

IV.2. Efekt Coriolisa.

Założmy, że na wirującej tarczy z prędkością kątową $\omega = \text{constant}$ ciało o masie m przemieszcza się ze stałą prędkością $v_r = \text{constant}$ od punktu 0 wzdłuż promienia r tarczy. Ponieważ zmienia się promień r od osi obrotu tarczy, to także zmienia się wartość siły odśrodkowej D_o .

W nieruchomym układzie odniesienia, czyli poza wirującą tarczą, tor ruchu punktu materialnego m odwzorowywany jest jako krzywa zwana spiralą Archimedesesa¹ (Fig. IV.2.1.).

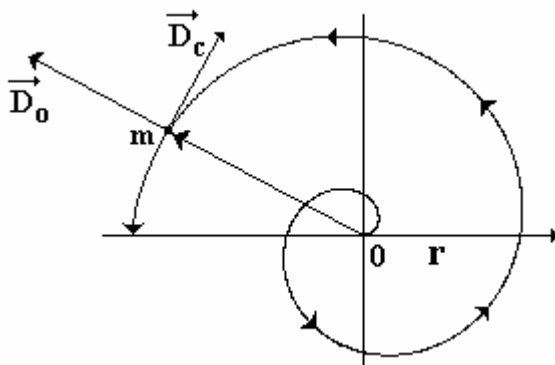


Fig. IV.2.1. Obserwowany tor ruchu ciała o masie m wzdłuż spirali Archimedesesa w nieruchomym układzie odniesienia. Tarcza obraca się w lewo.

Równanie spirali Archimedesesa we współrzędnych biegunowych ma postać:

$$r = \frac{v_r}{\omega} \cdot \phi \quad (\text{IV.2.1.})$$

gdzie r jest odległością (promieniem wodzącym) punktu materialnego m od osi obrotu, oraz: $\frac{v_r}{\omega}$ jest parametrem spirali Archimedesesa.

W nieruchomym układzie odniesienia, czyli poza tarczą, v_s jest prędkością punktu materialnego po spirali Archimedesesa.

Prędkość v_s jest złożeniem stałej prędkości $v_r = \text{const}$ wzdłuż promienia r okręgu oraz prędkości $v \neq \text{const.}$ po okręgach o różnych promieniach $r \neq \text{const.}$:

$$\vec{v}_s = \vec{v} + \vec{v}_r \quad (\text{IV.2.2.})$$

W dyskutowanym przypadku jest, że prędkość v_s wzrasta wraz ze wzrostem r .

A to oznacza, że prędkość v_s jest proporcjonalna do odległości r .

A to z kolei oznacza, że v_s jest prędkością w ruchu jednostajnie przyspieszonym po spirali.

Z zależności (IV.2.2.), znajdujemy:

$$v_s^2 = (\vec{v} + \vec{v}_r)^2 = v^2 + 2\vec{v} \cdot \vec{v}_r + v_r^2 = v^2 + 2\omega \vec{r} \cdot \vec{v}_r + v_r^2$$

Uwzględniając powyższe, wartość siły działającej wzdłuż spirali Archimedesesa jest taka, że:

¹ Archimedes z Syrakuz, (ok. 287 – ok. 212 przed Chr.), przez niektórych uważany za najwybitniejszego fizyka, matematyka i wynalazcę Starożytności. Podał sposób wykreślenia stycznej do spirali zwanej obecnie „spirala Archimedesesa” i wskazał, że może być użyta do rozwiązania tzw. „kwadratury koła”. Na tej podstawie podał oszacowanie liczby π z dokładnością do drugiego miejsca po przecinku.

„Spirala Archimedesesa” znana już była znacznie wcześniej w okresie (III-II tysiąclecie przed Chr.) kultury minojskiej (wyspa Kreta). Na słynnym dysku z Fajstos (okrągła płytką gliniana o średnicy ok. 16 cm) rozmieszczone są znaki piktograficzne (obrazki) wzdłuż „spirali Archimedesesa”. Znaków tych nie udało się rozszyfrować. Jest to jedna z większych „zagadek” Starożytności.

$$\mathbf{D}_s = m \frac{v_s^2}{r} = m \frac{(v + v_r)^2}{r} = m \frac{v^2}{r} + m(2\omega v_r) + m \frac{v_r^2}{r}$$

W powyższym: $\mathbf{D}_o = m \frac{v^2}{r} \neq \text{constant}$ jest siłą odśrodkową wzdłuż promienia \mathbf{r} .

Natomiast: $\mathbf{D}_r = m \frac{v_r^2}{r}$ jest siłą oporu wzdłuż promienia \mathbf{r} w wyniku ruchu obrotowego tarczy.

Siła

$$\bar{\mathbf{D}}_C = 2m \bar{\omega} \times \bar{v}_r \quad (\text{IV.2.3.})$$

zwana jest siłą inercjalną (bezwładności) Coriolisa².

Wyrażenie:

$$\bar{\mathbf{a}}_C = 2 \bar{\omega} \times \bar{v}_r \quad (\text{IV.2.4.})$$

zwane jest przyspieszeniem Coriolisa.

Wektor $\bar{\omega}$ jest prostopadły do płaszczyzny tarczy i przechodzi przez punkt obrotu. Tym samym, wektor \bar{v}_r jest prostopadły do wektora $\bar{\omega}$. Wobec tego, mamy:

$$\bar{\omega} \times \bar{v}_r = \omega \cdot v_r \cdot \sin 90^\circ = \omega \cdot v_r$$

Powyższe zapisy oznaczają, że siła Coriolisa $\bar{\mathbf{D}}_C$ jest prostopadła do prędkości kątowej $\bar{\omega}$ oraz prędkości liniowej \bar{v}_r (Fig. IV.2.1.). To samo dotyczy przyspieszenia $\bar{\mathbf{a}}_C$.

Dla powyższego warunku, zależności (IV.3.3.) oraz (IV.3.4.) można przepisać w postaci:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{D}_C &= 2m \omega v_r \\ \mathbf{a}_C &= 2 \omega v_r \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.2.5.})$$

Dla $v_r = 0$ jest $\mathbf{a}_C = 0$. Ciało \mathbf{m} nie porusza się wzdłuż promienia \mathbf{r} , i w takim przypadku siła Coriolisa nie występuje.

Jeżeli ciało o masie \mathbf{m} oddala się od punktu obrotu $\mathbf{0}$, czyli wartość \mathbf{r} wzrasta, to kierunek siły \mathbf{D}_C jest przeciwny do kierunku obrotu promienia \mathbf{r} (Fig. IV.2.1.).

Natomiast, jeżeli ciało \mathbf{m} porusza się do punktu obrotu $\mathbf{0}$, czyli wartość \mathbf{r} maleje, to kierunek siły \mathbf{D}_C jest zgodny z kierunkiem obrotu promienia \mathbf{r} (Fig. IV.2.2.).

W tym z kolei przypadku, ciało \mathbf{m} porusza się wzdłuż spirali Archimedesesa w kierunku przeciwnym (Fig. IV.2.2.).

² Gaspard Gustave de Coriolis (1792-1843), francuski inżynier i matematyk, członek Francuskiej Akademii Nauk. W 1835 r. podał teorię ruchu względnego w wirującym układzie odniesienia. Obecnie znane m.in. jako przyspieszenie Coriolisa oraz siła Coriolisa.

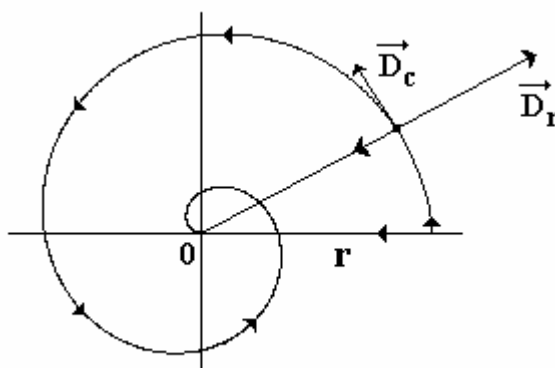


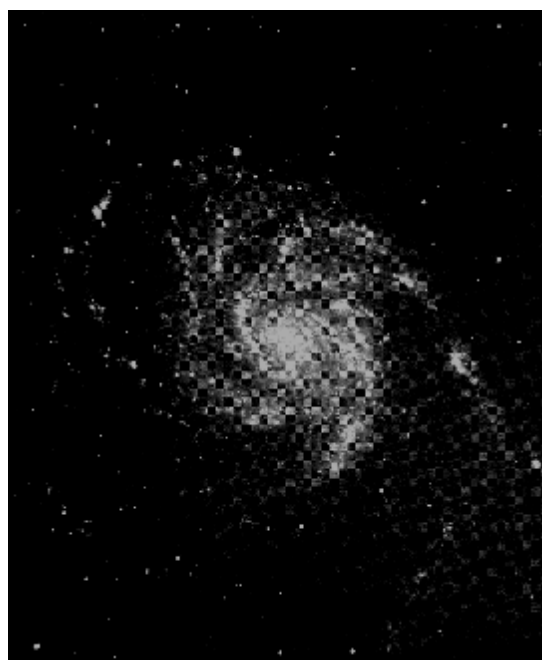
Fig. IV.2.2. Pozorny ruch ciała w nieruchomym układzie wzdłuż spirali Archimedesesa, gdy w układzie inercyjnym ruch ciała jest do punktu 0 osi obrotu układu inercyjnego (maleje promień r).

Galaktyki spiralne.

Jeżeli wirujący obiekt materialny wyrzuca na zewnątrz cząstki o jednakowych prędkościach, to cząstki te rozłożone są na spirali Archimedesesa. Obserwowane jest to w postaci galaktyk spiralnych.



Odległość: ok. 2,5 miliona lat świetlnych



ok. 1,25 miliona lat świetlnych.

Spiralne mgławice w konstelacji Wielkiej Niedźwiedzicy.

Spiralna mgławica w konstelacji Warkocza Bereniki.
Odległość ok. 3,5 miliona lat świetlnych.



Photographs by Dr. Ritchey, with the 60-inch reflector of the Mount Wilson Observatory, 1910, March, April.

Wirujący układ odniesienia.

Załóżmy obecnie, że w nieruchomym układzie, czyli w t.zw. układzie nieruchomego obserwatora, ciało o masie m porusza się ze stałą prędkością v_r wzdłuż promienia r okręgu.

Jeżeli w nieruchomym układzie ciało porusza się **od** punktu 0 , to w wirującym układzie obserwatora tor ruchu tego ciała obserwowany jest wzdłuż spirali Archimedesesa (**Fig. IV.2.3.**).

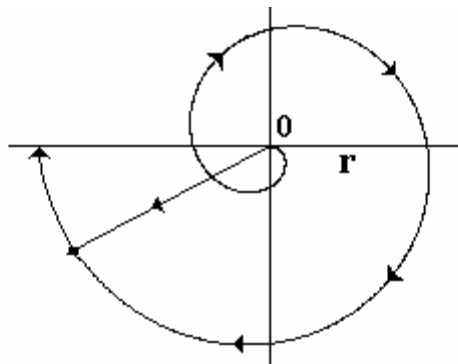


Fig. IV.2.3. Pozorny ruch ciała w wirującym układzie obserwatora.

W nieruchomym układzie obserwatora ciało porusza się wzdłuż promienia r ze stałą prędkością v_r .

Natomiast, jeżeli ciało porusza się **do** punktu 0 , to w wirującym (inercjalnym) układzie obserwatora kierunek ruchu po spirali jest przeciwny.

W obydwu powyższych przypadkach, w nieruchomym układzie **nie występują żadne siły powodujące zmianę ruchu, tym samym nie występują siły inercjalne!**

Natomiast w wirującym układzie odniesienia, obserwator z krzywizny obserwowanego toru ruchu cząstki domniemywa, że na ciało to działają siły powodujące zmianę ruchu, tak co do wartości jak i kierunku. I dokonuje odkrycia (nieznanych) sił... , w tym nadprzyrodzonych.

Przestrzenny układ inercjalny.

Leżące w jednej płaszczyźnie koncentryczne okręgi o różnych promieniach r można „rozłożyć przestrzennie” na kuli o promieniu R .

W przypadku kuli ziemskiej, okręgi te zwane są równoleżnikami (**Fig. IV.2.4.**).

Okręgi prostopadłe do równoleżników zwane są południkami.

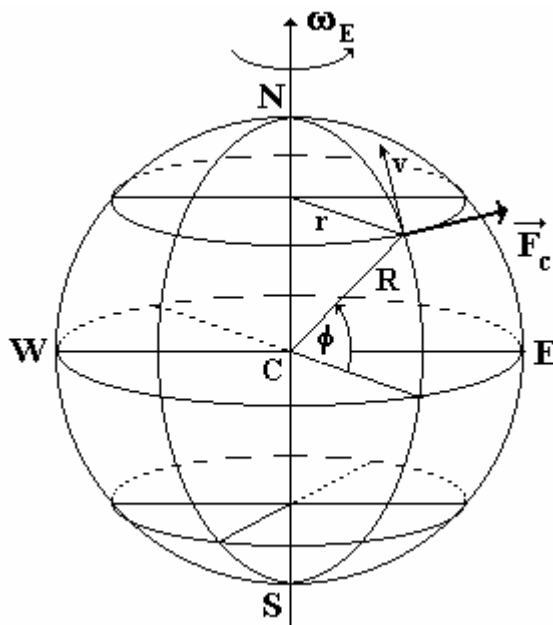


Fig. IV.2.4. Rozkład okręgów o różnych promieniach r wzdłuż osi obrotu ω_E Ziemi.

Jeżeli ciało o masie m porusza się po powierzchni Ziemi wzdłuż południka, to jego wektor prędkości \vec{v} jest prostopadły do promienia R Ziemi, oraz tworzy kąt ϕ z osią obrotu ω_E Ziemi.

Wektor prędkości \vec{v} można rozłożyć na dwie składowe: \vec{v}_r wzdłuż promieni r , oraz \vec{v}_h równoległe do osi obrotu ω_E Ziemi.

Składowa prędkości v_r wzdłuż różnych promieni r pod różnymi szerokościami geograficznymi ϕ jest taka, że:

$$v_r = v \sin \phi$$

Wobec tego, zależności (IV.2.5.) można przepisać w postaci:

$$\left. \begin{aligned} D_C &= 2 m \omega_E v \sin \phi \\ a_C &= 2 \omega_E v \sin \phi \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV.2.6.})$$

Jeżeli na przykład, na półkuli północnej poruszamy się wzdłuż południka od równika do bieguna N, to zmniejsza się nasza odległość od osi ω_E obrotu Ziemi, lub inaczej mówiąc, przechodzimy kolejno na okręgi o coraz mniejszych promieniach r .

Tym samym, zwiększa się wartość składowej prędkości v_r .

Z tego względu, zwiększa się siła Coriolisa skierowana na wschód (porównaj z rys. IV.2.2.).

Rzeki płynące z południa na północ (półkula północna) „unoszone są” na wschód, stąd ich prawe brzegi są rozmywane, a nawet prowadzi to do przesunięcia koryta tych rzek na wschód. Na przykład, bardzo wyraźnie widać to w Warszawie, gdzie prawy brzeg Wisły jest

wyraźnie rozmywany. Mało tego, koryto tej rzeki zostało przesunięte od Górnego Mokotowa o kilka kilometrów na wschód.

Natomiast, jeżeli będziemy poruszać się w kierunku przeciwnym, czyli z północy na południe, to efekt będzie odwrotny: zmniejsza się wartość składowej prędkości v_r , a siła Coriolisa będzie działać na zachód (porównaj z rys. **IV.2.1.**).

Identycznie jest, gdy na półkuli południowej poruszamy się na...południe (**S**), lub odwrotnie.

Stałe wiatry, zwane passatami, wiejące do równika, odchylane są w kierunku południowo-zachodnim na półkuli północnej i w kierunku północno-zachodnim na półkuli południowej. Jest to jeden z bezpośrednich dowodów ruchu wirowego Ziemi.

Na zakończenie tej części rozważań należy zaznaczyć, że siła Coriolisa jest siłą pozorną. Ciało przemieszczając się wzdłuż południka zachowuje stałą prędkość względem układu absolutnie absolutnego **AA-space**,. a tym samym stały pęd $\vec{p} = m \cdot \vec{v} = \text{constant}$, jaki ciało to uzyskało na danym równoleżniku.

Na innym równoleżniku, odpowiada inna wartość pędu tego ciała. Względna różnica tych pędów daje w efekcie pozorną zmianę pędu w czasie, czyli wartość siły Coriolisa.

W przestrzeni absolutnie absolutnej **AA-space** siła Coriolisa nie występuje.

Siła Coriolisa jest bezpośrednim dowodem zachowania prędkości (ruchu), tak co do kierunku jak i wartości, ciał materialnych w przestrzeni kosmicznej.

Jest to przestrzeń absolutnie absolutna (**AA-space**), w której prędkość c światła jest stała i izotropowa. Przestrzeń ta zwana też jest eterem.