

Zbudowanie lasera było niewątpliwie jednym z przełomowych momentów w rozwoju naszej cywilizacji. Był to przełom, bo naukowcy udowodnili, że są w stanie wykorzystać do celów praktycznych zjawiska, których nawet sama przyroda w sposób naturalny nie wykorzystuje. Poza Ziemią chyba nigdzie we Wszechświecie nie ma miejsca, w którym istnieje światło laserowe. No może poza tymi obszarami, gdzie wytwarzają je podobnie jak my inne, wysoko rozwinięte cywilizacje. Spróbujmy zatem odpowiedzieć na dwa naturalnie pojawiające się pytania: co to jest światło laserowe? oraz jak działa laser?



Tomasz Sowiński jest asystentem w Centrum Fizyki Teoretycznej PAN. W 2005 roku skończył z wyróżnieniem studia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego w zakresie fizyki teoretycznej, a trzy lata później uzyskał tam stopień naukowy doktora. Od lat zajmuje się popularyzacją nauk przyrodniczych. W roku 2008 otrzymał tytuł Mistrza Popularyzacji Nauki „Złoty Umysł” w konkursie Prezesa Polskiej Akademii Nauk.

(ok. 450–750 THz). Inaczej mówiąc, światło to rozchodzące się w przestrzeni z niesamowitą prędkością zaburzenie pola elektromagnetycznego – drgające poprzecznie do kierunku propagacji i wzajemnie prostopadle pole elektryczne i magnetyczne. Nasze oczy rejestrują różne częstotliwości światła w różny sposób i tym samym w naszym mózgu powstaje wrażenie koloru.

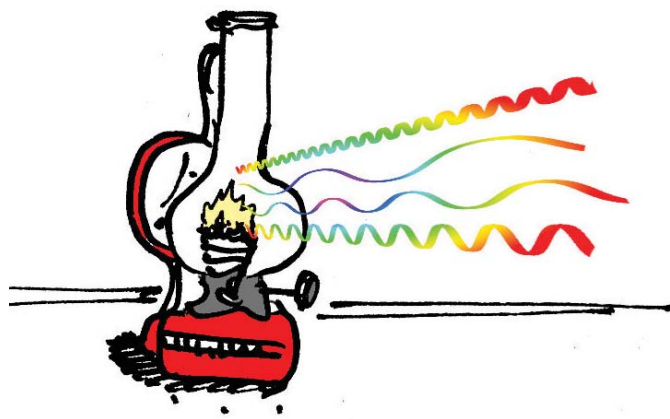
W życiu codziennym mamy do czynienia głównie ze światłem, które jest mieszaniną fal elektromagnetycznych o różnych częstotliwościach (kolorach), rozchodzących się w różnych kierunkach. Takie jest światło dochodzące do nas ze Słońca czy od standardowej żarówki. Takie jest również światło emitowane przez każde ciało, które ma niezerową temperaturę (MT 12/2006). Oczywiście różne kolory występują w tej mieszaninie w różnych

Tajemnice lasera cz. 1

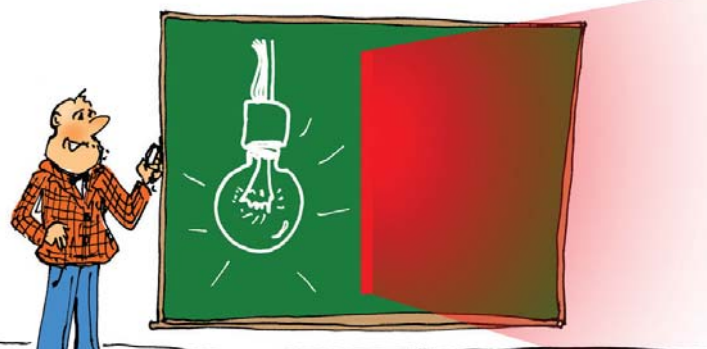
Tomasz Sowiński

LASER TO NIE ŻARÓWKA!

Nie jest żadną tajemnicą (MT 03/2007), że każde światło jest falą elektromagnetyczną. Jak każda fala ma ona swoją częstotliwość, która w tym przypadku jest z zakresu, na które wyczulone jest ludzkie oko



Każde światło jest falą elektromagnetyczną



Światło monochromatyczne można jednak bardzo łatwo wytworzyć

proporcjach, ale praktycznie nie zdarza się, aby było to światło monochromatyczne, czyli światło składające się z fal o tylko jednej, konkretnej częstotliwości. Światło monochromatyczne można jednak bardzo łatwo wytworzyć, przepuszczając światło kolorowe np. przez pryzmat lub siatkę dyfrakcyjną (odbicie od płyty CD). Pojawiająca się w takiej sytuacji tęcza to nic in-



W życiu codziennym mamy do czynienia głównie ze światłem, które jest mieszaniną fal elektromagnetycznych o różnych częstotliwościach

nego jak rozbieżna wiązka promieni, w której w danym kierunku rozchodzi się fala o ściśle określonej częstotliwości. Światło monochromatyczne powstaje również w świetłówkach, gdzie na skutek wyładowań elektrycznych w gazie powstaje światło o ściśle określonej częstotliwości. Światło monochromatyczne nie jest zatem całkowicie naturalne, ale bardzo łatwo je wytworzyć.

Częstotliwość fali nie jest jednak jedyną własnością rozchodzącego się światła. Równie istotny jest kierunek rozchodzenia. Zazwyczaj wyobrażamy sobie, że światło rozchodzi się po promieniach i jest to całkiem słuszne wyobrażenie. Niemniej jednak prawdziwe światło, nawet to z doskonałego reflektora, jest bardzo rozbieżne. To sprawia, że wraz ze wzrostem odległości od źródła jego natężenie maleje. Łatwo się przekonać, że maleje proporcjonalnie do kwadratu odległości od źródła, tzn. jeśli odległość zwiększymy dwukrotnie, to natężenie światła zmniejszy się czterokrotnie. Rozbieżność światła nie jest zbyt mocno związana z częstotliwością, a raczej z jego źródłem. Nawet światło monochromatyczne (uzyskane tak jak to przed chwilą omówiliśmy) jest rozbieżne. Praktycznie każde światło, które spotykamy w codziennym życiu, jest rozbieżne i zazwyczaj jest to własność sprzyjająca. Bo właśnie dzięki temu widzimy różne przedmioty z różnych kierunków. Gdyby światło odbite od przedmiotów było ukierunkowane, to moglibyśmy te przedmioty oglądać, tylko stając na drodze tego światła. Łatwo jednak można sobie wyobrazić (przynajmniej teoretycznie) światło ukierunkowane – takie, które rozchodzi się w konkretnym kierunku. Takie światło miałoby oczywiście tę przewagę nad tym rozbieżnym, że jego natężenie nie

malełoby z odległością i tym samym mogłoby docierać bardzo, bardzo daleko w niezmienionej formie. Wytworzenie takiego światła wcale nie jest jednak proste.

Ostatnia własność światła, nad którą chciałbym się na chwilę zatrzymać, to tzw. koherencja. Jest to pojęcie dość trudne i dlatego, aby je wyjaśnić, wrócmy na chwilę do światła monochromatycznego. Wyobraźmy sobie, że udało nam się jakimś cudem wytworzyć światło monochromatyczne i ukierunkowane. Jest to zatem taki jednokolorowy promień świetlny. Takie światło można sobie wyobrazić jako mieszaninę różnych fal o TEJ SAMEJ częstotliwości i rozchodzącej się w TYM SAMYM kierunku. Wciąż jednak jest w takim świetle miejsce na pewien chaos. Różne fale składające się na taki promień rozchodzą się zupełnie niezależnie od siebie, fizycy mówią, że nie są w fazie.

Posłużmy się tutaj pewnym przykładem, aby lepiej zobrazować to pojęcie. Wyobraźmy sobie wielką trybunę piłkarską, na której kibice chcą zrobić falę meksykańską. Załóżmy, że wszyscy kibice umówili się, że będą wstawali i siadali dokładnie z tą samą częstotliwością, np. wstawali dokładnie na dwie sekundy i następnie na dwie sekundy siadali. Dodatkowo umówili się, że będą wstawać dokładnie pół sekundy po tym, jak wstanie siedzący z prawej strony kolega. Pierwszy kibic, czyli ten, który nie ma innego kibica z prawej strony, jest natomiast generatorem fali. Za pierwszym razem wstaje on, kiedy chce, ale jak już wstanie, to działa wg schematu: dwie sekundy stania, dwie sekundy siedzenia. Łatwo sobie wyobrazić, że w ten sposób w każdym rzędzie, w lewą stronę będzie

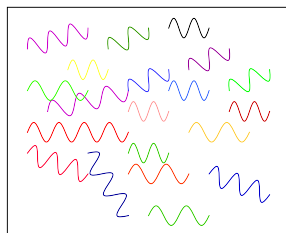


Fala ukierunkowana i koherentna.

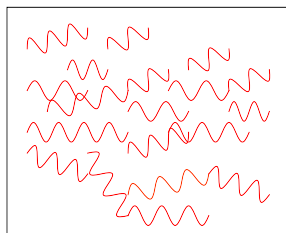
rozchodziła się fala. Fale te w różnych rzędach będą się oczywiście rozchodziły całkowicie niezależnie od siebie, ale wszystkie razem będą tworzyły ukierunkowaną falę monochromatyczną. Za sprawą całkowicie niezależnych od siebie generatorów fali w każdym rzędzie nie będzie to fala koherentna. Można się o tym przekonać dość prosto. W danej chwili kibice, którzy siedzą w różnych rzędach, ale w tej samej odległości od swoich generatorów, będą w różnej fazie swojego działania. Jedni będą stali, inni siedzieli, a jeszcze inni właśnie będą siadać lub wstawać. Gdyby natomiast kibice generujący fale w swoich rzędach umówili się wcześniej i wystartowali dokładnie w tym samym momencie, sytuacja byłaby zupełnie inna. Fale w każdym z rzędów byłyby identyczne nie tylko co do swojej częstotliwości, ale również fazy. Po stadionie rozchodziłaby się piękna meksykańska fala. Byłaby to fala monochromatyczna, ukierunkowana i koherentna.

Takie jest właśnie światło laserowe: monochromatyczne (jeden kolor, jedna częstotliwość), ukierunkowane (rozchodzi się niemal idealnie w jednym kierunku, nie tracąc dzięki temu swojego natężenia) i ko-

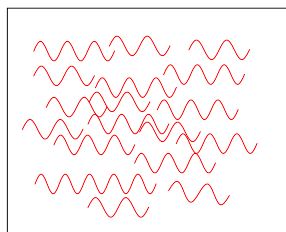
herentne (wszystkie składające się na nią fale elektromagnetyczne drgają w fazie). Światło spotykane w codziennym życiu nie ma natomiast żadnej z tych własności.



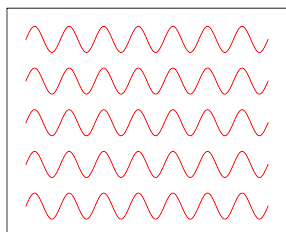
Światło białe



Światło monochromatyczne



Światło monochromatyczne i ukierunkowane



Światło laserowe (monochromatyczne, ukierunkowane i koherentne)

INNY PUNKT WIDZENIA

Przedstawiony przed chwilą opis światła laserowego był oparty na falowej naturze światła. Dobrze jednak wiemy, że światło można również w sposób komplementarny opisywać jako strumień fotonów (MT 04/2007). Oba opisy są równie dobre, choć mają zastosowanie w różnych realizacjach doświadczalnych. Nie ulega jednak wątpliwości, że światło laserowe powinno dać się również opisać z tego, ziarnistego punktu widzenia. Jakie cechy powinny mieć fotony, aby wszystkie razem składały się na światło laserowe? Częściowa odpowiedź na to pytanie jest bardzo prosta.

Fotony składające się na światło laserowe powinny na pewno poruszać się w tym samym kierunku – kierunku rozchodzenia się promienia laserowego. Wtedy mamy pewność, że światło przez nie niesione jest ukierunkowane. Oczywiście jest też, że fotony muszą mieć dokładnie tę samą energię. Energia fotonu jest bowiem proporcjonalna do częstotliwości fali elektromagnetycznej, na którą się składa (MT 01/2007). Jeśli zatem światło ma być monochromatyczne, to fotony muszą mieć jedną, konkretną energię. Tę, która odpowiada danej częstotliwości fali. No dobrze, ale jaka własność fotonów decyduje o tym, że światło jest koherentne? Tak jak przy opisie falowym, koherencja światła jest sprawą najtrudniejszą. I niestety nie możemy zagłębić się w wytłumaczenie tego problemu tak bardzo, jakbyśmy tego chcieli, gdyż wymagałoby to dość skomplikowanej wiedzy matematycznej, jaką stosuje się w kwantowej teorii pola elektromagnetycznego. Na szczęście można łatwo powiedzieć, jakie wnioski płyną z owego skomplikowanego formalizmu i prosto odpowiedzieć na pytanie o to, jaką wspólną własność muszą mieć fotony, aby światło było koherentne, ukierunkowane i monochromatyczne. Fotony te muszą być po prostu **IDENTYCZNE!** Identyczne pod każdym względem – całkowicie od siebie nieodróżnialne. Mówiąc językiem mechaniki kwantowej: wszystkie fotony muszą być dokładnie

w tym samym stanie kwantowym. Jeśli jest to prawda (a trzeba mi uwierzyć na słowo), to już teraz wiadać, dlaczego światło laserowe jest tak niesamowite. Składa się ono z niewyobrażalnej liczby fotonów, które są identyczne pod każdym względem. Poruszają się dokładnie w tym samym kierunku, mają taką samą energię oraz wszystkie własności, które fotony mogą mieć. O tych własnościach nie będziemy teraz wspominać, gdyż wykracza to znacznie poza zakres wiedzy szkolnej. Ważne jest jedno: fotony są identyczne, jeśli wszystkie liczby, które opisują ich własności, są takie same. Laser to po prostu urządzenie, które potrafi produkować identyczne fotony w ogromnych ilościach.

JAK WYTWORZYĆ IDENTYCZNE FOTONY?

Skoro światło laserowe składa się z identycznych fotonów, to od razu narzuca się pytanie o możliwość doświadczalną zrealizowania takiej fali. Sam fakt, że fotony mogą być identyczne, nie gwałci żadnych praw fizyki (wynika to z praw mechaniki kwantowej i tego, że fotony są bozonami (MT 03/2007)), ale oczywiście nie oznacza to wcale, że można je wytworzyć. W dzisiejszych czasach nie jest to może już tak ekscytujące, bo pierwszy działający laser został zbudowany w roku 1960 przez amerykańskiego fizyka Theodore'a Maimana (nieco wcześniej zbudowano tzw. maser, który emituje mikrofalowe promieniowanie elektromagnetyczne monochromatyczne, ukierunkowane i koherentne). Niemniej jednak do tego czasu wcale nie było pewne, że teoretyczna możliwość istnienia lasera rzeczywiście ziści się w laboratorium.

EMISJA WYMUSZONA

Idea budowy lasera opiera się na bardzo fundamentalnym zjawisku tzw. emisji wymuszonej promieniowania. Aby przynajmniej poglądowo zrozumieć, na czym to zjawisko polega, powinniśmy na chwilę wrócić do kwantowego modelu budowy atomu Bohra (MT 912/2007). Jak pamiętamy, elektron w atomie może się znajdować tylko na dobrze określonych orbitach i mieć ściśle określoną energię. Energia tego elektronu jest skwantowana, tzn. tylko niektóre wartości energii są dozwolone. Elektron może przeskakiwać pomiędzy dozwolonymi orbitami, ale wtedy potrzebne jest dostarczenie lub odebranie energii w postaci fotonu o dopasowanej energii. Jeśli elektron wchodzi na orbitę o wyższej energii, musi pochłonąć z otoczenia foton, jeśli przeskakuje w drugą stronę, to foton jest emitowany. Wydawać mogłoby się, że te dwa zjawiska są zjawiskami wzajemnie odwrotnymi, ale tak nie jest. Należy bowiem zauważyć, że wejście na orbitę o wyższej energii jest zawsze wymuszone.

Elektron musi pochłonąć foton z zewnątrz, tzn. bez swobodnego fotonu, który jakoś musi się znaleźć w otoczeniu atomu, przejścia na wyższy stan ener-

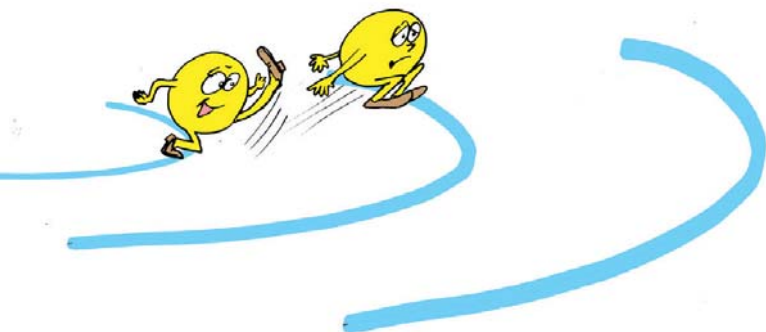


Emisja spontaniczna - dzieje się sama z siebie i nie mamy nad nią żadnej kontroli.

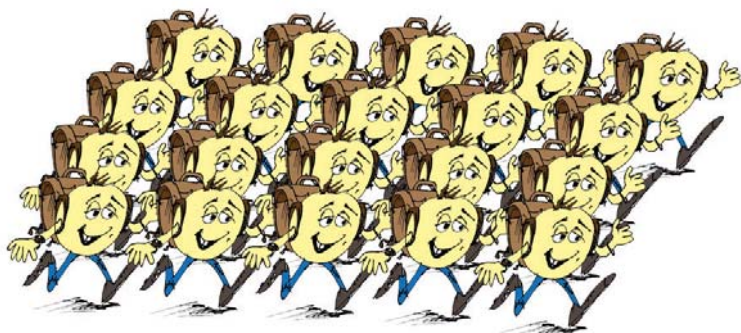
tyczny po prostu nie będzie. Emisja jest natomiast procesem całkowicie spontanicznym. Jeśli elektron nie znajduje się w najniższym stanie energetycznym, to wystarczy tylko odpowiednio długo poczekać i nastąpi przejście na stan niższy wraz z wyemitowaniem fotonu. Z praw mechaniki kwantowej wynika, że nie możemy przewidzieć ani w którym momencie, ani w jakim kierunku ten foton zostanie wyemitowany. Wiadomo jednak, że musi to wcześniej czy później nastąpić, bo wszystkie stany energetyczne poza stanem podstawowym (tym o najniższej energii) nie są stabilne. Emisja musi w końcu nastąpić.

Widzimy zatem, że absorpcja fotonu jest zjawiskiem wymuszonym – to my, wysyłając w kierunku atomu odpowiedni foton, wymuszamy, aby elektron przeskoczył na wyższy poziom energetyczny. Emisja jest natomiast spontaniczna – dzieje się sama z siebie i nie mamy nad nią żadnej kontroli.

Okazuje się, że oprócz tych dwóch zjawisk rządzących przeskokami kwantowymi elektronu w atomie istnieje jeszcze jedno – emisja wymuszona. Zjawisko emisji wymuszonej jest bardzo zaskakujące i występuje w sytuacji, gdy foton o energii pasującej do danego przejścia w atomie uderza w elektron znajdujący się na orbicie o wyższej energii. Wtedy jest duże prawdopodobieństwo, że ten przelatujący foton wymusi przejście elektronu na niższy stan energetyczny i w efekcie doprowadzi do wyemitowania dodatko-

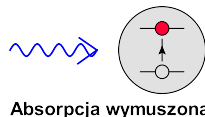


wego fotonu. Sam zaś nie zostanie pochłonięty. Zapewne zastanawiasz się, Drogi Czytelniku, skąd jest pewność, że emisja fotonu została wymuszona przez zewnętrzny foton, a nie jest po prostu skutkiem emisji spontanicznej, która zachodzi zawsze i nie zależy od tego, ile fotonów jest w otoczeniu. Ta pewność wynika z faktu, że fotony emitowane w emisji wymuszonej mają zupełnie inne własności niż te emitowane spontanicznie. Jak już wspominaliśmy, główną własnością

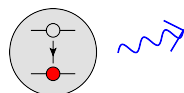


Takie jest właśnie światło laserowe:
monochromatyczne
ukierunkowane, koherentne

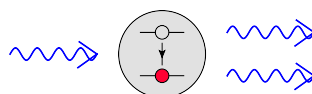
emisji spontanicznej jest to, że nie jesteśmy w stanie przewidzieć, w którym kierunku polecą emitowane fotony. W przypadku emisji wymuszonej foton leci dokładnie w tym samym kierunku, w którym leci foton wymuszający. Właściwie to jest on identyczną kopią fotonu wymuszającego i ich odróżnienie jest fundamentalnie niemożliwe. Oba fotony są identyczne.



Absorpcja wymuszona



Emisja spontaniczna



Emisja wymuszona

ZNÓW TEN EINSTEIN

Opisane przed chwilą zjawisko emisji wymuszonej zostało teoretycznie przewidziane przez Alberta Einsteina w 1917 roku, gdy próbował on innym sposobem wytłumaczyć, dlaczego ciało doskonale czarne emituje promieniowanie zgodne z rozkładem Plancka. Na gruncie rozważań termodynamicznych doszedł on do wniosku, że rozkładu Plancka nie da się poprawnie przewidzieć, jeśli nie założymy, że oprócz emisji spontanicznej istnieje również emisja wymuszona. Bezpośrednie doświadczalne potwierdzenie tego, że Einstein miał rację, przyszło po niespełna 10 latach. I znów się okazało, że Einstein miał absolutną rację. Potrzeba było jednak kolejnych 30 lat, zanim ktoś w końcu wpadł na pomysł, że zjawisko emisji wymuszonej można wykorzystać do wytwarzania światła laserowego.

PIERWSZY KROK DO LASERA

Zjawisko emisji wymuszonej jest fundamentem, na którym opiera się działanie lasera. Pozwala ono, przynajmniej teoretycznie, produkować identyczne fotony. Droga do lasera jest jednak jeszcze bardzo długa, bo nadal jest kilka nierozwiązanych problemów. Po pierwsze, trzeba mieć jakieś atomy, w których jedno z przejść elektronowych odpowiada częstotliwości promieniowania widzialnego. Dodatkowo trzeba jakoś sprawić, aby wszystkie (lub chociaż ich znaczna część) atomy w pewnym momencie były w stanie wzbudzone, tak aby było można wymusić ich świecenie. Trzeba przy tym zadbać o to, aby powstrzymać jakąś emisję spontaniczną do innych stanów elektronu w atomie. Trzeba też pomyśleć o tym, że jak atomy wyświecą fotony, to należałoby je natychmiast znów wzbudzić tak, aby mogły emitować fotony ponownie. Chcemy przecież, aby laser działał w sposób ciągły. No i ostatecznie trzeba jakoś sprawić, aby światło laserowe świeciło w tym kierunku, w którym sobie życzymy. Ale o tym wszystkim opowiemy sobie już następnym razem. Zapraszam... ●