

SCENARIUSZ DOŚWIADCZENIA 1. Siła dośrodkowa

Uwaga! Doświadczenie powinno być wykonywane w dwuosobowym zespole.

Problem badawczy

Czy w rzeczywistych warunkach siła dośrodkowa jest wprost proporcjonalna do kwadratu prędkości?

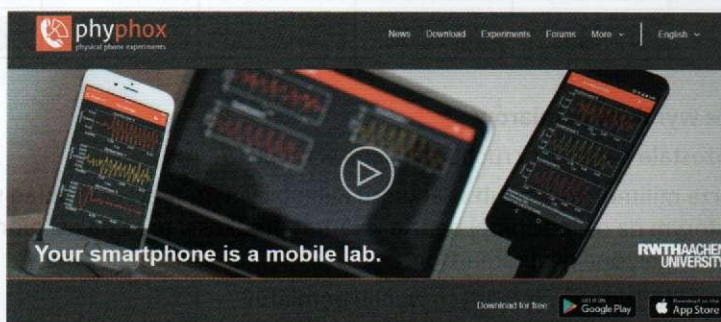
Wstęp

Na ciało poruszające się ruchem jednostajnym po okręgu działa siła dośrodkowa. Wartość tej siły obliczamy ze wzoru $F_d = \frac{mv^2}{r}$. Z tego wzoru wynika, że siła dośrodkowa jest wprost proporcjonalna do kwadratu prędkości ciała poruszającego się po okręgu. Z II zasady dynamiki wiadomo, że przyspieszenie jest wprost proporcjonalne do siły nadającej to przyspieszenie. Wystarczy zatem porównać przyspieszenia w ruchu po okręgu oraz kwadraty prędkości, aby odpowiedzieć na postawione pytanie badawcze.

W proponowanym doświadczeniu będziemy sprawdzać tę zależność dla rowerzysty poruszającego się po okręgu.

Przyspieszenie będziemy mierzyć za pomocą smartfona z zainstalowaną aplikacją Phyphox. Aplikacja ta jest darmowa i można ją zainstalować na smartfonach wyposażonych w system operacyjny Android lub iOS.

Prędkość rowerzysty wyznaczymy, gdy podzielimy długość tuku przez czas jego pokonania.

**Przyrządy pomiarowe i materiały do przeprowadzenia doświadczenia**

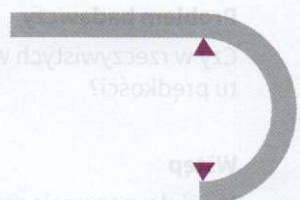
- ▶ rower
- ▶ stoper
- ▶ taśma miernicza
- ▶ smartfon z aplikacją Phyphox

Hipoteza badawcza

W ruchu po okręgu siła dośrodkowa jest wprost proporcjonalna do kwadratu prędkości ciała.

Przebieg doświadczenia

1. Na boisku lub pustym parkingu przygotuj tor do pomiarów składający się z prostoliniowego odcinka przechodzącego w zakręt o promieniu kilku metrów, tak aby stanowił około połowy okręgu (rys.).
2. Ustaw na łuku znaczniki początku i końca pomiaru czasu jazdy.
3. Zmierz długość s toru między znacznikami i wpisz ją do tabeli.
4. Jedna osoba uruchamia smartfon z włączoną aplikacją i ze smartfonem w kieszeni rozpędza się na prostym odcinku drogi, tak aby bez pedałowania i hamowania przejechać wyznaczony zakręt.
5. Druga osoba mierzy czas przejazdu wyznaczonego odcinka s .
6. Zapisz w tabeli wyniki pomiarów czasu i przyspieszenia (zmierzonego przez smartfon).
7. Pomiar powtórz dla kilku różnych czasów przejazdu zakrętu.



Nr pomiaru	s (m)	t (s)	$v = \frac{s}{t} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$	$v^2 \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right)$	$a \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$
1					
2					
...					
8					

Opracowanie wyników pomiarów

1. Oblicz pozostałe parametry ruchu zapisane w tabeli (v , v^2).
2. Na papierze milimetrowym lub w arkuszu kalkulacyjnym przygotuj układ współrzędnych, w którym na osi poziomej będzie kwadrat prędkości v^2 , a na osi pionowej przyspieszenie zmierzone przez smartfon.
3. Zaznacz w układzie współrzędnych wyniki pomiarów.

Omówienie wyniku doświadczenia

Zapisz odpowiedzi na poniższe pytania.

1. Czy punkty pomiarowe układają się wzdłuż prostej?
2. Czy hipoteza badawcza została potwierdzona?
3. Jakie czynniki miały największy wpływ na rozrzut punktów pomiarowych?

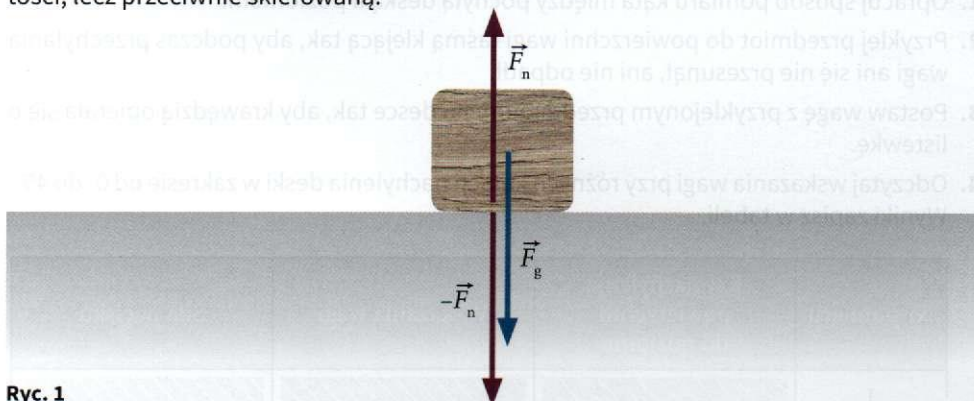
SCENARIUSZ DOŚWIADCZENIA 2. Siła nacisku na pochyłej powierzchni

Problem badawczy

W jaki sposób siła nacisku ciała na podłoże zależy od kąta nachylenia podłoża względem poziomu?

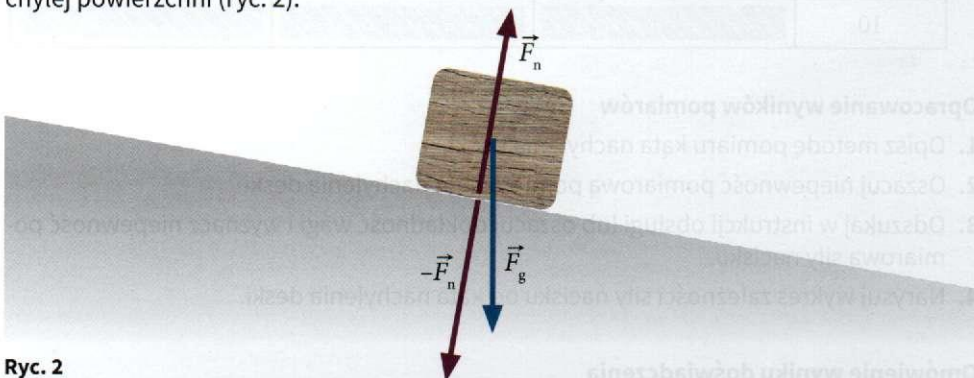
Wstęp

Na ciało leżące na powierzchni działa siła nacisku skierowana do niej prostopadle. Zgodnie z III zasadą dynamiki spoczywające ciało działa na powierzchnię siłą o tej samej wartości, lecz przeciwnie skierowaną.



Ryc. 1

Gdy powierzchnia jest ustawiona poziomo, a ciało swobodnie na niej spoczywa, to siła nacisku jest równa ciężarowi ciała (ryc. 1). Nieco inaczej jest, gdy ciało spoczywa na pochyłej powierzchni (ryc. 2).



Ryc. 2

W naszych badaniach waga domowa będzie służyć jako siłomierz mierzący nacisk. Aby wyznaczyć siłę nacisku, trzeba wskazania wagi w kilogramach pomnożyć przez $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.

Przyrządy i materiały do przeprowadzenia doświadczenia

- ▶ waga kuchenna lub łazienkowa
- ▶ deska trochę większa od wagi z zamocowaną listewką uniemożliwiającą przesuwanie się wagi

- ▶ badany przedmiot na tyle lekki, aby utrzymała go taśma klejąca
- ▶ taśma klejąca
- ▶ kątomierz

Hipoteza badawcza

Im większy jest kąt nachylenia podłoża do poziomu, tym mniejsza jest siła nacisku ciała na podłoże.

Przebieg doświadczenia

1. Opracuj sposób pomiaru kąta między pochyłą deską a poziomem.
2. Przyklej przedmiot do powierzchni wagi taśmą klejącą tak, aby podczas przechylania wagi ani się nie przesunął, ani nie odpadł.
3. Postaw wagę z przyklejonym przedmiotem na desce tak, aby krawędzią opierała się o listewkę.
4. Odczytaj wskazania wagi przy różnych kątach nachylenia deski w zakresie od 0° do 45° . Wyniki zapisz w tabeli.

Nr pomiaru	Kąt nachylenia powierzchni do poziomu	Wskazania wagi	Siła nacisku
1			
2			
...			
10			

Opracowanie wyników pomiarów

1. Opisz metodę pomiaru kąta nachylenia deski.
2. Oszacuj niepewność pomiarową pomiaru kąta nachylenia deski.
3. Odszukaj w instrukcji obsługi lub oszacuj dokładność wagi i wyznacz niepewność pomiarową siły nacisku.
4. Narysuj wykres zależności siły nacisku od kąta nachylenia deski.

Omówienie wyniku doświadczenia

Zapisz odpowiedzi na poniższe pytania.

1. Czy hipoteza badawcza została potwierdzona?
2. Czy punkty pomiarowe układają się wzdłuż linii prostej?
3. Z wykresu oszacuj kąt, dla którego siła nacisku jest równa połowie ciężaru ciała. Wynik zapisz z podaniem niepewności pomiarowej.
4. Jakie czynniki miały wpływ na precyzję przeprowadzenia pomiarów?

SCENARIUSZ DOŚWIADCZENIA 3. Siła tarcia

Problem badawczy

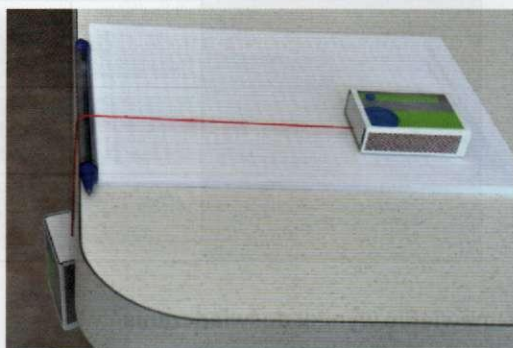
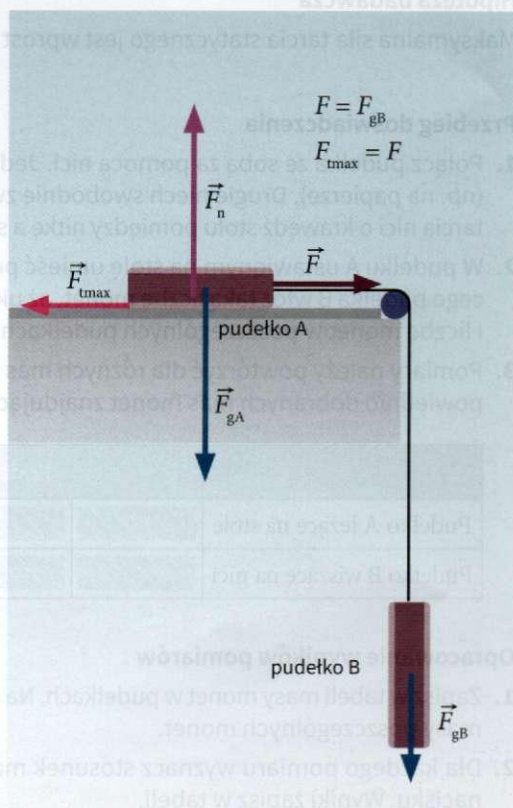
W jaki sposób maksymalna siła tarcia zależy od siły nacisku?

Wstęp

Na spoczywające ciało, które chcemy wprowadzić w ruch, działa siła tarcia statycznego. Siła ta zmienia swoją wartość od zera do wartości maksymalnej, którą osiąga w chwili ruszenia ciała. Będziemy mierzyć siłę zewnętrzną, przy której ciało zacznie się poruszać. Jest ona równa maksymalnej wartości siły tarcia statycznego.

Rozważmy sytuację, w której dwa pudełka od zapatek połączone są sznurkiem i ułożone jak na rysunku. Masy pudełek można zwiększać przez włożenie do nich monet. Z warunku równowagi sił wynika, że maksymalna siła tarcia statycznego działająca na pudełko A leżące na stole jest równa sile ciężkości działającej na wiszące pudełko B. Siła ciężkości jest wprost proporcjonalna do masy monet znajdujących się w pudełku (masa monet w pudełku powinna być dużo większa od masy pudełka i wówczas pomijamy masę pudełka). Podobnie siła nacisku działająca na pudełko leżące na stole jest wprost proporcjonalna do masy monet w tym pudełku. Wobec tego stosunek maksymalnej siły tarcia statycznego do siły nacisku będzie równy stosunkowi mas monet w pudełkach:

$$f = \frac{F_{t \max}}{F_n} = \frac{m_B}{m_A}$$



Przyrządy pomiarowe i materiały do przeprowadzenia doświadczenia

- ▶ dwa pudełka po zapałkach
- ▶ monety
- ▶ mocna nić
- ▶ długopis

Hipoteza badawcza

Maksymalna siła tarcia statycznego jest wprost proporcjonalna do siły nacisku.

Przebieg doświadczenia

- Połącz pudełka ze sobą za pomocą nici. Jedno z pudełek ustaw na badanym podłożu (np. na papierze). Drugie niech swobodnie zwisa z krawędzi stołu. W celu zmniejszenia tarcia nici o krawędź stołu pomiędzy nitką a stół włóż długopis (jak na fotografii).
- W pudełku A ustawionym na stole umieść pewną liczbę monet, a następnie do wiszącego pudełka B włóż taką liczbę monet, aż układ pudełek zacznie się poruszać. Rodzaje i liczbę monet w poszczególnych pudełkach zapisz w tabeli.
- Pomiary należy powtórzyć dla różnych mas monet w pudełku A leżącym na stole i odpowiednio dobranych mas monet znajdujących się w wiszącym pudełku B.

	Rodzaje i liczba monet w pudełkach				
Pudełko A leżące na stole					
Pudełko B wiszące na nici					

Opracowanie wyników pomiarów

- Zapisz w tabeli masy monet w pudełkach. Na stronie internetowej NBP można sprawdzić masy poszczególnych monet.
- Dla każdego pomiaru wyznacz stosunek maksymalnej siły tarcia statycznego do siły nacisku. Wyniki zapisz w tabeli.

Masa monet w pudełku A					
Masa monet w pudełku B					
$\frac{F_{t \max}}{F_N}$					

Omówienie wyniku doświadczenia

Zapisz odpowiedzi na poniższe pytania.

- Czy hipoteza badawcza została potwierdzona?
- Jakie czynniki miały wpływ na precyzję pomiarów?

SCENARIUSZ DOŚWIADCZENIA 4. Zmiany energii przy odbiciu

Problem badawczy

Jaką część energii mechanicznej zachowuje spadająca piłeczka po odbiciu od podłoża?

Wstęp

Gdy puścimy swobodnie piłkę z pewnej wysokości, to po odbiciu dolatuje ona na niższą wysokość. Dzieje się tak dlatego, że podczas odbicia energia mechaniczna piłki się zmniejsza. Będziemy badać, czy zmniejszanie energii podczas odbicia zależy od początkowej wysokości, z której spada piłka. Do pomiarów będziemy używać smartfonu z aplikacją Phyphox. Wśród dostępnych w tej aplikacji pomiarów jest **(Nie)sprężyste odbicie**.

Materiały do przeprowadzenia doświadczenia

- ▶ smartfon z aplikacją Phyphox
- ▶ linijka (lub miara taśmowa)
- ▶ piłeczka do tenisa stołowego
- ▶ różne rodzaje podłoża

Przebieg doświadczenia

1. Przygotuj aplikację Phyphox do pomiarów.
2. Wybierz podłoże do badań (np. drewniany blat biurka oraz ceramiczną posadzkę w łazience).
3. Umieść piłeczkę do tenisa stołowego na ustalonej wcześniej wysokości.
4. Uruchom aplikację Phyphox.
5. Puść piłeczkę.
6. Odczytaj z aplikacji, ile energii pozostało piłeczce po pierwszym odbiciu.
7. Zmień wysokość początkową i powtórz czynności od 3. do 7.
8. Uzyskane wyniki zapisz w tabeli.
9. Czynności powtórz dla innego podłoża.

PODŁOŻE 1	Wysokość początkowa (cm)												
	Energia, która pozostała po pierwszym odbiciu (% początkowej)												
PODŁOŻE 2	Wysokość początkowa (cm)												
	Energia, która pozostała po pierwszym odbiciu (% początkowej)												

Opracowanie wyników pomiarów

1. Na podstawie wyników z tabeli narysuj dla danego rodzaju podłoża wykres zależności energii, która pozostała po pierwszym odbiciu (% początkowej energii), od początkowej wysokości.
2. Podobny wykres narysuj dla drugiego rodzaju podłoża.

Omówienie wyniku doświadczenia

Zapisz odpowiedzi na poniższe pytania.

1. Czy stosunek energii po pierwszym odbiciu do energii początkowej zależy od wysokości, z jakiej spada piłeczka?
2. Które z badanych podłoży jest bardziej sprężyste? Odpowiedź uzasadnij.

SCENARIUSZ DOŚWIADCZENIA 5. Szacowanie liczby gwiazd widocznych na niebie

Problem badawczy

Czy obecność Księżyca na nocnym niebie ma wpływ na liczbę widocznych gwiazd?

Wstęp

Liczba gwiazd widocznych na niebie nie jest stała. Zależy od tego, czy obserwujemy niebo w mieście, czy daleko od światel miejskich. Więcej gwiazd zobaczymy w ciemną, bezksiężycową noc niż w czasie pełni Księżyca. Widoczność gwiazd zależy również od przejrzystości powietrza i wzroku samego obserwatora. Systematycznie prowadzone obserwacje mogą mieć charakter naukowy.

Od pewnego czasu zwraca się uwagę na zanieczyszczenie nocnego nieba sztucznym światłem. Wzrastająca liczba sztucznych światel (np. oświetlenie ulic, reklamy, podświetlanie budowli architektonicznych) powoduje, że w nocy przestaje być ciemno. Skutkuje to zachwianiem zegara biologicznego sterującego aktywnością zwierząt i ludzi. Może to być jedną z przyczyn zaburzeń snu u wielu osób, które w konsekwencji zaczynają być stale zmęczone i źle się czują.

Monitorowanie gwiazd widocznych na nocnym niebie pozwala nam w miarę obiektywnie porównywać zanieczyszczenie światłem w różnych miejscach na Ziemi.

Gdy ktoś patrzy bezpośrednio w niebo i próbuje liczyć gwiazdy, szybko może się zgubić. Które gwiazdy zostały już policzone, a które nie? Aby tego uniknąć, trzeba ograniczyć obszar obserwacji i patrzeć np. przez rurkę. Gdy średnica rurki przyłożonej do oka jest pięć razy mniejsza od jej długości, widzimy około $\frac{1}{200}$ część nieba. Wobec tego po pomnożeniu średniej arytmetycznej liczby gwiazd widocznych w rurce w różnych obszarach nieba przez 200 uzyskamy szacunkową liczbę gwiazd widocznych na całym niebie.

Materiały do przeprowadzenia doświadczenia

- ▶ Rurka o średnicy 2–4 cm i długości pięć razy większej niż jej średnica (np. odpowiednio przycięta rurka po ręczniku papierowym).

Hipoteza badawcza

Obecność Księżyca na niebie w znaczący sposób wpływa na liczbę widocznych gwiazd.

Przebieg doświadczenia

Uwaga! Pomiaru należy przeprowadzić dwukrotnie: raz, gdy na niebie nie ma Księżyca, i drugi raz, gdy Księżyc jest w pełni.

1. Po wyjściu z domu przez 5–10 minut postaraj się nie patrzeć na źródła światła, aby oczy przyzwyczyły się do ciemności.
2. Przyłóż rurkę do oka i skieruj ją w stronę dowolnego fragmentu nieba. Policzn gwiazdy widoczne w polu widzenia. Ważne, aby w trakcie liczenia nie zmieniać pozycji rurki.

3. Zanotuj wynik pomiarów (podczas notowania nie używaj latarki). Gdy w rurce nie ma żadnej gwiazdy, wpisujemy 0 – to też ważny wynik.
4. Czynności powtórz 15–20 razy – kieruj rurkę w różne losowo wybrane obszary nieba.

Opracowanie wyników pomiarów

1. Oblicz średnią arytmetyczną liczby gwiazd widocznych w rurce podczas pomiarów wykonanych w bezksiężycową noc oraz średnią arytmetyczną z pomiarów uzyskanych podczas pełni Księżyca.
2. Każdą z obliczonych średnich pomnóż przez 200. Otrzymasz szacunkową liczbę gwiazd widocznych w dniu obserwacji.

Omówienie wyniku doświadczenia

Zapisz odpowiedzi na poniższe pytania.

1. Porównaj wyniki uzyskane w czasie nocy bezksiężycowej i podczas pełni. Czy postawiona hipoteza została potwierdzona?
2. Jakie czynniki miały wpływ na wynik obserwacji?

TEKST 1. Najszczęśliwsza myśl Einsteina

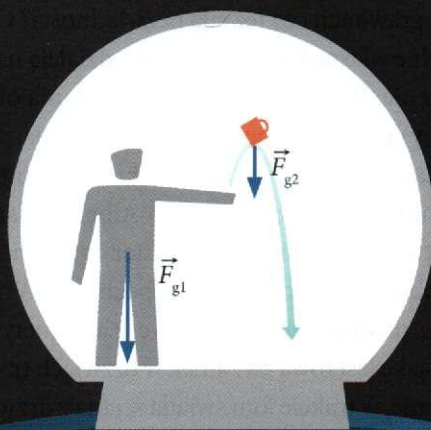
Było to w 1907 roku. Dwudziestoośmioletni urzędnik Albert Einstein jak zwykle rozmyślał w pracy. Dwa lata wcześniej wstrząsnął podstawami fizyki, gdy wykazał, że przestrzeń i czas zależą od układu odniesienia, a energia i masa są związane wzorem: $E = mc^2$. Ta niezwykła teoria, nazwana szczególną teorią względności, połączyła czas i przestrzeń w czterowymiarową czasoprzestrzeń. Według niej w pełnej zgodzie z prawami natury można podróżować w przyszłość, a w Galaktyce istnieją układy odniesienia, w których Bolesław Chrobry jeszcze żyje. Ta teoria była krokiem milowym w rozumieniu praw przyrody, jednakże świat fizyków jeszcze tego nie zauważył. Einstein wciąż nie mógł znaleźć pracy zgodnej z jego naukowym powołaniem, czyli na dobrej uczelni.

Wtedy właśnie przyszła mu do głowy – jak sam ją później określił – najszczęśliwsza myśl jego życia.

„Siedziałem właśnie w biurze patentowym w Bernie, gdy nieoczekiwanie przyszła mi do głowy pewna myśl: człowiek spadający swobodnie nie będzie odczuwał swojego ciężaru. Byłem doprawdy wstrząśnięty. Ta prosta myśl wywarła na mnie ogromne wrażenie i stała się impulsem do stworzenia teorii grawitacji”¹.

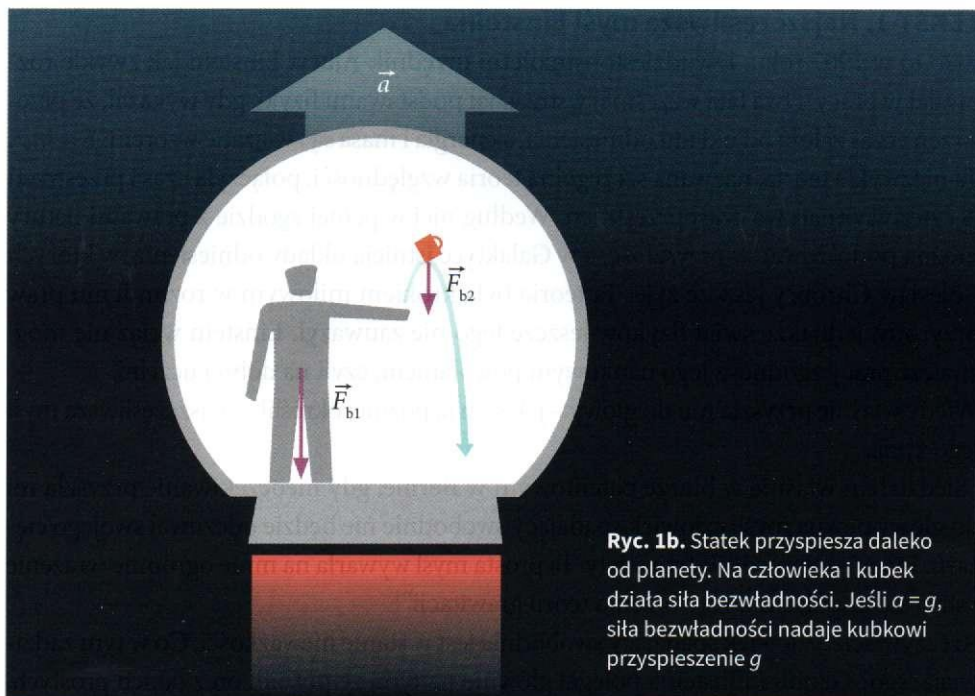
Rzeczywiście, człowiek spadający swobodnie jest w stanie nieważkości. Co w tym zadziwiającego? Geniusz Einsteina polegał głównie na tym, że potrafił on z takich prostych, znanych wszystkim faktów wyciągnąć głębokie wnioski. Przede wszystkim dzięki tej szczęśliwej myśli sformułował tak zwaną **zasadę równoważności**: siły bezwładności nie da się odróżnić (w małych obszarach) od siły grawitacji. Nieważkość w układzie spadającym powstaje dlatego, że siła bezwładności dokładnie równoważy siłę grawitacji.

Ryc. 1a. Statek kosmiczny stoi na powierzchni planety. Na człowieka i kubek działa siła grawitacji, która nadaje kubkowi przyspieszenie g



Tatooine

¹ A. Pais, *Pan Bóg jest wyrafinowany. Nauka i życie Alberta Einsteina*, Warszawa 2001, s. 187.

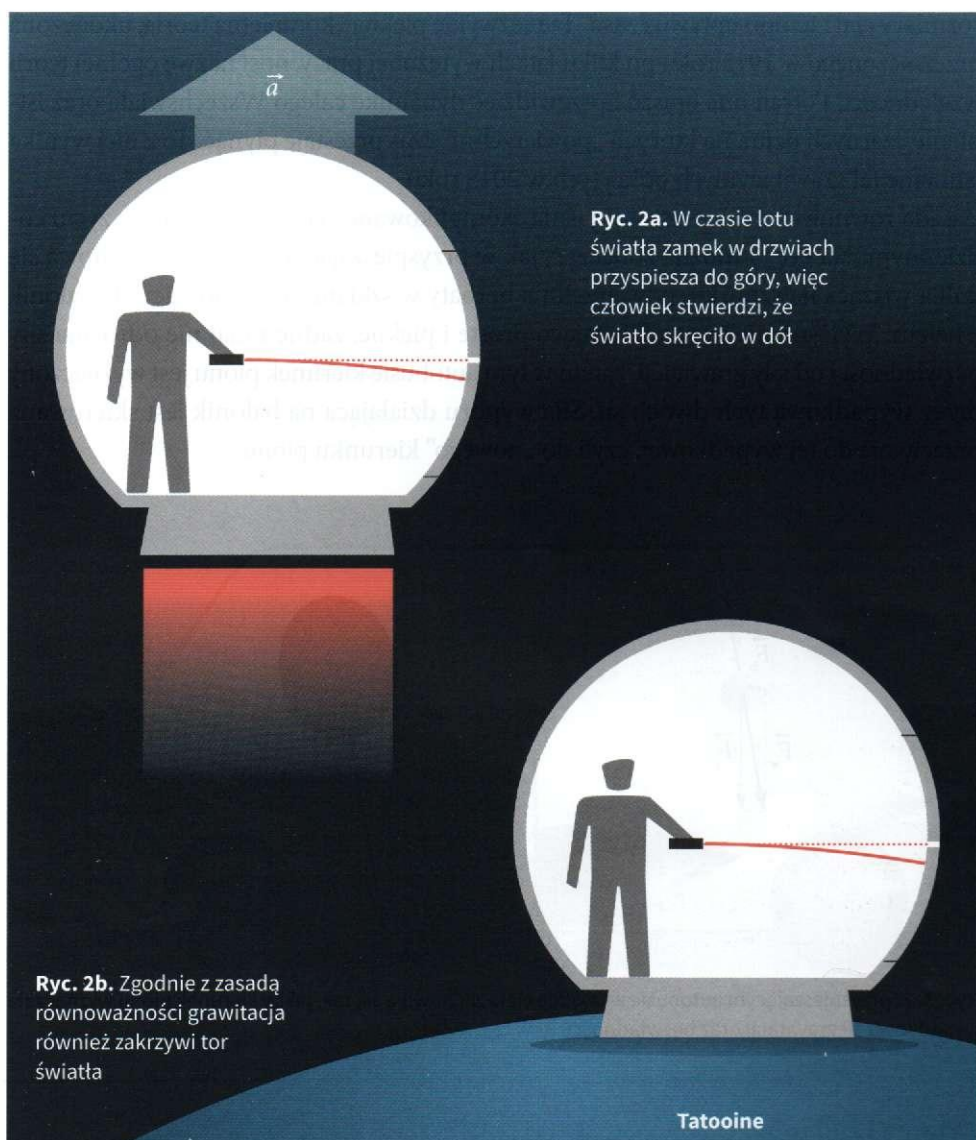


Zilustrujmy to przykładem. Zmęczony Han Solo² budzi się na swoim statku kosmicznym na planecie Tatooine po całonocnym maratonie gier komputerowych. Czuje ciężar swój i kubka, którym rzucił, ale nie wie, czy to dlatego, że ciągle jest na planecie (ryc. 1a), czy też Chewbacca odpalił już silniki statku, który porusza się z przyspieszeniem daleko w przestrzeni kosmicznej (ryc. 1b).

Jak Han Solo może stwierdzić bez wychodzenia z kabiny, czy na niego i wszystkie inne ciała w kabinie działa siła grawitacji czy też siła bezwładności? Otóż nie może! Obie siły mają te same fundamentalne własności. Po pierwsze – działają na wszystkie ciała i nadają im jednakowe przyspieszenie. Po drugie – skutków działania obu sił można się pozbyć (w małym obszarze kabiny) przez zmianę układu odniesienia.

Podobieństwo między siłą grawitacji i siłą bezwładności było powszechnie znane, zobaczymy jednak, jakie wnioski wyciągnął z niego Albert Einstein. Przede wszystkim założył, że to podobieństwo dwóch sił ma charakter fundamentalny i w żadnym doświadczeniu (w małych obszarach i małych odstępach czasu) nie można ich odróżnić. Przeprowadźmy teraz tzw. doświadczenie myślowe. Zamknięty w kabinie Han chce się wydostać, więc kieruje wiązką laserową na zamek w drzwiach (ryc. 2a). Czy trafi do celu? Jeśli statek ma przyspieszenie, w trakcie lotu światła ściana z drzwiami zwiększy prędkość i ucieknie promieniowi światła trochę w górę. Han zobaczy, że wiązka światła uderzy w drzwi poniżej zamka, a zatem wywnioskuje, że skręciła w dół. A jeśli statek wciąż spoczywa na planecie Tatooine?

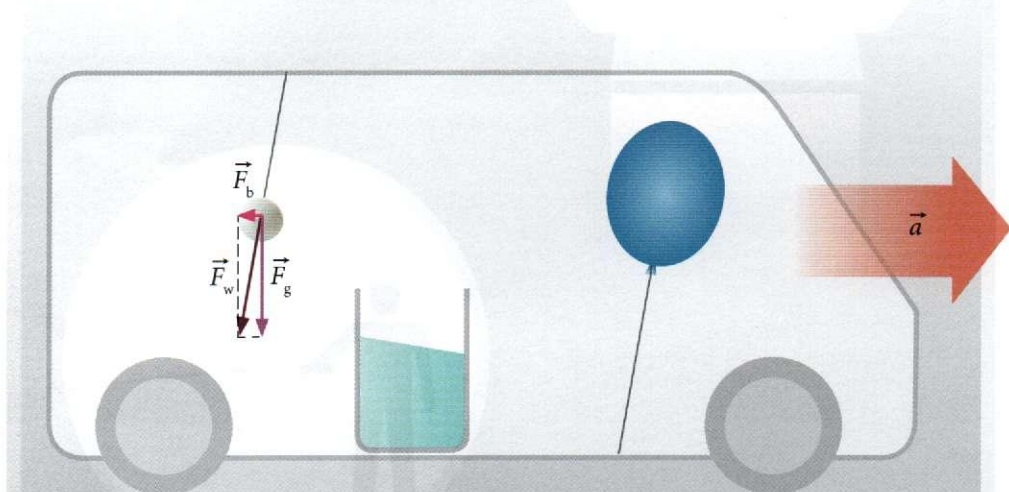
² Postać z *Gwiezdnych wojen*.



Teraz cofnijmy się do roku 1907. Niemal wszyscy fizycy uważali wtedy, że światło jest falą elektromagnetyczną, zatem nie podlega grawitacji. Tylko Einstein był przekonany, że światło jest strumieniem cząstek, dziś nazywanych fotonami. Jeśli siły bezwładności nie da się odróżnić od siły grawitacji i siła bezwładności odchyła światło, to siła grawitacji musi to robić w ten sam sposób (ryc. 2b). I to bez względu na to, czym jest światło! W ten sposób Einstein przewidział, że światło przechodzące w pobliżu masywnych ciał jest przez grawitację zakrzywiane. Jeśli grawitacja działa tak samo na wszystkie obiekty, to jest cechą samej **przestrzeni**. W ten sposób Einstein odkrył, że to, co nazywamy siłą grawitacji, jest zakrzywieniem czasoprzestrzeni. Od tego zakrzywienia (grawitacji) zależą

rozmiary ciał i tempo upływu czasu. Ta niezwykle piękna i kompletna teoria, ukończona przez uczonego w 1915 roku po kilku latach wytężonej pracy, nosi nazwę ogólnej teorii względności. Potrafi ona opisać i przewidzieć dynamikę całego Wszechświata oraz istnienie czarnych dziur, na których „powierzchni” czas przestaje płynąć. To z niej wynika istnienie fal grawitacyjnych odkrytych w 2015 roku.

Zasada równoważności prosto wyjaśnia skomplikowane zjawiska również w życiu codziennym. Na ryc. 3 można zobaczyć, jak w przyspieszającym autobusie zachowa się kulka wisząca na sznurku, powierzchnia herbaty w szklance czy unoszący się balonik z helem. Wyjaśnienie jest zadziwiająco proste i piękne: żadne z ciał nie odróżnia siły bezwładności od siły grawitacji, zatem w tym autobusie kierunek pionu jest wyznaczony przez wypadkową tych dwóch sił. Siła wyporu działająca na balonik jest skierowana przeciwnie do tej wypadkowej, czyli do „nowego” kierunku pionu.



Ryc. 3. W przyspieszającym autobusie wszystkie ciała zachowują się tak, jakby kierunek pionu wyznaczała wypadkowa sił grawitacji oraz bezwładności

Pytania i zadania

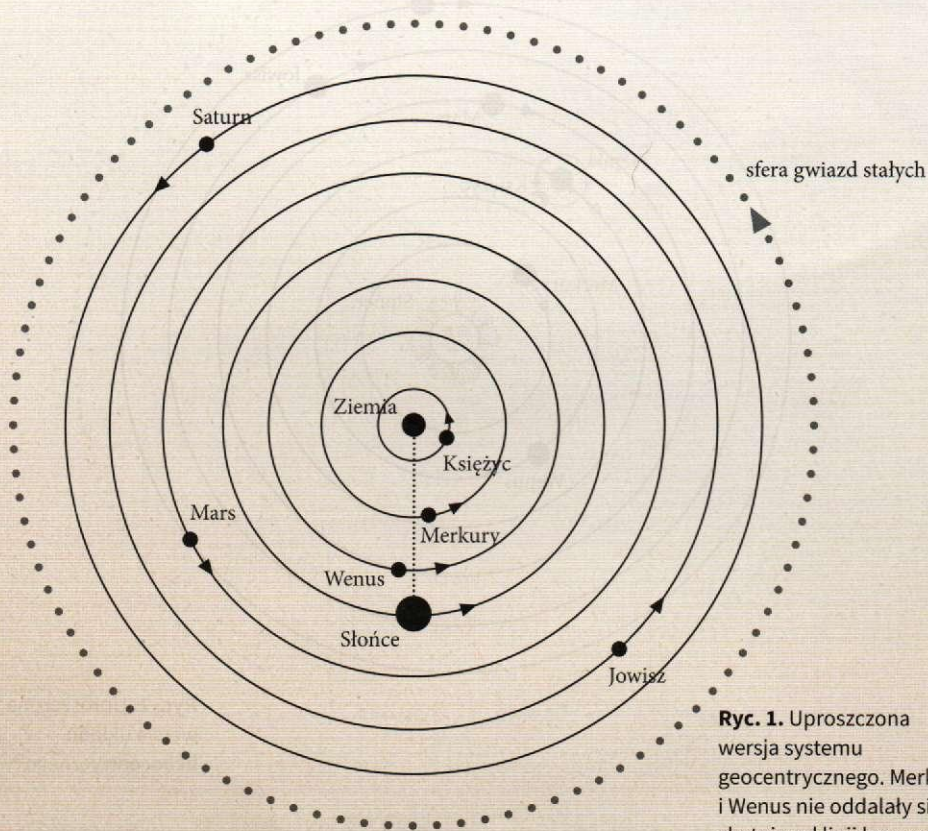
1. Czy w małych obszarach można odróżnić eksperymentalnie siłę bezwładności od siły grawitacji?
2. Wyjaśnij, dlaczego zasada równoważności obowiązuje tylko w niewielkich obszarach. Wskazówka: przerysuj sytuację z ryc. 1a z zachowaniem proporcji (kabina względnie duża w porównaniu z planetą). Narysuj kierunki spadania dwóch ciał z przeciwnych krańców kabiny w dwóch sytuacjach: gdy działa siła grawitacji i gdy działa siła bezwładności.
3. Która teoria Alberta Einsteina opisuje czarne dziury?
4. Czy światło podlega grawitacji?
5. Dlaczego deskorolkarz lub narciarz zjeżdżający z pochyłości nie zachowuje postawy pionowej, lecz raczej prostopadłą do podłoża? Wyjaśnij to na podstawie informacji podanych w tekście.

TEKST 2. Rewolucja na niebie i na Ziemi

„Wstrzymał Słońce, ruszył Ziemię, polskie go wydało plemię” – mowa tu oczywiście o Mikołaju Koperniku, jednym z największych uczonych w dziejach nauki. Spróbujmy przyjrzeć się wielkiemu astronomowi i jego odkryciu.

Mikołaj Kopernik, jak pisze wybitny historyk brytyjski Norman Davies, „pochodził z niemieckiej rodziny kupieckiej z Torunia i był lojalnym poddanym polskiego króla, którego bronił przed atakami Krzyżaków”³. W swoim długim, pracowitym życiu kanonika (1473–1543) piastował wiele funkcji, astronomią zajmował się tylko w czasie wolnym. Był więc astronomem amatorem w dzisiejszym rozumieniu tego terminu. Tuż przed śmiercią, po wieloletnich wahaniach, wydał dzieło *De revolutionibus orbium coelestium*, czyli *O obrotach sfer niebieskich*. Księga okazała się niezwykle rewolucyjna.

Ówczesna główna koncepcja filozofii przyrody sformułowana przez greckiego uczonego Ptolemeusza opisywała świat jako gigantyczną kulę. Na jej wewnętrznej powierzchni, zwanej sferą niebieską, były gwiazdy. Wszystkie ciała ciężkie dążyły do środka tego wszechświata, zatem składająca się z nich Ziemia była w jego centrum. Sfera niebieska okrążała Ziemię w czasie jednej doby, a planety (do których zaliczano także Księżyc i Słońce) krążyły wokół niej z różnymi okresami obiegu. Był to tzw. **model geocentryczny** (ryc. 1).

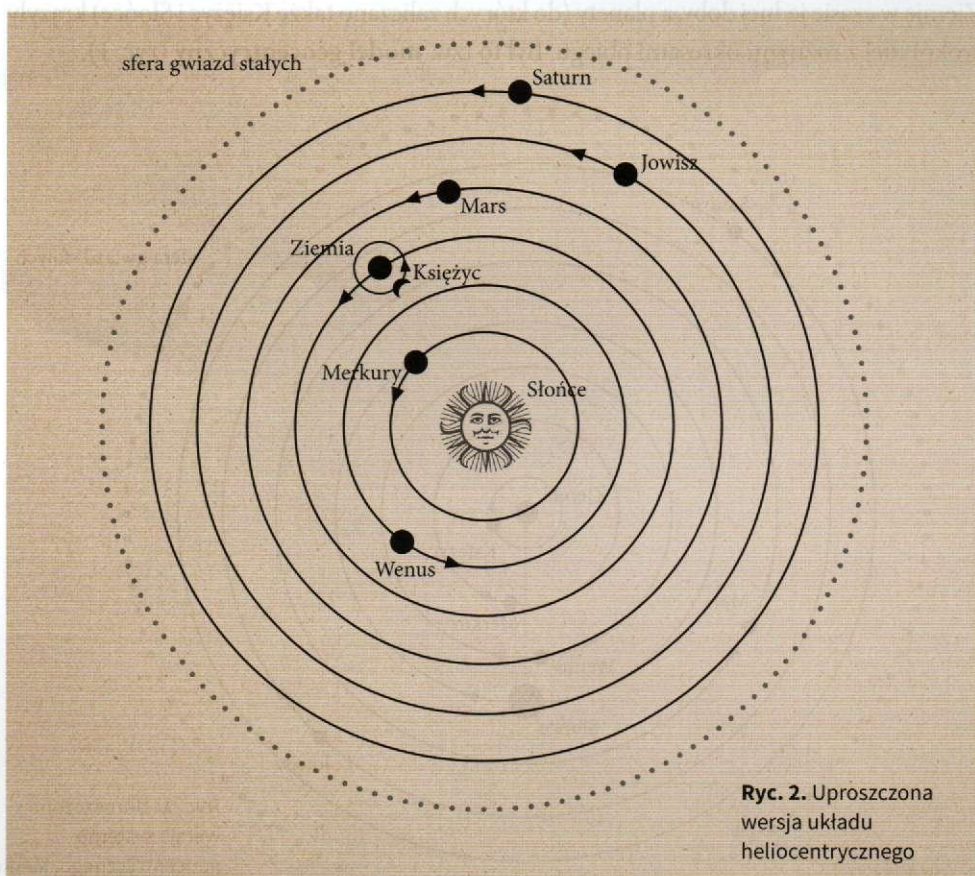


Ryc. 1. Uproszczona wersja systemu geocentrycznego. Merkury i Wenus nie oddalały się zbyt od linii łączącej Ziemię ze Słońcem

³ N. Davies, *Europa. Rozprawa historyka z historią*, Kraków 1998, s. 548.

Ówcześni uczeni za pomocą tego modelu mogli w miarę dokładnie przewidywać przyszłe położenia planet, ale „nie zdołali odkryć (...) rzeczy najważniejszej, mianowicie układu Wszechświata i ustalonego porządku jego części”⁴. Nawet kolejność planet była w nim dość dowolna, nic też nie dało się w jego ramach powiedzieć o ich odległościach od Ziemi. Planety dolne – Merkury i Wenus – nie oddalały się w tym modelu zbyt od linii łączącej Ziemię ze Słońcem, a planety górne – Mars, Jowisz i Saturn – nie miały tego ograniczenia. Było to zupełnie niezrozumiałe.

W kulistość Ziemi uczeni nie wątpili już od czasów starożytnych. Przewidywały ją greckie teorie filozofii przyrody, a potwierdzały obserwacje astronomiczne i naziemne, np. statki znikające za horyzontem. Kopernik nie był pierwszym astronomem, który zauważył, że obserwowany ruch olbrzymiej sfery niebieskiej można wytłumaczyć ruchem obrotowym niewielkiej Ziemi, a sama sfera może pozostawać w spoczynku. Jednak ruchy wszystkich planet na sferze niebieskiej wyjaśnił genialnie prosto jednym tylko ruchem – Ziemi wokół Słońca, które w tej teorii znajdowało się w środku orbit planet (ryc. 2).

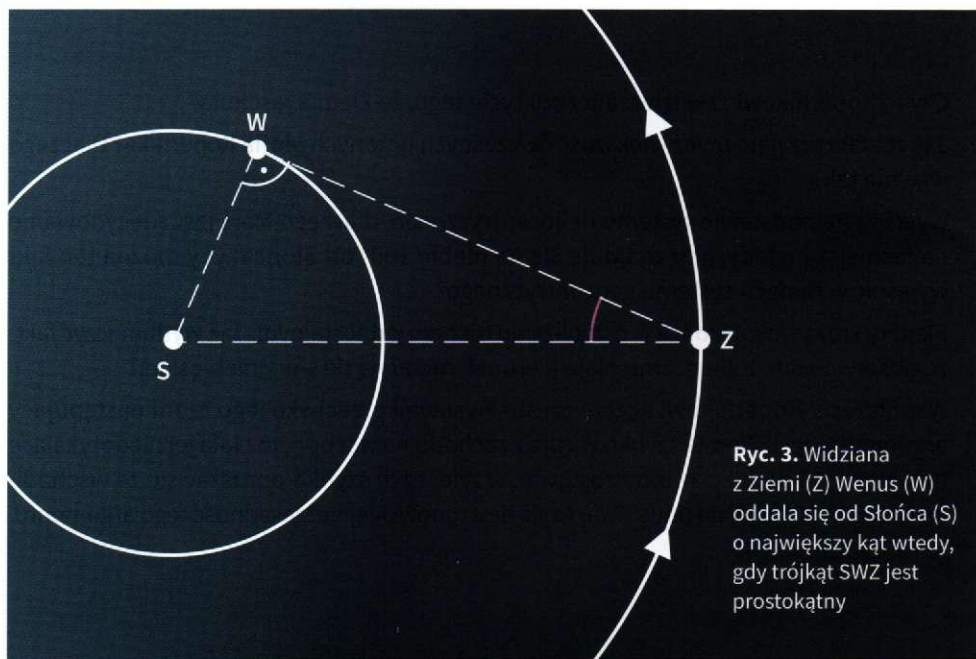


Ryc. 2. Uproszczona wersja układu heliocentrycznego

⁴ M. Kopernik, *O obrotach*, Warszawa-Kraków 1976, s. 4.

W przeciwieństwie do poprzedników Kopernik potrafił wyjaśnić za pomocą swojej teorii wiele faktów dotąd niezrozumiałych, np. niejednostajne ruchy planet na tle gwiazd. W jego systemie heliocentrycznym stało się jasne, dlaczego tylko planety dolne nie oddalają się na niebie na dowolnie duży kąt od Słońca. Zrozumiałe stało się też, dlaczego planety górne świecą zdecydowanie najjaśniej, gdy są na niebie po przeciwnej stronie niż Słońce.

Mikołaj Kopernik jako pierwszy podał poprawne odległości planet od Słońca (co prawda tylko w jednostkach astronomicznych). Dopiero w systemie heliocentrycznym było to możliwe. Spróbujmy to pokazać na przykładzie Wenus (ryc. 3).



Jeśli zmierzmy maksymalny kąt, o jaki Wenus oddala się od Słońca na sferze niebieskiej, to po skorzystaniu z własności trójkąta prostokątnego przedstawionego na ryc. 3 łatwo obliczymy odległość Słońce–Wenus przy założeniu, że odległość Słońca od Ziemi wynosi 1. Teoria Mikołaja Kopernika miała wiele zalet. Niestety, miała również dwie zasadnicze wady. Po pierwsze: była zupełnie sprzeczna z potocznym doświadczeniem – każdy przecież widział, że powierzchnia Ziemi spoczywa, a Słońce i Księżyc, planety i gwiazdy poruszają się na niebie. Po drugie była całkowicie sprzeczna z obowiązującymi wówczas teoriami fizycznymi. Nic zatem dziwnego, że ogromna większość uczonych nie potraktowała jej poważnie. Dopiero gdy powstała sformułowana na jej podstawie nowa fizyka Newtona, szala zaczęła się przechylać na korzyść systemu heliocentrycznego. Decydujące było trafne obliczenie przez Halleya – na podstawie prawa grawitacji Newtona – czasu ponownego pojawienia się komety, dziś nazywanej kometa Halleya. Nastąpiło to

w połowie XVIII wieku, dwieście lat po śmierci Kopernika, a sto lat po umieszczeniu przez Kościół katolicki jego księgi *O obrotach sfer niebieskich* w *Indeksie ksiąg zakazanych*. Sam genialny Kopernik świetnie zdawał sobie sprawę z ogromnego oporu, jaki musiała wzbudzić jego koncepcja. Warto przeczytać przedmowę do jego dzieła, w której pięknie tłumaczy swoje motywacje i rozterki. Dla potępiających system heliocentryczny na podstawie świadectwa zmysłów ma nader lakoniczną odpowiedź: „Dzieła matematyczne pisane są dla matematyków”⁵. To zdanie aktualne także w dzisiejszych czasach, gdy wielu ludzi bardziej wierzy w tzw. zdrowy rozsądek niż w wyniki badań naukowych.

Pytania i zadania

1. Czy to Kopernikowi zawdzięczamy odkrycie tego, że Ziemia jest kulą?
2. Jak została przyjęta przez większość ówczesnych uczonych teoria Kopernika? Dlaczego właśnie tak?
3. Wyjaśnij na podstawie systemu heliocentrycznego, dlaczego Mars jest zdecydowanie najjaśniejszy wtedy, gdy znajduje się na niebie 180° od Słońca. Czy można ten fakt wyjaśnić w ramach systemu geocentrycznego?
4. Planety krążą wokół Słońca w przybliżeniu ruchem jednostajnym. Jak wytłumaczyć fakt, że obserwowane z Ziemi zmieniają kierunek ruchu na tle sfery niebieskiej?
5. Współcześni Kopernikowi uczeni często wysuwali przeciwko jego teorii następujący argument: „Jeśli Ziemia szybko wiruje z zachodu na wschód, to ciała jej niedotykające (np. chmury i ptaki) powinny zostawać w tyle, czyli szybko poruszać się ze wschodu na zachód”. Wyjaśnij na podstawie fizyki newtonowskiej bezzasadność tego argumentu.

⁵ M. Kopernik, *O obrotach*, Warszawa–Kraków 1976, s. 6.

ROZDZIAŁ 1.

1. a) $21,3 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$
b) $0,94\%$
2. a) $8,48 \text{ V}$
b) $0,01 \text{ V}$
c) $0\text{--}20 \text{ V}$
3. a) 22°C
b) 2°C
c) od -4°C do $+204^\circ\text{C}$
4. boisko: $\Delta l = \pm 2,2 \text{ m}$, tawka: $\Delta l = \pm 0,02 \text{ m}$
5. $d \approx 2700 \text{ kg/m}^3$

ROZDZIAŁ 2.

2. $v_1 \approx 0,82 \text{ m/s}$, $v_2 \approx 0,48 \text{ m/s}$
3. $t = 65 \text{ min}$
4. Czas jazdy to $10,5 \text{ h} + 4 \text{ przerwy po } 20 \text{ min}$, czyli razem $11 \text{ h } 50 \text{ min}$.
5. $s \approx 190 \text{ km}$

ROZDZIAŁ 3.

1. Pojazd B.
3. a) $a \approx 16 \text{ m/s}^2$
b) $a \approx 13 \text{ m/s}^2$
4. $t \approx 49 \text{ s}$
5. $a \approx 14 \text{ m/s}^2$

ROZDZIAŁ 4.

1. a) Pojazd B.
b) $s_B/s_A \approx 2,5$
2. O $10,49$.
3. $t = 10 \text{ min}$
4. $a \approx 0,63 \text{ m/s}^2$
5. $s \approx 490 \text{ m}$

POWTÓRZENIE DZIAŁU KINEMATYKA

1. A: 1, 3
B: 4, 5
2. B 1
3. $t = 12 \text{ s}$
4. 1 P
2 P
5. b) $t = 12 \text{ s}$

ROZDZIAŁ 5.

1. $F = 850 \text{ N}$

ROZDZIAŁ 6.

1. $F_{\text{op}} = 1200 \text{ N}$
2. $F_{\text{op}} = 24 \text{ N}$
3. $F_p \approx 44 \text{ N}$
4. $F_B \approx 87 \text{ N}$

ROZDZIAŁ 7.

2. $F_w \approx 8,1 \text{ N}$, $a \approx 34 \text{ m/s}^2$
3. $F_w \approx 463 \text{ kN}$
4. $t \approx 1 \text{ min}$
5. $\Delta F_n \approx 740 \text{ N}$

ROZDZIAŁ 8.

2. Największa – B, najmniejsza – D.
3. Równoległe do deski w górę.
4. a) $F_{t \text{ max}} = 1,44 \text{ N}$
b) $t = 0,32 \text{ s}$
c) $F_{t \text{ kin}} = 1,2 \text{ N}$
5. b) Wzrosła siła nacisku na ściany komina, tarcie i ciężar pozostaną bez zmian.

ROZDZIAŁ 9.

2. Około 15,9 m.
3. Jeśli $h \approx 1,5 \text{ m}$, to $t = 1,4 \text{ s}$. Młotek i piórko spadały tak samo – na Księżycu nie ma oporu powietrza.

ROZDZIAŁ 10.

1. a) $v = 0 \text{ m/s}$
b) $v \approx 1675 \text{ km/h}$
2. $v_m = 24v_g$
3. $a_d \approx 6,3 \text{ m/s}^2$
 $F_d \approx 380 \text{ N}$
4. $v \approx 11 \text{ m/s}$
5. Wskazówka: Narysuj siłę nacisku działającą na rower (z kolarzem) pokonujący mocno nachylony zakręt. Narysuj również siłę ciężkości i wyciągnij wnioski.

ROZDZIAŁ 11.

4. a) $F_b \approx 15 \text{ kN}$, $F_b \approx 22F_g$
b) $F_b \approx 97 \text{ kN}$
5. $a_{\max} \approx 4,7 \text{ m/s}^2$

ROZDZIAŁ 12.

3. $v \approx 16,4 \text{ m/s}$ dla $h = 13,8 \text{ m}$
4. $a = 0,8 \text{ m/s}^2$, $s = 160 \text{ m}$, $h \approx 13 \text{ m}$
5. $h \approx 0,78 \text{ m}$

POWTÓRZENIE DZIAŁU DYNAMIKA

4. $F_w \approx 1230 \text{ N}$
6. a) $a = 3 \text{ m/s}^2$
b) $a \approx 2,3 \text{ m/s}^2$
7. C 2
8. 1 F, 2 P
9. B

ROZDZIAŁ 13.

3. $E = 2,7 \cdot 10^{16} \text{ J}$
4. 22
5. b) $E \approx 3,3 \cdot 10^5 \text{ J}$

ROZDZIAŁ 14.

2. a) i b) $W = \Delta E \approx 137\,000 \text{ J}$
c) $P \approx 470 \text{ W}$
3. $m \approx 4,2 \text{ mln ton}$
5. $F_{\text{op}} = 288 \text{ N}$

ROZDZIAŁ 15.

1. $E_g \approx 3,7 \cdot 10^7 \text{ J}$, czyli około 5 razy mniejsza.
2. $E_g \approx 120\,000 \text{ J}$, $E_k = 540 \text{ J}$
3. $\Delta E = 150\,000 \text{ J}$

ROZDZIAŁ 16.

3. $h \approx 46 \text{ m}$
4. $v \approx 6 \text{ m/s}$
5. $E_k/E_g = 0,58$, więc tracone jest 42% energii początkowej.

ROZDZIAŁ 17.

1. $x \approx 0,3 \text{ m}$
3. $W \approx 2E_k = 50 \text{ J}$
5. 3000 N

ROZDZIAŁ 18.

1. $E_k \approx 710 \text{ J}, E_g \approx 156 \text{ J}$
2. Środek masy zawodnika podniesie się o $1,2 \text{ m}$, czyli będzie nad poprzeczką.
3. $v \approx 15,5 \text{ m/s}$

POWTÓRZENIE DZIAŁU ENERGIA I JEJ PRZEMIANY

1. C
2. C
3. D
4. a) $t = 2 \text{ s}$
c) $E_{k\max} = 270 \text{ J}$
d) $h = 30 \text{ m}$
e) $E_g \approx 450 \text{ J}$
g) $P = 562,5 \text{ W}$

ROZDZIAŁ 19.

2. $0,009 \text{ au}$
3. Wenus. 42 mln km

ROZDZIAŁ 20.

2. 3 razy.
3. Około 3400 razy.

ROZDZIAŁ 21.

1. $T \approx 1,54 \text{ h}$
2. $v \approx 1 \text{ km/s}$

ROZDZIAŁ 22.

1. Około 330 000 razy.
2. Dla Merkurego i Wenus.
3. $m \approx 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
4. $m \approx 1,9 \cdot 10^{27} \text{ kg}$

ROZDZIAŁ 23.

2. $F_n \approx 5100 \text{ N}$
4. Wskazówka: przeciążenie na obu szalkach wagi będzie takie samo.
5. Wskazówka: można skorzystać ze wzoru $v^2 = 2as$. $t \approx 0,027 \text{ s}$, $a \approx 1800 \text{ m/s}^2$

ROZDZIAŁ 24.

1. $t \approx 8 \text{ min}$
2. Odległość do najbliższej gwiazdy jest większa od odległości Słońce–Neptun około 9000 razy.
3. Wskazówka: Zmierzyć na rycinie 24.1 kąt, jaki zakreśliła wybrana gwiazda wokół gwiazdy polarnej, i obliczyć z proporcji czas ekspozycji przy znanym okresie obrotu nieba.
5. $m \approx 3,5 \cdot 10^{41} \text{ kg}$

ROZDZIAŁ 25.

1. $v \approx 1200 \text{ km/s}$
5. Około 14 mld lat świetlnych, czyli tyle samo, ile droga światła wyemitowanego tuż po powstaniu Wszechświata.

POWTÓRZENIE DZIAŁU GRAWITACJA I ASTRONOMIA

1. 378 mln km i 78 mln km
2. $d \approx 0,001 \text{ ly}$
3. $g \approx 0,19 \text{ m/s}^2$
4. 2 razy mniejsza.
6. 1 F, 2 P
7. I, III, IV
8. B 1

Tabela 1. Stałe fizyczne i astronomiczne

prędkość światła w próżni	$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
przyspieszenie ziemskie	$g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
stała grawitacji	$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$
stała Hubble'a	$H = 2,23 \cdot 10^{-5} \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{ly}}$
jednostka astronomiczna	$1 \text{ au} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ km}$
masa Ziemi	$M_z = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg} \approx 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
masa Słońca	$M_s = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg} \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
promień Ziemi	$R_z = 6370 \text{ km} = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$

Tabela 2. Przedrostki do wielokrotności i podwielokrotności jednostek

Przedrostek	Skrót	Mnożnik
peta	P	$10^{15} = 1\,000\,000\,000\,000\,000$
tera	T	$10^{12} = 1\,000\,000\,000\,000$
giga	G	$10^9 = 1\,000\,000\,000$
mega	M	$10^6 = 1\,000\,000$
kilo	k	$10^3 = 1000$
hekto	h	$10^2 = 100$
deka	da	$10^1 = 10$
–	–	$10^0 = 1$
decy	d	$10^{-1} = 0,1$
centy	c	$10^{-2} = 0,01$
mili	m	$10^{-3} = 0,001$
mikro	μ	$10^{-6} = 0,000\,001$
nano	n	$10^{-9} = 0,000\,000\,001$
piko	p	$10^{-12} = 0,000\,000\,000\,001$
femto	f	$10^{-15} = 0,000\,000\,000\,000\,001$