

**MT: Panie Tomku! Obiecał mi Pan ostatnio kolejne dowody na to, że „fale światła to cząstki”. Jak coś może być cząstką, jeśli jest falą?**

**TS:** Tak, to rzeczywiście jest trochę dziwne. Muszę powiedzieć, że choć dziś fizycy już się do tego przyzwyczaili i uważają ten fakt za coś normalnego, to jeszcze 100 lat temu było to trudne do zaakceptowania. Przekonały ich, jak zawsze zresztą, eksperymenty. A te nie pozostawiały żadnych wątpliwości, że światło, choć jest falą, to jest również cząstką. Tym razem opowiemy sobie o innym wyniku eksperymentu, który zupełnie nie zapowiadał się ciekawie.

Wszystko zaczyna się bardzo niewinnie jeszcze w XIX wieku. A to za sprawą dobrze nam znanego Heinricha Herta, który potwierdził istnienie fal elektromagnetycznych. Zresztą jest to zadziwiający chichot historii, że to właśnie jemu przypadło najpierw eksperymentalne potwierdzenie falowej teorii Maxwella, a następnie wykonanie eksperymentu, który okazał się

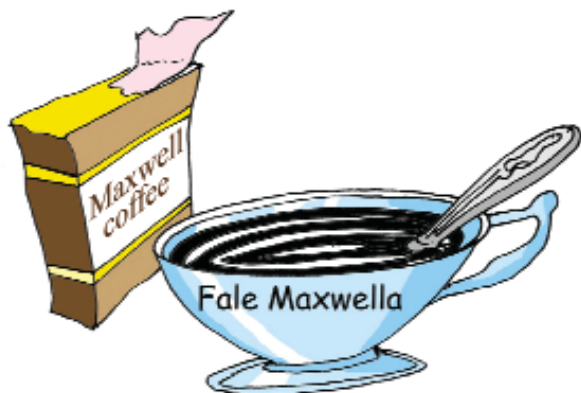


O fizyce opowiada Tomasz Sowiński.

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 oświetlanie ciał pchnęło fizykę do przodu?



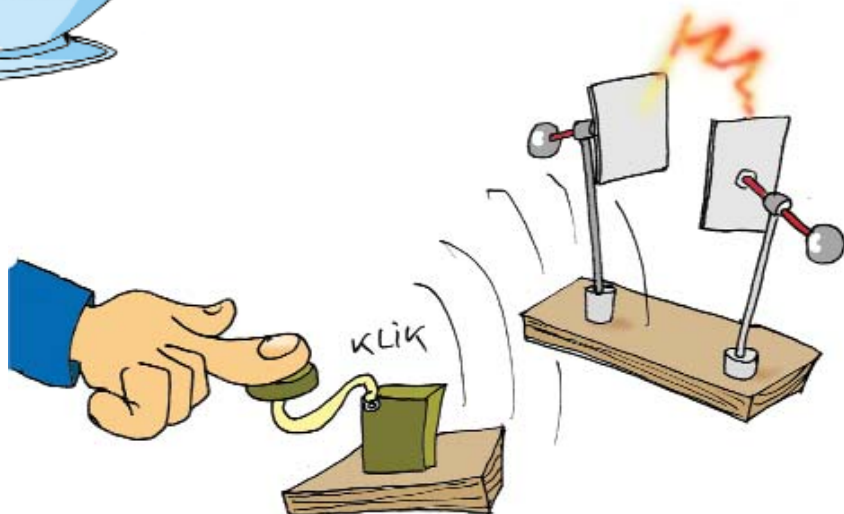
przyczyną stwierdzenia, że fale elektromagnetyczne nie są falami, lecz zbiorem cząstek.

Jak to często bywa z takimi eksperymentami, wszystko stało się przypadkiem. Hertz był tak zafascynowany tym, że istnieją fale elektromagnetyczne, że zbudował sobie podręczne urządzenie do ich rejestrowania, tzw. iskrownik Herta. Było to bardzo wyrafinowane

urządzenie i składało się z dwóch części: odbiornika i iskrownika. Działo ono w ten sposób, że ilekroć na odbiornik padała fala elektromagnetyczna, tylekroć pomiędzy dwoma specjalnie przygotowanymi płytkami iskrownika następowało wyładowanie elektryczne – przeskok iskry. Dzięki temu obserwując iskrę, było można stwierdzić, czy na odbiornik pada fala elektromagnetyczna, czy nie.

**MT: Bardzo ciekawe urządzenie. A dlaczego ono tak działa?**

**TS:** Odbiornik to nic innego jak antena dla fal elektromagnetycznych. Pomędzy jej końcami poja-



wia się zmienne napięcie, ilekroć pada na nią fala elektromagnetyczna. To zmienne napięcie jest w wyrafinowany sposób wykorzystane do naładowania płytek iskrownika i ostatecznie prowadzi do przeskoku iskry pomiędzy nimi. Reasumując: przeskoczenie iskry w iskrowniku jest dowodem na to, że na odbiornik padała fala elektromagnetyczna.

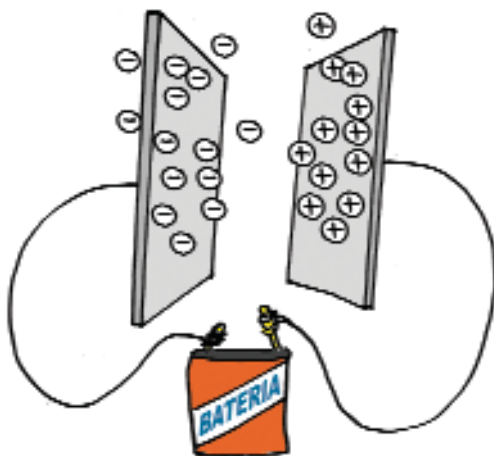
Niestety problem polega na tym, że przy bardzo słabej padającej fali iskra będzie ledwo zauważalna. Właśnie próba rozwiązania tego technicznego problemu doprowadziła Hertza do fenomenalnego odkrycia. Hertz po prostu postanowił zamknąć iskrownik w ciemnym pudełku.

**MT: No tak, w sali kinowej też lepiej widać film, gdy wszystkie światła są pogaszone.**

**TS:** Tak się wydaje na pierwszy rzut oka. Ale gdy Hertz zamknął iskrownik w pudełku, okazało się, że iskry, zamiast być lepiej widoczne, są jeszcze słabsze.

**MT: Niemożliwe!**

**TS:** Dziwne prawda? Ta naukowa zagadka została szybko przez Hertza rozwiązana. Doszedł on do wniosku, że wyładowanie pomiędzy płytkami zachodzi łatwiej (tzn. przeskoczenie iskry jest bardziej wyraziste), gdy nie tylko na odbiornik, ale też na iskrownik pada fala elektromagnetyczna. Nic więc dziwnego, że po osłonięciu iskrownika iskry były słabsze. Po prostu jego płytki były osłonięte od dodatkowego promieniowania,



później Joseph John Thomson zainspirowany pracami Maxwella i swoimi eksperymentami wysunął hipotezę, że istnieją elektrony – nośniki ładunku elektrycznego. Dopiero wtedy można było w końcu dokładnie zbadać nie tylko jakościowo, ale również ilościowo, jak przebiega zjawisko fotoelektryczne. Jako pierwszy takie kompleksowe badania nad tym zjawiskiem przeprowadził Philipp von Lenard na początku XX wieku. Wyniki jego eksperymentów były zdumiewające.

Warto dodać, że ze zjawiskiem fotoelektrycznym związane są aż trzy Nagrody Nobla z fizyki (patrz notka na końcu). Niestety nie załapał się na nią Hertz, bo zmarł, mając zaledwie 37 lat. Moim skromnym zdaniem gdyby za życia Hertza przyznawano te nagrody, to bez wątpienia jedna przypadłaby również jemu.

które wcześniej na nie padało. Hertz zatem wykazał, że zdolność naładowanych płytek do wyładowania zmienia się, gdy na te płytki poświeci się światłem lub inną falą elektromagnetyczną. Zjawisko to nazywamy dziś **EFEKTEM FOTOELEKTRYCZNYM**.

**MT: Na czym dokładnie polega ten efekt?**

**TS:** Wyobraźmy sobie dwie płytki kondensatora. Po przyłożeniu do nich stałego napięcia (np. z baterijki) na jednej z nich zacznie natychmiast gromadzić się ładunek elektryczny. Jeśli tylko przyłożone napięcie będzie odpowiednio duże, to po chwili nastąpi wyładowanie elektryczne – ładunki zostaną „wyrwane” z naładowanej płytki i spontanicznie przeleczą na drugą, która jest naładowana przeciwnie. Efekt fotoelektryczny polega na tym, że jeśli poświecimy promieniowaniem elektromagnetycznym na płytkę z ładunkami, to wyładowanie będzie następowało łatwiej, niż gdy świecić nie będziemy.

**MT: Czyżby elektrony lubiły się opalać?**

**TS:** No można tak powiedzieć. Elektrony po prostu mają zdolność do pochłaniania promieniowania elektromagnetycznego. Ilekroć zatem będziemy świecić promieniowaniem na płytkę, tylekroć będzie ona przekazywana ładunkom, które się na niej gromadzą. Dzięki temu będą one mogły się łatwiej uwolnić. Warto jednak podkreślić, że gdy Hertz robił swoje eksperymenty, nie było nawet jeszcze wiadomo, że przeskoczenie iskry to po prostu ruch ładunków elektrycznych. Dopiero 12 lat

**MT: A co było takiego zdumiewającego?**

**TS:** Nie będę tutaj wchodził w szczegóły techniczne, bo mogłyby one tylko zaciemnić cały obraz. Powiem raczej o rezultatach. Jak Pani myśli, co się powinno dzieć z ładunkami na płytce, jak będziemy zwiększać natężenie padającego promieniowania?

**MT: No tak na zdrowy rozsądek, to, że zwiększamy natężenie promieniowania, znaczy, że dostarczamy większej energii. Zatem ładunki powinny opuszczać płytkę z większą prędkością.**

**TS:** Krótko mówiąc, sugeruje Pani, że jeśli zwiększymy natężenie promieniowania padającego, to zwiększy się również maksymalna energia kinetyczna, jaką otrzymują elektrony po wybiciu.

**MT: To strasznie naukowo powiedziane, ale o to mi chodziło.**

**TS:** Zgadzam się. Wg mnie też tak powinno być. A co powinno się stać, jeśli będziemy zmieniać częstotliwość padającego promieniowania?

**MT: Hm... co może się dzieć? Wiadomo, że energia promieniowania zależy od jego natężenia. Więc nie powinno być chyba żadnych różnic? Ważne, żeby natężenie światła było odpowiednio duże.**

**TS:** Brawo! Jeśli natężenie promieniowania jest na tyle duże, aby dostarczana energia była większa niż ta, która jest potrzebna na wyrwanie elektronu z płytki, to częstotliwość promieniowania nie powinna mieć żadnego znaczenia. Jeśli natomiast natężenie będzie bardzo śl-

be, to będzie trzeba po prostu odczekać troszkę czasu, zanim zmagazynuje się odpowiednia ilość energii i wyrwanie elektronu nastąpi z lekkim opóźnieniem.

**MT: No jasne. Gdy za wolno dopływa energia, to po prostu trzeba poczekać, aż się zmagazynuje.**

**TS:** Świetnie! Zatem spodziewamy się trzech efektów:

1. zwiększenie natężenia promieniowania zwiększa energię kinetyczną uwolnionych elektronów,
2. zmiana częstości promieniowania nie ma właściwie żadnego wpływu na przebieg zjawiska,
3. jeśli natężenie promieniowania jest bardzo małe, to będzie opóźnienie w czasie pomiędzy oświetleniem płytki a wyemitowaniem ładunków elektrycznych.

Warto dodać, że taki właśnie przebieg tego zjawiska nie tylko wynika z naszej intuicji, ale po prostu z praw Maxwella. Jeśli promieniowanie elektromagnetyczne jest falą, to tak właśnie powinno przebiegać zjawisko fotoelektryczne.

Problem w tym, że doświadczenia von Lenarda nie potwierdziły żadnego z trzech powyższych punktów.

**MT: Co? Nie... To ten eksperyment był jakoś źle zrobiony. To niemożliwe!**

**TS:** No niestety. A może raczej na szczęście. Eksperyment był wielokrotnie powtarzany przez różne osoby i zawsze wynik był taki sam. Wnioski płynące z falowej natury promieniowania źle opisują efekt fotoelektryczny.

**MT: Całkowicie źle, naprawdę? Może tylko jakiś szczegół jest inny?**

**TS:** Po pierwsze, z doświadczenia wynika jasno, że zwiększenie natężenia promieniowania zupełnie nie zmienia maksymalnej energii kinetycznej ładunków elektrycznych. Zwiększa się natomiast ich liczba. Tzn. czym większe natężenie, tym więcej ładunków jest wybijanych.

Po drugie, nie widać żadnego opóźnienia w czasie, gdy natężenie promieniowania jest bardzo małe. Dla czasowego przebiegu zjawiska nie ma żadnego znaczenia, czy pada silna wiązka promieniowania, czy słaba.

**MT: Ha... szkoda. A tak ładnie nam się wszystko zgadzało. A jak jest z częstością promieniowania?**

**TS:** Tutaj jest absolutna BOMBA. Tego się nikt nie spodziewał. Okazuje się, że jak zwiększa się częstość padającego promieniowania, to rośnie maksymal-

na energia kinetyczna wybijanych ładunków. A gdyby tego było jeszcze mało, to istnieje pewna częstość promieniowania, poniżej której zjawisko fotoelektryczne nie zachodzi. W dodatku ta graniczna częstość nie zależy od natężenia promieniowania. Jest ona jakby ustalona dla danego materiału, z którego zrobiona jest płytka kondensatora. Dla różnych materiałów jest różna, ale nie zależy od niczego innego.

**MT: No nie. To jakiś zupełny nonsens.**

**TS:** Tak. Tak to właśnie wyglądało po przeprowadzeniu eksperymentu. Wszystko wskazuje na to, że koncepcja falowej natury promieniowania elektromagnetycznego nie może być zastosowana w tym przypadku. Albo zupełnie czegoś nie rozumiemy.

**MT: To jest bardzo dziwne. Przecież wiemy, że światło jest falą! Zresztą jako fala zostało przewidziane i odkryte. A teraz mi Pan mówi, że to nie jest prawda?**

**TS:** Światło ewidentnie jest falą. Zachodzą przecież różne zjawiska, jak np. interferencja czy dyfrakcja światła, które można wytłumaczyć tylko przy założeniu, że światło jest falą elektromagnetyczną. Jednak w przypadku zjawiska fotoelektrycznego takie założenie prowadzi na manowce.

**MT: Jak zatem można wytłumaczyć tak dziwne wyniki eksperymentów?**

**TS:** Rzeczywiście na pierwszy rzut oka wydaje się, że sprawa jest całkowicie beznadziejna. Jednak przypomnijmy sobie (MT 12/06), że już w roku 1900 Max Planck prostym zabiegiem wyjaśnił inne zjawisko, które też było sprzeczne z falową naturą światła.

**MT: Tak, chodziło o promieniowanie ciała doskonale czarnego.**



## promieniowanie ciała doskonale czarnego

**TS:** Przypomnijmy. Jeśli założy się, że promieniowanie nie jest wysyłane w sposób ciągły, ale w postaci paczek, których energia jest proporcjonalna do częstości promieniowania, to wszystko będzie się zgadzało. Wtedy przewidywany rozkład natężenia promieniowania będzie taki, jaki mierzymy w eksperymentach. W czasach Plancka ten zabieg był uważany za czystą sztuczkę techniczną, która z niewiadomych przyczyn dobrze działa. Jednak był ktoś, kto miał inne zdanie na ten temat. Ktoś bardzo już wtedy znany ze swych kontrowersyjnych poglądów. Jakiś kandydat?



**MT:** Największe kontrowersje budziła wtedy teoria względności. Czas jest względny, długość jest względna, paradoks bliźniąt. O tym wszystkim mówiliśmy. Czy może zatem chodzi o Alberta Einsteina?

**TS:** Bravo! Tylko Einstein był zdolny wstrząsnąć znów całym światem fizyki ze swoją nową hipotezą, która doskonale przewidywała wyniki eksperymentów nad efektem fotoelektrycznym.

**MT:** Zamieniam się zatem w słuch...

**TS:** Einstein zauważył, że jeśli przyjmie się hipotezę Plancka, że promieniowanie elektromagnetyczne przenoszone jest za pomocą „paczek energii” (dziś nazywamy te paczki **FOTONAMI**), to zjawisko fotoelektryczne bardzo prosto można wytłumaczyć. Energia  $E$  takiej paczki jest proporcjonalna do częstości promieniowania  $\nu$ , czyli dana jest wzorem

$$E = h\nu,$$

gdzie  $h$  jest stałą proporcjonalności, dziś nazywaną stałą Plancka. Foton, padając na płytkę kondensatora, oddziałuje z pojedynczym elektronem, przekazując mu swoją energię. Część tej energii jest tracona na wydosłanie się elektronu z płytki. Elektron bowiem jest trzymany na płytce za pomocą różnych sił wewnętrznych, które zależą od tego, z jakiego materiału jest ona zrobiona.

Praca  $W$ , która musi być wykonana, aby wyrwać elektron z płytki, nazywana jest **pracą wyjścia** i oczywiście zależy tylko od materiału, z którego jest zrobiona płytka. Po wyrwaniu elektronu reszta energii zamienia się po prostu w energię kinetyczną elektronu  $E_K$ . Mamy zatem związek

$$W + E_K = h\nu$$

Praca wyjścia + energia kinetyczna elektronu = energia fotonu.

**MT:** No dobrze, ale co z tego wynika?

**TS:** No jak to? Widzimy, po pierwsze, że energia kinetyczna uwolnionego elektronu zależy od częstości promieniowania. Im ona jest większa, tym większa jest ta energia. Po drugie, widzimy, że jeśli częstość jest za mała, to energia fotonu nie jest wystarczająca, aby wykonać pracę wyjścia i tym samym elektron nie zostanie wyrwany. To znaczy, że istnieje pewna częstość graniczna  $\nu_0$ , poniżej której zjawisko nie będzie zachodziło. Częstość ta dana jest wzorem

$$\nu_0 = \frac{W}{h}.$$

Dodatkowo widzimy, że zwiększenie natężenia promieniowania nie ma żadnego wpływu na energię elektronu, bo ta zależy tylko od energii pojedynczego fotonu. Zwiększenie natężenia powoduje jedynie, że zwiększa się liczba fotonów, które padają na płytkę. Tym samym więcej elektronów może zostać wybitych.

Nie ma też mowy o żadnym opóźnieniu czasowym zjawiska dla małych natężeń. Niezależnie bowiem od natężenia promieniowania fotony zawsze poruszają się z taką samą prędkością (prędkością światła) i zawsze niosą taką samą energię – ona zależy tylko od częstości.

**MT:** Niesamowite. Takie minimalne założenie i już wszystko jest wytłumaczone. To nie może być przypadek.

**TS:** Też tak myślę. Fizycy uwielbiają, gdy skom-



plikowane i nieintuicyjne rzeczy daje się wytłumaczyć bardzo prosto. Tutaj mamy do czynienia właśnie z takim przypadkiem. Proste założenie – światło to strumień cząstek – pozwoliło wytłumaczyć zjawisko, które przebiegało inaczej, niż mówiła dotychczasowa teoria. Był to kolejny triumf korpuskularnej teorii promieniowania. Wytłumaczono kolejne zjawisko tym prostym zabiegiem.

**MT:** Zatem wszystko wskazuje na to, że jednak światło jest strumieniem cząstek.

**TS:** Tak, są takie doświadczenia, które można wytłumaczyć tylko w ten sposób. Ale to jeszcze nie koniec. Kiedy fizycy zaczęli coraz bardziej przekonywać się do tego, że światło jest cząstką, pojawiło się kolejne fenomenalne zjawisko. Było ono ostatecznym triumfem korpuskularnej teorii promieniowania i przekonało resztki sceptyków. Opowiemy sobie o nim już następnym razem... Serdecznie zapraszam! ●

## NOTKA HISTORYCZNA

Sir Joseph John Thomson – fizyk angielski, który odkrył elektron i prowadził intensywne prace nad przewodnictwem prądu przez gazy. Otrzymał za to Nagrodę Nobla z fizyki w 1906 roku.



Philipp Eduard Anton von Lenard – fizyk austrowęgierski, który prowadził

badania nad promieniowaniem katodowym i zbadał wiele jego własności. Otrzymał za to Nagrodę Nobla z fizyki w 1905 roku.



Albert Einstein – jeden z najwybitniejszych fizyków wszech czasów. Znany głównie ze swojej teorii względności. Przyczynił się do rozwoju właściwie wszystkich dziedzin współczesnej mu fizyki. W roku 1905 wytłumaczył efekt fotoelektryczny, korzystając z hipotezy Plancka. Otrzymał za to Nagrodę Nobla z fizyki w 1921 roku.

