

IV.3. Wahadło Foucault.

W praktycznym wykonaniu, wahadło proste jest to układ, w którym ciało o możliwie dużej masie m zawieszono jest na możliwie cienkiej nici. Ciało to może wykonywać ruch oscylacyjny względem punktu położenia równowagi. Przez punkt ten oraz punkt zawieszono przechodzi oś $\vec{\omega}_{pp}$ płaszczyzny wahań.

Prostopadłe do płaszczyzny wahań przechodzi oś $\vec{\omega}_p$ ruchu oscylacyjnego, jak to pokazano na rys. obok.

Obrót płaszczyzny wahań wokół osi $\vec{\omega}_{pp}$ jest jednocześnie obrotem osi ruchu oscylacyjnego $\vec{\omega}_p$ wahadła.

W kwietniu 1851 r. w Paryskim Obserwatorium Léon Foucault¹ po raz pierwszy publicznie zademonstrował szczególne działanie wahadła jako efekt działania siły Coriolisa.

Wahadło mogło swobodnie obracać się w płaszczyźnie pionowej wahań i jednocześnie było zaopatrzone w mechanizm umożliwiający skuteczne eliminowanie tłumienia wahań w wyniku oporu powietrza.

Za pomocą przez siebie skonstruowanego wahadła Foucault bezpośrednio zademonstrował ruch rotacyjny Ziemi.

W kilka tygodni później, wahadło o długości 67 metrów i ciężarku o masie 28 kg zostało uruchomione w Panthéonie w Paryżu.

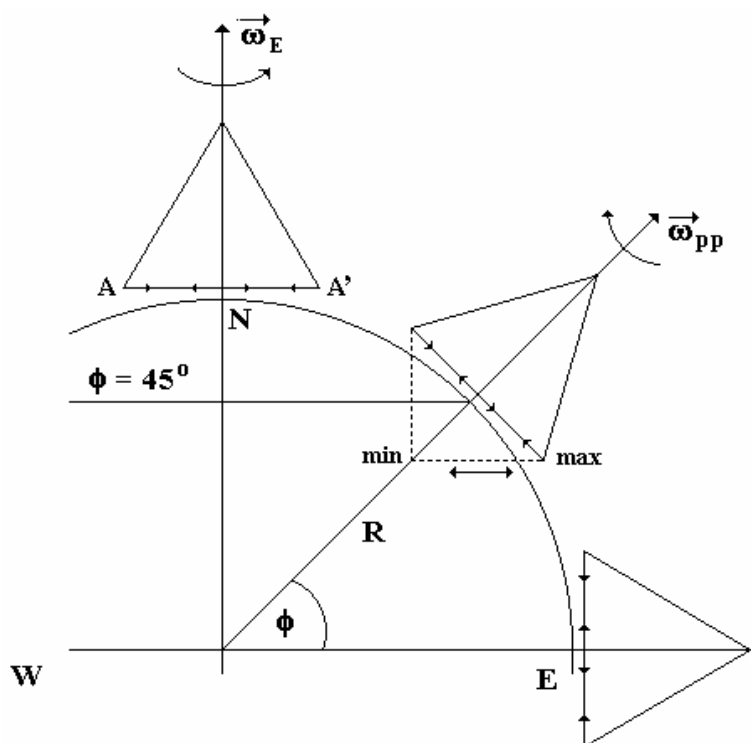
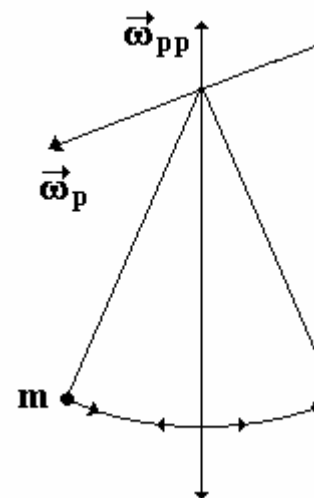


Fig. IV.3.1. Wahadło Foucault pod różnymi szerokościami geograficznymi ϕ .

¹ Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868), fizyk francuski; głównie zajmował się opracowaniem metod pomiaru prędkości światła w (hipotetycznym) eterze. W 1850 r. wykonał pomiar prędkości absolutnej (w hipotetycznym eterze) światła, sugerowaną przez Arago metodą wirującego zwierciadła. Wykazał też, że prędkość światła jest mniejsza w wodzie niż w powietrzu, tym samym wykazując prawdziwość teorii falowej światła, w przeciwieństwie do teorii korpuskularnej. Odkrywcą łuku węglowego (między elektrodami węglowymi) oraz prądów wirowych (znane obecnie jako prądy Foucault), prądów indukcyjnych w metalach wywołanych zmiennym polem magnetycznym. Od 1855 zatrudniony jako fizyk w Paryskim Obserwatorium.

Załóżmy, że umieściliśmy wahadło dokładnie na biegunie **N** Ziemi. W położeniu równowagi drut na którym zawieszony jest ciężarek wyznacza oś $\vec{\omega}_{pp}$ płaszczyzny wahań wahadła. W tym przypadku oś $\vec{\omega}_{pp}$ wahadła pokrywa się z osią $\vec{\omega}_E$ ruchu rotacyjnego Ziemi. Amplituda wahań wahadła wynosi AA' (na rys. IV.3.1. odcinek AA' prostej).

W czasie wahań, ciężarek wahadła przechodzi przez oś $\vec{\omega}_E$ obrotu Ziemi i z kolei oddala się od tej osi na maksymalną odległość $r = AA'/2$.

W skrajnych położeniach **A** oraz **A'** prędkość kuli wahadła wynosi zero, ponieważ w czasie wahań w tych położeniach kula wahadła zmienia kierunek ruchu na przeciwny. Ale w tych położeniach, prędkość kuli po obwodzie okręgu o promieniu **r** powinna wynosić:

$$v_a = \omega_{pp} \frac{AA'}{2} = \omega_{pp} \cdot r$$

Ale, żeby nadać taką prędkość po obwodzie, musiałaby działać siła styczna do okręgu o promieniu **r**, co z kolei spowodowałoby obrót płaszczyzny wahań wokół osi ω_{pp} tego wahadła. Ale takiej siły... nie ma!

Z tego względu, płaszczyzna wahań nie ulega obrotowi wokół osi $\vec{\omega}_{pp}$ płaszczyzny wahań.

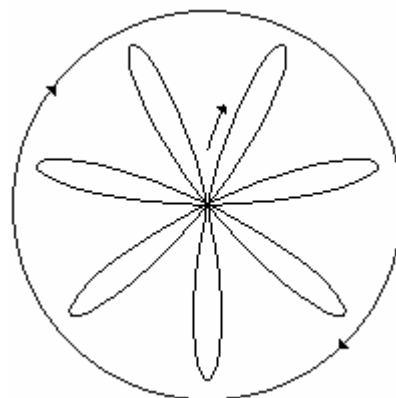
Ale pod wahadłem obraca się kula ziemiska. Obserwator stojący (lub leżący) obok wahadła ma wrażenie, (ale tylko wrażenie!), że płaszczyzna wahań wahadła ulega obrotowi.

W rzeczywistości, to obserwator na obracającej się Ziemi obracany jest względem płaszczyzny wahań wahadła!

Powyższe odnosi się do sytuacji, gdy wahadło zostało wprowadzone w ruch od (dolnego) położenia równowagi, a w którym to położeniu prędkość $v_s = 0$.

Względem powierzchni obracającej się Ziemi tor ruchu ciężarka wahadła jest taki jak pokazano na rysunku obok. Natomiast w przestrzeni, w której wiruje Ziemia, tor ruchu ciężarka nie ulega odkształceniu, ani też obrotowi.

Ciężarek przechodzi przez punkt równowagi trwałej, dokładnie nad biegunem północnym **N**.



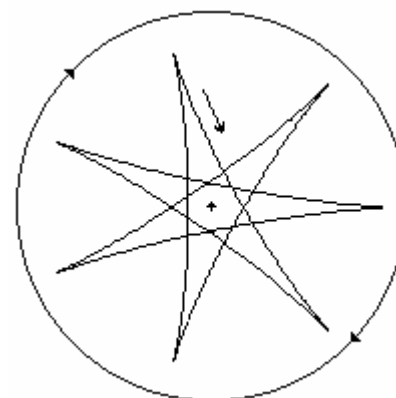
Jeżeli jednak odchylimy kulę wahadła od dolnego położenia równowagi trwałej, i na chwilę przytrzymamy, to w tym położeniu **A** lub **A'** (Fig. IV.3.1.) kula uzyska prędkość v_a po obwodzie okręgu o promieniu **r**.

Uwaga: użyliśmy siły do przeniesienia i przytrzymania na moment kuli w odległości **r** od osi obrotu Ziemi. W tym czasie, kula uzyskała prędkość v_a po obwodzie okręgu o promieniu **r**.

Puszczamy kulę, która ma już prędkość obwodową v_a .

Ciężarek uzyskuje prędkość w kierunku położenia równowagi trwałej, ale jednocześnie ma prędkość v_a w kierunku prostopadłym. Wypadkowa prędkość jest taka, że ciężarek omija punkt równowagi trwałej.

Tor ruchu ciężarka jest taki jak pokazano na rysunku obok.



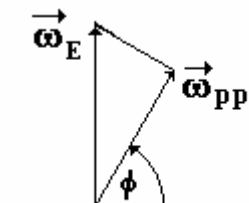
Podobnie jak wyżej, należy rozpatrywać ruch wahadła pod różnymi szerokościami geograficznymi ϕ . Jednak w takich przypadkach, tor ruchu kuli wahadła jest nachylony pod różnymi kątami względem osi ziemskiej $\vec{\omega}_E$. Liczy się tylko składowa prostopadła do osi

$\vec{\omega}_E$, Składowa ta określa maksymalne i minimalne odległości kuli wahadła od osi $\vec{\omega}_E$ obrotu Ziemi, jak to pokazano dla szerokości geograficznej $\phi = 45^\circ$ na rys. IV.3.1.

Właśnie te skrajne odległości kuli wahadła określają skrajne prędkości powierzchni Ziemi względem kuli wahadła.

Czas (pozornego!) obrotu płaszczyzny wahań wahadła zależy od kąta osi ω_p obrotu wahadła względem osi ω_E (rzeczywistego!) obrotu Ziemi.

Z rysunku obok, mamy (porównaj z rys. IV.3.1):



$$\omega_{pp} = \omega_E \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) = \omega_E \sin \phi$$

Ale

$$\omega_E = \frac{2\pi}{T} \quad \text{oraz} \quad \omega_{pp} = \frac{2\pi}{\tau}$$

gdzie: T – czas pełnego obrotu Ziemi

τ – czas pełnego obrotu płaszczyzny wahań wahadła.

Z powyższego znajdujemy:

$$\tau = \frac{T}{\sin \phi}$$

1° Paryż, gdzie pierwszy raz Jean Bernard Léon Foucault uruchomił swoje wahadło, jest pod szerokością geograficzną $48^\circ 46'$.

Znajdujemy, że pełny obrót płaszczyzny wahań wahadła wynosi 31 h 50 min 20 s.

2° Na obydwu biegunach ziemskich jest $\phi = \frac{\pi}{2}$ oraz $\tau = T = 24 \text{ h}$.

I „gołym okiem widać”, że Ziemia obraca się, a nie wahadło!

3° Na równiku jest $\phi = 0$ oraz $\tau = \infty$. I nie ma żadnych „złudzeń i pozorów”, ale dokładnie z rzeczywistością nie obserwujemy obrotu płaszczyzny wahań wahadła.

A to z tego względu, że na równiku **pod** wahadłem powierzchnia Ziemi nie obraca się względem płaszczyzny wahań wahadła.

Z powyższych rozważań oraz wielokrotnie powtarzanych eksperymentów wprost wynika, że ruch wahadła Foucault jest ruchem w przestrzeni absolutnej.

Jednak eksperymenty prowadzone są na wirującej Ziemi. Odpowiada to sytuacji, gdy ruch w nieruchomym układzie odwzorowywany jest w wirującym układzie obserwatora, a co wyżej dosyć szczegółowo przedstawiliśmy (pkt IV.2.).

Tym samym, eksperyment Foucault jest bezpośrednim dowodem ruchu absolutnego.

Powyższe też wprost oznacza, że jakkolwiek ruch na powierzchni Ziemi jest przede wszystkim ruchem w przestrzeni absolutnej.

Odnoszenie tego ruchu tylko względem przedmiotów otaczających obserwatora jest... tylko jego własnym ograniczeniem widzenia tego świata materialnego.