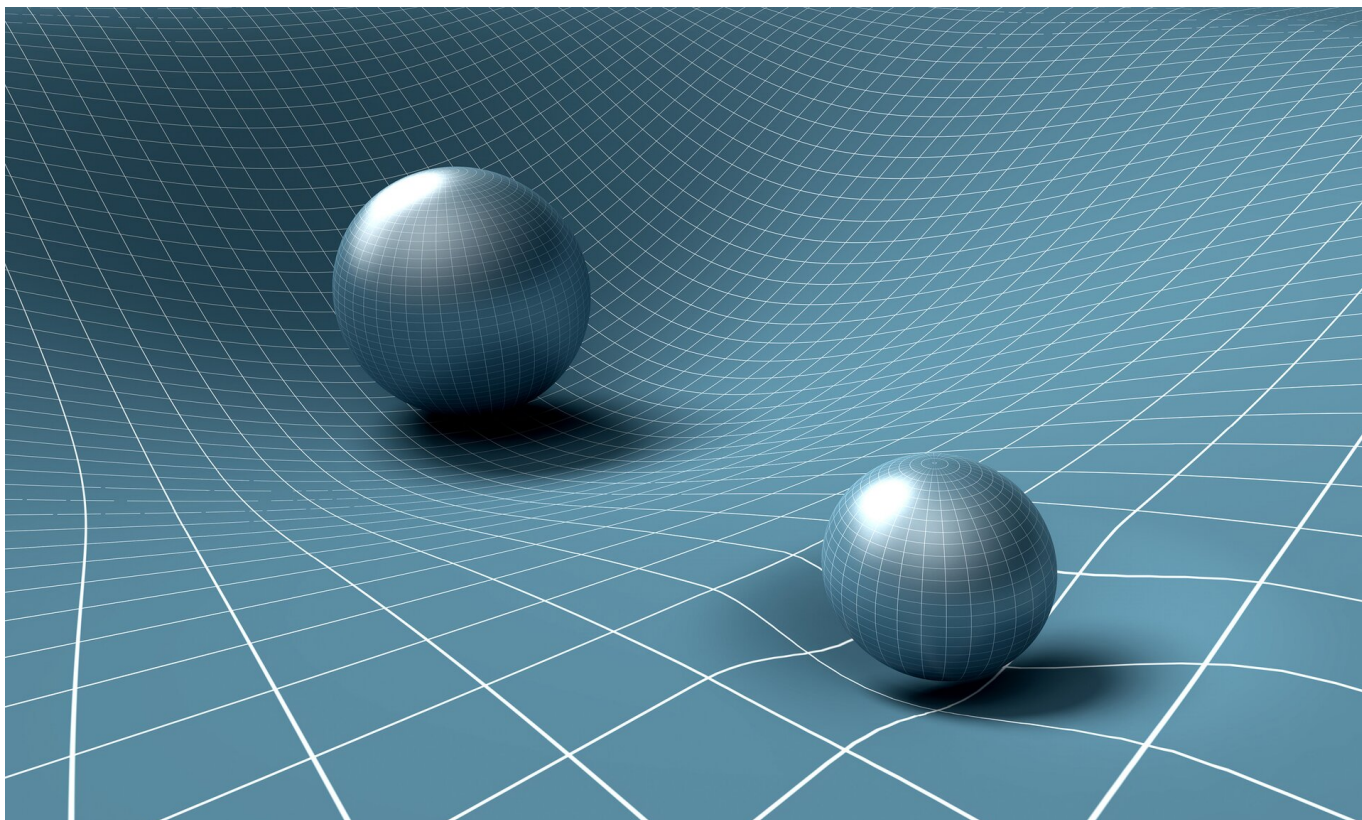




Dlaczego wyznaczenie stałej grawitacyjnej było bardzo ważne?

- [Wprowadzenie](#)
- [Przeczytaj](#)
- [Grafika interaktywna \(schemat\)](#)
- [Film \(standardowy\)](#)
- [Dla nauczyciela](#)



Dlaczego wyznaczenie stałej grawitacyjnej było bardzo ważne?

Czy to nie ciekawe?

Jak zmierzyć masę swego ciała - wiemy bardzo dobrze. Wystarczy wejść na wagę i odczyt jest natychmiastowy. Pomiary dużo większych mas wymagają nieco innych wag - ale też są możliwe. Do bezpośredniego pomiaru masy obiektów astronomicznych, jak się domyślasz, nie ma odpowiednich przyrządów. Nie jest to jednak niemożliwe. Jak wyznaczyć masę Ziemi i innych ciał niebieskich, dowiesz się w tym e- materiale.

Twoje cele

- poznasz dwie metody historyczne wyznaczania stałej grawitacyjnej,
- zrozumiesz, jakie znaczenie miało to dla rozwoju fizyki,
- zastosujesz prawa Keplera i znajomość ruchu po okręgu do wyznaczenia masy ciał niebieskich,
- ocenisz, jakie jest znaczenie znajomości dokładnej wartości stałej grawitacji dla współczesnych pomiarów astronomicznych.

Przeczytaj

Warto przeczytać

Ciężar każdego ciała na Ziemi wynika z siły oddziaływania grawitacyjnego pomiędzy tym ciałem a Ziemią. Wartość F tej siły określił Newton w prawie powszechnego ciążenia

$$F = G \frac{Mm}{R^2} .$$

Siła ta nadaje swobodnemu ciału przyspieszenie grawitacyjne g :

$$g = \frac{F}{m} = G \frac{M}{R^2} .$$

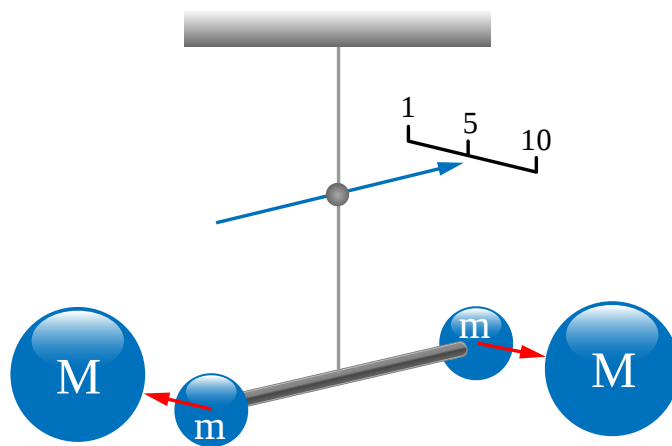
Oznacza to, że $G = \frac{gR^2}{M}$. Aby więc wyznaczyć stałą G , musimy znać promień Ziemi R , przyspieszenie grawitacyjne g i masę Ziemi M . Mówiono, że wyznaczenie wartości stałej G to zważenie Ziemi – tak było w istocie! Dokładne wyznaczenie tej stałej było bardzo ważne dla rozwoju nauki. Po raz pierwszy zrobił to w warunkach laboratoryjnych angielski uczony Henry Cavendish w końcu XVIII wieku. Niemal sto lat później fizyk niemiecki Philipp von Jolly, zastosowawszy zupełnie inną metodę, uzyskał wynik znacznie bardziej dokładny.

Jaki sens fizyczny ma stała grawitacji? Przyjrzyjmy się wzorowi

$$F = G \frac{Mm}{R^2} .$$

Jeżeli podstawimy do niego wartości jednostkowe masy i odległości, to uzyskamy wartość siły oddziaływania pomiędzy jednokilogramowymi masami z odległości jednego metra; wynosi ona (jak dziś wiemy) $6,67 \cdot 10^{-11}$ N .

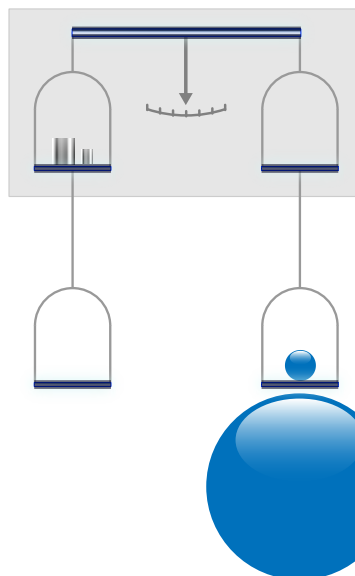
Widzimy, że pomiar siły grawitacji w warunkach laboratoryjnych wymagał bardzo dużej precyzji. Henry Cavendish przeprowadził takie precyzyjne doświadczenie w 1798 roku. Pomiar wykonał za pomocą tzw. wagi skręceń. Na nici kwarcowej zawiesił poziomo pręt z dwiema małymi kulkami na jego końcach. Do kulek tych zbliżał z obu stron dwie duże kule ołowiane (Rys. 1.). Siły przyciągania skręcały pręt i nić kwarcową o pewien kąt. Kąt skręcenia Cavendish mierzył za pomocą promienia odbitego od lusterka zawieszonego na nici kwarcowej. Znając wartość tego kąta, Cavendish mógł obliczyć siły przyciągania się kul. Pomiar wymagał wielkiej ostrożności, dlatego swoją wagę umieszczał w zamkniętej skrzyni w celu uniknięcia prądów powietrza, zaś odchylenie nici kwarcowej obserwował za pomocą lunety z innego pomieszczenia.



Rys. 1. Schematyczny rysunek wagi skręceń używanej przez H. Cavendisha.

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Pod koniec XIX wieku, w roku 1881, Philipp von Jolly opracował dokładniejszą metodę, stosując do pomiaru siły grawitacji czułą wagę (Rys. 2.).



Rys. 2 Schematyczny rysunek wagi użytej przez P. Jollego do pomiaru siły grawitacyjnej.

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Pod jej szalkami umieścił jeszcze jedną parę szalek. Na jednej z dolnych szalek umieścił napełnioną **rtęcią** szklaną bańkę, ważącą 5 kg, i zrównoważył ją, ustawiając odpowiedni odważnik na lewej szalce górnej. Bezpośrednio pod bańką z rtęcią umieścił wielką kulę ołowianą, zbudowaną z oddzielnych sztab, ważącą 5,8 t. Waga wychyliła się, gdyż kula przyciągnęła bańkę z rtęcią. Okazało się, że do zrównoważenia wagi trzeba było położyć na przeciwległej górnej szalce odważnik o masie zaledwie 0,566 mg. Zatem wartość siły, z jaką

kula przyciągnęła bańkę, wynosiła 5, 55 mN. Otrzymana wartość stałej grawitacyjnej wynosiła $G = 6,66 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$.

Najdokładniejsze współczesne pomiary wskazują na następującą wartość stałej grawitacji:

$$G = (6,6742 \pm 0,0010) \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2.$$

Zwróć uwagę, że względna niepewność pomiarowa stałej wynosi ok. 0,015%.

Ważenie Słońca



Rys. 3 Fotografia Słońca.

Źródło: dostępny w internecie: <https://pl.pinterest.com/pin/792422496922847593/> [dostęp 4.08.2022], domena publiczna.

Znając prawo grawitacji i stałą grawitacji, możemy wyznaczyć masę Słońca, Ziemi i innych ciał naszego układu planetarnego, nie opuszczając domu. W celu wyznaczenia masy Słońca należy najpierw zauważyć, że siła dośrodkowa utrzymująca Ziemię na orbicie wokół Słońca to siła grawitacyjna przyciągania Ziemi do Słońca:

$$F = G \frac{M_Z M_S}{r^2},$$

gdzie M_Z to masa Ziemi, M_S – masa Słońca, r – odległość Ziemi do Słońca, równa promieniowi orbity Ziemi. Zastosujemy wzór na siłę dośrodkową w ruchu po okręgu (przyjmujemy, że kształt orbity Ziemi nie odbiega znacznie od okręgu):

$$F = \frac{4\pi^2 M_Z r}{T^2},$$

gdzie T to okres obiegu Ziemi (czyli rok): Przyrównajmy prawe strony powyższych wzorów do siebie:

$$\frac{4\pi^2 M_Z r}{T^2} = G \frac{M_Z M_S}{r^2}.$$

Po przekształceniu otrzymamy wzór na masę Słońca:

$$M_S = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}.$$

Wszystkie wartości wielkości znajdujących się po prawej stronie tego wzoru można wyznaczyć doświadczalnie, będąc na Ziemi (bez konieczności wędrowania w kosmos). Promień orbity Ziemi wynosi $r = 1,49 \cdot 10^{11}$ m, okres obiegu (czyli rok) to $T = 365,25$ dób (jedna doba słoneczna wynosi 24 h, tj. 86400 s) i stała grawitacji $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$. Po wstawieniu tych danych do wyprowadzonego wzoru otrzymujemy masę Słońca:

$$M_S = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2} = \frac{4\pi^2 (1,496 \cdot 10^{11})^3}{6,67 \cdot 10^{-11} (365,25 \cdot 86400)^2} \text{ kg} = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}.$$

Porównując masę Słońca z masą Ziemi, nietrudno obliczyć, że Słońce ma masę ok. 335 000 razy większą od masy Ziemi.



Rys. 4. Centrum Drogi Mlecznej - zastosowanie III prawa Keplera i znajomość stałej grawitacji pozwoliły określić masę supermasywnej czarnej dziury kryjącej się gdzieś w centrum obrazu (Nagroda Nobla 2020). Źródło: dostępny w internecie: <https://www.eso.org/public/images/eso0846a/> [dostęp 4.08.2022], licencja: CC BY 4.0.

Słowniczek

rtęć

(*ang.: mercury*) – pierwiastek chemiczny, który jest jedynym metalem występującym w warunkach normalnych w stanie ciekłym.

Droga Mleczna

(*ang.: Milky Way*) – nazwa galaktyki, w której jest nasz układ planetarny.

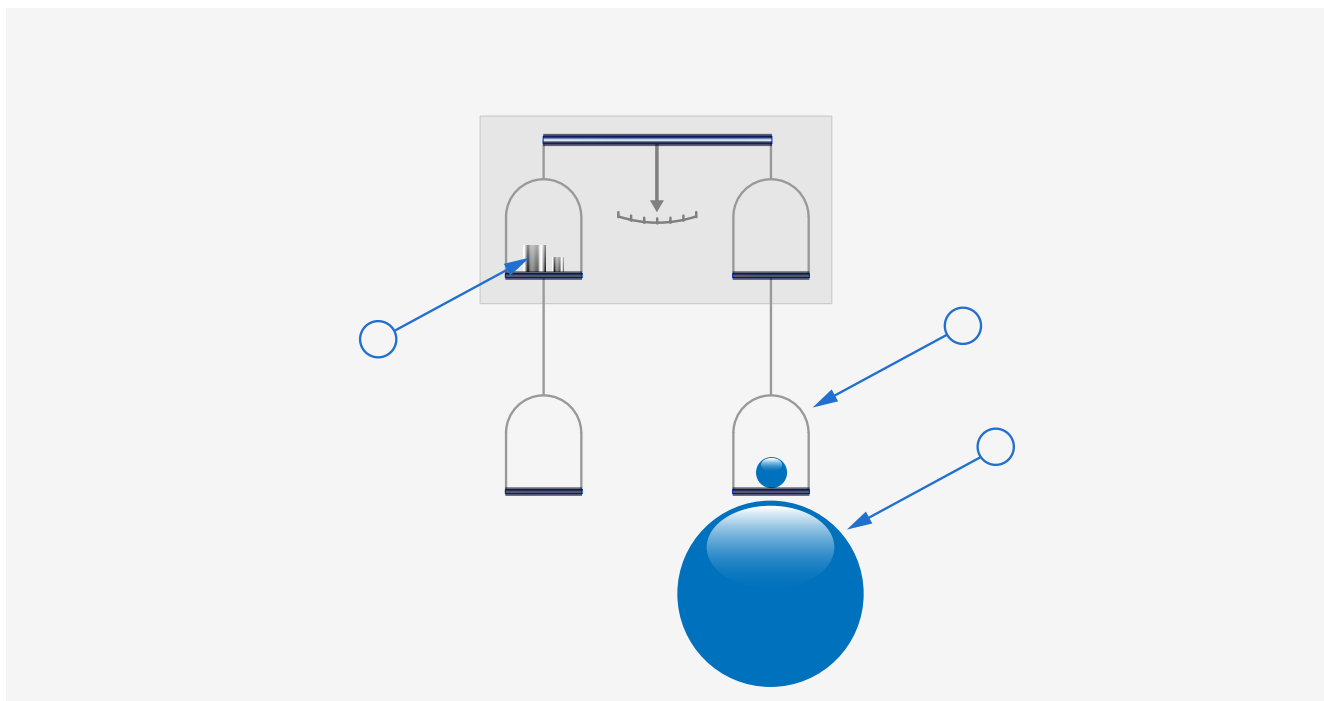
Grafika interaktywna (schemat)

Wyznaczenie stałej grawitacyjnej

Doświadczenie Jolly'ego

Polecenie 1

Uzupełnij grafikę, która obrazuje doświadczenie von Jolly'ego.



Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Polecenie 2

Czy rtęć umieszczona na szalce w doświadczeniu von Jolly'ego wypełniłaby szklankę? Gęstość rtęci: $d = 13\,600 \text{ kg/m}^3$, objętość szklanki to około 200 ml.

Polecenie 3

Gdyby w doświadczeniu von Jolly'ego zastąpić sztaby ołowiane kulą, jaki byłby promień tej kuli? Gęstość ołowiu: $d = 11\,300 \text{ kg/m}^3$.

Polecenie 4

Oszacuj, w jakiej odległości znajdowały się środki mas oddziałujących ze sobą dwóch ciał - sztaby ołowiu i kuli rtęci. Dane znajdziesz w grafice.

Oszacuj także, o ile procent różni się ten wynik od przyjmowanej dziś wartości $G = 6,6742 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$.

Polecenie 2

Za pomocą przedstawionej w filmie aparatury można zmierzyć nie tylko wartość stałej grawitacji. Można także zbadać, czy wartość siły grawitacji maleje odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości pomiędzy oddziałującymi ciałami, jak przewiduje to prawo powszechnego ciążenia.

Opisz pokrótce postępowanie pozwalające przeprowadzić takie badanie. W opisie zawrzyj krótki opis procedury analizy wyniku pomiaru.

Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Anna Kaczorowska
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	Zabawy ze stałą grawitacyjną
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres podstawowy/rozszerzony
Podstawa programowa	Zakres podstawowy III. Grawitacja i elementy astronomii. Zakres rozszerzony IV. Grawitacja i elementy astronomii
Kształtowane kompetencje kluczowe:	Zalecenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.: • kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji, • kompetencje cyfrowe, • kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii, • kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.
Cele operacyjne:	Uczeń: 1. wymienia obliczenia zaprezentowane przez konkurujące grupy związane z obliczaniem wartości siły grawitacyjnej, 2. analizuje i porównuje, na przykładzie Ziemi, Słońca i innych ciał w galaktyce, skalę wielkości mas we Wszechświecie, 3. ocenia, jakie jest znaczenie znajomości dokładnej wartości stałej grawitacji dla współczesnych pomiarów astronomicznych.
Strategie nauczania	game-based learning
Metody nauczania	analiza pomysłów

Formy zajęć:	Praca w dwóch grupach jako przygotowanie do zabawy oraz praca całą klasą w czasie realizacji lekcji.
Środki dydaktyczne:	Komputer z rzutnikiem.
Materiały pomocnicze	E-materiał: „Dlaczego wyznaczenie stałej grawitacyjnej było ważne”.
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
Lekcja będzie grą – „Obrona stałej grawitacyjnej”. Klasa będzie uczestniczyć słuchając argumentów dwóch zespołów. Zespoły będą pięcioosobowe i przed lekcją do gry muszą się przygotować.	
Faza realizacyjna:	
Pierwszy etap polega na tym, że każdy z zespołów przedstawia swoją tezę. Teza pierwszego zespołu polega na przedstawieniu konsekwencji tego, że stała grawitacyjna ma wartość $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$. Przedstawienie powinno opierać się na konkretnych przykładach wartości siły grawitacyjnej pomiędzy wybranymi ciałami oraz zjawisk, które są konsekwencją tej wartości. Wśród nich może pojawić się film pokazujący metodę Cavendisha obliczania siły grawitacyjnej. Druga grupa prezentuje, jak wyglądałby świat i Wszechświat, gdyby stała miała wartość 1000 razy większą. Stanowisko musi być zaprezentowane z wykorzystaniem wcześniej przeprowadzonych rachunków i próby przedstawienia konsekwencji takiej wartości stałej. Po takich prezentacjach publiczność może zadawać pytania członkom obu zespołów.	
Faza podsumowująca:	
Ocenie podlega rzeczowość przedstawionych stanowisk i – w przypadku drugiego zespołu – pewna kreatywność. Oceny dokonuje nauczyciel wraz z zespołem dwójga ekspertów wybranych spośród uczniów na początku lekcji.	
Praca domowa:	
Oceń i opisz w postaci pisemnej pracy, jakie mogły być konsekwencje tego, że Cavendish wyznaczył stałą grawitacyjną jako $G = 6,66 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$.	
Wskazówki metodyczne opisujące różne zastosowania danego multimedium	Film i grafika przedstawiają historyczne sposoby wyznaczania stałej grawitacyjnej. Wraz z pytaniami aktywizującymi mogą być dobrym tematem koła przedmiotowego.

