

Tomasz Kurek

**Mierzenie odległości we Wszechświecie**

**Cefeidy**

Seminarium jesienne Klubu Astronomicznego „Almukantarat”  
Kraków 2013

Spis literatury:

Marek Substyk, *Poradnik miłośnika astronomii*, AstroCD, 2010

<http://www.astronomynotes.com/ismnotes/s5.htm>

<http://sci.esa.int/education/35616-stellar-distances/?fbodylongid=1673>

<http://en.wikipedia.org>

<http://www.wiw.pl/delta/klopoty.asp>

Program komputerowy „iris”

Program komputerowy „CurveExpert”

## **Cefeidy – niezwykle gwiazdy**

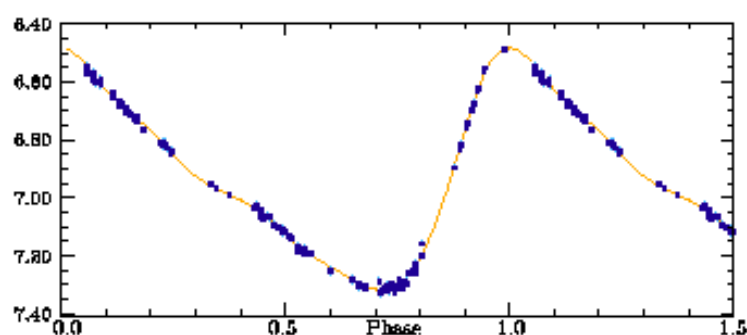
Cefeida to gwiazda zmienna pulsująca, czyli taka gwiazda, która okresowo zmienia swoją jasność. Słowo pulsująca oznacza, że zmiany jasności są spowodowane regularnymi zmianami w samej strukturze gwiazdy. W przypadku cefeid najważniejszą rolę w tym procesie odgrywa hel. Podwójnie zjonizowany hel, czyli taki, który nie ma dwóch elektronów, jest bardziej nieprzeźroczysty (czyli zatrzymuje więcej promieniowania) niż pojedynczo zjonizowany hel. Więc w cefeidzie promieniowanie gwiazdy podgrzewa ten hel. Im bardziej jest podgrzany tym bardziej jest zjonizowany, więc zatrzymuje więcej światła. Cefeida robi się coraz ciemniejsza. Ale zwiększa się też napór ciśnienia promieniowania gwiazdy na ten zjonizowany hel, dlatego też się rozszerza. Z tego powodu jego gęstość się zmniejsza i w pewnym momencie jego temperatura zaczyna maleć, więc staje się mniej zjonizowany i bardziej przeźroczysty. Ciśnienie promieniowania gwiazdy znowu może swobodnie opuszczać gwiazdę a grawitacja tej gwiazdy zaczyna ją zmniejszać. Cefeida robi się coraz jaśniejsza. Promieniowanie gwiazdy znowu zaczyna podgrzewać zjonizowany hel i cały proces się powtarza. W naszej galaktyce odkryto już około 700 cefeid. Cefeidy leżą w pasie niestabilności na diagramie hertzsprunga-russella.

## **Trochę historii**

10 września 1784 roku Edward Pigott odkrył zmienność w jasności gwiazdy Eta Aquilae, ta gwiazda stała się pierwszą odkrytą cefeidą, mimo tego nazwę „Cefeidy” wzięto od cefeidy Deltę Cephei odkrytej parę miesięcy później przez Johna Goodricke. W 1912 roku Henrietta S. Leavitt z obserwatorium harwardzkiego odkryła na podstawie obserwacji gwiazd zmiennych w Małym Obłoku Magellana zależność pomiędzy jasnością obserwowaną tych cefeid a ich okresem zmiany blasku (przyjęła ona, że wszystkie cefeidy znajdujące się w tym obłoku są mniej więcej tak samo odległe od Ziemi). Autorem pomysłu, że obserwacje cefeid mogą posłużyć do wyznaczania odległości we Wszechświecie, był Ejnar Hertzsprung (wymyślona przez niego metoda zostanie opisana w dalszej części referatu). W latach 40-tych Walter Baade odkrył, że istnieje kilka rodzajów cefeid, a nie jedna jak przedtem myślano, jeden. Dzięki jego odkryciu pomiary odległości we Wszechświecie stały się o wiele dokładniejsze niż przed jego odkryciem.

## Nie wszystkie są takie same

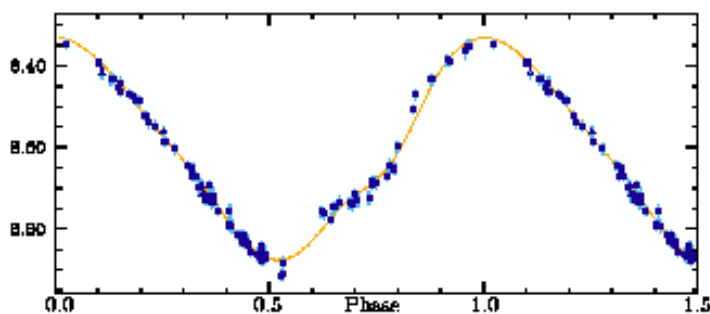
Większości cefeid dzieli się na dwa główne rodzaje, czyli cefeidy pierwszego typu zwane cefeidami klasycznymi, oraz cefeidy drugiego typu. Cefeidy klasyczne to są gwiazdy z 1 populacji, czyli młode gwiazdy o wysokiej metaliczności. Ich masy wynoszą zazwyczaj od 4 do 20 mas Słońca, a także ich jasność absolutna jest średnio 100000 większa niż jasność absolutna Słońca. Wykres zmiany blasku tego rodzaju cefeid przypomina sinusoidę. Mogą mieć typy widmowe od F6 do K2.



Wykres nr 1 – przykładowy wykres zmiany blasku cefeidy klasycznej

Źródło: <http://www.astronomynotes.com/ismnotes/s5.htm>

Najbardziej znanym przykładem cefeidy jest gwiazda Delta Cephei, znajdująca się w gwiazdozbiornie Cefeusza. Ta gwiazda jest też prototypem cefeid i nazwa cefeidy wzięła się od nazwy gwiazdozbiornu w którym się znajduje. Jej okres zmiany blasku wynosi 5.37 dni, a jej jasność zmienia się wtedy od 3.48 do 4.37 magnitudo. Innymi przykładami cefeid typu pierwszego są Eta Aquilae, znajdująca się w gwiazdozbiornie Orła, z okresem zmiany blasku 7.18 dnia, i ze zmianą jasności od 3.5 do 4.4 magnitudo, albo Zeta Geminorum z gwiazdozbiornu Bliźniąt, której okres zmiany blasku wynosi 10.15 dnia i zmienia swoją jasność od 3.63 do 4.18 magnitudo. Drugi rodzaj cefeid stanowią gwiazdy 2 populacji, czyli starsze gwiazdy o niskiej metaliczności, mają około cztery razy mniejszą jasność od cefeid typu pierwszego, a ich masy wynoszą średnio tylko połowę masy Słońca. Wykres zmiany jasności od czasu cefeid 2 typu różni się nieznacznie kształtem krzywej od cefeid 1 typu.



Wykres nr 2 - przykładowy wykres zmiany blasku cefeidy typu drugiego

Źródło: <http://www.astronomynotes.com/ismnotes/s5.htm>

Cefeidy typu drugiego dzielą się na trzy podtypy. Pierwszym z nich jest BL Herculus, są to cefeidy z okresem zmiany blasku od 1 do 4 dni. Przykładem cefeidy tego podtypu, jest gwiazda BL Herculus, od której wzięła się nazwa tego podtypu. Znajduje się w gwiazdozbiornie Herkulesa, jej okres zmiany blasku wynosi 1.3 dnia, a jej jasność zmienia się od 9.7 do 10.6 magnitudo. Następnym podtypem jest W Wirginis, okres zmiany blasku tych cefeid wynosi od 10 do 20 dni. Przykładem jest sama gwiazda W Wirginis z gwiazdozbiornu Panny z okresem zmiany blasku około 17 dni i ze zmianą jasności od 9.9 do 11.7 magnitudo. Ostatnim podtypem cefeid drugiego typu jest RV Tauri, cefeidy o tym podtypie mają okresy zmiany blasku większe niż 20 dni, jednym z najjaśniejszych przedstawicieli tego podtypu jest Rho Scuti w Tarczy Sobieskiego. Okres zmiany blasku tej gwiazdy wynosi aż 146.5 dnia, i zmienia swoją jasność od 4.2 do 8.6 magnitudo.

### **Dlaczego są takie ważne, czyli właściwość okresu zmiany blasku cefeid**

W cefeidach istnieje bezpośrednia zależność pomiędzy ich okresem zmiany blasku, a ich jasnością absolutną (więc także mocą promieniowania). Dzięki tej zależności znając tylko średnią jasność cefeidy i jej okres zmiany blasku można obliczyć odległość do tej cefeidy. Cefeidy są niezwykle istotnym obiektem w pomiarach odległości we Wszechświecie, ponieważ jeśli w jakiejś gromadzie gwiazd lub innej galaktyce odkryje się cefeidę, to można dość dokładnie zmierzyć odległość do takiego obiektu.

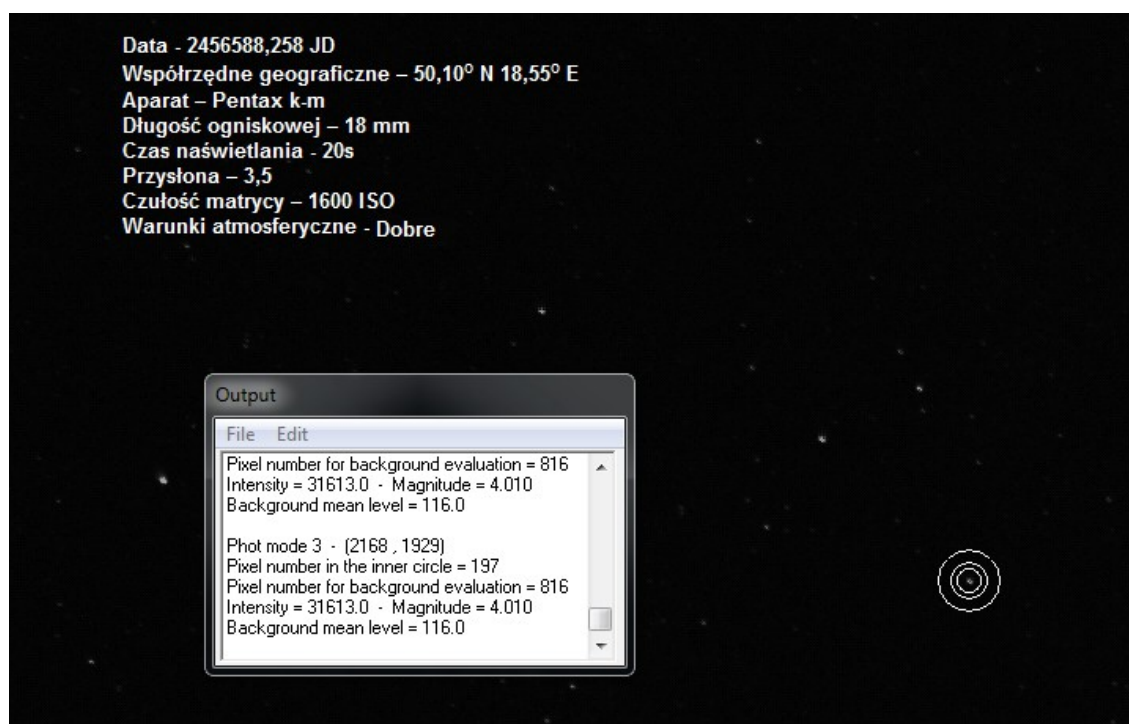
## Jak zmierzyć odległość do cefeid?

Ze względu na to, że cefeidy są tak niezwykle istotnym obiektem w astronomii, postanowiłem zmierzyć odległość do cefeidy Delta Cephei.

Do obserwacji i pomiarów wykorzystałem:

- aparat Pentax k-m (lustrzanka cyfrowa z obiektywem 18mm)
- program komputerowy „iris” - darmowy program, którego jednym z zastosowań jest mierzenie jasności gwiazd na zdjęciach.
- program komputerowy „CurveExpert” - darmowy program, który służy do dopasowywania określonych wykresów funkcji do danych punktów w układzie kartezjańskim.
- teleskop Sky-Watcher Synta R-90/900 AZ-3

Obserwacje polegały na codziennym robieniu zdjęć gwiazdy Deltę Cephei w celu wyznaczenia jej okresu zmiany blasku i jasności średniej. Każdego dnia zdjęcia były robione o godzinach 20:00, 21:00, 22:00 czasu GMT+2 i jeśli warunki w danym dniu były niesprzyjające to robiłem zdjęcie także o godzinie 23:00 czasu GMT+2. Zdjęcia były robione od 23 października do 28 października włącznie. Do obróbki uzyskanych zdjęć użyłem programu „iris”, za jego pomocą dokonywałem pomiarów jasności gwiazdy w magnitudo na każdym zdjęciu przez cały okres obserwacji. Dane dotyczące obserwacji znajdują się w tabeli nr 1. Poniżej znajduje się przykładowe zdjęcie z obserwacji.



Data [JD]	2456587.254	2456587.336	2456588.258	2456588.301	2456588.344	2456589.251
Współrzędne geograficzne	50,10° N 18,55° E	50,10° N 18,55° E	50,10° N 18,55° E	50,10° N 18,55° E	50,10° N 18,55° E	50,10° N 18,55° E
Aparat	Pentax k-m	Pentax k-m	Pentax k-m	Pentax k-m	Pentax k-m	Pentax k-m
Długość ogniskowej	18mm	18mm	18mm	18mm	18mm	18mm
Czas naświetlania [s]	20	20	20	20	20	20
Przysłona	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Czułość matrycy	1600 ISO	1600 ISO	1600 ISO	1600 ISO	1600 ISO	1600 ISO
Warunki atmosferyczne	złe	złe	dobre	średnie	średnie	dobre
Jasność cefeidy [Mag]	3,95	4.05	4.01	4.04	4.03	4.11

2456590.251	2456590.295	2456591.342	2456591.381	2456592.255	2456592.306	2456594.340
50,10° N 18,55° E	50,10° N 18,55° E	50,10° N 18,55° E	50,10° N 18,55° E	50,10° N 18,55° E	50,10° N 18,55° E	50,10° N 18,55° E
Pentax k-m	Pentax k-m	Pentax k-m	Pentax k-m	Pentax k-m	Pentax k-m	Pentax k-m
18mm	18mm	18mm	18mm	18mm	18mm	18mm
20	20	20	20	20	20	20
3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
1600 ISO	1600 ISO	1600 ISO	1600 ISO	1600 ISO	1600 ISO	1600 ISO
dobre	dobre	złe	złe	dobre	dobre	dobre
3.77	3.67	3.48	3.58	3.85	3.84	4,01

Tabela nr 1 – Dane dotyczące obserwacji

Skala, którą użyłem do oceny warunków obserwacji:

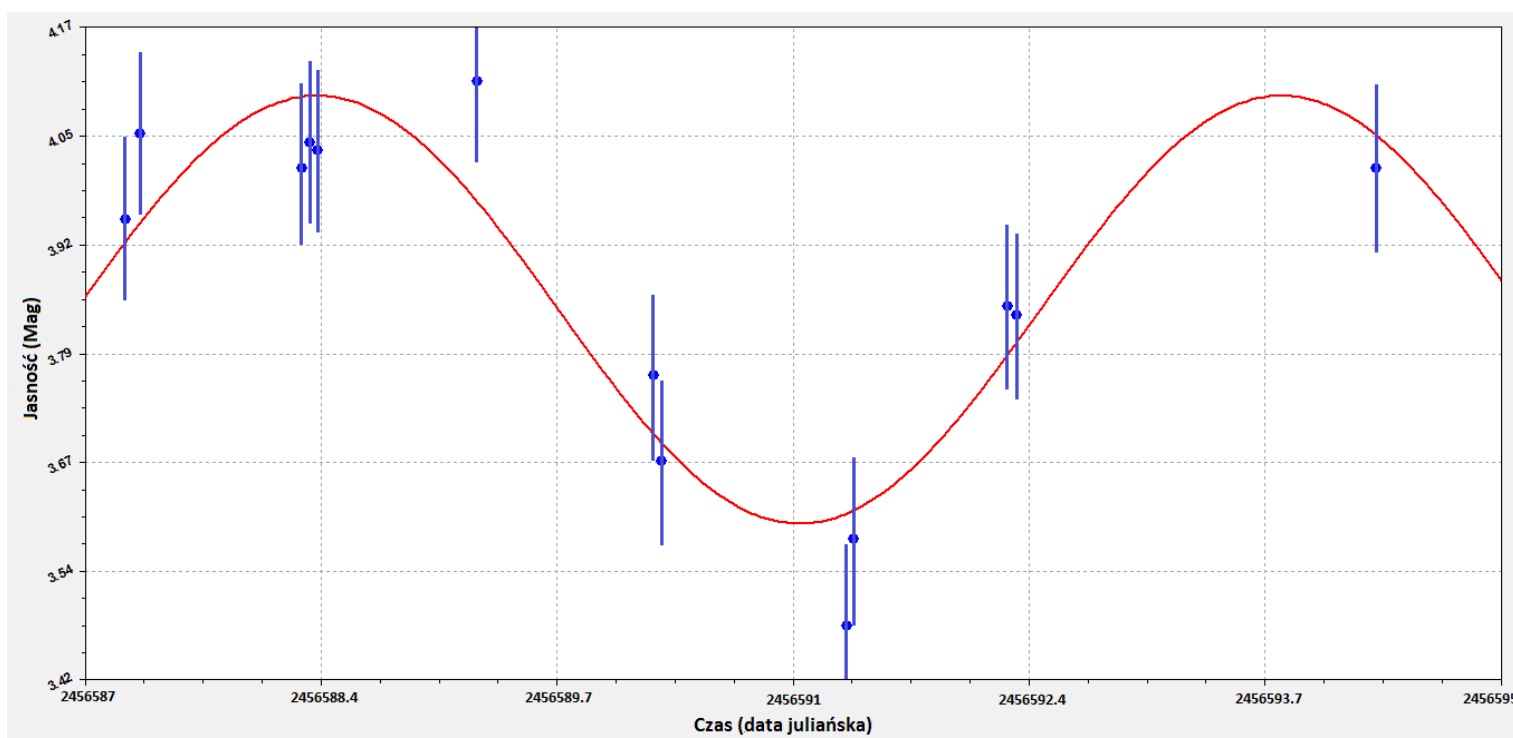
Złe – częściowe zachmurzenie

Średnie – mgła, zanieczyszczenie światłem Księżyca

Dobre – kiedy żadne z powyższych czynników nie wystąpiły

Jeśli wystąpiło całkowite zachmurzenie, to obserwacje nie były wykonywane.

Uzyskane wartości jasności Delt Cephei umieściłem na układzie współrzędnych, którego oś X to daty wykonywania zdjęć w JD (dacie juliańskiej), a oś Y to jasność Delt Cephei w danym czasie w magnitudo. Do tak uzyskanych punktów dopasowałem przy użyciu programu komputerowego „CurveExpert” sinusoidę, ponieważ wykres zmiany blasku cefeid najbardziej przypomina sinusoidę. Na podstawie mierzenia jasności innych gwiazd w programie „iris”, ustaliłem, że niepewność pomiarowa wynosi  $\pm 0,10[\text{Mag}]$ . Otrzymany wykres to wykres nr 3.



Wykres nr 3

Aby obliczyć odległość do gwiazdy trzeba skorzystać ze wzoru na jasność absolutną:

$$[1] M = m - \log(r) + 5 \quad \text{więc} \quad r = 10^{\frac{m-M+5}{5}} \quad [\text{pc}]$$

Gdzie:

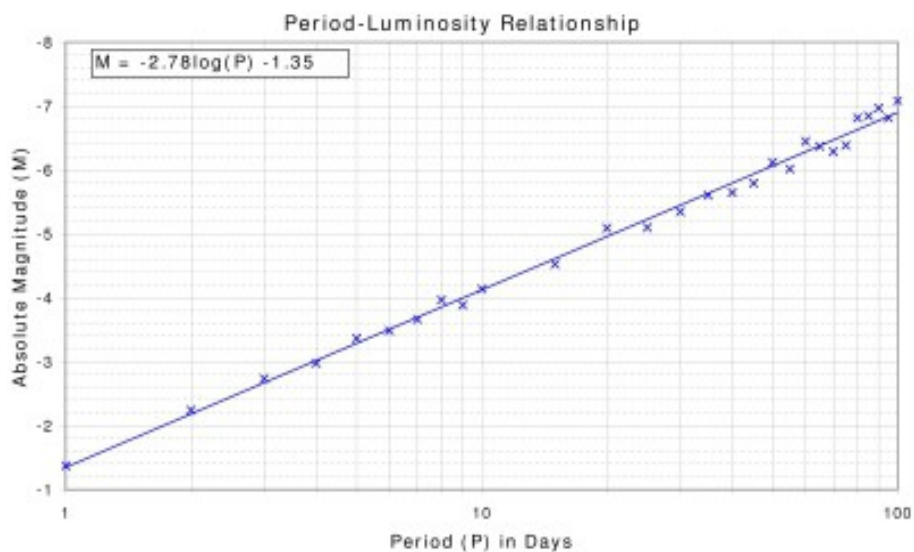
M – jasność absolutna cefeidy [Mag]

m – średnia jasność cefeidy widziana z Ziemi [Mag]

r – odległość do cefeidy [pc]

W cefeidach istnieje bezpośredni związek pomiędzy okresem zmiany blasku a jasnością absolutną.

Ta zależność została przedstawiona na wykresie nr 4.



Wykres nr 4 – wykres zależności jasności absolutnej od okresu zmiany blasku w cefeidach

Źródło: <http://sci.esa.int/education/35616-stellar-distances/?fbbodylongid=1673>

Wzór opisujący ten wykres to:

$$[2] M = -2,78\log(P) - 1,35 \quad [\text{Mag}] \quad (\text{odczytane z wykresu})$$

Gdzie

P – okres zmiany blasku cefeidy [dni]

Podstawiamy wzór [2] do wzoru [1] i otrzymujemy:

$$[3] r = 10^{\frac{m + 2,78\log(P) + 6,35}{5}}$$

Przy użyciu programu komputerowego „CurveExpert” odczytuje z mojego wykresu zmiany blasku okres zmiany blasku Delty Cephei -  $P = 5,45$  [dni].

Aby obliczyć średnią jasność cefeidy widzianej z Ziemi odczytałem z wykresu zmiany blasku cefeidy największą i najmniejszą wartość jasności Delty Cephei i obliczyłem z nich średnią:

$$[4] m = \frac{4,1 [\text{Mag}] + 3,6 [\text{Mag}]}{2} = 3,85 [\text{Mag}]$$

Ostatecznie średnia jasność cefeidy wynosi  $m = 3,85 \pm 0,10$  [Mag]



Po podstawieniu danych liczbowych do wzoru [3] otrzymałem  $r=281$  [pc]

Niepewność pomiarowa wynosi:

$$[5] \quad \Delta r = \left| \frac{d \left( 10^{\frac{m+2,78 \log(P)+6,35}{5}} \right)}{dm} \right| * \Delta m$$

Po obliczeniu pochodnej otrzymałem:

$$[6] \quad \Delta r = \left| \frac{10^{\frac{m+2,78 \log(P)+6,35}{5}} * \ln(10)}{5} \right| * \Delta m$$

Więc niepewność pomiarowa wynosi  $\Delta r = 13.0$  [pc]

Więc ostateczny wynik wynosi  $r = 281 \pm 13$  [pc]

W wyniku moich przeprowadzonych obserwacji, ustaliłem, że cefeida Delta Cephei znajduje się od nas  $r = 281 \pm 13$  [pc]. Prawdziwa odległość do Deltę Cephei wynosi około 887 ly, czyli 272 pc. Odległość ta mieści się w moim przedziale niepewności pomiarowej. Procentowa różnica pomiędzy prawdziwą odległością, a moją obliczoną odległością wynosi:

$$[5] \quad 100 - \frac{272 * 100}{281} = 3,2 \quad [\%]$$

Aby obliczyć odległość do Cefeidy, można skorzystać ,zamiast z zależności okresu zmiany blasku od jasności absolutnej, z zależności okresu zmiany blasku od mocy promieniowania cefeidy. W tym wypadku należy obliczyć jej natężenie promieniowania ze wzoru:

$$[6] \quad m_1 - m_2 = -2.5 * \log \left( \frac{I_1}{I_2} \right)$$

Gdzie:

$m_1$  - jasność cefeidy [Mag]

$m_2$  - jasność innej gwiazdy (np. Słońca) [Mag]

$I_1$  - natężenie promieniowania Cefeidy  $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$

$I_2$  - natężenie promieniowania innej gwiazdy (np. Słońca)  $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$

znając już moc promieniowania cefeidy i jej natężenie promieniowania obliczyć do niej odległość

ze wzoru na natężenie promieniowania:

$$I = \frac{P}{4 * \pi * r^2}$$

[7]

Gdzie:

P – moc promieniowania cefeidy

I – natężenie promieniowania cefeidy

r – odległość do cefeidy

Wyniki uzyskane tą metodą dają mniejszą dokładność w porównaniu z tą zastosowaną w moich obliczeniach,