

1. Pomiar

1-1. Wielkości fizyczne, wzorce, jednostki

Wielkości fizyczne, których używamy do wyrażania praw fizycznych, są blokami służącymi do budowania Fizyki. Znajdujemy pośród tych wielkości takie jak: długość, masa, czas, siła, prędkość, gęstość, oporność, temperatura, natężenie światła, natężenie pola magnetycznego.

Wiele z tych terminów np. *długość*, *siła* i inne należą do naszego języka codziennego. Jednakże w fizyce musimy zdefiniować słowa opisujące wielkości fizyczne jasno i dokładnie, znaczenie ich nie musi być równoznaczne ze znaczeniem tych samych słów w języku potocznym.

Mówimy, że zdefiniowaliśmy np. taką wielkość fizyczną jak masa, kiedy ustaliliśmy sposób postępowania — innymi słowy receptę — przy mierzeniu tej wielkości oraz przyjęliśmy jednostkę, taką jak kilogram. Jednostkę jednego kilograma możemy określić w dowolnie wybrany sposób przy założeniu, aby ten sposób był użyteczny i praktyczny oraz uzyskał międzynarodową akceptację.

Istnieje tak wiele wielkości fizycznych, że zachodzi potrzeba ich uporządkowania. One wcale nie są niezależne względem siebie, np. prędkość jest stosunkiem długości do czasu. Wybieramy zatem w tym celu ze wszystkich możliwych fizycznych wielkości nieliczne, które nazywamy *wielkościami podstawowymi* — wszystkie pozostałe nazywamy *wielkościami pochodnymi*. Każdej wielkości podstawowej przyporządkujemy wzorec. Jeżeli np. wybieramy długość jako wielkość podstawową, to przyporządkowujemy jej wzorec o nazwie metr (patrz rozdział 1-3) i opisujemy dokładnie czynności laboratoryjne wymagane przy posługiwaniu się tym wzorcem.

Powstaje tu kilka pytań, np.: (a) Ile wielkości podstawowych należy wybrać? (b) Które wielkości powinny być wybrane? (c) Kto ma dokonać wyboru?

Odpowiedź na dwa pierwsze pytania brzmi: wybieramy najmniejszą liczbę wielkości fizycznych, która doprowadzi do kompletnego opisu fizyki przy pomocy najprostszych pojęć. Można tu przyjąć wiele rozwiązań, np. siła może być wielkością podstawową. Jednak w systemie, który przyjmujemy (patrz paragraf 1-2) siła jest wielkością pochodną.

Odpowiedź na trzecie pytanie zależy od porozumienia międzynarodowego. W Międzynarodowym Biurze Miar i Wag, umiejscowionym pod Paryżem i założonym w roku 1875 podejmowane są decyzje w tych sprawach. Biuro to utrzymuje stały kontakt z od-

powiednimi Urzędami Miar i Wag na całym świecie — np. z Centralnym Urzędem Jakości i Miar w Warszawie*.

Okresowo zbiera się międzynarodowy organ, którym jest Ogólna Konferencja Miar i Wag, w celu podjęcia ustaleń i zaleceń. Pierwsza z nich miała miejsce w 1889 r., a czternasta w 1971 r.

Jeżeli już raz wybraliśmy wielkość wzorcową, np. długość, to musimy również ustalić sposób, według którego będziemy mierzyć długość dowolnego przedmiotu, porównując go z wzorcem. Znaczy to, że wzorzec musi być dostępny. Chcemy również w określonych granicach otrzymywać ten sam wynik niezależnie od tego kiedy porównujemy dany obiekt z wzorcem. Znaczy to, że wzorzec ma być niezmienny.

Te dwa żądania często nie są równocześnie spełnione. Przyjmując długość jako wielkość podstawową i definiując jej wzorzec (yard) jako odległość między nosem a końcami palców wyciągniętej ręki mamy z pewnością wzorzec dostępny, ale nie niezmienny. Wymagania nauki i technologii kierują nas dokładnie w przeciwną stronę. Dostępność osiągamy tworząc liczne wzorce wtórne przy ścisłym przestrzeganiu ich niezmienności. Czasami dokonujemy porównań z wzorcem podstawowym bardzo okrężną drogą. Rozważmy mierzenie odległości w następujących przypadkach: (a) odległość Wielkiej Mgławicy w Andromedzie, (b) wzrost człowieka, (c) odległość między jądrami atomowymi w cząsteczce NH_3 . Widzimy jasno, że techniki porównania z wzorcem długości różnią się znacznie. Na przykład nie możemy użyć linijki w przypadkach a i c.

1-2. Międzynarodowy Układ Jednostek

Czternasta Ogólna Konferencja Miar i Wag (1971) opierając się na pracach poprzednich konferencji i międzynarodowych komitetów wybrała siedem jednostek podstawowych wyszczególnionych w tablicy 1-1. Jest to podstawa Międzynarodowego Układu Jednostek, oznaczonego w skrócie SI od nazwy francuskiej *Le Système International d'Unites*.

Tablica 1-1

Jednostki podstawowe układu SI

Wielkość	Nazwa	Symbol
długość	metr	m
masa	kilogram	kg
czas	sekunda	s
prąd elektryczny	amper	A
temperatura	kelwin	K
liczność materii	mol	mol
światłość	kandela	cd

W tekście tego podręcznika podamy wiele przykładów jednostek pochodnych SI takich jak szybkość, siła, opór elektryczny itd., które wynikają z tablicy 1-1.

* Przypis tłumacza.

Na przykład jednostką siły w układzie SI jest *niuton* (skrót N) zdefiniowany jako

$$1 \text{ N} = 1 \text{ m} \cdot \text{kg/s}^2,$$

co będzie wyjaśnione w rozdziale 5.

Częstokroć, kiedy wyrażamy w jednostkach SI fizyczne wielkości, takie jak promień Ziemi albo przedział czasu między dwoma zderzeniami jądrowymi, dochodzimy do bardzo wielkich albo do bardzo małych liczb. Dla wygody, Czternasta Ogólna Konferencja Miar i Wag — znowu opierając się na pracach poprzednich konferencji — zaleciła stosowanie przedrostków wyszczególnionych w tablicy 1-2. Zatem możemy zapisać średni promień Ziemi ($= 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$) jako 6,37 Mm, a przedział czasu często spotykany w fizyce jądrowej — powiedzmy $2,35 \cdot 10^{-9} \text{ s}$ jako 2,35 ns.

Przedrostki dla czynników większych od jednośc są pochodzenia greckiego, a dla czynników mniejszych od jednośc — łacińskiego (z wyjątkiem femto i atto — ostatnio dodane — są duńskiego pochodzenia).

Aby wykorzystać tablicę 1-1 potrzebujemy siedem recept proceduralnych, które pozwolą nam w laboratorium zdefiniować siedem jednostek podstawowych w układzie SI. Będziemy je omawiać dla długości, masy i czasu w kolejnych trzech paragrafach. Z Międzynarodowym Układem Jednostek SI konkurują dwa inne duże układy. Jednym z nich jest układ Gaussa, który był używany w dużej części dotychczasowej literatury fizycznej. Nie będziemy go jednak stosować w tym podręczniku.

Dodatek G podaje współczynniki przechodzenia od tego układu do układu jednostek SI.

Drugim jest układ brytyjski dalej będący w użyciu w Wielkiej Brytanii, Stanach Zjednoczonych i innych krajach.

Dodatek G podaje również współczynniki przechodzenia od układu brytyjskiego do układu SI. W dalszej części podręcznika będziemy używać układu SI.

1-3. Wzorzec długości*

Pierwszym międzynarodowym wzorcem długości była sztaba wykonana ze stopu platynowo-irydowego, nazwana *wzorcem metra* i przechowywana w Międzynarodowym Biurze Miar i Wag. Odległość między dwiema cienkimi, złotymi liniami wygrawerowanymi w pobliżu końców tej sztaby, podtrzymywanej mechanicznie w określony sposób, w temperaturze 0°C — przyjęto za *jeden metr*. Historycznie metr był zdefiniowany jako jedna dziesięciomilionowa odległości od bieguna północnego do równika, mierzonej wzdłuż południka przechodzącego przez Paryż. Jednakże dokładne pomiary wykonane już po wykonaniu sztaby metrowej wykazały, że długość wzorcowa metra różni się nieco od planowanej wartości (o około 0,023%).

Ponieważ wzorzec metra nie jest łatwo dostępny, wykonano jego dokładne kopie i wysłano do odpowiednich laboratoriów na świecie. Te wtórne wzorce zostały użyte do wyskalowania jeszcze łatwiej dostępnych przyrządów do mierzenia długości. I tak, do niedawna skalę każdego lineалу czy innego urządzenia mierzącego porównywano — za pomocą skomplikowanego łańcucha operacji, przy użyciu mikroskopów i maszyn nacinających — z wzorcem metra.

* Patrz: H. Barrell, *The Metre*, *Contemporary Physics*. 3, 415 (1962).

Sztaba metrowa jako pierwotny wzorzec długości ma kilka wad: może ulec zniszczeniu, np. w wyniku pożaru lub wojny; nie jest łatwo dostępna. Nie są to zastrzeżenia bezpodstawne. Gdy w roku 1834 spłonął gmach Brytyjskiego Parlamentu — wzorce brytyjskiego yarda i funta zostały bezpowrotnie zniszczone.

Międzynarodowe Biuro Wag i Miar założone we Francji ma charakter instytucji neutralnej i na szczęście jego neutralność była respektowana przez nazistów w okresie II wojny światowej.

Ponadto, co jest najważniejsze, dokładność, z jaką mogą być wykonywane pomiary różnych długości — za pomocą drobnych nacięć przy użyciu mikroskopu — już nie odpowiada wymaganiom nowoczesnej nauki i techniki. Oczywiście tego faktu sugerują chociażby drobne poprawki toru lotu wymagane w trakcie lotów kosmicznych.

Jeżeli między innymi nie znalibyśmy odległości dzielącej Ziemię od Księżyca w metrach jako funkcji czasu z daną dokładnością, loty na Księżyc byłyby o wiele trudniejsze.

Już w roku 1828 została po raz pierwszy wysunięta przez J. Babinet'a myśl, aby za wzorzec długości obrać długość fali świetlnej. Dzięki późniejszemu udoskonaleniu interferometrów (patrz rozdział 45, tom II) naukowcy otrzymali dokładne przyrządy optyczne, przy pomocy których fale świetlne można wykorzystywać do pomiarów długości. Długość widzialnych fal świetlnych wynosi około $0,5 \mu\text{m}$ (patrz tablica 1-2), a pomiary długości prętów nawet metrowych można wykonać z dokładnością do małej części długości fali świetlnej. Przy porównywaniu długości za pomocą fal świetlnych dokładności 10^{-9} są możliwe.

Tablica 1-2

Przedrostki układu SI

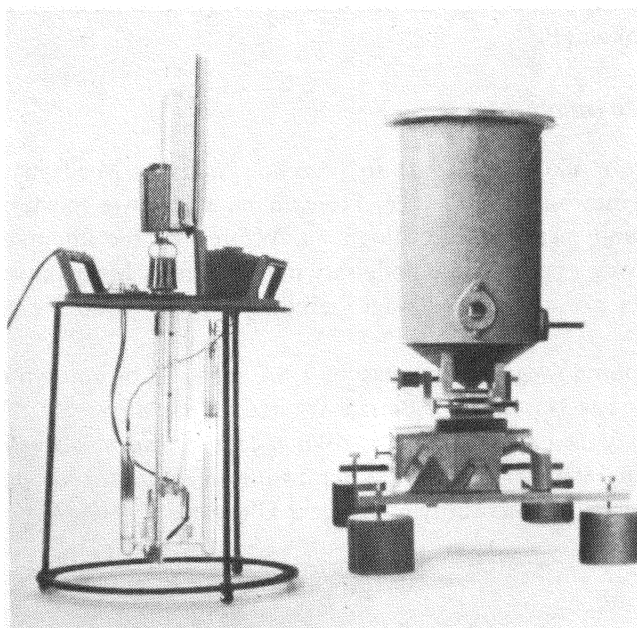
Czynnik	Przedrostek	Symbol	Czynnik	Przedrostek	Symbol
10^1	deka	da	10^{-1}	decy	d
10^2	hekto	h	10^{-2}	centy	c
10^3	kilo	k	10^{-3}	mili	m
10^6	mega	M	10^{-6}	mikro	μ
10^9	giga	G	10^{-9}	nano	n
10^{12}	tera	T	10^{-12}	piko	p
10^{15}	peta	P	10^{-15}	femto	f
10^{18}	eksa	E	10^{-18}	atto	a

W roku 1960 XI Ogólna Konferencja Miar i Wag ustaliła atomowy wzorzec długości. Wybrano mierzoną w próżni długość fali pomarańczowo-czerwonej linii określonej w spektroskopii jako linia $2p_{10} - 5d_5$ i emitowanej przez atomy izotopu ^{86}Kr podczas wyładowania elektrycznego (patrz rys. 1-1). Jeden metr jest obecnie zdefiniowany jako 1 650 763,73 długości fali tej linii. Ta liczba długości fal została ustalona za pomocą bardzo dokładnych porównań z długością sztaby wzorcowej metra. Porównanie wykonano w tym celu, aby nowy wzorzec oparty na długości fali świetlnej był możliwie najlepiej zgodny ze starym wzorcem, opartym na długości sztaby metrowej.

Nowy wzorzec pozwala porównywać długości dziesięciokrotnie dokładniej niż to jest możliwe przy użyciu starego wzorca.

Wybór atomowego wzorca długości, oprócz możliwości dokonywania dokładniejszych pomiarów długości, zapewnia ponadto inne korzyści. Atomy ^{86}Kr są wszędzie dostępne, są identyczne i emitują światło o tej samej długości fali. Wybrana długość fali jest jednoznacznie związana z kryptonem 86 i jest bardzo dokładnie określona, a izotop ten może być rzeczywiście otrzymany w czystej postaci.

Mając pierwotny atomowy wzorec długości potrzebujemy wykalibrowanych za jego pomocą wzorców wtórnych, które byłyby praktyczne w użyciu. Często, tak jak przy



Rys. 1-1. Lampa kryptonowa (^{86}Kr) wyjęta z obudowy, w której się normalnie znajduje. (Dzięki uprzejmości National Physical Laboratories, Teddington, Anglia)

Tablica 1-3

Niektóre pomierzone długości

Długość	Metry
odległość do najbliższej galaktyki (w Andromedzie)	$2 \cdot 10^{22}$
promień naszej Galaktyki	$6 \cdot 10^{19}$
odległość do najbliższej gwiazdy (Alpha Centauri)	$4,3 \cdot 10^{16}$
średni promień orbity dla naszej najbardziej odległej planety (Plutona)	$5,9 \cdot 10^{12}$
promień Słońca	$6,9 \cdot 10^8$
promień Ziemi	$6,4 \cdot 10^6$
wysokość Mt Everest	$8,9 \cdot 10^3$
typowa wysokość człowieka	$1,8 \cdot 10^0$
grubość strony w tej książce	$1 \cdot 10^{-4}$
rozmiar wirusa poliomyelitis	$1,2 \cdot 10^{-8}$
promień atomu wodoru	$5,0 \cdot 10^{-11}$
efektywny promień protonu	$1,2 \cdot 10^{-15}$

pomiarze międzymolekularnych albo międzygwiazdnych odległości, nie możemy dokonać bezpośrednich porównań ze wzorcem. Musimy zatem użyć metod pośrednich, aby odnieść daną odległość do pierwotnego wzorca długości. Na przykład znamy odległości najbliższych gwiazd, ponieważ ich położenie względem tła bardziej odległych gwiazd przesuwa się w miarę obrotu Ziemi po jej orbicie.

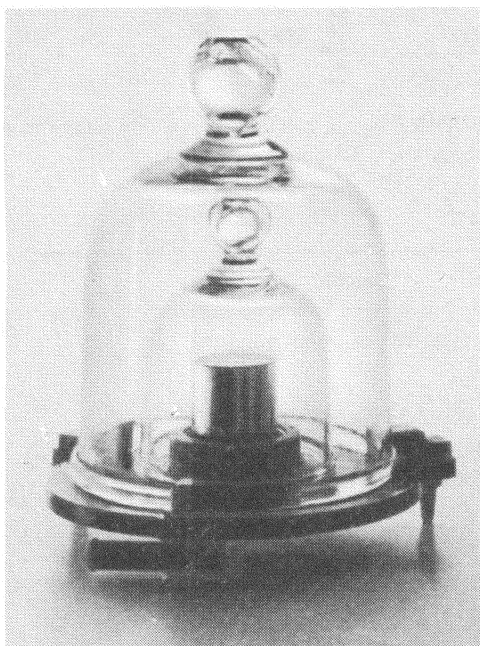
Jeżeli mierzymy to kątowe przesunięcie (paralakse) i jeżeli znamy średnicę ziemskiej orbity w metrach, to możemy obliczyć odległość sąsiedniej gwiazdy.

Tablica 1-3 pokazuje niektóre wielkości. Zauważmy, że te wielkości różnią się między sobą o czynnik około 10^{37} .

1-4. Wzorzec masy

Wzorzec masy w układzie SI jest to przechowywany w Międzynarodowym Biurze Miar i Wag platynowo-irydowy walec, któremu na podstawie międzynarodowych porozumień przypisano masę jednego kilograma. Wzorce wtórne kilograma rozesłano do Urzędów Miar i Wag krajów, które podpisały porozumienia. Masy innych ciał mogą być określone techniką równoramienniej wagi szalkowej z precyzją do 2 części na 10^8 , czyli do $2 \cdot 10^{-8}$.

Kopia międzynarodowego wzorca masy w USA znana jako prototyp kilograma Nr 20 jest przechowywana w Narodowym Biurze Wzorców (patrz rys. 1-2). Wyjmuje się go z ochronnych kloszy nie częściej niż raz w roku w celu sprawdzenia wartości pochodnych wzorców. Od roku 1889 prototyp Nr 20 był dwukrotnie przewożony do Francji w celu ponownego porównania z pierwotnym wzorcem kilograma.



Rys. 1-2. Wzorzec kilograma Nr 20 przechowywany w Narodowym Biurze Wzorców — USA. Jest to dokładna kopia międzynarodowego wzorca z Międzynarodowego Biura Miar i Wag pod Paryżem. Wzorzec kilograma jest walcem platynowym zamkniętym pod podwójnym kloszem

Podczas wyjmowania wzorca spod kloszy i przenoszenia go są obecne zawsze dwie osoby. Jedna, aby przenieść kilogram parą szczyścić, druga, aby uchwycić kilogram, gdyby pierwsza osoba upadła (potknęła się).

Tablica 1-4 wyszczególnia niektóre zmierzone masy. Zwracamy uwagę, że różnią się one od siebie o czynnik około 10^{70} . Większość mas mierzy się w kilogramach metodami pośrednimi. Na przykład możemy zmierzyć masę Ziemi (patrz paragraf 16.3) mierząc w laboratorium siłę przyciągania grawitacyjnego między dwiema kulami ołowianymi. Masy tych kul muszą być dokładnie znane przez bezpośrednie porównanie z wzorcem kilograma np. na wadze równoramiennej.

Tablica 1-4

Niektóre masy

Obiekt	Kilogramy
nasza Galaktyka	$2,2 \cdot 10^{41}$
Słońce	$2,0 \cdot 10^{30}$
Ziemia	$6,0 \cdot 10^{24}$
Księżyc	$7,4 \cdot 10^{22}$
wody oceanów	$1,4 \cdot 10^{21}$
statek oceaniczny	$7,2 \cdot 10^7$
słoń	$4,5 \cdot 10^3$
człowiek	$5,9 \cdot 10^1$
winogrono	$3,0 \cdot 10^{-3}$
cząstka kurzu	$6,7 \cdot 10^{-10}$
wirus tytoniu	$2,3 \cdot 10^{-13}$
cząsteczka penicyliny	$5,0 \cdot 10^{-17}$
atom uranu	$4,0 \cdot 10^{-26}$
proton	$1,7 \cdot 10^{-27}$
elektron	$9,1 \cdot 10^{-31}$

W skali atomowej mamy inny wzorec masy nie zaliczany do układu SI. Jest to masa atomu ^{12}C , która w wyniku międzynarodowego porozumienia została nazwana *masą atomową* — dokładnie 12 ujednoliconych jednostek masy atomowej (skrót — u).

Tablica 1-5

Masy atomowe niektórych izotopów

Izotop	Masa w atomowych jednostkach masy
^1H	$1,00782522 \pm 0,00000002$
^{12}C	12,00000000 (dokładnie)
^{64}Cu	$63,9297568 \pm 0,0000035$
^{102}Ag	$101,911576 \pm 0,000024$
^{137}Cs	$136,907074 \pm 0,000005$
^{190}Pt	$189,959965 \pm 0,000026$
^{238}Pu	$238,049582 \pm 0,000011$

Masy innych atomów z dużą dokładnością możemy wyznaczyć przy pomocy spektrometru masowego.

Tablica 1-5 zawiera niektóre wybrane masy atomowe z prawdopodobnymi błędami pomiaru. Zachodzi potrzeba ustalenia drugiego wzorca masy, ponieważ obecna technika laboratoryjna pozwala nam porównywać względem siebie masy atomowe z większą precyzją niż to można osiągnąć przez porównanie z wzorcem kilograma. Chodzi tu o zależność wyrażoną w przybliżeniu jako

$$1 \text{ u} = 1,660 \cdot 10^{-27} \text{ kg}.$$

1-5. Wzorzec czasu*

Istnieją dwa aspekty pomiaru czasu. Dla celów społecznych i pewnych celów naukowych musimy umieć określić chwilę czasu (porę dnia), aby uporządkować kolejno pewne wydarzenia. W większości prac naukowych chcemy wiedzieć jak długo trwało jakieś zdarzenie. A więc dowolny wzorzec czasu musi pozwolić dać odpowiedź na pytanie „kiedy to się zdarzyło” albo „jak długo to trwało”. Tablica 1-6 pokazuje zakres przedziałów czasowych, które się mierzy. Przedziały te różnią się od siebie o czynnik około 10^{40} .

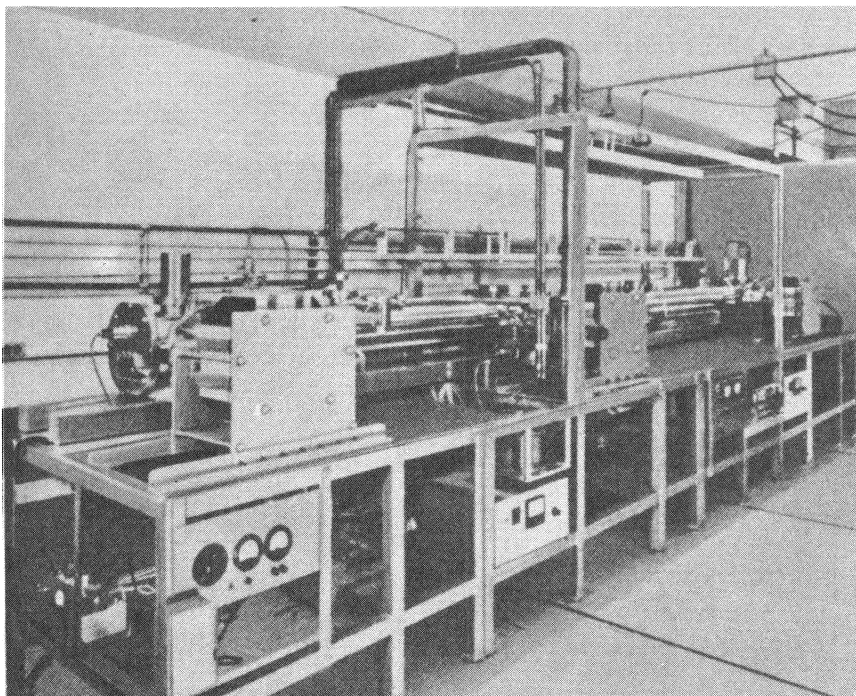
Do pomiarów czasu można wykorzystać każde powtarzające się zjawisko; pomiar polega na liczeniu liczby powtórzeń. Można w tym celu użyć np. drgającego wahadła, masy zawieszonej na sprężynie lub kryształu kwarcu. Od wieków spośród wielu występujących w przyrodzie i powtarzających się zjawisk jako wzorzec czasu wybierano obrót

Tablica 1-6

Niektóre przedziały czasu

	sekundy
wiek Ziemi	$1,3 \cdot 10^{17}$
wiek piramidy Cheopsa	$1,2 \cdot 10^{11}$
przeciętna długość życia w Stanach Zjednoczonych	$2 \cdot 10^9$
okres obrotu Ziemi dookoła Słońca (1 rok)	$3,1 \cdot 10^7$
okres obrotu Ziemi dookoła własnej osi (1 dzień)	$8,6 \cdot 10^4$
okres obrotu typowego satelity	$5,1 \cdot 10^3$
czas życia swobodnego neutronu	$7,0 \cdot 10^2$
średni przedział czasu między dwoma uderzeniami serca	$8,0 \cdot 10^{-1}$
okres drgań widełek stroikowych a^1	$2,3 \cdot 10^{-3}$
czas życia mionu	$2,2 \cdot 10^{-6}$
okres drgań mikrofal o długości 3 cm	$1,0 \cdot 10^{-10}$
typowy okres obrotu cząsteczki	$1 \cdot 10^{-12}$
czas życia obojętnego pionu	$2,2 \cdot 10^{-16}$
okres drgań promieniowania γ o energii 1 MeV (obliczony)	$4 \cdot 10^{-21}$
czas potrzebny na przejście szybkiej cząstki elementarnej przez jądro o średnich rozmiarach (obliczony)	$2 \cdot 10^{-23}$

* Patrz: Louis Essen, Accurate Measurement of time, *Physics Today*, 1960.



Rys. 1-3. Wzorzec atomowego zegara cezowego w Boulder Laboratorium Narodowego Biura Wzorców

Ziemi dokoła jej osi, określający długość doby. Do dziś jeszcze jest on podstawą do określania powszechnie prawnie obowiązującego wzorca czasu. Jedna sekunda (średnia słoneczna) jest mianowicie zdefiniowana jako $1/86\,400$ doby (średniej słonecznej). Czas zdefiniowany za pomocą obrotu Ziemi dokoła własnej osi nazywamy *czasem uniwersalnym* (UT).

Czas uniwersalny (UT), musi być mierzony za pomocą obserwacji astronomicznych trwających przez kilka tygodni. Dlatego potrzebne są dokładne wtórne zegary ziemskie, wyskalowane za pomocą obserwacji astronomicznych. Bardzo dobrymi wtórnymi wzorcami czasu są kryształowe zegary kwarcowe, w których wykorzystuje się podtrzymywane elektrycznie, okresowe drgania kryształu kwarcowego. Najlepsze z tych zegarów pozwalają mierzyć czas z maksymalnym błędem równym $0,02$ s na rok.

Jednym z najpowszechniejszych zastosowań wzorca czasu jest określenie częstości. W zakresie częstości radiowych można porównywać elektronicznie częstości z zegarem kwarcowym, z dokładnością równą przynajmniej $1/10^{10}$. W wielu wypadkach potrzebna jest właśnie tak duża dokładność. Jednakże ta dokładność jest około sto razy większa od dokładności, z jaką można wyskalować za pomocą obserwacji astronomicznych sam zegar kwarcowy. Jeszcze lepszymi wzorcami czasu są używane w wielu krajach zegary atomowe, w których wykorzystuje się okresowe drgania atomów.

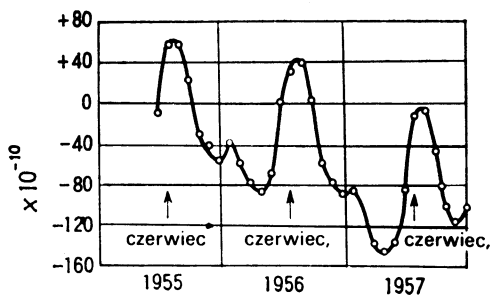
Jeden z typów zegara atomowego, oparty na charakterystycznej częstości związanej z izotopem ^{133}Cs istnieje w NPL* w Anglii już od roku 1955. Na rysunku 1-3 pokazany jest podobny zegar w Narodowym Biurze Wzorców — USA.

* National Physical Laboratory.

Trzynasta Ogólna Konferencja Miar i Wag przyjęła w 1967 roku sekundę opartą o zegar cezowy jako wzorzec międzynarodowy. Sekundę zdefiniowano jako 9 192 631,770 okresów dokładnie określonego przejścia w ^{133}Cs . W ten sposób dokładność pomiarów czasu powiększono do $1 \cdot 10^{-12}$, czyli nastąpiła poprawa w stosunku do metod astronomicznych o czynnik 10^3 .

Jeżeli dwa cezowe zegary działają z taką dokładnością i jeżeli nie ma innych źródeł błędów, wskazania tych zegarów będą się różnić nie więcej niż o jedną sekundę po okresie 6000 lat. Rozpatruje się projekty jeszcze dokładniejszych zegarów atomowych.

Na rys. 1-4 pokazano, zmierzone przy użyciu zegara cezowego zmiany szybkości obrotu Ziemi dookoła własnej osi w przeciągu trzech kolejnych lat. Zwracamy uwagę, że prędkość obrotu Ziemi jest duża latem i mała zimą (półkula północna) oraz maleje z roku na rok.



Rys. 1-4. Zmiany szybkości obrotu Ziemi dookoła własnej osi zmierzone przy pomocy zegara cezowego. (Z pracy: L. Essen, *Physics Today*, July 1960)

W związku z rys. 1-4 nasuwa się pytanie, skąd możemy być pewni, czy to rzeczywiście Ziemia, a nie zegar „chodzi” nieregularnie. Istnieją dwie odpowiedzi na to pytanie. 1. Budowa atomu jest znacznie prostsza niż budowa Ziemi, co skłania nas do przypisywania zaobserwowanych różnic Ziemi. Zwolnienie obrotu Ziemi można np. przypisać wpływom tarcia między wodą i lądem podczas przyptywów i odpływów mórz. Zmiany w prędkości obrotów Ziemi mogą być także spowodowane sezonowymi ruchami powietrza, mogą również być związane z topnieniem i ponownym zamarzaniem polarnych pokryw lodowych. 2. Do mierzenia czasu w Układzie Słonecznym można wybrać jeszcze inne zjawiska, np. ruch planet lub księżyców; obrót Ziemi wykazuje zmiany — podobne do przedstawionych na rys. 1-4, chociaż mniej dokładnie zaobserwowane — również w odniesieniu do tych zjawisk.

Korzystanie z wzorca czasu można udostępnić różnym, nawet bardzo odległym placówkom za pomocą sygnałów radiowych. Stacja WWV w Stanie Colorado i stacja WWVH na Hawajach należące do Narodowego Biura Wzorców służą temu celowi. Rozgłośnie te nadają na częstotliwościach 2,5, 5, 10, 15, 20 i 25 MHz stabilizowanych z dokładnością $1/10^{11}$ w odniesieniu do zegara cezowego. Jeden megaherc (skrót MHz) równa się 10^6 cykli na sekundę. Stacje te nadają nieprzerwanie co 5 minut na zmianę sygnał o wysokości 440 Hz (dźwięk muzyczny A) i o wysokości 600 Hz. Dziesięć razy na godzinę podają one sygnały czasu posługując się dwójkowym systemem kodowania.

Dwie inne rozgłośnie, tj. WWVB i WWVL usytuowane w Fort Collins w Stanie Colorado dostarczają wzorcowych sygnałów do celów specjalnych, o jeszcze większej dokładności.

Pytania

1. Jak można skorygować następujące stwierdzenie: „z chwilą gdy pewien wzorzec fizyczny został wybrany, zgodnie z samym znaczeniem słowa „wzorzec” jest on niezmienny”?

2. Wielu zdolnych badaczy ma powody, aby wierzyć w realność pozazmysłowego spostrzegania. Przyjmując, że rzeczywiście w naturze występuje pozazmysłowe spostrzeganie, jakiej fizycznej (jednej albo kilku) wielkości, należy poszukiwać aby móc zdefiniować i opisać to zjawisko ilościowo?

3. Zgodnie z punktem widzenia przyjętym przez niektórych fizyków i filozofów, nie uznaje się za fizycznie realne wielkości, których nie można wykryć za pomocą sposobów fizycznych. Jeżeli nie można opisać sposobów określenia jakiejś wielkości fizycznej, to mówimy, że ta wielkość nie jest wykrywalna. Nie wszyscy naukowcy podzielają ten punkt widzenia. Jakie są zalety i wady takiego punktu widzenia?

4. Czy ma sens definiowanie jakichś wielkości fizycznych, dla których nie ma lub nie są znane metody pomiaru?

5. Jakie cechy charakterystyczne oprócz niezmienności i dostępności powinien mieć wzorzec fizyczny?

6. Czy można sobie wyobrazić utworzenie układu jednostek podstawowych, do którego nie wchodziłby czas? (Tablica 1-1).

7. Spośród siedmiu podstawowych jednostek wymienionych w tabeli 1-1 tylko jedna — kilogram — ma przedrostek (patrz tablica 1-2). Czy miałaby sens zmiana nazwy istniejącego platynowo-irydowego walca z Międzynarodowego Biura Miar i Wąg na *gram* zamiast *kilogram*?

8. Czy można zdefiniować temperaturę używając pojęć długości, masy i czasu? Zwrócić uwagę na wahadło.

9. Jeden metr był początkowo pomyślany jako jedna dziesięciomilionowa część linii południka przechodzącego przez Paryż od bieguna północnego do równika. W rozdziale 1-3 dowiedzieliśmy się, że ta definicja długości metra różni się od wzorcowej sztaby metrowej o 0,023%. Czy oznacza to, że wzorcowa sztaba metra jest do tego stopnia niedokładna?

10. Dlaczego porównywanie jakiejś długości z wzorcową sztabą metrową musi odbywać się w określonej temperaturze? Czy długość można nazwać podstawową wielkością fizyczną, skoro przy ustalaniu jej wzorca musi być określona inna wielkość fizyczna — temperatura?

11. Gdyby ktoś powiedział, że wszystkie wymiary wszystkich przedmiotów skurczyły się w ciągu nocy do połowy swojej pierwotnej wielkości, to jak można by obalić to stwierdzenie?

12. Czy można mierzyć długość wzdłuż linii krzywej? Jeśli tak, to w jaki sposób?

13. Spróbować wymyślić sposób pomiaru: (a) promienia Ziemi; (b) odległości między Ziemią i Słońcem; (c) promienia Słońca.

14. Spróbować wymyślić sposób pomiaru: (a) grubości kartki papieru; (b) grubości błonki bańki mydlanej; (c) średnicy atomu.

15. Dlaczego istnienie dwóch wzorców masy: kilograma i atomu ^{12}C jest użyteczne?

16. W jaki sposób otrzymuje się zależność między masą wzorcowego kilograma a masą atomu ^{12}C ?

17. Czy obecny wzorzec kilograma masy jest dostępny, niezmienny, odtwarzalny, niezniszczalny? Czy łatwo stosuje się go do celów porównawczych? Czy w jakimkolwiek względzie wzorzec atomowy byłby lepszy? Dlaczego nie używa się wzorca atomowego jak w przypadku długości i czasu?

18. Zaproponować praktyczne sposoby, którymi można by określić masę różnych obiektów z tablicy 1-4.

19. Zaproponować obiekty, których masa zmieściłaby się w szerokim przedziale między masą oceanów a masą statków oceanicznych (tablica 1-4) i oszacować ich masę.

20. Wymienić kilka występujących w przyrodzie powtarzających się zjawisk okresowych, które mogłyby służyć jako wzorce czasu?

21. Można by zdefiniować jedną sekundę jako 1,2 uderzenia pulsu prezesa Amerykańskiego Towarzystwa Fizycznego. Galileusz używał podobnej definicji w niektórych swoich pracach. Nie uwzględniając rozważań o niezmienności, dlaczego definicja oparta na zegarze atomowym jest lepsza?

22. Jakie warunki powinien spełniać dobry zegar?

23. Okres czasu, po upływie którego Księżyc powraca do pewnego położenia na tle gwiazd stałych, nazywany jest *miesiącem gwiazdowym*. Przedział czasu pomiędzy dwiema identycznymi fazami Księżyca nazywany jest *miesiącem księżycowym*. Miesiąc księżycowy jest dłuższy niż miesiąc gwiazdowy. Dlaczego?

24. Korzystając z wiadomości o wahadłach, przytoczyć ujemne strony używania okresu wahadła jako wzorca czasu.

25. Wymyślić sposób określenia wzorca długości za pomocą wzorca czasu lub na odwrót. (Co można powiedzieć o zegarze wahadłowym?) Czy można jednocześnie długość i czas uważać za wielkości podstawowe?

26. Krytycy systemu dziesiętnego często zaciemniają sens jego istnienia powiedzeniem w rodzaju: „Zamiast kupować funt masła będę musiał prosić o 0,452 kilograma masła”. Wskutek tego życie byłoby bardziej skomplikowane. Jak można odeprzeć ten zarzut?

Zadania

Paragraf 1-3

1. Podać swój wzrost w stopach i calach.

2. Podać 20 mil w kilometrach przyjmując tylko, że 1 mila = 5280 stóp, 1 stopa = 12 cali, 1 cal = 2,54 cm, 1 m = 100 cm i 1 km = 1000 m.

Odp.: 32,2 km.

3. Rakieta osiągnęła wysokość 300 km. Podać tę wysokość w milach.

4. Odległości astronomiczne są znacznie większe od odległości, z jakimi mamy do czynienia na Ziemi, tak że w celu łatwiejszego określenia względnych odległości między ciałami astronomicznymi stosujemy specjalne, odpowiednio duże jednostki. *Astronomiczna jednostka długości* (AU) jest równa średniej odległości Ziemi od Słońca, tzn. wynosi około $150 \cdot 10^6$ km. 1 *parsek* (1 pc) jest równy odległości, z jakiej widać promień drogi ziemskiej (1 AU) pod kątem $1''$. *Rok świetlny* jest równy odległości, jaką przebywa w ciągu jednego roku światło biegnące w próżni z prędkością 300 000 km/s. (a) Wyrazić odległość od Ziemi do Słońca w parsekach i latach świetlnych, (b) Wyrazić lata świetlne i parseki w kilometrach.

5. Pracownik warsztatu narzędziowego chciałby mieć wzorcową podziałkę, powiedzmy o długości 1 cm, za pomocą której mógłby mierzyć z dokładnością do 0,000 000 1 cm. Pokazać, że metr platynowo-irydowy nie pozwala na osiągnięcie tej dokładności, natomiast metr określony za pomocą kryptonu 86, pozwala. Skorzystać z danych zamieszczonych w tym rozdziale.

6. Podać zależność pomiędzy: (a) calem kwadratowym i centymetrem kwadratowym; (b) milą kwadratową i kilometrem kwadratowym; (c) metrem sześciennym i centymetrem sześciennym; (d) stopą kwadratową i yardem kwadratowym.

7. Założyć, że średnia odległość między Ziemią i Słońcem jest 400 razy większa od średniej odległości między Ziemią i Księżycem. Następnie rozważyć całkowite zaćmienie Słońca i zastanowić się, jakie wnioski można wyciągnąć odnośnie: (a) zależności między średnicą Słońca i średnicą Księżyca; (b) względnej objętości Słońca i Księżyca. (c) Określić, pod jakim kątem widać monetę 10-groszową, która dokładnie zasłania cały Księżyc, i korzystając z tego wyniku oraz znanej odległości między Ziemią i Księżycem [$3,80 \cdot 10^5$ km] ocenić, jaka jest średnica Księżyca.

Odp.: (a) $d_s/d_k = 400$, (b) $V_s/V_k = 6,4 \cdot 10^7$, (c) $3,5 \cdot 10^3$ km.

Paragraf 1-4

8. Używając właściwych przeliczeń i danych z tego rozdziału podać liczbę atomów wodoru (liczba atomowa 1) potrzebną do otrzymania jednego kilograma masy.

9. Jeżeli pamiętamy liczbę Avogadra możemy mówić o masie Ziemi jako o 10 molach kilogramów. Co takie stwierdzenie znaczy i jaka jest jego dokładność? Rzeczywista masa Ziemi wynosi $5,98 \cdot 10^{24}$ kg.

Odp.: Błąd = 0,67%.

10. (a) Przyjmując, że gęstość (masa/objętość) wody wynosi dokładnie 1 gram/cm³ wyrazić gęstość wody w kg/litr. (b) Przypuśćmy, że wyschnięcie ze zbiornika 1 litra wody trwa dokładnie 10 godz. Jaka jest średnia masa wody wyparowującej ze zbiornika w kilogramach na sekundę?

11. Wygodnym zastąpieniem liczby sekund w roku jest wyrażenie $\pi \cdot 10^7$. Jakim błędem w procentach obarczone jest to przybliżenie?

Odp.: -0,44%.

12. (a) Jednostką czasu używaną czasami w fizyce mikroskopowej jest jeden *shake* równy 10^{-8} s. Czy więcej jest tych jednostek w sekundzie niż sekund w roku? (b) Ludzkość istnieje około 10^6 lat, a Wszechświat około 10^{10} lat. Gdybyśmy wiek Wszechświata przyjęli za jeden dzień, ile sekund istniałaby ludzkość?

13. Maksymalna prędkość jaką osiągają różne zwierzęta wynosi w km/godz.: (a) ślimak — $4,8 \cdot 10^{-8}$, (b) pająk — 1,92, (c) wiewiórka — 19,2, (d) człowiek — 44,8, (e) zając — 56, (f) lis — 67,2, (g) lew — 80 i (h) gepard — 112. Wyrazić te dane w metrach na sekundę.

Odp.: (a) 0,013, (b) 0,54, (c) 5,4, (d) 13, (e) 16, (f) 19, (g) 22, (h) 31 m/s.

14. Posługując się rys. 1-2 obliczyć, o ile różni się okres obrotu Ziemi dookoła własnej osi w połowie lata od odpowiedniego okresu w czasie następnej wiosny.

15. W laboratorium sprawdzono pięć zegarów. W ciągu kolejnych dni tygodnia, dokładnie w południe, odczytano określone przez sygnał WWV następujące wskazania dla pięciu zegarów.

Zegar	Niedziela	Poniedziałek	Wtorek	Środa	Czwartek	Piątek	Sobota
A	12:36:40	12:36:56	12:37:12	12:37:27	12:37:44	12:37:59	12:38:14
B	11:59:59	12:00:02	11:59:57	12:00:07	12:00:02	11:59:56	12:00:03
C	15:50:45	15:51:43	15:52:41	15:53:39	15:54:37	15:55:35	15:56:33
D	12:03:59	12:02:52	12:01:45	12:00:38	11:59:31	11:58:24	11:57:17
E	12:03:59	12:02:49	12:01:54	12:01:52	12:01:32	12:01:22	12:01:12

Jak uszeregować te pięć zegarów pod względem ich przydatności od pomiaru czasu? Uzasadnić swój wybór.

Odp.: C. D. A. B. E. (od najlepszego do najgorszego). Ważnym kryterium jest stałość dziennych różnic a nie ich wielkość.

16. Zakładając, że długość doby wzrasta jednostajnie o 0,001 s w ciągu jednego wieku, obliczyć wypadkowy efekt, jaki wywarło to na pomiar czasu w ciągu dwudziestu wieków. Takie zwolnienie obrotów Ziemi zostało wykryte za pomocą obserwacji dotyczących czasów występowania zaćmień Słońca w ciągu tego okresu.

17. Wyrazić prędkość światła $3 \cdot 10^8$ m/s w (a) stopach/nanosekundę, (b) milimetrach/pikosekundę.

Odp. (a) 0,98 stopa/ns, (b) 0,3 mm/ps.

18. Jednostką astronomiczną (AU) jest średnia odległość Ziemi od Słońca, która wynosi 149 000 000 km. Prędkość światła równa się około $3,0 \cdot 10^8$ m/s. Wyrazić prędkość światła w jednostkach astronomicznych na minutę.

19. Pewien statek kosmiczny ma prędkość 19 760 km/godz. Jaka jest jego prędkość w latach świetlnych na stulecie? Rok świetlny jest to odległość, jaką przebiegnie promień świetlny poruszający się z prędkością 300 000 km/s w ciągu jednego roku.

Odp. $2,8 \cdot 10^{-3}$ lat świetlnych/stulecie.

20. (a) Promień protonu jest równy około 10^{-15} m, promień obserwowalnego Wszechświata — około 10^{28} cm. Jakie znaczenie fizyczne mogłaby mieć odległość leżąca w przybliżeniu pośrodku między tymi dwoma krańcowymi punktami, na skali logarytmicznej? (b) Średni czas życia obojętnego pionu (cząstka elementarna) wynosi około $2 \cdot 10^{-16}$ s. Wiek Wszechświata jest równy około $4 \cdot 10^9$ lat. Jakie znaczenie fizyczne mógłby mieć przedział czasu leżący w przybliżeniu pośrodku między tymi dwoma krańcowymi punktami na skali logarytmicznej?