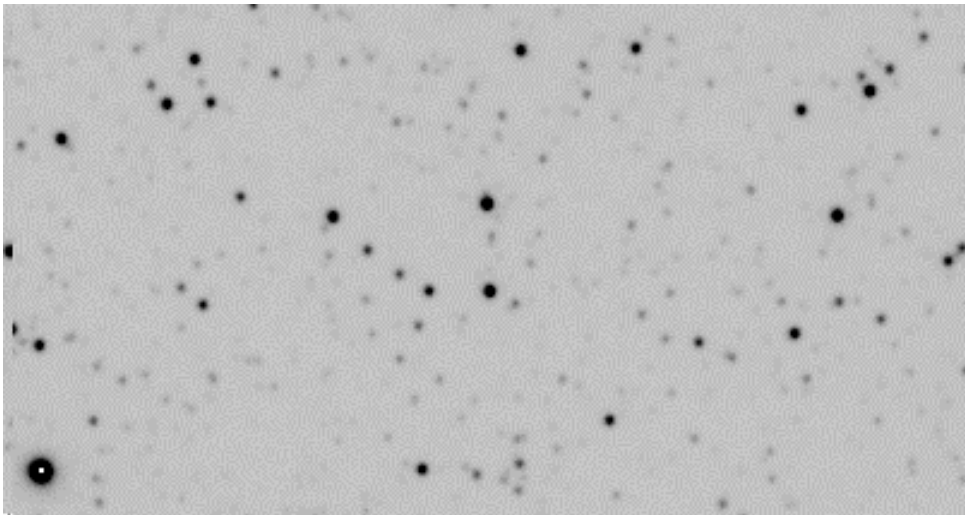


Jak zmierzyć Wszechświat: odległości do cefeid



Weronika Śliwa



Logo designed by Armella Leung, www.armella.fr.to

Ten projekt został zrealizowany przy wsparciu finansowym Komisji Europejskiej. Projekt lub publikacja odzwierciedlają jedynie stanowisko ich autora i Komisja Europejska nie ponosi odpowiedzialności za umieszczoną w nich zawartość merytoryczną.

Niezwykłe gwiazdy - cefeidy

Niezbędne dane:

- 1) Pliki ze zdjęciami cefeid – w katalogu Cepheids
- 2) Informacja o zależności pomiędzy okresem zmienności cefeidy a jej mocą promieniowania, czyli ilością energii promieniowanej przez gwiazdę w ciągu sekundy – na rysunku 4
- 3) Moc promieniowania Słońca – $3,85 \times 10^{26}$ W
- 4) Pakiet oprogramowania do obróbki obrazów SalsaJ.

Wstęp: kosmiczny pomiar odległości nie jest łatwy ...

Jak zmierzyć odległość do gwiazd? A do innych niż nasza galaktyk? Zwykle trudno się kierować jasnością kosmicznego obiektu – przecież na niebie samo może wyglądać bardzo jasny ale daleki obiekt i drugi słabszy, ale położony bliżej. Przez setki lat uczeni nie wiedzieli więc nawet, że każda z gwiazd jest w innej odległości od Ziemi – uważano że znajdują się one wszystkie na jednej, obracającej się sferze. W XIX wieku udało się wreszcie metodami geometrycznymi zmierzyć odległość do pierwszych kilku gwiazd i w przybliżeniu zbadano kształt i rozmiary naszej Galaktyki – Drogi Mlecznej. Wkrótce pojawił się jednak następny problem: czy widoczne na nocnym niebie mgliste „chmurki” – mgławice są obiektami znajdującymi się wewnątrz Galaktyki czy też może niektóre z nich to inne galaktyki podobne do naszej. Tę kwestię rozstrzygnęły dopiero badania cefeid – niezwykle pulsujących gwiazd – wykonane w 1912 roku przez amerykańską uczoną Henriettę Leavitt. Dzięki jej odkryciu udało się zmierzyć odległość do mgławicy Andromedy i Wielkiego Obłoku Magellana, które okazały się oddzielnymi od naszej galaktykami. Teraz dzięki danym dotyczącym gwiazd z Wielkiego Obłoku Magellana takie badanie możemy wykonać i my. Wystarczy tylko poznać własności cefeid.

Cefeidy – kosmiczne świece

Cefeidy to wyjątkowo jasne, tysiąc lub nawet dziesięć tysięcy razy jaśniejsze od Słońca gwiazdy regularnie zmieniające swą jasność. Każda cefeida pulsuje - okresowo zmienia swoje rozmiary i temperaturę powierzchni. Okres takich zmian wynosi od kilku dni do kilku miesięcy. Niezwykłą i cenną dla astronomów własnością cefeid jest związek pomiędzy ich przeciętną jasnością i okresem pulsacji - jaśniejsze cefeidy pulsują wolniej od słabszych. Cefeida o okresie pulsacji trzech dni emituje w ciągu sekundy 800 razy więcej energii niż Słońce. Jeśli okres pulsacji wynosi 30 dni, gwiazda jest jaśniejsza od Słońca aż 10 000 razy. Mierząc okres zmienności danej cefeidy możemy więc wyznaczyć ilość promieniowanej przez nią energii. Porównując ją następnie z ilością energii docierającej do Ziemi możemy wyznaczyć odległość cefeidy od nas. Zasada pomiaru odległości za pomocą cefeid jest więc podobna do ustalania nocą odległości kogoś machającego z daleka latarką, jeśli wiemy, jak

silną ma ona żarówkę. Cefeidą, choć nietypową (a więc nie nadającą się do wyznaczania odległości opisaną tu metodą) jest też Gwiazda Polarna.

Niezbędne wzory

Ilość energii promieniowanej w jednostce czasu przez gwiazdę nazywamy jej mocą promieniowania i oznaczamy literą L . Jeśli znajdujemy się w odległości r od gwiazdy, przez jednostkę powierzchni ustawionej prostopadle do kierunku ku gwiazdzie przepływa strumień energii F :

$$F = \frac{L}{4\pi r^2}.$$

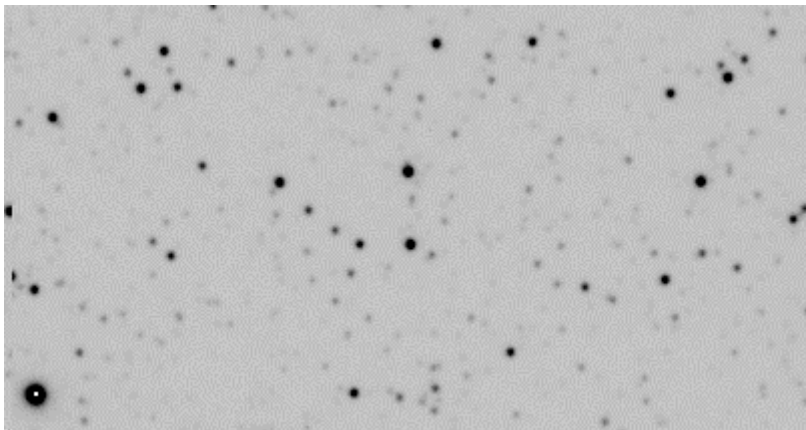
Przykładowo, moc promieniowania Słońca, $L_s = 3,85 \times 10^{26}$ W, a strumień słonecznej energii, przepływający przez jednostkową powierzchnię w pobliżu Ziemi, $F_s = 1370$ W/m².

Tak więc znając moc promieniowania gwiazdy możemy po zmierzeniu strumienia dochodzącej od niej energii wyznaczyć odległość gwiazdy r .

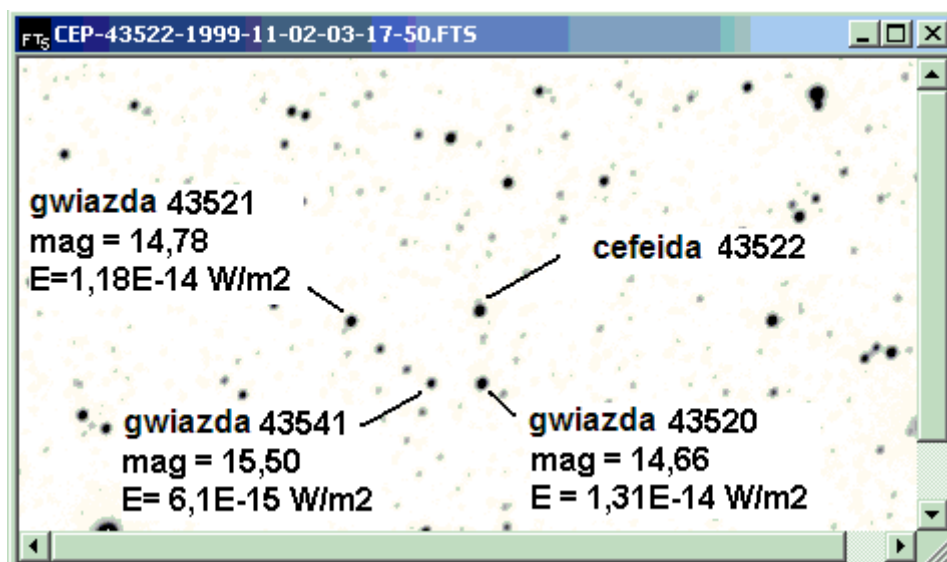
Czas na pomiar

W celu zmierzenia odległości cefeid, obserwowanych w Wielkim Obłoku Magellana potrzebne nam będą pliki z danymi tych cefeid. Znajdują się one w katalogu Cepheids. Dane pochodzą z eksperymentu OGLE (<http://www.astrouw.edu.pl/~ogle/index.html>).

Nazwa każdego z plików zawiera datę wykonania obserwacji. I tak plik CEP-43522-1999-10-24-03-23-25.FTS przedstawia obraz nieba z 24 października 1999 roku o godzinie 3.23 (datę obserwacji możesz też ustalić otwierając okno Obraz>Pokaż informacje [HOU-IP: Data Tools/image info]). Wszystkie zdjęcia przedstawiają ten sam obszar nieba w którym znajduje się zmieniająca jasność cefeida, a także gwiazdy porównania – zwykle gwiazdy o stałej jasności. Położenie interesujących nas gwiazd przedstawia rys. 1. Wszystkie obserwacje wykonywano w świetle czerwonym i bliskiej podczerwieni.



Rys. 1. Widok jednego z plików z danymi



Rys. 2. Zdjęcie zaznaczoną pozycją cefeidy i gwiazd porównania

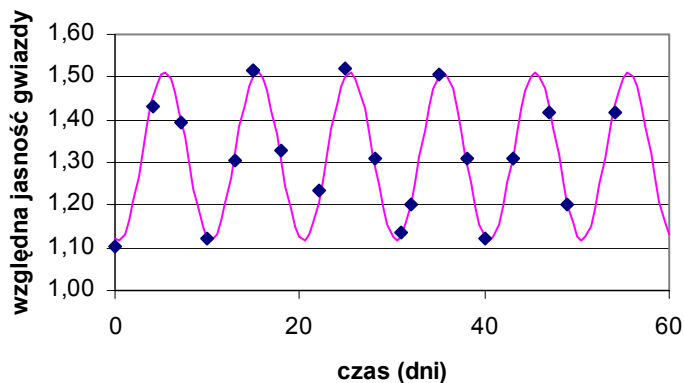
Obserwacje wykonywane podczas kolejnych nocy mogą się nieco od siebie różnić. Kolejne noce mogły być mniej lub bardziej pogodne, niewielkim zmianom mogła też ulegać czułość samego detektora teleskopu. Dlatego, aby określić zmiany jasności cefeid w poszczególnych dniach, wykorzystamy jasność gwiazdy porównania. Jak wiemy, jest to gwiazda której blask nie powinien się zmieniać. Gdybyśmy obserwowali dwie gwiazdy o stałej jasności, np. jedną dwukrotnie jaśniejszą od drugiej, to choć – z powodu odmiennych w kolejnych dniach warunków obserwacji – ich mierzona jasność mogłaby się nieco różnić, to przy każdym pomiarze jedna gwiazda powinna być dwa razy jaśniejsza od drugiej – stosunek ich jasności powinien być cały czas taki sam. W przypadku obserwacji stałej gwiazdy porównania i cefeidy zmiana stosunku jasności cefeidy do jasności gwiazdy porównania wywołana jest wyłącznie zmienną jasnością cefeidy.

Przystąpmy więc do badań.

1. Zmierz jasności wybranej cefeidy i gwiazdy porównania w kolejnych dniach obserwacji. By to zrobić
 - a. w SalsieJ otwórz plik z danymi cefeidy i zapisz dokładną datę wykonania obserwacji;
 - b. zmień paletę obrazów na IGREY lub inną, na której będziesz wyraźnie widział poszczególne gwiazdy [Obraz:>Dostosuj:>Jasność/Kontrast: Auto]; znajdź na obrazach cefeidę i wybraną gwiazdę porównania;
 - c. wybierz narzędzie Analiza>Fotometria, najedź kursorem na cefeidę i kliknij myszką; zmierzona jasność cefeidy zostanie zapisana w oknie Fotometria; zmierz także jasność gwiazdy porównania;
 - d. powyższe czynności powtórz dla wszystkich obserwacji cefeidy.
2. Wyniki pomiarów umieść w tabeli, w której w kolejnych kolumnach znajdują się daty (z uwzględnieniem godziny) poszczególnych obserwacji, odstęp czasu (w godzinach lub dniach) między kolejną obserwacją a pierwszą Δt , zmierzona jasność cefeidy L_c i jasność gwiazdy porównania L_g oraz ich stosunek.

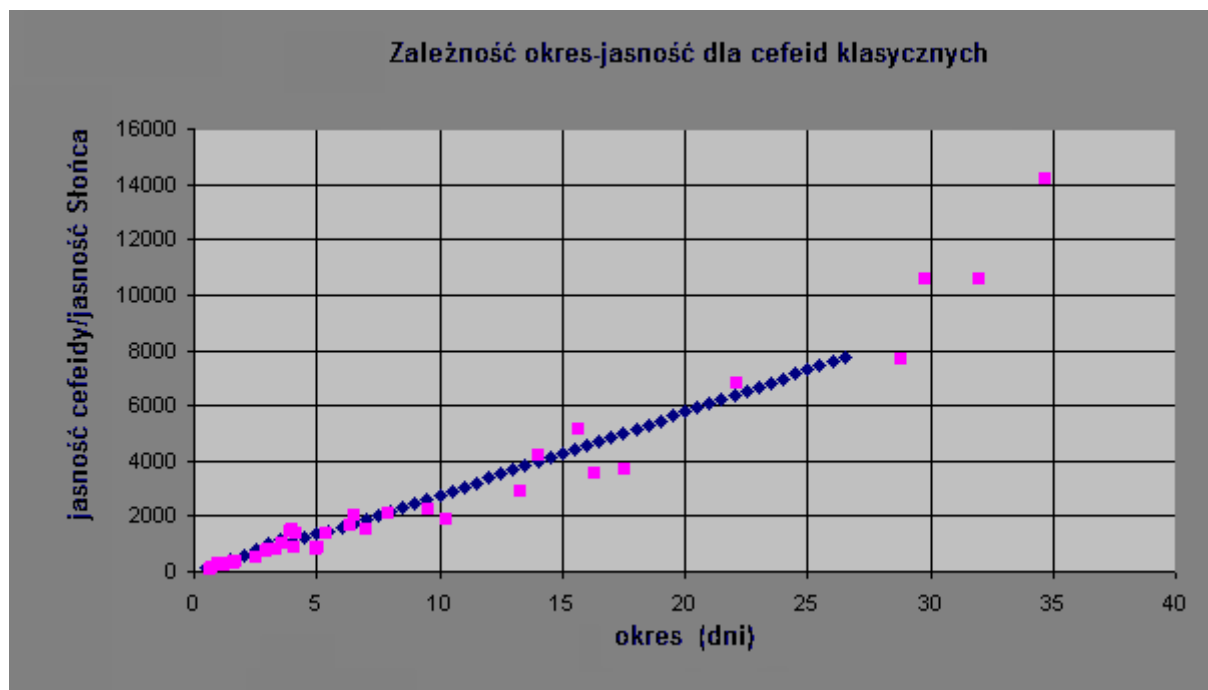
Gwiazda porównania	data	Δt (dni)	L_c	L_g	L_c/L_g
A	26-09 18:01:00	0,000	168086	357753	0,4698
	28-09 19:36:00	2,066	179784	340024	0.5287
	...				

3. Posługując się danymi z rys. 2 oblicz średnią jasność cefeidy w stosunku do gwiazdy porównania. Wykorzystując stosunek średniej jasności cefeidy do jasności gwiazdy porównania oraz podany na rys. 2 strumień promieniowania dochodzący od wybranej przez Ciebie gwiazdy porównania oblicz średni strumień promieniowania F_{sr} dochodzący od cefeidy. Jeśli chcesz i potrafisz, do wykonania odpowiednich obliczeń możesz wykorzystać arkusz kalkulacyjny (patrz Dodatek 2).
4. Zaznacz na wykresie stosunek jasności cefeidy do jasności gwiazdy porównania w zależności od czasu, jaki minął od pierwszej obserwacji. Do otrzymanych punktów spróbuj dopasować sinusoidę. Na podstawie wykresu wyznacz okres zmian jasności cefeidy.



Rys. 3 – przykładowy wykres zależności jasności cefeidy od czasu

5. Korzystając z widocznej na rys. 4 zależności pomiędzy okresem pulsacji cefeidy a jej średnią mocą promieniowania, ustal ile razy większa jest moc promieniowania cefeidy od mocy promieniowania Słońca. Oblicz moc promieniowania cefeidy.



Rys. 4 – zależność pomiędzy okresem zmian jasności cefeidy i jej mocą promieniowania (wyrażoną w mocach promieniowania Słońca)

6. Posługując się wzorem z początku tego ćwiczenia oblicz odległość cefeidy od Słońca. Jest to jednocześnie odległość pomiędzy Słońcem a Wielkim Obłokiem Magellana, w którym znajduje się ta gwiazda.
7. Zastanów się: jakie mogą być źródła niedokładności otrzymanego przez Ciebie wyniku? Które z nich najsilniej mogą wpłynąć na wynik? Na przykład, wynik zależy również od tego, w jakiej części Obłoku znajduje się cefeida. Ponieważ jednak rozmiary Wielkiego Obłoku Magellana są znacznie mniejsze od odległości, jaka dzieli go od Galaktyki wynik pomiaru niewiele odbiega od średniej odległości pomiędzy tymi obiektami. Są jednak i inne źródła niedokładności. Przestrzeń pomiędzy Wielkim Obłokiem Magellana a Ziemią wypełniona jest pochłaniającym część promieniowania drobnym pyłem. Jak obecność takiego pyłu wpływa na nasze oszacowania odległości?

Więcej o cefeidach dowiesz się ze stron:

<http://sswdob.republika.pl/cefeidy.htm>

<http://orion.pta.edu.pl/astroex/ex2/cefeidy.html>

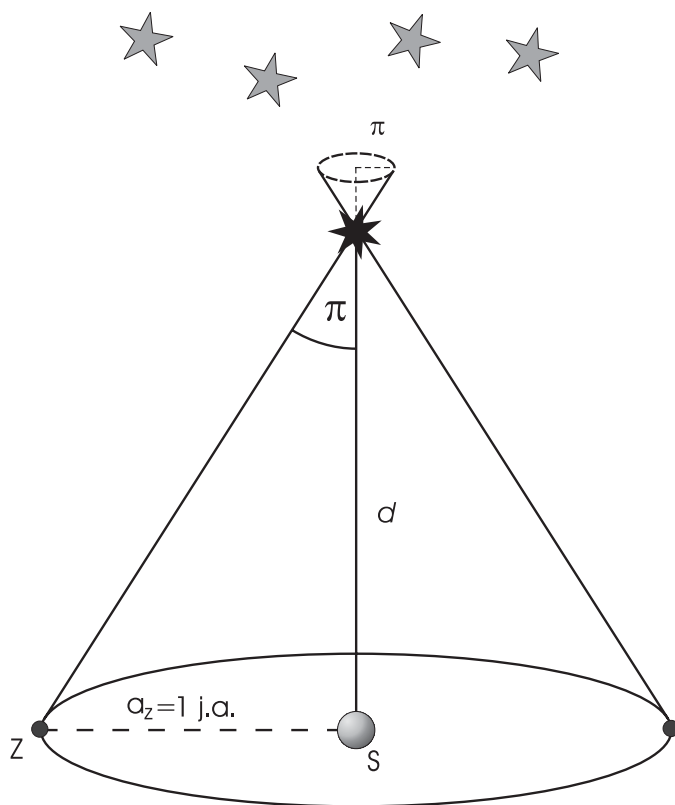
<http://www.uni-sw.gwdg.de/~hessman/MONET/AstroKiste/Sterne/Cepheiden/>

Podziękowania. Jesteśmy wdzięczni Fabrice Mottez (CETP) za udostępnienie francuskiej wersji ćwiczenia i Bohdanowi Paczyńskiemu za zachętę i pomoc w wyborze danych. Dziękujemy zespołowi OGLE za zezwolenie na użycie w ćwiczeniu uzyskanych przez niego danych.

Dodatek 1. Jak zmierzyć odległość do innych galaktyk?

Pierwszym krokiem jest oczywiście bezpośredni pomiar odległości do, choćby najbliższych, gwiazd. Dokonuje się go metodą paralaksy heliocentrycznej.

Zjawisko paralaksy heliocentrycznej polega na przesunięciu obrazu bliższych ciał na tle dalszych wywołanego zmianami położenia Ziemi w jej ruchu wokół Słońca. Podobny efekt obserwujemy spoglądając na jakiś bliski przedmiot na tle dalszego jednym, a później drugim okiem – położenie bliższego przedmiotu wydaje się wówczas zmieniać.



Zjawisko paralaksy – obserwowana w półrocznych odstępach czasu bliska gwiazda wydaje się przesuwać na tle odległych gwiazd zataczając koło o promieniu π . Znając wartość π można obliczyć odległość gwiazdy.

Pierwszą udaną próbę zmierzenia paralaksy, π , gwiazdy podjął Friedrich Bessel w 1838. Udało mu się zmierzyć odległość do 61 Cygni – słabej gwiazdy podwójnej. Następny obserwator, Tomasz Henderson zmierzył odległość Syriusza, a niedługo potem zmierzono też paralaksę Wegi. Choć metoda paralaksy heliocentrycznej nadaje się do pomiaru odległości tylko stosunkowo bliskich, odległych co najwyżej o kilka tysięcy lat świetlnych, gwiazd (przesunięcie na niebie dalszych gwiazd jest zbyt małe do zmierzenia) dziś, dzięki m. in. pomiarom satelitarnym, znamy paralaksy – a więc i odległości – tysięcy gwiazd, w tym kilkuset cefeid. Dzięki tym danym posługując się zależnością okres – jasność dla cefeid mierzymy odległości do zawierających je, niezbyt odległych (w odległości nie większej niż kilkadziesiąt milionów lat świetlnych) galaktyk. Kolejnym krokiem w pomiarze odległości są pomiary jasności gwiazdy supernowych i słynne prawo Hubble'a – ale to już temat na oddzielne ćwiczenie HOU.

Dodatek 2. Wyznaczanie okresu cefeidy za pomocą Excela

Wyznaczenia okresu cefeidy przy niezbyt dużej liczbie obserwacji nie jest trywialne. W tym celu

1. Rysujemy wykres stosunku jasności cefeidy C do jasności gwiazdy porównania R w zależności od czasu, $C/R(t_i)$.
2. Staramy się do danych $C/R(t)$ dopasować sinusoidę:

$$C/R(t_i) = B + A \cdot \sin(2\pi \frac{t_i}{P} + \Delta\varphi).$$

Wymaga to wyznaczenia aż czterech parametrów: średniej jasności cefeidy B , amplitudy zmian A , okresu P oraz fazy sinusoidy $\Delta\varphi$. Dobrze jest najpierw oszacować przybliżone wartości przynajmniej części z tych parametrów:

- a. B – w przybliżeniu średnia z $C/R(t)$;
 - b. A – połowa „rozpiętości” wykresu $C/R(t)$;
 - c. faza – o ile pierwsze punkty wykresu plasują się poniżej średniej – ujemna, np. $\pi/2$ (-1,57), jeśli powyżej – dodatnia, typu $\pi/2$, itp.;
 - d. okres – jeśli mniej więcej widać jaki jest, można wstawić, ale na ogół ten parametr jest trudny do samodzielnej oceny na podstawie wykresu z danymi.
3. Uruchamiamy w Excelu funkcję Solver (Narzędzia/Solver). Wstawiamy w niej formułę, do której mamy dopasować dane oraz wstępną ocenę parametrów. Po chwili Solver poda swoje rozwiązanie oraz jakość dopasowania, czyli odchylenie danych od wykresu Dy^2 .
 4. Na ogół pierwsze dopasowanie będzie niezbyt dobre – zapamiętujemy lub zapisujemy wartość Dy^2 i podajemy kolejną „startową” wartość okresu P .
 5. Czynności powtarzamy zmieniając okres startowy w zakresie od 1 dnia do 20 dni co 0,1 dnia.
 6. Wybieramy rozwiązanie o najmniejszej wartości Dy^2 .
 7. Rysujemy wykres otrzymanego rozwiązania z naniesionymi punktami $C/R(t_i)$ i na oko oceniamy jego jakość – jeśli jest dobra wykorzystujemy otrzymany okres do wyznaczenia odległości cefeidy

Dodatek 3. Lista najjaśniejszych cefeid

By wykorzystać wyniki obserwacji cefeid z poniższej listy trzeba

1. Posługując się załączonymi współrzędnymi alpha (rektascensja), delta (deklinacja) odnaleźć gwiazdę na niebie.
2. Wyznaczyć samodzielnie podstawowy okres pulsacji cefeidy P_0 , liczony w dniach.
3. Na podstawie załączonej poniżej zależności P-L pomiędzy okresem pulsacji cefeidy P_0 i jej mocą promieniowania obliczyć stosunek mocy promieniowania cefeidy L do mocy promieniowania Słońca L_s . (Uwaga: wykres wykorzystany w ćwiczeniu HOU odnosi się do jasności cefeid w świetle czerwonym i podczerwonym R i nie można go wykorzystać do poniższych danych, zawierających informacje o jasności w świetle

widzialnym V – stąd konieczność wykorzystania poniższego wzoru lub ściągnięcia odpowiedniego wykresu z Internetu – np. ze strony http://web.pdx.edu/~straton/women_cosmology/Day_2_Cepheids.html).

4. Cefeidy zaznaczone jako owertonowe (typ FO) pulsują z okresem P_1 , krótszym od podstawowego. Okres podstawowy (potrzebny do wykorzystania we wzorze $P-L$) obliczamy ze wzoru $P_1/P_0=0,70$; można też wykorzystać trochę lepsze przybliżenie: $P_1/P_0=-0,027\log(P_1)+0,716$

Zależność $P-L$: $\frac{L}{L_s} = 297,03 \cdot P_0^{1,092}$

Wszystkie Cefeidy klasyczne o jasności $V_{sr} < 8.0\text{mag}$

gwiazda	Okres [doby]	V_{sr} [mag]	alpha [h m s]	delta [° ']	ΔV [mag]	Typ
SU Cas	1.949322	5.970	2 47 28.88	68 40	0.414	FO
SZ Tau	3.14838	6.531	4 34 20.00	18 26	0.330	FO
Beta Dor	9.842425	3.731	5 33 11.00	-62 31	0.630	
T Mon	27.024649	6.124	6 22 31.00	7 6	1.028	
RT Aur	3.72819	5.446	6 25 21.25	30 31	0.803	
W Gem	7.913779	6.950	6 32 6.00	15 22	0.822	
Zeta Gem	10.15073	3.918	7 1 9.00	20 38	0.480	
MY Pup	5.695309	5.677	7 36 53.00	-48 29	0.301	FO
AH Vel	4.227231	5.695	8 10 26.00	-46 29	0.327	FO
RS Pup	41.3876	6.947	8 11 9.00	-34 25	1.105	
l Car	35.551341	3.724	9 43 52.35	-62 16	0.725	
U Car	38.7681	6.288	10 55 45.57	-59 27	1.165	
ER Car	7.71855	6.824	11 7 31.99	-58 33	0.470	
S Mus	9.659875	6.118	12 10 4.00	-69 52	0.500	
T Cru	6.7332	6.566	12 18 36.50	-62 0	0.498	
R Cru	5.82575	6.766	12 20 52.22	-61 21	0.794	
R Mus	7.510467	6.298	12 39 0.00	-69 8	0.760	
S Cru	4.689596	6.600	12 51 23.56	-58 9	0.690	
V Cen	5.493861	6.836	14 28 56.92	-56 40	0.804	
V737 Cen	7.06585	6.719	14 33 19.86	-61 47	0.317	
AX Cir	5.273306	5.880	14 48 29.86	-63 36	0.420	
R TrA	3.389287	6.660	15 15 16.00	-66 18	0.561	
S TrA	6.323465	6.397	15 56 40.00	-63 38	0.768	
S Nor	9.754244	6.394	16 14 42.00	-57 46	0.640	
V636 Sco	6.796859	6.654	17 19 5.00	-45 34	0.500	
X Sgr	7.012877	4.549	17 44 25.00	-27 48	0.590	
Y Oph	17.126908	6.169	17 49 58.00	-6 8	0.483	
W Sgr	7.594904	4.668	18 1 50.00	-29 35	0.805	
AP Sgr	5.057916	6.955	18 10 0.00	-23 7	0.832	
Y Sgr	5.77338	5.744	18 18 26.00	-18 53	0.725	
U Sgr	6.745229	6.695	18 28 57.00	-19 9	0.717	
BB Sgr	6.637102	6.947	18 48 2.00	-20 21	0.597	
FF Aql	4.470916	5.372	18 56 1.20	17 17	0.321	FO
U Aql	7.023958	6.446	19 26 39.90	-7 8	0.757	
SU Cyg	3.845492	6.859	19 42 48.51	29 8	0.766	
Eta Aql	7.176735	3.897	19 49 55.50	0 52	0.799	
S Sge	8.382086	5.622	19 53 45.00	16 30	0.718	
X Cyg	16.386332	6.391	20 41 26.60	35 24	0.986	
T Vul	4.435462	5.754	20 49 21.00	28 3	0.643	
Delta Cep	5.36627	3.954	22 27 18.53	58 9	0.838	
RX Cam	7.912024	7.682	4 0 49.26	58 31	0.729	
AW Per	6.463589	7.492	4 44 25.00	36 38	0.812	
RX Aur	11.623537	7.655	4 57 55.45	39 53	0.664	

CK Cam	3.29495	7.58	5	2	24.17	55	17	0.6	
AP Pup	5.084274	7.371	7	56	1.00	-39	59	0.647	
AT Pup	6.664879	7.957	8	10	31.00	-36	47	0.904	
V Car	6.696672	7.362	8	27	42.53	-59	57	0.601	
RZ Vel	20.39824	7.079	8	35	18.00	-43	56	1.181	
BG Vel	6.923655	7.635	9	6	39.00	-51	14	0.457	
V Vel	4.371043	7.589	9	20	45.00	-55	44	0.689	
VY Car	18.99	7.443	10	42	33.28	-57	18	1.065	
V898 Cen	3.527125	7.963	11	9	6.80	-54	17	0.4	FO
XX Cen	10.95337	7.818	13	37	1.12	-57	21	0.924	
V381 Cen	5.07878	7.653	13	47	22.49	-57	19	0.720	
BP Cir	2.3984	7.560	14	42	48.00	-61	15	0.337	FO
AV Cir	3.0651	7.439	14	46	9.00	-67	17	0.315	FO
RV Sco	6.061306	7.040	16	55	3.00	-33	32	0.824	
BF Oph	4.06751	7.337	17	2	59.00	-26	30	0.636	
V482 Sco	4.527807	7.965	17	27	31.00	-33	34	0.652	
V950 Sco	3.380090	7.302	17	34	7.00	-40	47	0.365	FO
V350 Sgr	5.154178	7.483	18	42	19.00	-20	42	0.705	
YZ Sgr	9.553606	7.358	18	46	35.00	-16	46	0.674	
TT Aql	13.754707	7.141	19	5	41.40	1	13	1.082	
V496 Aql	6.807055	7.751	19	5	38.60	-7	31	0.349	
U Vul	7.990629	7.128	19	34	26.00	20	13	0.718	
SV Vul	44.994772	7.220	19	49	28.00	27	19	1.054	
V1162 Aql	5.3761	7.798	19	49	35.20	-11	29	0.507	
IR Cep	2.114124	7.784	21	56	19.49	60	46	0.372	FO
V411 Lac	2.908162	7.860	22	26	56.62	50	42	0.3	FO

=====