

1.5. Ruch po okręgu – siła odśrodkowa

Na fot.1.10a zaznaczyliśmy, oprócz siły dośrodkowej działającej na kulę, również siłę działającą na miotacza. Wynika ona z III zasady dynamiki Newtona: jeśli ciało A działa na ciało B siłą F to ciało B działa na ciało A siłą o tej samej wartości ale przeciwnie skierowaną. Na miotacza działa siła o tej samej wartości, z jaką miotacz utrzymuje kręcącą się kulę. Siłę taką nazywamy siłą *odśrodkową*.

Siłą odśrodkową nazywamy siłę działającą na punkt centralny obrotu. Siła ta jest siłą reakcji ze strony poruszającego się ciała na siłę dośrodkową.

Siła odśrodkowa działa np. na rękę uczennicy kręcącej piłką na fot. 1.9a i na Ziemię, dookoła którego krąży Księżyc. Z tego też powodu, Księżyc krąży dookoła Ziemi, ale i Ziemia, mimo że 80 razy cięższa od Księżyca, też wokół niego „tańczy”.

Zadanie 1.4 (trudne)

Spróbujmy obliczyć, po jakim okręgu porusza się głowa miotacza na fot. 1.10a, jeżeli kula porusza się na okręgu promieniu 2 metrów¹¹.

Wzór $F = m \frac{v^2}{R}$ nie jest wystarczający do rozwiązania tego zagadnienia: prędkość liniowa

kuli i lampy na głowie miotacza są różne. Identyczne pozostają ich prędkości *kątowe*, tzn. kąt, jaki zataczają w danej jednostce czasu. Związek między prędkością kątową ω a prędkością liniową jest następujący¹²

$$v = \omega R \quad (1.11)$$

Zastępując we wzorze (1.10) prędkość liniową przez prędkość kątową otrzymujemy alternatywny wzór na siłę dośrodkową

$$F = m\omega^2 R \quad (1.12)$$

Z równości sił i prędkości kątowych możemy wywnioskować, że promienie orbit krążących wokół siebie dwóch ciał mają się do siebie jak odwrotności ich mas. Masa miotacza jest zapewne dziesięć razy większa niż masa kuli (7,2 kg), więc ich orbity mają się do siebie jak 1:10, co widać na rys. 1.10a. Obserwacje cyklicznych choć niewielkich zmian położenia gwiazd są jednym ze sposobów na poszukiwania planet krążących dookoła odległych słońc.

Z powodu znacznej różnicy mas protonu i elektronu, na rysunku 1.10b nie zaznaczamy, że proton również krąży, bo jego orbita ma promień 1/1837 razy mniejszy niż orbita elektronu. W przypadku Ziemi i Księżyca punkt, dookoła którego oba ciała niebieskie krążą, znajduje się 1700 km pod powierzchnią Ziemi.

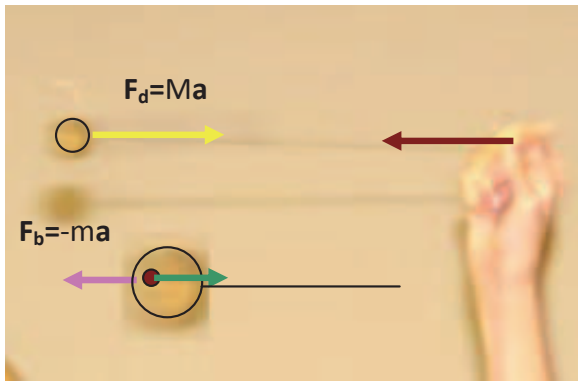
1.6. Ruch po okręgu – siły bezwładności

Przyczyną ruchu po okręgu jest siła *do-środkowa*. Jak to się więc dzieje, że pasażerowie w samochodzie pokonującym „na gazie” ostry zakręt czują siłę wypychającą ich na zewnątrz zakrętu? Odpowiedź otrzymamy ponownie z III prawa dynamiki Newtona.

¹¹ Dokładniej rzecz biorąc, należy i dla kuli i dla miotacza znaleźć wspólny punkt, dookoła którego obaj wirują – kula na dłuższym promieniu, a miotacz na krótszym. Tym punktem jest środek masy miotacza i kuli razem wziętych.

¹² Zob. np. *Toruński poręcznik do fizyki. Gimnazjum klasa I*, Wyd. Naukowe UMK, 2010, str. 56.

Rozważamy ruch po okręgu nie z punktu widzenia obserwatora zewnętrznego, ale z punktu widzenia obserwatora, który się po okręgu porusza, np. mrówki, która przez pomyłkę weszła do piłki, którą kręci Katarzyna (fot. 1.11).



Fot. 1.12. Siła dośrodkowa (F_d , żółta) działająca na wirującą piłkę jest równa co do wartości sile odśrodkowej (czerwonej), działającej na rękę Kasi. Ziarnko piasku w piłce naciska od wewnątrz na ściankę piłki (F_b , strzałka różowa) – jest to siła *odśrodkowa bezwładności*. Jest to siła reakcji wynikająca z III zasady dynamiki Newtona – to ścianka piłki naciska na ziarnko (strzałka zielona) tak, aby i ono podlegało przyspieszeniu dośrodkowemu, razem z piłką. Siła odśrodkowa bezwładności jest siłą pozorną, związaną z tym, że cała piłka podlega przyspieszeniu.

Na mrówkę (lub ziarnko piasku) wewnątrz piłki działa siła dośrodkowa, powodująca, że i mrówka porusza się po okręgu, razem z całą piłką. Źródłem tej siły jest wewnętrzna ścianka piłki, zob. powiększenie na fot. 1.12. Z III zasady dynamiki Newtona wynika, że mrówka też działa siłą na piłkę – siłą skierowaną od środka osi obrotu. Jest to siła bezwładności i nazywamy ją siłą *odśrodkową bezwładności*. Jest to siła pozorną, związaną z tym, że cała piłka w swym ruchu po okręgu ustawicznie przyspiesza ku środkowi okręgu.

Siła dośrodkowa działająca na piłkę ze strony ręki Katarzyny, F_d na rys. 1.12, zależy od przyspieszenia dośrodkowego a i masy piłki M , zgodnie ze wzorem $F_d = Ma$. Siła odśrodkowa bezwładności, która wciska mrówkę w ściankę piłki zależy od przyspieszenia i od masy *mrówki* m , $F_b = -ma$. Znak minus w tym ostatnim wzorze ma przypominać, że mrówka ciśnie w kierunku *od*-środkowym.

Siła odśrodkową bezwładności jest siłą pozorną.

To siła odśrodkowa bezwładności wciska w fotel pasażerów samochodu pokonującego zakręt z dużą prędkością.



Fot. 1.13. Zakręty, pozornie łagodne, ale z ograniczeniem prędkości do 70 km/h okazują się dla kierowców bardzo niebezpieczne. Przekroczenie szybkości do 100 km/h *podwaja* ryzyko wypadnięcia z zakrętu. Doświadczony kierowca w warunkach deszczu zwolni do 50 km/h, co *obniża* dwukrotnie ryzyko wypadku; na tym zdjęciu mały samochód został wypchnięty z drogi przez pirata (foto MK)

Na zakończenie, jeszcze raz o niebezpiecznych zakrętach drogowych. Pirat, który przeżył wypadnięcie z zakrętu gotów jest przysiąc, że to „niewidzialna” siła wypchnęła go z zakrętu. Ale to nie jest tak. Zabrakło, po prostu, siły dośrodkowej. Innymi słowy, samochód pirata drogowego nie „wypada” z zakrętu – on zwyczajnie **jedzie na wprost**, zgodnie z I prawem dynamiki Newtona. Na samochód nie działają siły ze strony drogi, bo koła straciły „pryczepność”; samochód porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym, a to tylko droga uciekła w bok! Warto uczyć się praw fizyki.