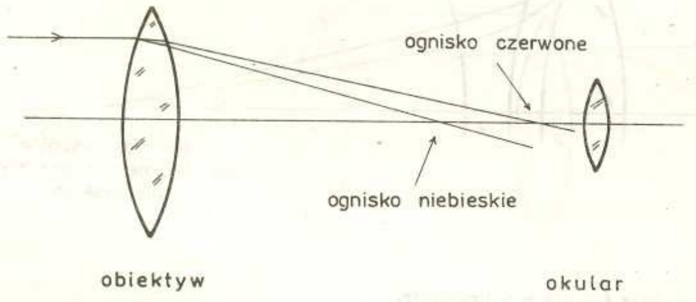
Czy astronom nie lubi kolorów?

Tomasz KWAST

Przez wiele lat astronomia bardzo dobrze radziła sobie bez klisz czułych na barwy. Informacje o wyglądzie nieba w rozmaitych zakresach światła uzyskiwano na podstawie kilku zdjęć czarnobiałych, ale wykonanych przez odpowiednie filtry przepuszczające światło o żądanej barwie. Rzecz jasna, pojawienie się dostatecznie czułych klisz barwnych ogromnie sprawę uprościło i to, co dawniej można było wywnioskować dopiero z serii zdjęć, teraz można już zobaczyć od jednego rzutu oka. Na współczesnych zdjęciach barwnych od razu widać, że gwiazdy są kolorowe (efekt temperatury), że rozproszone mgławice gazowe są na ogół czerwone (bo świeci tam głównie wodór w linii H_α), że galaktyki spiralne mają czerwieńsze części centralne, a bardziej niebieskie ramiona (efekt występowania różnych populacji gwiazd), że mgławice planetarne są często kolorowe (bo świecą tam różne atomy o różnych stopniach wzbudzenia), że kolorowe są planety i ich satelity itd.

Tak więc barwa w astronomii jest również naukową informacją. W jednym jednak przypadku astronom kolorów nie lubi, mianowicie, gdy przejawiają się jako aberracja chromatyczna. Zjawisko to polega na tym, że każda soczewka oprócz załamywania promieni powoduje rozszczepienie światła białego. Soczewkę można wszak uważać za układ nieskończenie wielu pryzmatów. Rozszczepienie jest więc nieuniknione, a skutkiem jest fakt, że np. obiektyw lunety w innym miejscu skupia promienie niebieskie niż czerwone (rys. 1) i jeżeli przy oglądaniu gwiazdy nastawi się okular na ostrość dla ogniska niebieskiego, to widać gwiazdę z czerwoną obwódką – i odwrotnie.



Rys. 1. Schemat najprostszej lunety.

Jak z tym walczyć? Jeden sposób zaradzenia złu znajdziemy od razu, gdy przypomnimy sobie podstawowy wzór soczewkowy

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right), \tag{1}$$

gdzie f oznacza ogniskową soczewki, n – współczynnik załamania szkła, r_1 i r_2 – promienie krzywizny powierzchni soczewki. Dla ustalonego kształtu soczewki ogniskowa jest funkcją współczynnika załamania różnego dla różnych częstości promieniowania. Zróżniczkowawszy stronami wzór (1) względem długości fali dostajemy

$$\frac{d}{d\lambda}\left(\frac{1}{f}\right) = \frac{dn}{d\lambda}\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right) = \frac{1}{(n-1)f}\frac{dn}{d\lambda} \tag{1a}$$

Wbrew zdrowemu rozsądkowi

(Według wykładów radiowych z audycji IV programu – *Widnokrąg*)

Widzę, lecz nie wierzę
Georg Cantor (1845 – 1918)

Tomasz HOFMOKL

Często zdarza się słyszeć zdanie, że coś jest niemożliwe, bo jest sprzeczne ze zdrowym rozsądkiem. Mogłoby się wydawać, że ten zdrowy rozsądek jest ostatecznym kryterium prawdziwości wypowiadanych sądów. Co więcej, opieranie się na nim świadczy o ogromnym zaufaniu do potęgi ludzkiego rozumu. Zaufanie to jest szczególnie silne u ludzi młodych, którzy ufają (i słusznie) potędze logicznego rozumowania zapominając (i w tym miejscu popełniają błąd), że należy sprawdzić również poprawność wyjściowych przesłanek. Wiedzie to często do wypowiadania kategorycznych sądów, które nie zawsze są prawdziwe. A to z kolei prowadzi niekiedy do różnego rodzaju kryzysów; czy to kryzysu wiary u ludzi wychowanych w duchu określonej religii, czy też do gwałtownych zmian w poglądach społecznych lub politycznych. W wymienionych dziedzinach bardzo trudno jest podejmować racjonalną dyskusję, ponieważ wykazanie fałszywości przyjętych przesłanek może nie być wcale łatwe. Nie tymi też dziedzinami chciałbym zająć się w moich wykładach, które zatytułowałem *Wbrew zdrowemu rozsądkowi*.

Jestem fizykiem i zajmuję się fizyką najdrobniejszych składników materii, tak zwaną fizyką cząstek elementarnych. Jestem fizykiem doświadczalnym, to znaczy, że odpowiedzi na postawione pytania szukam przede wszystkim w wynikach doświadczenia; można to ująć bardziej górnolotnie, że pytania te zadaję samej przyrodzie. Trzeba może powiedzieć od razu, że będę mówił o odpowiedziach, jakich udziela przyroda nie mnie osobiście. Byłoby to ogromne, piramidalne samochwalstwo. Jest rzeczą oczywistą, że wyniki, o których będę wspominał w toku prezentowanego cyklu wykładów *Wbrew zdrowemu rozsądkowi*, zostały otrzymane przez bardzo wielu badaczy w całej historii rozwoju nauki.

Tak zwany zdrowy rozsądek kształtuje się na podstawie doświadczeń z życia codziennego, zjawisk obserwowanych bezpośrednio w otaczającym nas świecie. Jest rzeczą oczywistą, że częściej mamy okazję obserwować spadek rzuconego kamienia niż kwantowe zachowanie się elektronu. Na podstawie tych właśnie codziennych obserwacji wytwarzamy sobie, najczęściej bezwiednie, przekonanie o tym, co jest możliwe, a co nie. Inaczej mówiąc, cò jest zgodne ze zdrowym rozsądkiem, a co jemu przeczy. W badaniach naukowych, dzięki odpowiednim urządzeniom, możemy obserwować zjawiska, z którymi nie spotykamy się na co dzień. Niektóre z tych zjawisk zdają się przeczyć naszemu poczuciu, co jest możliwe. Obserwacja ich stanowi najcenniejszą podnietę do weryfikowania naszego poglądu na otaczający świat i przy okazji uczy nas pokory. Nie wszystko, co jest sprzeczne ze zdrowym rozsądkiem, jest rzeczywiście niemożliwe. Przykładem takiego zjawiska, które w sposób oczywisty wydaje się na pierwszy rzut oka niemożliwe, jest interferencja elektronu samego ze sobą. Omówię to zjawisko w jednym z dalszych wykładów. Teraz, dla podkreślenia jego zaskakującego przebiegu, przedstawię je przez analogię.

Proszę sobie wyobrazić następującą sytuację. Jesteś samotnie w pomieszczeniu, w którym jest dwoje drzwi. Aby być jeszcze bardziej precyzyjnym, powiem, że są tam dwa otwory drzwiowe odległe od siebie i nie stykające się. Nie ma więc mowy o podchwytliwym stawianiu problemu, na przykład przez proponowanie jednego otworu dwudrzwiowego.
Mamy więc pomieszczenie o dwóch nie stykających się otworach. Proponuję wykonanie następującego zadania: wyjść przez oba otwory jednocześnie nie rozdzielając się przy tym na dwie części. Czy to możliwe? W oparciu o nasze codzienne doświadczenia, czyli w ramach zdrowego rozsądku jest to zadanie bezsensowne do tego stopnia, że nie warte nawet poważnego zastanawiania się. A jednak ... Elektron potrafi to wykonać, a przynajmniej zachowuje się tak, jakby to wykonywał. Mamy na to dowody eksperymentalne. Okazuje się, że nasz zdrowy rozsądek może prowadzić do fałszywych wniosków, jeżeli zastosujemy go w sytuacji skrajnie nietypowej dla życia codziennego. Co więcej, nie potrafimy wyobrazić sobie, jak to elektron robi, aby przejść przez dwa otwory równocześnie będąc przy tym cząstką niepodzielną.

Widać, że aby ogniskowe dla różnych barw były możliwie najbardziej zbliżone, ogniskowa w ogóle musi być jak największa. W ten sposób walczył z aberracją chromatyczną m.in. Heweliusz, budując niesłychanie długie teleskopy.

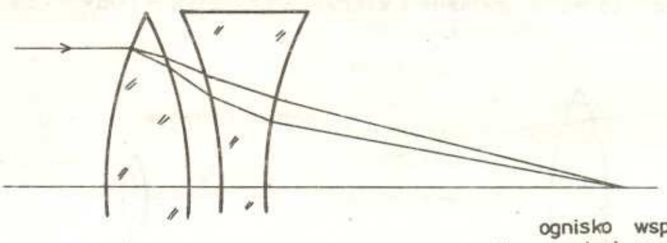
Zgodzimy się chyba, że nie jest to sposób zadowalający. Na szczęście około 1730 r. w Anglii wpadł ktoś na pomysł zbudowania obiektywu lunety z dwóch soczewek z różnych gatunków szkła. By zrozumieć ten pomysł, trzeba przypomnieć jeszcze jeden zasadniczy wzór na ogniskową F układu dwóch soczewek rozdzielonych odległością Δ:

$$\frac{1}{F}=\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}-\frac{\Delta}{f_1 f_2}. \tag{2}$$

Obiektyw ma stanowić zwartą całość, niech więc $\Delta=0$, a wtedy mając dwie soczewki możemy doprowadzić do pokrycia się ognisk dla dwóch barw. Wtedy bowiem ma być

$$\mathrm{d}\left(\frac{1}{F}\right)=0=\mathrm{d}\left(\frac{1}{f_1}\right)+\mathrm{d}\left(\frac{1}{f_2}\right)=\frac{\mathrm{d}n_1}{(n_1-1)f_1}+\frac{\mathrm{d}n_2}{(n_2-1)f_2}.$$

Widać, że aby ostatnia suma dała zero, jedna z ogniskowych musi być ujemna. Dlatego taki obiektyw, zwany achromatem, składa się z jednej soczewki skupiającej i jednej rozpraszającej (rys. 2). Pokrycie się ognisk dla dwóch tylko barw daje, wbrew pozorom, całkiem niezłą jakość obrazu. Oczywiście, obiektywy teleskopów profesjonalnych są budowane z większej liczby soczewek. Również bardzo skomplikowane są obiektywy mikroskopów i aparatów fotograficznych, ponieważ muszą być wolne nie tylko od aberracji chromatycznej, lecz i od innych wad soczewek, które silnie przejawiają się przy dużej zbieżności wiązki światła przechodzącej przez taki układ.



Rys. 2. Bieg światła w achromacie.

Uzyskawszy achromatyczny obraz w ognisku lunety należy go teraz obejrzeć przez achromatyczny okular. W zasadzie może nim być analogiczny układ dwóch soczewek o odpowiednio dobranej łącznej ogniskowej F

$$\left(\text{powiększenie lunety}=\frac{\text{ogniskowa obiektywu}}{\text{ogniskowa okularu}}\right).$$

Przyjęło się stosować jednak inną konstrukcję, mianowicie z dwóch soczewek z tego samego szkła, za to przy $\Delta\neq 0$. Wzór (2) daje teraz warunek achromatyzacji

$$\mathrm{d}\left(\frac{1}{F}\right)=0=\mathrm{d}\left(\frac{1}{f_1}\right)+\mathrm{d}\left(\frac{1}{f_2}\right)-\frac{\Delta}{f_1}\mathrm{d}\left(\frac{1}{f_2}\right)-\frac{\Delta}{f_2}\mathrm{d}\left(\frac{1}{f_1}\right),$$

skąd po podstawieniach wg (1a) mamy

$$\frac{\mathrm{d}n_1}{(n_1-1)f_1}+\frac{\mathrm{d}n_2}{(n_2-1)f_2}=\frac{\Delta}{f_1 f_2}\left(\frac{\mathrm{d}n_1}{n_1-1}+\frac{\mathrm{d}n_2}{n_2-1}\right).$$

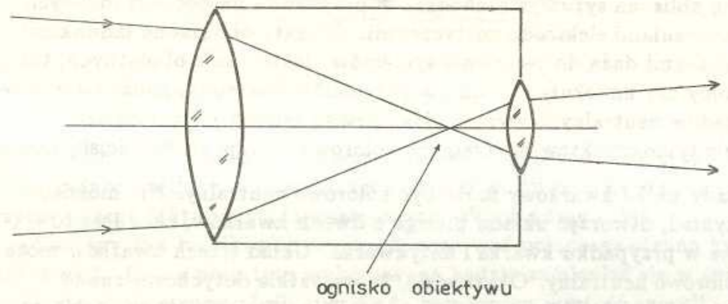
Jeżeli ma być $n_1 = n_2 = n$, to

$$\frac{dn}{n-1}\left(\frac{1}{f_1}+\frac{1}{f_2}\right) = \frac{\Delta}{f_1 f_2}\cdot\frac{2dn}{n-1},$$

skąd

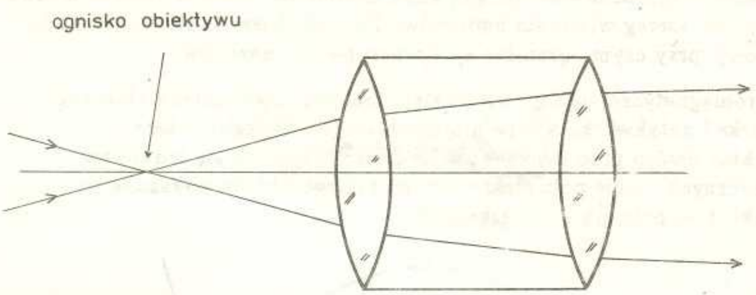
$$\Delta = \frac{f_1+f_2}{2}.$$

Jak widać, achromatyczny okular można zbudować na mnóstwo sposobów. Najpopularniejsze są dwa typy. Tzw. okular Huygensa ma $f_1 : \Delta : f_2 = 3 : 2 : 1$, przy czym soczewka o dłuższej ogniskowej jest po stronie obiektywu lunety.



Rys. 3. Okular Huygensa.

W drugim, zwanym okularem Ramsdena, jest $f_1 : \Delta : f_2 = 1 : 1 : 1$.



Rys. 4. Okular Ramsdena.

Każdy z nich ma swoje wady i zalety. Okular Huygensa ma większe pole widzenia, ale efektywne ognisko obiektywu znajduje się między soczewkami okularu i trudno tam zamontować np. mikrometr. Nie ma tego problemu w okularze Ramsdena, bo ognisko leży tu na zewnątrz okularu, za to skoro soczewki są w odległości ogniskowej, to widać osiadający na nich kurz; by tego uniknąć, dobiera się je nie całkiem ściśle według proporcji 1:1:1. Inne lepsze okulary są udoskonalonymi wariantami tych dwóch. Łatwo domyśleć się, że np. każdą soczewkę okularu można sporządzić jako mały achromat, wtedy proporcje odległości mogą być inne, a okular będzie miał inne cechy pożyteczne w specjalnych zastosowaniach. Rzecz jasna, będzie wtedy odpowiednio droższy.

Musimy zmienić nasz pogląd na świat, a tym samym wzbogacić rozumienie procesów, jakie zachodzą w przyrodzie. Do tego doświadczenia wrócimy w jednym z dalszych wykładów. Wybrałem je tutaj jako przykład, aby zilustrować, co mam na myśli mówiąc o procesach przebiegających wbrew zdrowemu rozsądkowi. Zaskakujące wyniki doświadczeń spotykamy zarówno w fizyce klasycznej, jak i we współczesnej, chociaż trzeba przyznać, że w tej ostatniej jest ich naprawdę bardzo dużo. Nie ma w tym nic dziwnego, do wyników fizyki klasycznej zdążyliśmy się już przyzwyczaić. Weszły już one, można się tak wyrazić, do skarbnicy doświadczenia życia codziennego i wobec tego stanowią jeden z elementów budujących zdrowy rozsądek. W fizyce klasycznej zaskakuje nas na ogół przebieg zjawiska, mimo że jest on logiczną konsekwencją podstawowych zasad, do których jesteśmy przyzwyczajeni i które akceptujemy jako zgodne ze zdrowym rozsądkiem. W fizyce współczesnej wyjaśnienie przebiegu zjawiska wymaga niekiedy zrewidowania podstawowych zasad lub pojęć i jest znacznie trudniejsze do zaakceptowania. Oczywiście, trudniejsze tylko dla nas, bowiem to, co nazywamy fizyką współczesną, znowu stanie się za jakiś czas fizyką klasyczną, zgodną ze zdrowym rozsądkiem.

W dalszej części wykładu zatrzymam się na zjawisku oczywistym dla każdego: zastanówmy się, czy rozumiemy rzut kamieniem. Bierzemy kamień do ręki, krótki zamach ramieniem i kamień leci. Czy jest w tym coś, co może nas zaniepokoić, czego nie rozumiemy? – dziś chyba nie. Za czasów Arystotelesa sytuacja była cokolwiek odmienna. Nasze pojęcia o otaczającym świecie czerpiemy nie tylko z własnych obserwacji i doświadczeń, ale korzystamy z dorobku pokoleń przekazywanego lepiej lub gorzej w procesie zorganizowanej edukacji, czyli na ogół ze szkoły. Nic więc dziwnego, że „zdrowy rozsądek" współczesnego ucznia liceum różni się od zdrowego rozsądku, na przykład, Arystotelesa, który urodził się 384 lata przed Chrystusem. Arystoteles obserwował bardzo uważnie otoczenie. Stwierdzał oczywiste fakty: wóz jedzie, jeżeli ktoś lub coś go ciągnie. Jeżeli brak siły pociągowej, wóz stoi. Trudniej ciągnąć po piasku niż po równej, płaskiej drodze. W każdym ruchu, twierdzi Arystoteles, są dwa główne czynniki: siła napędzająca (F) i opór (R). Aby ruch mógł zaistnieć, siła napędzająca musi być większa niż opór. Stwierdzenie to można nazwać pierwszą