ROZDZIAŁ II. Wielkości fizyczne

2.1. Czytanie wielkości fizycznych

Fizyka opisuje otaczający nas świat – kolor kwiatów, lot samolotu, jesienną niepogodę. W odróżnieniu jednak od innych nauk i sztuk takich, jak poezja i malarstwo, fizyka opisuje świat za pomocą liczb. I tak, komputer kontrolujący lot samolotu sprawdza jego prędkość (950 km/h), wysokość lotu (11 km nad poziomem morza), współrzędne geograficzne aktualnego położenia samolotu (52°58’ do 53°04’ szerokości geograficznej północnej i 18°32" do 18°43" długości geograficznej wschodniej dla Torunia), temperaturę na zewnątrz (-45ºC) i wiele jeszcze innych *wielkości fizycznych*. Jesienna niepogoda jest opisana przez wielkość opadu deszczu (20 mm w ciągu 24 godzin), kierunek i siłę wiatru (północno–zachodni, 320º NW, 6 stopni w skali Beauforta), ciśnienie atmosferyczne (980 hektopaskali). Nawet kolor kwiatu można opisać za pomocą wielkości fizycznej, jaką jest długość fali światła.

Aby rozumieć ten codzienny opis świata, trzeba umieć nie tylko *czytać* liczby, ale umieć je *ocenić*. Temperatura na zewnątrz, minus 45 stopni Celsjusza (-45º C) wydaje się temperaturą bardzo niską, ale wysoko nad ziemią, 10–11 km, ta temperatura powinna być nawet niższa – około -55ºC. Ciśnienie atmosferyczne, 98 tysięcy paskali, wydaje się ogromne, ale w pogodny dzień to ciśnienie (na poziomie morza) powinno wynosić 101 tysięcy paskali.

Fot. 2.1. Stała Plancka w symbolu Instytutu Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu

W ocenie wartości fizycznych bardzo istotna jest *dokładność* pomiaru. Przy prognozie ilości deszczu bardzo trudno przewidzieć dla Warszawy (jest to praktycznie niemożliwe), czy więcej deszczu spadnie na Sadybie, czy na Woli. Z tego powodu, stwierdzenie „opad 20 mm”, czyli 2 cm deszczu, jest prognozą (przed deszczem), czy pomiarem (po deszczu) dość dokładnym. Dla samolotu natomiast zwiększenie prędkości z 950 km/h do 970 km/h powoduje znaczny wzrost zużycia paliwa, dlatego komputer utrzymuje prędkość z dość dużą dokładnością. Ale i zmiana ciśnienia powietrza o 3% w prognozie pogody może oznaczać różnicę między jesienną szarugą a pięknym babim latem.

Niektóre wielkości fizyczne są niezmienne, jak na przykład prędkość światła. Co więcej, pomiar prędkości światła daje zawsze tę samą wartość, niezależnie, czy mierzymy ją w szkolnej klasie, czy w satelicie lecącym nad Ziemią. Wartość prędkości światła znamy z dużą dokładnością. Wynosi ona trzysta tysięcy kilometrów na sekundę, a dokładniej 299 792 458 m/s. Jest kilka wielkości fizycznych, które znamy z dużą dokładnością, jedną z nich jest tak zwana „stała Plancka”, której wartość jest wypisana przy wejściu do Instytutu Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu (zob. fot. 2.1.).

Wreszcie, dla opisania niektórych wielkości fizycznych, jak na przykład wiatru, potrzebne jest podanie nie tylko ich wartości (8 metrów na sekundę), ale i kierunku (320º NW). Takie wielkości, jak prędkość wiatru nazywamy *wektorami*. Dla innych wielkości, jak na przykład temperatury, nie określamy kierunku. Takie wielkości nazywamy *skalarami*. Skalarem jest na przykład masa ciała (zwana mylnie „ciężarem”), pole powierzchni boiska do siatkówki i wiele innych. Wektorem jest nie tylko prędkość, ale na przykład siła, z którą popychamy szkolną ławkę (bo istotny jest kierunek tego „popychania”). O siłach i prędkościach będziemy mówić w dalszych częściach poręcznika, na razie wróćmy do liczb i ich dokładności.

2.2. Wielkości przybliżone

Stan finansów szkoły corocznie jest sprawozdawany do jej władz. Sprawozdanie to zawiera wpływy i wydatki, i podawane jest z dokładnością do jednej złotówki. Finanse wielkich fabryk samochodów, o wiele razy większe niż budżet szkoły, też są sprawozdawane z dokładnością do jednej złotówki (lub euro). Nawet wydatki całej Unii Europejskiej jako organizacji, w 2009 roku 116,1 miliarda euro, są sprawozdawane z tą samą dokładnością. Planowane wydatki Unii na rok 2009 to dokładnie 116 096 062 329 € .

Wielkości fizyczne podajemy w inny sposób niż budżet Unii. Wielkości te są prawie zawsze wynikiem pomiaru, a ten jest przeprowadzany z określoną *dokładnością*. I tak, z inną dokładnością mierzona jest odległość między słupkami na autostradzie – stoją one co 50 metrów i kilka centymetrów różnicy w ich dokładnym ustawieniu nie jest istotne. Z kolei, odległość Księżyca od Ziemi, mimo że ogromna (średnio 384 tys. km) jest mierzona z dokładnością lepszą niż 1 cm. Stąd wiemy, że Księżyc bardzo powoli, 3 cm na rok, ale nieuchronnie oddala się do Ziemi.

Dla jasnego podkreślenia, które wielkości znamy (lub powinniśmy znać) z dużą dokładnością, fizycy posługują się pojęciem *błędu* (lub raczej *niepewności* pomiaru). I tak zapis $x = 50{,}0 \pm 0{,}1$ m oznacza, że *niedokładność* w ustawienia słupka nie powinna przekraczać 10 centymetrów. Zapis $c = 299\,792\,458 \pm 1$ m/s oznacza, że prędkość światła znamy z dokładnością do jednego metra na sekundę.

Porównując dokładność rozstawienia słupków z dokładnością wyznaczenia prędkości światła ta pierwsza wydają się być lepsza. W rzeczywistości jest inaczej. Dla oceny tych dwóch dokładności należy porównać wielkości *względne*. I tak słupki są rozstawione z dokładnością 0,1 części na 50 części, czyli 0,2 części na sto, czyli 0,2%. Prędkość światła znamy z dokładnością 0,00000033%. Dokładność współczesnego wyznaczenia stałej Plancka ($6{,}62606896 \cdot 10^{-34}$ J·s) wynosi 0,000005%.

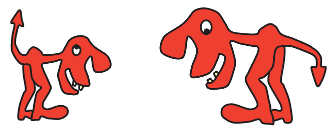
Zadanie 2.1

Zaznacz na drzwiach swoją wysokość, a następnie zmierz tę zaznaczoną wysokość za pomocą miarki krawieckiej. Z jaką dokładnością (w centymetrach) jesteś w stanie zmierzyć tę wysokość? Ile wynosi niepewność *względna* w procentach (czyli stosunek niepewności wyrażony w centymetrach do twojej wysokości)?

Dokładność pomiaru

Jak zapisywać liczby, które nie są dokładne? Regułą stosowaną przez fizyków jest podawanie błędu pomiaru. Czasem te błędy mogą być zupełnie duże, w porównaniu z mierzoną wielkością. Dużą niepewnością obarczone są, na przykład, oszacowania (pomiary lub teoria) masy najmniejszych składników materii, cząstek elementarnych zwanych *kwarkami* (nazwa być może od serbołużyckiego „twaróg"). Masy dwóch kwarków, *up* i *down*, z których składa się prawie cała znana nam materia, znane są, we właściwych jednostkach, z dokładnością $1{,}5 < m_{up} < 5$ i $5 < m_{down} < 9$. O dziwo, masy kwarków „egzotycznych" znamy z większą dokładnością *względną*. I tak najcięższy z nich ma masę (w jednostkach 1000 razy większych) $m_{top} = 174{,}3 \pm 3{,}2$.

Wynik jeszcze mniej dokładny, choć niezwykle ciekawy, dały doświadczenia przeprowadzone na początku XXI wieku dla sprawdzenia, czy czas może biec do tyłu (innymi słowy, czy koniecznie musimy się starzeć, czy też w niektórych przypadkach można „samoczynnie" odmłodnieć). Doświadczenia dotyczyły też kwarków, tak zwanych *dziwnych*.



Fot. 2.2. Kwarki *down* mają nieco większą masę niż kwarki *up*. O ile większą, tego dokładnie nie wiemy © T. Wróblewski

Badania te wykazały, że *prawdopodobieństwo*, że czas zacznie biec do tyłu wynosi k = 3,0 ± 3,3 [6]. Jak widzicie, niepewność wyniku jest większa niż sam wynik! *Zmierzone* prawdopodobieństwo *odwrócenia* czasu wynosi więc ZERO!
Jak zapisywać liczby, o których wiemy, że ich dokładność jest ograniczona? Należy je *zaokrąglić.*

Reguły zaokrąglania liczb

Zaokrąglanie liczb polega na odrzuceniu cyfr, które uważamy za niedokładne lub nie są potrzebne w danym momencie. Dla przykładu, nie ma potrzeby podawania w każdym dokumencie dokładnego budżetu Unii Europejskiej 116 096 063 329 €. Dla potrzeb prasy wystarczy podać, że budżet ten wynosi 116 mld euro. W tym zaokrągleniu odrzuciliśmy wszystkie cyfry, oprócz pierwszych trzech.

Zaokrąglania liczb dokonuje się w dwojaki sposób, w zależności od tego, jaką wartość ma *pierwsza* z odrzucanych cyfr. Jeśli jest ona w zakresie od „0” do „4”, to wszystkie niepotrzebne cyfry są po prostu odrzucane. Jeśli natomiast pierwsza z odrzucanych cyfr ma wartość w zakresie od „5” do „9”, to *ostatnia* z zachowanych cyfr zostaje *zwiększona* o jeden.

Przykład 2.1

Zaokrąglić liczbę x = 12,848571 do a) trzech, b) pięciu, c) siedmiu cyfr znaczących[7].

Rozwiązanie:

a) czwartą cyfrą w podanej liczbie jest „4”. Zgodnie z podaną regułą odrzucamy więc pozostałe cyfry, pozostawiając x = 12,8.
b) szóstą cyfrą jest „5”. Zgodnie z regułą, zwiększamy o jeden piątą cyfrę. W tym przybliżeniu x = 12,849.
c) ósmą cyfrą jest „1”. Dla zaokrąglenia po prostu ją odrzucamy i otrzymujemy x = 12,84857.

Istnieje wiele sposobów na zapis tej samej liczby. Wybrany sposób często świadczy o dokładności liczby lub o celu, w jakim ją przedstawiamy. Pisząc, że Maria Curie-Skłodowska przerobiła własnoręcznie „półtora tony” rudy uranowej, mamy na celu podkreślenie wielkiego wysiłku przez nią włożonego, a nie dokładne „zważenie” tej rudy. W celu obliczenia, jak długo biegnie światło ze Słońca do Ziemi (odległej o 149 mln km), wystarczy przyjąć prędkość światła jako „trzysta tysięcy km na sekundę”. Stąd wynik: 500 sekund, czyli około 8 minut. Dobór sposobu zapisu jest szczególnie ważny, jeśli wielkości nie są dokładne, albo zmienne w czasie. I tak odległość Ziemi od Słońca wynosi 147 mln km w dniu 2 stycznia zaś 151 mln km w dniu 2 lipca. Rozsądniej jest więc podawać „mln km” niż podać wszystkie cyfry w kilometrach.

W szczególności dysponujemy tzw. *notacją* naukową, w której zamiast wielu zer na końcu liczby, podajemy po prostu ich ilość. Milion, czyli sześć zer, zapiszemy jako 10^6. I tak odległość od Słońca, 149 mln km, możemy zapisać jako $149 \cdot 10^6$ km lub lepiej, $149 \cdot 10^9$m.

---

[6] A. Angelopoulos i in., *A determination of the CPT violation parameter Re(δ) from the semileptonic decay of strangeness–tagged neutral kaons*, Physics Letters, B 444, 1998, 52-60.
[7] Za cyfry znaczące uważamy wszystkie, za wyjątkiem zer na początku liczby lub cyfr na końcu liczby, które należy odrzucić z uwagi na niepewność pomiaru.

Przykład 2.2

Zapisz w notacji naukowej liczby R = 384 tys. km i E = 116,1 mld euro.

Rozwiązanie:

$R = 384 \cdot 10^3$ km $= 384 \cdot 10^6$ m
$E = 116{,}1 \cdot 10^9$ €

2.3. Obliczenia przybliżone

Wydatki Unii Europejskiej są znane z dużą dokładnością, bo sumują się na nie dokładne wielkości wydatków na poszczególne cele. I tak w budżecie 2009 roku na pomoc ekonomiczną dla gospodarek było przeznaczone 45 999 519 679 €, a na ochronę środowiska 52 566 129 680 €. Oczywiście, jeśli jeden z oddziałów („Dyrektoriatów") Unii nie potrafiłby ocenić własnych wydatków z dokładnością do jednego euro, cały budżet nie byłby spisany z taką dokładnością.

W fizyce, gdzie wielkości są z natury rzeczy prawie zawsze przybliżone[8], potrzebne są reguły działań matematycznych na liczbach przybliżonych. Podstawą tych reguł jest określenie, z jaką dokładnością znamy poszczególne składniki (w dodawaniu) lub czynniki (w mnożeniu) tych działań. Inne nieco reguły dotyczą dodawania, a nieco inne mnożenia.

W dodawaniu istotne jest, ile cyfr *po przecinku* (lub przed przecinkiem) znamy dokładnie. Spróbujmy na przykład policzyć, jaka powinna być masa jednej cząsteczki wody H_2O, która składa się z dwóch atomów wodoru i jednego atomu tlenu. Masa atomu wodoru (w jednostkach atomowych, j. at.) wynosi 1,0000245 j. at., a masa atomu tlenu 16,2458 j. at. Masę atomu wodoru znamy więc z dokładnością do 7 cyfr po przecinku, ale masę atomu tlenu zaledwie z dokładnością do 5 cyfr po przecinku. Masę cząsteczki wody możemy więc określić jedynie z dokładnością do 5 cyfr po przecinku.

W dodawaniu liczb przybliżonych istotna jest dokładność oceny każdego ze składników, tzn. ile cyfr ***po*** przecinku jest dokładnych. Suma liczb przybliżonych jest określona z taką dokładnością (tzn. zawiera tyle cyfr po przecinku), z jaką dokładnością jest znana najmniej dokładna liczba.

Przykład 2.3 dla przyszłych farmaceutów/farmaceutek

Umiejętność dodawania liczb przybliżonych jest potrzebna również np. w aptece.

I tak, jeśli jeden ze składników leku jest znany z dokładnością do 5 miejsc po przecinku, a drugi z dokładnością do 2 cyfr po przecinku, to i tak suma będzie określona z dokładnością do zaledwie 2 cyfr po przecinku.

Leki na serce muszą być podawane z dużą precyzją. Jeden z nich (atropina) jest podawany w dawkach po 0,1 miligrama, czyli 0,0001 grama. Jeśli jednak na opakowaniu leku znajdziemy informację, że zawartość „czynnika aktywnego" wynosi 0,1 miligrama, to zawartość ta nie może być określona z dokładnością mniejszą niż około 10%, czyli 0,01 miligrama. Zawartość leku możemy więc podać jako 0,00010 grama – z dokładnością do 5 miejsc po przecinku.

[8] Albert Einstein podobno powiedział, że dobry Bóg wymyślił tylko liczby naturalne, jak 1, 2, 3 a całą resztę, czyli liczby ułamkowe, pierwiastki itd. wymyślił człowiek. W fizyce jedynie „ilość atomów" jest liczbą naturalną, o ile potrafilibyśmy je zliczyć, a inne wielkości są liczbami przybliżonymi.

Trudno byłoby podać pigułkę o masie 0,1 mg (jest to mniej więcej ziarenko cukru pudru). Lek „aktywny” jest więc mieszany z innymi składnikami, „wypełniaczami”, jak mąka ziemniaczana, celuloza itp. Typowe pigułki, niezależnie, czy są to witaminy czy leki na serce, mają masę 0,2±0,01 grama, co dla ścisłości zapiszemy jak 0,20 g. Masa wypełniacza, w gramach, jest więc określona z dokładnością do dwóch miejsc po przecinku. Skład pigułki na serce jest więc następujący:

– składnik aktywny	0,000010 grama
– wypełniacz	0,20 grama
Razem 0,000010 g + 0,20 g =	0,20 g

Fot. 2.3. Pigułki są duże i kolorowe, a zawierają głównie cukier i mąkę ziemniaczaną

W mnożeniu (lub dzieleniu) dokładność wyniku zależy nie od ilości cyfr dokładnych po przecinku, ale od ilości *wszystkich* cyfr dokładnych w każdym z czynników, niezależnie od tego czy są one po, czy przed przecinkiem. Dokładność wyniku jest taka sama jak dokładność *najmniej* dokładnego z czynników (albo dzielnej lub dzielnika przy dzieleniu). Rozważmy taki przykład.

Przykład 2.4 dla przyszłych kierowców

Na stacji benzynowej wlano do zbiornika 50 litrów benzyny. Dokładność podziałki odmierzającej wynosi 10 ml (czyli 0,01 litra). Samochód przejechał dokładnie 658,154 km. Jakie jest zużycie paliwa na 1 km?

Rozwiązanie:

Dokładność podziałki 10 ml oznacza (dla fizyka), że wlano V = 50,00 ± 0,01 litra. Ilość benzyny znamy więc z dokładnością czterech cyfr *znaczących*.

Długość przejechanej drogi, według słupków na drodze możemy określić z dokładnością nie gorszą niż 1 metr. Przejechana droga wynosi więc s = 658,152 ± 0,001 km. Drogę tę znamy z dokładnością do sześciu cyfr znaczących.

Aby obliczyć zużycie paliwa na 1 km dzielimy ilość całkowitą benzyny przez ilość przejechanych kilometrów

x = 50,00 : 658,152 = 0,07597029 litra na kilometr.

Wynik ten jest jednak niepoprawnie zapisany! Podaliśmy aż 7 cyfr znaczących – 7597029 (zera przed „7” nie liczą się jako cyfry *znaczące*). Ilość paliwa znamy z dokładnością do czterech cyfr znaczących, dlatego w wyniku wolno nam podać jedynie 4 cyfry znaczące. Poprawne zapisanie wyniku będzie następujące:

x = 0,07597 litrów na kilometr.

Tak naprawdę, zarówno ilość wlanego paliwa, jak i długość przejechanej drogi (jak ją liczyć? kiedy zgaśnie silnik, czy kiedy samochód się zatrzyma?) jest określona z niewielką liczbą cyfr *znaczących*. Dlatego zużycie paliwa podaje się z dokładnością nie większą niż 2–3 cyfry znaczące. I tak w naszym przypadku zapisalibyśmy x = 7,6 litra na 100 kilometrów.

W ***mnożeniu*** liczb przybliżonych istotna jest ilość cyfr ***znaczących najmniej*** dokładnego czynnika. Iloczyn podajemy z dokładnością do tylu cyfr znaczących, ile zawiera ten czynnik.

2.4. Jednostki pomiaru wielkości fizycznych

W jednej z amerykańskich nowel bohater, mały chłopiec, leży pod pierzyną i oczekuje śmierci lada moment. Jego mama zmierzyła mu temperaturę i okazało się, że wynosi ona 102 stopnie. Tymczasem w szkole chłopiec słyszał, że temperatura normalna wynosi 36,6 stopnia, a umiera się przy temperaturze 42 stopni. Oczywiście, mama mierzyła stopnie w skali Fahrenheita (gdańszczanin, 1686–1736) a w szkole uczono temperatury w skali Celsjusza (Szwed, 1701–1744). W skali Fahrenheita właśnie 100 stopni jest normalną temperaturą ciała (a właściwie 98 stopni).

Ważne jest więc uzgodnienie *jednostek* pomiaru. Fizycy poświęcają ujednoliceniu jednostek miar dużo uwagi. Na ratuszu w Chełmnie znajduje się średniowieczny *wzorzec* długości, żelazna sztaba o długości 4,35 metra. Dziś, powszechną miarą długości, przynajmniej w Europie, jest 1 metr. Długość jednego metra przyjęto jako 1/10 000 ćwiartki równika Ziemi. Jeden metr to mniej więcej zamaszysty krok żołnierza. Dla dokładniejszego określenia, we Francji w XIX wieku zbudowano wzorzec metra, ze szlachetnego stopu (platyny z irydem), który nie rozszerza się ze wzrostem temperatury. Dziś taki wzorzec nie jest dostatecznie dokładny i metr wyznacza się za pomocą światła specjalnego lasera.

Podobnie, za pomocą lasera, określa się jednostkę czasu – *sekundę*. Jednostką czasu u starożytnych Rzymian była *godzina* (hora, stąd skrót „h"); *małą* jednostką była *minuta* (1/60 godziny), a *drugą*, mniejszą jednostkę nazwano *sekundą* (1/3600 godziny). Podobnie jak jednostka długości, tak i jednostka czasu wyznaczana jest dziś za pomocą laserów. Jakich? Zajrzyj do Internetu – zmienia się to co jakiś czas, w miarę postępu badań fizyki, i wzorzec przyjęty dziś może nim nie być za rok.

Ilość substancji fizycy definiują jako *masę*. Jeśli mówi się potocznie, że Bolek waży 47 kg, to poprawnie powinno się powiedzieć: „masa Bolka to 47 kg". Podobnie jak wzorzec metra, tak wzorzec kilograma był ustalony za pomocą odważnika (cylinder o średnicy 39 mm i o wysokości 39 mm) ze stopu irydu z platyną i przechowywany w Instytucie Miar i Wag w Sevres pod Paryżem. Dziś masę określamy za pomocą metod chemicznych (mas pojedynczych składników materii – atomów).

Czwartą, bardzo ważną wielkością w fizyce jest temperatura. Temperaturę, w skali międzynarodowej, określało się do niedawna za pomocą punktu topnienia (0ºC) i wrzenia wody (100ºC). Dziś, skala temperatury jest taka sama, ale sposoby jej wyznaczenia są dokładniejsze. Najniższą możliwą temperaturą jest -273,16ºC. W tej temperaturze zanika ruch cząsteczek gazu. Użytecznie jest więc przyjąć za temperaturę zerową -273,16ºC. Taką skalę temperatur nazywamy skalą Kelwina. Zmiana temperatury o 1 kelwin i 1 stopień Celsjusza jest taka sama; dwie skale różnią się tylko wyborem temperatury zerowej.

Zestawienie wielkości podstawowych:

- jednostką długości (lub odległości) jest **metr**,
- jednostką czasu jest **sekunda** (1 godzina liczy 3600 sekund),
- jednostką masy jest **kilogram** (a 1 gram to tysięczna część kilograma),
- jednostką temperatury jest stopień Celsjusza (lub **Kelwina**, dokładnie taki sam).

Istnieje jeszcze kilka innych wielkości fizycznych określanych jako *podstawowe*. Jedną z nich jest na przykład wielkość natężenia prądu elektrycznego (amper), inną – jasność źródeł światła (kandela). Odpowiednie definicje znajdziesz bez trudu w Internecie. Dziś, większość z nich, podobnie jak jednostkę masy, można określić za pomocą własności obiektów z mikroświata – atomów i elektronów.

2.5. Przedrostki jednostek pomiaru

Jak już na pewno zauważyłeś, bardzo rzadko korzystamy z podstawowej jednostki fizycznej takiej jak metr. Do pomiarów odległości między miastami używamy *kilo*–metra. Wzrost podajemy w *centy*–metrach, a grubość wkładu do ołówka w *mili*–metrach. Używamy więc *przedrostków*. Przedrostki te pochodzą z języka greckiego. Na przykład „centy" oznacza część setną. W tabeli poniżej podajemy znaczenie i skróty najczęściej używanych przedrostków. Wytłuszczoną czcionką podajemy te najważniejsze.

Wielokrotności „10"

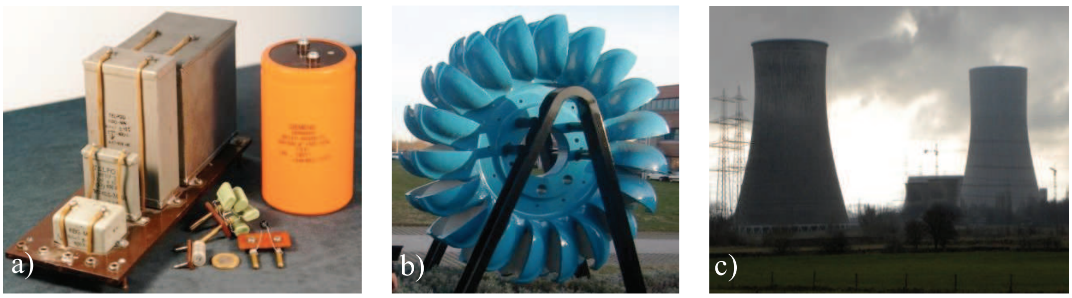
Mnożnik	Nazwa	Skrót	Przykład
10	deka	d	dekagram = 10 g
100	hekto	h	hektolitr = 100 litrów; 1 hektar = 100 arów = 100x100 m^2
1000	**kilo**	**k**	**kilogram = 1000 gramów; kilometr = 1000 m**
1 000 000	**mega**	**M**	**megawat (moc turbiny elektrowni) = 1 000 000 W**
1 000 000 000	giga	G	gigawat (moc elektrowni atomowej) = 1 000 000 000 W
1 000 000 000 000	tera	T	10 terawat (elektrownie świata) = 10 000 000 000 000 W

I tak, *moc* kuchenki elektrycznej to 1 kilowat, moc małej turbiny wodnej to 1 megawat (tysiąc razy więcej), a moc elektrowni atomowej to 1 gigawat (moc tysiąca małych turbin wodnych).

Ułamki „10"

Mnożnik	Nazwa	Skrót	Przykład
0,1	decy	dc	1 decymetr = 0,1 m = 10 cm; 1 dcm^3= 1 litr
0,01	**centy**	**c**	**1 centymetr = 0,01 m = 10 mm**
0,001	**mili**	**m**	**1 milimetr = 0,001 m; mililitr = 0,001 litra = 1 cm^3**
0,000 001	**mikro**	**µ**	**1 mikrometr („mikron") = 0,001 mm; włos = 50 µm**
0,000 000 001	nano	n	0,1 nanonometra = typowe rozmiary atomu
0,000 000 000 001	pico	p	picofarad = pojemność elektryczna małego kondensatora
10^{-18}	atto	a	attosekunda = czas przeskoku elektronu w atomie

Każdy kraj nieco inaczej używa przedrostków jednostek miar. W Polsce kupuje się mięso na „deko", czyli dekagramy, we Włoszech na „etto", czyli hektogramy. Włoskie dwa „etti" to polskie 20 „deka", a właściwie (w systemie międzynarodowym) 0,2 kg. Pojemność butelek z winem Włosi podają w mililitrach (750 ml), Polacy w litrach (0,75 litra), a Francuzi w centylitrach (75 cl). Znajomość fizyki może się więc przydać w restauracji za granicą!



Fot. 2.6. Przedrostki jednostek miar pozwalają w skrótowy sposób charakteryzować szeroki zakres wielkości fizycznych: a) „pojemność" kondensatorów zmienia się od *piko* przez *nano* do *mikro*; b) moc małej turbiny wodnej (wysokości człowieka) to 1 MW; c) moc jednego reaktora w elektrowni atomowej to typowo 1 GW

2.6. Przykład pomiaru fizycznego – gęstość

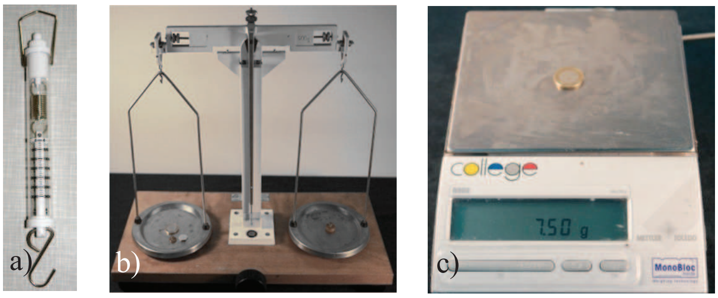
Jako praktyczny przykład pomiaru fizycznego i stosowanych jednostek spróbujemy wyznaczyć *gęstość* kilku ciał. Pojęcie gęstości zostało wprowadzone przez Archimedesa. Legenda głosi, że szukał on sposobu upewnienia się, czy złotnik nie oszukał władcy Syrakuz, dodając do złota w koronie nieco miedzi. Złoto należy do najcięższych metali, natomiast miedź jest niewiele cięższa od żelaza. Łatwo zważyć koronę, jednak aby stwierdzić, czy jest ona zrobiona z czystego złota, czy ze złota z domieszką miedzi, należy wyznaczyć jeszcze jej *objętość*.

Fot. 2.7. Ruiny starożytnych Syrakuz na Sycylii, miasta rodzinnego Archimedesa

Kawałek cegły „waży” więcej niż kawałek drewna takich samych rozmiarów. Wynika to z mniejszej *gęstości* drewna w porównaniu do materiału cegły.

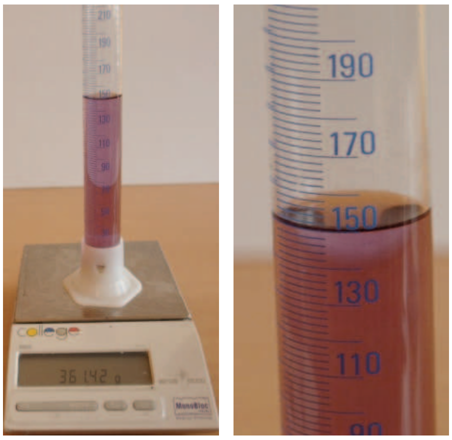
Gęstością nazywamy stosunek **masy** ciała do jego **objętości.** Gęstość podajemy w $\frac{kg}{m^3}$.

Dla wyznaczenia *gęstości* danego materiału musimy znać jego masę oraz objętość. Masę wyznaczamy w prosty sposób, za pomocą wagi. Innej wagi użyjemy do wyznaczenia naszej masy, innej używa gospodyni domowa w kuchni, innej jeszcze złotnik. Najprostszą wagą jest sprężynka, która rozciąga się więcej, jeśli jest do niej podczepiona większa masa, zob. fot. 2.8.

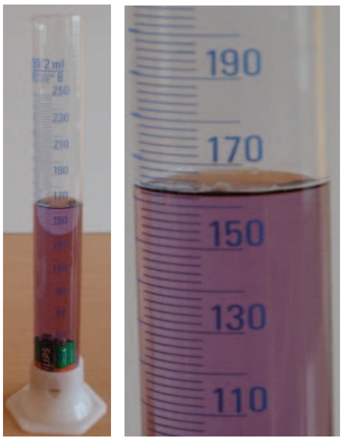


Fot. 2.8. Rodzaje wag:
a) sprężynowa; b) szalkowa;
c) elektroniczna

Wyznaczenie objętości jest nieco trudniejsze. Archimedes, wchodząc do wanny pełnej wody, zauważył, że objętość wody, która się wylała, odpowiada objętości jego ciała. Mamy więc sposób na wyznaczenie nieznanej objętości ciała.

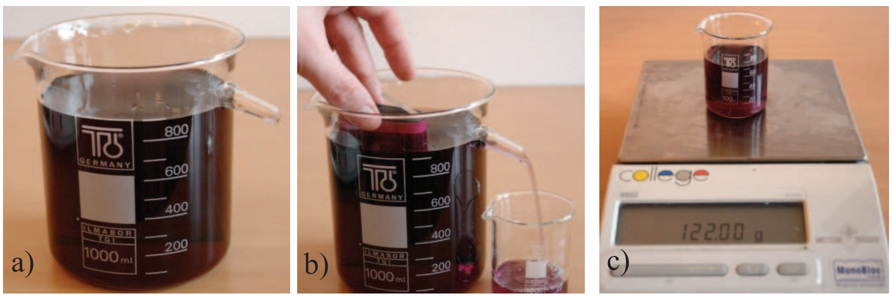
a)


Fot. 2.9. a) Wyznaczanie objętości: menzurka z początkowym poziomem cieczy (przed wrzuceniem badanego ciała do naczynia)

b)


Fot. 2.9. b) Wyznaczanie objętości: menzurka z podniesionym poziomem cieczy (po wrzuceniu badanego ciała do naczynia poziom wody podniósł się)

1° Możemy je wrzucić do szklanego naczynia z podziałką (tak zwanej *menzurki*), wypełnionego częściowo wodą i zmierzyć, o ile cm^3 podniósł się poziom wody (patrz fot. 2.9a. i 2.9b.).



Fot. 2.10. Wyznaczanie objętości: menzurka, z której wylała się woda (po wrzuceniu badanego ciała do naczynia, część wody wylała się)

2° Możemy wrzucić badane ciało do jakiegokolwiek naczynia pełnego wody, zebrać wylaną wodę, wlać ją do menzurki i zmierzyć jej objętość. Objętość wylanej wody, z grubsza, odpowiada objętości ciała (patrz fot. 2.10.).

3° Możemy też wyznaczyć objętość ciała tylko za pomocą wagi. Wiemy (taka była początkowa definicja grama), że 1 cm^3 wody ma masę 1 g. Wystarczy więc ustawić na wadze jakiekolwiek naczynie pełne wody i zapisać wskazanie wagi (m_1). Następnie wrzucamy badany przedmiot i ponownie zapisujemy wskazanie wagi. Tym razem wskazuje ona sumę $m_1 + m_2$ masy naczynia z wodą i przedmiotu m_2. Na końcu zdejmujemy naczynie z wodą (i zanurzonym w niej przedmiotem) i „ważymy” masę wylanej wody m_3. Masa wylanej wody wyrażona w gramach odpowiada objętości V przedmiotu w cm^3.

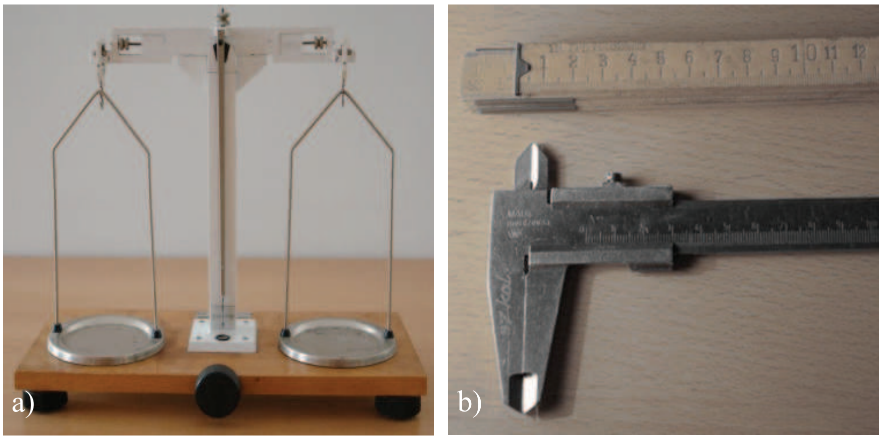
Gęstość d obliczamy, dzieląc masę przedmiotu m_2 przez jego objętość V:

$$d = \frac{m_2}{V}.$$

Zadanie 2.2.

Wyznaczyć gęstość kawałka kredy szkolnej.

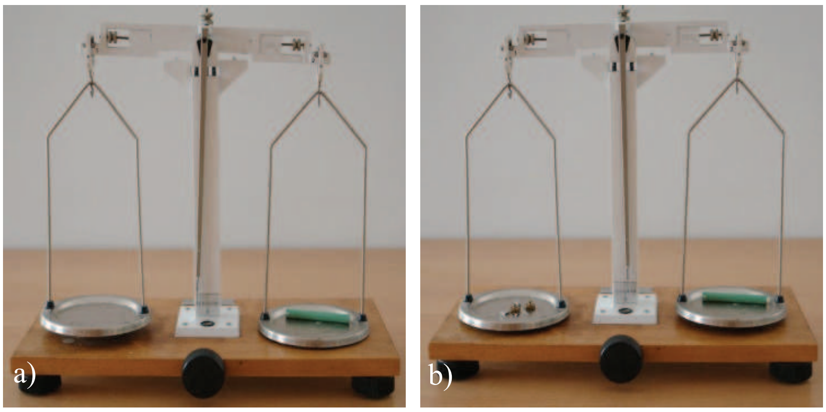
Do wyznaczenia gęstości kredy szkolnej będzie potrzebna waga szalkowa, odważniki i suwmiarka (patrz fot. 2.11.)

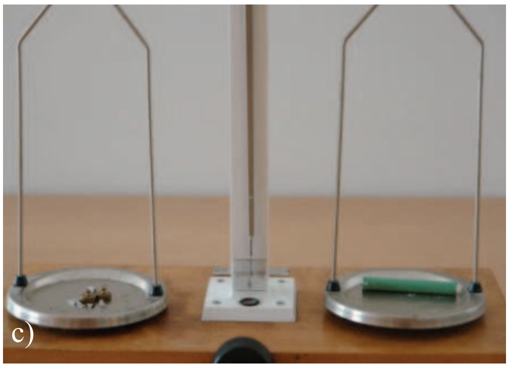


Fot. 2.11. Narzędzia potrzebne do wyznaczenia gęstości kawałka kredy szkolnej: a) waga szalkowa; b) suwmiarka.

Kolejne etapy tego doświadczenia przebiegają następująco:

1° Kładziemy kawałek kredy szkolnej na wadze szalkowej i za pomocą dokładanych odważników ważymy tę kredę, porównując jej masę z masą odważników. Ustalenie masy ciała na wadze szalkowej wiąże się z doprowadzeniem jej do równowagi (patrz fot. 2.12.)

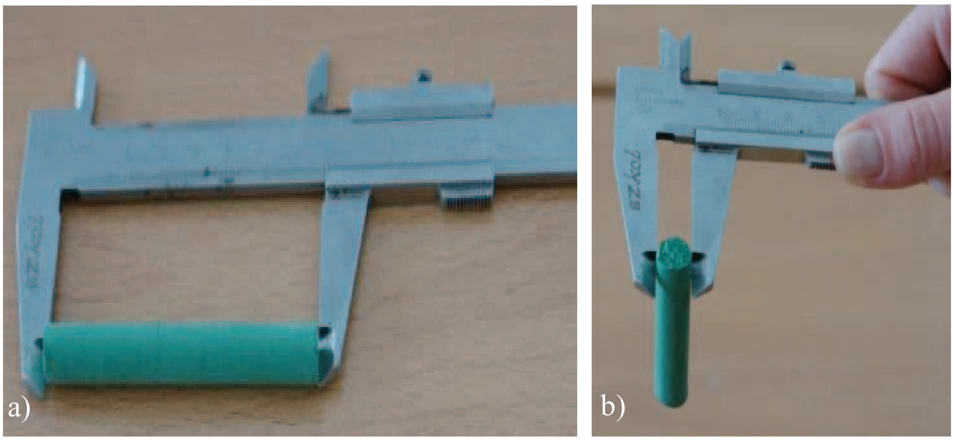




Fot. 2.12. Kolejne etapy przeprowadzenia doświadczenia polegającego na wyznaczeniu gęstości kawałka szkolnej kredy.

Na koniec odczytujemy wartości z użytych w pomiarze odważników i je sumujemy. W naszym przypadku użyliśmy odważników o masach: 5 g, 5 g, 500 mg, 200 mg, 100 mg, 20 mg, 20 mg, co dało łączną masę 10,84 g. W ten sposób wyznaczyliśmy masę kawałka kredy szkolnej.

2° Wyznaczamy objętość kawałka kredy szkolnej przy użyciu suwmiarki. Kreda szkolna ma kształt walca. Zatem do wyznaczenia objętości potrzebna jest jej wysokość oraz promień.



Fot. 2.13. Wyznaczanie objętości kredy szkolnej za pomocą suwmiarki: a) wyznaczanie wysokości; b) wyznaczanie średnicy.

Kreda ma wysokość 7,71 cm oraz średnicę 1,02 cm. Promień kredy jest więc równy 0,51 cm. Po podstawieniu tych danych do wzoru $V = \pi R^2 h$, otrzymujemy objętość równą 6,3 cm³.

3° Ze wzoru na gęstość mamy:

$$d = \frac{m}{V} = \frac{10{,}84\ \text{g}}{6{,}3\ \text{cm}^3} = 1{,}72 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}.$$

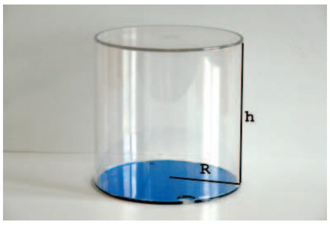
W szczególnych przypadkach, jeżeli chodzi o przedmioty o prostych kształtach jak kauczukowa piłeczka (kula), bateryjka „paluszek" (walec), szklana piramida (ostrosłup), możemy wyznaczyć objętość ciała, korzystając ze wzorów matematycznych.

Przypominamy je poniżej.

Kula o promieniu *R*

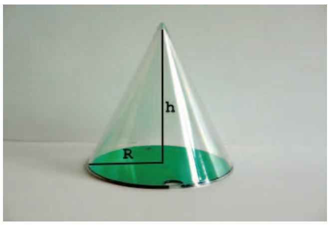
$$V = \frac{4}{3}\pi R^3$$

Walec o wysokości *h* i o podstawie o promieniu *R*



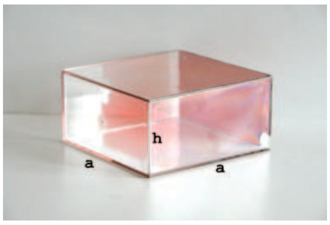
$$V = \pi R^2 h$$

Stożek o wysokości *h* i o podstawie o promieniu *R*



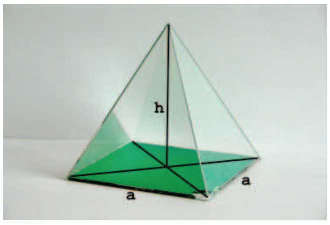
$$V = \frac{1}{3}\pi R^2 h$$

Graniastosłup o podstawie kwadratowej o boku *a* i wysokości *h*



$$V = a^2 h$$

Piramida o podstawie kwadratowej o boku *a* i wysokości *h*



$$V = \frac{1}{3}a^2 h$$

Wzory te pochodzą jeszcze z czasów Pitagorasa i Archimedesa, ale wcale nie tak łatwo niektóre z nich wyjaśnić. A liczba $\pi \approx 3{,}1415$ spędzała sen z powiek matematykom przez stulecia.