

WIRTUALNE LABORATORIA FIZYCZNE NOWOCZESNĄ METODĄ NAUCZANIA

INNOWACYJNY PROGRAM NAUCZANIA FIZYKI
W SZKOŁACH PONADGIMNAZJALNYCH

Moduł dydaktyczny: fizyka - informatyka

Grawitacja i elementy astronomii

Grzegorz F. Wojewoda

Człowiek - najlepsza inwestycja



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



WARSZAWSKA
WYŻSZA SZKOŁA
INFORMATYKI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Tytuł: **Grawitacja i elementy astronomii**

Autor: **mgr Grzegorz F. Wojewoda**

Redaktor merytoryczny: **dr hab. inż. prof. WWSI Zenon Gniazdowski**

Materiał dydaktyczny opracowany w ramach projektu edukacyjnego
WIRTUALNE LABORATORIA FIZYCZNE NOWOCZESNĄ METODĄ NAUCZANIA.
PROGRAM NAUCZANIA FIZYKI
Z ELEMENTAMI TECHNOLOGII INFORMATYCZNYCH

www.wlf.wysi.edu.pl

wlf@wysi.edu.pl

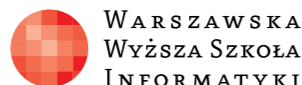
Wydawca: Warszawska Wyższa Szkoła Informatyki
ul. Lewartowskiego 17, 00-169 Warszawa
www.wysi.edu.pl
rektorat@wysi.edu.pl

Projekt graficzny: *Maciej Koczanowicz*

Warszawa 2013

Copyright © Warszawska Wyższa Szkoła Informatyki 2013
Publikacja nie jest przeznaczona do sprzedaży

Człowiek - najlepsza inwestycja



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

MODUŁ 1

GRAWITACJA I ELEMENTY ASTRONOMII

→ FIZYKA – ZAKRES PODSTAWOWY

OPRACOWANE W RAMACH PROJEKTU:
WIRTUALNE LABORATORIA FIZYCZNE NOWOCZESNĄ METODĄ NAUCZANIA.
PROGRAM NAUCZANIA FIZYKI
Z ELEMENTAMI TECHNOLOGII INFORMATYCZNYCH

Wstęp

Fizyka to podstawowa nauka przyrodnicza. Podstawowa w tym sensie, że stanowi zestaw praw i zasad uogólniających dane uzyskane w wyniku doświadczeń opisujących obiektywne prawa przyrody. Teoria w fizyce nie może być traktowana jako zestaw prawd ostatecznych. Każda teoria fizyczna to model matematyczny opisujący zjawiska z otaczającego nas świata słuszny w granicach potwierdzonych przez eksperyment.

Treści zapisane w podstawie programowej nauczania fizyki w szkole ponadgimnazjalnej obejmują zagadnienia opisane przez fizykę klasyczną, czyli taką której podwalinami są zasady dynamiki sformułowane przez Izaaka Newtona.

Założenia, które są podstawą zasad dynamiki Newtona:

1. Absolutny matematyczny i prawdziwy czas sam w sobie, i przez jego własną naturę płynie równo w odniesieniu do wszystkiego zewnętrznego, który inaczej zwie się trwaniem.
2. Absolutna przestrzeń przez jej własną naturę niezależnie od wszystkiego zewnętrznego pozostaje zawsze taka sama i nieruchoma.
3. Miejsce jest częścią przestrzeni, którą zajmuje ciało, i jest zależne od przestrzeni albo absolutne, albo relatywne.
4. Ruch absolutny jest przesunięciem ciała z jednego miejsca absolutnego do drugiego; ruch względny jest przesunięciem od jednego miejsca względnego do drugiego.

Aksjomaty, czyli prawa ruchu (zasady dynamiki)

Prawo I

Każde ciało zachowuje swój stan spoczynku lub ruchu jednostajnego wzdłuż linii prostej, chyba że jest zmuszone do zmiany tego stanu przez przyłożone do niego siły.

Prawo II

Zmiana ruchu jest proporcjonalna do czynnej siły przyłożonej i ma kierunek wzdłuż prostej, wzdłuż której ta siła jest przyłożona.

Prawo III

Do każdej akcji zawsze istnieje przeciwna i równa co do wielkości reakcja, wzajemne działania na siebie dwóch ciał są zawsze równe co do kierunku i wielkości i zawsze przeciwne co do zwrotu.

Temat 1

Ruch jednostajny po okręgu

Wstęp

Obserwator stojący na Ziemi (na półkuli północnej) może dostrzec, że gwiazdy zataczają okręgi wokół punktu znajdującego się w pobliżu Gwiazdy Polarnej (rys. 1.1.). W rzeczywistości to Ziemia wiruje wokół swojej osi, co sprawia, że każdy z nas uczestniczy nieustannie w ruchu po okręgu. Jeżeli uświadomimy sobie jeszcze, że Ziemia krąży wokół Słońca po orbicie, która w przybliżeniu jest kołowa, to już wiadomo, dlaczego omawianie tematów związanych z grawitacją zaczniemy od opisu ruchu po okręgu. Podczas realizacji zagadnień z tego tematu dowiedzie się, jakie wielkości fizyczne opisują ruch po okręgu, opowiemy o związku ruchu samochodu po rondzie z ruchem Księżyca wokół Ziemi.



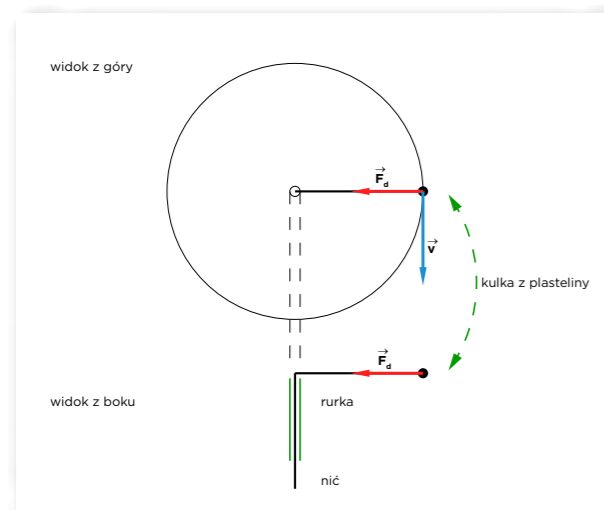
Rys. 1.1. Pozorny ruch gwiazd wokół Gwiazdy Polarnej.

W otaczającym nas świecie można dostrzec wiele obiektów, których ruch odbywa się po okręgu. Na przykład są to ludzie znajdujący się na karuzeli w lunaparku, samochód jadący wokół ronda czy kulka zamocowana na lince i wprawiona w ruch po okręgu. Skupmy na początku swoją uwagę na ruchu kulki poruszającej się po okręgu.

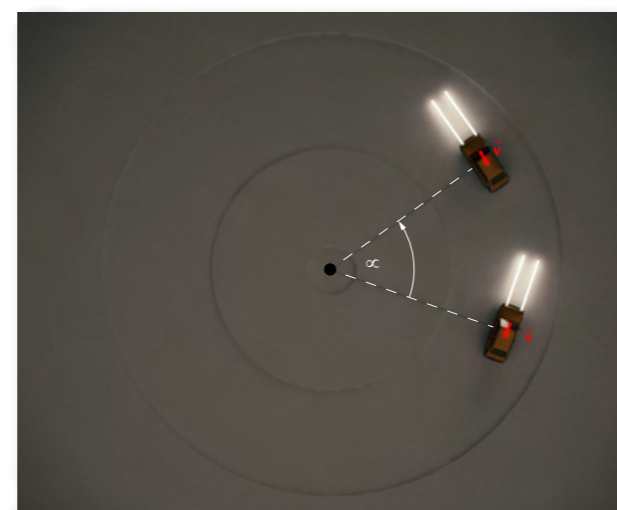
Wykonajmy doświadczenie, w którym zbadamy własności siły powodującej ruch po okręgu. Poszukamy odpowiedzi na pytanie, jaki jest kierunek oraz zwrot siły powodującej ruch ciała po okręgu.

Patrz: Doświadczenie 1

Siła dośrodkowa jest wspólną nazwą wszystkich rzeczywistych sił powodujących ruch jednostajny po okręgu. W naszym doświadczeniu siłą dośrodkową była siła reakcji na rozciąganie. Siłą dośrodkową



Rys. 1.2. Schemat doświadczenia, w którym badamy podstawowe własności siły dośrodkowej.



Rys. 1.3. Zmiana wektora prędkości w ruchu po okręgu.

powodującą ruch samochodu po łuku płaskiej, poziomej szosy jest siła tarcia opon o jezdnię, siłą dośrodkową powodującą ruch Księżyca wokół Ziemi jest siła grawitacji, itp.

Spróbujmy teraz opisać ruch po okręgu posługując się pojęciami prędkości i przyspieszenia. W tym celu rozważmy ruch samochodu, który porusza się ze stałą wartością prędkości po skrzyżowaniu ruchem okrężnym (rys. 1.3.). Wyobraźmy sobie, że ruch auta odbywa się nocą, przy włączonych światłach drogowych. Reflektory samochodowe świecą na wprost, wskazując chwilowy kierunek jazdy, a więc również chwilowy kierunek wektora prędkości. Kierowca oraz obserwatorzy znajdujący się na zewnątrz samochodu mogą dostrzec, że podczas ruchu kierunek jazdy auta stale się zmienia. Jest to kolejna bardzo ważna cecha ruchu po okręgu:

Podczas ruchu jednostajnego po okręgu kierunek wektora prędkości jest zmienny w czasie.

(Aby lepiej zapamiętać tę cechę warto prześledzić animację nr 1).

Możemy w przybliżeniu przyjąć, że Księżyc krążący wokół Ziemi porusza się po okręgu. W czasie tego ruchu kierunek wektora prędkości Księżyca nieustannie się zmienia. Możemy jednak przyjąć, że wartość jego prędkości w ruchu dookoła naszej planety pozostaje stała. Ruch Księżyca wokół Ziemi można określić jako **ruch jednostajny po okręgu**, a także jako **ruch okresowy**. Oznacza to, że istnieje określony czas, po którym Księżyc znajdzie się w tym samym punkcie przestrzeni, przyjmując, że punktem odniesienia jest środek Ziemi. Czas jednego pełnego obiegu po okręgu nazywamy **okresem**. Okres oznaczamy literą T . Jednostką okresu jest sekunda (1s).

Ilość obiegów w ruchu po okręgu wykonywanych w jednostce czasu nazywamy **częstotliwością**. Wartość częstotliwości jest równa odwrotności okresu:

$$f = \frac{1}{T}$$

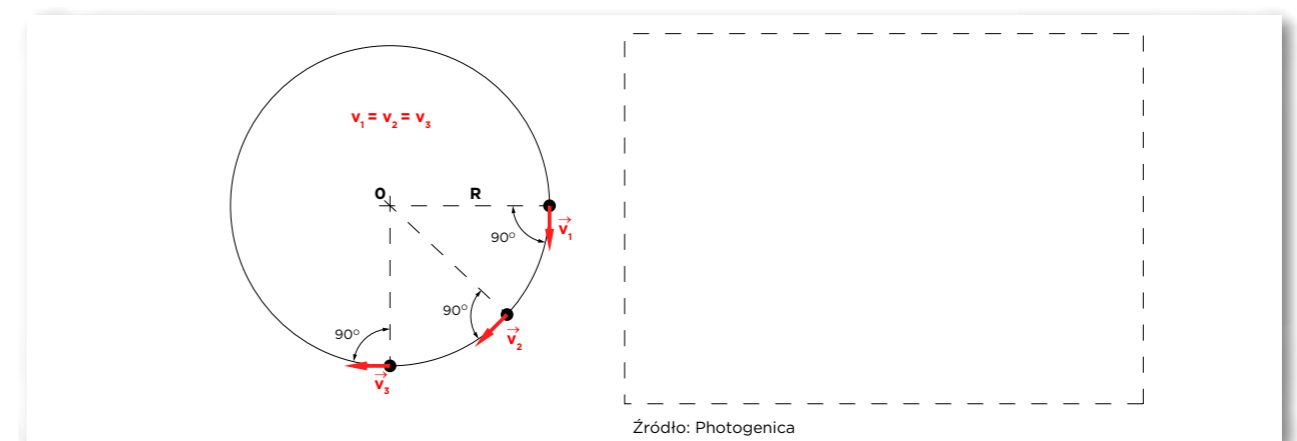
Jednostką częstotliwości jest herc (1Hz): $[f] = \frac{1}{s} = \text{Hz}$

Wartość prędkości możemy obliczyć ze wzoru: $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$. W ruchu jednostajnym po okręgu droga Δs pokonywana w czasie jednego pełnego obiegu jest równa długości okręgu, czyli: $\Delta s = 2\pi R$, gdzie R jest promieniem okręgu. Czas jednego obiegu to okres T .

Oznacza to, że wartość prędkości w ruchu jednostajnym po okręgu możemy obliczyć ze wzoru:

$$v = \frac{2\pi R}{T}$$

Tak zdefiniowaną prędkość w ruchu po okręgu nazywamy czasami **prędkością liniową**. Kierunek prędkości chwilowej w ruchu po okręgu jest prostopadły do kierunku wyznaczonego przez promień tego okręgu (rys. 1.4.).



Rys. 1.4. Wektor prędkości w ruchu jednostajnym po okręgu jest zawsze styczny do toru. Kierunek wektora prędkości mogą wyznaczać iskry ze szlifierki.

Przypominamy, że z naszego doświadczenia wynika, że ruch plasteliny po okręgu powoduje siła, której kierunek jest wzdłuż promienia okręgu, o zwrocie skierowanym do środka okręgu. Zgodnie z II zasadą dynamiki Newtona przyspieszenie ciała jest skutkiem działania na to ciało siły wypadkowej

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{WYP}}{m}$$

Jeśli przyczyną ruchu jednostajnego po okręgu jest siła, to w tym ruchu występuje przyspieszenie. Nazywamy je dośrodkowym, bo ma kierunek zgodny z kierunkiem promienia okręgu, a zwrot do jego środka. Z drugiej strony można powiedzieć, że w ruchu jednostajnym po okręgu występuje przyspieszenie, bo w tym ruchu nieustannie zmienia się prędkość (rys. 1.5.). Wartość **przyspieszenia dośrodkowego** w ruchu jednostajnym po okręgu można wyznaczyć ze wzoru:

$$a = \frac{v^2}{R}$$

Wartość siły wypadkowej (zgodnie z II zasadą dynamiki) można obliczyć ze wzoru:

$$F_{WYP} = m \cdot a$$

Wstawiając do tego wzoru wyrażenie na wartość przyspieszenia dośrodkowego, otrzymujemy:

$$F_{WYP} = m \frac{v^2}{R}$$

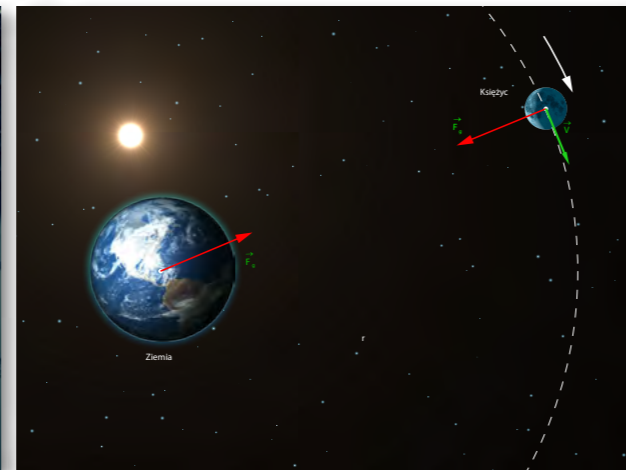
Wartość tej siły jest wprost proporcjonalna do masy oraz kwadratu prędkości ciała, a odwrotnie proporcjonalna do promienia okręgu:

$$F_d = \frac{m \cdot v^2}{R}$$

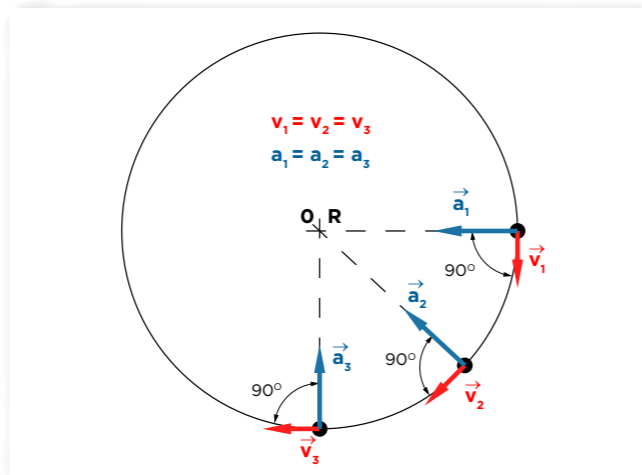
Przykłady zastosowania poznanej wiedzy do opisu zjawisk otaczającego świata:



Rys. 1.6. Chwilowy kierunek prędkości kawałka błota przylepionego do opony koła rowerowego.



Rys. 1.7. Ruch Księżyca wokół Ziemi powoduje siła przyciągania grawitacyjnego.



Rys. 1.5. Wektor prędkości liniowej oraz przyspieszenia dośrodkowego w ruchu jednostajnym po okręgu.

Wyobraźmy sobie rowerzystę jadącego ze stałą prędkością po zabłoconej drodze. Do koła roweru przylepiony jest kawałek błota. Względem osi koła kawałek błota porusza się ruchem jednostajnym po okręgu. W tym przypadku rolę siły dośrodkowej pełni siła przylegania między oponą a błotem. Co się stanie z kawałkiem błota, gdy zwiększymy prędkość roweru? Ze wzoru na wartość siły dośrodkowej wynika, że jej wartość jest proporcjonalna do kwadratu wartości prędkości liniowej. Natomiast siła przylegania nie zależy od wartości prędkości. Gdy wartość siły dośrodkowej wyznaczona ze wzoru jest większa od rzeczywiście istniejącej siły powodującej ruch po okręgu (w tym przypadku siły przylegania), to dalszy ruch kawałka błota odbywa się początkowo w kierunku wyznaczonym przez chwilowy kierunek jego prędkości liniowej (rys. 1.6.). Mokre i brudne plecy rowerzysty jadącego w deszczowy dzień na rowerze bez błotników są najlepszym dowodem na słuszność tych rozważań.

Pomiędzy Ziemią a Księżycem działają przyciągające siły grawitacyjne. Pod wpływem przyciągania grawitacyjnego Ziemi Księżyc krąży wokół naszej planety. Ściśle rzecz biorąc to oba obiekty krążą wokół wspólnego środka masy. Dla uproszczenia przyjmijmy jednak, że Księżyc krąży wokół Ziemi po okręgu o stałym promieniu. Wykonywany przez Księżyc ruch jednostajny po okręgu odbywa się pod wpływem siły dośrodkowej. Rolę siły dośrodkowej pełni w tym przypadku siła przyciągania grawitacyjnego (rys. 1.7.). Prosimy zapoznać się z animacją nr 2.

Temat 2

Proste obserwacje astronomiczne

Wstęp

Chcemy was przekonać, że każdy z nas może, chociaż przez chwilę, być astronomem. Na niebie jest tak wiele interesujących obiektów. Aby je zobaczyć, nie potrzeba bardzo drogiego i skomplikowanego sprzętu. Wystarczy tylko chcieć.

Orientacja na niebie

Nocne niebo dla nieprzygotowanego obserwatora to tylko mnóstwo świecących punktów. Aby obserwacje miały sens, trzeba się do nich przygotować. Przed rozpoczęciem przygody z obserwacjami astronomicznymi proponujemy najpierw usiąść przed ekranem komputera i wykorzystać jeden z darmowych programów, które symulują wygląd nieba. Tu wykorzystaliśmy program Stellarium. Jest on bardzo prosty w obsłudze i pozwala na wstępne zapoznanie się z rozmieszczeniem gwiazd i planet na niebie.

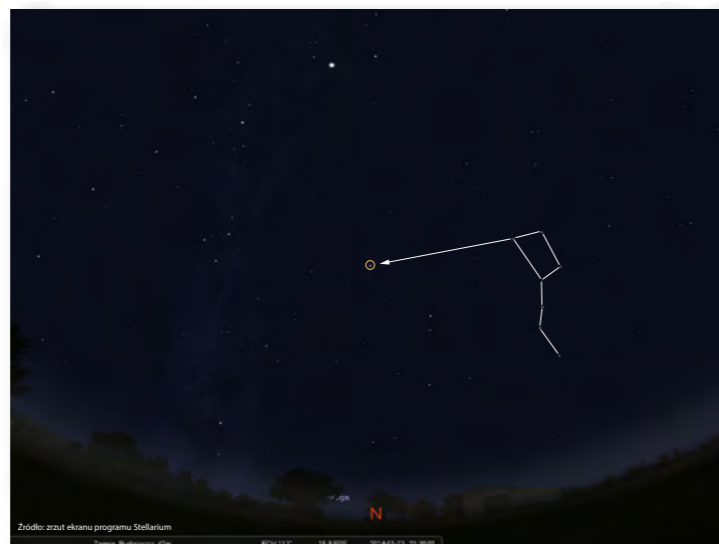
Na rysunku 2.1. przedstawiono widok sfery niebieskiej z zaznaczonymi nazwami najjaśniejszych gwiazd. Oczywiście prawdziwe niebo różni się od tego obrazka. Po pierwsze, nie zawsze widać aż tyle gwiazd. Oświetlenie ulic i budynków powoduje, że widać niewiele gwiazd na bezchmurnym niebie. Po drugie obrazek jest płaski, a sfera niebieska jest częścią powierzchni kuli. Po trzecie, na rysunku jaśniejsze gwiazdy zaznaczono jako duże kropki, w rzeczywistości widoczne rozmiary tych gwiazd są mniejsze.

Najpierw spróbujmy znaleźć Gwiazdę Polarą. Na rysunku 2.2. przedstawiono sposób, w jaki się to robi. W północnej części sfery niebieskiej znajduje się bardzo charakterystyczny gwiazdozbiór o nazwie Wielki Wóz. Odliczając pięć długości odcinka łączącego gwiazdy tworzące „koła” Wielkiego Wozu w kierunku wskazanym strzałką, znajdziemy dość jasną gwiazdę. Jest to Gwiazda Polarna. Na naszej półkuli zawsze wskazuje ona kierunek północny.

A teraz nieco trudniejsze zadanie. Znajdziemy słabo widoczny obiekt. Będzie to galaktyka M31 w gwiazdozbiórze Andromedy. To najdalszy obiekt w kosmosie, który możemy dostrzec gołym okiem. Światło wysłane z tej galaktyki potrzebuje ponad 2 miliony lat, aby do nas dotrzeć. Na niebie szukamy gwiazd układu



Rys. 2.1. Obraz zimowego nieba przedstawiony za pomocą programu Stellarium.



Rys. 2.2. Sposób znajdowania Gwiazdy Polarnej na sferze niebieskiej.

jących się w literę W (rys. 2.3). Jest to gwiazdozbiór Kasjopeja. Poniżej znajduje się kilka gwiazd tworzących na niebie łagodny łuk. To gwiazdozbiór Andromedy. Pomiędzy „literą W” a łukiem gwiazd można dostrzec mglisty obiekt – galaktykę M31. Oprócz obiektów świecących własnym światłem na niebie widoczne są planety, które świecą światłem odbitym. Planety zmieniają swoje położenie na niebie względem gwiazd. Zmiany położenia planet widoczne są w dłuższym okresie. Starożytni nazywali je gwiazdami błędzącymi. Na rysunku 2.4 przedstawiono zmiany położenia Jowisza na tle gwiazd.



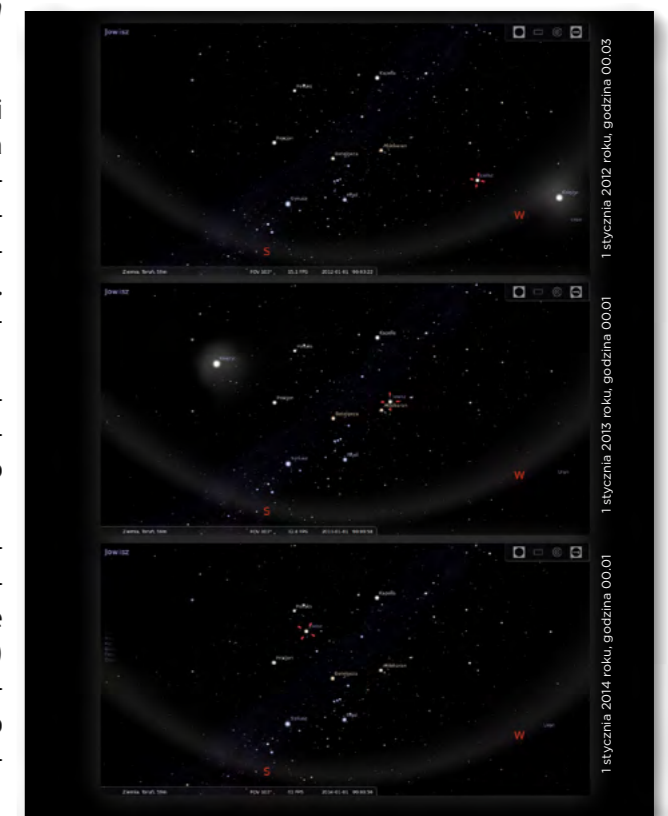
Rys. 2.3. Schemat sposobu znajdowania Galaktyki M31.

Sposoby wyznaczania odległości kątowych na sferze niebieskiej

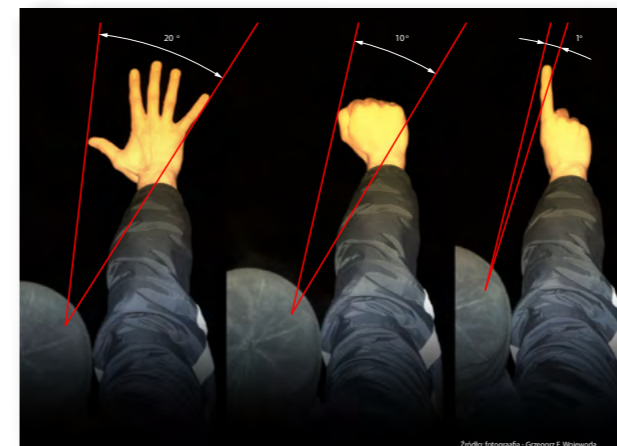
Najprościej – użyć własnej dłoni (rys. 2.5). Jeżeli wyciągniemy rękę, wówczas odległość kątowna rozłożonej dłoni odpowiada około 20° . Gdy wyciągniemy zaciśniętą pięść to zmierzmy odległość kątowną równą w przybliżeniu 10° . Palec wskazujący odpowiada kątowi około 1° . Nie jest ważna wielkość dłoni, bo jest ona proporcjonalna do długości ramienia.

Do szacowania odległości kątowych na sferze niebieskiej może również służyć tarcza Księżyca. Rozmiary kątowe tarczy Księżyca w pełni to około pół stopnia.

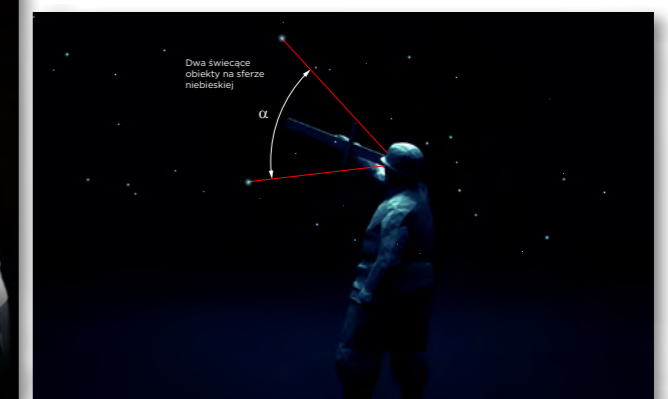
Do wyznaczania odległości kątowych służy również laska Jakuba. Przyrząd ten możemy zbudować samodzielnie. Do budowy laski potrzebne będą dwie linijki (jedna dłuższa, druga krótsza) oraz ruchome połączenie między nimi. Połączenie to można wykonać z kawałka kartonu. Sposób pomiaru kątów za pomocą laski Jakuba przedstawia rysunek 2.6.



Rys. 2.4. Zmiana położenia Jowisza na tle gwiazd.



Rys. 2.5. Sposób szacowania kątów na niebie za pomocą dłoni.



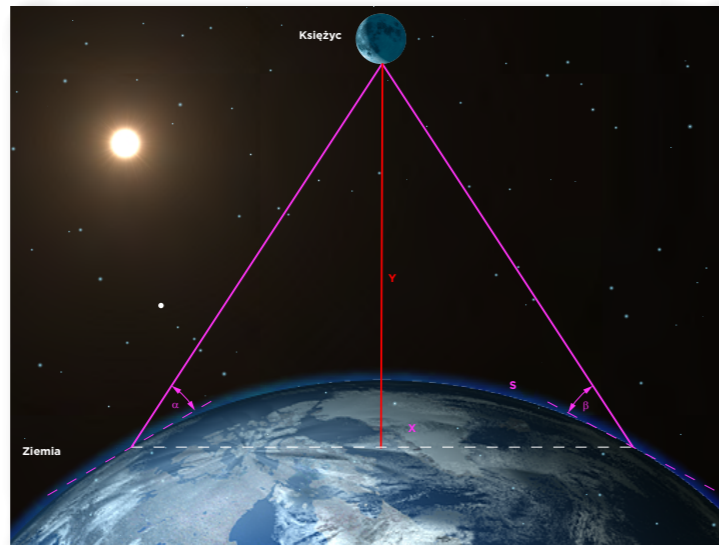
Rys. 2.6. Schemat pomiaru kątów na niebie za pomocą laski Jakuba.



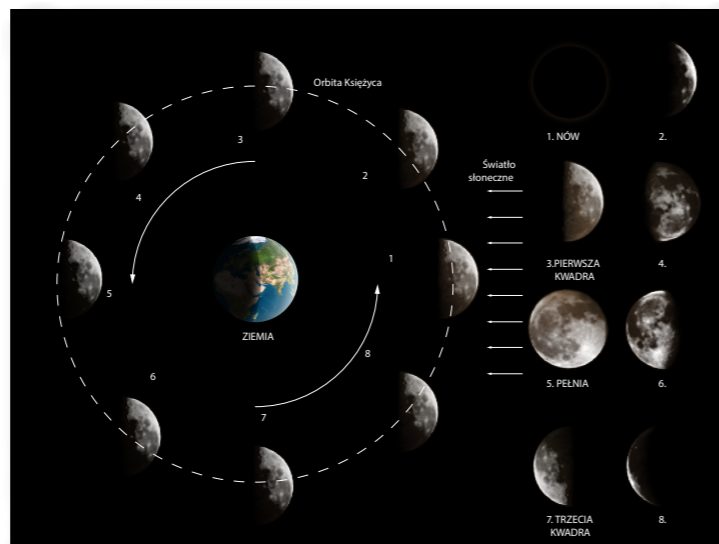
Rys. 2.7. Ilustracja zjawiska paralaksy.

Umiejętność wyznaczania kątów na sferze niebieskiej była już znana starożytnym. Potrafiono również wyznaczać odległości do najbliższych ciał niebieskich.

Do wyznaczenia odległości do najbliższych ciał niebieskich może służyć metoda oparta na paralaksie. Na rysunku 2.7 przedstawiono mechanizm tego zjawiska. Na figurkę najpierw patrzono okiem lewym, a potem prawym. Na fotografiach widać przemieszczanie się figurki na tle ścianki. Korzystając z tego efektu można wyznaczyć odległość Księżyca od Ziemi (rys. 2.8). Dwóch obserwatorów znajduje się w odległości s od siebie. Jeśli znamy odległość s oraz promień Ziemi, możemy wyznaczyć odległość x . Obserwatorzy wyznaczają kąty α oraz β względem swoich horyzontów. Pozostają „tylko” obliczenia matematyczne w celu wyznaczenia odległości y . Starożytny astronom Hipparch w II w.p.n.e., analizując zaćmienia Słońca i Księżyca, ustalił, że odległość Ziemia – Księżyc wynosi 59 promieni Ziemi. Wynik ten jest porównywalny z otrzymywanymi obecnie. Współcześnie odległość Ziemi od Księżyca wyznacza się bardzo precyzyjnie dzięki lustrum umieszczonym na Księżycu. Z Ziemi w kierunku Księżyca wysyła się wiązkę promieni laserowych. A następnie mierzy się czas powrotu sygnału świetlnego. Znając prędkość światła oraz czas lotu sygnału, można obliczyć szukaną odległość.



Rys. 2.8. Schemat wyznaczania odległości do Księżyca.



Rys. 2.9. Mechanizm powstania faz Księżyca.

Używana na Ziemi jednostka odległości, jaką jest metr, w przestrzeni kosmicznej okazuje się zbyt mała. Na użytek szkolny będziemy używać jednostek odległości zdefiniowanych następująco:

Jednostka astronomiczna (1 j.a lub 1 AU) to odległość równa średniej odległości między Ziemią a Słońcem. Jest ona w przybliżeniu równa 150 mln. km.

Rok świetlny (1 l.y.) to odległość, którą w próżni światło pokonuje w czasie jednego roku.

$$1l.y. = 63241 j.a. = 9,46 \cdot 10^{15} m$$

Oznaczenie 1 l.y. pochodzi od angielskiej nazwy tej jednostki – light year.

Fazy Księżyca

Zajmijmy się teraz naszym najbliższym sąsiadem – Księżycem. Na pewno każdy z was zauważył, że Księżyc zmienia swoje położenie względem gwiazd oraz zmienia swój wygląd. Na rysunku 2.9. przedstawiono mechanizm powstawania faz Księżyca. W wyniku ruchu obiegowego wokół Ziemi powstają fazy Księżyca oraz zmiana jego położenia na sferze niebieskiej.

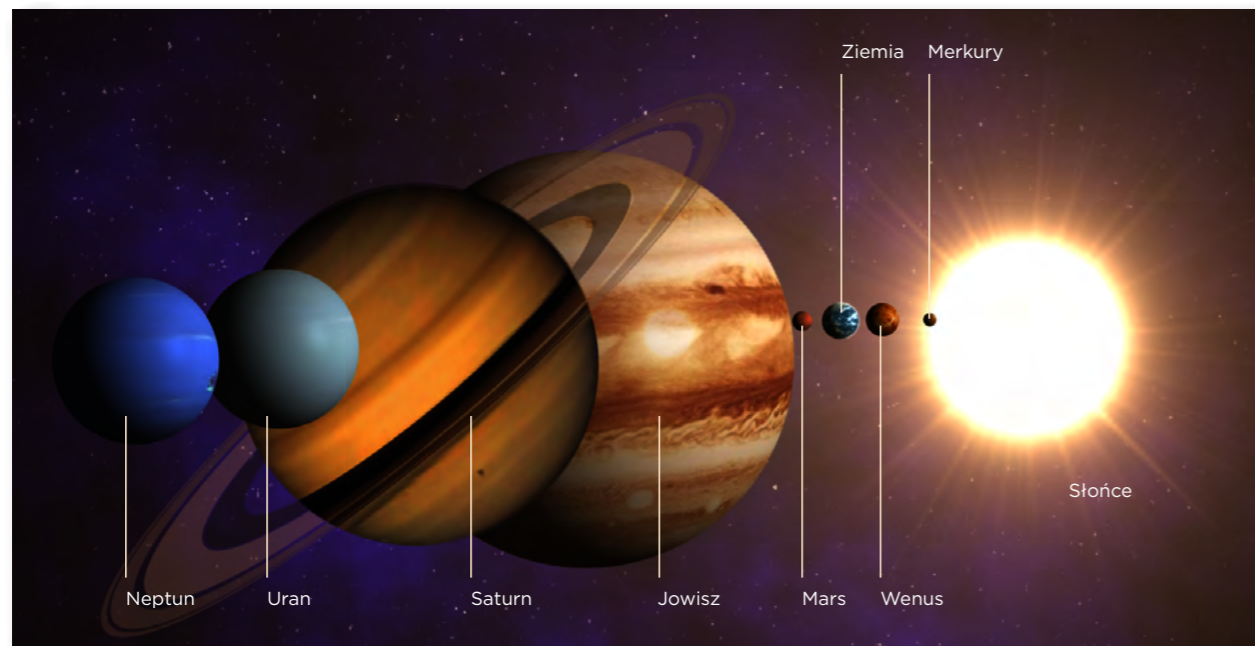
Temat 3

Układ Słoneczny

Wstęp

Dzisiaj zabierzemy was na wycieczkę po naszym najbliższym kosmicznym sąsiedztwie. Będzie to podróż po Układzie Słonecznym. Opiszemy cechy fizyczne planet. Zastanowimy się również, czy grozi nam spotkanie z innym obiektem Układu Słonecznego.

Około 4,6 miliarda lat temu ogromny obłok pyłu i gazu zaczął się zapadać pod wpływem przyciągania grawitacyjnego. Był to początek Układu Słonecznego. Obecnie struktura Układu Słonecznego jest następująca (rys. 3.1.). Centrum Układu Słonecznego stanowi Słońce, które zawiera ponad 99% jego masy. Cztery najbliższe Słońca planety to Merkury, Wenus, Ziemia i Mars. Są one stosunkowo niewielkie, mają duże gęstości. Posiadają powierzchnię, na której mogą lądować sondy kosmiczne. Cztery planety zewnętrzne – Jowisz, Saturn, Uran oraz Neptun – to gazowe olbrzymy, czyli obiekty bardzo masywne, ale o stosunkowo małej gęstości. Gazowe olbrzymy zbudowane są głównie z helu i wodoru. Wokół prawie wszystkich planet (za wyjątkiem Merkurego i Wenus) krążą księżycy. Największy z nich, Tytan, księżyc Saturna, jest nawet większy od Merkurego. Cztery największe księżycy Jowisza (Io, Europa, Ganymedes, Kallisto) można dostrzec z powierzchni Ziemi już za pomocą dobrej lornetki.



Rys. 3.1. Największe obiekty Układu Słonecznego.

Tab. 1 Wybrane parametry planet Układu Słonecznego

Planeta	Masa $M_z=1$	Promień równikowy $R_z=1$	Okres obiegu $t_z=1$ rok	Odległość od Słońca $a_z=1$	Okres obrotu $T_z=1$ doła
Merkury	0,0553	0,383	0,24	0,387	58,65
Wenus	0,815	0,949	0,62	0,723	243,00
Ziemia	$5,98 \cdot 10^{24} \text{kg}$	$6,38 \cdot 10^6 \text{m}$	365,25 dni	$1,5 \cdot 10^{11} \text{m}$	$23^{\text{h}}56^{\text{m}}04^{\text{s}}$
Mars	0,107	0,533	1,88	1,524	1,03
Jowisz	317,83	11,21	11,86	5,2	0,41
Saturn	95,16	9,45	29,46	9,537	0,65
Uran	14,54	4,01	84,07	19,19	0,76
Neptun	17,15	3,88	164,8	30,07	6,39

W 2006 roku Międzynarodowa Unia Astronomiczna uzgodniła następującą definicję planety:

1. Jest to obiekt krążący wokół Słońca.
2. Obiekt ten ma kształt zbliżony do kuli.
3. W pobliżu okołosłonecznej orbity tego obiektu nie może być innych obiektów krążących wokół Słońca.

Obiekt spełniający pierwszy warunek to planetoida. Obiekt spełniający tylko dwa pierwsze warunki to planeta karłowata. Do grona planet karłowatych zaliczamy na przykład Plutona. Orbita Plutona leży w pasie planetoid zewnętrznych, zwanym pasem Kuipera. Pomiedzy orbitami Marsa i Jowisza znajduje się główny pas planetoid, w którym poruszają się między innymi planeta karłowata Ceres oraz planetoida Iris. W Układzie Słonecznym znajdują się również planetoidy krążące wokół Słońca poza wymienionymi miejscami. Nas szczególnie interesują obiekty krążące wokół Słońca po orbitach przecinających orbitę Ziemi. W przeszłości wiele z takich obiektów uderzało w powierzchnię naszej planety. Świadczą o tym liczne ślady po uderzeniach meteorytów. Po zbadaniu metodami izotopowymi (szerzej o tych metodach w rozdziale poświęconym fizyce jądrowej) wieku okruchów skalnych docierających do powierzchni Ziemi, naukowcy oszacowali, że Układ Słoneczny ma około 4,6 miliarda lat. Tyle lat mają najstarsze meteoryty, które znaleziono na powierzchni Ziemi.

Podsumowanie

Układ Słoneczny składa się ze Słońca i 8 planet: Merkury, Wenus, Ziemia, Mars, Jowisz, Saturn, Uran i Neptun.

Oprócz tego wokół Słońca krążą planety karłowate (na przykład Pluton czy Ceres) oraz planetoidy (na przykład Adonis i Iris).

Temat 4

Prawo powszechnego ciężenia

Wstęp

Wskażemy podobieństwa między siłą powodującą spadanie jabłek z drzew a siłą powodującą ruch Księżyca wokół Ziemi. Wyjaśnimy, od jakich wielkości zależy siła wzajemnego oddziaływania grawitacyjnego między ciałami.

Od czasów starożytnych uważano ruch planet po kołowych orbitach za naturalny. Zdecydowana większość ówczesnych myślicieli sądziła jednak, że Słońce oraz planety krążą wokół Ziemi. Pod koniec średniowiecza polski astronom, Mikołaj Kopernik, stworzył teorię głoszącą, że Ziemia wraz z pozostałymi planetami krąży wokół Słońca. Żyjący na przełomie XVI i XVII wieku włoski uczone Galileo Galilei (Galileusz) odkrył, że gdy na ciało nie działa żadna siła, to porusza się ono po linii prostej. Aby ruch odbywał się po okręgu, na ciało musi działać siła. Na początku XVII wieku niemiecki astronom Johannes Kepler sformułował epiczne prawa dotyczące ruchu planet wokół Słońca. W myśl trzeciego prawa Keplera:

Stosunek kwadratu okresu obiegu T planety wokół Słońca do trzeciej potęgi średniej odległości R_{sr} planety od Słońca jest wielkością stałą (const.).

$$\frac{T^2}{R_{sr}^3} = const$$

Galileusz udowodnił, że ruch jednostajny po linii prostej bez oporów ruchu nie wymaga siły napędzającej. Z obserwacji wynikało, że ruch planet wokół Słońca odbywa się po elipsach, a nie po okręgach. Wielu naukowców w XVII wieku starało się scalić w jedno odkrycia Galileusza i Keplera. Udało się to Izakowi Newtonowi. Po przeanalizowaniu zasady bezwładności Galileusza, Newton doszedł do wniosku, że siła powodująca ruch planety wokół Słońca nie jest skierowana wzdłuż kierunku prędkości planety, ale do środka krzywizny ruchu. Czyli siła powodująca ruch planety wokół musi pochodzić od Słońca.

Ale czy może istnieć siła wzajemnego działania między ciałami bez ich bezpośredniego kontaktu? Legenda wymyślona częściowo przez samego Newtona głosi, że na rozwiązanie tej zagadki wpadł w ogrodzie, pod jabłonią. Newton zastanawiał się, czy natura siły powodującej spadanie jabłka z drzewa jest taka sama, jak natura siły powodującej ruch Księżyca wokół Ziemi. Doszedł do wniosku, że Księżyc spadłby na Ziemię tak jak jabłko, gdyby nie to, że ma prędkość w kierunku prostopadłym do kierunku działania siły. Stanowiło to rewolucję w ówczesnym rozumieniu świata. Po raz pierwszy w dziejach nauki wysunięto hipotezę, że prawa przyrody są takie same na Ziemi i w kosmosie. Stąd nazwa „prawo powszechnej grawitacji”.

Jak już wiemy, wartość siły dośrodkowej powodującej ruch ciała po okręgu wyrażamy wzorem $F_d = \frac{m \cdot v^2}{R}$, a wartość prędkości liniowej w ruchu po okręgu wynosi: $v = \frac{2\pi R}{T}$. Wykorzystując te zależności, wartość siły dośrodkowej można zapisać za pomocą równania:

$$F_d = \frac{4\pi^2 \cdot m \cdot R}{T^2}$$

Z III prawa Keplera wynika, że kwadrat okresu obiegu planety wokół Słońca jest proporcjonalny do trzeciej potęgi odległości planety od Słońca: $T^2 \sim R^3$. Wstawiając tę zależność do wyrażenia na wartość siły dośrodkowej, otrzymujemy:

$$F_d \sim \frac{1}{R^2}$$

Wynik tych rozważań jest następujący. Wartość siły działającej na planetę w ruchu dookoła Słońca jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości planety od Słońca. Jeśli odległość ciała niebieskiego od Słońca rośnie dwukrotnie, to wartość siły z jaką Słońce przyciąga to ciało maleje czterokrotnie. Z trzeciej zasady dynamiki Newtona wynika, że jeśli Słońce przyciąga planetę, to również planeta przyciąga Słońce. Siły wzajemnego oddziaływania mają te same wartości i kierunki działania, ale przeciwne zwroty. Są też przyłożone do różnych ciał.

Analizując ruch komety Halleya, Newton doszedł do wniosku, że jego rozważania są prawdziwe, a ich wyniki zgodne z obserwacjami. Kometa poruszała się po torze, który można było wyznaczyć korzystając z prawa powszechnego ciężenia.

Prawo powszechnego ciężenia

Siła wzajemnego przyciągania grawitacyjnego między dwoma ciałami jest wprost proporcjonalna do iloczynu mas tych ciał a odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości między tymi ciałami.

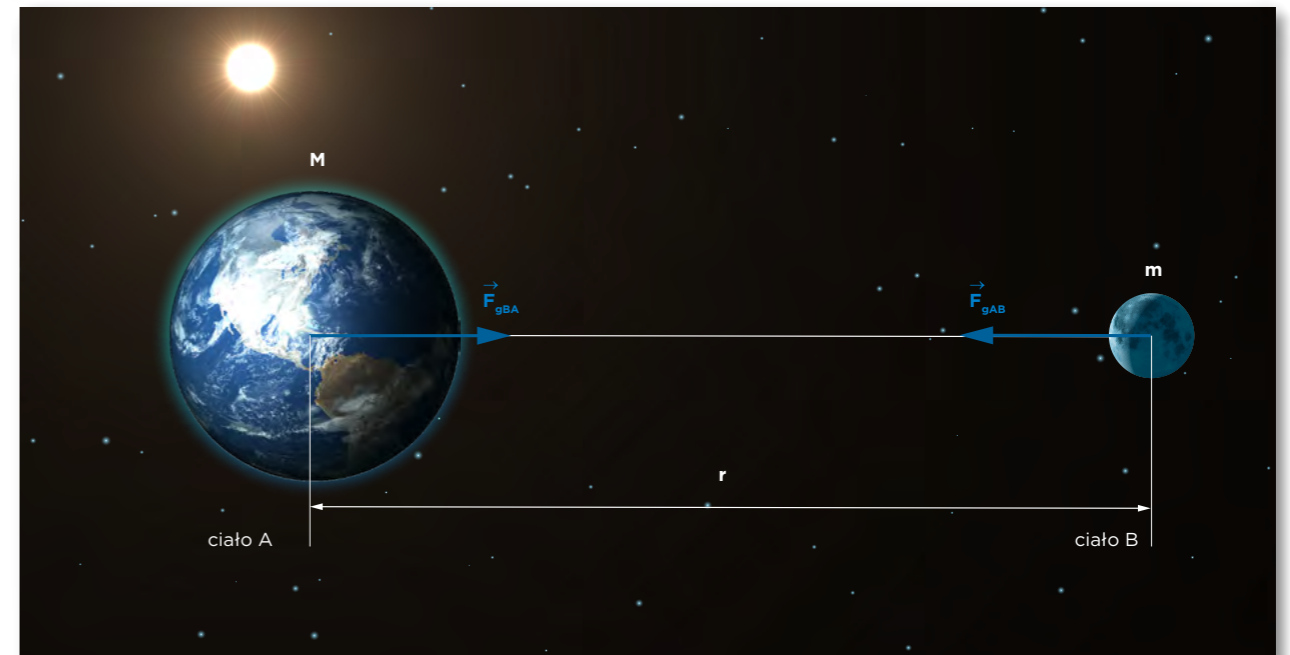
$$F_{gAB} = F_{gBA} = F_g \sim \frac{M \cdot m}{r^2}$$

Jak widać na rysunku 4.1. ciało A przyciąga ciało B pewną siłą grawitacji \vec{F}_{gAB} , ale również ciało B przyciąga ciało A siłą grawitacji \vec{F}_{gBA} . Siły mają jednakowe wartości.

Aby wartość sił wzajemnego oddziaływania grawitacyjnego między ciałami wyrazić w jednostkach siły układu SI, musimy otrzymany stosunek iloczynu mas do kwadratu odległości między masami pomnożyć przez pewną stałą. Stała ta nosi nazwę stała grawitacji i jej wartość wynosi: $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{kg^2}$.

Wartość siły oddziaływania grawitacyjnego między dwoma ciałami o symetrii sferycznej znajdującymi się w odległości dużo większej od ich rozmiarów obliczymy ze wzoru:

$$F_g = G \frac{M \cdot m}{r^2}$$



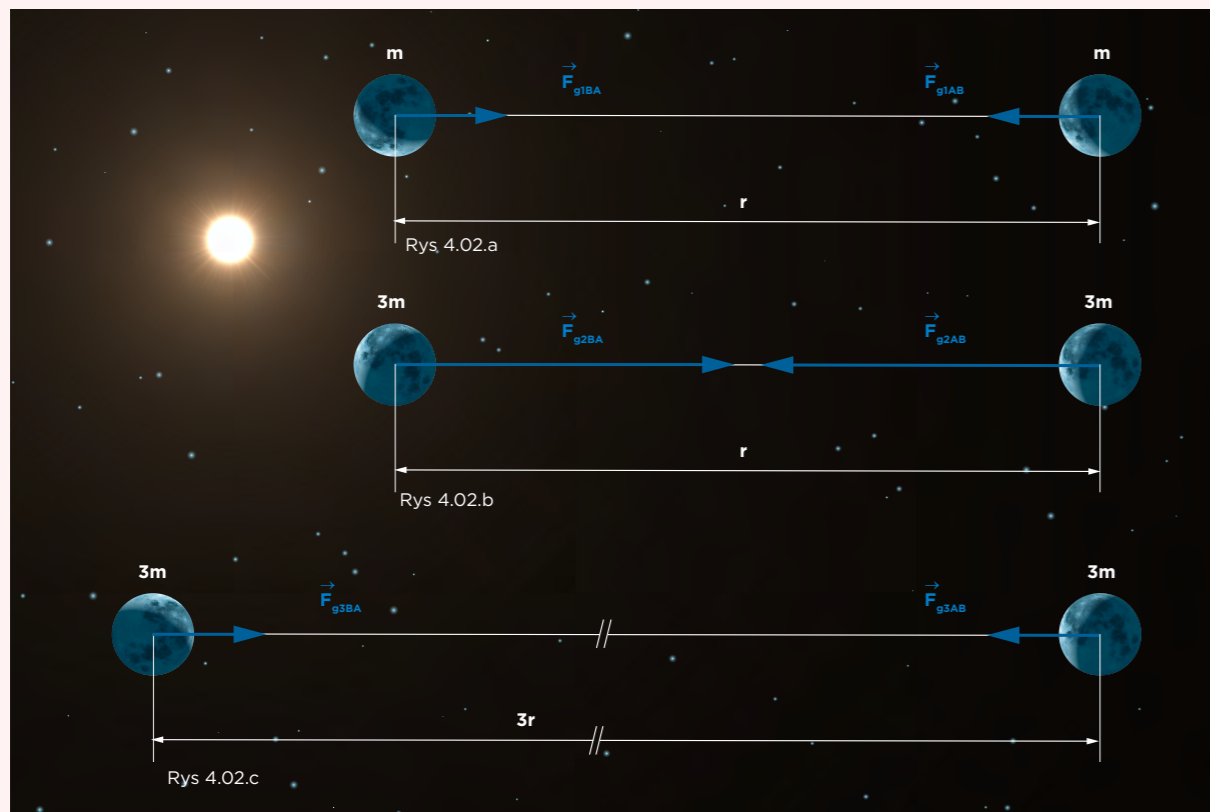
Rys. 4.1. Siły wzajemnego oddziaływania grawitacyjnego mają takie same wartości.

Przykład 1

Dwa ciała – każde o masie m – zostały umieszczone w odległości r od siebie. Ciała te przyciągają się siłami grawitacji o wartości F_g . Oblicz, jak zmieni się siła wzajemnego przyciągania grawitacyjnego, gdy w miejsce tych ciał wstawimy ciała o masach $3m$ każde. Następnie oddalimy je na odległość 3 razy większą niż początkowa.

Rozwiązanie:

Na początku ciała znajdują się w odległości r od siebie (rys. 4.2.a).



Rys. 4.2. a, b, c.

Wartość sił wzajemnego oddziaływania wynosi: $F_{g1AB} = F_{g1BA} = F_{g1} = G \frac{m \cdot m}{r^2} = G \frac{m^2}{r^2}$

Następnie w miejsce mas m wprowadzamy masy $3m$ (rys. 4.2.b).

Wartość sił wzajemnego oddziaływania wynosi: $F_{g2AB} = F_{g2BA} = F_{g2} = G \frac{3m \cdot 3m}{r^2} = G \frac{9m^2}{r^2} = 9F_{g1}$

Wartość sił wzajemnego przyciągania grawitacyjnego wzrosła dziewięciokrotnie.

Teraz odległość między ciałami rośnie trzykrotnie.

Wartość sił wzajemnego oddziaływania wynosi: $F_{g3AB} = F_{g3BA} = F_{g3} = G \frac{3m \cdot 3m}{(3r)^2} = G \frac{9m^2}{9r^2} = G \frac{m^2}{r^2} = F_{g1}$

Po zwiększeniu odległości między ciałami o masach $3m$ wartość siły maleje dziewięciokrotnie, osiągając wartość początkową.

Wzajemność oddziaływania grawitacyjnego między ciałami znacznie różniącymi się masami jest trudno potwierdzić. Skutkiem przyciągania grawitacyjnego między Słońcem a Ziemią jest ruch Ziemi dookoła Słońca. Ale niełatwo jest wykryć wpływ siły grawitacji, z jaką Ziemia działa na Słońce. O wiele prościej jest potwierdzić wzajemność oddziaływań podczas obserwacji ruchu obiektów o porównywalnych masach. Astronomowie obserwują wiele układów gwiazd podwójnych, które obiegają wspólny środek masy leżący gdzieś pomiędzy tymi gwiazdami.

Przykład 2

Oblicz wartość siły grawitacji, z jaką Ziemia przyciąga Księżyc.

Rozwiązanie:

Odległość Księżyca od Ziemi wynosi: $r = 3,84 \cdot 10^8 \text{ m}$

Masa Księżyca wynosi: $M_K = 7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg}$

Masa Ziemi wynosi: $M_Z = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

Wartość siły wzajemnego oddziaływania grawitacyjnego wynosi:

$$F_g = G \frac{M_Z \cdot M_K}{r^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \frac{5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg} \cdot 7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg}}{(3,84 \cdot 10^8 \text{ m})^2} = 1,98 \cdot 10^{20} \text{ N}$$

Odpowiedź: Siła przyciągania grawitacyjnego między Ziemią a Księżycem ma wartość $1,98 \cdot 10^{20} \text{ N}$

Gdy obliczymy wartość siły dośrodkowej powodującej ruch Księżyca wokół Ziemi korzystając z jej definicji otrzymamy wartość $1,91 \cdot 10^{20} \text{ N}$. Zbieżność tej wartości z wartością siły grawitacji w przykładzie 2 nie jest przypadkowa. To właśnie siła grawitacji jest siłą dośrodkową powodującą ruch Księżyca wokół Ziemi. Niewielkie różnice w wartościach biorą się z zastosowanych uproszczeń.

Księżyc krąży wokół Ziemi pod wpływem siły oddziaływania grawitacyjnego – tej samej, która sprawia, że jabłka spadają z drzew. Ale nie można dostrzec bezpośredniego „połączenia” między Ziemią a Księżycem, czy między Ziemią a jabłkiem. Mówimy, że oddziaływanie grawitacyjne między ciałami przenoszone jest za pomocą pola grawitacyjnego. Więcej na temat pola grawitacyjnego dowiedzie się w zakresie rozszerzonym. Teraz powinna nam wystarczyć informacja, że aby pomiędzy ciałami działały siły grawitacji, ciała te nie muszą się ze sobą stykać.

W gimnazjum definiowano ciężar ciała jako iloczyn jego masy m oraz wartości przyspieszenia ziemskiego g : $F_g = m \cdot g$

Przyspieszenie ziemskie (a na powierzchni innych planet określane jako przyspieszenie grawitacyjne) informuje o wartości przyspieszenia, z jakim porusza się dane ciało, gdy siła grawitacji jest jedyną siłą powodującą ruch tego ciała.

Wyznamy wartość przyspieszenia grawitacyjnego, gdy dana jest siła grawitacji działająca na ciało o masie m :

$$g = \frac{F_g}{m} = \frac{G \frac{Mm}{r^2}}{m}$$

Ostatecznie otrzymujemy:

$$g = G \frac{M}{r^2}$$

Ze wzoru tego można obliczyć wartości przyspieszenia swobodnego spadku nie tylko na Ziemi, ale również na innych planetach.

Przykład 1

Stalowa kula ma masę 350g. Oblicz wartość siły grawitacji działającej na tę kulę w pobliżu powierzchni Ziemi. Oblicz wartość przyspieszenia swobodnego spadku tej kuli w pobliżu powierzchni Ziemi.

Rozwiązanie:

Wartość siły grawitacji działającej na stalową kulę:

$$F_g = G \frac{M \cdot m}{R_Z^2}$$

gdzie: $M = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ – masa Ziemi, $R = 6,38 \cdot 10^6 \text{ m}$ – promień Ziemi

Podstawiając dane do wzoru, otrzymamy:

$$F_g = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2} \frac{6 \cdot 10^{24} \text{ kg} \cdot 0,35 \text{ kg}}{(6,38 \cdot 10^6 \text{ m})^2} = 3,44 \text{ N}$$

Wartość przyspieszenia swobodnego spadku kuli:

$$g = \frac{F_g}{m} = \frac{3,44 \text{ N}}{0,35 \text{ kg}} = 9,83 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Odpowiedź: Na stalową kulę działa siła grawitacji o wartości 3,44N. Wartość przyspieszenia swobodnego spadku tej kuli pod wpływem siły grawitacji wynosi 9,83m/s².

Tabela 4.1. Wartości przyspieszeń grawitacyjnych na poszczególnych planetach.

Planeta	Wartość przyspieszenia grawitacyjnego na powierzchni planety [m/s ²]	Stosunek przyspieszenia grawitacyjnego na danej planecie oraz na Ziemi
Merkury	4,39	0,45
Wenus	8,87	0,91
Ziemia	9,8	1
Mars	3,7	0,38
Jowisz	24,8	2,53
Saturn	10,4	1,06
Uran	8,87	0,91
Neptun	11,1	1,13

W tabeli przedstawiono wartości przyspieszeń grawitacyjnych na powierzchni planet Układu Słonecznego. W przypadku planet gazowych są to punkty znajdujące się w odległości równej promieniowi danej planety od jej środka. Wartość przyspieszenia grawitacyjnego na powierzchni Słońca wynosi około

$$274 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Siła grawitacji działająca na ciała na powierzchni planety jest równy iloczynowi masy ciała oraz wartości przyspieszenia grawitacyjnego. Na przykład człowiek o masie 60 kg, stojący na powierzchni ziemi, jest przyciągany przez nią siłą o wartości około 588 N. Gdyby umieścić ciało o takiej masie na Słońcu, byłoby ono przyciągane siłą o wartości 16440 N. Ziemia przyciąga siłą o takiej wartości ciało o masie prawie 1,7 tony znajdujące się na jej powierzchni. Przypominamy, że w naszych rozważaniach nie uwzględniamy ruchu wirowego planety.

Podsumowanie:

Wiemy już, że prawa fizyki obowiązujące na Ziemi obowiązują również w kosmosie.

Wartość siły wzajemnego przyciągania grawitacyjnego między ciałami jest wprost proporcjonalna do wartości mas tych ciał, a odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości między tymi ciałami.

$$F_g \sim \frac{M \cdot m}{r^2}$$

Aby utrwalić zdobyte wiadomości można zapoznać się z symulacją nr 1

Temat 5

Ruch ciał w polu grawitacyjnym

Wstęp

Jeśli zapytasz się przechodnia na ulicy, dlaczego na stacji orbitalnej panuje stan nieważkości, usłyszysz coś o braku grawitacji, próżni, itp. Udowodnimy, że przyczyną stanu nieważkości wewnątrz stacji kosmicznej jest grawitacja, a nie jej brak! Wyjaśnimy, co spadająca butelka z wodą ma wspólnego ze stacją kosmiczną. Zastanowimy się nad przyczynami stanu nieważkości. Omówimy warunki, jakie muszą być spełnione, aby można było okrążyć Ziemię poruszając się pojazdem bez napędu. Obliczymy jak daleko od środka Ziemi znajdują się satelity nadające programy telewizyjne i wyjaśnimy, dlaczego muszą one krążyć nad równikiem.



Rys. 5.1. Waga mierzy wartość siły, z jaką twoje stopy na nią naciskają.

Gdy stoisz na wadze łazienkowej ustawionej na poziomej podłodze, naciskasz na nią siłą równą swojemu ciężarowi (rys. 5.1.). Waga łazienkowa mierzy wartość siły, z jaką twoje stopy na nią naciskają. Ale na wyświetlaczu tej wagi pojawia się wynik podany w kilogramach, czyli w jednostkach masy. Ciężar ciała jest proporcjonalny do masy tego ciała, więc mierząc wartość ciężaru, możemy od razu podawać wartość jego masy. Taki stan wzajemnego oddziaływania człowieka i wagi można nazwać **stanem ważkości**. Wartość siły nacisku ciała na powierzchnię wagi jest równa wartości siły przyciągania grawitacyjnego (gdy zaniedba się wpływ ruchu wirowego Ziemi). Wartość tej siły obliczamy ze wzoru: $F_g = m \cdot g$ gdzie: g – wartość przyspieszenia grawitacyjnego. Gdy zmienia się wartość przyspieszenia grawitacyjnego, to zmienia się wartość siły grawitacji.

Gdybyśmy jednak przenieśli tę wagę na pokład Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS) i postawili na niej astronautę, to wynik wskazań wagi byłby równy zero. Pasażer stacji kosmicznej nie naciska na wagę. Jest to **stan nieważkości**. Polega on na tym, że ciało nie naciska na podłoże, na którym się znajduje. Stan nieważkości panuje we wszystkich pojazdach kosmicznych poruszających się w kosmosie wyłącznie pod wpływem sił grawitacji. Oto link do filmu ze strony Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA) przedstawiającego warunki na pokładzie Międzynarodowej Stacji Kosmicznej:

http://spaceinvideos.esa.int/Videos/2013/09/Luca_s_Expedition_36_highlights

Teraz obalmy mit o braku grawitacji w takiej odległości od Ziemi, w jakiej krąży wokół niej Międzynarodowa Stacja Kosmiczna (International Space Station ISS), w odległości około 340 km nad powierzchnią naszej planety.

Przykład 1

Oblicz wartość przyspieszenia grawitacyjnego w odległości 340 km od powierzchni Ziemi. Porównaj otrzymany wynik z wartością przyspieszenia grawitacyjnego na powierzchni Ziemi. Promień Ziemi $R = 6,38 \cdot 10^6 m$, masa Ziemi: $M = 6 \cdot 10^{24} kg$.

Rozwiązanie:

Wartość przyspieszenia grawitacyjnego obliczamy ze wzoru: $a_g = \frac{F_g}{m}$ gdzie: F_g – wartość siły grawitacji na orbicie okołozemskiej.

$$F_g = G \frac{M_z \cdot m}{r^2}$$

Wstawmy ten wzór do wzoru na wartość przyspieszenia grawitacyjnego:

$$a_g = \frac{G \frac{M_z \cdot m}{r^2}}{m} = G \frac{M_z}{r^2}$$

Odległość stacji orbitalnej od środka Ziemi: $r = 6,38 \cdot 10^6 m + 0,34 \cdot 10^6 m = 6,72 \cdot 10^6 m$

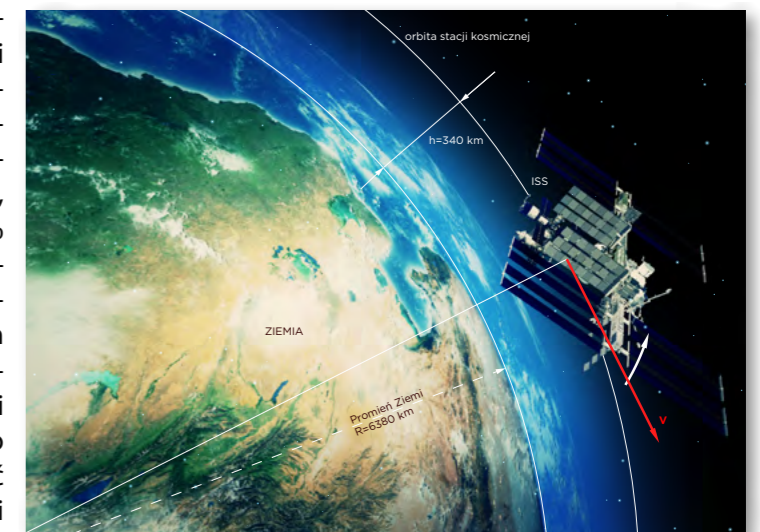
Wstawiając dane do wzoru na wartość przyspieszenia grawitacyjnego otrzymujemy:

$$a_g = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2} \frac{6 \cdot 10^{24} kg}{(6,72 \cdot 10^6 m)^2} = 8,86 \frac{m}{s^2}$$

Wartość przyspieszenia grawitacyjnego na powierzchni Ziemi wynosi $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$.

Odpowiedź: Wartość przyspieszenia grawitacyjnego w odległości równej promieniowi orbity Międzynarodowej Stacji Kosmicznej wynosi około 90% wartości przyspieszenia grawitacyjnego na powierzchni Ziemi.

Wynik tych obliczeń powinien przekonać wszystkich, że to nie brak grawitacji jest przyczyną stanu nieważkości na pokładzie Międzynarodowej Stacji Kosmicznej. Przeciwnie wartość siły grawitacji działającej na ciało o tej samej masie na orbicie, po której krąży ta stacja jest tylko 10% mniejsza niż na powierzchni Ziemi. Porównajmy promień orbity, po której porusza się stacja kosmiczna, z promieniem Ziemi (rys. 5.2.). Jak widać na rysunku odległość stacji kosmicznej od powierzchni Ziemi jest naprawdę niewielka. Tak blisko Ziemi pole grawitacyjne nie może być bliskie zero. Księżyc krąży wokół Ziemi po orbicie o promieniu około 380 tys. km w polu grawitacyjnym Ziemi, co jest najlepszym dowodem na to, że pole grawitacyjne nie zanika w niewielkiej odległości od Ziemi. Przyczyną stanu nieważkości na międzynarodowej stacji kosmicznej nie jest więc brak grawitacji! Jest wręcz przeciwnie. Przyczyną stanu nieważkości może być właśnie oddziaływanie grawitacyjne. Przeprowadźmy proste doświadczenie.



Rys. 5.2. Porównanie promienia Ziemi z promieniem orbity Międzynarodowej Stacji Kosmicznej ISS.

Patrz. Doświadczenie 2. Badanie spadku ciał

Warto zobaczyć stan nieważkości osiągnięty w sali lekcyjnej: film – Doświadczenie 2

Stan nieważkości pojawia się w pojeździe, który porusza się wyłącznie pod wpływem sił grawitacji. Wówczas wartości natężenia pola grawitacyjnego oraz przyspieszenia wywołanego tym polem są jednakowe. Oznacza to, że przyczyną stanu nieważkości występującego na pokładzie Międzynarodowej Stacji Kosmicznej jest działanie ziemskiego pola grawitacyjnego. Stan nieważkości pojawia się w każdym pojeździe kosmicznym po wyjściu z atmosfery oraz po ustaniu pracy silników tego pojazdu, gdy jedyną siłą działającą na pojazd jest siła grawitacji. W warunkach ziemskich symulacje stanu nieważkości osiąga się w samolotach, które poruszają się po specjalnej trajektorii – takiej, aby przyspieszenie samolotu miało kierunek i zwrot zgodny z kierunkiem i zwrotem przyspieszenia ziemskiego.

Loty kosmiczne

Historia lotów kosmicznych sięga w zasadzie czasów Izaaka Newtona. W roku 1728 Newton opublikował książkę, w której opisał eksperyment myślowy z ruchem satelitów wokół Ziemi. Wyobraźmy sobie, że na Ziemi jest bardzo wysoka góra, na której ustawiamy armatę (rys. 5.4). Z armaty tej wystrzelono pocisk z prędkością początkową skierowaną poziomo (to znaczy prostopadle do kierunku promienia Ziemi). Wartość prędkości początkowej była taka, że pocisk doleciał do punktu D. Gdy zwiększono wartość prędkości początkowej, pocisk doleciał do punktu E. Po kolejnym zwiększeniu wartości prędkości początkowej pocisk dolatuje do punktu F, itd. Oczywiście cały czas zakładamy, że ruch pocisku odbywa się bez oporów powietrza. Możemy wyobrazić sobie, że istnieje taka wartość prędkości, z którą należy wystrzelić pocisk z armaty, aby okrążył on Ziemię po okręgu i uderzył w tę armatę od tyłu.

Wyjaśnijmy, dlaczego jest to możliwe. Podczas lotu pocisku działa na niego siła przyciągania grawitacyjnego (rys. 5.5). Siła grawitacji, która powoduje zakrzywienie toru lotu pocisku, jest w tym przypadku siłą dośrodkową. Przyrównajmy wzory na wartości sił grawitacji oraz dośrodkowej:

$$F_g = F_d$$

Pamiętamy, że wartość siły grawitacji działającej na pocisk opisujemy wzorem: $F_g = G \frac{M \cdot m_p}{r^2}$, zaś

wartość siły dośrodkowej opisujemy wzorem: $F_d = \frac{m_p v^2}{r}$, gdzie r – promień okręgu, po którym porusza się pocisk, m_p – masa pocisku.

Przyrównując do siebie wyrażenia na wartości sił, otrzymujemy:

$$G \frac{M \cdot m_p}{r^2} = \frac{m_p v^2}{r}$$

Dzieląc obie strony równania przez m_p oraz mnożąc przez r , otrzymamy:

$$G \frac{M}{r} = v^2$$

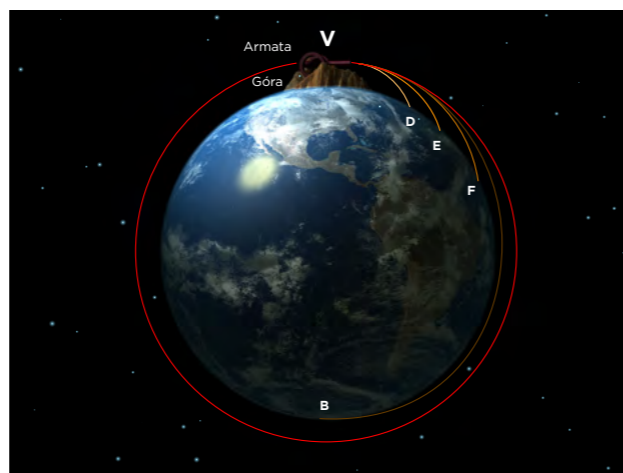
Stąd wartość prędkości, z jaką porusza się pocisk w ruchu po okręgu wokół Ziemi, opisuje równanie:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

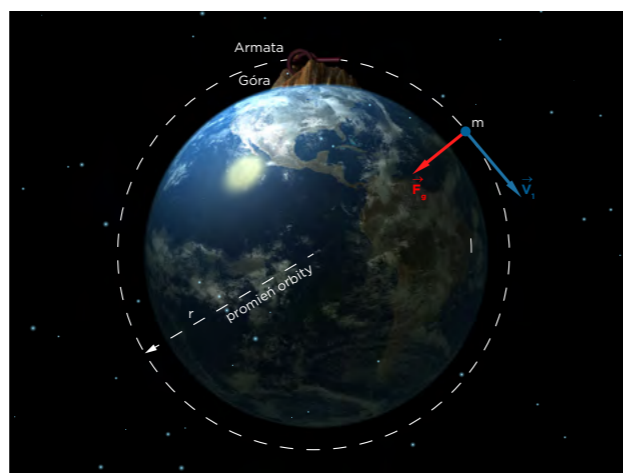
Wartość prędkości, z jaką porusza się satelita wokół planety, po okręgu o jak najmniejszym promieniu nazywamy pierwszą prędkością kosmiczną. Wartość tej prędkości:

$$v_I = \sqrt{\frac{GM}{R}}$$

gdzie: M – masa planety, R – promień planety



Rys. 5.4. Góra Newtona.



Rys. 5.5. Pierwsza prędkość kosmiczna dla orbity okołoziemskiej.

Najczęściej planety posiadają atmosferę, więc promień najmniejszej orbity musi być nieco większy od promienia planety.

Przykład 1

Oblicz wartość pierwszej prędkości kosmicznej dla Ziemi. Porównaj otrzymany wynik z wartością prędkości, z jaką porusza się Międzynarodowa Stacja Kosmiczna.

Rozwiązanie:

Masa Ziemi wynosi $M = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$, promień Ziemi wynosi: $R = 6,38 \cdot 10^6 \text{ m}$

Wstawiając te dane do wzoru na wartość I prędkości kosmicznej, otrzymamy:

$$v_I = \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2} \cdot 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{6,38 \cdot 10^6 \text{ m}}} = 7,91 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 7,91 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Stacja kosmiczna porusza się po orbicie o promieniu $r = 6,38 \cdot 10^6 \text{ m} + 0,34 \cdot 10^6 \text{ m} = 6,72 \cdot 10^6 \text{ m}$

Wartość I prędkości kosmicznej dla stacji kosmicznej:

$$v_{IST} = \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2} \cdot 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}}{6,72 \cdot 10^6 \text{ m}}} = 7,70 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 7,7 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Odpowiedź: Wartość I prędkości kosmicznej dla Ziemi wynosi 7,91 km/s. Wartość prędkości Międzynarodowej Stacji Kosmicznej wynosi 7,7 km/s.

Ten wynik świadczy o tym, że im dłuższy jest promień orbity satelity, tym mniejsza jest wartość prędkości, z jaką się on porusza.

Jak okres obiegu wokół planety zależy od promienia orbity kołowej. Siłą powodującą ruch satelity wokół planety jest siła grawitacji. W tym przypadku jest ona siłą dośrodkową. Możemy więc przyrównać wartości sił grawitacji i dośrodkowej:

$$G \frac{M \cdot m_s}{r^2} = \frac{m_s v^2}{r}$$

Z równania tego wyznaczamy wartość prędkości:

$$G \frac{M}{r} = v^2$$

Przypominamy, że wartość prędkości w ruchu jednostajnym po okręgu określa zależność:

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

Łącząc ze sobą dwa ostatnie wyrażenia, otrzymujemy:

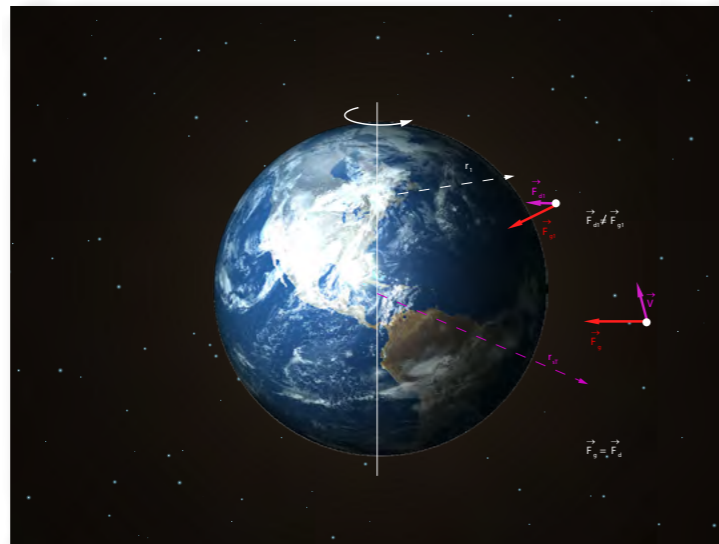
$$G \frac{M}{r} = \frac{4\pi^2 r^2}{T^2}$$

Z ostatniego równania wyznaczamy wartość okresu obiegu:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} r^3$$

Z powyższego wzoru wynika, że kwadrat okresu obiegu satelity wokół planety jest proporcjonalny do trzeciej potęgi odległości tego satelity od środka planety.

Otrzymana zależność jest zgodna z III prawem Keplera. Z zależności między okresem obiegu satelity wokół planety a odległości od tej planety wynika, że im większa jest odległość satelity od planety, tym czas obiegu jest dłuższy. I tak jest w rzeczywistości. Międzynarodowa Stacja Kosmiczna krążąca wokół Ziemi po orbicie o promieniu 6720 km potrzebuje około 92 minuty na jeden obieg wokół Ziemi. Satelita telekomunikacyjny nadający sygnał telewizyjny, krążący po orbicie o promieniu 42 tys. km potrzebuje 24 godzin na jeden obieg Ziemi.



Rys. 5.6. Orbita stacjonarna.

Wokół Ziemi krążą wiele satelitów, które służą do obserwacji Ziemi (w tym satelity meteorologiczne i szpiegowskie) oraz inne pełniące role użytkowe. Na przykład satelity systemu GPS służącego do precyzyjnego wyznaczania pozycji na powierzchni Ziemi (tak zwana nawigacja satelitarna). Przyjemność oglądania programów telewizji satelitarnej zapewniają satelity telekomunikacyjne, krążące wokół Ziemi po orbicie stacjonarnej. **Satelita stacjonarny to satelita, który znajduje się ciągle nad tym samym punktem na powierzchni Ziemi.** Orbita stacjonarna leży wyłącznie w płaszczyźnie równika ziemskiego (rys. 5.6.). Wszystkie satelity krążą wokół Ziemi pod wpływem jej pola grawitacyjnego. Siła przyciągania grawitacyjnego jest siłą powodującą ruch satelitów wokół Ziemi (żaden pojazd kosmiczny nie jest wyposażony w ciągle działający napęd). Ziemia potrzebuje 24 godzin na wykonanie jednego obrotu wokół swojej osi. Aby satelita mógł być nieruchomy względem punktu na powierzchni Ziemi, na wykonanie jednego pełnego obiegu wokół naszej planety również potrzebuje 24 godzin. Tylko w przypadku umieszczenia satelity w płaszczyźnie równika, w odpowiedniej odległości, jest to możliwe.

Przykład 2

Oblicz wartość promienia orbity stacjonarnej satelity krążącego wokół Ziemi.

Rozwiązanie:

Ruch satelity odbywa się pod wpływem siły grawitacji, która w tym przypadku jest siłą dośrodkową. Możemy wykorzystać poznaną wcześniej zależność:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} r^3$$

Z tego równania wyznaczamy promień orbity stacjonarnej:

$$r = \sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}}$$

Wyrażenie to jest prawdziwe dla każdej planety.

Podstawiając do wzoru dane dotyczące Ziemi, otrzymujemy:

$$r = \sqrt[3]{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2} \cdot 5,98 \cdot 10^{24} kg \cdot (24 \cdot 3600s)^2}{4\pi^2}} = 42,25tys.km.$$

Odpowiedź: Promień orbity stacjonarnej wokół Ziemi wynosi prawie 42,3 tys. km.

Podsumowanie:

Stan nieważkości osiąga się w pojazdach poruszających się z przyspieszeniem, które jest wywołane wyłącznie siłą grawitacji.

Stan nieważkości występuje na przykład w statku kosmicznym po wyjściu poza atmosferę i ustaniu pracy jego silników.

Aby bez napędu okrążyć planetę po okręgu należy, rozpędzić się do I prędkości kosmicznej. Wartość tej prędkości obliczamy ze wzoru:

$$v_I = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

Im większy jest promień okręgu, po którym satelita porusza się wokół Ziemi, tym dłuższy jest okres jego obiegu.

Przyjemność oglądania telewizji satelitarnej zapewniają nam satelity stacjonarne, które krążąc nad równikiem, pozostają w spoczynku względem punktów na powierzchni Ziemi.

Temat 6

Budowa i ewolucja Wszechświata

Wstęp

Omówimy krótko obserwowaną strukturę Wszechświata a następnie wyniki obserwacji, które przyczyniły się do zrozumienia budowy i ewolucji Wszechświata.

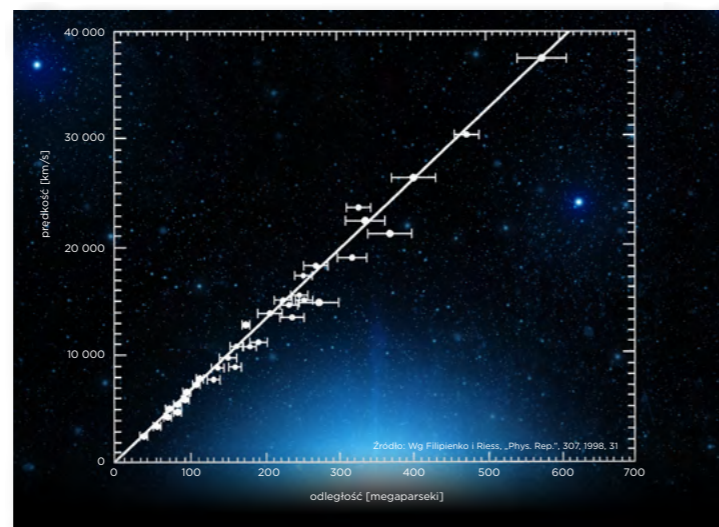
Jeszcze sto lat temu nasze wyobrażenie o Wszechświecie ograniczało się w zasadzie do naszej Galaktyki. Jednak obserwacje prowadzone przez Edwina Powella Hubble'a rozszerzyły horyzonty obserwowanego świata. Za pomocą teleskopu zainstalowanego na górze Mount Wilson niedaleko Los Angeles w Kalifornii E. Hubble odkrył, że niektóre z obiektów mgławicowych nie stanowią części naszej galaktyki lecz są odrębnymi galaktykami. Odkrycie to zostało opublikowane w roku 1924. W następnych latach Hubble kontynuował obserwacje galaktyk. Światło od nich pochodzące kierował na spektrograf i badał widma ich świecenia. Widma galaktyk otrzymuje się w podobny sposób jak widma gwiazd. Hubble odkrył, że widma galaktyk są przesunięte względem widm otrzymywanych na Ziemi. Co to znaczy? Wyjaśnijmy to na przykładzie. Gdy stoimy obok ruchliwej szosy i słuchamy dźwięków emitowanych przez mijające nas samochody, to słyszymy charakterystyczne obniżenie częstotliwości odbieranego sygnału w momencie przejeżdżania auta. Zjawisko to nazywamy **efektem Dopplera**. Gdy źródło dźwięku zbliża się do obserwatora, to częstotliwość odbieranego sygnału jest większa od częstotliwości emitowanej przez źródło. Gdy źródło dźwięku oddala się od obserwatora, to odbierany sygnał ma mniejszą częstotliwość niż wysłany. Podobnie jest z falami elektromagnetycznymi. Gdy źródło sygnału oddala się od obserwatora, odbiera on sygnał o częstotliwości mniejszej, niż sygnał wysłany ze źródła. Długość odebranej fali jest w tym przypadku większa, niż długość fali wysłanej. Gdy źródło sygnału zbliża się do obserwatora, to długość fali odebranego sygnału jest mniejsza niż długość fali sygnału wysłanego. Ścisłe rzecz biorąc o przesunięciu widm galaktyk nie decyduje taki sam mechanizm, jaki powoduje zmianę częstotliwości dźwięku emitowanego przez poruszające się źródło. Jednak na naszym poziomie rozważań pozostaniemy przy tej analogii.

A skąd wiadomo jaka była częstotliwość sygnału wysłanego? Zakładamy, że w innych galaktykach znajdują się te same pierwiastki, co w naszej Galaktyce. Każdy pierwiastek ma charakterystyczne dla siebie widmo. Wystarczy więc porównać widmo otrzymane w laboratorium z widmem uzyskanym w wyniku obserwacji galaktyk, aby odkryć ewentualne różnice. Okazało się, że widma odległych galaktyk są przesunięte w kierunku fal czerwonych. To znaczy, że obserwowana długość fali jest większa od emitowanej przez źródło. Wynika z tego jasny wniosek: galaktyki się od nas oddalają. Z wartości przesunięcia widm można wyznaczyć prędkości oddalającej się galaktyki.

Ale skąd wiadomo jak daleko od nas znajduje się dana galaktyka? Obecnie najpopularniejszym sposobem wyznaczania odległości od galaktyk jest obserwacja wybuchów supernowych. Odkryto, że pewien rodzaj supernowych podczas wybuchu emituje zawsze taką samą ilość promieniowania. Wiedząc, że ilość promieniowania z danego źródła maleje z kwadratem odległości można wyznaczyć odległość źródła od Ziemi. Gdy dane obserwacyjne naniesiono na wykres (rys. 6.1.), to okazało się, że im dalej leży dana galaktyka, tym większa jest prędkość jej ucieczki. Odkryte prawo nosi nazwę **prawa Hubble'a**:

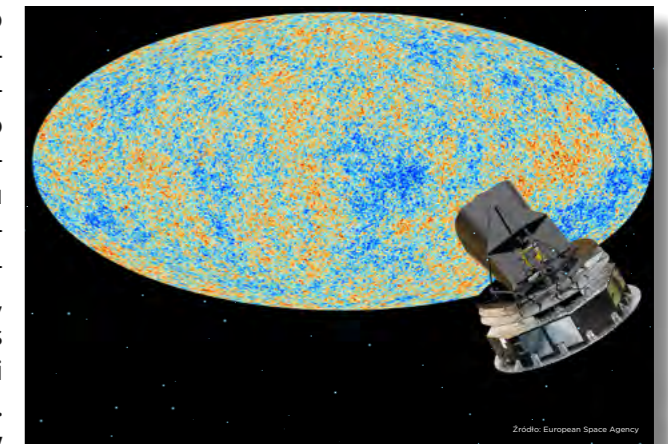
$$v = H \cdot r$$

gdzie: r – odległość galaktyki od Ziemi
H – stała Hubble'a

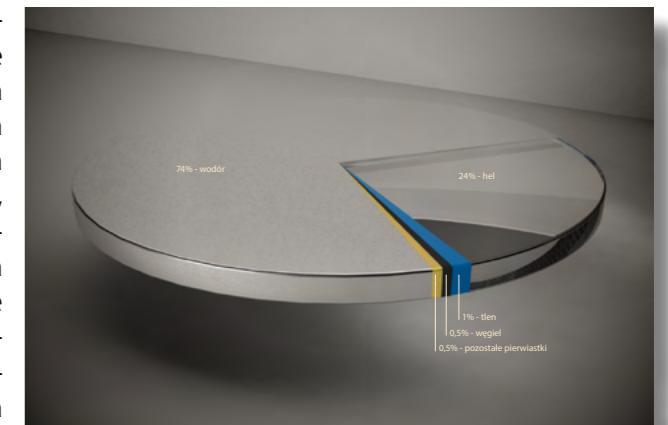


Rys. 6.1. Zależność prędkości oddalania się galaktyk w zależności od odległości od tej galaktyki.

Kolejne ważne dla kosmologii odkrycie zostało dokonane właściwie przez przypadek. W 1964 Arno Penzias oraz Robert W. Wilson, amerykańscy uczeni, rozpoczęli obserwacje radiowego promieniowania Drogi Mlecznej oraz pozostałości po wybuchach supernowych. Po rozpoczęciu obserwacji badacze zorientowali się, że ich aparatura, niezależnie od kierunku ustawienia anteny, rejestruje jednostajny szum. Rok później, po konsultacjach z fizykami teoretykami, Penzias i Wilson opublikowali pracę, w której informowali o odkryciu mikrofalowego promieniowania tła. W następnych latach dokonano wielu pomiarów tego promieniowania tła i z bardzo dużą dokładnością ustalono, że jego rozkład widmowy odpowiada krzywej teoretycznej rozkładu promieniowania ciała doskonale czarnego o temperaturze 2,726 K. Przyjmuje się, że taka jest temperatura Wszechświata. Promieniowanie mikrofalowe tła powstało tuż po Wielkim Wybuchu. Żeby można było wyjaśnić powstawanie układów galaktyk, powinno się obserwować drobne niejednorodności tego promieniowania. W celu wyznaczenia tych niejednorodności umieszczono w kosmosie sondy do badania promieniowania tła. W kolejności umieszczania orbicie były to: COBE, która pracowała w latach 1989 – 1993, oraz WMAP, która pracowała w latach 2001 – 2010. Obecnie w kosmosie znajduje się sonda Planck, która kontynuuje obserwacje promieniowania tła. Jak widać na rysunku 6.2., na tle jednorodnego szumu pochodzącego ze wszystkich stron kosmosu pojawiają się drobne niejednorodności. Intensywne promieniowanie na środku obrazu to promieniowanie emitowane przez naszą Galaktykę.

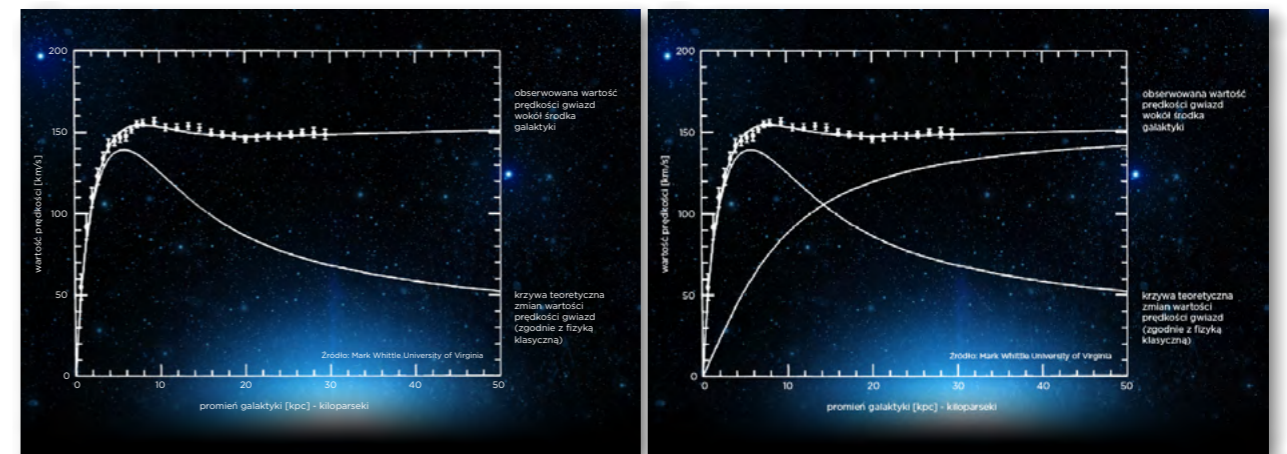


Rys. 6.2. Mikrofalowe promieniowanie tła zarejestrowane przez teleskop Planck.



Rys. 6.3. Skład chemiczny Wszechświata.

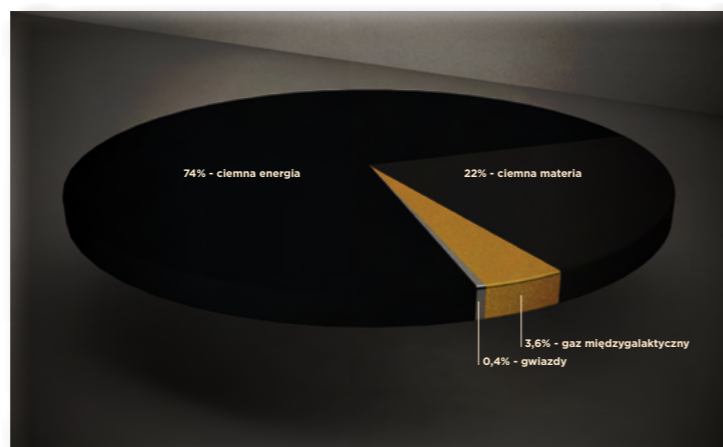
Analizując promieniowanie elektromagnetyczne dochodzące w pobliżu Ziemi na różnych długościach fal oraz widmo tego promieniowania, astrofizycy oszacowali skład chemiczny Wszechświata. Według tych szacunków wodór stanowi około 74% materii Wszechświata, hel 24% a pozostałe pierwiastki pozostałe 2% (rys. 6.3.).



Rys. 6.4. Zależność wartości prędkości gwiazd w ruchu wokół centrum galaktyki w zależności od środka galaktyki.

Korzystając z metod służących do wyznaczenia wartości prędkości galaktyk, można wyznaczyć wartość prędkości gwiazd poruszających się wokół jądra galaktyki. Analizuje się widmo gwiazdy, wyznacza się wartość przesunięcia widmowego i na tej podstawie szacuje się wartość prędkości gwiazdy w ruchu dookoła środka galaktyki, oczywiście przy uwzględnieniu ruchu galaktyki jako całości. Okazało się, że wartości tych prędkości nie są zgodne z przewidywaniami teoretycznymi (rys. 6.4.).

Przy uwzględnieniu rozkładu masy zawartej w galaktyce, wartości prędkości gwiazd powinny się układać wzdłuż krzywej A. Obserwacje dowodzą, że układają się one wzdłuż krzywej B. Oznacza to, że galaktyki zawierają zbyt mało masy, aby utrzymać gwiazdy w ruchu dookoła ich środków. Obecnie najbardziej popularnym sposobem wyjaśnienia tego problemu jest przyjęcie hipotezy **ciemnej materii** (stanowiłaby ona brakującą masę galaktyki). Ciemna materia to składnik złożonych obiektów we Wszechświecie, o którego obecności świadczy wyłącznie grawitacja. Ciemna materia nie emituje promieniowania. Najprawdopodobniej ma postać słabo oddziaływujących cząstek elementarnych o różnej od zera masie spoczynkowej. Obecnie są prowadzone badania mające na celu znalezienie tych cząstek. Ciemna materia występuje w całym Wszechświecie i ma istotny wpływ na jego ewolucję. Na rysunku 6.5. przedstawiono schematyczny rozkład procentowy składników Wszechświata.



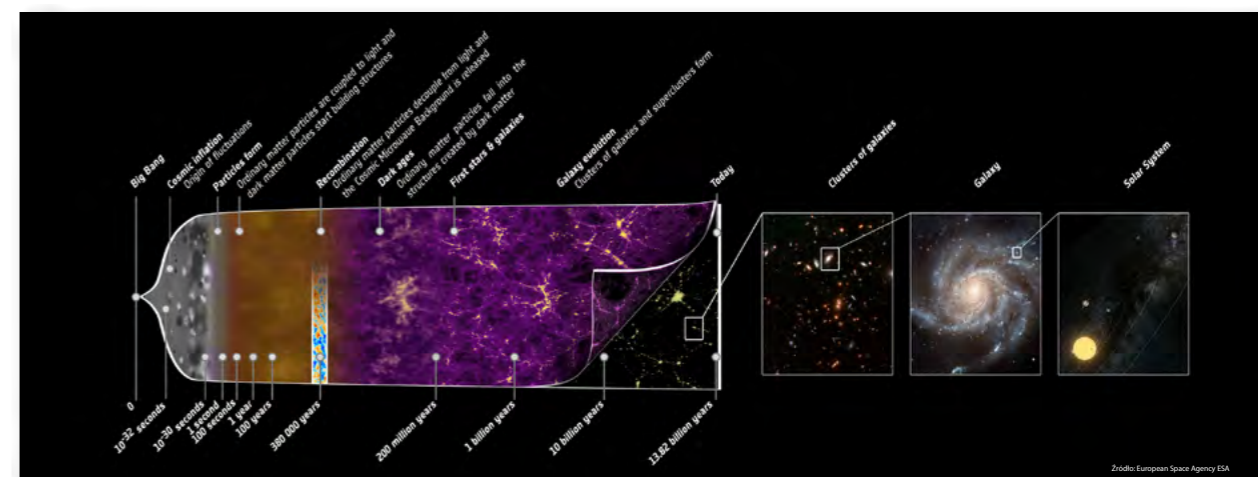
Rys. 6.5. Hipotetyczny skład Wszechświata.

Prawo Hubble'a mówi nam, że Wszechświat się rozszerza. Ale jakie jest tempo tej ekspansji? Z prostego modelu grawitacji wynika, że wystrzelony z orbity okołoziemskiej, w kierunku zewnętrznych planet, satelita porusza się ruchem opóźnionym. Przyciągająca siła grawitacji powoduje spowalnianie jego ruchu. Spodziewano się, że podobny efekt powinno obserwować w skali całego Wszechświata. Po początkowym szybkim rozszerzaniu się, tempo ekspansji powinno spadać. Do wyznaczenia tempa rozszerzania się Wszechświata użyto pewnego typu supernowych, których wybuchy różnią się nieznacznie błyskiem. Można je więc traktować jako swoisty wzorzec odległości od galaktyki, w której wybuchły. W typowej galaktyce wybuch takiej supernowej zdarza się raz na 300 lat. Należy więc obserwować jak największą liczbę galaktyk, szukać supernowych, a następnie – analizując ilość światła docierającego do Ziemi – wyznaczyć odległość od galaktyki. Badając widmo galaktyki, wyznaczamy wartość jej prędkości oddalania się. Okazało się, że zamiast spowolnienia tempa ekspansji, obserwuje się jego wzrost. Wszechświat rozszerza się coraz szybciej. Tak jakby rozpychała go jakaś tajemnicza siła. Aby wyjaśnić ten fakt, wprowadzono do kosmologii nowy czynnik – ciemną energię. **Ciemna energia** to hipotetyczna forma energii, która wypełniając całą przestrzeń, powoduje jej rozpychanie. Oszacowano, że ciemna energia stanowi 74% całego Wszechświata. Na razie nic więcej nie wiadomo na jej temat.

Model Wielkiego Wybuchu

Najlepszym modelem opisującym powstanie oraz rozwój naszego Wszechświata jest Model Wielkiego Wybuchu (Big Bang). Naukowcy zajmujący się początkami Wszechświata nie są pewni, jak wyglądał jego początek. Ciągłe trwają prace nad udoskonaleniem tego modelu. Odpowiedzi na pytania dotyczące początków Wszechświata nie szuka się w obserwacjach astronomicznych, ale w wielkich akceleratorach i zderzaczach cząstek elementarnych. Ale nawet tam, gdzie cząstkom elementarnym nadaje się ogromne energie, nie udało się odtworzyć warunków panujących w początkach Wszechświata. Szacuje się, że powstał on 13,7 mld lat temu. Schemat ewolucji Wszechświata przedstawiono na rysunku 6.6.

Od chwili „zero” do czasu 10^{-43} s trwała tak zwana era Planka. Nie udało się dotąd stworzyć teorii, która by opisywała, co się wówczas działo. Następną była era wielkiej unifikacji, która trwała do czasu 10^{-35} s. W tym czasie materia i energia były nierozróżnialne, a oddziaływania silne, słabe oraz elektromagne-



Rys. 6.5. Schemat ewolucji Wszechświata.

tyczne były jedynym oddziaływaniem. Potem nastąpiła era inflacji. W czasie od 10^{-35} do 10^{-32} s Wszechświat zwiększył swoje rozmiary od 10^{-26} m do 10m, czyli od rozmiarów miliarda razy mniejszych od protonu urosł do rozmiarów wagonu kolejowego. Od 10^{-32} s do 10^{-9} trwała era kwarkowa. Oddziaływanie silne oddzieliło się od oddziaływań słabego i elektromagnetycznego. Wszechświat składał się z mieszanki cząstek materii i antymaterii. Początkowo ilość materii i antymaterii była we Wszechświecie jednokowa. Potem w wyniku fluktuacji kwantowych na każdy miliard antykwarków pojawiał się miliard i jeden kwark. Doświadczenia przeprowadzane przez naukowców zajmujących się fizyką cząstek elementarnych dowodzą, że własności cząstek nie są idealnym odbiciem własności antycząstek. Jednak nie wiadomo dokładnie, jaki był mechanizm powstania nadwyżki materii nad antymaterią. Sądzi się, że w czasie trwania ery kwarkowej powstały również cząstki ciemnej materii. Pod koniec ery kwarkowej rozmiary Wszechświata osiągnęły miliard kilometrów. W czasie od 10^{-9} s do 10^{-6} s następuje oddzielenie oddziaływania słabego i elektromagnetycznego i od tej pory do chwili obecnej w przyrodzie występują cztery podstawowe oddziaływania: grawitacyjne, elektromagnetyczne, słabe i silne.

Po czasie 10^{-6} s powstają protony i neutrony. Następuje dalszy wzrost rozmiarów Wszechświata i spadek jego temperatury. Po czasie 1s od jego początku, w chwili gdy jego rozmiary zwiększyły się do biliona kilometrów, a temperatura spadła do 10 miliardów kelwinów rozpoczęła się era nukleosyntezy. Część z powstałych chwilę wcześniej neutronów zaczęła się rozpadać, a część – łączyć się z protonami tworząc jądra deuteru. Następnie zaczęły się tworzyć jądra helu ^3He , a potem helu ^4He . W pierwotnych reakcjach syntezy zużyte zostały wszystkie neutrony. Szacuje się, że podczas tej pierwotnej nukleosyntezy powstało 98% helu obecnie występującego w kosmosie, a także pewna ilość litu. Czas pierwotnej nukleosyntezy skończył się około 200 s po początku, gdy temperatura spadła do 100 milionów kelwinów.

W tym czasie materia Wszechświata składała się głównie z elektronów, protonów, jąder helu. Nieustannie zderzała się z fotonami, co sprawiało, że ówczesny Wszechświat był nieprzeźroczysty. Niektórzy kosmolodzy nazywają czas do 300 tys. lat od początku Wszechświata erą ciemności. W 300 000 lat po początku temperatura Wszechświata spada do 3000 K, a jego rozmiary rosną do 100 milionów lat świetlnych. W tych warunkach protony oraz jądra helu zaczynają wychwytywać elektrony, powstają pierwsze atomy, a Wszechświat staje się przeźroczysty dla promieniowania. Uwolnione wówczas fotony są obecnie rejestrowane jako mikrofalowe promieniowanie tła.

W 100 milionów lat po Wielkim Wybuchu powstają pierwsze gwiazdy, a 1 miliard po chwili początkowej tworzą się pierwsze galaktyki. Galaktyki te obecnie rejestruje się jako obiekty o największym obserwowanym przesunięciu ku czerwieni. 9 miliardów lat po Wielkim Wybuchu powstaje Układ Słoneczny. 10 mld lat po chwili początkowej ciemna energia zaczyna powodować wzrost tempa ekspansji Wszechświata.

Taki jest stan wiedzy u progu drugiej dekady XXI wieku. Co czeka nasz Wszechświat w przyszłości nie wiadomo. Przez ostatnie 100 lat ludzkość bardzo rozszerzyła swoją wiedzę na temat kosmosu. Jeszcze 100 lat temu byliśmy przekonani, że żyjemy w jedynej Galaktyce w kosmosie...

Podsumowanie

Fakty obserwacyjne będące podstawą kosmologii:

1. Galaktyki oddalają się od siebie. Im odległość między galaktykami jest większa, tym wartość prędkości oddalania się jest większa.
2. Cały Wszechświat wypełniony jest mikrofalowym promieniowaniem tła. Rejestruje się niewielkie niejednorodności tego promieniowania.
3. Struktura Wszechświata jest kształtowana przez ciemną materię.
4. Tempo ekspansji Wszechświata rośnie.

Teoria Wielkiego Wybuchu jest najlepszą teorią wyjaśniającą fakty obserwacyjne dotyczące Wszechświata. Rozpoczął się on od wielkiej eksplozji w której powstał czas, przestrzeń i energia. Początek Wszechświata nastąpił około 13,7 miliarda lat temu.

Człowiek - najlepsza inwestycja



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



WARSZAWSKA
WYŻSZA SZKOŁA
INFORMATYKI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego