Siły pływowe na Ziemi i w Układzie Słonecznym

Andrzej KRASIŃSKI

1. Siły bezwładności.

Wszystko, co trzeba wiedzieć o siłach bezwładności, aby zrozumieć dalszy ciąg artykułu, można znaleźć w moim artykule w *Delcie* 3/1980. Przypomnijmy więc tylko podstawowe fakty w skrócie.

Pierwsze prawo dynamiki Newtona mówi, że ciało, na które nie działają żadne oddziaływania zewnętrzne, będzie poruszało się ruchem jednostajnym prostoliniowym albo pozostawało w spoczynku. Stwierdzenie to jest w gruncie rzeczy definicją pewnej klasy układów odniesienia zwanych **układami inercjalnymi**, założeniem zaś mechaniki Newtona jest, że takie układy odniesienia istnieją. Nasze otoczenie jest przeniknięte siłami grawitacyjnymi Ziemi i sąsiednich obiektów astronomicznych i nie jest wcale oczywiste, gdzie należałoby szukać układów inercjalnych.

W układzie, który nie jest inercjalny, ciała niekoniecznie będą poruszały się po liniach prostych albo ze stałymi prędkościami, mogą one doświadczać niespodziewanych zmian kierunku lub przyspieszeń. Przykładem układu nieinercjalnego jest wnętrze autobusu (zakładamy na chwilę, że powierzchnia Ziemi jest układem inercjalnym – wrócimy jeszcze do tego problemu). W przyspieszającym autobusie pasażerowie czują siłę ciągnącą ich do tyłu, w hamującym autobusie pewna siła pcha ich do przodu, na zakręcie zaś podobna siła usiłuje wypchnąć ich na zewnątrz zakrętu. Narciarz rozpoczynający zjazd musi wychylić się do przodu, aby nie upaść na plecy pod wpływem siły, która nie działała na niego, dopóki stał w miejscu. Siły, pojawiające się w układach odniesienia poruszających się ruchem przyspieszonym, są nazywane **siłami bezwładności**. W układzie poruszającym się z przyspieszeniem $\vec{a}$ siła bezwładności jest równa $-m\vec{a}$, gdzie m jest masą ciała doświadczającego przyspieszenia. Proszę zauważyć, że siła bezwładności ma zwrot przeciwny do wywołującego ją przyspieszenia.

Wyobraźmy sobie teraz ciało o masie m spadające swobodnie w polu grawitacyjnym o natężeniu $\vec{g}$. Siła grawitacyjna działająca na to ciało jest wtedy równa $m\vec{g}$, przyspieszenie w spadku swobodnym wynosi $\vec{g}$, siła bezwładności wynosi więc $-m\vec{g}$, zatem siła wypadkowa działająca na ciało, mierzona w układzie odniesienia spadającym wraz z badanym ciałem, wynosi $m\vec{g} - m\vec{g} = 0$. Ciało spadające swobodnie nie doświadcza więc żadnych sił i jest jedną z możliwych realizacji układu inercjalnego. Zauważmy jednak, że taki układ (nazywany **lokalnym układem inercjalnym**) przestaje być inercjalny w dużych odległościach od swobodnie spadającego ciała. Wystarczy wyobrazić sobie dwa obiekty swobodnie spadające po przeciwnych stronach Ziemi. Każdy z tych obiektów będzie miał niezerowe przyspieszenie względem drugiego, a więc nie będą one dla siebie nawzajem inercjalnymi układami odniesienia.

Jak duży jest lokalny układ inercjalny? Wyobraźmy sobie na chwilę jednorodne pole grawitacyjne (jest to obiekt nieistniejący w realnym świecie). Jego natężenie $\vec{g}$ jest wszędzie takie samo, a więc jakiekolwiek dwa swobodnie spadające ciała będą poruszały się z takim samym przyspieszeniem $\vec{g}$. Względne przyspieszenie tych dwu ciał będzie więc równe zeru, czyli będą poruszać się jedno względem drugiego po linii prostej ze stałą prędkością. Widać stąd, że układ odniesienia związany ze swobodnie spadającym ciałem jest układem inercjalnym w całym obszarze, w którym pole grawitacyjne można uważać za jednorodne.

Rzeczywiste pola grawitacyjne, występujące w przyrodzie, nie są jednorodne. Ich linie sił są zbieżne, a natężenie pola grawitacyjnego zmienia się wzdłuż nich (rośnie w kierunku źródła). Lokalny układ inercjalny jest więc ściśle inercjalny tylko wzdłuż każdego pojedynczego toru spadku swobodnego, i jest w przybliżeniu inercjalny w takim otoczeniu owego toru, w którym zbieżność linii sił jest zaniedbywalnie mała (na przykład, nie może być zmierzona przyrządem pomiarowym o danej dokładności – należy pamiętać, że wielkość układu lokalnego zawsze będzie zależała od dokładności naszych pomiarów).

Zauważmy, że znoszenie sił grawitacyjnych przez siły bezwładności zachodzi nie tylko dla ciał spadających wprost ku środkowi Ziemi. Zachodzi ono także na orbitach

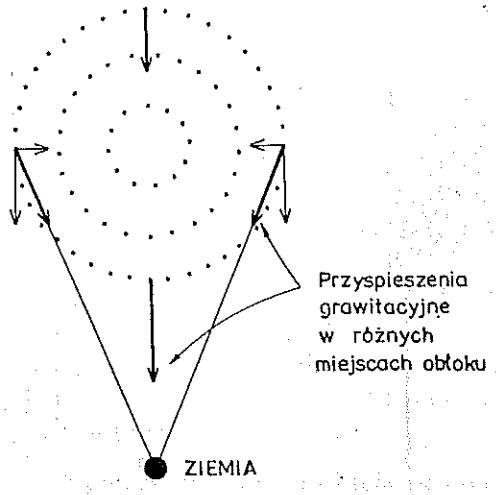
kołowych, w tym przypadku siła grawitacji $m\vec{g}$ jest równoważona przez siłę odśrodkową $mv^2/r = mg$, gdzie m jest masą obiektu krążącego po orbicie, v – jego prędkością, r – odległością od środka Ziemi. Siła odśrodkowa jest siłą bezwładności wywołaną przez przyspieszenie $\vec{g}$ odchylające tor ciała od linii prostej. Na orbicie eliptycznej ruch ciała jest złożeniem ruchu obiegowego oraz spadku swobodnego (lub swobodnego ruchu w górę – siła grawitacji zmniejsza wtedy prędkość), również wtedy siła grawitacyjna jest znoszona przez siły bezwładności, chociaż rachunek byłby trochę bardziej skomplikowany.

2. Siły pływowe.

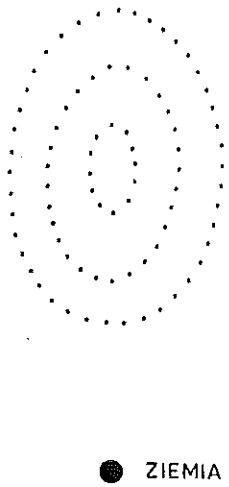
Wyobraźmy sobie kulisty obłok złożony z małych obiektów, nie oddziałujących na siebie żadnymi siłami (zapomnimy na chwilę o ich wzajemnym przyciąganiu grawitacyjnym) i spadający swobodnie w polu grawitacyjnym bardzo dużego obiektu (np. Ziemi) wprost ku jego środkowi, z prędkością początkową równą zeru (rys. 1a). Przypomnijmy wzór na przyspieszenie grawitacyjne:

$$\vec{g} = -\frac{GM\vec{r}}{r^3},$$

gdzie G – stała grawitacyjna, M – masa Ziemi, r – odległość obiektu od Ziemi. Ponieważ obiekty znajdujące się w „górnej" („tylnej"?) części obłoku są zawsze dalej od Ziemi niż obiekty w dolnej części obłoku, przyspieszenie tylnej części będzie zawsze mniejsze od przyspieszenia przedniej części. Ta różnica przyspieszeń wywoła różnicę w prędkościach, stale narastającą. W rezultacie dolna część obłoku będzie oddalała się od górnej. Równocześnie przyspieszenia bocznych



Rys. 1a.
Obłok swobodnie spadających obiektów, w chwili początkowej mający kształt kulisty...

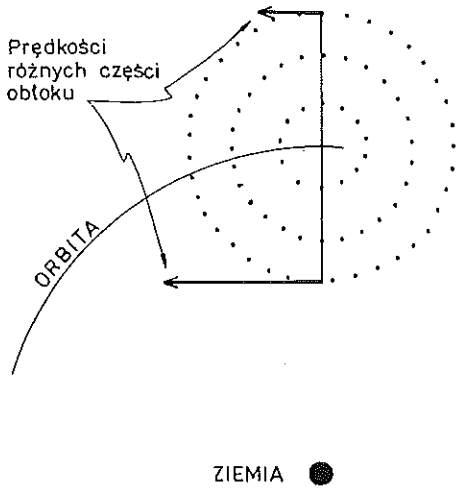


Rys. 1b.
...wydłuży się podczas lotu i zwęży wskutek różnic w natężeniu pola grawitacyjnego w sąsiednich punktach.

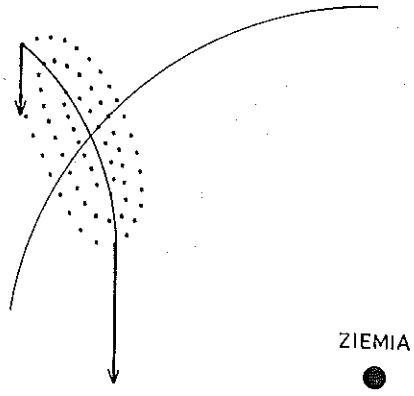
części obłoku nie będą równoległe, lecz nachylone ku sobie (są one wszystkie skierowane ku środkowi Ziemi). Będą więc miały małe składowe, skierowane ku środkowi obłoku, i boki obłoku będą powoli zbliżały się do siebie. Widać stąd, że różnice w natężeniu pola grawitacyjnego w sąsiednich punktach spowodują deformację obłoku. Będzie on rozciągany w kierunku środka Ziemi i ściskany w kierunkach prostopadłych, zmieniając kształt z kulistego na wrzecionowaty (rys. 1b).

Te różnice w natężeniu pola grawitacyjnego nazywane są **siłami pływowymi**. Przy ich obliczaniu odejmuje się wartości składowych siły grawitacyjnej po przeciwnych stronach badanego obiektu (w powyższym przykładzie był to spadający obłok). Wynik tego obliczenia nie może być zakodowany jako wektor, ponieważ składa się on z 9 liczb – jest to macierz; nie będziemy się dalej zajmowali szczegółami matematycznymi, ale trzeba wiedzieć, że mówimy tu o innym pojęciu niż zwyczajna siła wektorowa.

Obłok poruszający się po orbicie kołowej ulegnie podobnej deformacji (rys. 2a i 2b). Można łatwo obliczyć (np. z drugiego prawa Keplera), że obiekty dalsze od Ziemi poruszają się po orbicie z mniejszą prędkością niż obiekty bliższe. „Dolna" część obłoku będzie więc stale wyprzedzała część górną, i jeśli w chwili początkowej obłok będzie kulisty, to po pewnym czasie przybierze kształt podobny do banana (ponieważ różnica prędkości nie jest proporcjonalna do różnicy odległości od Ziemi, obiekty leżące początkowo na odcinku prostej utworzą później łuk krzywej).



Rys. 2a.
Obłok poruszający się po orbicie, początkowo kulisty...



Rys. 2b.
... również zostanie zdeformowany wskutek różnych prędkości orbitalnych różnych części obłoku (spowodowanych różnicami w natężeniu pola grawitacyjnego).

Na orbicie eliptycznej deformacja obłoku będzie kombinacją opisanych tu efektów.

W tym miejscu Czytelnik wie już wystarczająco dużo, aby zrozumieć, jak powstają przypływy na Ziemi i na innych ciałach niebieskich.

3. Przypływy na Ziemi.

Mechanizm przypływów oceanicznych na Ziemi jest skomplikowany, ponieważ Ziemia jest dość mocno związana swoim własnym polem grawitacyjnym (nie jest obłokiem swobodnie poruszających się obiektów), a ponadto skorupa ziemska jest ciałem stałym o dużej sztywności. Różne części Ziemi nie poruszają się więc niezależnie w polu grawitacyjnym Słońca. Przedstawione powyżej rozumowanie pozwala jednak na jakościowe zrozumienie tego procesu.

Będąc ciałem prawie sztywnym cała Ziemia jest przymuszana do ruchu po orbicie z tą samą prędkością. Jednakże, część Ziemi znajdująca się bliżej Słońca, gdyby mogła, poruszałaby się szybciej niż środek Ziemi (z drugiego prawa Keplera) – porusza się więc z prędkością mniejszą od jej właściwej prędkości orbitalnej. Powoduje to nadwyżkę siły ciążenia nad siłą odśrodkową – na tę część Ziemi działa siła odciągająca ją ku Słońcu, od środka Ziemi. Część Ziemi znajdująca się dalej od Słońca, gdyby mogła, poruszałaby się po orbicie wolniej niż środek Ziemi, jest więc przymuszana do ruchu „zbyt szybkiego". To z kolei wywołuje nadwyżkę siły odśrodkowej nad siłą ciążenia – na tę część Ziemi działa więc siła odciągająca ją od Słońca, znów od środka Ziemi.

Jedyną częścią powierzchni Ziemi, która może w widoczny sposób poddać się tym siłom, są masy wody w oceanach. Wznoszą się one ku Słońcu i w dal od Słońca, wysokość wzniesienia jest ograniczana polem grawitacyjnym Ziemi. Gdyby Ziemia obracała się synchronicznie, zwrócona stale tą samą stroną ku Słońcu, owe dwa wzniesienia na powierzchni oceanów stałyby nieruchomo stale w tych samych miejscach. Ponieważ Ziemia obraca się niesynchronicznie, wzniesienia przypływów, znajdujące się zawsze na linii łączącej środki Słońca i Ziemi, wędrują po powierzchni Ziemi powodując obserwowalne efekty na wybrzeżach.

Dla uproszczenia mówiliśmy tu o przypływach spowodowanych przez Słońce. W rzeczywistości na Ziemię działa także przyciąganie grawitacyjne Księżyca. Ponieważ Księżyc jest znacznie bliżej, niejednorodność jego pola grawitacyjnego (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.

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.

Właśnie dlatego Ziemia nie została jeszcze zmuszona do obrotu synchronicznego z Księżycem. Warto jednak wiedzieć, że istnieją geologiczne dowody na to, że ruch obrotowy Ziemi jest spowalniany. W muzeum historii naturalnej Smithsonian Institution w Waszyngtonie znajduje się odłamek dawnej rafy koralowej pochodzący sprzed kilkuset milionów lat. Rafa koralowa jest szkieletem żywego organizmu i, dopóki organizm żyje, stale rośnie. Geolodzy potrafią rozpoznać warstwy przyrostu dziennego rafy i po charakterystycznych, cyklicznie powtarzających się układach warstw dziennych rozpoznają przyrosty roczne. Okazuje się, że w czasach, gdy rafa z muzeum żyła, rok miał 390 dni. Nie są znane przyczyny, dla których mogłaby zmaleć długość roku na Ziemi (wiązałoby się to z przyspieszeniem ruchu orbitalnego, a więc zbliżeniem Ziemi do Słońca – tak wyraźna zmiana w ciągu kilkuset milionów lat nie byłaby możliwa do wytłumaczenia). Wniosek jest tylko jeden: Ziemia obraca się dziś wolniej, a za spowolnienie obrotu odpowiedzialne są przypływy.

Siły pływowe mogą wywoływać też inne efektowne zjawiska. Jeśli są wystarczająco duże, mogą spowodować rozerwanie gwiazdy, planety lub księżyca na fragmenty. Możliwe, że ich działaniu zawdzięczają też istnienie pierścienie pyłowe wokół planet. Wyobraźmy sobie, że na orbicie wokół gwiazdy lub planety znalazł się obłok małych obiektów (podobny do tego, o którym już mówiliśmy), związany siłami grawitacyjnymi na tyle słabo, że własne pole grawitacyjne obłoku jest za małe dla powstrzymania rozciągającego działania sił pływowych. Wówczas, jak to już opisaliśmy, część obłoku bliższa ciału przyciągającemu będzie systematycznie wyprzedzać część zewnętrzną i po dostatecznie dużej liczbie obiegów wyprzedzi ją o całą orbitę. W tym momencie obłok zamieni się w zamknięty pierścień. Nie próbujemy tu wyjaśnić, jak powstaje początkowy obłok, ale wnioskiem z powyższych rozważań jest następujące stwierdzenie: dla układu wielu małych obiektów krążących po bliskich sobie orbitach naturalnym stanem końcowym jest zamknięty pierścień wokół ciała centralnego, nie zaś obłok o małych rozmiarach.

Przypuśćmy, że obrót księżyca jakiejś planety stał się już synchroniczny, ale jego orbita jest eliptyczna. Ze wzoru na Δg widać, że różnica sił grawitacyjnych po przeciwnych stronach księżyca jest

większa, gdy księżyc znajduje się bliżej planety i mniejsza, gdy jest dalej. Fala przypływu na powierzchni księżyca (powierzchnia ta jest ciałem stałym!) będzie wtedy stać stale w tym samym miejscu powierzchni, ale będzie oscylować w górę i w dół. Energia, której kosztem powstają odkształcenia powierzchni księżyca, to energia ruchu obiegowego po orbicie. Wskutek utraty tej energii księżyc może w końcu spaść na swoją macierzystą planetę lub też jego orbita może stać się kołowa. Zanim do tego dojdzie, praca wykonywana przez oscylującą powierzchnię księżyca wytwarza energię cieplną w jego wnętrzu i może je stopić. Ten mechanizm wytwarzania ciepła jest jedynym wyjaśnieniem, dlaczego na najbliższym z galileuszowych księżyców Jowisza, Io, znajdują się wulkany (erupcje wulkanów na Io zostały sfotografowane przez amerykańską sondę kosmiczną Voyager). Obiekt o dużej masie, jak Ziemia, mógł zachować wystarczająco dużo ciepła we wnętrzu od czasu swojego powstania, lub też nagrzać się od energii rozpadu pierwiastków promieniotwórczych. Mały obiekt, taki jak Io, wystygłby już dawno (podobnie jak np. nasz Księżyc), gdyby nie miał stale działającego źródła energii.

5. Siły pływowe są obiektywnym testem na istnienie pola grawitacyjnego.

Jak już stwierdziliśmy wcześniej, przyspieszenie może znieść grawitację. Może też być użyte do symulowania grawitacji. Czytelnicy wiedzą pewnie, np. z powieści fantastyczno-naukowych, o „sztucznej grawitacji" w pojeździe kosmicznym, którą można wytworzyć przez obrót pojazdu wokół jego osi – siła odśrodkowa będzie wtedy „udawała" siłę grawitacyjną. Nie jest to żadna sztuczka psychologiczna, siły bezwładności i siły grawitacyjne naprawdę działają identycznie na wszystkie układy fizyczne i żadne przyrządy pomiarowe mierzące siłę **w jednym punkcie** nie potrafią rozróżnić tych dwóch sił.

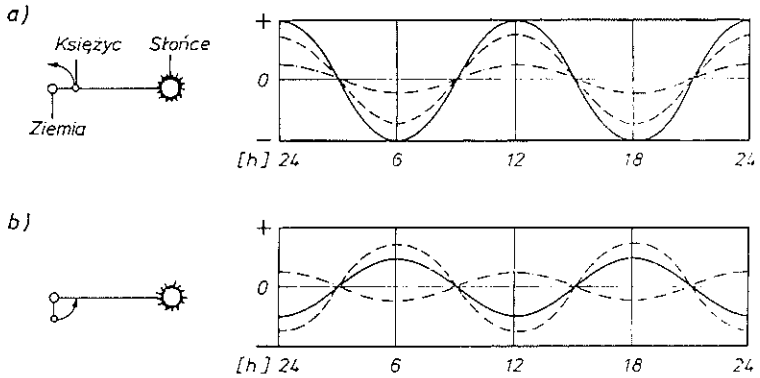
Możliwość odróżnienia grawitacji od sił bezwładności stwarzają właśnie siły pływowe. Wyobraźmy sobie układ inercjalny, w którym nie działają siły grawitacyjne. Wyobraźmy sobie następnie, że w takim układzie zbieramy grupkę małych cząstek materii i następnie wypuszczamy wszystkie cząstki z jednakowymi prędkościami początkowymi (tzn. wszystkie prędkości mają równoległe kierunki oraz jednakowe zwroty i wartości liczbowe). Względne prędkości cząstek są więc początkowo równe zeru. Jeśli w układzie nie działają żadne siły, to prędkości względne pozostaną równe zeru stale – i obserwację tę uczyni każdy obserwator, niezależnie od tego, czy on sam spoczywa, czy porusza się ruchem jednostajnym lub przyspieszonym. Jeżeli jednak obserwowane cząstki znajdują się w polu grawitacyjnym, to wskutek działania sił pływowych pomiędzy prędkościami poszczególnych cząstek zaczną narastać różnice i po pewnym czasie prędkości różnych cząstek na ogół nie będą ani równe, ani równoległe – prędkości względne staną się różne od zera. Również tę obserwację zgodnie uczynią wszyscy możliwi obserwatorzy. Siły pływowe są więc obiektywnym, niezależnym od układu odniesienia dowodem istnienia pola grawitacyjnego. Wniosek ten jest ważny przy studiowaniu teorii grawitacji Einsteina, dla której rozróżnienie zjawisk względnych, obserwowalnych tylko w niektórych układach odniesienia, od zjawisk obiektywnych, wykrywalnych dla każdego obserwatora, jest podstawowym problemem.

Rozwiązanie zadania M 615. Oznaczmy

PŁYWY

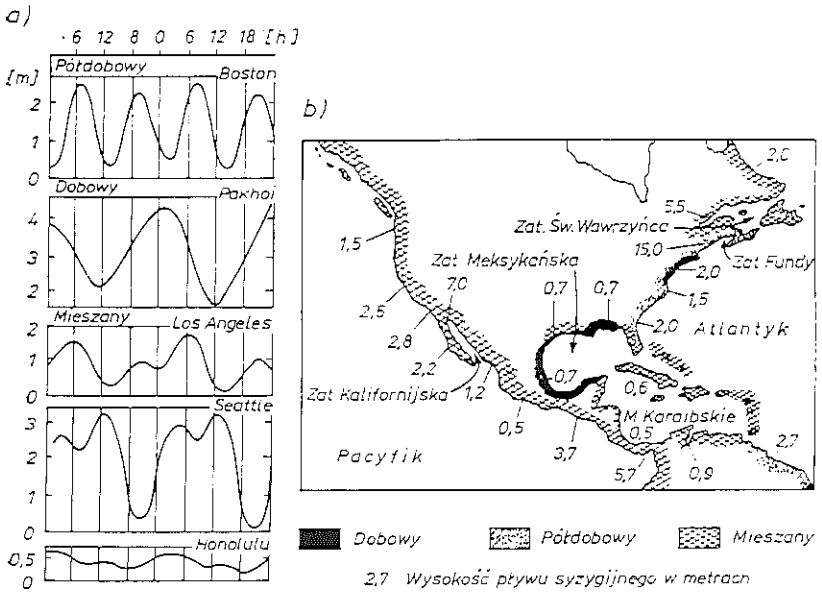
Na zdjęciu: port jachtowy w Brześć w czasie odpływu.

Opracowano na podstawie *Zarysu oceanologii* Harolda V. Thormana.



Przebieg pływów słonecznych i księżycowych

a – Księżyc w nowiu (pływ syzygijny), b – trzecia kwadra (pływ kwadraturowy).



Typy pływów

a – **Pływ półdobowy** cechuje występowanie dwu stanów wysokich w ciągu doby; wysokości kolejnych stanów wysokich i niskich są w przybliżeniu takie same. W **pływach dobowych** występuje tylko jeden stan niski i jeden stan wysoki w ciągu doby. **Pływ mieszany** ma zarówno cechy pływu dobowego, jak i półdobowego; pływ ten charakteryzuje się dużą różnicą między wysokością stanów wysokich i niskich, a także obu tych stanów występujących w ciągu doby.

b – Liczby na mapie odpowiadają wysokości pływu syzygijnego w metrach. Są one bliskie maksymalnym obserwowanym wartościom. Fale sztormowe, oddziaływania niżów atmosferycznych, prądów oceanicznych oraz stymulujący wpływ działania innych ciał niebieskich mogą jeszcze zwiększyć wysokość tych pływów.