

Rozdział IV. Budowa i powstanie Układu Słonecznego

4.1. Mieszkając na wirującej planecie

Pojęcie „wschód” i „zachód” oznaczają nie tylko punkty na horyzoncie, ale mają znaczenie kulturowe i geograficzne. Mówimy „Europa Zachodnia”, „Bliski Wschód”, „Dziki Zachód”. Jak się to ma do kierunków świata? Stojąc na półkuli północnej, jak w Polsce, twarzą do południa mamy po lewej ręce „wschód” a po prawej „zachód”. Słońce wschodzi na wschodzie, zachodzi na zachodzie a w południe jest na południu. Mówimy, że „słońce wschodzi”, ale od czasów Kopernika wiemy, że to Ziemia się kręci.

Obrazy kręcącej się Ziemi stanowią czołówkę co drugiego dziennika telewizyjnego, nie tylko w Polsce. Kula ziemiska na tych obrazach kręci się z lewa na prawo – patrząc z góry kręci się w kierunku „odwrotnym do kierunku ruchu wskazówek zegara”. Skąd takie porównanie? Otóż, jeżeli Ziemia kręci się w kierunku odwrotnym do kierunku obrotu wskazówek zegara, to cień wskazówki zegara słonecznego na półkuli północnej będzie się poruszał się w kierunku zgodnym z kierunkiem zegara. Lub raczej: to wskazówki zegara kręcą się w kierunku cienia wskazówki zegara słonecznego.



Ryc. 4.1. Obraz kręcącej się Ziemi jest czołówką wielu dzienników TV – tu przykład włoski i niemiecki

Inaczej jest w Australii – tam też słońce wschodzi na wschodzie i zachodzi na zachodzie, ale w samo południe jest dokładnie na *północy*. Trudno się temu dziwić: Słońce świeci (20.03 i 22.09) pionowo nad równikiem a dla Australii równik jest na północy. W konsekwencji, zegary słoneczne w Australii mają rosnący porządek godzin w odwrotnym kierunku niż zegary w Europie.

Fot. 4.2. Słońce, widziane z półkuli południowej zatacza na niebie łuk w „odwrotnym” kierunku: ze wschodu na zachód, ale w samo południe wskazuje geograficzną północ; zegary słoneczne w parku w Sydney mają odwrotny niż w Europie porządek godzin – liczby rosną w kierunku przeciwnym niż na tarczy zwykłego zegara



Widziany świat zależy więc od punktu patrzenia. Na Ziemi, wirującej na równiku z prędkością 40/24 tys. km na godzinę, trzeba mieć sporo wyobraźni, aby opisać Układ Słoneczny tak, jakby go widział przybysz z innej Galaktyki.

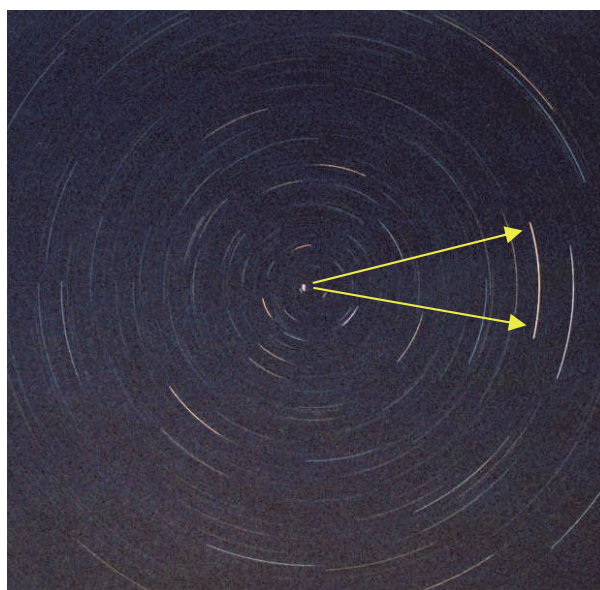
Pytanie: Czy widziałeś zegar słoneczny? A może znajdziesz jakiś w Internecie?



Fot. 4.3. Na cokole pomnika Kopernika, niemiecki rzeźbiarz F. A. Tieck w 1853 roku napisał po łacinie *Terrae motor, Solis Caelique stator* – „Ruszył Ziemię, wstrzymał Słońce i **niebo**”. Sam Kopernik pisał: „Czyż możliwe jest, że to nie Ziemia się kręci a całe ogromne niebo, którego granic nie znamy, ani znać zapewne nie możemy?”

**Ruszył Ziemię,
wstrzymał Słońce
i niebo**

Jeżeli Ziemia się kręci, to stojąc na niej nieruchomo wydaje się nam, że to raczej cała „kopuła” niebieska kręci się nad naszą głową. Trudno to zauważyć „gołym okiem”, ale położony nieruchomo przez kilka minut aparat fotograficzny zarejestruje gwiazdy, które zataczają część okręgu. Tego rodzaju zdjęcie pokazujemy na fot. 4.4. W ciągu 2 godzin gwiazdy zataczają, wokół gwiazdy Polarnej, łuk okręgu o kącie $\varphi = \frac{2}{24} \cdot 360^\circ$, czyli w ciągu jednej godziny cały nieboskłon, tak w dzień jak i w nocy zatacza kąt $\varphi = 15^\circ$ (czyli jeden stopień kątowny w cztery minuty zegarowe).



Fot. 4.4. W ciągu 1 godziny wszystkie gwiazdy na niebie, Słońce, Księżyc planety zataczają łuk o kącie rozwarcia 15° . Na tym zdjęciu kąt wynosi około 24° , zdjęcie wykonywano przez około 100 minut. Dłuższe łuki zataczają gwiazdy położone dalej od gwiazdy Polarnej.

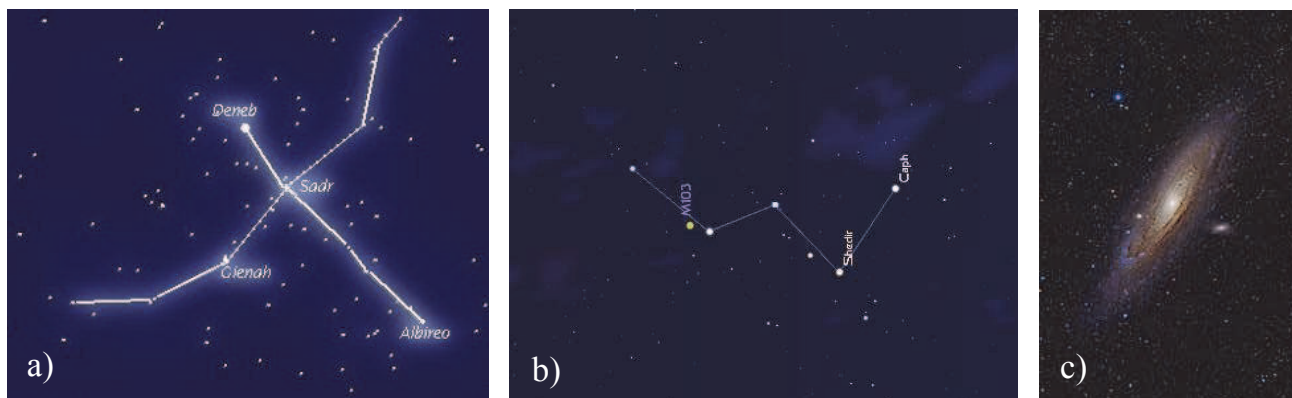
Zdjęcie 4.4 wykonano celując aparatem fotograficznym w gwiazdę Polarną – stojąc twarzą na południe, musimy (w Polsce) wychylić się do tyłu, aby mieć ją nad głową. Jest to jedyny nieruchomy punkt na nieboskłonie. Ale obrót dziennie-nocny nieba to nie jedyny ruch widoczny z Ziemi. Słońce i Księżyc w ciągu dni i miesięcy poruszają się również *na tle* gwiazd. Dokładniej: poruszają na tle wąskiego pasa gwiazdozbiorów, który już w starożytności nazwano zoo-diakiem, czyli zwierzyńcem niebieskim.

Aby o nim opowiedzieć, warto jednak opuścić wirującą Ziemię i spojrzeć na Układ Słoneczny z perspektywy przybysza z dalekiego kosmosu, tak jak to narysował Kopernik na ryc. 1.2a.

Pytanie: Jaki kąt zataczają (pozornie) gwiazdy w ciągu jednej minuty? Wynik podaj w postaci ułamka zwykłego, np. $(\frac{1}{2})^\circ$.

4.2. Niebieski zwierzyniec

Starożytni Grecy (a przed nimi Egipcjanie, Babilończycy, Medowie i inni) wpatrując się (bezczytnie, bez TV i Internetu) godzinami w niebo wyobrażali sobie na nim postacie z mitologii – herosów i ratowane przez nie kobiety (Perseusza, Kasjopeję, Andromedę), zwierzęta (Łabędzia, Smoka) czy obiekty, jak strzałę.



Ryc. 4.5. Dwa charakterystyczne gwiazdozbiory letniego nieba na półkuli północnej: **a)** Łabędź (*Cygnus*) i **b)** Kasjopeja (*Cassiopeia*). Latem, przed północą Łabędzia znajdziesz nad głową, a Kasjopeję nieco na wschód. Pod Kasjopeją, na dwusiecznej kąta dwóch prawych ramion, o trzy długości ramion w dół znajdziesz **c)** mgławicę Andromedy, widoczną gołym okiem¹

Szczególne 12 gwiazdozbiorów w pasie, po którym (pozornie) w ciągu roku porusza się Księżyc i Słońce określono nazwami zwierząt (ale nie tylko): Baran, Byk, Bliźnięta, Panna, Lew itd. Na pewno wiesz, „pod jakim znakiem” zodiakalnym jesteś urodzony!

Aby zrozumieć, dlaczego Słońce (a Księżyc i planety również) poruszają się w wąskim pasie nieba, warto wrócić do rysunku Kopernika (ryc. 1.2) i porównać go z modelem Bohra atomu wodoru (rys. 2.21). Elektrony w atomie poruszają się we wszystkich kierunkach, ba! orbitale są tak umieszczone, aby były jak najdalej od siebie (zob. np. orbitale *p* i *d* na ryc. 2.35). Jest to oczywiste: ujemne elektrony wzajemnie się odpychają. Inaczej jest w przypadku planet. Przez cztery i pół miliarda lat, orbity planet (powstałych z jednej, jedynej mgławicy) ustawiły się w jednej *plaszczyźnie*. Plaszczynę tę nazywamy *ekliptyką*.

Odmienne niż elektrony w atomie, wszystkie planety (i Księżyc) krążą w przybliżeniu w jednej płaszczyźnie. W płaszczyźnie tej leży również Słońce.

Płaszczyznę opisującą orbitę Ziemi dookoła Słońca nazywamy ekliptyką.

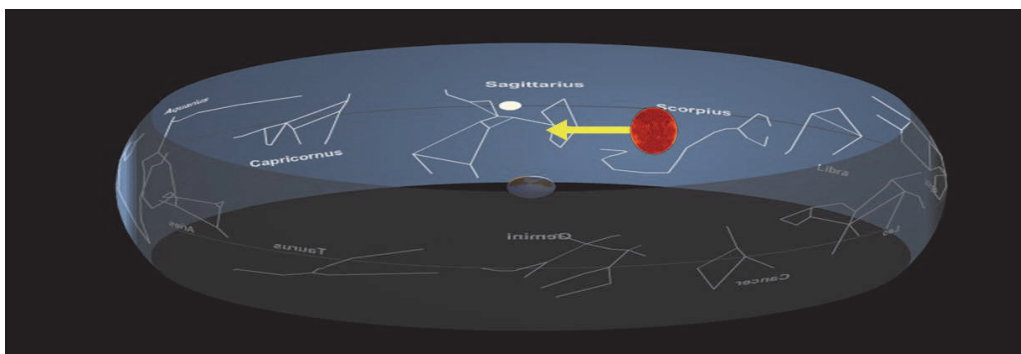
Z modelu Kopernika łatwo wywnioskować, że jeżeli Ziemia krąży dookoła Słońca (a czyni to na schemacie z ryc. 1.2 w kierunku odwrotnym do kierunku obiegu wskazówek zegara), to z Ziemi wydaje się, że to Słońce na tle gwiazd przesuwają się w *lewo*. Ruch ten nie jest łatwy do zaobserwowania – na tle jakiego gwiazdozbioru znajduje się aktualnie Słońce, wnioskujemy z tego, jaki gwiazdozbiór ekliptyki widzimy w kierunku południowym o naszej północy².

O ile przesuwają się Słońce w lewo w ciągu miesiąca? To proste: o $\Phi = \frac{1}{12} \cdot 360^\circ$ czyli 15° .

Jak widzisz, stopnie i minuty wymyślili Babilończycy, aby łatwiej liczyć położenie Słońca na niebie.

¹ http://www.margheritacampaniolo.it/la_costellazione_cigno.htm

² Innymi słowy, o północy widzimy w kierunku południowym gwiazdozbiór zodiaku przeciwny do tego, w którym aktualnie znajduje się Słońce.



Ryc. 4.6. Słońce widziane z Ziemi w ciągu roku przesuwają się w lewo, zataczając pełne 360° na tle gwiazdozbiorów zodiaku. Ruch ten widziany z Ziemi nakłada się na obrót dobowy, więc nie jest tak zauważalny jak (pozorny) ruch dzienny.

W pierwszym rozdziale przedstawiliśmy Układ Słoneczny tak, jak go znał Mikołaj Kopernik. W schemacie z rys. 1.2a należałoby dodać jedynie kierunek obrotu „sfer” – okazuje się, że wszystkie planety widziane z perspektywy rys. 1.2a poruszają się w kierunku odwrotnym do kierunku wskazówek zegara. Również Księżyc wokół Ziemi krąży w kierunku odwrotnym do kierunku ruchu wskazówek. Oznacza to, że również Księżyc obserwowany z Ziemi przesuwają się na nieboskłonie w lewo, mniej więcej o $\Theta = \frac{1}{30} \cdot 360^\circ$ co noc.

Słońce, widziane z Ziemi, przesuwają się na tle zodiaku w lewo, o mniej więcej 15° na miesiąc.

Księżyc, widziany z Ziemi, przesuwają się na tle zodiaku w lewo, mniej więcej o 12° na dobę.

Ale Słońce i Księżyc to nie jedyne obiekty, które (pozornie) wędrują po zodiaku. Starożytni (a za nimi Kopernik) znali pięć takich „błądzących gwiazd”, czyli planet: Merkurego, Wenus, Marsa, Jowisza, Saturna.

Pytanie: Sprawdź, w jakich miesiącach jest widoczny na niebie „Twój” gwiazdozbiór zodiakalny. Jeśli chcesz go zobaczyć, szukaj go w pasie, po którym wędruje (pozornie) Słońce i Księżyc. Ekliptyka, czyli tory wszystkich planet i Księżyca leżą w pasie zodiakalnym.

4.3. Nierozłączna para: Ziemia - Księżyc

Miesiącem początkowo Słowianie nazywali naturalnego satelitę Ziemi, gdyż co określony czas (około 30 dni) pojawiał się w pełni widoczny na niebie. Początkową fazę (od nowiu do pierwszej kwadry) nazywano wówczas Księżycem (od słowa „książe”), czyli synem Miesiąca³. Jak „wschód” i „zachód” tak *Księżyc* ma mnóstwo znaczeń, szczególnie dla poetów i zakochanych.

Obserwując Księżyc z Ziemi widzimy, że jego rozmiar zmienia się: raz jest większy (rozmiar kątowy wynosi 33'), innym razem wydaje się mniejszym obiektem (29'). Rozmiar tarczy Księżyca to średnio więcej niż pół stopnia (mniej więcej grubość kciuka widzianego na wyciągniętej ręce⁴). Obserwowane rozmiary naszego satelity zależą od miejsca w którym

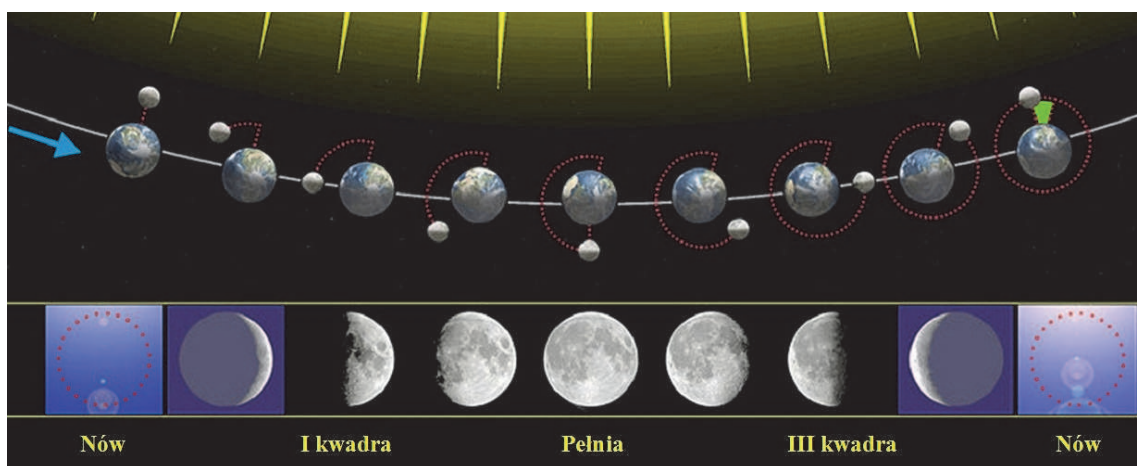
³ Nazwy niektórych pojęć związanych z Księżycem wywodzą się od słów *Selene* oraz *Luna* (odpowiednio greckiej i rzymskiej bogini i uosobienia Księżyca). *Selenographia: sive Lunae descriptio* (*Selenografia: lub opisanie Księżyca*) to dzieło napisane w 1647 r. przez naszego rodaka Jana Heweliusza. Gdański astronom opisał w niej obserwacje Księżyca, jakie wykonał w zbudowanym przez siebie obserwatorium mieszczącym się na dachach trzech kamienic w centrum miasta.

⁴ Nie martw się, jeżeli masz mały kciuk – przypuszczalnie i ramię masz odpowiednio krótsze!

znajduje się na orbicie względem Ziemi, ponieważ odbiega ona od kształtu koła – jest eliptyczna. Najmniejsza odległość, na jaką satelita może zbliżyć się do Ziemi wynosi 363 tys. km – mówimy, że Księżyc jest wtedy w *perigeum*⁵ swojej orbity, a największa - 405 tys. km (*apogeum*). Światło, które pędzi w próżni z prędkością bliską 300 000 km/s, odległość Ziemia-Księżyc pokonuje w czasie ok. 1 sekundy. Możemy zatem powiedzieć, że Księżyc znajduje się w przybliżeniu w odległości 1 *sekundy świetlnej* od Ziemi.

Księżyc jest ciałem szarym, jak popiół⁶. Na niebie widzimy go, ponieważ odbija światło słoneczne. Ze względu na konfigurację, w jakiej znajdzie się satelita względem Słońca i Ziemi, obserwujemy **fazy Księżyca** (patrz. Ryc. 4.7 i 4.8). Księżyc przesuwa się po niebie w ciągu jednej doby o odległość kątową ok. 13°, ze wschodu na zachód, co w konsekwencji powoduje iż jeden obieg wokół Ziemi (czyli okres np. od nowiu do nowiu) zajmuje satelicie 27,3 dnia (**miesiąc syderyczny**). W tym czasie jednak Ziemia zmienia położenie na orbicie względem Słońca, dlatego aby zaobserwować kolejną tę samą fazę, Księżyc musi „dogonić” Ziemię – potrzebuje na to około 2 dni. Faktyczny okres pomiędzy kolejnymi identycznymi fazami wynosi zatem 29,5 dnia i nazywany jest **miesiącem synodycznym** (Fot. 1.1).

Księżyc, podobnie jak planety, obraca się również wokół własnej osi. Obserwując z Ziemi powierzchnię Księżyca widzimy cały czas te same szczegóły, ponieważ okres obiegu wokół Ziemi jest równy okresowi obrotu satelity wokół własnej osi⁷. To „samo-uzgodnienie” okresu obrotu i obiegu dookoła Ziemi jest zjawiskiem wyjątkowym w całym Układzie Słonecznym. W konsekwencji widzimy, że Księżyc zwrócony jest w stronę Ziemi zawsze tą samą stroną⁸. Pierwsze zdjęcia tzw. ciemnej strony Księżyca⁹ wykonała dopiero radziecka sonda *Łuna 3* w 1959 roku.



Ryc. 4.7 Schemat przedstawiający występowanie faz Księżyca oraz definicję miesiąca syderycznego (27,3 dnia) i synodycznego (29,5 dnia); Księżyc obiega Ziemię w tym samym kierunku (przeciwnie do ruchu wskazówek zegara, o ile oglądany jest znad ziemskiego bieguna północnego), w którym Ziemia obiega Słońce. (Źródło: Wikipedia)

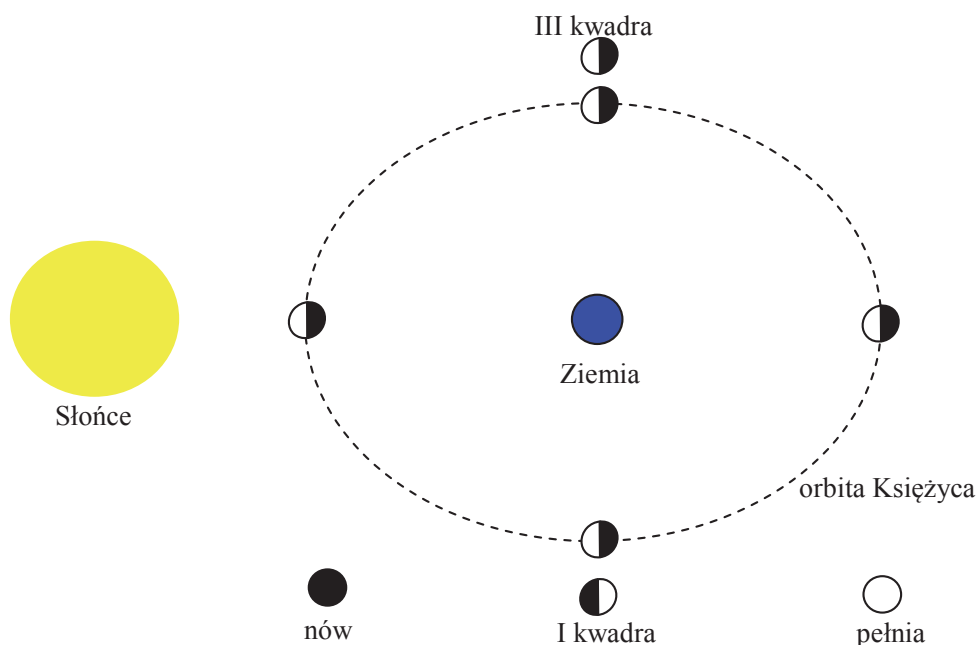
⁵ W podobnym nieco znaczeniu, bliskości, znajdziesz przedrostek greckiego pochodzenia w słowie „pery-feria” i „pery-skop”.

⁶ Naukowo, warstwę pyłu pokrywającego Księżyc (i inne planety skaliste, w tym Ziemię) nazywamy *regolitem*.

⁷ Jest to jedyny chyba w Układzie Słonecznym przykład takiej synchronizacji (1:1) ruchów dwóch ciał niebieskich. Obiegi trzech z czterech największych satelitów Jowisza a mianowicie Io, Europy i Ganimedesa mają się do siebie jak 1:2:4. Okres obrotu Merkurego wokół własnej osi ma się do okresu obiegu dookoła Słońca jak 3:2. Te tzw. rezonanse są wynikiem „samo-uzgodnienia” orbit pod wpływem wzajemnego oddziaływania grawitacyjnego. Warunkiem koniecznym są jednak procesy strat energii, jak np. pływy ziemskich oceanów były przyczyną „samo-uzgodnienia” ruchu Księżyca.

⁸ Z uwagi na niewielkie „drgania” orbity Księżyca (tzw. libracje) widzimy z Ziemi nieco więcej (59%) niż połowę powierzchni naszego satelity.

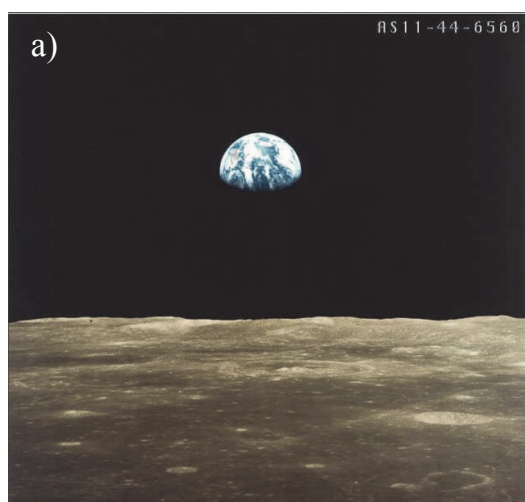
⁹ „Dark Side of the Moon”



Ryc. 4.8 Schemat obserwowania faz Księżyca. Gdy Księżyc znajduje się pomiędzy Ziemią a Słońcem widzimy nieoświetloną część Księżyca, zatem Księżyc jest w nowiu. Kiedy Ziemia znajdzie się pomiędzy Słońcem a Księżycem, obserwujemy pełnię. Gdy oświetlona jest prawa połowa tarczy Księżyca nazywamy ją pierwszą kwadrą, gdy lewa – trzecią kwadrą.

Trudno przecenić znaczenie Księżyca dla powstania życia na Ziemi. To jego sąsiedztwo powoduje przypływy i odpływy, które w niektórych miejscach spiętrzenia wody, jak np. w ujściu Tamizy, sięgają kilku metrów. Życie powstało w wodzie, ale rozwinęło się w całe bogactwo form dopiero na lądzie.

Samo łacińskie określenie *satelita*¹⁰ oznacza nie tyle obiekt astronomiczny, co „nieodłącznego towarzysza”, coś w rodzaju straży przybocznej. Ziemia jest jedyną planetą Układu Słonecznego, która ma satelitę o porównywalnych rozmiarach (promień nieco więcej niż 1/3 promienia Ziemi¹¹). Ma to zasadnicze znaczenie dla stabilizacji nachylenia osi Ziemi. Przeprowadzone niedawno symulacje komputerowe pokazują, że bez Księżyca oś Ziemi „rozchwiałyby się” już po 10 mln lat.



Fot. 4.9. a) Z powierzchni Księżyca trudno stwierdzić, czy to Księżyc towarzyszy Ziemi czy Ziemia Księżycowi (foto NASA Apollo 11); b) układ Ziemia –

Księżyc można przyrównać do pirogi z Polinezji: tubylcy żeglują na większej łodzi, ale mniejsza jest niezbędna dla zachowania równowagi

¹⁰ **satelita** <łac. *satelles*, D. ~*litis* = sługa, strażnik, towarzysz podróży>, *Słownik Wyrazów Obcych PWN*, PWN Warszawa, 1972, str. 668.

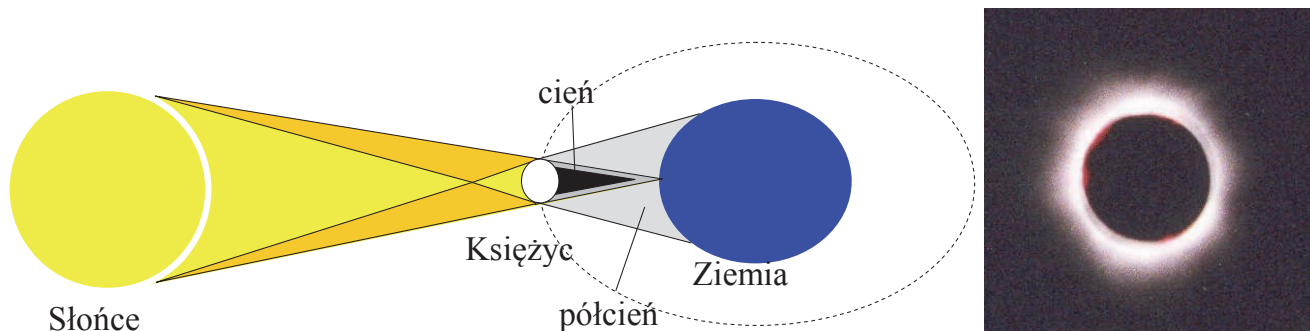
¹¹ Dokładnie promień Księżyca wynosi 1740 km, w porównaniu z 6370 km promieniem Ziemi.

4.4. Zaćmiewani i zaćmiewający

Pierwsze zapiski o zaćmieniu Słońca pochodzą z notatek chińskich astronomów już z roku 775 p.n.e.! Przez długi czas zaćmieniom przypisywane było złowieszcze znaczenie¹². Nic dziwnego, nie rozumiano jeszcze jaki mechanizm prowadzi do ich obserwacji.

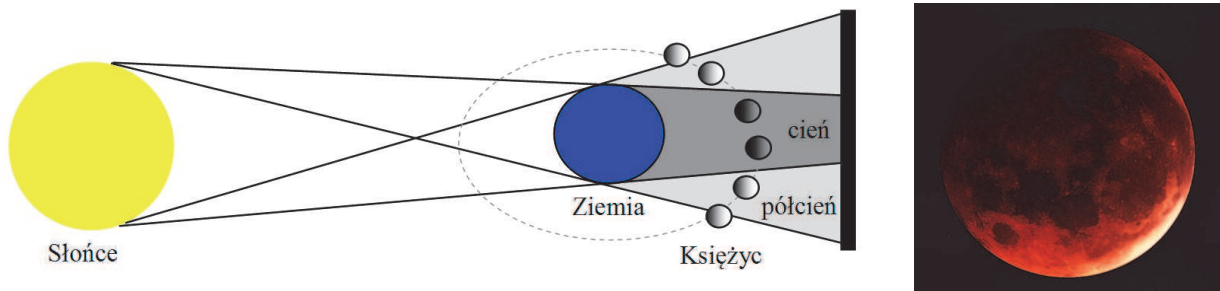
Dziś wiemy, że obserwowane z Ziemi zaćmienie powodują trzy ciała niebieskie ułożone w szczególnej konfiguracji względem siebie. Gdy jedno z ciał zasłoni swoją tarczą lub rzuci cień na całą lub część powierzchni drugiego ciała – obserwujemy zaćmienie.

Zaćmienie Słońca (Fot. 4.10) występuje wtedy, gdy Księżyc znajdzie się pomiędzy Ziemią i Słońcem, a jego tarcza (której rozmiary kątowe są porównywalne do rozmiarów Słońca) zasłoni całą (zaćmienie całkowite) lub część (zaćmienie częściowe) tarczy tej gwiazdy.



Ryc. 4.10. Schemat i zdjęcie zaćmienia Słońca. Tylko w strefie zupełnego cienia obserwujemy zaćmienie *całkowite*. Kiedy Księżyc jest od Ziemi nieco „za daleko”, obserwujemy zaćmienie „obraczkowe”. Fotografia została wykonana zwykłym aparatem (na klisze), bez specjalnych filtrów – w czasie zaćmienia robi się ciemno jak w nocy (GK, Monachium, 1998)

Zaćmienie Księżyca obserwowane jest wtedy, gdy Ziemia znajdzie się pomiędzy Słońcem i Księżycem, a jej cień padający na tarczę Księżyca zasłoni jego część lub całość. O ile zaćmienie Słońca, szczególnie to całkowite, zdarzające się bardzo rzadko w określonym miejscu, ma przebieg „dramatyczny”, o tyle zaćmienie Księżyca, zdarzające się nawet kilka razy w roku, często bywa niezauważone. Z uwagi na proporcje odległości i rozmiarów, cień Księżyca na Ziemi ma rozmiary najwyżej kilkudziesięciu kilometrów. W konsekwencji zaćmienie Słońca w określonym punkcie na Ziemi trwa nie więcej niż 8 minut. Zaćmienie Księżyca odbywa się bez szumu wiatru, Księżyc przygasa, staje się ciemnobrązowy¹³ a całe zjawisko trwa nawet 100 minut.



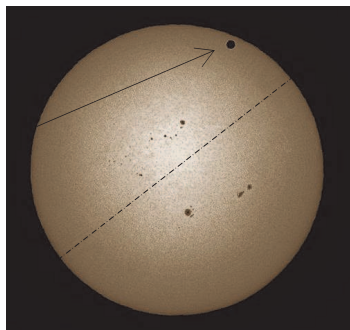
Ryc. 4.11 Schemat występowania zjawiska zaćmienia Księżyca. Zaćmienia Księżyca zdarzają się o wiele częściej niż zaćmienia Słońca i trwają nawet godzinę. Tarcza Księżyca robi się ciemno-bura

¹² Kto przeżył zaćmienie całkowite, znakomicie to rozumie. Z powodu różnicy temperatur między nagrzanym gruntem a wędrującą (z prędkością kilku tysięcy km/h) strefą cienia, zaczyna wiać gwałtowny, zimny wiatr a ptaki zaskoczone nagłą nocą pośpiesznie szukają kryjówek.

¹³ Kolor burzo-czerwony zaćmionego Księżyca wynika z obecności atmosfery na Ziemi, która rozprasza nieco promienie Słońca, tak że Księżyc nie jest zupełnie czarny.

Tranzyt planet na tarczy Słońca

Już za czasów Ptolemeusza (I w. n.e.) astronomowie wiedzieli, że dwie planety: Merkury i Wenus mogą przechodzić na tle tarczy Słońca. Pierwsze matematyczne obliczenia tranzytu wykonał Kepler. W słynnych „Tablicach Rudolfańskich” (*Tabulae Rodolphinae*, 1627) przewidział przejście Merkurego z 7 listopada 1631 roku oraz przejście Wenus miesiąc później.



Do tranzytu dochodzi, gdy jedna z planet wewnętrznych (Merkury lub Wenus) znajdzie się pomiędzy Ziemią a Słońcem. Tranzyt planety Wenus zachodzi okresowo co: 8, 105, 8, 121 lat. Ostatni tranzyt Wenus obserwowany był w 2004 r., kolejny w 2012 r., następne będą w 2117 r. oraz 2125 r.

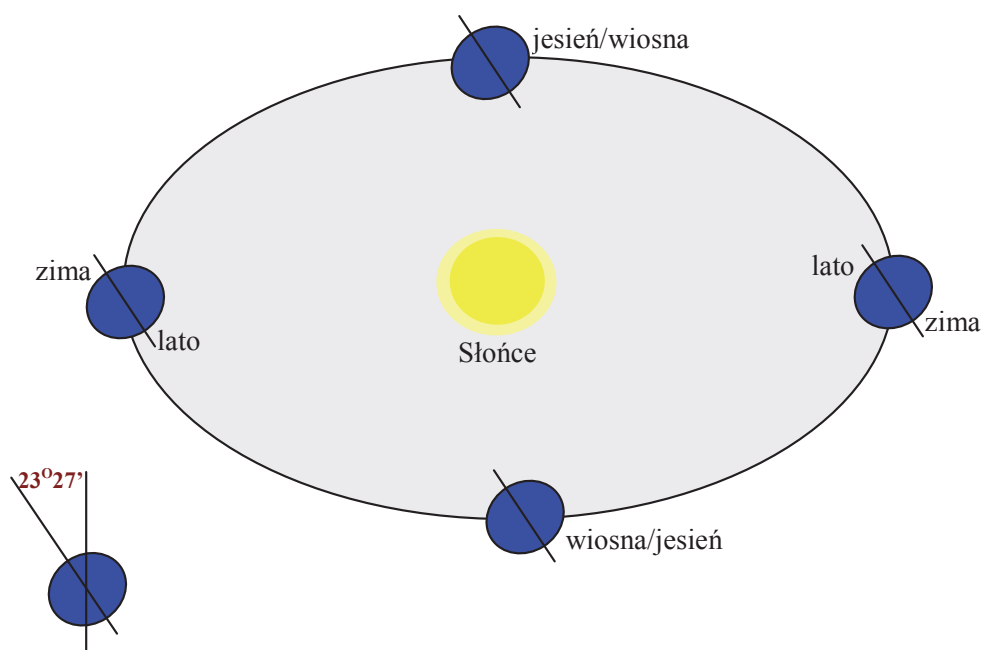
Fot. 4.12 Tranzyt Wenus na tle tarczy słonecznej godz. 6:25, 6/6/2012, Monte Bondone, szer. geogr. 46°N, foto Ch. Lavarian. Wenus to plamka w górnym prawym rogu, pozostałe ciemne punkty to plamy słoneczne. Linia przerywana to położenie ekliptyki (przy Słońcu wschodzącym)

Tranzyty Merkurego, który jest położony blisko Słońca i obiega je raz na 88 dni, mogą być obserwowane znacznie częściej, ostatni w 2006 r., kolejny w 2016 r. Możliwe są również podwójne tranzyty, gdy obie planety przechodzą na tle tarczy Słońca, zdarzają się jednak bardzo rzadko – raz na kilkadziesiąt tysięcy lat.

W przypadku planet zewnętrznych (znajdujących się w większej odległości od Słońca niż Ziemia) tranzyty są niemożliwe. Możemy zaobserwować natomiast **okultację**, czyli przesłonięcie planet zewnętrznych przez obiekty znajdujące się bliżej Słońca.

4.5. Cztery pory roku

Skąd się biorą pory roku i do czego służą? Fascynowały one nie tylko geografów i astronomów ale też kompozytorów i poetów. Powodem występowania pór roku jest dość znaczne ($23^{\circ}27'$) nachylenie osi obrotu Ziemi do płaszczyzny obiegu dookoła Słońca (czyli ekliptyki), zob. ryc. 4.13.



Ryc. 4.13. Występowanie pór roku (lata w lipcu na półkuli północnej a w styczniu na półkuli południowej) jest uwarunkowane nachyleniem osi obrotu Ziemi do płaszczyzny ekliptyki.

W ruchu dookoła Słońca Ziemia ustawia się „bokiem” w stosunku do Słońca w marcu (20-go) i wrześniu (22-go): w tych dniach promienie słoneczne padają (w południe) prostopadłe na równik. W czerwcu Ziemia nagrzewa swoją północną czapę polarną – dzień na szerokościach geograficznych powyżej $66^{\circ}33'N (=90^{\circ}-23^{\circ}27')$ trwa pół roku.

Moment, w którym Słońce osiąga (w południa) najwyższą możliwą pozycję na horyzoncie nazywamy przesileniem letnim (łac. *solstitium*). W tym stuleciu, na półkuli północnej jest to 21 czerwca. W końcu czerwca w St. Petersburgu, w Norwegii i Islandii można przeżywać „białe noce” a znaczne różnice w długości dnia obserwujemy nawet w Polsce. W Jastarni słońce wschodzi o 4:08 (polskiego czasu astronomicznego) a w Cieszynie o 4:37. Dzień nad morzem w lecie jest nawet o godzinę dłuższy niż w Tatrach!

Dzień przesilenia letniego potrafiły, zapewne, wyznaczać nawet ludy prehistoryczne. Mogły do tego służyć megalityczne „menhiry” w Stonehenge w Anglii z III tysiąclecia p.n.e. A już Kopernik, za astronomami starożytnymi wiedział, że moment równonocy systematycznie przesuwają się o kilkanaście minut na rok. Powodem jest *trzeci* ruch Ziemi: **precesji** osi obrotu, jak stożki zataczone przez oś bąka, wyprowadzonego z równowagi. Ruch ten jest powolny – oś Ziemi zakreśla pełny stożek raz na 25,8 tys. lat. W czasach faraonów gwiazdą polarną był *Thuban* w konstelacji Smoka.

Pory roku nie występują na wszystkich planetach. Są one na Marsie, który ma podobne nachylenie osi do płaszczyzny swego obiegu dookoła Słońca, $25^{\circ}32'$ (i podobną długość doby, 24,5 h). Pory roku nie występują na Wenus, dla której nachylenie osi wynosi tylko 3° . Wenus jest natomiast najgorętszą planetą Układu Słonecznego, ze średnią temperaturą około $460^{\circ}C$. Wynika to z gigantycznego efektu cieplarnianego, spowodowanego dużymi koncentracjami dwutlenku węgla, dwutlenku siarki i pary wodnej w atmosferze tej planety.

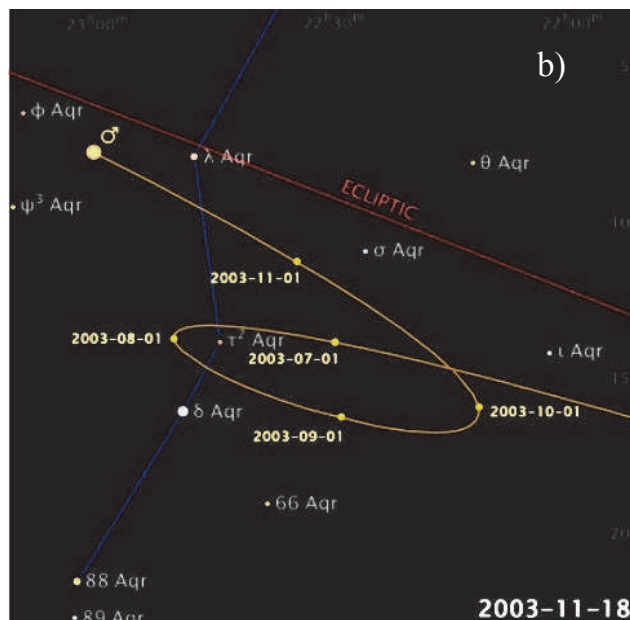
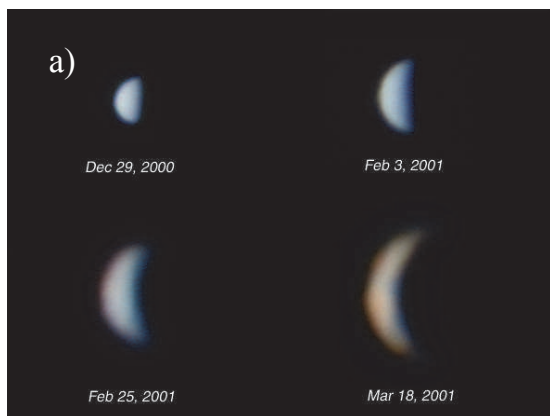
4.6. Błądzące gwiazdy

Mianem błądzących gwiazd (planet) astronomowie starożytni określili kilka obiektów, które obserwowali w pasie zodiaku (czyli w płaszczyźnie ekliptyki), które podobnie jak Słońce przesunęły się w ciągu roku w lewo, ale od czasu do czasu „błądziły”.

Planety łatwo zidentyfikować na nocnym niebie: są one dość jasne (zależy to jednak od konkretnego okresu), poruszają się w płaszczyźnie ekliptyki i, w odróżnieniu od gwiazd, „nie migają”. Ta ostatnia cecha wynika z faktu, że gwiazdy są od nas bardzo daleko, więc wydają się punktami. Małe zaburzenia w ziemskiej atmosferze, gdzieś po drodze światła z kosmosu powodują, że światło raz dociera do naszego oka raz nie: gwiazdy do nas „mrugają”. Planety są znacznie bliżej, widzimy je jako małe plamki już przez zwykłą lornetkę, więc świecą, dla nas Ziemiaków, światłem ciągłym.

Planety mają swoje barwy – Mars czerwony, Saturn jasnożółty. Planety wewnętrzne, Wenus i Merkury (zob. schemat Kopernika na ryc. 1.2) wykazują fazy jak Księżyc. Przez pewne okresy są oświetlone przez Słońce z boku i wyglądają jak sierp Księżyca. Szczególnie dobrze widoczne jest to dla Wenus, parę godzin przed wschodem lub pół roku później parę godzin po zachodzie słońca, fot. 4.14a.

Planety wewnętrzne wyraźnie „wędrują” w okolicach Słońca. Inaczej jest dla planet zewnętrznych, Marsa, Jowisza, Saturna, których ruch, widziany z Ziemi, jest specyficzny: planety te zakreślają na zodiaku pętle. Mars zatacza największą pętlę, raz na 2 lata, Saturn – najmniejszą, raz na lat 30. Otóż Ziemia, zgodnie z III prawem Keplera (zob. par. 1.7) porusza się po orbicie z większą prędkością kątową (a liniową również większą, równanie 1.14) i w pewnych okresach wyprzedza Marsa. Na tle gwiazd stałych wydaje się, jakoby Mars zawrócił, ryc. 4.14b. Prawdziwie błądząca gwiazda!



Fot. 4.14. Dwa dowody na prawdziwość teorii Kopernika: **(a)** fazy Wenus¹⁴, zaobserwowane po raz pierwszy przez Galileusza; **(b)** zapętłona (jeśli widziana z Ziemi) trajektoria Marsa na niebie¹⁵.

4.7. Nasze najbliższe kosmiczne sąsiedztwo – Układ Słoneczny

W skali całego Kosmosu układ planetarny jest najmniejszym dostrzegalnym tworem, jest takim naszym „najbliższym podwórkiem”. Wszystkie obiekty wchodzące w skład Wszechświata, które nie należą do Układu Słonecznego, znajdują się w dużo większych odległościach od Ziemi.

Ruchami planet, komet, satelitów, asteroidów rządzi znane już przez Was prawo grawitacji. Nie jest to ruch „idealny”, o jakim marzyli starożytni astronomowie czy nawet początkowo Kepler. Powiedzieliśmy już, że planety poruszają się w płaszczyźnie ekliptyki, czyli toru Ziemi dookoła Słońca. Teraz musimy dodać: *prawie* w płaszczyźnie ekliptyki. Rozważaliśmy poprzednio orbity kołowe. Teraz musimy poprawić: *prawie* kołowe. Ale astronomiczne prawa Keplera, oparte na fizycznym prawie grawitacji pozostają *dokładnie* prawdziwe.

Poprawki do ruchu planet wynikają z wielu czynników. Oddziaływanie grawitacyjne nie dotyczy tylko par Ziemia – Księżyc i Słońce – Ziemia. Wszystkie ciała w kosmosie wzajemnie na siebie oddziałują grawitacyjnie. Poza tym, planety w Układzie Słonecznym poruszają się od kilku miliardów lat, i ich miejsce obecne jest skutkiem wszystkich oddziaływań przez ten okres. Stąd, im dokładniejsze maszyny cyfrowe, tym dokładniej przewidywać możemy przyszłe zjawiska astronomiczne.

Heliocentryczna teoria usunęła Ziemię z centrum Wszechświata nadając jej drugorzędną funkcję w Układzie Słonecznym. Kopernik pokazał, że w centrum Układu Słonecznego znajduje się Słońce, a wokół niego po kolistych orbitach krążą wszystkie planety. Poprawnie podał kolejność znanych wówczas planet oraz oszacował ich odległości. Kopernik wiele lat zwlekał z drukiem swojego dzieła. Przypuszczalnie, po 40 latach własnych obserwacji astronomicznych wiedział, że planety nie poruszają się po dokładnych kołach, ale nie potrafił tego udowodnić. Dziś wiemy, że planety poruszają się po *elipsach*, dla których w jednym z ognisk znajduje się Słońce. Orbita Ziemi jest niewiele spłaszczona – wzajemny stosunek dwóch osi elipsy wynosi 1,017 ale orbita Marsa już bardziej – stosunek osi wynosi 1,093¹⁶.

¹⁴ T. Harrison, *Mercury, Venus and Mars*, New Mexico State University, <http://ganymede.nmsu.edu/tharriso/ast110/class08.html> (20/06/2012)

¹⁵ Źródło: Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/File:Apparent_retrograde_motion_of_Mars_in_2003.gif

¹⁶ W konsekwencji aphelium i perihelium dla Marsa różnią się też znacznie (1,67 AU i 1,38 AU)

Szczegółowy obraz Układu Słonecznego zawdzięczamy Janowi Keplerowi, który do teorii Kopernika dodał trzy bardzo ważne prawa. Kepler oparł się na obserwacjach ruchu planet (głównie Marsa) wykonanych przez Tychona Brahego. Swoje obserwacje Brahe zapisał Keplerowi w testamencie. Kepler w 1609 r. w dziele *Astronomia Nova* zawarł pierwsze dwa prawa, a następnie w 1619 r. w *Harmonices Mundi* treść kolejnego, trzeciego prawa.

I prawo Keplera:

Każda planeta w Układzie Słonecznym porusza się wokół Słońca po elipsie, a Słońce znajduje się w jednym z jej ognisk.

II prawo Keplera:

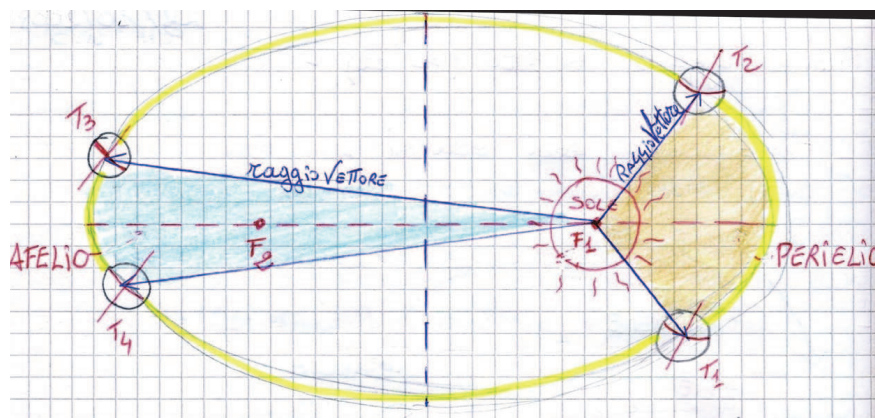
Linia łącząca Słońce z planetą (wektor wodzący) zakreśla w dowolnej jednostce czasu jednakowe pola wycinków elipsy.

III prawo Keplera:

Stosunek kwadratu okresu obiegu planety wokół Słońca do sześciannu wielkiej półosi jej orbity (czyli średniej odległości od Słońca) jest stały dla wszystkich planet w Układzie Słonecznym.

Trzy prawa Keplera, dzięki znajomości fizyki, nie powinny być dla Was zaskoczeniem. Jedynie pierwsze z nich wymaga nieco trudniejszej matematyki¹⁷. Trzecie sformułowaliśmy w rozdziale I. Drugie potwierdza wyprowadzone przez nas równanie (1.14) - im dalej od Słońca, tym wolniejszy ruch.

Kepler zauważył rzecz bardzo interesującą dla orbit eliptycznych – w równych odcinkach czasu pole zakreślone przez promień wodzący planety pozostaje stałe. Innymi słowy: dla takiego samego czasu im promień mniejszy, tym zatoczony w tym samym czasie łuk większy i odwrotnie, zob. rys. 4.15.



Ryc. 4.15. Drugie prawo Keplera w ilustracji Martyny, uczennicy klasy 1A szkoły hotelarskiej w Porto Sant' Elpidio (Włochy): w równych odcinkach czasu pola zakreślone przez promień wodzący planety są równe. Punkt orbity najbliższej Słońca to peryhelium, najdalszy – aphelium. Przez F_1 i F_2 są oznaczone dwa ogniska elipsy¹⁸

Od tamtej pory Wszechświat stał się dużo prostszy. Kopernik wprowadził ład i porządek do ruchu planet, natomiast Kepler delikatnie przesunął tory, po których się poruszają.

Kopernik oraz Kepler nie wiedzieli o istnieniu Urana i Neptuna. Uran, mimo że widoczny gołym okiem, porusza się po zodiaku tak wolno, że dopiero W. Herschela w 1781 r. stwierdził, że to planeta. Neptun został znaleziony w ciągu godziny, w 1846 r. przez astronoma J. Galle, przez wiele lat profesora Uniwersytetu we Wrocławiu. Jednak odkrycie Neptuna tak naprawdę zawdzięczamy matematykom, którzy podali jego położenie na podstawie zaburzeń w orbicie Urana. I Uran i Neptun są planetami gazowymi, nieco mniejszymi od Saturna.

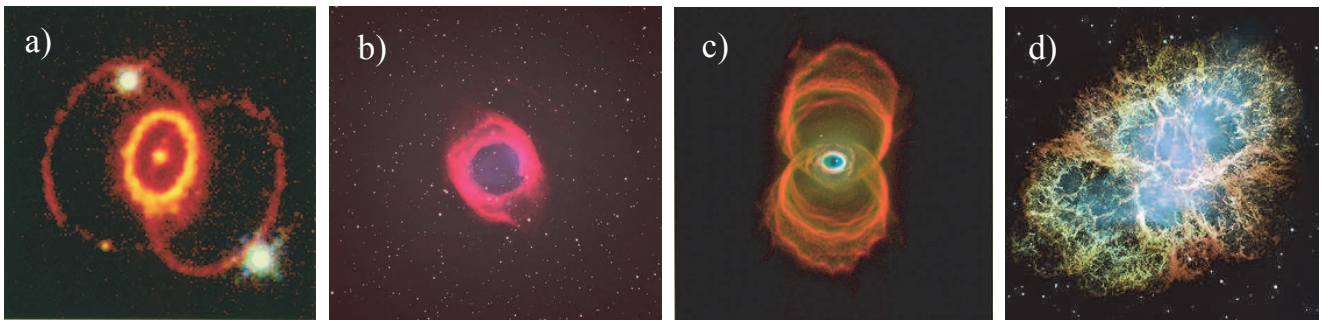
¹⁷ Ogniska nie należy mylić ze środkiem elipsy. Słońce nie znajduje się w środku elipsy, ale w jej ognisku. Jest to konsekwencja prawa grawitacji. Wyprowadzenie orbit eliptycznych wymaga znajomości wyższej matematyki, zob. np. nasza strona „Fizyka zabawek” <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki/files/mech/kepler.htm>

¹⁸<http://pierluigistroppa.altervista.org/SITO%20STROPPA+/SCIENZE%20DELLA%20TERRA.html>

Z kolei na podstawie zaburzeń w orbicie Neptuna poszukiwano następnego obiektu. Pluton, odkryty w 1930 r. obiega Słońce raz na 248 lat po orbicie nachylonej do ekliptyki pod kątem aż 17° . Pluton przez długi czas zaliczany był do grona planet. Dopiero odkrycie w 2005 r. Eris – obiektu o masie nieco większej od Plutona i okrążającego Słońce po wydłużonej orbicie raz na 650 lat, spowodowało zmianę - wprowadzenie nowej definicji „planety”. W myśl tej definicji z 2006 roku ani Eris ani Pluton do planet nie należą – ich orbity są znacznie nachylone do ekliptyki a orbity wydłużone. Nie mamy dostatecznie jasnych danych, jak te „planety karłowate” powstały, ale nie wydaje się, aby w ten sam sposób jak reszta Układu.

4.8. Budowa i powstanie Układu Słonecznego

Najbardziej wiarygodna do dziś hipoteza powstania Układu Słonecznego została sformułowana przez Immanuela Kanta i Pierre-Simona Laplace’a w połowie XVIII wieku. W myśl tej hipotezy, Układ powstał przez grawitacyjną kondensację chmury gazowo – pyłowej. Dziś, dzięki postępom astrofizyki i fizyki jądrowej, potrafimy stwierdzić, że chmura taka powstała w wyniku eksplozji innej gwiazdy, która poprzednio zajmowała miejsce Słońca. Gwiazda ta, masywniejsza od Słońca, wypaliła paliwo w swoim cyklu życiowym, zapadła się, ponownie rozgrzała i wybuchła, podobnie jak supernowe na fot. 4.16.



Fot. 4.16. Układ Słoneczny powstał w wyniku wybuchu supernowej, podobnego do obserwowanych dziś w dalekim kosmosie; Mgławica Kraba (d) to supernowa z 1054 r. (Źródło NASA)

W trakcie zapaści, pod ogromnymi ciśnieniami dokonała się synteza jąder pierwiastków chemicznych cięższych od żelaza, jak np. uranu. W wyniku wybuchu pierwiastki te, jak i inne, typowe dla gwiazd, zostały wyrzucone w kosmos.

W Układzie Słonecznym cztery wewnętrzne planety, Merkurego, Wenus, Ziemię i Marsa nazywamy *tellurycznymi*, od „Terra”, czyli Ziemia. Ich średnia gęstość przekracza 5g/cm^3 . Gęstość planet zewnętrznych, Jowisza, Saturna, Urana i Neptuna jest znacznie mniejsza, ok. $1,2\text{g/cm}^3$. Odzwierciedla to zasadnicze różnice w ich składzie. W skorupie Ziemi (podobnie jak na Księżycu) dominującymi pierwiastkami są krzem i tlen a w jądrze – żelazo. W atmosferze Jowisza, metodami spektroskopii optycznej odkryto metan, amoniak, wodę, dwutlenek siarki.

Mimo zawartości lekkich pierwiastków, wodoru i helu, planety zewnętrzne są masywne; nawet najmniejsza z nich, Neptun jest 200 razy masywniejsza od Ziemi. Przyciąganie grawitacyjne Jowisza i Saturna na ogromnych przestrzeniach przewyższa przyciąganie ze strony Słońca. Dzięki temu, wiele obiektów kosmicznych „szwędających” się po rubieżach Układu Słonecznego zostało przechwyconych przez te planety-giganty.¹⁹ Sam Jowisz, który ma co najmniej 63 satelitów, przypuszczalnie 55 z nich wyłapał z przestrzeni kosmicznej.

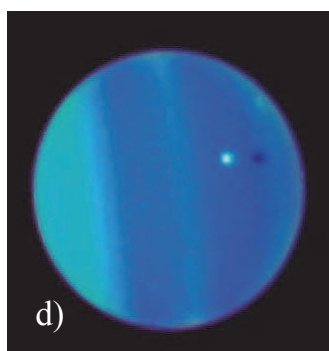
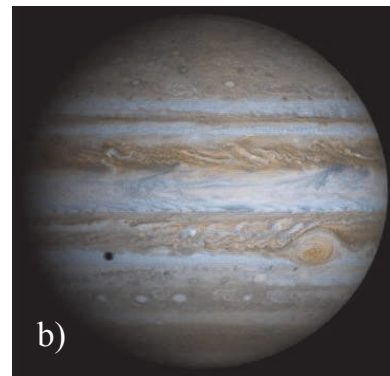
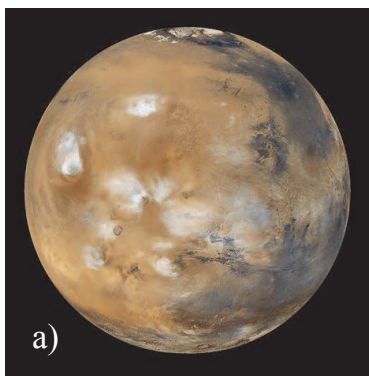
¹⁹ W języku potocznym, postawnego mężczyznę pilnującego, aby do klubu młodzieżowego nie dostała się osoba niepożądana nazywamy „bramkarzem”. Jowisz i Saturn dla życia na Ziemi pełnią funkcję „bramkarzy”, chroniąc naszą planetę przed zbyt częstymi mega-kolizjami kosmicznymi.

Pomiędzy Marsem i Jowiszem znajduje się tzw. *pas planetoid* spośród których największa jest *Ceres*. Pas planetoid składa się, przypuszczalnie, z resztek innej planety *tellurycznej*. Za orbitą Neptuna wyodrębniony jest kolejny obszar, który składa się z lodowych i skalnych obiektów, tzw. *pas Kuipera*. W tym obszarze odkryto ostatnio nowe planety karłowate. Zewnętrzny obszar układu planetarnego zajmuje *dysk rozproszony*, którego częścią jest *Eris* oraz krótkookresowe komety. Zewnętrzną otoczkę rozciągającą się na odległość nawet 50 tys. AU²⁰ jest obłok Oorta składający się, zapewne, z miliardów czy nawet bilionów lodowych obiektów. Granica Układu Słonecznego nie jest konkretnie ustalona. Uznaje się, że jest to obszar, gdzie wiatr słoneczny oraz grawitacja Słońca ustępują oddziaływaniom galaktycznym.

Dokładne masy, okresy obiegu dookoła Słońca, okresy obrotu dookoła własnej osi i odległości od Słońca podajemy w tabeli 4.1. Planety rozłożone są dość „regularnie” dookoła Słońca. Jeżeli odległość Ziemia – Słońce przyjmiemy za „1”, to Merkury jest od Słońca w odległości mniej więcej 3/8, Wenus 3/4, Mars 3/2 AU. Kolejne planety, Jowisz, Saturn, Uran i Neptun znajdują się w odległościach, około 5, 10, 20 i 30 AU. Nie potrafimy dziś odtworzyć warunków powstania Układu Słonecznego tak, aby wynikiem były obserwowane rozkłady mas i odległości od Słońca.

Fot. 4.17. Cztery z zewnętrznych planet Układu Słonecznego (źródło NASA):

(a) pustynny Mars, z kanionami, wygasłymi wulkanami i czapami lodu na biegunach mógł kiedyś gościć prazycie; (b) Jowisz, ponad 10-krotnie większy niż Ziemia obraca się w ciągu 10 godzin; powoduje to turbulentne wiatry, przypominające ziemskie pasaty, ale dużo gwałtowniejsze; czarna kropka to cień jednego z księżyców Jowisza, Europy;



(c) Saturn widziany z sondy Cassini; (d) Uran kręci się wokół osi leżącej prawie w płaszczyźnie jego ekliptyki; niebieskawy kolor Uran zawdzięcza obecności metanu, widoczny też księżyc Ariel i jego cień.

Kilka liczb w budowie i historii Ziemi jest do zapamiętania:

- promień Ziemi, około 6370 km
- odległość Ziemia – Księżyc, około 380 tys. km
- odległość Słońce – Ziemia, około 150 mln km

Wiek Ziemi: 4,567 mld lat

Pierwsze ślady istot człeko-podobnych: 2-3 mln lat temu

Rysunki naskalne we Francji: 28 tys. lat temu

²⁰ Jednostką astronomiczną odległości (AU) jest średnia odległość Ziemi od Słońca, czyli 149 597 870,691 km. Rok świetlny, czyli odległość, jaką przebywa światło w ciągu roku to 63 241 AU.

Tabela 4.1. Niektóre dane 8 planet Układu Słonecznego, planetoidy Ceres i 4 planet karłowatych.

Nazwa	Średnica [km]	Odległość od Słońca [tys. km] ²¹	Długość roku [doba ziemska/rok]	Długość doby [ziemska doba/h]
Słońce	1 392 000	-	-	25,38 d
Merkury	4880	57 910	87,97 dni	58,646 d
Wenus	12 100	108 200	224,7 dni	-243,02 d ²²
Ziemia	12 742	149 598	365,26 dni	23,93 h
Mars	6780	227 900	686,98 dni (1,88 r.)	24,62 h
Ceres ²³	950	413 700	4,6 lat	9,07 h
Jowisz	139 800	778 340	11,863 lat	9,93 h
Saturn	116 500	1 426 670	29,447 lat	10,64 h
Uran	50 700	2 870 700	84,017 lat	-17,24 h
Neptun	49 240	4 498 000	164,79 lat	16,11 h
Pluton	2350	5 906 000	247,92 lat	-6,387 d
Haumea	1150	6 432 000	282 lat	3,92 h
Makemake	1470	6 783 000	305 lat	22,5 h
Eris	2330	10 180 000	561 lat	25,9 h

Dwie sondy wysłane przez człowieka w 1977 roku docierają właśnie do granic Układu Słonecznego: Voyager 1 znajduje się w odległości ponad 120 AU od Słońca a Voyager 2 – prawie 100 AU²⁴. W obszarach tych kończy się wpływ wiatru słonecznego (czyli strumienia zjonizowanych atomów, głównie protonów wysyłanych ze Słońca), zob. ryc. 4.18.

Czy to już granica Układu Słonecznego? Na razie nie potrafimy na to pytanie odpowiedzieć. Potrafimy natomiast, dzięki porównaniom zawartości na Ziemi (i w meteorytach) różnych pierwiastków o długim okresie rozpadu promieniotwórczego i produktów ich rozpadu, jak np. izotopy ołowiu określić wiek Ziemi. Dzięki tym danym, na dziś (20.06.2012) moment powstania Ziemi określamy na **4,567 mld lat** temu. Ziemia

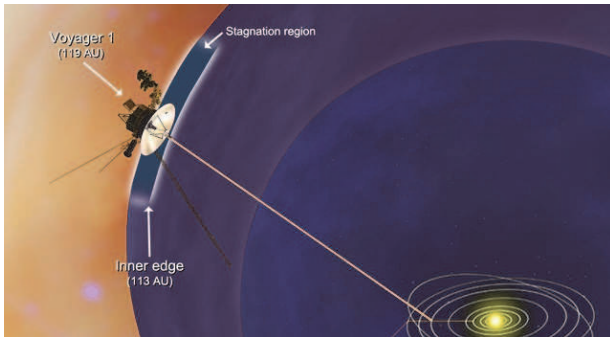
²¹ Dla orbit eliptycznych ekwiwalentna odległość orbity kołowej (wg III Prawa Keplera), z dokładnością do 5 cyfr znaczących

²² Wenus obraca się w „odwrotnym” kierunku, czyli patrząc znad ziemskiego bieguna północnego w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu wskazówek zegara; podobnie Uran, ale jego oś obrotu własnego jest prawie że w płaszczyźnie ekliptyki

²³ Planetoida

²⁴ Sprawdź stan na dzień dzisiejszy, pod adresem NASA <http://voyager.jpl.nasa.gov/>

uformowała się bardzo szybko, przez 50-100 mln lat, ale w trakcie tego formowania uderzyło w nią jakieś ciało niebieskie rozmiarów Marsa. Z wybitej ziemskiej materii powstał Księżyc.

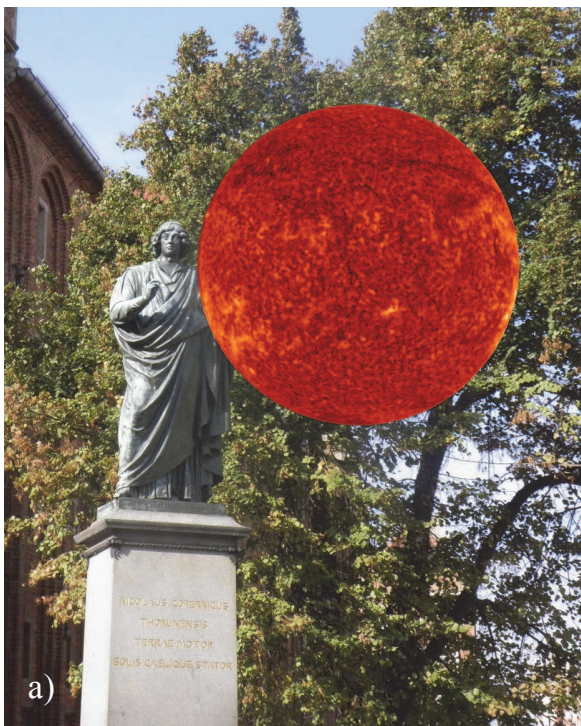


Ryc. 4.18. Artystyczna wizja sondy Voyager 1 docierającej do granic *heliosfery*; w dolnym prawym rogu pokazane są orbity planet dookoła Słońca; Voyager 1 jest obecnie (VI 2012) trzy razy dalej od Słońca niż Pluton (Źródło: NASA)

Owocowo-warzywny Układ Słoneczny

Jak duży jest Układ Słoneczny? Sonda Voyager dziś (29.06.2012) jest 120 AU od Ziemi i zaczyna rejestrować nagły wzrost promieniowania kosmicznego. Niektórzy uczeni twierdzą, że Układ może sięgać nawet do 50 tys. AU, czyli prawie rok świetlny. Dla człowieka jednak takie pojęcia są abstrakcyjne. Spróbujmy zatem zmniejszyć rozmiary planet oraz odległości pomiędzy nimi tak, by Układ Słoneczny zmieścił się w granicach dużego miasta – np. Torunia. Dla łatwiejszego wyobrażenia wielkości planet znajdziemy warzywa lub owoce, które będą przedstawiały rozmiary poszczególnych planet.

I tak, jeśli na pomniku Kopernika umieścimy kulę o średnicy 2,8 metra odpowiadającą Słońcu (w skali 1:500 000 000), to Merkury wielkości małej śliwki mirabelki znajdowałby się w odległości 115 metrów, czyli gdzieś w Kościele p.w. Św. Ducha, Wenus rozmiarów nieco większej śliwki gdzieś w okolicach Kościoła p.w. Wniebowzięcia Najświętszej Marii Panny, a Ziemia w okolicach Kościoła św. Jakuba. Jowisz byłby rozmiarów arbuza, a żółty Saturn – melona, ale już poza Starym Miastem.



Fot. 4.19. Układ Słoneczny w skali owocowo-warzywniej: **a)** pomnik Kopernika na Rynku Starego Miasta w Toruniu (wysokość – 2,6m); Kopernik trzymający Słońce w skali „owocowej”; **b)** planety w tej samej skali (foto M. Więcek); **c)** widok na Rynek Starego Miasta w Toruniu, w głębi gotycki Kościół pw. Wniebowstąpienia Najświętszej Marii Panny (foto MK)



Fot. 4.20. Zdjęcia przedstawiają satelitarną mapę Torunia z zaznaczonymi orbitami planet w skali „owocowej”: **a)** Słońce oraz planety skaliste (Merkury, Wenus, Ziemia i Mars) znajdują się na Starym Mieście; **b)** Pozostałe planety oraz planeta karłowata Pluton. Białym obszarem zaznaczony jest fragment w którym zawiera się obszar „a)” (Mapy: <http://maps.google.pl/>).

Zadanie:

1. Spójrz na mapę miasta, w którym mieszkasz. Spróbuj umieścić w nim planety w tej samej skali, co w podręczniku.

W jakiej odległości od pomnika Kopernika w Toruniu znalazła by się najbliższa Słońcu gwiazda – Proxima Centauri? Jej odległość od Słońca wynosi około 4 lata świetlne.

Pytania kontrolne:

1. Ile razy (w dużym przybliżeniu) odległość Ziemia – Słońce jest większa od średnicy Słońca? Sto, tysiąc, milion, sto milionów?
2. W jakiej względnej odległości od Ziemi i od Księżyca latają satelity geostacjonarne? Bliżej Ziemi czy bliżej Księżyca?
3. Ile, w przybliżeniu (w mln km) wynosi jednostka astronomiczna długości AU?
4. Wymień 8 planet Układu Słonecznego i podaj, w przybliżeniu, ich odległości od Słońca w jednostkach astronomicznych (w postaci ułamków zwykłych i liczb całkowitych).
5. Oblicz, z jaką prędkością porusza się po Ziemi cień Księżyca w czasie zaćmienia Słońca. Obliczenie wykonaj dla równika, 20 marca, uwzględnij tylko ruch obrotowy Ziemi wokół własnej osi.
6. Znajdź w Internecie, jaką gwiazdę będzie wskazywała oś Ziemi (jej północny biegun) w roku 14 000.
7. (trudne) Ze znanych odległości Wenus i Ziemi od Słońca oraz średnicy Słońca oblicz, ile maksymalnie może trwać tranzyt Wenus na tarczy Słońca (Wskazówka: oblicz szerokość kątową tarczy Słońca po czym skorzystaj z III prawa Keplera i oblicz prędkości kątowe Wenus i Słońca).