Dlaczego nie da się zobaczyć atomów?

*Ewa ŁACIŃSKA**

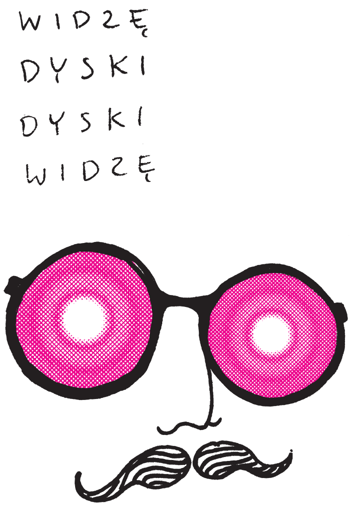
*Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

We Wszechświecie istnieje dużo różnych ograniczeń, występujących w różnych dziedzinach. Mimo że, być może, nie jest to dla nas oczywiste i niekoniecznie mamy okazję dostrzec to w życiu codziennym, światło widzialne ograniczone jest pod wieloma względami. Długość fali wynosi od 380 nm dla światła fioletowego do 780 nm dla czerwieni. Światło w próżni musi poruszać się ze stałą prędkością wynoszącą

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \approx 300\,000 \text{ km/s}.$$

W związku z naturą światła i jego oddziaływaniem z materią mamy do czynienia również z innymi ograniczeniami. Skutkują one, między innymi, takimi zjawiskami jak aberracje czy też ograniczona rozdzielczość przyrządów optycznych.

Jednym z podstawowych ograniczeń związanych ze światłem jest fakt, że nie istnieje idealny przyrząd optyczny ogniskujący światło, np. idealna soczewka. Ogniskowanie światła jest potrzebne przykładowo do obrazowania optycznego i występuje w mikroskopach optycznych, aparatach fotograficznych, kamerach itp. Oczywiście, bardzo skomplikowanym narządem wykonującym obrazowanie jest również ludzkie oko. We wszystkich tych przykładach występują aberracje, które ograniczają ich możliwości poprawnego działania.



Przykładową aberracją, która wynika z natury światła, jest aberracja chromatyczna. Związana jest ona z cechą opisującą dany materiał, jaką jest jego współczynnik załamania n. Określa on, z jaką prędkością światło rozchodzi się w danym materiale w stosunku do jego prędkości w próżni, $v = c/n$. Przykładowo dla szkła n wynosi około 1,5, co oznacza, że światło porusza się w szkle półtora raza wolniej niż w próżni. Zgodnie z prawem Snella, współczynnik załamania określa również, jak bardzo ugnie się wiązka światła przy przechodzeniu z jednego ośrodka do drugiego. Kluczowym elementem pozwalającym zrozumieć, czym jest aberracja chromatyczna, jest fakt, że dla większości stosowanych materiałów (np. szkło) współczynnik załamania światła nie jest liczbą stałą dla wszystkich długości fali, lecz przyjmuje różne wartości dla różnych barw. Zjawisko to nosi nazwę dyspersji współczynnika załamania światła. Liczba n maleje wraz ze wzrostem długości fali, co oznacza, że dla światła widzialnego osiąga największą wartość dla koloru fioletowego, a najmniejszą dla czerwieni. W konsekwencji przy przechodzeniu z jednego ośrodka do drugiego światło fioletowe załamuje się pod największym kątem, a czerwone pod najmniejszym. Zjawisko to jest intencjonalnie wykorzystywane w pryzmatach, które rozszczepiają światło białe na wszystkie kolory tęczy.

Ale zastanówmy się nad konsekwencjami dyspersji współczynnika załamania światła przy pracy soczewki skupiającej światło. Wiązka światła przechodząca przez prosty układ optyczny, złożony z jednej soczewki, rozszczepi się zarówno na granicy powietrze/soczewka, jak i na granicy soczewka/powietrze, przy czym pamiętamy, że światło fioletowe i niebieskie ugnie się najbardziej, a czerwone najmniej. W konsekwencji ognisko nie będzie idealnie punktowe, jakbyśmy zakładali i bardzo chcieli, ale dla światła niebieskiego znajdzie się ono bliżej soczewki, dla czerwonego dalej, a reszta barw zogniskuje się gdzieś pośrodku. Skutkuje to tym, że na ekranie obserwujemy kolorową obwódkę wokół ogniska.

Aberrację chromatyczną można ograniczać, stosując np. dublet achromatyczny, czyli dwie połączone soczewki, jedną skupiającą i jedną rozpraszającą, o różnej dyspersji współczynnika załamania. Są one tak dobrane, aby ogniska dla światła niebieskiego i czerwonego wypadały w tym samym miejscu. Dla innych barw efekt ten nie jest aż tak widoczny, tak więc dla wielu zastosowań (np. lornetki, lunety) użycie dubletu achromatycznego wystarcza, aby skorygować aberrację chromatyczną. Należy jednak pamiętać, że nie da się jej zupełnie wyeliminować, można jedynie ją korygować do pewnego stopnia.

Załóżmy jednak, że mamy do dyspozycji idealny przyrząd obrazujący, np. idealny mikroskop, pozbawiony aberracji chromatycznej. Czy oznacza to, że stosując dowolne powiększenie, możemy uzyskać obraz o dowolnej rozdzielczości, czyli zobaczyć obiekty dowolnie małe, np. cząsteczki chemiczne i atomy? Okazuje się, że nawet gdy zaniedbamy wszystkie wady przyrządów optycznych związane z obrazowaniem, pojawia się kolejne ograniczenie wynikające z samej natury światła. Mam tutaj na myśli zjawisko dyfrakcji i interferencji. Najprościej mówiąc, jeśli fala światła napotka na swojej drodze przeszkodę, to ulegnie ugięciu na niej, czyli zmieni się kierunek jej rozchodzenia – jest to zjawisko dyfrakcji. Natomiast gdy dwie fale spotkają się, to w zależności od faz, w których się znajdują, mogą się wzmocnić lub osłabić – jest to zjawisko interferencji. Tak więc, gdy przepuścimy wiązkę światła przez kołowy otwór, światło to ugnie się na granicy otworu, a ponadto, zgodnie z zasadą Huygensa, każdy punkt otworu będzie źródłem nowej fali kulistej. Fale pochodzące z różnych fragmentów otworu interferują i w konsekwencji, zamiast pojedynczego punktu na ekranie zaobserwujemy typowy obraz interferencyjno-dyfrakcyjny, okrągłą rozmytą plamkę wraz z kilkoma jasnymi pierścieniami.

Centralna jasna plamka zawiera około 85% energii światła i nazywa się plamką Airy'ego. Wokół niej występują kolejno pierścienie jasne i ciemne, oznaczające odpowiednio miejsca, w których fale się dodały konstruktywnie bądź destruktywnie. Zjawisko to ma ogromne znaczenie przy określaniu zdolności rozdzielczej przyrządów optycznych. Gdybyśmy chcieli mieć układ optyczny pozwalający na powiększenie naszego obrazu dowolną ilość razy, to teoretycznie, zgodnie z optyką geometryczną, jesteśmy w stanie to zrobić. Jednak w tej teorii soczewka ogniskuje światło w punkcie – w praktyce, jeśli weźmiemy pod uwagę efekty dyfrakcyjno-interferencyjne, obraz jest nieco większy. Tak więc obraz dwóch bardzo małych, punktowych przedmiotów jest tak naprawdę ich obrazem dyfrakcyjno-interferencyjnym. Zamiast dwóch punktów na ekranie w głównej mierze będziemy obserwować dwie plamki Airy'ego. Jeżeli łączna suma promieni plamek Airy'ego będzie większa niż odległość pomiędzy dwoma przedmiotami, to obrazy obiektów będą się nakładać. W efekcie przy dowolnie blisko położonych punktach przekrycie się plamek staje się na tyle duże, że nie będziemy w stanie ich odróżnić.

Zjawisko to nosi nazwę ograniczenia dyfrakcyjnego. Tak więc, o ile zgodnie z optyką geometryczną możemy oglądać każdy mały obiekt, to w praktyce nie będziemy w stanie go wystarczająco wyostrzyć. Mówi się, że przyrząd optyczny jest ograniczony dyfrakcyjnie, jeśli poprawa jego parametrów (np. użytych materiałów, zastosowanej konstrukcji) nie jest w stanie poprawić już jego zdolności rozdzielczej ze względu na występujące efekty dyfrakcyjnie. Takim bardzo dobrze wykonanym przyrządem jest np. ludzkie oko. Powstaje więc pytanie, jakie najmniejsze obiekty jesteśmy w stanie zobaczyć przy użyciu mikroskopu optycznego? Z pomocą przychodzi nam kryterium Rayleigha, które określa maksymalną zdolność rozdzielczą, czyli minimalną odległość pomiędzy rozróżnialnymi punktami. Mówi ono, że dwa obiekty są wciąż widocznie odseparowane, jeśli maksimum obrazu dyfrakcyjnego (jasny prążek) pierwszego przedmiotu pokrywa się z minimum drugiego (ciemny krążek). Matematycznie możemy je opisać wzorem:

$$d \simeq 0{,}61\lambda\ \mathrm{NA},$$

gdzie: d – minimalna odległość pomiędzy rozróżnianymi punktami, λ – długość fali światła, NA – apertura numeryczna mikroskopu ($\mathrm{NA} = n \sin\alpha$, n to współczynnik załamania światła dla materii pomiędzy obiektywem i obserwowanym obiektem, α – połowa kąta, pod jakim promienie światła mogą wchodzić do obiektywu). Przykładowo: dla długości fali 500 nm (światło zielone) i aperturze numerycznej równej 1 dostajemy $d \simeq 0{,}3\ \mu m$, czyli tyle, ile wynosi średnica dużych wirusów albo małych bakterii. Jest to za mało i to w dodatku o jakieś trzy rzędy wielkości, aby zobaczyć atomy. Istnieją jednak urządzenia obrazujące, nazywane również mikroskopami, ale wykorzystujące inne zjawiska fizyczne zamiast światła, pozwalające „zobaczyć" to, co naprawdę małe. Jest to jednak temat na oddzielny artykuł.

Rozwiązanie zadania F 937.
Każda kulka spadająca z wysokości h przy sprężystym zderzeniu z tłokiem przekazuje mu pęd $2mv = 2m\sqrt{2gh}$. Następuje to raz w ciągu czasu t pomiędzy dwoma kolejnymi zderzeniami, który jest równy sumie czasu wznoszenia i spadania kulki: $t = 2\sqrt{2h/g}$, gdzie g to przyspieszenie ziemskie. Stąd znajdujemy średnią wartość siły oddziaływania jednej kulki na tłok w ciągu czasu t, równą

$$F_1 = \frac{\Delta p}{t} = \frac{2mv}{t} = \frac{2m\sqrt{2gh}}{2\sqrt{2h/g}} = mg.$$

Dla średniej siły oddziaływania N kulek na tłok znajdujemy

$$F_{\text{śr}} = NF_1 = Nmg.$$

(Zauważmy, że wielkość tej siły, równa całkowitemu ciężarowi kulek, nie zależy od wysokości, na jaką one podskakują, co wynika ze sprężystego charakteru zderzeń z tłokiem).

Ciśnienie gazu pod tłokiem znajdujemy jako sumę ciśnień:

$$p = p_0 + g(Nm + M)/S.$$

Rozwiązanie zadania F 938.
Każda kropla, wpadając do naczynia, powiększa jego ładunek o Q. Ładunek ten rozkłada się równomiernie na powierzchni sfery i wytwarza wokół niej pole elektryczne, które jest takie jak pole pochodzące od ładunku punktowego, równego ładunkowi sfery, umieszczonego w jej środku. Na spadającą kroplę działają więc dwie siły: przyspieszająca ruch kropli siła ciężkości i opóźniająca ten ruch siła elektrostatyczna. Przyjmijmy, że do naczynia wpadło n kropli, a więc jego ładunek wynosi nQ. Kropla $n' = n + 1$ już do naczynia nie wpadnie, jeżeli jej prędkość na wysokości otworu w naczyniu będzie równa zeru.

Prędkość tę znajdziemy, obliczając energię kinetyczną, jaką ma na wysokości $2R$ kropla spadająca z wysokości h. Będzie ona równa zmianie jej energii potencjalnej, na którą składa się energia pochodząca od pola grawitacyjnego i od pola elektrycznego przy spadku z wysokości h do wysokości $2R$:

$$\Delta E_p = mg(h - 2R) + \frac{nQ^2}{4\pi\varepsilon_0(h - R)} - \frac{nQ^2}{4\pi\varepsilon_0 R}.$$

Mamy więc

$$\frac{mv^2}{2} = mg(h - 2R) - \frac{nQ^2}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{h - 2R}{R(h - R)},$$

a stąd

$$v^2 = 2g(h - 2R) - \frac{2nQ^2(h - 2R)}{4\pi\varepsilon_0 m(h - R)R}.$$

Z warunku $v = 0$ dostajemy

$$n = 4\pi\varepsilon_0 mgR(h - R)/Q^2,$$

a to oznacza, że ostatnia kropla, która wpadnie do naczynia, ma numer n, będący największą liczbą całkowitą spełniającą warunek:

$$n < 4\pi\varepsilon_0 mgR(h - R)/Q^2.$$