



Od Kosmosu do mikroświata: liczby w przyrodzie

Krzysztof Fiałkowski

Instytut Fizyki UJ

I. Wstęp: wielkie i małe liczby wokół nas

1. Jak sobie radzić z liczbami – olbrzymami i karzelkami?

Kiedy liczymy otaczające nas przedmioty i porównujemy ich wagę lub rozmiary, podajemy wyniki w postaci liczb. Mogą to być liczby całkowite, jak 1, 2, 5, lub 125, mogą to też być liczby ułamkowe podane w postaci zwykłej lub dziesiętnej, jak $1/2$, $4/3$, 1,3 lub 0,125. W tym drugim przypadku widzimy, że są wśród nich zarówno liczby większe, jak i mniejsze od jedynki. Zwykle jednak nie są one zbyt wiele razy mniejsze, ani większe od jedynki.

Wynika to po prostu z możliwości naszych zmysłów. Jeśli nawet liczymy bardzo szybko, w ciągu godziny nie policzymy więcej, niż kilka tysięcy przedmiotów. Jeśli mierzymy długości dwóch prętów, stosunek ich długości też nie przekroczy zwykle podobnej wartości: nie umiemy zmierzyć długości znacznie mniejszej niż jeden milimetr, a nasz zasięg rąk nie przekracza dwóch metrów. Zatem w życiu codziennym rzadko spotykamy liczby mniejsze niż (powiedzmy) jedna stutysięczna, lub większe niż sto tysięcy.

Czasem nie porównujemy wagi (lub masy) albo rozmiarów dwóch przedmiotów. Jeśli wyznaczamy je i wyrażamy w wybranych jednostkach, wynik zależy oczywiście od wyboru jednostek. Wybieramy je zwykle tak, aby otrzymać wynik między jedynką a setką. Nie mówimy więc, że kupujemy „pięćdziesiąt tysięcy gramów ziemniaków”, tylko po prostu „pięćdziesiąt kilogramów ziemniaków”; nie wlewamy do wiadra „dziesięciu tysięcy centymetrów sześciennych wody”, tylko „dziesięć litrów wody”.

Aby objąć zakresem jednostek nie tylko rozmiary i masy otaczających nas przedmiotów, ale i obiekty mikroświata oraz ciała astronomiczne, ustalono prosty schemat nazw „jednostek pochodnych” wielokrotnie mniejszych lub większych od jednostki wyjściowej. Uzyskujemy je dodając przed nazwą jednostki przedrostek pochodzący z łaciny (dla ułamków jednostki wyjściowej) lub z greki (dla wielokrotności jednostki wyjściowej). Przedrostki te to:

decy (d) = 10^{-1} ;	piko (p) = 10^{-12} ;	deka (da) = 10^1 ;	tera (T) = 10^{12} ;
centy (c) = 10^{-2} ;	femto (f) = 10^{-15} ;	hekto (h) = 10^2 ;	peta (P) = 10^{15} ;
mili (m) = 10^{-3} ;	atto (a) = 10^{-18} ;	kilo (k) = 10^3 ;	eksa (E) = 10^{18} ;
mikro (μ) = 10^{-6} ;	zepto (z) = 10^{-21} ;	mega (M) = 10^6 ;	zetta (Z) = 10^{21} ;
nano (n) = 10^{-9} ;	jokto (j) = 10^{-24} ;	giga (G) = 10^9 ;	jotta (Y) = 10^{24}

Zatem bilion (milion milionów, czyli 10^{12}) gramów, to jeden teragram (Tg), a jedna miliardowa, czyli 10^{-9} metra, to jeden nanometr (nm). Podobnie tworzymy nowe jednostki np. czasu: jedna tysięczna sekundy to jedna milisekunda (ms), a także wszelkich innych wielkości fizycznych.

Nie wszystkie te jednostki są naprawdę praktycznie używane: nikt właściwie nie nazywa miliona gramów „megagramem”, skoro istnieje tradycyjna nazwa „tona”; nikt też nie używa dla długich okresów czasu nazw dużych wielokrotności sekundy, bo stosujemy tradycyjnie minuty, godziny, dni i lata. Zwykle mówimy też „litr”, a nie „decymetr sześcienny”. Jednak dla wielu wielkości fizycznych wszystkie te przedrostki są naprawdę potrzebne i wykorzystywane.

Zwróćmy też uwagę na to, jak pożyteczny jest zapis potęgowy wielkich liczb. Tradycyjnego zapisu nie używamy praktycznie dla liczb większych od miliona (10^6), bo bardzo trudno dla nich uniknąć pomyłki bez powolnego „liczenia zer”. Można oczywiście użyć nazw słownych, jakie utworzono dla całkowitych potęg tysiąca i miliona. Niestety do dziś Europa i Stany Zjednoczone używają tu różnych konwencji nazw, co grozi poważnymi nieporozumieniami. Odpowiednie nazwy zestawiono w poniższej tabelce:

Zapis potęgowy	Nazwa polska	Nazwa europejska	Nazwa amerykańska
10^6	milion	million	million
10^9	miliard	milliard	billion
10^{12}	bilion	billion	trillion
10^{15}			quadrillion
10^{18}	trylion	trillion	quintillion
10^{21}			sextillion
10^{24}	kwadrylion	quadrillion	septillion

W dalszej części artykułu zobaczymy, jak wielkie i małe liczby pojawiają się w opisie obiektów kosmicznych i atomowych. Dyskusja takich liczb powinna ułatwić nam zrozumienie skali tych obiektów, o których opowiemy w następnych częściach. Zobaczymy też, jak zaskakujące mogą być odpowiedzi na proste pytania dotyczące porównań różnych wielkości. Mam nadzieję, że te rozważania pomogą czytelnikom w przyszłości oceniać poprawnie „rząd wielkości”, czyli przybliżoną wartość wyników różnych zadań (poniżej wyjaśnimy dokładnie, co rozumiemy przez to pojęcie). Nie chodzi tu tylko o zadania szkolne: w wypowiedziach publicznych polityków i wysokich urzędników aż nazbyt często zdarzają się koszarne wpadki, w których miliony myli się z miliardami, metry sześciennie z litrami, a tony z kilogramami. Tymczasem często chwila zastanowienia może nam umożliwić zrozumienie problemu i uchronić przed demonstracją swojej ignorancji.

2. Co to jest rząd wielkości?

Często zdarza się, że nie zależy nam na dokładnym wyniku jakichś obliczeń, a jedynie na przybliżonym oszacowaniu danej wielkości. W takich przypadkach bardzo pożytecznym pojęciem staje się „rząd wielkości”, czyli całkowita potęga liczby 10 najbliższa szacowanej liczby.

Podajmy kilka przykładów. Liczba 4 jest o trzy większa od $1 = 10^0$, a o sześć mniejsza od $10 = 10^1$, powiemy więc o niej, że jest „rzędu jedności”, albo po prostu „rzędu 1”. Liczba 755 jest o 655 większa od $100 = 10^2$, a o 245 mniejsza od $1000 = 10^3$, jest więc „rzędu tysiąca”, czyli „rzędu 10^3 ”. Liczba 0,00045 jest o 0,00035 większa od $0,0001 = 10^{-4}$, a o 0,00055 mniejsza od $0,001 = 10^{-3}$, jest więc „rzędu jednej tysięcznej”, czyli „rzędu 10^{-3} ”.

Definicja ta jest dość arbitralna; wynika z niej np. że „granicą” między liczbami rzędu jedności i liczbami rzędu dziesiątki jest 5,5, a granicą między liczbami rzędu 0,1 i liczbami rzędu 1 jest liczba 0,55. Rzędem wielkości liczby X nazywamy więc taką całkowitą potęgę dziesiątki 10^n , że X zawarte jest między $5,5 \cdot 10^{n-1}$ a $5,5 \cdot 10^n$. Naturalniejsze wydaje się ustalenie granicy między liczbami „rzędu 10^n ” i „rzędu 10^{n+1} ” na liczbie $5 \cdot 10^n$. Można więc oczywiście przyjąć nieco inną definicję, nazywając rzędem wielkości liczby X całkowitą potęgę 10^n taką, że X zawarte jest między $5 \cdot 10^{n-1}$ a $5 \cdot 10^n$. Jeszcze inną definicję otrzymamy żądając, aby iloraz „granic” G i najbliższej całkowitej mniejszej potęgi 10

$$I = G / 10^{n-1}$$

był taki sam, jak iloraz najbliższej większej potęgi 10 i „granic”

$$I = 10^n / G.$$

Oczywiście kwadrat tego ilorazu jest równy 10

$$I^2 = (10^n / G) \cdot (G / 10^{n-1}) = 10,$$

więc jego wartość to w przybliżeniu $I = 3,16$. Zatem rzędem wielkości liczby X nazwalibyśmy potęgę 10^n taką, że X zawarte jest między $3,16 \cdot 10^{n-1}$ a $3,16 \cdot 10^n$.

Wątpliwości te są zazwyczaj nieistotne dla rozważanych w dalszych rozdziałach wielkości. Jeśli chodzi nam o podanie przybliżonej wartości bardzo wielkiej albo bardzo małej liczby, nie ma większego znaczenia, czy np. o liczbie 4 000 000 000 (wyrażającej w przybliżeniu obwód Ziemi mierzony w centymetrach) powiemy, że jest „rzędu 10^9 ” czy „rzędu 10^{10} ”. Na wszelki wypadek jednak z reguły będziemy podawali nieco dokładniejsze oszacowania, w których przynajmniej pierwsza cyfra podawanej liczby będzie wiarygodna.

II. Odległości, rozmiary i masy w Kosmosie

1. Ziemia i jej otoczenie

Przejdziemy teraz do odległości, które wyrażone w metrach (a nawet kilometrach) są naprawdę wielkie: odległości w Układzie Słonecznym, w naszej galaktyce i w Kosmosie. Jak zobaczymy, można jednak ustalić łatwe do pojęcia proporcje nawet między takimi odległościami.

Zacznijmy od rozmiarów naszej Ziemi. Już starożytni ocenili, że obwód jej wynosi około 40 000 km, zatem średnica wynosi poniżej 13 000 km. Nie jest to odległość niewyobrażalna – prawie każdy z nas odbywał podróże przekraczające 1000 km, a typowy samochód użytkowany w rodzinie przejeżdża kilka tysięcy kilometrów w ciągu roku. Warto jednak wspomnieć, że ocena masy Ziemi wynikająca z tych rozmiarów daje już liczby olbrzymie: objętość kuli to

$$V = 4\pi \cdot R^3 / 3,$$

więc objętość Ziemi to około

$$V \cong 12,5 \cdot (6400)^3 / 3 \text{ km}^3 \cong 1,1 \cdot 10^{12} \text{ km}^3 = 1,1 \cdot 10^{21} \text{ m}^3.$$

Gdyby nawet gęstość Ziemi była taka, jak wody (a w rzeczywistości jest kilkakrotnie większa), to jej masa byłaby rzędu 10^{21} ton, czyli 10^{24} kg. W systemie europejskim to kwadrylion – liczba naprawdę niezwykle wielka. Można więc łatwo zrozumieć, czemu tak trudno było uczonym sprawdzić doświadczalnie na Ziemi prawo powszechnego ciążenia, tak wspaniale widoczne w ruchu Księżyca i planet oraz ruchu ciał w pobliżu powierzchni Ziemi. Masa kul ołowianych, czy też innych obiektów używanych w doświadczeniach była w przybliżeniu o dwadzieścia rzędów wielkości mniejsza od masy Ziemi, więc nawet przy najmniejszej odległości siły wywierane przez nie na ciało próbne były o wiele mniejsze od znanej wszystkim siły przyciągania ziemskiego.

Przejdźmy teraz do czegoś, co każdy z nas widzi codziennie na niebie: Słońce i Księżyc widoczne są jako tarcze bardzo podobnej wielkości. Oznacza to, że stosunek średnic tych ciał do ich odległości od Ziemi jest bardzo podobny. Księżyc jest znacznie mniejszy od Ziemi; jego średnica to mniej niż cztery tysiące kilometrów. Krąży on wokół Ziemi w odległości poniżej czterystu tysięcy kilometrów, a odległość Ziemi od Słońca jest kilkaset razy większa – około sto pięćdziesiąt milionów kilometrów (odległość tę nazwano „jednostką astronomiczną” i używa się jej niekiedy do porównania odległości różnych planet od Słońca). Wynika stąd, że średnica Słońca to

$$d \cong 150 \cdot 10^6 \text{ km} \cdot 4000 / 400\,000 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ km}$$

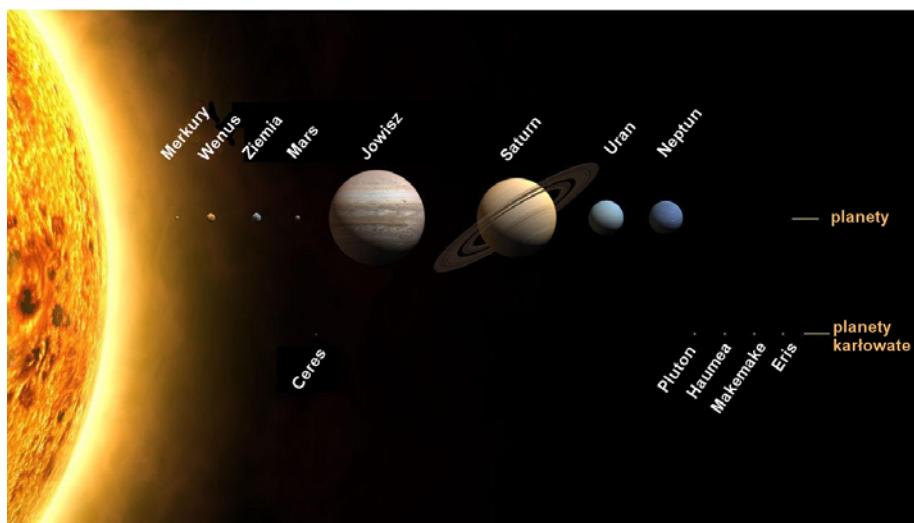
czyli półtora miliona kilometrów – ponad sto razy więcej niż średnica Ziemi. Zatem objętość Słońca jest ponad milion razy większa; Ziemia zmieściłaby się w nim razem z orbitą Księżyca! Masa Słońca, którą można wyznaczyć z analizy ruchu Ziemi i innych planet jest oczywiście odpowiednio ogromna (lecz nieco mniejsza, niż można by ocenić z rozmiarów, bo jego gęstość jest mniejsza od gęstości Ziemi): ponad trzysta tysięcy mas Ziemi, czyli dwa kwintyliony ($2 \cdot 10^{30}$) kilogramów. Tej liczby nie będziemy już próbowali sobie wyobrazić...

Łatwo można więc zrozumieć, dlaczego żadna z planet nie jest widoczna dla gołego oka jako „tarcza”, a tylko jako świecący (odbitym światłem słonecznym) punkt na niebie: planety mniej odległe od nas niż Słońce są podobnej wielkości, jak Ziemia. Nawet największa z planet – Jowisz – ma średnicę dziesięciokrotnie

mniejszą od Słońca, zaś jej minimalna odległość od Ziemi jest pięciokrotnie większa, niż Ziemi od Słońca. Jowisz wydawałby się więc mieć średnicę pięćdziesięciokrotnie mniejszą od Słońca lub Księżyca – a tak mała tarcza wygląda jak punkt, jeśli nie użyjemy lunety.

Gdyby zbudować model zmniejszony dziesięć miliardów (10^{10}) razy, w którym Słońce przedstawiałaby lampa o średnicy piętnastu centymetrów, to Ziemia byłaby ziarenkiem maku o półtoramilimetrowej średnicy, krążącym w odległości piętnastu metrów. Księżyc byłby jeszcze mniejszym ziarenkiem odległym o cztery centymetry od Ziemi, a Jowisz półtoracentymetrową wisienką odległą od Słońca o siedemdziesiąt pięć metrów.

Dalsze planety Układu Słonecznego są jeszcze wielokrotnie dalej. Dla najdalszej z nich, Neptuna, średnia odległość od Słońca wynosi niemal pięć miliardów kilometrów – trzydzieści razy więcej, niż dla Ziemi. (Zauważmy, że w jednostkach zalecanych we wstępie byłoby to po prostu 5 Tm – pięć terame-trów. Naprawdę szkoda, że jakoś nie przyjęto podawać tak odległości.) Na naszym modelu byłoby to ziarenko odległe od Słońca o niemal pięćset metrów!



Planety naszego Układu Słonecznego, oczywiście nie są zachowane proporcje odległości planet od Słońca

2. Gwiazdy i galaktyki

Pozornie ogromna odległość Neptuna od Słońca jest w rzeczywistości znikoma w skali kosmicznej. Światło słoneczne, które w ciągu sekundy przebiega około trzystu tysięcy ($3 \cdot 10^5$) kilometrów, dociera do Neptuna w ciągu 17 000 sekund, czyli niecałe sześć godzin. Tymczasem odległości między gwiazdami astronomie mierzą w latach świetlnych, czyli wielokrotnościach dystansu, jaki świa-

tło przebiega w ciągu roku. Rok ma 365 dni, a dzień 24 godziny, więc rok świetlny to

$$1 \text{ LY} = 365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s} \cdot 3 \cdot 10^5 \text{ km/s} \cong 10^{13} \text{ km} = 10 \text{ Pm}$$

czyli około dziesięć petametrów (jak widać, można było nadal używać znanych jednostek). Odległość Neptuna od Słońca to mniej niż jedna tysięczna roku świetlnego. Najbliższa Słońcu gwiazda, Proxima Centauri, jest już kilka tysięcy razy dalej (ponad cztery lata świetlne) – na naszym modelu nie zmieściłaby się w granicach Europy.

Ciekawe, że astronomowie dla jeszcze większych odległości używają zwykle wielokrotności innej jednostki – parseka. Jest to odległość, z której skrajne położenia Ziemi na orbicie słonecznej różnią się kierunkiem obserwacji o jedną sekundę łuku, czyli $1/3600$ stopnia. Jeden stopień to kąt rozwarcia oparty na łuku około 50 razy mniejszym od promienia. Łatwo można więc ocenić, że jeden parsek jest to w przybliżeniu odległość $50 \cdot 3600 = 180\,000$ razy większa od średnicy orbity Ziemi, czyli

$$1 \text{ pc} \cong 150 \cdot 10^6 \cdot 1,8 \cdot 10^5 \text{ km} \cong 3 \cdot 10^{13} \text{ km}.$$

Zatem parsek to około trzech (dokładniej 3,26) lat świetlnych. Doprawdy trudno zrozumieć, czemu używa się dwóch różnych jednostek o tak zbliżonych wartościach – chyba astronomowie są równie konserwatywni jak Anglicy, którzy wciąż używają mil, jardów i funtów obok kilometrów, metrów i kilogramów. Niemniej faktem jest, że największe odległości wyrażane są albo w tysiącach, milionach i miliardach lat świetlnych, albo w kilo-, mega- i gigaparsekach.

Gdzie spotykamy takie odległości? Nasz Układ Słoneczny stanowi cząstkę ogromnego układu około dwustu miliardów ($2 \cdot 10^{11}$) gwiazd ułożonych w zawartą w spłaszczonym dysku spiralę, który nazywamy galaktyką. Mieszkamy zresztą „na peryferiach” tego układu, co widać na niebie: jasny pas nazywany „Drogą Mleczną” to właśnie płaszczyzna naszej galaktyki; gdybyśmy byli w centrum, gwiazdy byłyby ułożone bardziej równomiernie we wszystkich kierunkach. Średnica naszej galaktyki to około stu tysięcy lat świetlnych (czyli trzydziestu kiloparseków, 10^{18} km, albo jeden zettametr – pomału kończą się nam jednostki wspomniane we wstępie), „grubość” jest kilkakrotnie mniejsza.

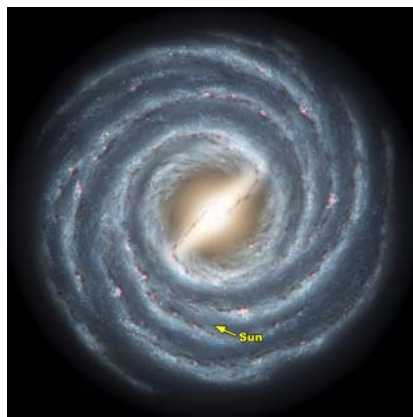
„Niedaleko” od naszej galaktyki, bo w odległości niewiele większej od jej średnicy znajdują się dwie karłowate galaktyki, zwane Obłokami Magellana na cześć ich obserwacji dokonanej przez tego żeglarza (choć już wcześniej widzieli je astronomowie starożytni i arabscy). Gołym okiem można też zobaczyć galaktykę M31, tzw. Wielką Mgławicę Andromedy, odległą o około dwa miliony lat świetlnych (siedemset kiloparseków) i jeszcze większą od naszej galaktyki.

To jednak dopiero początek znanego „dalekiego kosmosu”. Znamy obecnie setki tysięcy galaktyk, których odległości od nas mierzymy w mega- i gigaparsekach. Są wśród nich galaktyki tak odległe, że dociera do nas dziś światło wysłane przez nie przed ponad dziesięcioma miliardami lat, co jest czasem niewie-

le krótszym od wieku Wszechświata. Oznacza to odległości ponad 10^{26} m. Jeśli poprawne są przyjęte obecnie teorie ewolucji Wszechświata, możemy wkrótce dojść do granic poznania obserwacyjnego – do odbioru światła wysyłanego przez galaktyki bezpośrednio po ich utworzeniu.



Widok galaktyk w teleskopie Hubble'a



Obraz naszej galaktyki „z zewnątrz”

Jak już wspomniano, masy astronomiczne są niewyobrażalnie wielkie w porównaniu z masami obiektów doświadczalnych na Ziemi. Można jednak zbadać ich hierarchię biorąc jako jednostkę najwyższą z wymienionych dotąd mas – masę Słońca. Jest ono dość typową gwiazdą: masy innych gwiazd, które udało się wyznaczyć (zwykle z analizy ruchu względnego układów podwójnych gwiazd) wynoszą od jednej dwudziestej do sześćdziesięciu pięciu mas Słońca. Masa naszej galaktyki to ponad dwieście miliardów ($2 \cdot 10^{11}$) mas Słońca. Nie jest to bynajmniej „najcięższa” znana galaktyka: oszacowanie masy dla galaktyki oznaczanej NGC1316 dało ponad trzy biliony ($3 \cdot 10^{12}$) mas Słońca.

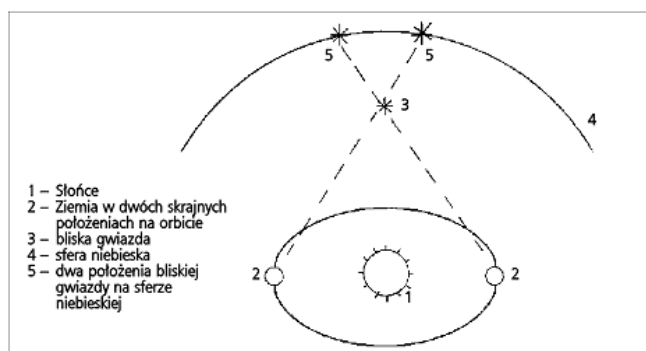
Nie będziemy tu już omawiać układów wyższego rzędu (gromad galaktyk) ani innych tworów kosmicznych (czarne dziury, struny kosmiczne), których własności nie są jeszcze dobrze ustalone. Sądzę jednak, że jasno pokazaliśmy, jak małym elementem kosmosu jest otaczający nas na co dzień świat – Ziemia – i jak długą drogę trzeba przejść, aby opisać nawet najbardziej pobieżnie strukturę znanej nam części Wszechświata.

3. Kosmiczne linijki

Wypada dodać kilka słów o tym, jak można mierzyć odległości kosmiczne. Nie będzie to oczywiście żaden systematyczny wykład; dokładne omówienie różnych metod pomiarów można znaleźć w wielu popularnych książkach poświęconych astronomii. Tutaj ograniczymy się do uproszczonego naszkicowania głównych idei kilku najważniejszych metod.

W naszym Układzie Słonecznym analiza obserwowanego ruchu planet i ich satelitów, opóźnień obserwowanych zaćmień i innych zjawisk w ramach teorii grawitacji pozwala na bardzo precyzyjne wyznaczanie odległości definiujących orbity. W przeszłości pozwoliło to nawet na odkrycie odległych planet przed ich bezpośrednią obserwacją: w 1845 roku analiza zaburzeń ruchu Urana wykazała, że można je wytłumaczyć przyciąganiem „dodatkowej” planety – Neptuna – i pozwoliła na obliczenie, gdzie i kiedy tę planetę można zobaczyć. Obserwacja w pełni potwierdziła przewidywania!

Dla najbliższych gwiazd użyteczna jest metoda paralaksy, oparta na podanej wyżej definicji parseka: dla półrocznego odstępu czasu (czyli położenia Ziemi „po dwóch stronach” jej orbity wokół Słońca) wyznaczamy „paralaksę” – kąt między kierunkami, pod którymi widoczna jest dana gwiazda.



Musimy oczywiście ustalić precyzyjnie czas obserwacji, aby uwzględnić poprawnie obrót Ziemi wokół swojej osi; musimy też mierzyć kąty z niezwykłą dokładnością. Jak już wspomniano, dla odległości jednego parseka różnica kątów wyniesie jedną sekundę łuku, czyli $1/3600$ część stopnia

$$1'' = 1^\circ / 3600.$$

Tłumaczy to nazwę „parsek” – odległość, dla której paralaksa równa jest jednej sekundzie. Odległości d wszystkich znanych gwiazd od Słońca są większe, więc ich paralaksy p są jeszcze mniejsze

$$p = 1'' \cdot 1 \text{ pc} / d.$$

Z Ziemi można mierzyć paralaksy większe od jednej setnej sekundy, co umożliwia pomiar odległości do stu parseków – ponad trzystu lat świetlnych. Teleskopy umieszczone na satelitach pozwalają na dziesięciokrotne zwiększenie tego zasięgu, ale to wciąż mało nawet w porównaniu z rozmiarami naszej galaktyki.

Na szczęście natura dostarczyła nam innych „miarok”. Obserwowana jasność gwiazdy jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości; wynika to

po prostu z faktu, że światło gwiazdy rozchodzi się równomiernie we wszystkich kierunkach, a pole powierzchni kuli rośnie proporcjonalnie do kwadratu promienia. Zatem wielkość strumienia światła, które wpada do naszego oka (lub teleskopu) stanowi dla rosnących odległości ułamek całkowitego strumienia wysyłanego przez gwiazdę, który maleje odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości. Jeśli możemy ocenić ten całkowity strumień (zwykle definiowany przez „jasność absolutną” J_0 , czyli taką, jaką miałaby dana gwiazda obserwowana z odległości dziesięciu parseków) porównanie z obserwowaną jasnością J pozwala na wyznaczenie odległości d

$$d^2 = (10 \text{ pc})^2 \cdot J_0 / J.$$

Dla niektórych typów gwiazd ocena jasności absolutnej jest całkiem wiarygodna. W szczególności, dla niektórych gwiazd (tzw. „cefeid”) jasność zmienia się okresowo, a długość tego okresu jest ściśle związana z ich jasnością absolutną. Stwierdzono to dla cefeid, dla których można było wyznaczyć odległość przez paralaksę i z jasności obserwowanej wyznaczyć jasność absolutną. Zatem cefeidy stanowią „znaki pomiarowe”; gdy Edwin Hubble odkrył w roku 1924 cefeidę w Wielkiej Mgławicy Andromedy, mógł wyznaczyć odległość do niej i definitywnie stwierdzić, że jest ona znacznie większa od rozmiarów naszej galaktyki. Wywnioskowano stąd, że mgławica ta jest pierwszą zidentyfikowaną odrębną galaktyką. Później metoda ta posłużyła do pomiaru odległości od wielu następnych galaktyk.

Jeszcze większe odległości można oszacować dzięki niezwyklemu odkryciu, dokonанemu również przez Hubble’a. Stwierdził on, że długości fal świetlnych dochodzących do nas z odległych galaktyk są systematycznie większe, niż dla galaktyk „bliskich”. To zjawisko „przesunięcia” długości fal tłumaczy się efektem ruchu galaktyk, a jego wielkość zgadza się dobrze z hipotezą, że galaktyki oddalają się od nas z prędkością proporcjonalną do odległości. Jest to fakt, który legł u podstaw uznanych obecnie teorii historii wszechświata. Dla nas jednak ważne tu jest jego praktyczne zastosowanie: przez pomiar przesunięcia długości fal można ocenić odległość najdalszych nawet obserwowanych obiektów. Tak właśnie oceniono wspomniane wyżej odległości rzędu miliardów lat świetlnych.

Zauważmy, że kolejne metody omówione powyżej korzystały odpowiednio każda z poprzedniej. Jak już wspomniano, zależność jasności absolutnej od okresu zmian cefeid wyznaczono dla tych cefeid, których odległość zmierzono metodą paralaksy, a potem użyto do pomiaru odległości znacznie większych. Podobnie zależność przesunięcia długości fal świetlnych od odległości wyznaczono dla galaktyk, których odległość znano dzięki obserwacji cefeid, a potem zastosowano dla wszystkich pozostałych. Wszechświat poznawaliśmy w kolejnych krokach, z których każdy był niezbędny dla uczynienia następnych. Dziś wydaje się nam, że już niewiele dalej możemy sięgnąć w przyszłości. Z pewnością jednak dokładniejsze badania kosmosu przyniosą jeszcze niejedną niespodziankę.

III. Świat atomów, jąder i cząstek elementarnych

1. Wstęp

Od starożytności ludzie zastanawiali się, czy materię można dzielić na dowolnie małe części. Filozofowie podzielili się na dwie grupy: jedni twierdzili, że taki podział można prowadzić w nieskończoność, a drudzy za Demokrytem z Abdeiry uważali, że materia składa się z cząstek, których nie można już dzielić na mniejsze – atomów (greckie słowo „atomos” oznacza właśnie obiekty niepodzielny).

Były to oczywiście rozważania czysto filozoficzne i nikt nie proponował żadnych konkretnych doświadczeń, które mogłyby rozstrzygnąć ten spór. Z pewnością zresztą nikt ze starożytnych filozofów nie wyobrażał sobie, jak małe są rozmiary cząstek, z których składa się materia.

Chemicy i fizycy XIX wieku powrócili do obrazu atomistycznego materii, ale tym razem obiekty, o których mówili, były niezbędne do właściwego opisu obserwowanych zjawisk. Cząsteczki chemiczne, z których składa się każda substancja, okazały się układami atomów – elementarnych składników, charakterystycznych dla każdego pierwiastka. O rozmiarach, masach i innych własnościach różnych atomów dowiadaliśmy się jednak w sposób bardzo pośredni i jeszcze u schyłku XIX wieku wielu uczonych kwestionowało realność atomów i cząsteczek, uważając je jedynie za użyteczne pojęcia teoretyczne.

Nie będziemy tu opisywać historii odkryć, które doprowadziły nas do obecnego stanu wiedzy o strukturze materii. Zanim jednak przedstawimy kolejne „piętra” tej struktury, musimy wyjaśnić pewne podstawowe różnice między przyjętym powszechnie przez fizyków opisem „mikroświata”, a otaczającym nas „zwykłym światem”. Tym czytelnikom, którym różnice te wydadzą się trudne do pojęcia, polecam niezmiennie popularną od kilkadziesiąt lat książeczkę amerykańskiego fizyka George’a Gamowa „Mister Tompkins w krainie czarów”, przedstawiającą znacznie szerzej w poglądowy sposób wiele z tych niezwykłych zjawisk.

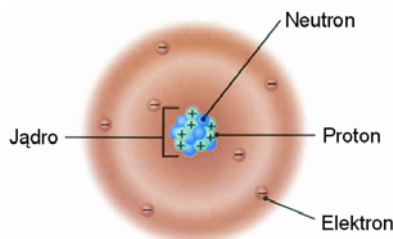
Dwoma podstawowymi elementami opisu mikroświata jest jego kwantowość i relatywistyczna równoważność masy i energii. Pierwszy element ma wiele konsekwencji: atomy są stabilne, choć analogiczne obiekty „makroskopowe” po bardzo krótkim czasie uległyby nieodwracalnym zmianom; stan atomu może zmieniać się tylko „skokowo”, a nie w sposób ciągły; nie można równocześnie wyznaczać par wielkości fizycznych, które dla „zwykłych” obiektów możemy mierzyć bez żadnych ograniczeń... Listę taką moglibyśmy kontynuować, jednak dla naszych celów naprawdę ważne jest to, że wszelkie podawane rozmiary będą miały tylko sens wartości średnich: nie należy wyobrażać sobie obiektów mikroświata jako „kulek” czy też innych brył o konkretnych kształtach. Nie należy też stosować do nich naszych przyzwyczajeń ze świata makroskopowego.

Równoważność masy spoczynkowej i energii jest pozornie znacznie prostsza. W gruncie rzeczy korzystał z niej już człowiek pierwotny zapalając pierwsze ogniska. Światło i ciepło, jakich dostarcza spalanie, są energią uzyskiwaną kosztem zmniejszenia całkowitej masy produktów spalania (gazów i popiołów) w porównaniu z masą spalanych materiałów i zużytego tlenu. Ubytek masy jest jednak tak znikomy, że nawet najdoskonalsze pomiary XIX wieku nie mogły go stwierdzić. Zupełnie inaczej jest w świecie atomów i mniejszych cząstek materii: masa układu związanego jest z reguły znacząco mniejsza od sumy mas jego składników. Oznacza to, że nowego sensu nabiera samo pojęcie złożoności: aby rozbić układ na składniki, należy dostarczyć energii, a jeśli jest ona bardzo duża, przy rozbijaniu mogą pojawić się nowe cząstki, których w układzie wcale nie było.

Ściślej mówiąc, w opisie kwantowym i relatywistycznym traci właściwie sens wyliczanie składników układu: to, co „zobaczymy” przy jego rozbijaniu (lub rozpraszaniu na nim innych cząstek) zależy od tego, jak prowadzimy proces rozbicia (albo rozpraszania). Niemniej można sprecyzować pewne warunki, przy których odpowiedź na pytanie „z czego składa się dany obiekt” stanie się w miarę jednoznaczna. W dalszym opisie będziemy więc nadal używać pojęcia „składników”, pamiętając o tym, że niekoniecznie znaczy ono to samo, co w przepisach kucharskich albo w opisach mechanizmów.

2. Atomy i ich składniki

Jak już wspomniano, wszystkie cząsteczki milionów związków chemicznych, które można znaleźć w otaczającej nas materii, zbudowane są z atomów zaledwie kilkudziesięciu pierwiastków. Promienie atomów są rzędu 10^{-10} m: milion razy mniejsze od najmniejszej odległości, jaką widzimy gołym okiem (0,1 mm). W ciałach stałych i cieczach, w których atomy są „ciasno upakowane”, odległości między nimi są tego samego rzędu; w gazach odległości mogą być znacznie większe.



Schemat atomu, oczywiście nie w skali

Atomy różnych pierwiastków różnią się tzw. liczbą porządkową Z , czyli liczbą elektronów wchodzących w skład atomu. Atom jako całość jest neutralny elektrycznie, a każdy z elektronów niesie ujemny ładunek elementarny $-e$

($e = 1,6 \cdot 10^{-16}$ C), więc „reszta atomu” musi nieść ładunek dodatni o takiej samej wartości bezwzględnej jak ładunek elektronów, czyli Ze . Jak wykazał już na początku XIX wieku Rutherford, ładunek ten jest zawarty w tzw. *jądrze*, zajmującym znikomo małą część objętości atomu, ale skupiającej niemal całą jego masę. Promienie jąder różnych pierwiastków są rzędu $10^{-15} - 10^{-14}$ m, więc objętości jąder są biliony razy mniejsze od objętości atomów.

Kolejne doświadczenia wykazały, że jądra są zbudowane z dwóch rodzajów cząstek: protonów o dodatnim ładunku e i neutralnych elektrycznie neutronów (niekiedy określa się je wspólną nazwą „nukleony”; masa obu rodzajów nukleonów jest zbliżona i prawie dwa tysiące razy większa od masy elektronu). Zatem dla atomu każdego pierwiastka liczba protonów musi być równa liczbie elektronów Z . Liczba neutronów dla większości pierwiastków nie jest ściśle ustalona. Odmiana pierwiastka o określonej liczbie neutronów w atomach nosi nazwę *izotopu*. Dla typowych pierwiastków istnieją jeden, dwa lub trzy izotopy, których atomy są stabilne (trwałe), oraz pewna liczba *izotopów promieniotwórczych*, dla których jądra atomów ulegają rozpadowi. Nie będziemy tu precyzować różnych typów rozpadów, o których można przeczytać w wielu popularnych książkach (np. „O siłach rządzących światem” A. Strzałkowskiego). Średni czas, po którym następuje rozpad, jest charakterystyczny dla danego izotopu i może się zmieniać w niezwykle szerokich granicach. Dla niektórych izotopów to znikomo mały ułamek sekundy, a dla innych miliony lat.

Najprostsze jądro to jądro atomu wodoru, które stanowi po prostu pojedynczy proton. Istnieje też cięższy trwały izotop wodoru, zwany deuterem; jądro atomu deuteru to układ proton-neutron. W wodrze występującym w przyrodzie jeden atom deuteru przypada na ok. 10 tysięcy „zwykłych” atomów. Dla kolejnego izotopu wodoru, zwanego trytem, jądro atomu składa się z protonu i dwóch neutronów. Ten układ nie jest już stabilny i ulega rozpadowi. Kolejne stabilne jądra to jądra izotopów helu. „Najpopularniejsze” z nich zawiera dwa protony i dwa neutrony. Dla większości lekkich pierwiastków liczba neutronów i protonów w jądrach atomów stabilnych izotopów jest w przybliżeniu równa; dla cięższych liczba neutronów jest większa. Najcięższe stabilne jądra to jądra atomów ołowiu, składające się z 82 protonów, oraz 122 do 126 neutronów.

Takie krótkie podsumowanie własności jąder pozwala na zrozumienie, czemu rozmiary jąder najcięższych i najlżejszych pierwiastków tak mało się różnią. Jeśli protony i neutrony mają podobne rozmiary i są „ciasno upakowane” w jądrze, to jego rozmiary można ocenić korzystając z faktu, że 216 nukleonów można ułożyć w sześcian z sześcioma nukleonami wzdłuż każdego boku. Oczywiście kształty jąder są bliższe kulom, niż sześcianom, ale ciasno upakowane 200 kulek też zmieści się w kuli o promieniu tylko sześciokrotnie większym od promienia pojedynczej kulki. Dlatego jądro atomu ołowiu jest tylko sześć razy większe od jądra atomu wodoru, choć jest od niego ponad dwieście razy cięższe.

Czy elektrony i nukleony są cząstkami elementarnymi, czy też są zbudowane z jeszcze mniejszych składników? Do dziś żadne doświadczenie nie wykazało istnienia struktury elektronów; jeśli mają one niezerowe rozmiary, to są one mniejsze niż 10^{-20} m. Elektrony są więc opisywane w teorii jako cząstki punktowe. Natomiast protony i neutrony okazały się być układami złożonymi z tzw. *kwarków*. Cząstek tych nie możemy bezpośrednio obserwować, bo siły wiążące kwarki w nukleony nie maleją z odległością. Zatem do oddzielenia pojedynczego kwarku na dowolnie dużą odległość potrzeba dowolnie dużej energii. Jak już wspomniano, energia może być użyta do wyprodukowania nowych cząstek. Zatem dostarczenie wielkiej energii do pojedynczego nukleonu spowoduje powstanie wielu nowych cząstek (też zbudowanych z kwarków), a nie oddzielenie pojedynczego kwarku.

Doświadczenia nie wskazują na istnienie struktury kwarków do odległości podobnej, jak dla elektronów, czyli 10^{-20} m. W pewnych teoriach rozważa się odległości znacznie mniejsze: tzw. długość Plancka (określająca odległości, dla których teoria grawitacji Einsteina musi się załamać ze względu na konieczność uwzględnienia efektów kwantowych) jest rzędu 10^{-35} m. Być może dla odległości „pośrednich” między dostępnymi dziś doświadczalnie, a długością Plancka odkryjemy kiedyś całkiem nową fizykę, np. dodatkowe wymiary „zwinięte” tak, że nie można ich zauważyć przy dostępnych obecnie energiach.

Z powyższych rozważań wynika, że nawet najgęściej upakowane atomy składają się głównie z próżni. W bryłce ołowiu o objętości 1 cm^3 zmieści się rzędu 10^{24} atomów i tyle samo jąder, więc objętość zajęta przez jądra wyniesie poniżej 10^{-18} m^3 – mniej, niż jedną bilionową objętości bryłki. Ta „rezerwa” bywa wykorzystana w przyrodzie: najcięższe gwiazdy po „wypaleniu” w reakcjach jądrowych wodoru przechodzą w stadium „supernowej”, czyli potężnego wybuchu, po którym powstaje tzw. gwiazda neutronowa zbudowana z nukleonów pozostałych po „zgnieceniu” atomów. Materia takiej gwiazdy jest, jak wynika z powyższych oszacowań, biliony razy gęstsza od „zwykłej” materii, więc średnica gwiazdy o masie porównywalnej ze Słońcem jest zaledwie rzędu dziesięciu kilometrów.

IV. Podsumowanie

W naszej podróży po świecie liczb spotykanych w przyrodzie odkryliśmy, że w świecie astronomii i cząstek elementarnych mamy do czynienia z odległościami niepomiarowo różnymi od spotykanych na co dzień.

Dzisiejsza skala badanych odległości rozciąga się na czterdzieści sześć rzędów wielkości: od dostępnych granic struktury cząstek, czyli 10^{-20} m, do odległości od najdalszych obserwowanych obiektów astronomicznych, czyli 10^{26} m. Można oczywiście tworzyć liczby jeszcze większe, szacując np. liczbę protonów i elektronów w naszej Galaktyce, albo w całym obserwowanym Wszechświecie. Mam nadzieję, że lektura tego artykułu pomoże w zrozumieniu tych faktów i w przyswojeniu sobie obrazu świata, jaki stworzyła współczesna nauka.