

Plansza nr 18

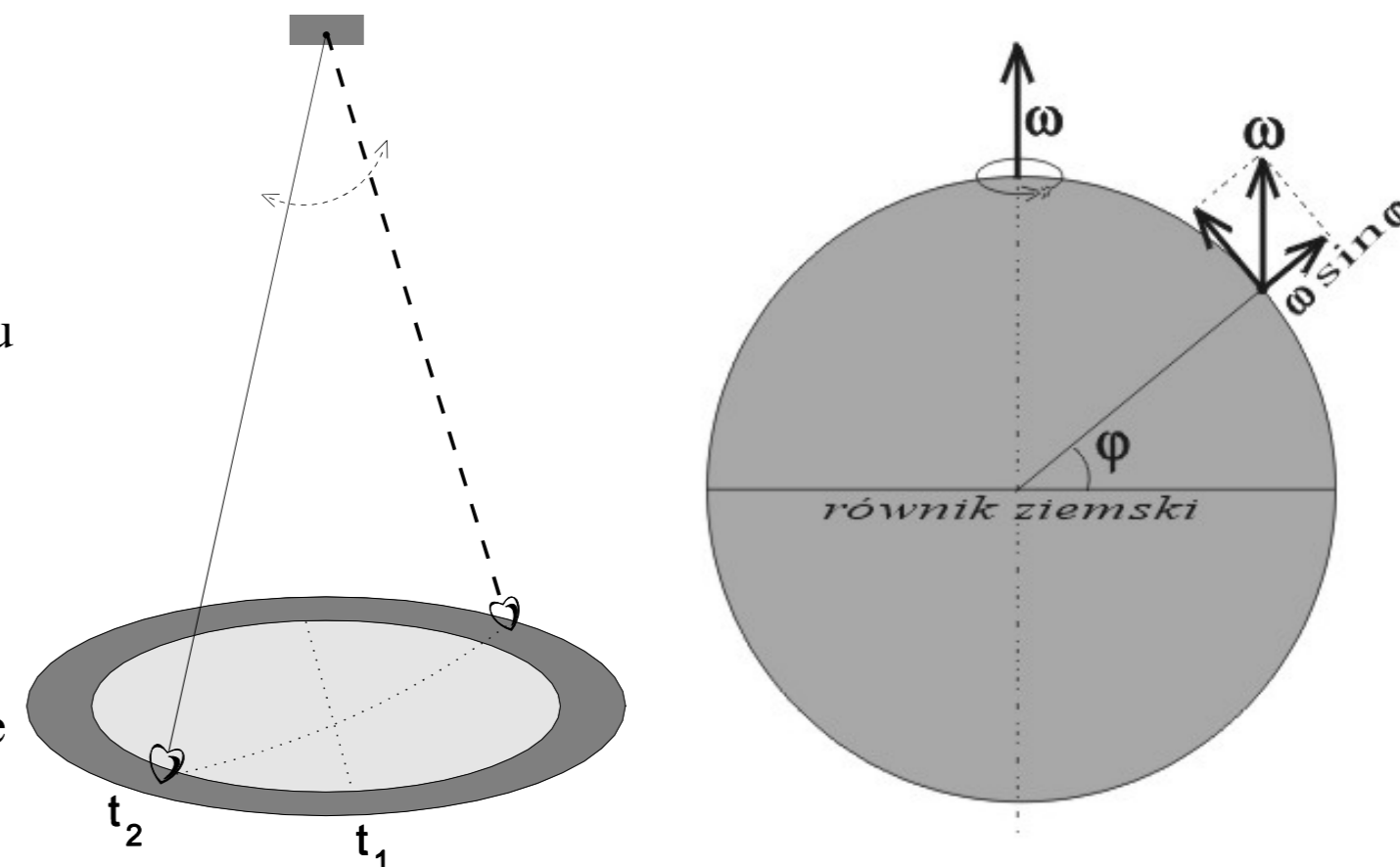
Ruchy Ziemi

Ruch wirowy. Ziemia wykonuje ruch obrotowy wokół własnej osi. Ruch ten był postulowany przez Kopernika, a dowiedzieć go można wykonując doświadczenie z **wahadłem Foucaulta** (lewy rysunek). Dobowy ruch ciał niebieskich ze wschodu na zachód jest obecnie poprawnie interpretowany jako następstwo ruchu wirowego Ziemi z zachodu na wschód. Doświadczenie dowodzące ruchu wirowego Ziemi zostało po raz pierwszy wykonane przez Foucaulta w 1851 roku. Polega ono na obserwacji zmiany płaszczyzny drgań wahadła względem dowolnej, ustalonej płaszczyzny poziomej, sztywno związanej z Ziemią. Gdyby Ziemia nie wirowała, to niezmienna w przestrzeni płaszczyzna drgań wahadła nie zmieniłaby się też względem Ziemi.

Płaszczyzna drgań wahadła w doświadczeniu Foucaulta zmienia się jednostajnie względem Ziemi, dokonując obrotu ze wschodu na zachód. Prędkość kątową obrotu tej płaszczyzny zależy od szerokości geograficznej φ miejsca, w którym wykonujemy doświadczenie. Za prędkość tą odpowiada bowiem tylko pionowa składowa prędkości kątowej obrotu Ziemi (rysunek po prawej). Składowa ta ma wartość $\omega \cdot \sin \varphi$, gdzie $\omega = 2 \cdot \pi / T_z$, a $T_z \approx 23^h 56^m$ jest dobą gwiazdową (24 godziny czasu gwiazdowego odpowiadają około $23^h 56^m$ czasu średniego słonecznego). Wartość liczbowa prędkości kątowej dla ruchu wirowego Ziemi wynosi $\omega = 0.00007292 \text{ s}^{-1}$. Czas, w którym płaszczyzna drgań wahadła zmienia się o kąt 360° na szerokości geograficznej φ wynosi

$$T = \frac{T_z}{\sin \varphi}$$

Ze wzoru widać, że w skrajnym przypadku, gdy $\varphi = 0^\circ$, T przyjmuje wartość nieskończenie wielką. Oznacza to, że na równiku płaszczyzna drgań wahadła nie będzie ulegać zmianie. Wobec ruchu wirowego Ziemi, na wszelkie ciała poruszające się względem niej samej z prędkością v , działa **siła Coriolisa** $\mathbf{F} = 2 \cdot m \cdot \mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega}$. Zachowanie się wahadła w doświadczeniu Foucaulta jest jednym z przejawów działania tej siły.



Ruchy okrężno-translacyjne Ziemi. Ruch obiegowy Ziemi dookoła Słońca, jak też i ruch Księżyca wokół Ziemi można rozpatrywać względem środków mas układów, jak to się czyni przy rozwiązywaniu problemu dwóch ciał. Dla układu Ziemia-Księżyc środek masy znajduje się w odległości około 4646 km od środka Ziemi (t.j. ponad 1700 km pod powierzchnią naszej planety), a dla układu Słońce-Ziemia środek masy znajduje się w pobliżu środka Słońca. W odstępie czasu równym jednemu miesiącowi gwiazdowemu Ziemia wykona pełen obieg środka masy układu Ziemia-Księżyc, a w odstępie jednego roku gwiazdowego pełny obieg środka masy w układzie Słońce-Ziemia. Te ruchy Ziemi dookoła poszczególnych środków mas są ruchami po okręgu globu jako całości. Dla skupienia uwagi na tym ruchu najlepiej zapamiętać o ruchu wirowym Ziemi i zauważyć, że mamy tu właściwie do czynienia z ruchem okrężno-translacyjnym. Termin „ruch okrężno-translacyjny” odnosi się do przemieszczania całego obiektu wzdłuż okręgu zamiast wzdłuż prostej, co ma miejsce przy zwykłej translacji. Tak jak przy zwykłej translacji nie mamy tu do czynienia z żadnym obrotem ciała, lecz z przesunięciem przy zachowaniu pierwotnej orientacji ciała. Jako przykład takiego ruchu może służyć ruch kredy podczas odręcznego (nie z użyciem cyrkla) rysowania na tablicy okręgu. W czasie ruchu okrężno-translacyjnego każdy element objętości przemieszczającego się ciała wykonuje ruch po okręgu o takim samym promieniu. Środki tych okręgów są jednak różne.

W ścisłym związku z ruchem okrężno-translacyjnym Ziemi pozostaje **zjawisko sił przyptywowych**. Wektory przyspieszenia przyptywowego dla elementów objętości Ziemi są wypadkową przyspieszeń grawitacyjnych wywołanych działaniem Księżyca i Słońca oraz przyspieszeń odśrodkowych w ruchach okrężno-translacyjnych wokół środków mas w układzie Ziemia-Księżyc i w układzie Ziemia-Słońce (lewy rysunek poniżej). Słabo widoczne wektory wypadkowe w punktach A, Z, B i C wskazują kierunki sił przyptywowych. W punktach A i Z siły te spowodują przyływ, w punktach B i C — odpływ. Wektory przyspieszeń grawitacyjnych i odśrodkowych w układzie Ziemia-Słońce nie zostały naniesione gdyż są zbyt długie, by zmieścić się na rysunku w tej skali (około 180 razy dłuższe od odpowiednich wektorów w układzie Ziemia-Księżyc).

Wyprowadźmy wzór na przyspieszenie przyptywowe w punkcie A, wywołane wpływem Księżyca. Przyspieszenie grawitacyjne na element masy w otoczeniu punktu A ze strony Księżyca wynosi

$$a_A = G \cdot \frac{M_K}{(d-r)^2}$$

gdzie M_K , d i r oznaczają odpowiednio masę Księżyca, odległość między środkami Ziemi i Księżyca oraz promień Ziemi. Podobnie możemy napisać dla elementu masy w otoczeniu punktu G

$$a_G = G \cdot \frac{M_K}{d^2}$$

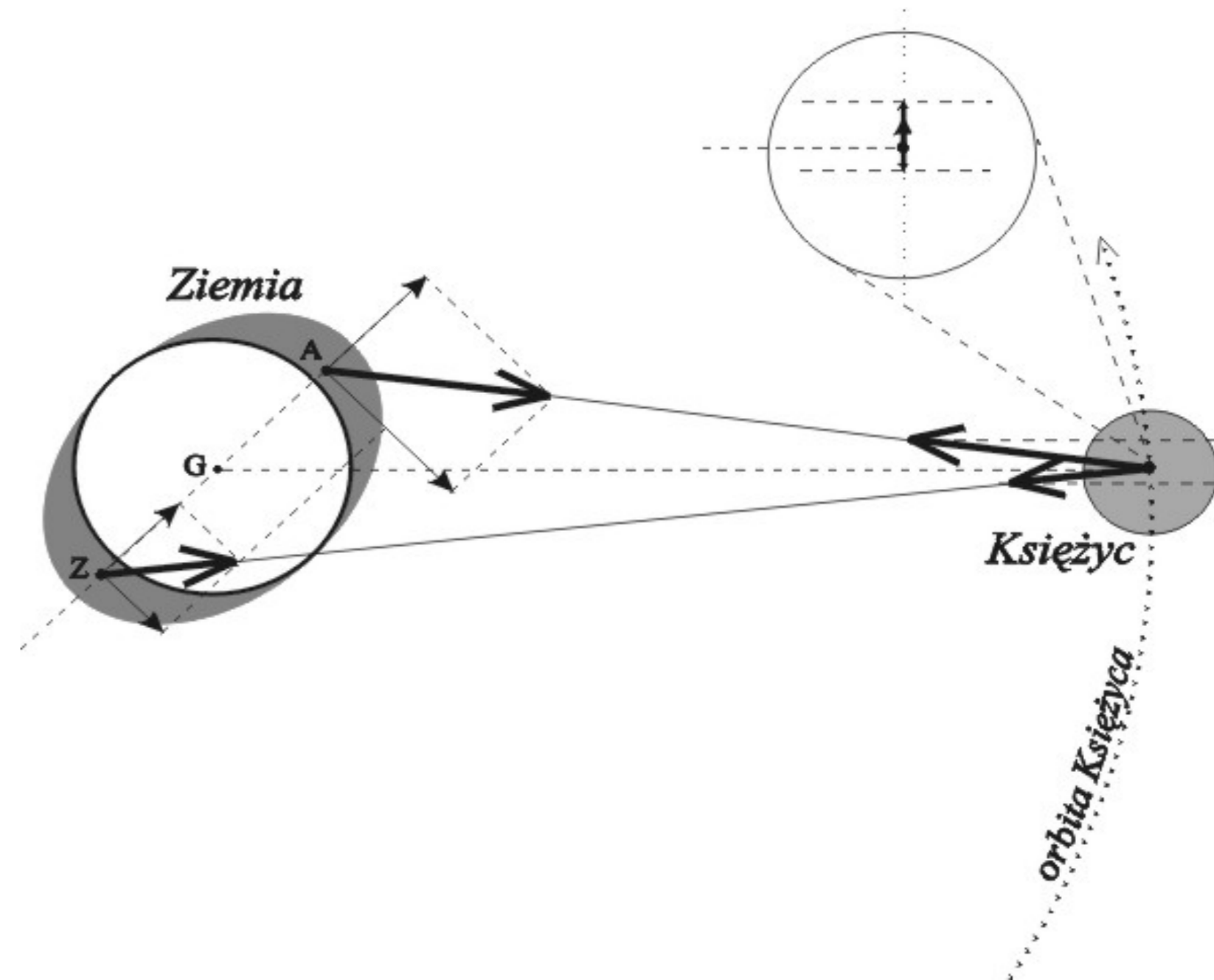
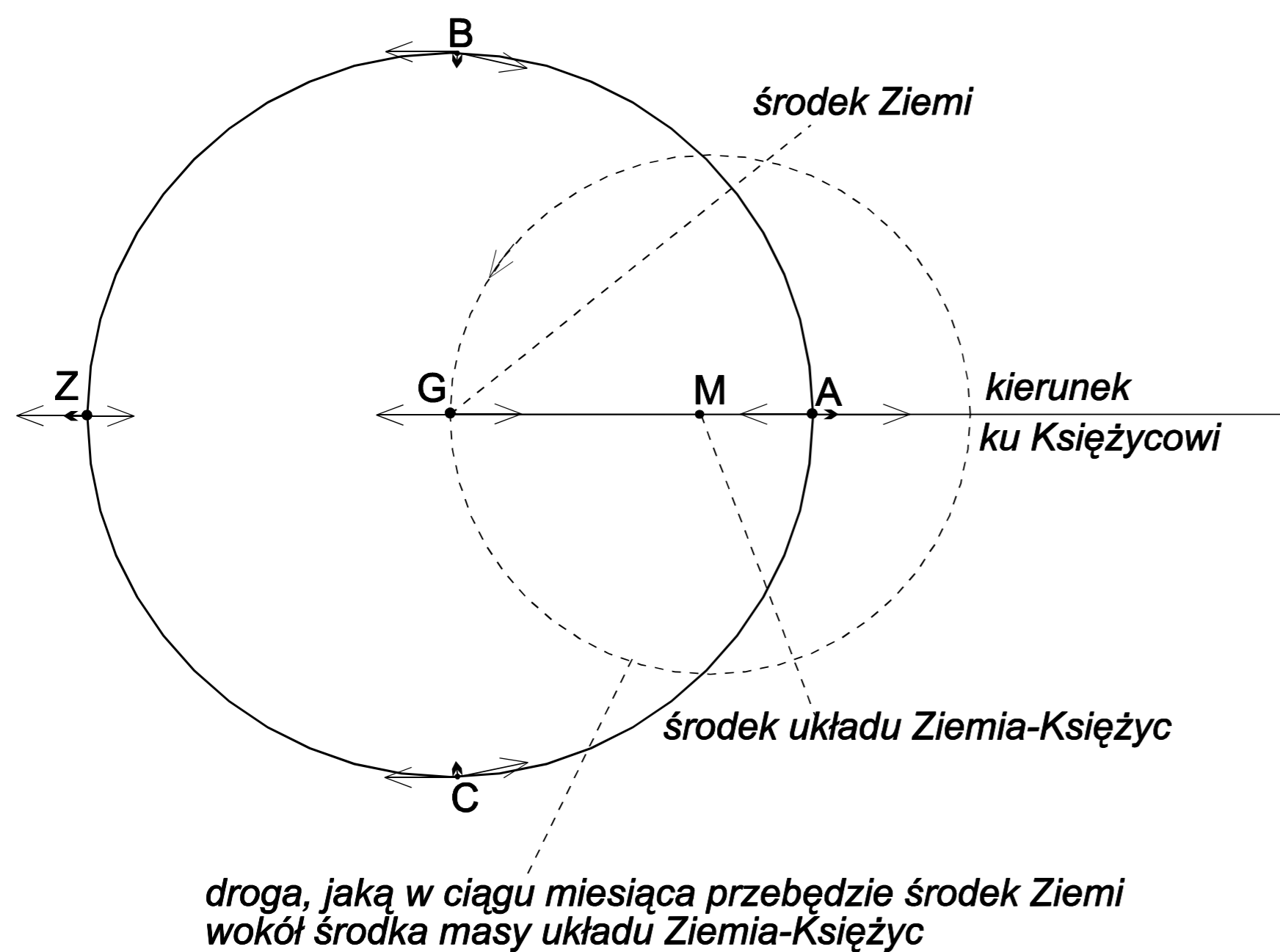
Przyspieszenie siły przyptywowej w punkcie A otrzymamy ze wzoru:

$$P_A = a_A - a_G = G \cdot M_K \frac{1}{d^2} \left(\frac{1}{1 - \frac{2r}{d} + \frac{r^2}{d^2}} - 1 \right)$$

Wzór powyższy wobec $r/d \ll 1$ można przybliżyć równaniem:

$$P_A = 2GM_K \cdot \frac{r}{d^3}$$

Wartość P_A liczona z powyższego wzoru wynosi $1.1 \times 10^{-4} \text{ cm s}^{-2}$.



Przyspieszenie przyptywowe ze strony Słońca wynosi $0.51 \times 10^{-4} \text{ cm s}^{-2}$, czyli około dwa razy mniej niż ze strony Księżyca. Przyczynki od Księżyca i od Słońca mogą się dodawać (maksymalna wartość gdy Księżyc jest w nowiu lub pełni) lub odejmować (minimalne przyspieszenie wypadkowe, gdy Księżyc znajduje się w pierwszej lub ostatniej kwadrze).

Istnieje wiele przejawów działania sił przyptywowych. Na Ziemi najłatwiej zaobserwować przyływy i odpływy mórz. Poziom wód mórz i oceanów (zwłaszcza na małych szerokościach geograficznych) podnosi się i opada w sposób regularny. Odstęp czasu pomiędzy kolejnymi przyływami (odpływami) wynosi $12^h 26^m$, czyli równy jest odstępowi czasu pomiędzy górowaniem a dołowaniem Księżyca. Po upływie $6^h 13^m$ od chwili maksymalnego przyływu występuje maksymalny odpływ. Ściślej mówiąc glob ziemski obiegany jest przez dwie fale przyptywowe. Fala przyływu księżycowego obiega Ziemię w czasie $12^h 26^m$, a druga fala, fala przyływu słonecznego obiega Ziemię w ciągu 12^h . Gdyby fala przyływu nadążała za Księżycem, to przyływ powinien wypadać dokładnie w czasie górowania i dołowania Księżyca w danym miejscu. Zawsze jednak obserwuje się pewne opóźnienie przyływu maksymalnego w stosunku do kulminacji Księżyca. Opóźnienie to, różne dla różnych miejsc, nosi nazwę **czasu portowego** (Chociaż rzecz dotyczy dowolnego miejsca na powierzchni Ziemi, to zjawisko pływów łatwo jest pomierzyć w portach morskich. Dla portów też istotną rzeczą jest wiedzieć kiedy będzie przyływ, a kiedy odpływ gdyż pozwala to odpowiednio organizować niektóre prace portowe. Pojęcie „czas portowy” zawdzięcza swą nazwę właśnie miejscu w jakim był wyznaczany). Wpływowi fali przyspieszeń przyptywowych poddają się nie tylko masy wód, ale także atmosfera, a nawet obszary lądowe. Ląd trwały ulega odkształceniom przyptywowym o amplitudzie około 20 centymetrów.

Siły przyptywowe w układzie Ziemia-Księżyc przyczyniają się do hamowania ruchu wirowego Ziemi oraz do przyspieszania ruchu orbitalnego Księżyca (na prawym rysunku wybrzuszenia przyptywowe Ziemi zaznaczono oczywiście w sposób mocno przesadzony).

Jak widać z rysunku Księżyc przyciąga z większą siłą bliższą masę wzniesienia przyptywowego A niż dalszą Z. Zgodnie z III zasadą dynamiki Newtona wzniesienia przyptywowe A i Z przyciągają Księżyc. Silniej jest on przyciągany przez masę wzniesienia A niż wzniesienia Z. Wypadkowy wektor sił pochodzących od A i Z (ściślej rzut wektora na kierunek chwilowego ruchu Księżyca) jest skierowany zgodnie z ruchem Księżyca. Siły przyptywowe powodują zatem przyspieszanie ruchu orbitalnego Księżyca, co z kolei przejawia się wzrostem promienia orbity czyli oddalaniem się Księżyca od Ziemi (3–4 cm rocznie).

