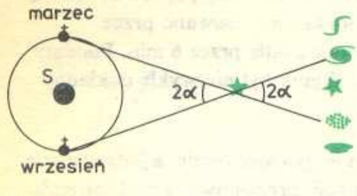
O odległościach astronomicznych

Mgr Tomasz CHLEBOWSKI



Mierzenie paralaksy gwiazdy.

Łatwo jest wyobrazić sobie, jak mierzymy odległości do gwiazd. Podstawową metodą wyznaczania tych odległości, na której oparte są wszystkie inne metody, jest pomiar paralaksy trygonometrycznej. Paralaksa gwiazdy jest to kąt, pod którym widziany jest z gwiazdy średni promień orbity Ziemi (przy założeniu, że promień ten jest prostopadły do linii widzenia).

Kąt ten mierzymy w taki sposób, że wyznaczamy zmianę położenia gwiazdy w ciągu pół roku na tle obiektów, o których wiemy, że znajdują się nieporównywalnie dalej (uznajemy, że w nieskończoności). Jest to kąt tak mały, że metoda ta pozwala na pomiar odległości tylko kilku tysięcy najbliższych gwiazd. Odległości dużo większe, do bliskich i dalekich galaktyk i kwazarów, wyznaczane są zupełnie innymi, przybliżonymi metodami. Ich dokładność ma decydujące znaczenie dla konstruowania i weryfikowania modeli kosmologicznych.

Operowanie metrami czy parsekami przy tak ogromnych odległościach nie jest wygodne. Odległość do najbliższej gromady gwiazd — *Hiad* — wynosi 44 pc, odległość do ogromnej galaktyki M101 — 7,2 Mpc, do najdalszych obserwowanych obiektów — niemal 3 Gpc. Wprowadźmy więc wygodniejszą wielkość opartą na pojęciu wielkości gwiazdowej.

Przypominamy, że absolutna wielkość gwiazdowa M jest to jasność gwiazdy m sprowadzonej do standardowej odległości 10 pc. $M = m+5-5\log r$.

Modułem odległości nazywamy wielkość $m-M(=5\log r-5)$. Jego sens fizyczny jest następujący: o tyle wielkości gwiazdowych będzie jaśniejszy obiekt, jeśli ustawimy go w odległości 10 pc. Moduł odległości do Słońca wynosi $-31{,}57$, natomiast do gromady galaktyk *Virgo* $+31{,}7$.

Wyobraźmy sobie, że wiemy, jaka jest wielkość absolutna danej gwiazdy. Niech to będzie biały karzeł w Hiadach. Wszystkie jego parametry przemawiają za tym, że jego wielkość absolutna powinna być $M = +11^{m}{,}00$. Natomiast wielkość widoma uzyskana z obserwacji wynosi $m = +14^{m}{,}23$. Stąd moduł odległości do tej gwiazdy $+3{,}23$.

Spróbujmy wyznaczyć teraz moduł odległości do dalekiej gromady galaktyk w gwiazdozbiorze Panny (pamiętając o tym, że tonący chwyta się brzytwy).

Najwygodniejszą miarką pozwalającą na wyznaczanie odległości galaktyk jest zależność między okresem a jasnością dla cefeid. Cefeidy — bardzo jasne gwiazdy zmienne ($M \sim -2^{m} \div -5^{m}$) mają tę własność, że istnieje prosta zależność między okresem zmian i absolutną wielkością gwiazdową. Wyznaczając okres i średnią jasność widomą otrzymujemy moduł odległości.

Gromada w Pannie jest jednak tak daleko, że nie obserwujemy w niej cefeid. Ponieważ najsłabsze rejestrowane gwiazdy mają jasność $m = +21^{m}$, więc $m-M > 26$.

Najjaśniejsze czerwone nadolbrzymy — jedne z najjaśniejszych gwiazd w galaktykach — są również dobrymi wskaźnikami odległości. Mają one absolutną wielkość $M \sim -8^{m}$. Takich czerwonych gigantów również w gromadzie Panny nie znaleziono, więc $m-M > 29$.

Najjaśniejsze niebieskie gwiazdy zmienne mają absolutną jasność do $M \sim -10^{m}$, więc gdybyśmy zaobserwowali takie gwiazdy w którejś z galaktyk, to można by wyciągnąć wniosek, że moduł odległości jest mniejszy niż 32. Niebieskie zmienne nadolbrzymy nie występują jednak we wszystkich galaktykach, więc z faktu, że nie widzimy ich w Pannie, nie możemy wyciągnąć żadnego wniosku.

W ogóle najjaśniejszymi gwiazdami, jakie istnieją w przyrodzie, są żółte nadolbrzymy typu F. Najjaśniejsze z najjaśniejszych mają wielkość $M \sim -11^{m}{,}0$. W jednej z galaktyk wchodzących w skład gromady w Pannie zaobserwowano takie gwiazdy. Najjaśniejsza z nich ma jasność $m = 20^{m}{,}8$. A więc jest to pierwsza ocena modułu odległości. Wynosi on 31,7 z dość dużym błędem 0,5. Kolejną metodą wyznaczania dużych odległości są pomiary jasności gwiazd nowych i supernowych w maksimum blasku. Badana gromada jest tak daleko, że wybuchów nowych nie obserwujemy, natomiast wybuchy supernowych obserwowano w ciągu ostatnich 60 lat ośmiokrotnie. Najjaśniejsze z supernowych osiągają w maksimum blasku wielkość $M = -20^{m}{,}8$ (czyli tyle, co cała galaktyka). Znając własności supernowych z bliższych galaktyk i rejestrując jasność supernowych w Pannie na poziomie $m = +12^{m} \div +14^{m}$, możemy wyznaczyć moduł odległości do gromady na $m-M = 32{,}2 \pm 0{,}6$, co nie jest sprzeczne z poprzednim wynikiem.

Badając bliskie galaktyki możemy analizować również inne zależności, np. zależność jasności i promieni obłoków zjonizowanego wodoru od widm oświetlających je gwiazd.

Z obserwacji jednego takiego obłoku, który udało się odnaleźć w gromadzie Panny, otrzymujemy $m-M = 31{,}9 \pm 0{,}3$.

Galaktyki wchodzące w skład gromady zawierają dużą liczbę kulistych gromad gwiazd. Przebieg zależności jasności gromad kulistych od częstości ich występowania skalibrowany na bliskich obiektach daje moduł odległości $31{,}65 \pm 0{,}5$.

Wyciągając średnią z wszystkich tych i jeszcze kilku innych rezultatów ważoną ich dokładnością otrzymujemy ostatecznie moduł odległości do gromady galaktyk w Pannie:

$$m-M = 31{,}7 \pm 0{,}08 \quad \text{czyli} \quad r = 21{,}9 \pm 0{,}9 \ \text{Mpc}.$$

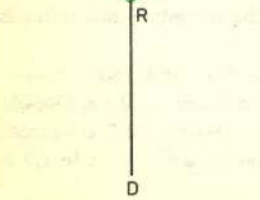
Średnia prędkość radialna układu 102 galaktyk wchodzących w skład tej gromady wynosi $V_R = 1100$ km/s z prędkościami względnymi średnio $\delta V_R = 68$ km/s.

A więc z powyższych danych możemy wyznaczyć stałą Hubble'a

$$H_0 = \frac{V_R}{r} = (50{,}3 \pm 4{,}2)\ \text{km}\,\text{s}^{-1}\ \text{Mpc}^{-1}.$$

Rozwiązanie zadania M 203

Niech P, Q, R będą punktami leżącymi odpowiednio na odcinkach $\overline{CA}$, $\overline{CB}$ i $\overline{CD}$ w odległości $\frac{1}{4}$ od punktu C. Można sprawdzić, że jeżeli „litery T" $\overline{AB} \cup \overline{CD}$ i $\overline{A'B'} \cup \overline{C'D'}$ są rozłączne, to również odpowiadające im trójkąty PQR i $P'Q'R'$ są rozłączne. Trójkąt PQR ma pole $\frac{1}{16}$ i w obszarze ograniczonym można zmieścić tylko skończenie wiele trójkątów z nim izometrycznych i rozłącznych. Stąd wynika, że w tym obszarze można pomieścić tylko skończoną liczbę rozłącznych „liter T". Widzimy też, że liczba ta nie przekracza 16 × pole danego obszaru, ale to oszacowanie jest bardzo „grube".



Gromada w Pannie jest jednym z najdalszych układów, których odległość wyznaczono kilkoma niezależnymi metodami. Odległości bardziej oddalonych obiektów możemy wyznaczać jedynie po dokonaniu karkołomnych założeń, np. że wszystkie galaktyki spiralne mają tę samą średnicę, lub że wszystkie galaktyki mają tę samą jasność!
Natomiast korzystając z prawa Hubble'a możemy wyznaczać odległości jeszcze dalszych obiektów (wszystkich jasnych na tyle, że możemy zmierzyć przesunięcie linii widmowych ku czerwieni) aż do momentu, kiedy krzywizna przestrzeni spowoduje, że prawo to nie będzie już liniowe. Wtedy musimy zdecydować się na określoną geometrię Wszechświata, aby dalej stosować prawo Hubble'a dostosowane do geometrii nieeuklidesowej.

Laboratorium w domu

Mgr Janusz GĄSIŃSKI

Pomiar, który można (a nawet należy) wykonać z zamkniętymi oczami

Tym razem za obiekt pomiarów wybierzemy Słońce. Postaramy się wyznaczyć ilość energii emitowanej w przestrzeń oraz temperaturę powierzchniową Słońca. Nasz cel będziemy starali się osiągnąć najprostszymi metodami, stąd konieczność dokonania podczas pracy rozmaitych uproszczeń, co w efekcie obwaruje wynik pewnymi zastrzeżeniami.
Część pomiarowa sprowadza się do wyznaczenia stałej słonecznej, czyli ilości energii, jaką otrzymuje jednostka powierzchni (prostopadła do padających promieni) w średniej odległości Ziemi od Słońca, poza atmosferą, w jednostce czasu.
Pomiar polega na porównaniu promieniowania Słońca z promieniowaniem żarówki (np. 200-watowej) o bańce ze szkła przezroczystego.
Jako fotometru użyj zamkniętych oczu. W słoneczny dzień zapal żarówkę, odczekaj aż się nagrzeje, a następnie zamknij oczy i zbliż do niej twarz (nie oparz nosa). Twoje oczy dostrzegą czerwień, oraz odczujesz ciepło (promieniowanie podczerwone). Nie otwierając oczu obróć twarz do Słońca, doznasz podobnych wrażeń. Postaraj się teraz umieścić twarz w takiej odległości od żarówki, by odcień czerwonego światła, widziany przez powieki, był taki sam, jak w przypadku „patrzenia" na Słońce. Zgodność odcieni będzie oznaczała równość natężenia promieniowania Słońca i żarówki. Równość ta dotyczy oczywiście zakresu światła widzialnego i częściowo podczerwieni przy dodatkowym założeniu, że widmo światła żarówki jest zbliżone do słonecznego i że rozkład tego promieniowania jest, podobnie jak w przypadku Słońca, równomierny we wszystkich kierunkach.
Pomiar odległości powiek od żarówki (*d*), przy której stwierdzisz zgodność natężeń promieniowania, kończy część doświadczalną.

Przy pomiarach natężeń źródła światła posługujemy się metodą porównawczą. Najprostszym przyrządem jest fotometr Bunsena, w postaci kartki z tłustą plamką. Przy równym oświetleniu plamka znika.

Przystępujemy do obliczeń

a) Stała słoneczna (*S*)
Znając moc żarówki (*P*) i wyznaczoną odległość (*d*) możesz obliczyć ilość energii (*E*) wydzieloną przez żarówkę na jednostkę czasu (*t*) i powierzchni (*u*) w pobliżu powiek $\frac{E}{t \cdot u} = \frac{P}{4\pi d^2}$.
Wielkość ta, po uwzględnieniu podanych powyżej zastrzeżeń, będzie poszukiwaną stałą słoneczną $(S) = \frac{P}{4\pi d^2}\left[\frac{W}{m^2}\right]$. Wynik porównaj z danymi tablicowymi. Najczęściej jest on podany w $\mathrm{cal \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}}$. $1\ \frac{\mathrm{cal}}{\mathrm{cm^2 \cdot min}} = \frac{4{,}18\,\mathrm{J}}{10^{-4}\,\mathrm{m^2} \cdot 60\,\mathrm{s}} = 696{,}67\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2}}$.
Uwaga: bardziej poprawny wynik otrzymasz po uwzględnieniu faktu, że około 23% strumienia energii jest pochłaniane przez ziemską atmosferę i nie dociera do powierzchni Ziemi.

Wynik tablicowy: $S = 1{,}99\ \frac{\mathrm{cal}}{\mathrm{cm^2 \cdot min}}$.

b) Energia
Znając stałą słoneczną w prosty sposób obliczysz ilość energii wypromieniowywanej przez Słońce z jednostki powierzchni w jednostce czasu.
Stosunek *R*/*r* (rysunek) ma wartość 215, więc stosunek powierzchni kul o promieniu *R* i *r* wynosi $215^2 = 46\,225$. Jeżeli 1 cm² kuli o promieniu równym średniej odległości Ziemia-Słońce otrzymuje $1{,}99\,\frac{\mathrm{cal}}{\mathrm{min}}$, to każdy cm² powierzchni Słońca wysyła w ciągu minuty 46 225 razy więcej energii.
Mnożąc stałą słoneczną przez powierzchnię kuli o promieniu *R* otrzymasz ilość energii emitowanej przez Słońce w ciągu minuty ($R = 149{,}5$ mln km).

W każdej minucie Słońce traci wskutek promieniowania około 255 mln ton masy.

c) Temperatura
W celu obliczenia temperatury powierzchniowej Słońca możesz zastosować prawo Stefana-Boltzmanna: $E = \sigma T^4$,
gdzie E — moc promieniowania z jednostki powierzchni Słońca $\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2}}$.

σ — stała Stefana, w układzie SI $\sigma = 5{,}6697 \cdot 10^{-8}\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2 \cdot K}}$

T — temperatura w kelwinach.

(Wiadomości na temat tego prawa zaczerpniesz z podręcznika fizyki dla szkoły średniej.)
Jeżeli zechcesz pogłębić swe wiadomości z astronomii, polecam książkę P. G. Kulikowskiego „*Poradnik miłośnika astronomii*", PWN, Warszawa 1976.