



Mieszkamy na Ziemi – wirującej planecie

Aneta Szczygielska, Jerzy Jarosz

Uniwersytet Śląski, Katowice

Patrząc w niebo przez tysiąclecia, wyobrażaliśmy sobie, że Słońce, Księżyc i sfera niebieska obracają się wokół Ziemi. Taki obraz Wszechświata harmonizował z przekonaniem o wyjątkowym miejscu w przyrodzie, przysługującym człowiekowi. Tymczasem ruch wirowy Ziemi ma decydujące znaczenie dla cyrkulacji atmosfery i hydrosfery, a tym samym wpływa na środowisko, w którym żyjemy. Dlaczego tak długo nie było to oczywiste?



Rys. 1. Ziemia i Księżyc widziane z kosmosu

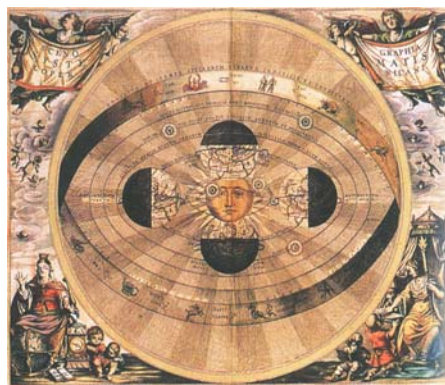
Jeszcze pięćset lat temu tylko pierwsza część stwierdzenia zawartego w tytule tego artykułu zostałaby uznana za prawdę. Powszechnie przyjęte poglądy umieszczały Ziemię w spoczynku, w centrum Wszechświata. Tym samym z definicji przyznawano Ziemi status układu inercjalnego. Układy takie pozostają w spoczynku lub poruszają się ruchem jednostajnym prostoliniowym. Nie występują w nich siły bezwładności i wszystkie zachodzące zjawiska można opisać zgodnie z zasadami dynamiki Newtona. To była piękna koncepcja – byliśmy w centrum, a cały Wszechświat, dosłownie i w przenośni, obracał się wokół nas.



Rys. 2. Geocentryczny układ planetarny, zaproponowany przez Ptolemeusza. Ziemia w środku Wszechświata

W takim świecie nie byłoby cyklonów, pasaty wiałyby od zwrotników do równika, wzdłuż południków, a upuszczone kamienie, zgodnie z prawami grawitacji spadałyby pionowo w dół. Pewnym minusem takiego świata byłby natomiast fakt, że Prąd Zatokowy nie mógłby ogrzewać Europy.

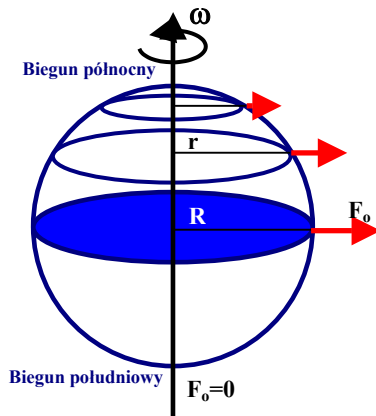
Rzeczywistość, w którą tak trudno było uwierzyć, okazała się jednak inna. Wszelkie wątpliwości, co kręci się wokół czego, zostały rozwiane przez Mikołaja Kopernika po wydaniu, niespełna pięćset lat temu, traktatu *O obrotach ciał niebieskich*. Kopernik „wprawił” Ziemię w bardzo złożony ruch wirowy wokół jej własnej osi obrotu (1 obrót na dobę), wokół wspólnego z Księżycem środka masy (1 obrót na miesiąc) i wreszcie wokół Słońca (1 obrót w roku).



Rys. 3. Heliocentryczny układ planetarny zaproponowany przez Kopernika. Słońce w środku Wszechświata

Już dużo wcześniej, nie zdając sobie sprawy z prawdziwych przyczyn, zauważono cykliczność pewnych zjawisk w przyrodzie i zaczęto stosować okresy tych obrotów do odmierzania upływającego czasu. Oczywiście okres obiegu Układu Słonecznego wokół środka Galaktyki jest już zbyt długi w stosunku do naszego życia, aby stosować go jako przydatną miarę czasu. Dzisiaj wiedza o Układzie Słonecznym należy do podstawowych elementów światopoglądu każdego człowieka, jednak na co dzień nie uświadamiamy sobie, że podróżujemy przez kosmos w nieznaną, mieszkając na powierzchni cienkiej warstwy twardej skały, unoszącej się na stopionej lawie, wirującej z prędkością liniową przekraczającą na równiku prędkość dźwięku i pędzącej wokół Słońca z zawrotną prędkością ponad 100 000 km/h.

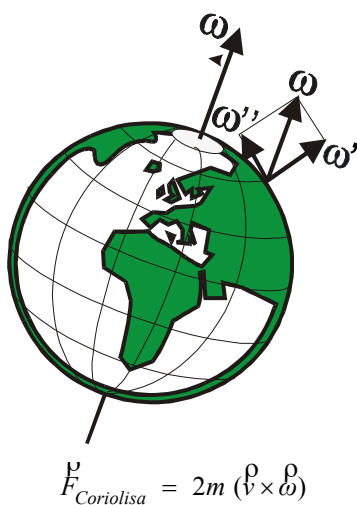
Ziemia jest więc układem nieinercyjnym, poruszającym się w dość skomplikowany sposób. Aby stosować w takim układzie prawa dynamiki Newtona, do opisu zjawisk należy wprowadzić tzw. *siły bezwładności*, pojawiające się w układach podlegających przyspieszeniu. Siły bezwładności są nam dobrze znane z takich sytuacji w życiu codziennym, w których mamy okazję poruszać się z pewnym przyspieszeniem, to znaczy zmieniając wartość lub kierunek prędkości. Na przykład w czasie jazdy autobusem, podczas przyspieszania lub hamowania doznajemy właśnie działania takich sił, zwróconych odpowiednio do tyłu lub do przodu, ale zawsze przeciwnie niż rzeczywiste zmiany prędkości. Podobnie dzieje się, gdy autobus zakręca – doznajemy wówczas, tak jak na karuzeli, działania *siły odśrodkowej*, skierowanej na zewnątrz od osi obrotu. Wartość tej siły działającej na nasze ciało zależy od wartości prędkości kątowej układu oraz od odległości ciała od osi obrotu. Im szybciej wiruje układ i im dalej znajdujemy się od osi obrotu, tym większa siła na nas działa.



Rys. 4. Siła odśrodkowa – rys. schematyczny.

Wartość siły odśrodkowej F_o działającej na ciała poruszające się po okręgu zależy od prędkości kątowej ruchu ω i od odległości r od środka obrotu

W układach wirujących oprócz wspomnianej już, dobrze znanej siły odśrodkowej występuje również druga siła bezwładności, znacznie mniej znana, lecz bez wątpienia nie mniej istotna – siła Coriolisa (nazwana tak od nazwiska odkrywcy – Gasparda Gustawa Coriolisa, francuskiego matematyka, 1792–1843). Działa ona wyłącznie na obiekty znajdujące się w ruchu i zależy od prędkości kątowej wirującego układu oraz od prędkości liniowej poruszającego się obiektu. Wielkość efektu związana jest z wzajemnym ułożeniem tych dwu wektorów. Kierunek działania siły Coriolisa jest zawsze prostopadły do kierunku wektora prędkości poruszającego się ciała, tak więc siła ta powoduje odchylenie toru ruchu ciała od linii prostej.

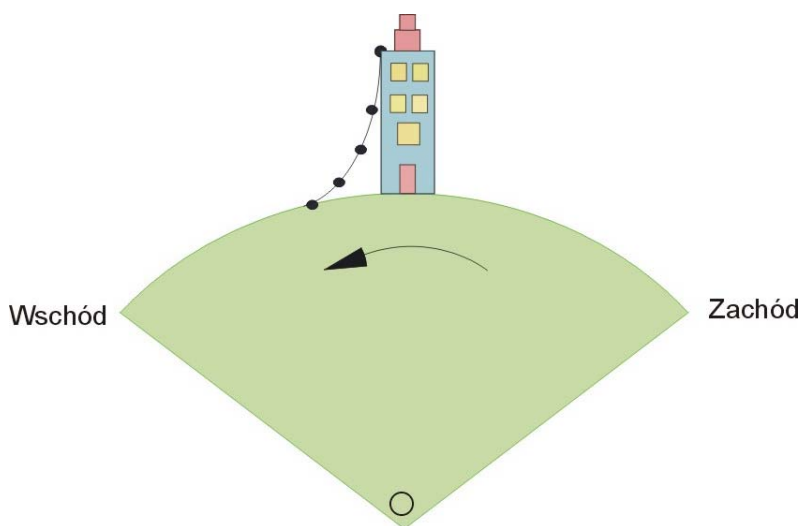


Rys. 5. Rozkład wektora prędkości kątowej Ziemi.

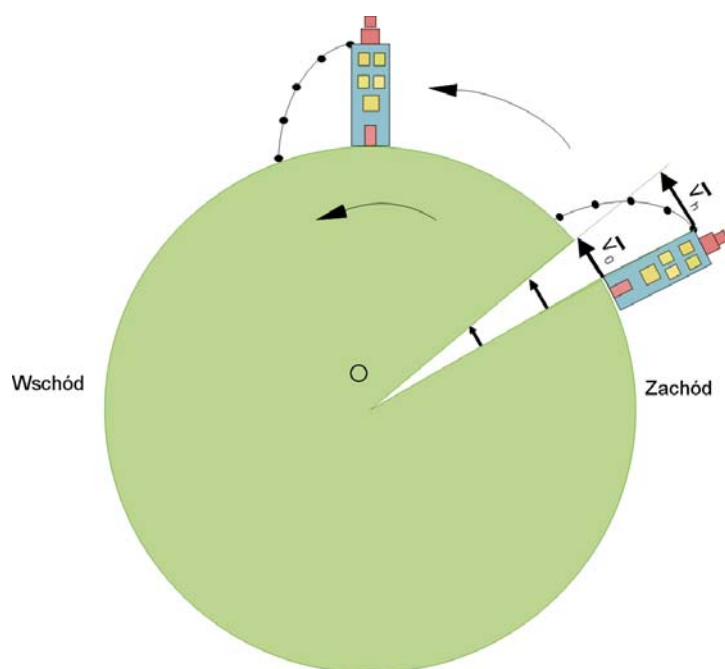
Siła Coriolisa zależy od masy i prędkości liniowej ciała oraz od prędkości kątowej układu

Na kuli ziemskiej różnica w orientacji wektora prędkości kątowej Ziemi i wektora prędkości ułożonego w płaszczyźnie stycznej do powierzchni Ziemi na półkuli północnej i południowej powoduje, że na półkuli północnej siły Coriolisa niezależnie od kierunku ruchu ciała odchylają jego tor zawsze w prawo w stosunku do wektora prędkości, natomiast na półkuli południowej zawsze w lewo. Odchylenia od prostoliniowego kierunku ruchu mogą być całkiem znaczne. Pewne wyobrażenie o wielkości efektu dają podręcznikowe przykłady. Na przykład w czasie II wojny światowej okazało się, że rakiety V2, wystrzeliwane na Londyn z odległości 300 km, lecące z prędkością 1400 km/h, odchylały się od zamierzonego celu o około 3,7 km w prawo! Przyczyną były oczywiście siły Coriolisa. Siły te,

działając na piechura idącego z prędkością 6,5 km/h, w okolicach Warszawy ($52^{\circ}18'$ szerokości geograficznej północnej) spowodowałyby odchylenie jego toru ruchu od linii prostej o 32 m (!) na każdym przebytych kilometrze drogi, gdyby nie tarcie, które pozwala mu zachować wybrany kierunek. Lokomotywa jadąca po torach nie może zmienić kierunku, ale jeśli dzieje się to na półkuli północnej, to mając masę 500 ton i jadąc z prędkością 100 km/h, na szerokości geograficznej Warszawy wywiera boczny nacisk na prawą szynę równy 164 kG. (Dlaczego więc właściwie szyny zużywają się równomiernie...?) Siły Coriolisa dają o sobie znać również wtedy, gdy wektor prędkości skierowany jest pionowo. To właśnie za ich przyczyną kamienie prawie nigdzie nie spadają pionowo w dół! Z wyjątkiem biegunów ziemskich wszędzie spadają nieco na wschód od miejsca, które wskazałby pion. Na naszej szerokości geograficznej przy upadku z wysokości 100 m odchylenie to wynosi około 2 cm.

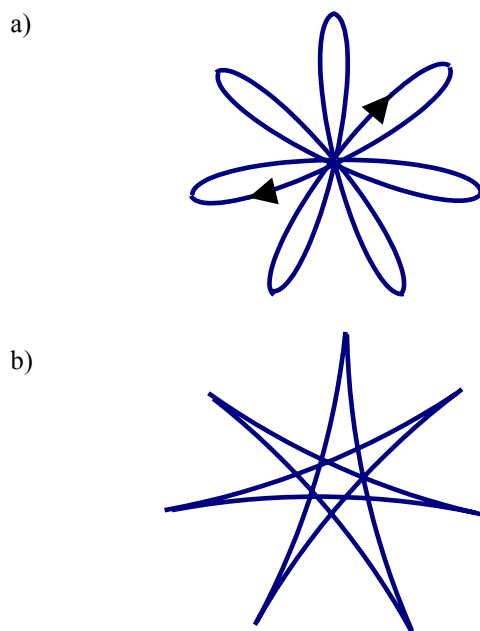


Rys. 6. Kształt toru ruchu spadającego z wieży kamienia, obserwowany z układu wirującego (nieinercyjnego)



Rys. 7. Ten sam kamień obserwowany przez obserwatora będącego w kosmosie – w układzie niezwiązanym z ruchem obrotowym Ziemi (inercjalnym)

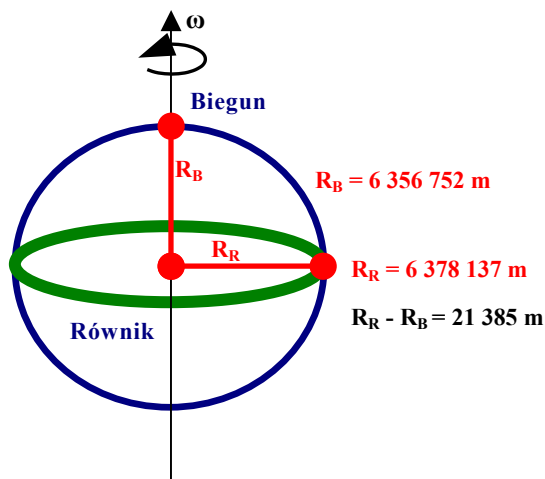
Od czasów Newtona uważano, że występowanie sił bezwładności jest bezwzględnym dowodem zmiennego ruchu układu. Pięknym, bezpośrednim dowodem na ruch obrotowy Ziemi stało się więc słynne doświadczenie z wahadłem, przeprowadzone w paryskim Panteonie w 1852 r. przez francuskiego fizyka Leona Jeana Foucaulta (1819–1868). Wahadło o długości 67 m wprowadzono w ruch z amplitudą 3 m i okazało się, że płaszczyzna wahań obraca się i kula wahadła za każdym wahnięciem trafia w miejsce przesunięte na obwodzie koła o 2,7 mm w stosunku do poprzedniego. Czas pełnego obrotu płaszczyzny wahadła wynosił 31 h i 47 min. Paryż leży na $48^{\circ}50'$ szerokości geograficznej północnej, na biegunie okres obrotu wynosiłby oczywiście 24 h. Co więcej, gdy dokładnie przyjrzeć się ruchowi wahadła okazuje się, że w ogóle nie porusza się ono w płaszczyźnie, ale zakreśla stosunkowo skomplikowane rozety, których kształt zależy w dodatku od sposobu wprowadzenia wahadła w ruch. Ruch tego samego wahadła znacznie prościej wygląda w przypadku obserwatora umieszczonego w kosmosie (w układzie inercjalnym) – wahadło oscyluje w stałej płaszczyźnie wahań, a Ziemia obraca się pod nim.



Rys. 8. Wahadło Foucaulta – tor ruchu – rozety.

Wahadło umieszczone w wirującym układzie nieinercyjnym zakreśla w czasie swojego ruchu rozety. W zależności od sposobu uruchomienia wahadła ((b) punkt startowy nieruchomy w stosunku do układu wirującego lub (a) nieruchomy w zewnętrznym układzie inercyjnym) kształt listków rozety jest ostry i wahadło omija środek wahań (b) lub też listki są zaokrąglone i wahadło przechodzi przez środek wahań (a)

Obie siły bezwładności, związane z ruchem obrotowym Ziemi, mają duży wpływ zarówno na samą Ziemię jak i na jej hydro- i atmosferę. Pierwszym widocznym efektem działania siły odśrodkowej jest kształt Ziemi, zbliżony do elipsoidy obrotowej. Gdyby o kształcie Ziemi decydowały wyłącznie siły grawitacji, musiałaby ona być kulą. Odległość od środka Ziemi do równika wynosi 6 378 137 m, podczas gdy odległość do bieguna tylko 6 356 752 m. Oznacza to spłaszczenie Ziemi w okolicach biegunów o ponad 20 km w stosunku do średnicy na równiku. W rezultacie waga sprężynowa, na której zawiesimy 1 kilogram cukru, pokaże na biegunie większy ciężar (1,002 kG) niż na równiku (tylko 0,997 kG). Na tę różnicę składa się zarówno większa siła grawitacji na biegunie (bliżej do środka Ziemi), jak i brak siły odśrodkowej, zmniejszającej ciężar ciał na równiku.



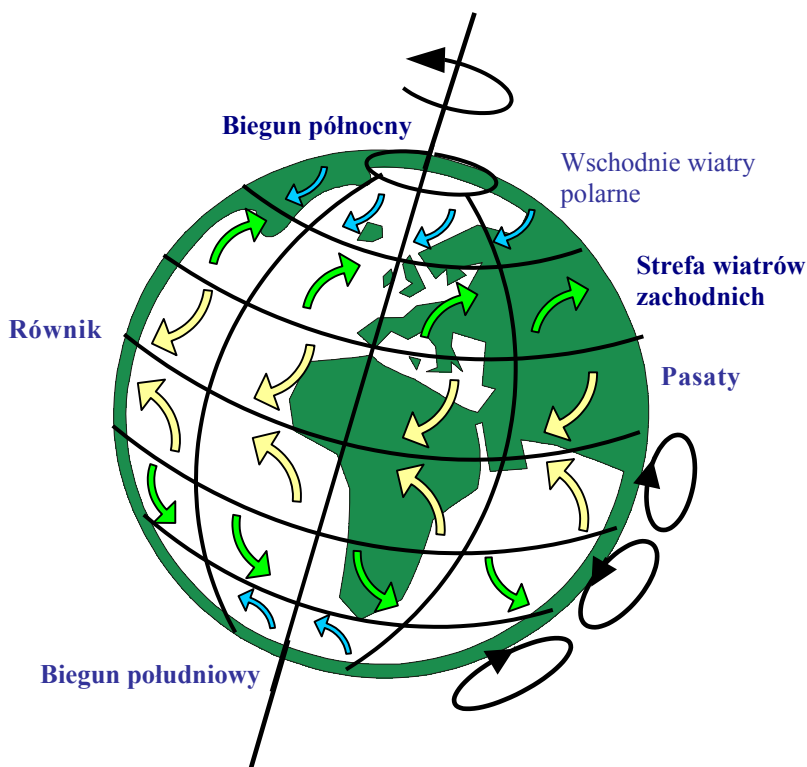
Rys. 9. Kształt Ziemi – elipsoida

Drugim, bardzo wyraźnie odczuwanym zjawiskiem związanym z działaniem sił odśrodkowych są przypyły i odpływy oceanów, powtarzające się dwukrotnie w ciągu doby. Za powstawanie pływów odpowiedzialne są siły odśrodkowe, powstające na skutek ruchu obrotowego Ziemi i Księżyca wokół wspólnego środka masy (znajduje się on we wnętrzu Ziemi, w odległości 0,73 promienia od jej środka), oraz siła przyciągania grawitacyjnego Księżyca. Przeważająca nad siłą odśrodkową grawitacja Księżyca tworzy od jego strony falę przypywu na linii łączącej środki mas Ziemi i Księżyca, podczas gdy po przeciwnej stronie kuli ziemskiej powstaje druga fala przypywu na skutek dominacji siły odśrodkowej nad siłą grawitacji Księżyca. Obrót Ziemi wokół własnej osi powoduje, że każdy punkt dwukrotnie w ciągu doby znajduje się w strefie przypywu. Przemieszczanie olbrzymich mas wody pochłania sporą ilość energii, co z kolei powoduje stopniowe zwalnianie ruchu obrotowego Ziemi.

Dużo większe znaczenie w kształtowaniu klimatu na Ziemi mają jednak zjawiska związane z siłami Coriolisa. W strefie równikowej nasłonecznienie jest największe i obszary położone w pobliżu równika otrzymują więcej energii słonecznej niż inne. Ogrzane powietrze unosi się i przesuwa w stronę biegunów. Na szerokościach około 30° ochładza się ono i opada, tworząc strefy wysokiego ciśnienia, z których wiatry zwane pasatami powracają w stronę równika, a część ochłodzonego powietrza kieruje się w stronę biegunów. Pasaty, ulegając działaniu siły Coriolisa odchylają się na półkuli północnej w prawo, a na półkuli południowej w lewo. W rezultacie wiatry te wieją odpowiednio z północnego i z południowego

wschodu. Jako wiatry stałe wiejące w określonym kierunku, pasaty już od dawna miały duże znaczenie praktyczne dla żeglarzy. Wykorzystywano je między innymi w czasie wypraw handlowych do Nowego Świata czy na Wyspy Karaibskie.

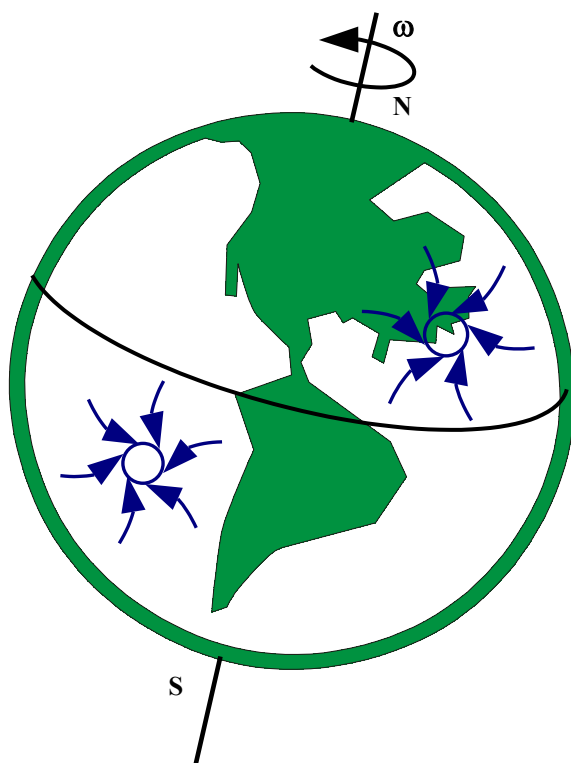
Powietrze płynące z tropików w stronę biegunów ogrzewa się i unosi ponownie na szerokościach około 60° . Siły bezwładności, odchylające kierunek mas powietrza płynącego w stronę biegunów, tym razem nadają im kierunek na wschód i w rezultacie szerokości od 30° do 60° bywają określane jako strefa wiatrów zachodnich. Z kolei wiatry wiejące z wyżów zlokalizowanych w okolicach biegunów w stronę frontu polarnego odchylane są podobnie jak pasaty i noszą nazwę biegunowych wiatrów wschodnich.



Rys. 11. Cyrkulacja atmosfery – strefa pasatów, wiatrów zachodnich i polarnych wiatrów wschodnich

Siły Coriolisa nie tylko określają kierunek wiatrów stałych wiejących na kuli ziemskiej, ale także decydują o kierunku wirowania cyklonów. Cyklony tropikal-

ne są obszarami o niskim ciśnieniu, do których z wszystkich stron napływa powietrze. Siły Coriolisa na półkuli północnej odchylają więcej promieniście wiatry w prawo, co w rezultacie nadaje masom powietrza ruch wirowy o orientacji lewoskrętnej. Średnice wirujących układów niżowych przekraczają często 1000 km. Na półkuli południowej sytuacja jest odwrócona i cyklony wirują zawsze zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara.



Rys. 12. Powstawanie cyklonów. Siły Coriolisa wymuszają lewoskrętny ruch cyklonów na półkuli północnej i prawoskrętny na półkuli południowej



Rys. 13. Cyklony na półkuli północnej – zdjęcia z satelity

Siły Coriolisa nie decydują natomiast o kierunku wirowania tornada, nazywanego często trąbą powietrzną. Średnica tornada jest znacznie mniejsza niż cyklonu i kierunek wirowania jest przypadkowy. Okazuje się, że nie tylko masy powietrza ulegając działaniu sił Coriolisa mogą tworzyć wielkie, wirujące układy. Badania procesów zachodzących we wnętrzu Ziemi pozwalają przypuszczać, że również masy stopionej lawy w płaszczu ziemskim, przemieszczające się ruchami konwekcyjnymi, tworzą obszary wirujące powoli, zgodnie z regułami rządzącymi zachowaniem się cyklonów. Możliwe, że siły Coriolisa, formując w pewien sposób prądy konwekcyjne, przenoszące ładunki elektryczne, odpowiadają również za powstanie ziemskiego pola magnetycznego.

Siły Coriolisa determinują również ruch mas wody w oceanach. Przyglądając się kierunkom przepływu prądów morskich w oceanach, trudno nie zauważyć widocznej tendencji do odchyłania kierunku ich przepływu w prawo lub w lewo, w zależności od półkuli, na której ten ruch się odbywa. Wiejące nad Pacyfikiem północno i południowo-wschodnie pasaty zbiegają się w strefie równikowej. W rezultacie powstaje wiatr wiejący na zachód wzdłuż równika, porywający ze sobą

