

Dla niektórych z nas cena to duża. Musieliśmy bowiem zgodzić się, że czas nie ma znaczenia absolutnego, że to samo dotyczy długości: pręt o długości metra widziany z bardzo szybko poruszającego się obiektu może mieć długość tylko pół metra. Taki efekt zauważymy pędząc już z prędkością równą 0,865 prędkości światła.

Nasuwa się pytanie, czy jest coś, co nie zmienia się z prędkością. Może masa albo ładunek elektryczny? Okazuje się, że ten ostatni nie zależy od prędkości i bardzo łatwo to wykazać doświadczalnie. Otóż dowodem na to jest doskonała obojętność elektryczna zwykłej materii. Elektrony są bardziej ruchliwe niż protony. W każdym pierwiastku inny jest ruch elektronów. Gdyby ładunek zależał od prędkości, materia nie mogłaby być obojętna elektrycznie. Uff, przynajmniej ładunek nie zależy od prędkości, mówimy, że jest niezmiennikiem. A może i masa ciała nie zależy od prędkości? Znowu trzeba „zapytać się” doświadczenia. Użyjemy do tego wiązki elektronów. Są one naładowane ujemnie i w ruchu mogą się odchylić zarówno pod wpływem pola elektrycznego, jak i pola magnetycznego. Pola te działają w różny sposób na poruszający się elektron. Okazało się, że porównując odchylenia w jednym i drugim polu można wyznaczyć stosunek ładunku cząstki do jej masy. Wiemy już, że ładunek cząstki nie zależy od prędkości, łatwo więc sprawdzimy, czy masa zależy od prędkości poruszania się. Przyznają Państwo, że zaskakuje sama możliwość takiej zależności, ale lepiej sprawdzić.

Pierwszy takie doświadczenie wykonał w 1901 roku W. Kaufman, ale opowiem o znacznie dokładniejszych pomiarach z 1908 roku wykonanych przez A. H. Bucherera. Zmieniał on prędkość wiązki elektronów od 0,3 prędkości światła do 0,69 prędkości światła i za każdym razem z odchylenia w polu elektrycznym i magnetycznym wyznaczał stosunek ładunku do masy elektronu. Stosunek ten nawet w żargonie fizycznym nazywa się „e do em”. Przypominam: ładunek elektryczny nie zależy od prędkości ruchu. Jeżeli więc masa jest stała, to i cały stosunek nie powinien zależeć od prędkości. Tymczasem okazało się, że ten stosunek maleje wraz ze wzrostem prędkości elektronów. Przy najmniejszej prędkości 0,32c wynosił 1,66, a przy prędkości 0,69c już tylko 1,28. Co to znaczy? A tylko tyle, że masa elektronu rośnie wraz ze wzrostem prędkości. Oczywiście, nie tylko elektronu. Doświadczeń takich wykonano później wiele i wszystkie potwierdzają ten wynik.

Dyfuzja

Jan KALINOWSKI

Zapach perfum z otwartej buteleczki po pewnym czasie rozejdzie się po pokoju. Dym z papierosa w powietrzu rozmywa się, a kropla atramentu wpuszczona do wody zabarwi ją. Teoria kinetyczna tłumaczy te zjawiska w następujący sposób. Cząsteczki gazów, cieczy i ciał stałych są w ciągłym ruchu i zderzają się. Rozpatrzmy na przykład dym w powietrzu. Żadna cząsteczka dymu (albo ich grupa) nie porusza się szybko w pewnym ustalonym kierunku, gdyż na skutek zderzeń kierunek jej ruchu ulega ciągłym zmianom. Cząsteczki dymu będą się stopniowo rozchodziły w powietrzu na skutek bezładnej ich wędrówki. Proces tego typu nazywamy dyfuzją. Dyfuzja będzie zachodzić dopóty, dopóki koncentracja cząsteczek jest nierównomierna. To samo dotyczy autodyfuzji – wyrównywania się gęstości cząsteczek w układach jednoskładnikowych. Po dostatecznie długim czasie nastąpi wyrównanie się koncentracji i dyfuzja ustanie.

Proces dyfuzji jest podobny do procesu przewodnictwa cieplnego, które zachodzi, jeśli jest różnica temperatur. Jeśli różnica koncentracji w punktach oddalonych o Δx wynosi $\Delta \rho$, to molekuly z obszaru o większej koncentracji dyfundują do obszaru o mniejszej z szybkością proporcjonalną do $\Delta \rho / \Delta x$. Zmiana liczby molekuł w jednostce czasu będzie też proporcjonalna do powierzchni A , przez którą dyfundują molekuly, tzn.

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -AD \frac{\Delta \rho}{\Delta x},$$

gdzie znak minus oznacza, że dyfuzja zachodzi w kierunku przeciwnym do tego, w którym wzrasta ρ . Stała D nosi nazwę współczynnika dyfuzji. Powyższe prawo dyfuzji podał w 1855 r. niemiecki fizjolog Adolf Fick. Równanie przewodnictwa cieplnego ma formalnie taką samą postać, przy podstawieniu $\Delta N \rightarrow \Delta Q$ (zmiana ciepła) i $\Delta \rho \rightarrow \Delta T$ (różnica temperatur).

Zwróćmy uwagę, że prawo to zostało sformułowane przez fizjologa, a nie fizyka. Dyfuzja substancji odżywczych w wodzie czy też tlenu do krwi w płucach ma przecież podstawowe znaczenie dla organizmów żywych.

Badając procesy dyfuzji można uzyskać ciekawe informacje o dyfundujących molekułach. Rozpatrzmy oddzielnie dyfuzję w gazach i cieczach.

W przypadku gazów rozpatrzmy najprostszy przypadek – autodyfuzję. Zauważmy, że współczynnik dyfuzji ma wymiar L^2/T , tzn. jest mierzony w m^2/s . Jest naturalne oczekiwać, że D będzie zależał od prędkości v dyfundujących cząsteczek. Mamy więc już m/s , potrzebujemy jeszcze czegoś o wymiarze długości. W gazach rozrzedzonych dyfuzja zachodzi szybciej. W rozrzedzonym gazie cząsteczki znajdują się średnio dalej od siebie, tzn. droga między kolejnymi zderzeniami wydłuża się. D może więc zależeć też od długości drogi swobodnej λ . Faktycznie, okazuje się, że $D = \frac{1}{3} v \lambda$. Z kolei według teorii kinetycznej gazów $v \sim \sqrt{T/m}$, więc pomiar D może dostarczyć informacji o masie molekuł. Z tabelki widać, że zależność $D \sim m^{-1/2}$ jest dość dobrze spełniona.

substancja	masa molekularna	temperatura (°C)	D (m^2/s)
H ₂	2	0	$6,34 \times 10^{-5}$
H ₂ O	18	8	$2,39 \times 10^{-5}$
O ₂	32	0	$1,78 \times 10^{-5}$
CO ₂	44	0	$1,39 \times 10^{-5}$
CS ₂	76	20	$1,02 \times 10^{-5}$

Dla dyfuzji w układach wieloskładnikowych zależność D od parametrów jest bardziej skomplikowana.

Dla dyfuzji w cieczach prosta analiza wymiarowa zawodzi, gdyż jest więcej czynników wpływających na D . W przypadku dużych molekuł kulistych (przypadek interesujący biologów) mechanizm dyfuzji przypomina mechanizm przemieszczania się kuli w cieczy lepkiej. Z doświadczenia otrzymujemy

$$D = \frac{kT}{6\pi a\eta},$$

gdzie k – stała Boltzmanna, a – rozmiar dyfundujących molekuł i η – lepkość cieczy. Tym razem $D \sim m^{-1/3}$; gdyż $m \sim a^3$, tzn. współczynnik dyfuzji jest niezbyt czuły na masę molekuł.

Potwierdzają to dane z tabelki dla współczynników dyfuzji w wodzie w temperaturze $t = 20^\circ\text{C}$.

molekuła	masa molekularna	D (m^2/s)
H_2O	18	2×10^{-9}
O_2	32	1×10^{-9}
$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ mocznik	60	$1,1 \times 10^{-9}$
$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ glukoza	180	$6,7 \times 10^{-10}$
$\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ sacharoza	342	$5,2 \times 10^{-10}$
kwas rybonukleinowy	13 683	$1,2 \times 10^{-10}$
hemoglobina	68 000	$6,9 \times 10^{-11}$
enzym ureaza	480 000	$3,5 \times 10^{-11}$

Zauważmy, że ze znajomości D możemy otrzymać bezpośrednio rozmiary dyfundującej molekuły. Masę molekuły możemy oszacować ze wzoru

$$m = \frac{4}{3}\pi\rho a^3,$$

gdzie ρ – gęstość suchej substancji, której molekuły dyfundują w cieczy. Gdy molekuły znajdują się w cieczy (wodzie), molekuły cieczy przyklejają się do powierzchni dyfundującej molekuły powiększając efektywnie jej rozmiary. Dla molekuł substancji biologicznych w wodzie doświadczenie mówi, że wynik trzeba poprawić o czynnik $\sim 1,5$, tzn. masa molekuły wyniesie

$$m = \frac{4}{3}\pi\rho a^3 / 1,5.$$

Dyfuzja zachodzi też w ciałach stałych. Jest to bardzo powolny proces wywołany ruchami cieplnymi atomów. Najlepiej zbadana jest dyfuzja w germanie i krzemie, gdyż dyfuzję wykorzystuje się tutaj do domieszkowania półprzewodników. Aby przyspieszyć proces dyfuzji, przeprowadza się go w wysokiej temperaturze. W tabelce poniżej podane są współczynniki dyfuzji dla niektórych pierwiastków.

pierwiastek	D (cm^2/s)	
	german w 800°C	krzem w 1300°C
B	4×10^{-13}	2×10^{-11}
Al	–	8×10^{-11}
Ga	1×10^{-13}	$2,5 \times 10^{-11}$
In	2×10^{-13}	$6,5 \times 10^{-12}$
Ge	8×10^{-14}	5×10^{-4}
P	$6,5 \times 10^{-12}$	2×10^{-4}
As	4×10^{-11}	$1,5 \times 10^{-12}$
Sb	2×10^{-11}	2×10^{-12}
Bi	–	$16,3 \times 10^{-12}$

Dane w tabelkach pochodzą z *Encyklopedii Fizyki*, PWN 1972 i książki J.B. Mariona, *General Physics with Bioscience Essays*, John Wiley & Sons 1979.

Wspominałem, że względem obserwatora na odległym, szybko poruszającym się kwazarze, przeżyłem już sto pięćdziesiąt lat. Teraz zaś okazuje się, że waże tam ponad dwieście kilogramów. Nie jest to ponętny obraz, ale na szczęście nie zależy mi aż tak bardzo na opinii odległego kwazarowca.

Przypomnijmy sobie, do jakich to wniosków doprowadziły nas doświadczenia omawiane w ostatnich trzech artykułach. Oto one:

1. Prędkość światła nie zależy od prędkości źródła lub obserwatora.
2. Czas w układzie poruszającym się płynie wolniej niż w spoczynku.
3. Długość obiektu poruszającego się względem obserwatora jest mniejsza niż w układzie, w którym ten obiekt spoczywa.
4. Masa ciała poruszającego się względem obserwatora jest większa niż wtedy, gdy ciało spoczywa.

Wszystko to razem doprowadziło fizyków do wniosku, że żyjemy nie w przestrzeni trójwymiarowej, lecz w czterowymiarowej czasoprzestrzeni. Tu jednak kończą się doświadczenia, a zaczynają rozważania teoretyczne, których obiecałem unikać.

Unikam rozważań teoretycznych i podawania wzorów. Te każdy zainteresowany Czytelnik może znaleźć w dowolnym podręczniku fizyki, który zajmuje się tymi zagadnieniami. Moim celem nie było, oczywiście, nauczanie Państwa szczególnej teorii względności, ale pokazanie, ile materiałów do przemyśleń dostarczają nam doświadczenia, które możemy wyjaśnić na jej podstawie. Takich doświadczeń można by wyliczyć jeszcze wiele. Nie są to doświadczenia z życia codziennego, ale nie są to też czysto akademickie doświadczenia nikomu do niczego nieprzydatne. Bez szczególnej, a również ogólnej teorii względności trudno by zrozumieć ruch ciał niebieskich, szczególnie przy osiąganych dokładnościach pomiarów. A to już ma praktyczne znaczenie dla astronautów.

Chciałbym Państwu polecić coś z lektury. Osobiście bardzo cenię wydaną w serii *Biblioteczka Delt* broszurę Andrzeja Szymachy i Piotra Lasoty *Teoria względnosci*. Książeczka jest dawno wyczerpana, ale na pewno można ją znaleźć w niejednej bibliotece. Kto bardziej dociekliwy, może zajrzeć do uniwersyteckiego podręcznika napisanego przez A. K. Wróblewskiego i J. Zakrzewskiego *Wstęp do fizyki*. Znajdzie tam wiele opisów doświadczeń, o których mówiłem.

Następnym razem wrócimy do bardziej przyziemnych spraw i zaproponuję Państwu zamrażanie wody w lodówce.