

MARCIN ŁOBEJKO
ŁUKASZ ŁAMŻA



CO SIĘ DZIEJE
W ŚWIECIE
KWANTÓW?

O INTERPRETACJACH
MECHANIKI KWANTOWEJ

I.2. Teoria falowa Maxwella

Dziewiętnasty wiek to w historii fizyki piękny okres. Obok dziesiątków innych świetnych odkryć, to właśnie wtedy nastąpiły narodziny elektromagnetyzmu, czyli niebywale skutecznej teorii opisującej w sposób ujednolicony znane już wówczas zjawiska elektryczne i magnetyczne. Z teorii tej dodatkowo i całkowicie niespodziewanie wyłonił się poprawny opis światła, który między innymi jest w stanie wytłumaczyć problem, na który napotkaliśmy przed chwilą, rekonstruując eksperyment Macha-Zehndera.

Owej wielkiej syntezy dokonał James Clerk Maxwell, bazując na badaniach swych poprzedników, zajmujących się w niezależny sposób zjawiskami elektrycznymi i magnetycznymi. Jak to często w nauce bywa, trud wielu naukowców został zwieńczony wielkim sukcesem jednego z nich. Jeśli chcemy zrozumieć i poprawnie zinterpretować niespodziewane wyniki eksperymentu Macha-Zehndera z poprzedniego rozdziału, musimy zagłębić się w teorię elektromagnetyzmu. Okazuje się jednak, że odpowiedź, której szukamy, da nam dużo więcej – pozwoli nie tylko poprawnie opisać światło, ale także będzie wskazówką do zrozumienia świata mikroskopowego w ujęciu kwantowym.

Zgodnie z teorią elektromagnetyzmu, światło jest wędrującym w przestrzeni zaburzeniem pola elektrycznego i magnetycznego (lub po prostu „elektromagnetycznego”). A czym właściwie jest samo pole? Jego koncepcja pochodzi oczywiście z matematyki, tak jak większość języka używanego przez fizyków, gdzie przez pole rozumie się wielkość, która jest zdefiniowana w całej przestrzeni, czyli po prostu wszędzie. Przykładowo polem może być intensywność światła, o której tyle mówiliśmy przed chwilą – jest to wszak wielkość, która ma przypisaną wartość w każdym punkcie przestrzeni. W tym przypadku intensywność wiązki była niezerowa tylko wzdłuż odpowiednich promieni laserowych, a poza nimi spadała do zera.

Aby więc opisać jakieś pole, należy podać, jak wartości opisujące to pole są rozłożone w przestrzeni. Występujące w przyrodzie pola elektryczne i magnetyczne mogą w różny sposób wypełniać przestrzeń, a ponadto mogą być statyczne (jak pole pochodzące od magnesu stałego), lub dynamiczne (jak pole pochodzące od anteny radiowej). Typowym przypadkiem zmienności pola jest rozchodzenie się fal elektromagnetycznych – regularnego następstwa górek i dolin, wędrujących w określonym kierunku z prędkością światła. Przykładem takiej fali może być wiązka laserowa, ale także fala radiowa wysyłana przez jakąś rozgłośnię. Może wydawać się to dziwne, ale zarówno światło, jak i fale radiowe czy telewizyjne, co do swojej natury są dokładnie tym samym zmiennym polem elektromagnetycznym.

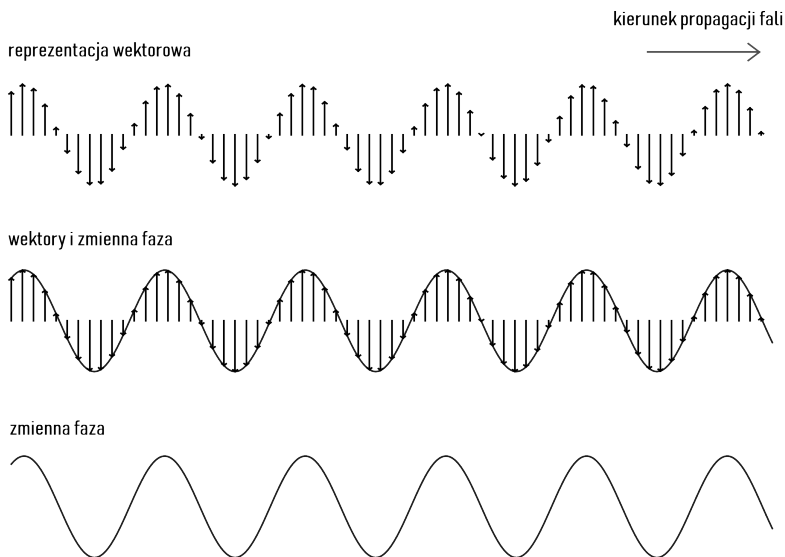
Poza rozważaną przez nas intensywnością, pole elektromagnetyczne posiada również inne własności. Pierwszą z nich jest kierunek. Takie „kierunkowe” pole nazywa

się w fizyce polem wektorowym. Własność ta jest zdecydowanie mniej intuicyjna niż intensywność, chociaż koncepcyjnie jest również bardzo prosta. Można sobie wyobrazić, że dla każdego punktu w przestrzeni podajemy nie tylko liczbę określającą intensywność pola, a także strzałkę wyznaczającą pewien kierunek (wektor). Kierunek ten może być różny dla różnych punktów przestrzeni, co oznacza, że nasze pole przypomina trochę jeża, którego igły mogą być skierowane w dowolną stronę świata.

Co istotne, strzałki te nie są kierunkiem przemieszczania się fali elektromagnetycznej, takiej jak analizowana wcześniej wiązka laserowa lub fala radiowa⁴, lecz raczej są wizualizacją kierunku działania „siły”, którą reprezentuje dane pole elektromagnetyczne. Oznacza to, że w każdym punkcie przestrzeni pole może oddziaływać w innym kierunku. I tak, na przykład, pole elektryczne będzie popychać cząstki o odpowiednim ładunku w kierunku wyznaczonym przez jej strzałki. Intensywność pola można łatwo włączyć do obrazu „strzałkowego” – im dłuższa strzałka, tym większa intensywność pola w danym punkcie.

Chociaż rozkład strzałek w ogólności może być dowolny i chaotyczny, to jednak w przypadku fali elektromagnetycznej jest on bardzo uporządkowany. Jeżeli narysujemy strzałki pola elektrycznego w fali elektromagnetycznej, to uzyskamy taki mniej więcej obraz:

⁴ Zauważmy, że nawet pola statyczne – jak choćby nieruchome, stałe pole generowane przez magnes sztabkowy – są polami wektorowymi.



Rys. 11. Fala elektromagnetyczna.

Kiedy fala przemieszcza się z lewej strony do prawej, to jednocześnie strzałki reprezentujące pole elektryczne poruszają się z góry na dół. Zachodzi charakterystyczny, powtarzalny ruch. Tę szczególną własność, czyli periodyczne „fallowanie” pola elektrycznego, w fizyce nazywamy zmienną fazą. Jeśli zaś powiemy, że pole w tym i tym punkcie skierowane jest, przykładowo, do góry, to właśnie określiliśmy jego fazę. Nieformalnie mówiąc, faza informuje nas więc o tym, na którym etapie „pełnego cyklu” znajduje się pole elektromagnetyczne w danym miejscu, w danym momencie.

W dalszej dyskusji wszystko, co nam będzie potrzebne do opisu fali elektromagnetycznej, to właśnie faza w różnych punktach przestrzeni oraz jej intensywność⁵. Możemy też zapomnieć o samych strzałkach, które budują falę elektromagnetyczną, lecz myśleć o niej jak o falującym „wężyku”, który swoją wysokością reprezentuje intensywność, a „falowaniem” – zmienną fazę. Warto chyba dodać, że szybkość zmieniania się fazy światła – czyli częstotliwość – jest odczytywana przez nas jako jego barwa. Szybka zmiana fazy interpretowana jest jako barwa niebieska, a kolory zielony, pomarańczowy, żółty i czerwony odpowiadają coraz wolniejszym jej zmianom. Gdybyśmy na przykład zamiast lasera o kolorze czerwonym użyli lasera zielonego, w naszym opisie pole tego drugiego falowałoby po prostu szybciej.

Laser, dodajmy, ma dwie ważne własności, które okażą się decydować o możliwości wykonania eksperymentu Macha-Zehndera. Po pierwsze, powstaje w nim światło o jednej tylko częstotliwości, w przeciwieństwie choćby do Słońca, w którego świetle obecne są składowe odpowiadające wszystkim widzialnym przez ludzkie oko barwom. Po drugie, światło lasera jest całkowicie uporządkowane ze względu na swoją fazę: w danym punkcie przestrzeni jest ono w całości w jednej i tej samej fazie. Można więc wskazać na przykład konkretną odległość od lasera, przy której wszystkie składające się na jego światło „strzałki” będą wskazywać, przykładowo, w górę. O takiej wiązce mówimy, że jest spójna. Również i to jest raczej sytuacją

⁵ Tak naprawdę istnieje jeszcze tylko jedna cecha fali elektromagnetycznej, a jest nią polaryzacja, która jednak w dalszym rozumowaniu nie jest nam potrzebna.

wyjątkową – niemal wszystkie otaczające nas źródła światła, od Słońca po żarówki i świetlówki, emitują światło niespójne, tzn. w dowolnym punkcie przestrzeni można napotkać na składowe tego światła znajdujące się akurat w najróżniejszej fazie.

Wróćmy może jednak do naszego doświadczenia. Jak pamiętamy, skrzyżowanie się obu wiązek w drugim lustrze półprzepuszczalnym (P_2) miało ogromny wpływ na zachowanie światła i tym samym na ostateczny wynik eksperymentu. Obu ścieżek nie można po prostu rozłożyć w czasie i wykonywać niezależnie – aby poprawnie zinterpretować wynik eksperymentu, musimy zrozumieć, jak dwie wiązki światła wpływają na siebie, gdy zostaną połączone.

Odpowiedź na to pytanie wiąże się ze szczególną własnością pola elektromagnetycznego, którą nazywa się zasadą superpozycji. Słowo superpozycja brzmi dziwacznie, ale kryje się za nim bardzo prosta idea, którą najlepiej zrozumieć na przykładzie.

Żałóży, że w Lublinie i Poznaniu wytworzono niezależnie dwie fale elektromagnetyczne – na przykład radiowe. Spotykają się one w połowie drogi (gdzieś niedaleko Brzezina pod Łodzią) i zaczynają się na siebie nakładać. Zasada superpozycji głosi, że nowa fala, która powstanie z nałożenia fal pierwotnych, jest po prostu sumą tej z Poznania i tej z Lublina. Pamiętajmy jednak, że pole elektromagnetyczne ma nie tylko intensywność (czyli długość naszej strzałki), ale również i kierunek (czyli jej zorientowanie w przestrzeni). Jeśli więc w danym miejscu strzałka jednej fali jest skierowana do góry, a drugiej w dół, a obie mają akurat dokładnie tę samą długość, to w myśl zasady superpozycji dochodzi do wzajemnego unicestwienia się tych pól. Można sobie wyobrazić, że jeśli w pewnym punkcie jedno

pole ciągnie do góry⁶, a drugie pole z dokładnie taką samą siłą w dół, to działania te wzajemnie się znoszą, a nowe pole posiada w tym miejscu zerową wartość.

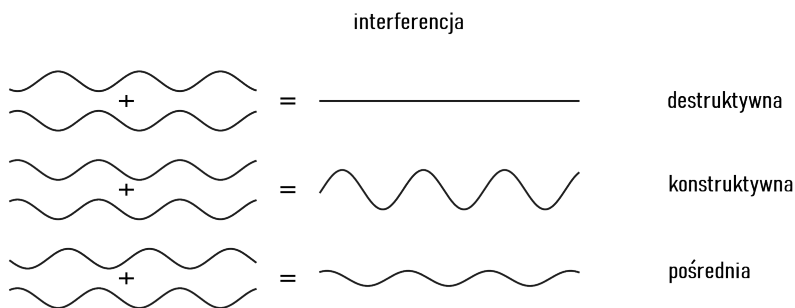
Zobaczymy teraz, co to oznacza dla naszych wiązek laserowych.

Po przejściu przez płytkę P_2 dwie wiązki nakładają się na siebie równolegle – zlewają się całkowicie ze sobą tak, że ostatecznie przestają być odróżnialne i tworzą pojedynczą wiązkę wypadkową. Zasada superpozycji głosi, że nowa wiązka jest po prostu sumą pierwotnych fal świetlnych. Nie oznacza to jednak, że w każdym punkcie intensywność wzrośnie dwukrotnie, ponieważ w tym procesie dodawania ogromną rolę odgrywa właśnie faza jednej i drugiej wiązki.

Prześledzimy dwa najbardziej skrajne przypadki. Pierwszy z nich dotyczy sytuacji, kiedy fazy naszych fal świetlnych są dokładnie takie same w każdym punkcie przestrzeni. Oznacza to, że jeśli w danym miejscu pole pierwszej wiązki „ciągnie do góry”, to pole drugiej wiązki ciągnie dokładnie tak samo i w tym samym kierunku. Rzeczywiście, w tym przypadku dodanie do siebie obu fal powoduje dwukrotne wzmocnienie jej intensywności. Mówimy, że fale spotkały się i nałożyły ze sobą dokładnie w fazie: „górką spotkała się z górką, a dolinką z dolinką”. Druga skrajność nazywana jest natomiast nałożeniem się fal przeciwnie w fazie, co oznacza sytuację dokładnie odwrotną. Do sytuacji takiej można dotrzeć, wychodząc od przypadku całkowitej zgodności fazowej, a następnie przesuwając jedną z wiązek w prawo lub

⁶ W sformułowaniu „ciągnąć do góry” w domyśle wyobrażamy sobie, że pole to siła oddziałująca na jakiś hipotetyczny ładunek. Należy jednak pamiętać, że pola elektryczne i magnetyczne istnieją, nawet jeśli nie ma obiektów, na które mogą działać!

lewo. W takim przypadku fale przestaną się już idealnie nakładać, wypadną z fazy i kiedy jedna z nich będzie wciąż z pełną siłą „ciągnąć do góry”, druga coraz słabiej. Przesuwając wiązkę jeszcze bardziej, w końcu dojdziemy do sytuacji, w której wektor jednej fali będzie skierowany do góry, a drugiej w dół. Przypadek ten jest nakładaniem się fal o dokładnie przeciwnych fazach, co ostatecznie prowadzi do wygaszenia całej wiązki!



Rys. 12. Interferencja fal.

Światło dodane do drugiego światła może więc wytworzyć ciemność! Widzimy więc, że zasada superpozycji i faza fal świetlnych prowadzi do bardzo ciekawych zjawisk. Łączenie wiązek laserowych może skutkować wzajemnym wzmocnieniem lub wygaszeniem – w zależności od tego, jakie były fazy poszczególnych wiązek. Dodajmy, że proces nakładania się fal elektromagnetycznych inaczej nazywa się interferencją. Interferencja może być konstruktywna – jeśli wiązki się wzmacniają, lub destruktywna – jeśli się wygaszają.