(zbieżność linii sił) jest większa niż w przypadku Słońca i przypływy spowodowane przez Księżyc są wyższe. Na otwartym oceanie różnice poziomu wody spowodowane przez Słońce wynoszą 35 cm, różnice poziomu spowodowane przez Księżyc wynoszą 65 cm. Te dwie pary fal przypływowych obiegają Ziemię z różnymi prędkościami (słoneczne w 24 godziny, Księżycowe nieco dłużej – podczas obrotu Ziemi Księżyc przemieszcza się w kierunku obrotu). Dwa razy w ciągu miesiąca synodycznego (podczas nowiu i pełni) fale przypływów słonecznych i księżycowych pokrywają się i osiągają maksymalną wysokość około 1 metra. W pozostałych okresach w ciągu doby następują po cztery mniejsze przypływy i odpływy, oddzielone zmieniającymi się odstępami czasu.

Fale przypływu zalewające wybrzeża oceanów osiągają wysokości znacznie przekraczające 1 metr. Dzieje się tak wtedy, gdy nadbiegająca fala napotyka dno morskie wznoszące się łagodnie w kierunku jej ruchu albo zatokę lejkowato zwężającą się w kierunku ruchu. W zatokach na francuskim brzegu kanału La Manche wysokość fali przypływu sięga 10 metrów, zaś najwyższe na świecie przypływy – 16 metrów – notowane są w zatoce Bay of Fundy w południowo-wschodniej Kanadzie.

Zauważmy, że różnice poziomu morza mniejsze niż 1 metr przy średnicy Ziemi, wynoszącej prawie 13 000 km, są bardzo małe. Pola grawitacyjne Słońca i Księżyca są więc z dobrym przybliżeniem jednorodne na całej Ziemi i są całkiem dokładnie znoszone przez przyspieszenia orbitalne Ziemi. Podobnie, pola grawitacyjne naszej Galaktyki i innych galaktyk są znoszone przez siły bezwładności spowodowane ruchem Słońca w Galaktyce i ruchem Galaktyki w Lokalnej Grupie galaktyk. Dlatego układ odniesienia związany ze środkiem Ziemi może być dla wielu celów uważany za inercjalny.

4. Skutki sił pływowych na innych ciałach w Układzie Słonecznym.

W skorupie Ziemi działanie sił pływowych nie daje się zaobserwować, ponieważ na Ziemi siły te są, jak wykazano powyżej, bardzo małe. Można sobie jednak łatwo wyobrazić, że większe siły pływowe, powstające w bardziej niejednorodnym polu grawitacyjnym (np. blisko Słońca albo dużej planety), mogą wznosić garby podobne do przypływów oceanu także w stałych powierzchniach planet lub księżyców. Zdarza się to rzeczywiście w Układzie Słonecznym.

Jabłko Demokryta

Kazimierz MIKULSKI

Wśród wielu anegdot i opowieści o starożytnych filozofach jest też i ta o jabłku Demokryta. Głosi ona, że siedząc pewnego razu na kamieniu nad brzegiem morza i trzymając w dłoni jabłko, Demokryt tak rozmyślał:

Jeżeli to jabłko przetnę na połowę, otrzymam połówkę jabłka. Jeżeli następnie tę połówkę przetnę na dwie części, otrzymam ćwiartkę jabłka. Jeżeli w ten sposób dalej będę dokonywał takiego dzielenia, to czy zawsze pozostanie mi w ręku ósma, szesnasta, trzydziesta druga itd. część jabłka, czy też nastąpi taki moment, że dzielenie doprowadzi do tego, iż pozostała w wyniku dzielenia część już nie będzie miała właściwości jabłka?

Filozof doszedł do wniosku, że granica owych podziałów istnieje. Swoje spostrzeżenia i wnioski wyłożył w dziele pt. *Mały diakosmos*, a niepodzielną część nazwał „atomem".

Ilu cięć potrzeba, by zamiast jabłka trzymać w ręku atom? Demokryt nie był w stanie odpowiedzieć na to pytanie. Aby to zrobić, musiałby znać rozmiary atomu, a pierwsze informacje na ten temat pojawiły się przeszło dwa tysiące lat po śmierci genialnego Greka.

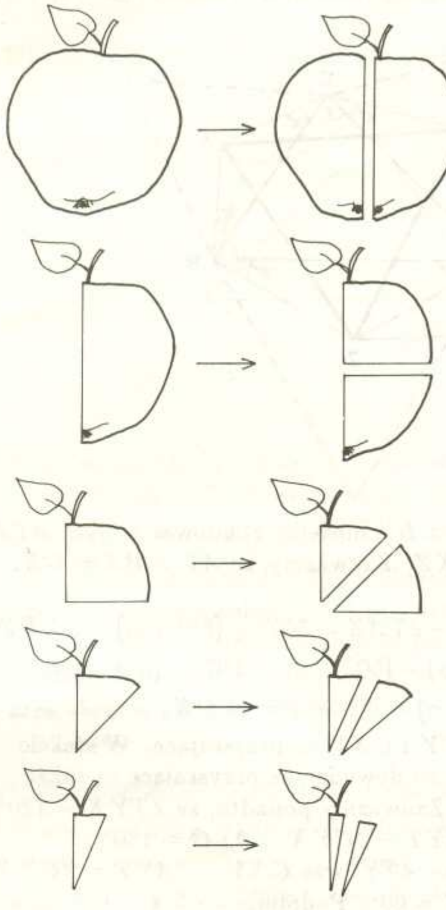
W 1742 r. Michaił Wasylewicz Łomonosow (1711 – 1765) zauważył, że jubilerzy rozwałkowują złoto do grubości jednej dziesięciotysięcznej części centymetra (10^{-4} cm), a więc atomy nie mogą być większe. W 1773 r. Benjamin Franklin (1706 – 1790) wykonał już specjalne doświadczenie mające na celu pomiar rozmiarów atomu. Wylał on na powierzchnię wody stawu w Clapham Common łyżkę oleju o objętości około 4 cm^3 i zmierzył powierzchnię powstającej plamy – wynosiła ona około 0,2 ha, czyli $2 \cdot 10^7$ cm^2. Dzieląc objętość przez powierzchnię, Franklin otrzymał liczbę $2 \cdot 10^{-7}$ cm wyznaczającą górną granicę na średnicę „atomu" (dziś powiedzielibyśmy – cząsteczki) oleju.

Doświadczenia z błonkami olejowymi były powtarzane i w późniejszych latach. W swoich rozległych pracach badawczych Michael Faraday (1791 – 1867) wykonał ze złota warstwy o grubości rzędu 10^{-6} cm, a na szkle otrzymał przezroczyste warstewki, wręcz błonki o grubości 10^{-7} cm. Lord John William Strutt Rayleigh (1842 –1919) otrzymał błonki o grubości 16 Å (1 Å= 10^{-8} cm). Natomiast w 1890 roku Wilhelmowi Conradowi Roentgenowi (1845 – 1923) udało się wytworzyć błonki olejowe o grubości 5 Å, ale jeszcze wcześniej, bo w 1805 roku, Thomas Young (1773 – 1829) badając zjawisko kapilarności oraz napięcia powierzchniowego cieczy wyliczył, że rozmiary badanych atomów są rzędu 10^{-8} cm.

Zupełnie odmienny sposób oszacowania wielkości fizycznych związanych z atomem (w tym i jego rozmiarów) podał w 1865 roku Józef Loschmidt (1821 – 1895). Stwierdził on, wykorzystując teorię molekularno-kinetyczną, która zakładała budowę gazów z poruszających się molekuł, że średnice atomów wynoszą 10^{-8} cm i są prawie jednakowe dla wszystkich znanych atomów.

Dalsze badania nie przyniosły już zasadniczych zmian w obrazie nakreślonym przez Loschmita, choć, oczywiście, precyzja pomiarów rosła z upływem czasu.

Aby odpowiedzieć na postawione wcześniej pytanie o liczbę podziałów jabłka, której musiałby dokonać Demokryt, możemy z powodzeniem przyjąć, że średnica atomu wynosi 10^{-8} cm. Załóżmy, że Demokryt trzymał jabłko będące w przybliżeniu kulą o średnicy d dziesięć centymetrów, a więc o objętości $V = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3 \approx 500\ \mathrm{cm}^3$. Przy każdym podziale jabłka objętość ta zmniejsza się o połowę (rysunek). Po n-tym dzieleniu objętość trzymanej części wynosi więc $V_n = \frac{V}{2^n}$, przy czym proces dzielenia możemy kontynuować co najwyżej do momentu, gdy V_n jest równe objętości atomu $V_a = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{D}{2}\right)^3$, gdzie $D = 10^{-8}$ cm. Otrzymujemy stąd $2^n \approx \left(\frac{d}{D}\right)^3$, czyli $n \approx 90$. Liczba ta jest zaskakująco mała.



$$1 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = \frac{1}{2^1} + \frac{1}{2^1}$$

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{1}{2^2} + \frac{1}{2^2}$$

$$\frac{1}{4} = \frac{1}{8} + \frac{1}{8} = \frac{1}{2^3} + \frac{1}{2^3}$$

$$\frac{1}{8} = \frac{1}{16} + \frac{1}{16} = \frac{1}{2^4} + \frac{1}{2^4}$$

$$\frac{1}{16} = \frac{1}{32} + \frac{1}{32} = \frac{1}{2^5} + \frac{1}{2^5}$$

Rysunek przedstawia podział jabłka Demokryta. A na ile części Ty, Czytelniku, możesz podzielić jabłko, ile najwięcej wykonasz cięć? Spróbuj.

Na zakończenie dodajmy, że z poglądami Demokryta (znanymi z poematu autorstwa Titusa Lukrecjusza Carusa (99 – 55 p.n.e.) pt. *O naturze wszechrzeczy*), żyjącego w latach około 460 – 370 p.n.e, w jońskiej kolonii Abderze na trackim wybrzeżu Morza Śródziemnego, nie zgadzał się działający niewiele później Arystoteles (384 – 322 p.n.e.), który uważał, że jabłko można dzielić bez końca. Zdanie Arystotelesa zwyciężyło i przez blisko dwa tysiące lat miało w nauce moc obowiązującą. A jednak Demokryt, uważany powszechnie za twórcę pojęcia atomu, nie był w swych poglądach zupełnie osamotniony. Historia wspomina jego nauczyciela, Leukippa z Miletu, oraz czasami fenickiego uczonego, Moscha z Sydonu, a także starochińskiego filozofa Kanadę (samo słowo „Kanada" można tłumaczyć jako „pożeracz atomów").

Fala przypływu biegnąca po powierzchni ciała stałego wykonuje pracę przy odkształceniu tej powierzchni. Źródłem energii do wykonania tej pracy jest ruch obrotowy ciała (planety lub księżyca). Energia ruchu obrotowego jakiegokolwiek ciała stałego w silnie niejednorodnym polu grawitacyjnym zmniejsza się więc stale dotąd, aż fale przypływu przestaną wędrować po jego powierzchni. Innymi słowy, księżyc lub planeta doświadczająca takich przypływów zwolni swój ruch obrotowy tak, że w końcu będzie zwrócona stale tą samą stroną w kierunku źródła pola grawitacyjnego. Tak właśnie stało się z Księżycem, który jest zwrócony ku Ziemi stale tą samą stroną, i z galileuszowymi satelitami Jowisza.

Można zapytać, dlaczego Księżyc nie zmusił Ziemi do obrotu synchronicznego, mimo że Ziemia zmusiła do tego Księżyc. Aby to wyjaśnić, napiszmy wzór na różnicę przyspieszeń grawitacyjnych wywołaną przez Ziemię po przeciwnych stronach Księżyca:

$$\Delta g_K = GM_z\left(\frac{1}{(d-r_K)^2} - \frac{1}{(d+r_K)^2}\right) = \frac{4GM_z\, d\, r_K}{(d^2 - r_K^2)^2},$$

gdzie M_z jest masą Ziemi, d – odległością od środka Ziemi do środka Księżyca, r_K – promieniem Księżyca. Wzór na różnicę przyspieszeń grawitacyjnych po przeciwnych stronach Ziemi wywołaną przez Księżyc jest następujący:

$$\Delta g_z = GM_K\left(\frac{1}{(d-r_z)^2} - \frac{1}{(d+r_z)^2}\right) = \frac{4GM_K\, d\, r_z}{(d^2 - r_z^2)^2},$$

gdzie M_K jest masą Księżyca, zaś r_z – promieniem Ziemi. Stąd:

$$\frac{\Delta g_K}{\Delta g_z} = \frac{M_z}{M_K}\cdot\frac{r_K}{r_z}\cdot\frac{(d^2 - r_z^2)^2}{(d^2 - r_K^2)^2} = \frac{M_z}{M_K}\cdot\frac{r_K}{r_z}\cdot\frac{(1 - r_z^2/d^2)^2}{(1 - r_K^2/d^2)^2}.$$

Ostatni czynnik jest z dobrym przybliżeniem równy 1 ($r_z/d \approx \frac{1}{60}$), $M_z/M_K \approx 81$, $r_K/r_z \approx \frac{2}{7}$. Zatem:

$$\frac{\Delta g_K}{\Delta g_z} = 23,$$

czyli siły pływowe wywoływane na Księżycu przez Ziemię są 23 razy większe niż siły pływowe wywoływane na Ziemi przez Księżyc. Ponadto, własne pole grawitacyjne Księżyca na jego powierzchni jest około 6 razy słabsze od ziemskiego pola grawitacyjnego na powierzchni Ziemi, Księżyc tłumił więc fale przypływowe znacznie mniej skutecznie niż Ziemia.