

**MT:** Ostatnio zapowiedział Pan, że opowie o ostatecznym dowodzie na to, że światło to strumień cząstek. Czy dwa dowody nie wystarczą?

**TS:** Fizycy bardzo lubią, gdy ich hipoteza, w tym przypadku hipoteza istnienia fotonów, jest potwierdzana w wielu różnych eksperymentach i gdy wytłumaczenie jakiegoś zjawiska jest banalne przy niebanalnym założeniu. Tak było właśnie ze zjawiskiem fotoelektrycznym.

**MT:** Wystarczyło założyć, że istnieją fotony i już wszystko było jasne.

**TS:** Samo założenie, że to fotony wybijają elektrony z materiału, pozwoliło Einsteinowi nie tylko wytłumaczyć zjawisko, ale również zrozumieć, dlaczego charakter tego zjawiska jest tak mało intuicyjny. Pamięta zapewne Pani różne zależności (np. zależność energii elektronu od częstości promieniowania), które były całkowicie sprzeczne z intuicją zbudowaną na przekonaniu, że światło to fala. A przewrotna hipoteza o korpuskularnym



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 fotony grają w bilard, czyli ostateczny dowód na ich istnienie!

charakterze światła natychmiast sprawiała, że te zależności okazywały się oczywistą konsekwencją.

Dotychczas mówiliśmy o zjawiskach pochłaniania i emisji promieniowania. Tak było w przypadku promieniowania ciała czarnego (emisja) i zjawiska fotoelektrycznego (pochłanianie). Okazuje się jednak, że promieniowanie elektromagnetyczne nie tylko może brać udział w tych dwóch procesach, ale również może być rozpraszane. Mało kto zdaje sobie sprawę z tego, że to właśnie dzięki procesowi rozpraszania codziennie widzimy różne przedmioty.

**MT:** Nigdy w ten sposób o tym nie myślałam.

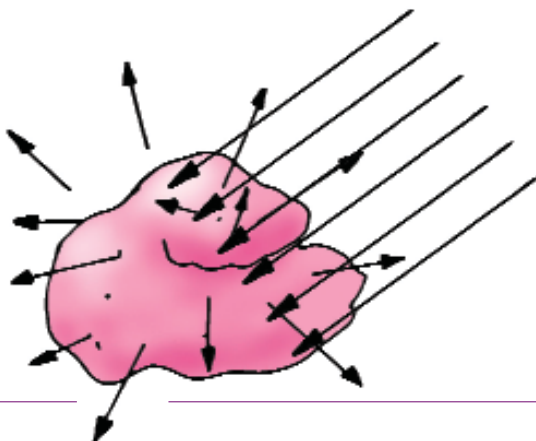
**TS:** Większość przedmiotów nie świeci, a jedynie odbija padające na nie promieniowanie. Promienie słoneczne padające na różne przedmioty są odbijane od ich powierzchni i docierają do naszych oczu. Dzięki temu, że powierzchnia tych przedmiotów nie jest idealnie gładka, promieniowanie odbijane jest właściwie we wszystkich kierunkach. To właśnie dlatego widzimy te przedmioty, niezależnie od tego, z której strony na nie patrzymy. Gdyby przedmioty miały idealnie gładką i płaską powierzchnię (np. powierzchnia lustra), promieniowanie odbijałoby się tylko w jednym kierunku i tylko z tego kierunku widzielibyśmy daną rzecz. Odbicie promieniowania od nierównej powierzchni nazywamy **ROZPRASZANIEM PROMIENIOWANIA**. Nazwa jest bardzo intuicyjna, bo promieniowanie padające z jednego kierunku jest rozproszone we wszystkie inne.

**MT:** To może przy okazji dowiem się, dlaczego widzimy różne kolory?

**TS:** Gdy już wiemy, że na powierzchni ciała dochodzi do rozproszenia promieniowania padającego,

to wytłumaczenie różnych kolorów jest dość proste. Padające promieniowanie, które pochodzi np. ze Słońca lub żarówki jest mieszaniną promieniowania o wszystkich możliwych kolorach. Mówiliśmy już o tym, gdy opowiadałem dlaczego ciała promieniają (MT 12/06). Powierzchnia ciała, oprócz tego, że może rozpraszać promieniowanie, może je również pochłaniać. Jeśli ciało jest akurat zbudowane tak, że pochłania jakiegoś promieniowania więcej niż innego, to światło rozproszone będzie mieszaniną światła o różnych kolorach, ale już w innych proporcjach. Po prostu jeśli jakieś ciało widzimy jako czerwone to dlatego, że jego powierzchnia pochłania inne kolory znacznie bardziej niż światło w tym kolorze.

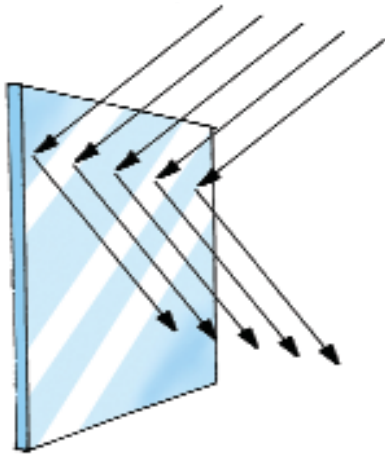
Dzięki temu, że rozpraszanie promieniowania na powierzchniach ciała jest tak powszechne w przyrodzie



# Mało kto zdaje sobie sprawę z tego, że to właśnie dzięki procesowi rozpraszania codziennie widzimy różne przedmioty.

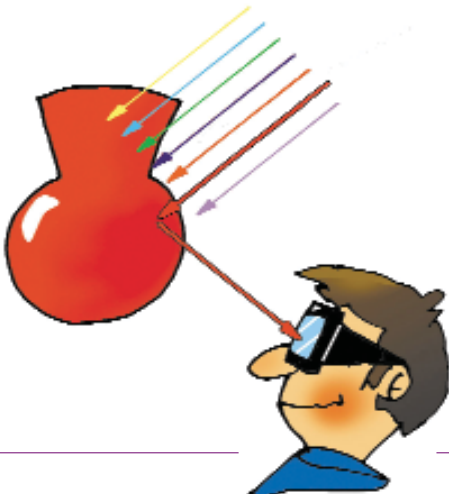
widzimy różne przedmioty, w różnych kolorach i w różnych odcieniach. To jak widzimy dane ciało zależy od tego jak zbudowana jest jego powierzchnia i jakie ma własności pochłaniania. Gdy tylko nastanie noc i wyłączymy wszystkie sztuczne światła nie jesteśmy w stanie zobaczyć żadnej rzeczy. To oczywiście skutek tego, że nie ma żadnego promieniowania, które mogłoby się rozproszyć na przedmiotach i dotrzeć do naszych oczu.

**MT:** I oczywiście zaraz Pan powie, że naszą codzienność można opisać prawami fizyki i jakimiś okropnymi równaniami.



**TS:** Oczywiście. Dzięki temu, że rozproszenie promieniowania jest tak bardzo powszechne, udało się bardzo dokładnie je zrozumieć i opisać. Jeśli przyjmiemy się, że światło jest falą elektromagnetyczną (a wiemy to z praw elektrodynamiki Maxwella omówionych w MT 03/06), wszystko jest bardzo proste i zgadza się z doświadczeniami.

Z praw Maxwella wynika jasno, że podczas odbicia od jakiejś powierzchni fala elektromagnetyczna może zmieniać wiele swoich własności. Podstawowa zmiana to oczywiście zmiana kierunku jej rozchodzenia. Okazuje się jednak, że zmiany mogą ulegać również inne jej parametry (np. tzw. polaryzacja). Nie jest to jednak teraz dla nas zbyt ważne. Ważne jest natomiast to, że NA PEWNO nie może się zmienić jej czę-



stość. Dla promieniowania widzialnego oznacza to, krótko mówiąc tyle, że podczas odbicia nie może się zmienić kolor światła. Jeśli na powierzchnię pada światło zielone, to po rozproszeniu (jeśli tylko do niego dojdzie) nadal będzie zielone. Oczywiście, na skutek pochłaniania promieniowania mogą się zmienić proporcje kolorów w mieszaninie światła. Natomiast dany kolor nie może zamienić się na inny.

**MT:** Rozumiem. A czy to zostało dokładnie potwierdzone w doświadczeniach?

**TS:** Tak. Odkąd ludzie zrozumieli, że światło to fala elektromagnetyczna, wykonali bardzo dużo eksperymentów z różnymi falami (widzialnymi, radiowymi, ultrafioletowymi, promieniami X) i potwierdzili teoretyczne prawa rozpraszania z fenomenalną dokładnością. Nie było żadnych wątpliwości, że rozpraszanie promieniowania elektromagnetycznego można wyjaśnić, zakładając, że jest ono falą.

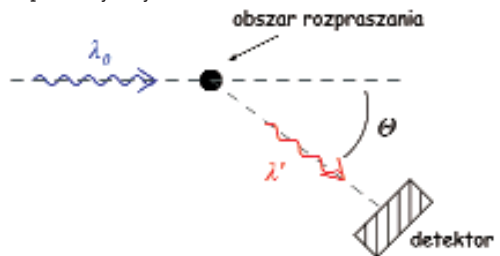
**MT:** Zapowiedział Pan, że poda ostateczny dowód na istnienie fotonów, a pokazał Pan, że promieniowanie jest falą. Coś Panu nie wyszło?

**TS:** To był tylko wstęp, który miał nam uświadomić, przed jakimi piekielnie trudnymi problemami stali fizycy na początku XX wieku. Mieli cały zbiór sprzecznych doświadczeń – z jednej strony wszystko wskazywało na to, że promieniowanie jest falą elektromagnetyczną, a z drugiej były doświadczenia, które dawały się wytłumaczyć jedynie przy założeniu, że światło to strumień fotonów. Jednym z koronnych argumentów falowej natury promieniowania było właśnie rozpraszanie. Jednak ten dowód nie utrzymał się zbyt długo – jedynie do roku 1923 za sprawą amerykańskiego fizyka Arthura Holly'ego Comptona!

**MT:** Co takiego wydarzyło się w roku 1923?

**TS:** Arthur Compton wykonywał bardzo dużo doświadczeń z promieniami X – bardzo wysokoenergetycznym promieniowaniem elektromagnetycznym odkrytym przez Roentgena. (Roentgen był pierwszym w historii laureatem Nagrody Nobla z fizyki właśnie dzięki temu odkryciu).

Pośród wielu doświadczeń Comptona było również takie, które pozwalało badać rozproszenie promieniowania na prawie swobodnych elektronach, w graficie. Compton wysyłał w kierunku płytki grafitowej promienie X i badał zależność natężenia promieniowania rozproszonego od kąta rozproszenia (w dalszej części będziemy oznaczali ów kąt grecką literą  $\Theta$ ). Schematyczny rysunek przebiegu doświadczenia pokazany jest na poniższym rysunku.



Compton spodziewał się, że niezależnie od kąta, pod jakim będzie badał rozproszenie, długość fali dochodzącego promieniowania  $\lambda'$  będzie dokładnie taka sama jak długość fali promieniowania padającego  $\lambda_0$ , wynika to bezpośrednio z praw Maxwella. Długość fali

i jej częstość są ze sobą jednoznacznie powiązane, o ile fala nie przechodzi do innego ośrodka. I rzeczywiście tak było – znaczna część promieniowania docierająca do detektora miała długość fali równą  $\lambda_0$ . To oznacza, że rzeczywiście działa założenie o falowej naturze promieniowania elektromagnetycznego.

Jednak gdy Compton dokładnie zbadał, jakie promieniowanie dociera do detektora, odkrył, że (oprócz tego spodziewanego) dociera również do niego fala elektromagnetyczna, której długość jest większa niż długość fali padającej. Zależność natężenia promieniowania od długości fali otrzymywanej w takim eksperymencie przedstawia poniższy wykres.



to zjawisko odkrył, ale również, choć wydawało to się

nienożliwe, wytłumaczył! W roku 1927 otrzymał za to Nagrodę Nobla za fizykę.

**MT: Minęły zaledwie cztery lata od wykonania doświadczenia do otrzymania Nobla. Bardzo szybko to wyjaśnili.**

**TS:** Compton był wielkim zwolennikiem hipotezy fotonowej, która miała już na swoim koncie dwa olbrzymie sukcesy (wytłumaczenie widma promieniowania ciała czarnego i zjawiska fotoelektrycznego). Był przekonany, że dzięki tej hipotezie uda się również wytłumaczyć jego eksperymenty.

**MT: Czyli znowu wystarczyło założenie, że promieniowanie to fotony, a nie fale?**

**TS:** Jeśli prawdą jest, że to właśnie fotony przenoszą promieniowanie elektromagnetyczne i w rozpraszaniu comptonowskim na pewno nie są pochłaniane, to właściwie wszystko staje się proste. Przeanalizujmy, jak przebiega to zjawisko w obrazie fotonowym. Przemieszczające się promieniowanie o długości fali  $\lambda_0$  to nic innego jak lecące z prędkością światła fotony. Zgodnie z hipotezą o istnieniu fotonów każdy z nich niesie pewną porcję energii  $E_0$  i porcję pędu  $p_0$ . Wielkości te są całkowicie zdeterminowane przez częstość promieniowania (lub inaczej mówiąc, jego długość) i wyrażają się wzorami:

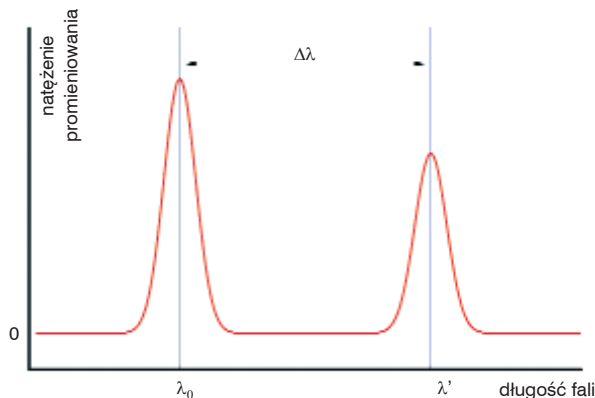
$$E_0 = \frac{hc}{\lambda_0}, \quad p_0 = \frac{h}{\lambda_0},$$

gdzie  $h$  to słynna stała Plancka, o której już wspominaliśmy.

W tym obrazie rozproszenie promieniowania na elektronach to nic innego jak zderzenie lecących fotonów ze spoczywającymi elektronami. Lecący foton uderza w elektron i przekazuje mu część swojego pędu i część swojej energii. Oczywiście odbywa się to dokładnie tak, aby były spełnione: zasada zachowania energii i zasada zachowania pędu. Skutkuje to oczywiście zmniejszeniem pędu i energii fotonu. A zmiana energii fotonu to nic innego jak zmiana na dłuższe długości fali promieniowania, które on przenosi. Stąd automatyczny wniosek, że promieniowanie rozproszone będzie miało większą długość.

**MT: No dobrze, ale dlaczego foton nagle leci w inną stronę? Nie mógłby dalej lecieć po prostej?**

**TS:** Proszę zauważyć, że dokładnie analogiczne zjawisko zachodzi na stole bilardowym. Tam również zdarza się tak, że rozpędzona bila uderza w inną, stojącą i po tym zderzeniu obie bile lecą w zupełnie różnych kierunkach. Wszystko zależy od tego, w które miejsce bili stojącej uderzy bila lecąca. W dużym, ale to bardzo dużym uproszczeniu można powiedzieć, że z podobnym zjawiskiem mamy do czynienia tutaj. To tak, jakby foton uderzał nie dokładnie w środek spoczywającego elektronu, ale troszkę z boku.



Wynika z niego jasno, że po rozproszeniu docierają do detektora dwie fale o różnych długościach.

**MT: Zdziwiająco, to tak, jakby fala się rozdziwiła na dwie różne!**

**TS:** Dokładnie tak to trzeba interpretować. Ale jakby tego było jeszcze mało, okazuje się, że długość tej dodatkowej fali elektromagnetycznej zależy od tego, pod jakim kątem się mierzy rozproszenie. Wraz ze wzrostem kąta rozproszenia  $\Theta$  różnica długości  $\Delta\lambda = \lambda_0 - \lambda'$  rośnie. Największe przesunięcie jest dla kąta równego  $180^\circ$ , tzn. gdy promieniowanie jest rozpraszane do tyłu!

Najbardziej zagadkowy i zdumiewający wniosek płynący z doświadczeń Comptona jest jednak taki, że przy ustalonym kącie rozproszenia przesunięcie długości nie zależy zupełnie od tego, jaka jest długość promieniowania padającego.

**MT: Czy to znaczy, że promieniowanie rozproszone do tyłu ma długość zawsze o tę samą wartość większą, niezależnie od tego, czy pada promieniowanie X, czy promieniowanie radiowe?**

**TS:** Hm. To bardzo znaczące uogólnienie, bo eksperyment na początku był wykonany dla różnych długości promieniowania X. Jednak jeśli udałoby się zrobić taki eksperyment dla promieniowania radiowego, to rzeczywiście tak by było. Przesunięcie długości byłoby dokładnie takie samo dla promieniowania radiowego, jak dla promieniowania rentgenowskiego.

Zjawisko polegające na przesunięciu ku fałom dłuższym promieniowania rozproszonego nazywamy ZJAWISKIEM COMPTONA. Compton bowiem nie tylko

# Energia i pęd fotonu są odwrotnie proporcjonalne do długości fali promieniowania, jakie przenoszą.

## Dla dociekliwych

Compton był pierwszym, który dokładnie wszystko przeliczył. Jeśli się uwzględní fakt, że:

1. w zderzeniu bierze udział zawsze jeden rozpedzony foton i jeden spoczywający elektron,
  2. spełnione są podczas zderzenia zasady zachowania pędu i energii,
  3. energia i pęd fotonu są odwrotnie proporcjonalne do długości fali promieniowania, jakie przenoszą,
- to można wyprowadzić wzór, który wiąże ze sobą zmianę długości fali promieniowania podczas rozproszenia  $\Delta\lambda$  z kątem rozproszenia  $\Theta$ . Wzór ten ma postać (jego wyprowadzenie można znaleźć w każdym podręczniku, w którym opisane jest zjawisko Comptona):

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \Theta)$$

gdzie  $m_e$  jest masą elektronu. Ze wzoru widać jasno, że zmiana długości fali zupełnie nie zależy od długości fali promieniowania padającego i zmienia się wraz z kątem rozpraszania, przy czym największe przesunięcie jest dla kąta półpełnego ( $180^\circ$ ) i wtedy wynosi

$$\Delta\lambda_{\max} = \frac{2h}{m_e c} = 0,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

Jak widać, przesunięcie to jest uniwersalne i zależy tylko od masy cząstki, na której zachodzi rozpraszanie (w tym przypadku masy elektronu).

Podkreślmy zatem jeszcze raz! Dzięki założeniu, że promieniowanie elektromagnetyczne przenoszone jest porcjami w postaci fotonów, udało nam się wyjaśnić, dlaczego następuje zmiana długości fali podczas takiego rozpraszania, dlaczego ta zmiana nie zależy od długości fali promieniowania padającego i dlaczego ta zmiana zmienia się wraz z kątem rozproszenia.

Od razu widać też, dlaczego najłatwiej było zaobserwować to zjawisko dla promieniowania X. Po prostu jego długość fali jest porównywalna z przesunięciem długości  $\Delta\lambda_{\max}$ , jakie następuje podczas takiego rozpraszania. Dla promieniowania radiowego, którego długość mierzy się w metrach lub nawet kilometrach, przesunięcie comptonowskie nie byłoby w praktyce możliwe do zaobserwowania.

**MT: No dobrze, ale jest tu pewna nieścisłość. Jednak pewna część promieniowania jedynie się rozprasza i nie zmienia się jego długość fali. A to, jak sam Pan powiedział, można wytłumaczyć tylko przy założeniu, że promieniowanie to fala elektromagnetyczna.**

**TS: Rzeczywiście wygląda to troszkę niepokojąco. Bo część zjawiska tłumaczymy założeniem, że światło to fala, a inną część, że światło to strumień fotonów. Okazuje się jednak, że również rozpraszanie bez zmiany długości fali można wytłumaczyć hipotezą o istnieniu fotonów. Dotychczas zakładaliśmy, że fotony zderzają się ze swobodnymi elektronami. Jednak w płycie grafitowej oprócz swobodnych elektronów są również takie, które są uwięzione w atomach węgla, tworzących grafit. Prawdę mówiąc, to tych jest znacznie więcej niż swobodnych. Z nimi również mogą zderzać się nadlatujące fotony. Tylko wtedy elektrony (ze względu na uwięzienie w atomie) zachowują się tak, jakby były zanurzone w bardzo lepkim ośrodku. Dla padającego fotonu mają one jakby znacznie większą masę – są bardziej bezwładne.**

## MT: I co z tego? Elektron to elektron!

**TS: Uwięziony elektron to nie to samo co swobodny elektron. Swobodny ma masę, taką jaka jest prawdziwa masa elektronu. Elektron uwięziony ma „efektywnie” masę znacznie większą. Gdy teraz popatrzymy na wzór wyrażający przesunięcie długości fali**



promieniowania wskutek rozpraszania Comptona, to widzimy, że to przesunięcie jest odwrotnie proporcjonalne do masy elektronu. To znaczy, że im masa elektronu większa, tym przesunięcie mniejsze. Dla „bardzo masywnego” elektronu przesunięcie jest znikome i w doświadczeniu jest niezauważalne. Nam wydaje się, że w ogóle go nie ma. Właśnie dlatego promieniowanie rozproszone składa się z promieniowania o dwóch długościach fali. Jedno bierze się z rozpraszania na swobodnych elektronach (znaczące przesunięcie długości fali), a drugie na elektronach uwięzionych w atomach (brak przesunięcia długości).

**MT: Zatem jednak wszystko można wyjaśnić hipotezą o istnieniu fotonów. To może jednak światło to tylko strumień fotonów, a nie fala elektromagnetyczna? Po co w ogóle mówić o fali, skoro wszystko można wyjaśnić istnieniem fotonów?**

**TS: Nie tak szybko! Najpierw nie chciała mi Pani uwierzyć, że światło to strumień fotonów, a teraz nie chce Pani uwierzyć, że światło to fala. W takim razie za miesiąc opowiemy sobie, jakie są dowody na to, że światło na pewno jest falą elektromagnetyczną!**

**MT: No nie! Pan zawsze jak mnie do czegoś przekona, to później mówi, że to nie do końca prawda.**

**TS: Cóż. Taki już jest zawód fizyka. Szukać dziury w całym i próbować to wszystko zrozumieć. ●**

