

1.1. Od Mikołaja Kopernika

Dzieło Mikołaja Kopernika „O ruchach ciał niebieskich”¹ rozpoczyna się od rozważań pozornie nie na temat – o kształcie Ziemi. O tym, że Ziemia jest kulą, wiadomo było od czasów starożytnych. Erastotenes w I w p.n.e. zmierzył nawet jej promień z zadziwiająco dobrą dokładnością. Kopernik postawił jednak trudne pytanie: jak to się dzieje, że woda z kuli ziemskiej nie spływa. Odpowiada sam Kopernik, że woda zapełnia zagłębienia terenu.

Ocean [...], który oblewa ląd stały, wlewa się tu i ówdzie w jego głąb w postaci mórz i wypełnia jego bardziej zapadłe wgłębienia. Wypadało tedy, aby mniej było wód niż łądu, by woda nie pochłonęła całej ziemi, skoro oba te elementy na skutek swej *ciężkości* dążą do tego samego środka, lecz żeby pewne części łądu pozostały na wierzchu dla utrzymania bytu istot lądowych, a także liczne tu i ówdzie rozciągające się wyspy. Bo i sam kontynent wszystkich ziem czymże jest innym, jeśli nie wyspą, większą tylko od innych?

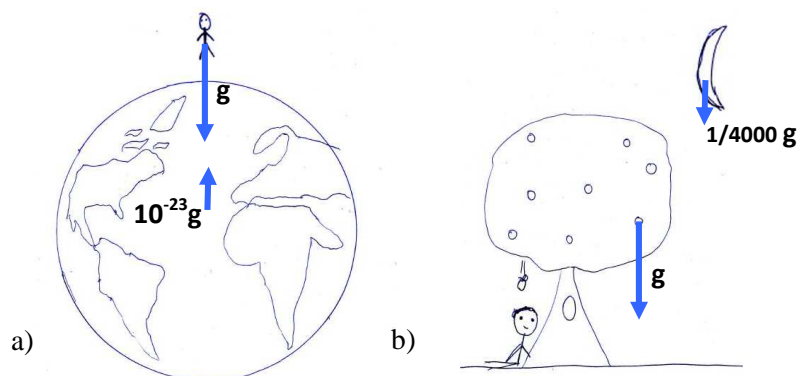
Kopernik wyraźnie mówi o *ciężkości* ciał. Dziś wiemy, że nie tylko woda ciąży w kierunku środka Ziemi ale że wszystkie ciała posiadające *masę* przyciągają się siłami grawitacji. Oddziaływanie to ma, zgodnie z III prawem Newtona charakter wzajemny: z taką samą siłą Ziemia przyciąga Kubę jak Kuba Ziemię. Gdy Kuba podskoczy nad ziemię, to Kuba spada na kulę ziemską, ale i Ziemia przyspiesza w kierunku Kuby. Przyspieszenie, z jakim spada Kuba, jest jednak znacznie większe niż przyspieszenie Ziemi w kierunku Kuby.

Decyduje o tym II prawo Newtona – przyspieszenie ciała jest wprost proporcjonalne do działającej siły a odwrotnie do jego masy

$$a = F/m,$$

gdzie a jest przyspieszeniem ciała, m jego masą a F działającą siłą.

Siła grawitacji jest taka sama dla dwóch ciał ale masa Ziemi znacznie, znacznie większa niż Kuby. Masa Ziemi wynosi $59 \cdot 10^{23}$ kg. Jeżeli masa Kuby wynosi 59 kg, to przyspieszenie kuli ziemskiej w kierunku Kuby jest 10^{-23} razy mniejsze niż Kuby w kierunku Ziemi. Z jakim przyspieszeniem spada Kuba, policzymy w następnym paragrafie.



Fot. 1.1. a) Kuba (59 kg) podskoczył nad Ziemię i spada na nią. Kuba spada na Ziemię z przyspieszeniem, które oznaczamy jako g ; kula ziemska przyspiesza w kierunku Kuby z przyspieszeniem $10^{-23}g$. **b)** Anegdota mówi, że Newton zrozumiał prawo grawitacji, gdy zauważył, że jabłko spada na ziemię tak samo, jak Księżyc dookoła Ziemi (ustawicznie) zakrzywia tor swojego ruchu, w kierunku Ziemi (Rysunek Kuba Garbacza lat 10)

¹ Wydrukowane dzieło Mikołaja Kopernika nosi tytuł „De revolutionibus orbium celestis” co tłumaczymy jako „O obrotach sfer niebieskich”. Nie jest jednak wykluczone, że mogło mieć ono pierwotnie inny tytuł. Praca jego ucznia Jana Retyka zapowiadająca dzieło Kopernika ma tytuł „De revelationibus ... moto” czyli o rewelacjach ruchu ciał niebieskich. Z pewnością wydawca dzieła opatrzył dzieło Kopernika nieuzgodnioną z nim przedmową, pomniejszającą znaczenie rewolucji kopernikańskiej.

1.2. Siła grawitacji

Wzór na siłę wzajemnego przyciągania grawitacyjnego między dwoma ciałami o określonych masach podał Izaak Newton, dopiero prawie 200 lat po Koperniku. Wzór ten należy do jednych z najprostszych w fizyce i jest niejako pierwowzorem dwóch innych oddziaływań – elektrycznych i magnetycznych. Siła oddziaływania grawitacyjnego jest tym większa, im większa jest masa oddziaływujących ciał, a maleje z *kwadratem* ich wzajemnej odległości. Opisujemy to wzorem

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (1.1)$$

gdzie F jest siłą wzajemnego przyciągania ciał o masach M i m a r jest ich wzajemną odległością.

Stała G nazywana jest stałą grawitacji i ma podstawowe znaczenie dla budowy naszego Wszechświata. To ona decyduje o szybkości obrotów planet dookoła Słońca, gwiazd dookoła środka Galaktyki a także rozmiarach całego Wszechświata. Jeżeli siłę wyrazimy w *niutonach* (N) a odległość w metrach, to wartość tej stałej wynosi $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$.

Formalnie wzór (1.1) dotyczy mas, które przybliżamy jako masy punktowe. Jest to bez wątplenia zrozumiałe np. dla Ziemi i Słońca: odległość Ziemi od Słońca (ok. 150 mln km) jest znacznie większa niż promień słonecznej kuli (1,4 mln km). Ale w przypadku Kuby i Ziemi?

Pokazał to już Newton, że kula oddziałuje grawitacyjnie tak, jakby cała masa była skupiona w jej geometrycznym środku. Pisał on tym, trochę intuicyjnie, nawet Kopernik: „Ziemia krąży dookoła środka Słońca, albo punktu, który w pobliżu tego środka się znajduje”.

Znając masę Ziemi i jej promień (6370 km) możemy obliczyć, jaka siła grawitacji działa na Kubę stojącego na powierzchni Ziemi. Przyjmujemy $M = 59 \cdot 10^{23} \text{ kg}$ i $m = 59 \text{ kg}$.

$$F = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 59 \cdot 10^{23} \cdot 59 / (6370 \cdot 1000)^2 = 583 \text{ N}$$

Obliczmy, ze wzoru (1.1) przyspieszenie g , jakie działa na Kubę lub jakiegokolwiek inne ciało spadające na Ziemię w pobliżu jej powierzchni. Przypominamy, że przyspieszenie jest wprost proporcjonalne do siły a odwrotnie proporcjonalne do masy ciała

$$g = F / m = G \frac{M}{r^2} \quad (1.2)$$

Podstawiając wartości liczbowe otrzymujemy

$$g = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 59 \cdot 10^{23} / (6370 \cdot 1000)^2 = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Jest to dobrze znana wartość przyspieszenia w spadku swobodnym. Dzięki teorii grawitacji Newtona potrafimy tę wielkość nie tylko zmierzyć, ale i wyliczyć².

Przyspieszenie g , z jakim spadają ciała na dowolnej planecie nie zależą od masy tych ciał, ale jedynie od masy planety i jej promienia.

$$g = G \frac{M}{r^2} \quad (1.3)$$

Sprawdzili to astronauta Apollo 15 spuszczając na Księżycu młotek i piórko: spadły razem (na Księżycu nie ma oporów powietrza), ale z przyspieszeniem mniejszym niż na Ziemi³.

² A właściwie, to pomiar przyspieszenia grawitacyjnego jest sposobem na wyznaczenie *masy* Ziemi.

³ Film ze statku Apollo pokazujemy na stronie internetowej ZDF UMK.