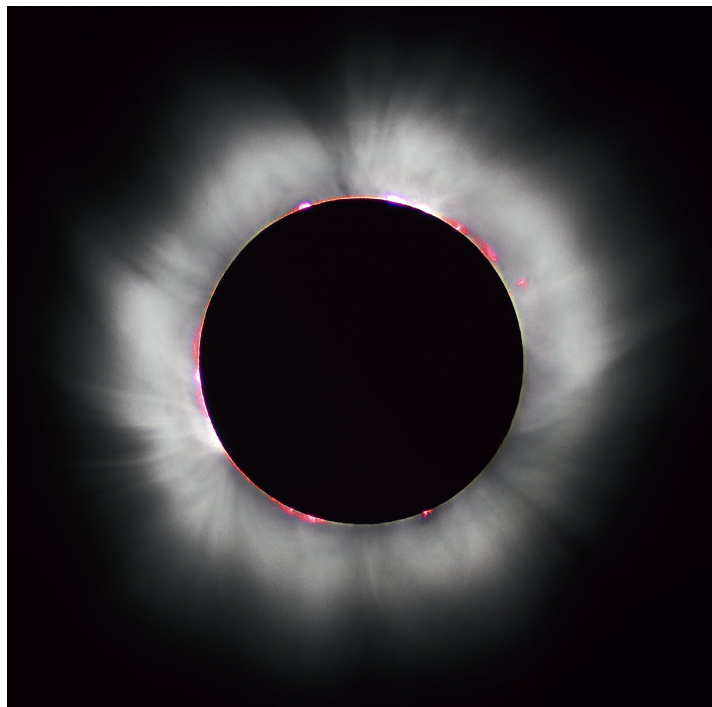


Jak daleko jest do planet, Słońca i gwiazd?

Jak daleko jest do planet, Słońca i gwiazd?

Kiedy patrzymy na niebo, to odnosimy wrażenie, że wszystkie obiekty, które na nim widzimy znajdują się w jednakowej odległości od Ziemi. Już w starożytności przyjmowano, że wszystkie obiekty widoczne na niebie leżą na powierzchni sfery niebieskiej. Ówcześni badacze uważali, że między sferą gwiazd stałych a Ziemią krążą ciała niebieskie, takie jak planety, Słońce i Księżyc. Ten ostatni często zakrywał gwiazdy, więc musiał być bliżej. Komety przez wiele stuleci uważano za obiekty występujące w atmosferze Ziemi. Jak dzisiaj wyznaczamy odległości w Kosmosie?



Podczas niektórych zaćmień całkowitych Słońca obserwator na Ziemi ogląda tarczę Księżyca idealnie zakrywającą tarczę Słońca. Dzięki temu możliwe jest obserwowanie korony słonecznej, czyli najbardziej zewnętrznej części atmosfery słonecznej

Źródło: Luc Viatour, dostępny w internecie: commons.wikimedia.org [dostęp 2.01.2022], licencja: CC BY-SA 3.0.

Przed przystąpieniem do zapoznania się z tematem, należy znać poniższe zagadnienia

- kąty wierzchołkowe i kąty przyległe oraz ich właściwości;
- trójkąty ostrokątne, prostokątne i rozwartokątne, a także równoboczne oraz równoramienne;

- twierdzenie o sumie kątów trójkąta.

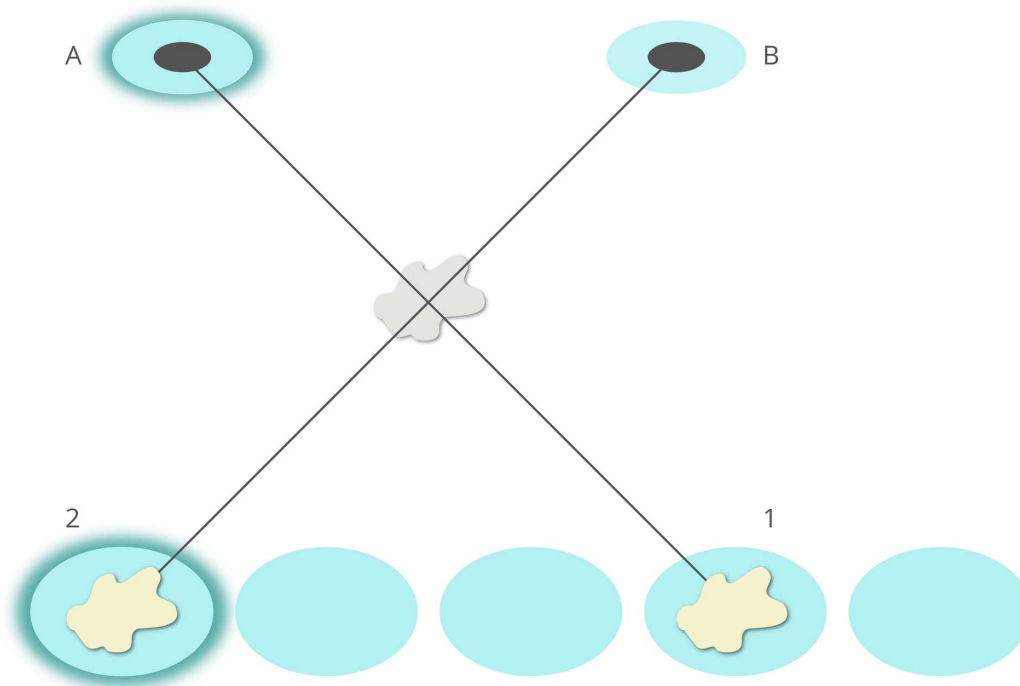
Nauczysz się

- wyznaczać odległości do oddalonych punktów z wykorzystaniem zjawiska paralaksy;
- interpretować rok świetlny jako jednostkę odległości;
- posługiwać się jednostką astronomiczną do opisu odległości w Układzie Słonecznym.

Na czym polega zjawisko paralaksy

Skąd wiemy, jak daleko od nas znajduje się jakaś rzecz? Pomińmy przedmioty znajdujące się w naszym najbliższym otoczeniu i zajmijmy się oceną odległości od domów, drzew, samolotów. Wykorzystujemy tu właściwości atmosfery i oka – im dalej znajduje się dany obiekt, tym bardziej jest on zamglony. Ma również mniejsze rozmiary katowe. Jeśli przedmiot znajduje się blisko nas, widzimy dużo szczegółów, jeśli daleko – tylko ogólny zarys. Na ogół widzimy przedmioty i z bliska, i z daleka, dzięki czemu mamy skalę porównania. Brakuje nam jej jednak w odniesieniu do Księżyca, Słońca i gwiazd, gdyż są one zbyt daleko. Gwiazdy (poza Słońcem) widzimy jako punkty niezależnie od tego, w jakiej odległości od nas się znajdują. Warto wspomnieć, że głównymi przeszkodami w rozwoju astronomii obserwacyjnej były brak możliwości pomiaru odległości i nieuwzględnianie skutków ruchu obrotowego Ziemi.

W wyznaczaniu odległości pomocne okazało się [zjawisko paralaksy](#). Na rysunku poniżej widać, że gdy patrzymy z punktu *A*, chmurkę widzimy w miejscu, oznaczonym jako 1, a gdy patrzymy z punktu *B* – widzimy ją w zupełnie innym miejscu (oznaczonym jako 2). Przesunięcie obserwatora z punktu *A* do *B* powoduje przesunięcie obrazu obiektu oglądanego przez tego obserwatora z położenia pierwszego do drugiego.



Gdy przesuwamy się z punktu A do punktu B, to przedmiot obserwacji ulega pozornemu przemieszczeniu (w stosunku do przedmiotów bardziej oddalonych)

Źródło: Tomorrow Sp. z o.o., licencja: CC BY 3.0.

To zjawisko przeważnie jest niekorzystne. Jest np. źródłem błędu odczytu wielkości fizycznych za pomocą mierników wskazówkowych. Gdy odczytujemy położenie wskazówki na tle skali, to oko umieszczone w punkcie A widzi inną wartość niż oko znajdujące się w położeniu B. Podobny błąd popełniamy, kiedy odczytujemy temperaturę na skali termometru.

Błąd spowodowany zjawiskiem paralaksy pojawia się również w niektórych aparatach fotograficznych – zarejestrowany obraz jest przesunięty w stosunku do tego, co widzieliśmy w wizjerze.

Ćwiczenie 1

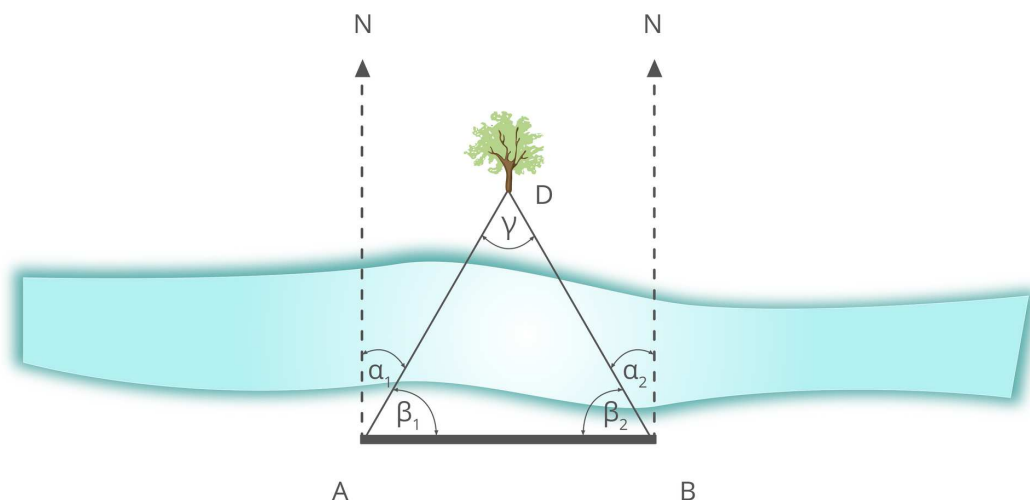
Jak powinno być ustawione oko, aby w wyniku zjawiska paralaksy nie doszło do błędnego odczytu położenia wskazówki miernika? Uzasadnij odpowiedź.

Źródło: GroMar Sp. z o.o., licencja: CC BY-SA 3.0.

Przesunięć gwiazd, które znajdują się bliżej Ziemi w stosunku do tych bardziej oddalonych spodziewano się od momentu ogłoszenia teorii Kopernika. W wyniku ruchu Ziemi dookoła Słońca powinniśmy obserwować przesuwanie się bliższych gwiazd na tle dalszych. Jednak niczego takiego w tamtych czasach nie stwierdzono. Dlaczego?

Przyjrzyjmy się uważnie rysunkowi powyżej. Gdyby przyjąć, że odległość AB to średnica orbity Ziemi (czyli – w ujęciu teorii Kopernika – okręgu, po jakim nasza planeta porusza się dookoła Słońca), to przesunięcie ciała niebieskiego (naszej chmurki) na tle oddalonego obiektu jest tym mniejsze, im dalej ten obiekt się od nas znajduje. Przy bardzo dużych odległościach przesunięcie będzie niemierzalne. Wszystko zależy więc od dokładności pomiarowej użytych przyrządów (a ściślej – dokładności pomiaru małych kątów).

Co nam daje znajomość geometrii, czyli jak zmierzyć odległość do obiektów, do których nie można dotrzeć?



Jak wyznaczyć odległość do drzewa?

Źródło: Tomorrow Sp. z o.o., licencja: CC BY 3.0.

Po drugiej stronie rzeki rośnie drzewo. W jakiej odległości od nas się ono znajduje?

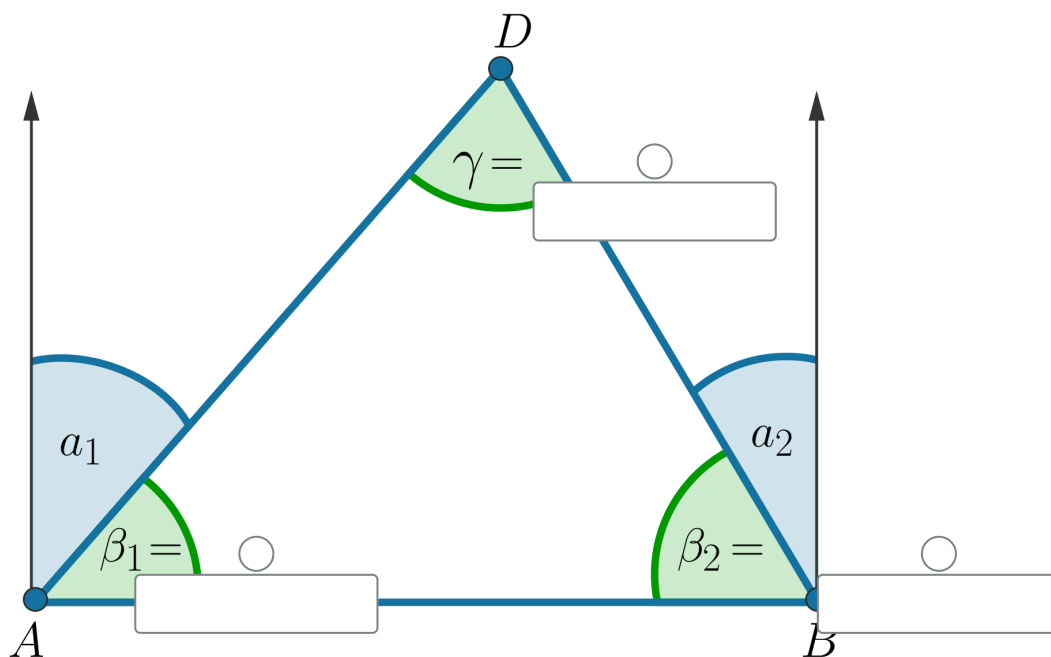
Na brzegu rzeki, na którym stoimy, wyznaczamy tzw. bazę AB – odcinek o długości kilkunastu lub kilkudziesięciu metrów. Im dalej od nas znajduje się drzewo, tym dłuższy powinien być ten odcinek.

Kiedy znajdujemy się w punkcie A , mierzymy kąt między kierunkiem północnym a kierunkiem, w jakim spoglądamy patrząc na drzewo. Czynność tę powtarzamy, kiedy znajdujemy się w punkcie B . Kierunek północny wyznaczony w punkcie A jest równoległy do kierunku północnego wyznaczonego w punkcie B ; oba te kierunki są prostopadłe do odcinka AB . Ten ostatni warunek nie jest konieczny, ale ułatwi rozumowanie tym, którzy jeszcze nie polubili geometrii.

Z pomiarów znamy wartości kątów α_1 i α_2 . Z prostych zależności obliczamy wartości kątów β_1 i β_2 w trójkącie ABD i wartość kąta γ . Znamy zatem wartości wszystkich kątów w tym trójkącie i długość jednego boku. Pozwala to obliczyć długości pozostałych boków.

Ćwiczenie 2

Poniższy rysunek przedstawia sytuację z wcześniejszej ilustracji. Wartości kątów α_1 i α_2 wynoszą odpowiednio 40° i 30° . Oblicz wartości wszystkich kątów w trójkącie ABD i wpisz je w odpowiednie miejsca na rysunku.

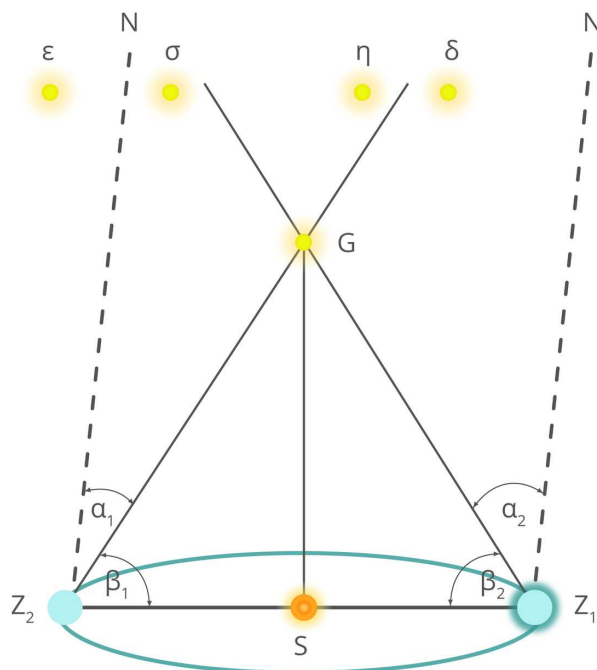


Źródło: GroMar Sp. z o. o., licencja: CC BY-SA 3.0.

A gdzie w tym wszystkim jest paralaksa?

No właśnie, pisaliśmy o pomiarze odległości do drzewa, a gdzie w tym wszystkim są paralaksa i gwiazdy?

Zacznijmy od powszechnie znanego faktu, że Ziemia krąży wokół Słońca.



Zjawisko paralaksy rocznej

Źródło: Tomorrow Sp. z o.o, licencja: CC BY 3.0.

Jak widać na powyższej ilustracji, gwiazda G w wyniku obiegu Ziemi dookoła Słońca stanie się widoczna obok gwiazdy σ (sigma), gdy Ziemia znajdzie się w punkcie Z_1 orbity, oraz między gwiazdami η (eta) i δ (delta), gdy będzie w położeniu Z_2 na orbicie. Takie zjawisko można zaobserwować w rzeczywistości.

kąt paralaksy

kąt, pod którym z danej gwiazdy widoczna byłaby wielka półość (czyli w uproszczeniu promień albo średnia odległość od Słońca) orbity Ziemi.

Niestety, jest pewien problem: aby skorzystać z powyższej definicji i zmierzyć [kąt paralaksy](#), należałoby polecieć tam, gdzie ta gwiazda się znajduje. Od najbliższej (poza Słońcem) gwiazdy światło biegnie do Ziemi przez ponad 4 lata, a obecna technika pozwalałaby odbyć taką podróż w czasie dziesiątków tysięcy lat. Na szczęście nie musimy nigdzie lecieć, ponieważ dzięki własnościom geometrycznym trójkąta i poprzez pomiar kątów α_1 i α_2 , możemy poznać wartość kąta paralaksy z Ziemi.

Ćwiczenie 3

Wykorzystaj powyższy rysunek i właściwości geometryczne trójkąta oraz prostych równoległych i wykaż, że kąt paralaksy p można obliczyć ze wzoru:

$$p = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$$

Źródło: GroMar Sp. z o.o., licencja: CC BY-SA 3.0.

Aby zmierzyć kąt paralaksy dla gwiazd, trzeba było czekać do połowy XIX wieku – dopiero w 1839 r. trzech astronomów – Friedrich von Struve, Friedrich Bessel i Thomas Henderson – niezależnie od siebie wyznaczyli wartości kątów paralaksy dla kilku najbliższych gwiazd. Ich pomiary spowodowały zdjęcie dzieła Kopernika z indeksu ksiąg zakazanych. Wyznaczenie pierwszych paralaks dla gwiazd nie było jednak jedynym dowodem na ruch Ziemi dookoła Słońca. Ponad sto lat wcześniej, w latach 1725 – 26, odkryto i wyjaśniono zjawisko [aberracji światła gwiazd](#). Dokonał tego [James Bradley](#).

Pomiary paralaksy są bardzo żmudnym zajęciem. W latach 1989 – 93 satelita Europejskiej Agencji Kosmicznej, nazwany Hipparcos na cześć astronoma Hipparcha, dokonał pomiarów paralaksy dla około 2,5 miliona gwiazd. Oprócz astrometrii satelita realizował również program fotometryczny, czyli pomiary natężenia światła pochodzącego od gwiazd. Wykrył duże liczby gwiazd podwójnych, a także zbadał zmiany promieniowania tysięcy gwiazd zmiennych. Do wyznaczenia paralaks potrzebna była dokładność rzędu 0,001 [sekundy łuku](#). Aby wyobrazić sobie, jaka to wartość, wystarczy przypomnieć sobie, że katowe średnice Słońca lub Księżyca na niebie wynoszą w przybliżeniu około pół stopnia, czyli 1800 [sekund katowych](#).

Dlaczego tak trudno było wyznaczyć kąt paralaksy? Odległości do gwiazd okazały się znacznie większe, niż przypuszczano. Paralaksa najbliższej (poza Słońcem) gwiazdy wynosi około 0, 78'' (sekundy kątowej). Jest to gwiazda o nazwie Proxima Centauri. Słowo „Proxima” oznacza po prostu „najbliższa”. Ta gwiazda znajduje się na południowej półkuli nieba, w gwiazdozbiornie Centaura. Razem z podwójną gwiazdą α Centauri tworzy układ potrójny gwiazd.

Jakich jednostek używamy do opisu odległości gwiazd i planet?

Do opisu odległości astronomowie używają jednostki związanej bezpośrednio z kątem paralaksy. Ta jednostka to [parsek](#) (1 pc) i oznacza ona odległość, z jakiej paralaksa roczna Ziemi widziana prostopadle do płaszczyzny jej orbity wynosi 1'', a jej przybliżona definicja przedstawia się następująco:

$$D \left(\text{odległość w parsekach} \right) = \frac{1}{p''}$$

W powyższym wzorze p to wartość kąta paralaksy obiektu, do którego odległość w parsekach chcemy obliczyć, podana w sekundach kątowych, zaś D to obliczona odległość w parsekach. Przykładowo: paralaksa Proximy wynosi 0, 78'', zatem jej odległość od Ziemi to:

$$\frac{1}{0,78} = 1,28 \text{ pc}$$

Jest to wygodna jednostka – dwie najbliższe nam gwiazdy (Słońce i Proxima) są odległe od siebie ok. 1 parsek. Używane są też wielokrotności tej jednostki: kiloparsek (kpc), megaparsek (Mpc) i gigaparsek (Gpc).

Dzięki trygonometrii, którą niedługo poznasz w szkole, można obliczyć ile kilometrów mieści się w jednym parseku. Otrzymujemy ogromną liczbę, tj. $3,086 \cdot 10^{13}$ km lub $3,086 \cdot 10^{16}$ m. Oznacza to, że odległość do Proximy wynosi około 40 bilionów kilometrów.

Popularną jednostką używaną w artykułach popularnonaukowych jest jeden [rok świetlny](#) (1 ly – skrót od słów light year). Jest to odległość, jaką światło przebywa w próżni w ciągu roku. Łatwo obliczyć, jaka jest to odległość – może obliczycie ją sami?

Ćwiczenie 4

Oblicz, ile kilometrów i metrów ma 1 rok świetlny oraz ile lat świetlnych to jeden parsek. Jako prędkość światła przyjmij $300000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$.

Źródło: GroMar Sp. z o.o., licencja: CC BY-SA 3.0.

Wiemy już, jak wyznaczyć odległość do gwiazd. Przyrządy satelity Hipparcos pozwalają wyznaczyć dokładne odległości do 1000 pc. Galaktyka jest jednak znacznie większa; znacznie większa jest także odległość do innych galaktyk. Jak się wyznacza tak ogromne odległości? Wspomnimy o tym w dalszej części podręcznika.

A Układ Słoneczny? Czy do wyznaczania odległości można wykorzystać inne metody? Odkrycie trzech praw Keplera opisujących ruch planet (zwłaszcza III prawa) pozwoliło obliczyć odległości od planet do Słońca. Przyjmijmy przy tym, że jednostka odległości równa 1 odpowiada odległości między Ziemią a Słońcem. Taką jednostkę nazywamy [jednostką astronomiczną](#). Jej wartość wynosi w przybliżeniu 149 600 000 km. Jednostkę astronomiczną oznaczamy jako au (astronomical unit). 1 parsek jest równy 206 265 au.

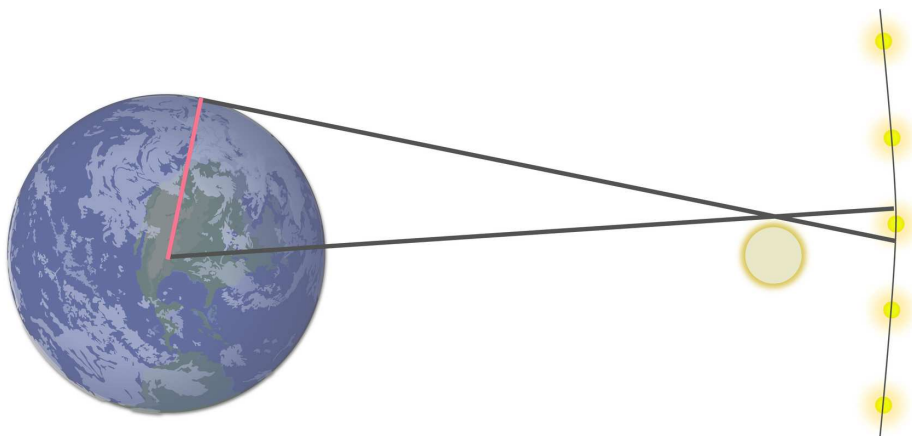
Ćwiczenie 5

Pełen obieg Marsa wokół Słońca wynosi 1,88 roku (ziemskiego). Oblicz odległość od Słońca do Marsa. Wynik podaj w jednostkach astronomicznych oraz kilometrach i zaokrąglaj do dwóch miejsc po przecinku w przypadku jednostek astronomicznych oraz do pełnych milionów kilometrów. Podczas obliczeń warto skorzystać z kalkulatora naukowego lub arkusza kalkulacyjnego. Uzupełnij luki w odpowiedzi, wpisując odpowiednie liczby.

Odpowiedź: Odległość Marsa od Słońca wynosi ok. au (jednostek astronomicznych), co w przeliczeniu daje nam ok. milionów km.

Źródło: ZPE, licencja: CC BY 3.0.

A jak wyznaczyć odległość z Ziemi do Księżyca? Opisane wyżej metody nie znajdują tu zastosowania – Księżyc znajduje się stosunkowo blisko Ziemi. Jest ona jednak kilkukrotnie od niego większa – można zatem wykorzystać pomiary wykonywane na Ziemi. W tym celu posługujemy się zjawiskiem paralaksy geocentrycznej.



Zjawisko paralaksy geocentrycznej – obserwatorzy w różnych miejscach na Ziemi widzą tarczę Księżyca ułożoną odrobinę inaczej względem gwiazd

Źródło: Tomorrow Sp. z o.o., licencja: CC BY 3.0.

W tym samym momencie tarcza Księżyca ułożona jest inaczej względem gwiazd z perspektywy obserwatora (w pobliżu bieguna Ziemi), dla którego Księżyc znajduje się

w płaszczyźnie horyzontu, a inaczej dla obserwatora (bliżej równika), dla którego Księżyc jest w zenicie. Wyznaczenie kątów w sposób podobny jak dla [paralaksy heliocentrycznej](#) pozwala wyznaczyć odległość do Księżyca.

Obecnie odległość do Księżyca wyznacza się za pomocą zjawiska odbicia światła laserowego wysłanego z Ziemi i odbitego od specjalnych odbłyśników umieszczonych na powierzchni naszego naturalnego satelity, m.in. dzięki wyprawom kosmicznym. Orbita Księżyca jest orbitą eliptyczną. Minimalna odległość od Księżyca do Ziemi wynosi 356 500 km (odległość do najbliższego perygeum), a maksymalna 406 700 km (odległość do najdalszego apogeum). Połowa wielkiej osi elipsy wynosi około 384 700 km.

Podsumowanie

- Zjawisko paralaksy heliocentrycznej (czyli pozornego przesuwania się gwiazd znajdujących się bliżej Ziemi w stosunku do tych dalszych, co jest wynikiem zmiany położenia obserwatora) pozwoliło potwierdzić teorię Kopernika i wyznaczyć odległości do najbliższych gwiazd.
- W astronomii używane są różne jednostki, za pomocą których wyraża się odległość do gwiazd lub planet. W Układzie Słonecznym najwygodniejszą jednostką jest jednostka astronomiczna (1 au), równa średniej odległości między Ziemią a Słońcem, czyli 149 597 870 700 m. Astronomowie używają jednostki zwanej parsekiem (skrót od wyrażenia **paralaksa sekundowa**). Kąt paralaksy dla gwiazdy odległej o 1 parsek (1 pc) wynosiłby 1". W życiu codziennym często używa się jednostki zwanej rokiem świetlnym (1 ly). Jest to odległość, jaką światło przebywa w próżni w ciągu jednego roku.
- Do wyznaczenia odległości obiektów znajdujących się stosunkowo blisko Ziemi, takich jak Księżyc czy planety Układu Słonecznego, wystarczają dwa punkty na Ziemi. Zmiana położenia obserwatora o kilka czy kilkanaście tysięcy kilometrów wystarczy do wykazania zjawiska paralaksy i wyznaczenia odległości.

Ćwiczenie 6

Dopiero w 1839 r. trzech astronomowie (niezależnie od siebie) zmierzili pierwsze paralaksy gwiazd. Byli to: Wilhelm Struve, który w Dorpacie wyznaczył paralaksę Wega, Friedrich Bessel, który w Królewcu zmierzył paralaksę gwiazdy 61 Cygni, i Thomas Henderson, który w latach 1832 – 33 w Kapsztadzie dokonywał pomiarów współrzędnych gwiazdy α Centauri. Wykonaj odpowiednie obliczenia i uzupełnij poniższy tekst. Przyjmij, że 1 rok świetlny = 0,3066 pc.

Uzupełnij luki w zdaniach, przeciągając odpowiednie liczby lub nazwy gwiazdozbiorów, lub wejdź w pole i wybierz odpowiedni element z listy rozwijalnej.

- Paralaksa roczna gwiazdy 61 Cygni wynosi 0,29". Odległość od Ziemi do tej gwiazdy wynosi ok. roku świetlnego.
- Odległość dzieląca Ziemię od Wega wynosi 25,3 roku świetlnego. Paralaksa tej gwiazdy wynosi sekund kątowych.
- 61 Cygni znajduje się w gwiazdozbiorze , Wega w gwiazdozbiorze , zaś α Centauri w gwiazdozbiorze .

7,4	Centaura	Lutni	0,18"	0,09"	11,25	Łabędzia	Strzelca
Oriona	Wielkiej Niedźwiedzicy	0,13"	15,92				

Źródło: ZPE, licencja: CC BY 3.0.

Słownik

aberracja światła gwiazd

pozorne odchylenie położenia ciała niebieskiego na sferze niebieskiej od jego położenia rzeczywistego spowodowane ruchem Ziemi. Pełnego opisu tego zjawiska dostarcza fizyka relatywistyczna.

jednostka astronomiczna (1 au)

połowa wielkiej osi elipsy, po której krąży Ziemia dookoła Słońca; inaczej – średnia odległość od Ziemi do Słońca, wynosząca 149 597 870,7 km.

paralaksa (zjawisko)

pozorne przesuwanie się obiektów bliższych w stosunku do dalszych w wyniku zmiany położenia obserwatora; poza astronomią to zjawisko istotne jest także w miernictwie i fotografii.

paralaksa heliocentryczna

połowa kąta, o jaki przesunie się gwiazda na sferze niebieskiej podczas przejścia Ziemi z jednego punktu orbity okołosłonecznej na przeciwległy punkt tej orbity; inaczej – kąt, pod jakim z danej gwiazdy byłaby widziana połowa wielkiej osi elipsy, po której krąży Ziemia (średnia odległość między Ziemią a Słońcem).

parsek

jednostka odległości używana w astronomii; jeden parsek równy jest odległości od Ziemi do gwiazdy, której paralaksa roczna położenia Ziemi wynosi $1''$ (jedną sekundę kątową).

rok świetlny

odległość, jaką światło przebywa w próżni w ciągu jednego roku.

sekunda kątowa, minuta kątowa

kąt pełny dzieli się na 360 stopni, jeden stopień – na 60 minut kątowych, a każda minuta kątowa – na 60 sekund kątowych; ze względu na podobieństwo nazw „minuta” i „sekunda” używanych jako jednostki czasu należy używać pełnych nazw, a więc: minuta kątowa, sekunda kątowa; minuty kątowe zapisuje się za pomocą znaku $'$ (np. $1'$), natomiast sekundy kątowe – za pomocą znaku $''$ (np. $1''$).

Biogram



James Bradley, astronom angielski, który dokonał dwóch fundamentalnych odkryć: aberracji światła oraz nutacji – zaburzeń ruchu osi Ziemi pod wpływem oddziaływania grawitacyjnego Księżyca

Źródło: Thomas Hudson, dostępny w internecie: <http://commons.wikimedia.org>, domena publiczna.

James Bradley

1692.9 Sherborne – 1762.07.13 Chalford

Bradley mierzył zmiany położenia gwiazd na niebie, przy czym te zmiany były dostrzegalne w cyklu rocznym. Badacz otrzymał jednakowe wyniki dla wszystkich gwiazd, które obserwował, zatem obserwowane zjawisko nie mogło być efektem paralaksy rocznej. Bradley interpretował je jako proces wynikający ze skończonej prędkości światła. W ten sposób wykazał dwie rzeczy: że Ziemia krąży dookoła Słońca i że prędkość światła jest skończona. W 1742 r. James Bradley uzyskał tytuł Astronoma Królewskiego i do końca życia pracował oraz mieszkał w obserwatorium w Greenwich.