



Måling af afstande i Universet ved hjælp af Cepheider

Denne øvelse er baseret på materiale oprindeligt udarbejdet af Fabrice Mottez (Frankrig) i 2003, med bidrag fra Weronika Sliwa (Polen) i 2005 og Rachel Comte (Frankrig) i 2009. Materialet er for nylig forbedret af Stefano Bertone (Italien/Frankrig), Gilles Chagnon (Frankrig) og Anne-Laure Melchior (Frankrig). Øvelsen er baseret på data, der er udført i Las Campanas Observatoriet i Chile ved OGLE (polsk/amerikansk) samarbejde. Observationerne taget i løbet af en intens observationskampagne, hvor den Lille Magellanske Sky (SMC) på daglig basis er blevet observeret. SMC er en nærliggende dværggalakse, der kredser om Mælkevejen. Disse data er blevet venligst stillet til rådighed for EU-HOU projektet af Bohdan Paczynski.¹

Teksten er oversat til dansk af Michael Andrew Dolan Møller, marts 2013.

¹ Dette projekt er støttet af EU. Denne publikation viser kun forfatterens holdninger, og EU-kommisionen er ikke ansvarlig for brugen af informationerne i denne tekst.

Indledning

Henrietta Swan Leavitt fandt i 1912 ud af, at en bestemt type stjerner, *cepheider*, pulserer, og deres pulsationsperiode giver et direkte mål for den gennemsnitlige absolutte størrelsesklasse af stjernen.

Eftersom det er nemt at måle den tilsyneladende størrelsesklasse samt ovenstående periode, kan man nemt regne afstanden ud til stjernen ved hjælp af afstandskvadratloven.

Cepheiderne har ydermere den fordel, at de lyser ganske kraftigt, så de er synlige selv i fremmede galakser.

I denne øvelse skal du måle på nogle billeder af en cepheidestjerne i Den lille Magellanske sky for derefter at beregne afstanden til skyen.

Billederne

- Der er 20 billeder, der viser de samme stjerner på forskellige dage og tidspunkter. Disse datoer er oplyst i titlen på hver billedefil. Filnavnene er angivet nedenfor. For eksempel blev SMC-Cep-43522-1999-10-24-03-23-25.fits taget af 24. oktober 1999 kl. 03^h 23^m og 25^s.

SMC-Cep-43522-1999-10-24-03-23-25.fits	SMC-Cep-43522-1999-11-23-02-55-34.fits
SMC-Cep-43522-1999-10-26-01-41-23.fits	SMC-Cep-43522-1999-11-26-01-22-41.fits
SMC-Cep-43522-1999-10-30-02-07-12.fits	SMC-Cep-43522-1999-11-27-00-48-33.fits
SMC-Cep-43522-1999-11-02-03-17-50.fits	SMC-Cep-43522-1999-11-30-03-15-26.fits
SMC-Cep-43522-1999-11-05-03-11-00.fits	SMC-Cep-43522-1999-12-03-02-39-09.fits
SMC-Cep-43522-1999-11-08-04-07-00.fits	SMC-Cep-43522-1999-12-05-02-44-18.fits
SMC-Cep-43522-1999-11-10-01-42-37.fits	SMC-Cep-43522-1999-12-08-02-25-59.fits
SMC-Cep-43522-1999-11-13-00-40-34.fits	SMC-Cep-43522-1999-12-12-01-10-52.fits
SMC-Cep-43522-1999-11-17-01-22-04.fits	SMC-Cep-43522-1999-12-14-02-08-45.fits
SMC-Cep-43522-1999-11-20-01-19-30.fits	SMC-Cep-43522-1999-12-19-03-23-16.fits

Der er også en fil med navnet `smc_sc5.fits`, som udgør CCD-området, hvorfra de tidligere snapshots er taget fra.


- Kopier Excel filen **Answerfile_cepheid_empty.xls** ind på din computer og åbn den. Den første og anden kolonne **dag og time, da billedet blev taget** og **Intervaltid (dage)** er allerede udfyldt. Bemærk at du kan negligere minutter, men ikke timer.
- Åben SalsaJ.
- I SalsaJ-værktøjslinjen, skal du klikke på Filer-Åbn. Åbn² filen `images_cepheids/smc_sc5.fits`. Den cepheide, vi vil undersøge her, er placeret på pixel $x = 439$, $y = 3435$. Find den. (Brug evt. **Contrast**-knappen samt zoom-værktøjet til at hjælpe dig.)
Små snapshots centreret i dette område er blevet ekstraheret til denne øvelse og vil blive anvendt nedenfor.

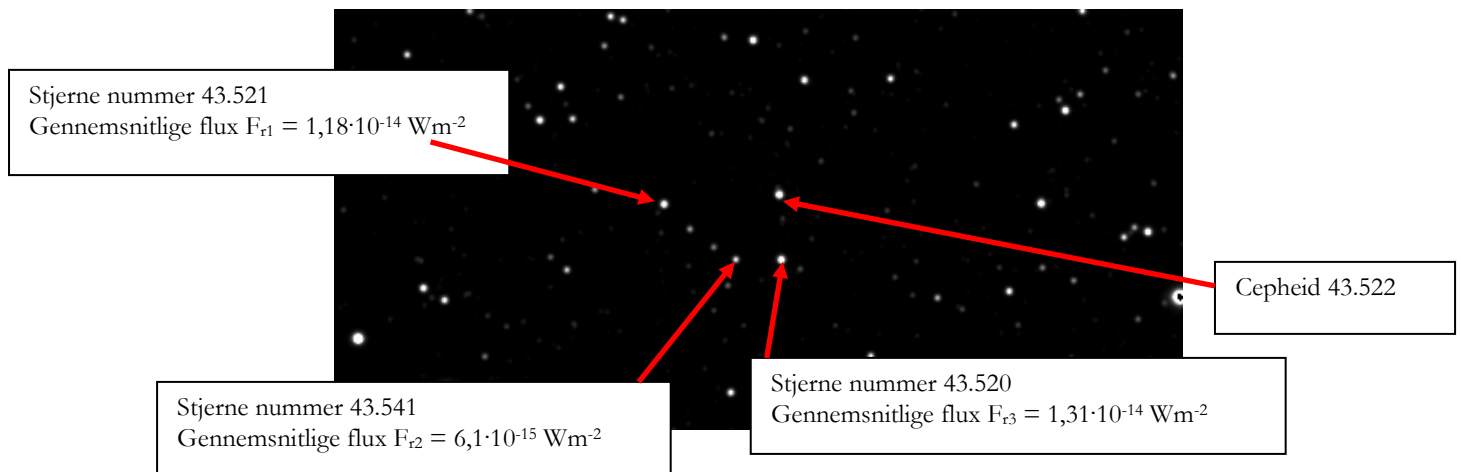
Fotometri med SalsaJ


Ideen er at bruge sammenhængen mellem cepheiders *absolutte* lysstyrke og deres periode til at bestemme afstanden til en galakse. Dette kan gøres med en serie af billeder målt til forskellige tidspunkter. Vi måler jo de *tilsyneladende* lysstyrker, så det er nødvendigt at foretage en kalibrering af målingerne. Heldigvis er kalibrering af *et* billede allerede foretaget, og det gør det muligt at finde den kalibrerede flux af 3 referencestjerner i billedområdet. En relativ kalibrering som beskrevet

² Hvis du får en **out of memory** besked, skal du lukke SalsaJ og dernæste åbne SalsaJ for Webcam. Derved får du allokeret 256Mbytes.

nedenfor vil så være tilstrækkelig til at bestemme afstanden.

5. Åbn billederne i mappen `images_cepheids` med File-Open. Tryk dernæst på Windows-Tile for at anbringe billederne ved siden af hinanden.
6. Klik på knappen **Brightness and Contrast** i værktøjslinien: 
7. Et nyt vindue vises. Klik på **Auto**. Billedkontrasten optimeres, og stjernerne bliver lettere at se. Hvis det er nødvendigt, kan du også flytte markørerne **Luminosity**, **maksimal** og **minimum** for yderligere at indstille justeringen af billedet. Luk til sidst vinduet **Brightness and Contrast**. Bemærk, at du ikke ændrer på selve billedet - det er kun fremvisningen af billedet, du ændrer på.
8. Gentag proceduren for resten af billederne.
9. Identificer de 4 stjerner, som er vigtige for vores øvelse: Cepheide 43522 og 3 stjerner, som vi vil kalde referencestjernerne. Du kan bruge billedet nedenfor til at hjælpe med identifikationen.



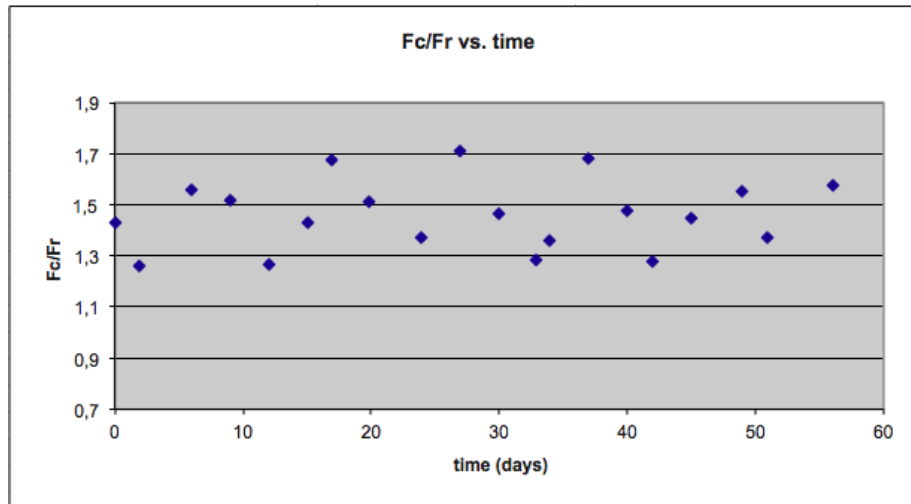
10. Klik på **Photometry**-ikonet.  Find cepheiden angivet på figuren ovenfor. Klik i midten af stjernen på det første billede. Stjernen er nu omkranset og værdien af dens intensitet vises i **Photometry**-vinduet. Klik på cepheiden på de 19 andre billeder (svarende til forskellige tidspunkter), i samme rækkefølge, som du har indtastet datoerne i Excel-svarfilen!
11. Du kan derefter kopiere listen i **Photometry**-vinduet (se nedenfor) og indsætte den i et tomt regneark.

Photometry								
Index	Image	X	Y	Star's intensity	Star's radius	Sky's intensity	Sky's radius	Message
1	SMC-Cep-43522-1999-10-24-03-23-25.fits	52	49	59037	14	866	21	
2	SMC-Cep-43522-1999-10-26-01-41-23.fits	54	51	58354	14	731	21	
3	SMC-Cep-43522-1999-10-24-03-23-25.fits	52	49	68032	12	854	18	
4	SMC-Cep-43522-1999-10-26-01-41-23.fits	54	51	69124	12	717	18	
5	SMC-Cep-43522-1999-10-30-02-07-12.fits	54	50	71027	12	634	18	
6	SMC-Cep-43522-1999-11-02-03-17-50.fits	54	51	72315	12	462	18	
7	SMC-Cep-43522-1999-11-05-03-11-00.fits	53	51	67736	12	551	18	
8	SMC-Cep-43522-1999-11-08-04-07-00.fits	53	49	70173	12	433	18	
9	SMC-Cep-43522-1999-11-10-01-42-37.fits	55	52	71021	12	643	18	
10	SMC-Cep-43522-1999-11-13-00-40-34.fits	55	51	66663	12	500	18	

12. Endelig kan du kopiere de fotometriske værdier (intensity) ind på **Flux of Cepheid (Fc)**-

kolonnen i svarfilen.

- Gentag punkterne 10-12 hvor det nu er en af referencestjernerne, du måler på. Indsæt intensiteten fra referencestjernen i kolonnen med overskriften **Flux of reference star (Fr)**. Bemærk, at du selv kan vælge en af de 3 referenceperioder stjerner angivet på ovenstående figur, men husk at måle på *samme* referencestjerne på alle 20 billeder.
- Svarfilen beregner automatisk F_c/F_s -forholdet i 5. kolonne. Regnearket tegner også variationen af F_c/F_s , som funktion af tiden. (Se billedet nedenfor).



Variationerne som funktion af tiden ser uregelmæssig ud, medens signalet vides at være periodisk. Overvej hvorfor.

Fortolkning

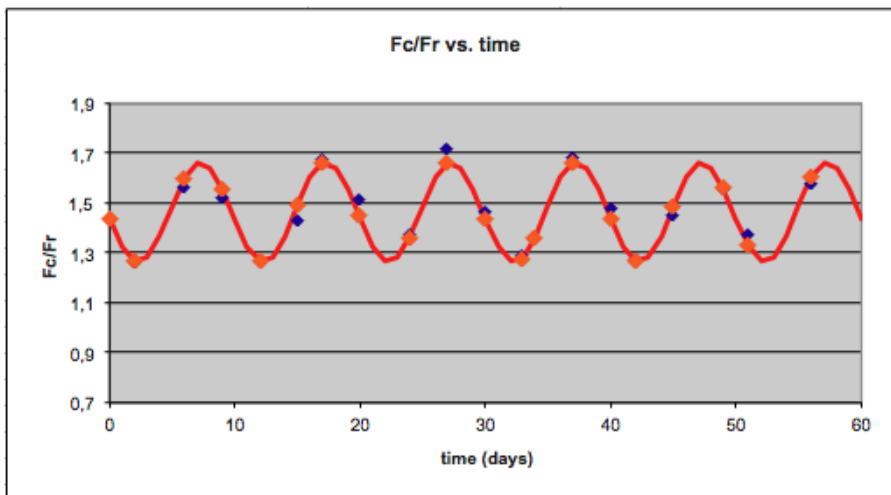
Vi skal udlede information fra observationerne for at måle afstanden til SMC: (1) den gennemsnitlige tilsyneladende lysstyrke af cepheiden, hvis bestemmelse kræver en absolut kalibrering, (2) perioden for lysstyrkevariationen, som bedst estimeres med en justering af en sinuskurve oven på lyskurven.

- Ved bunden af kolonnen F_c/F_s kan du (med fed skrift) se den gennemsnitlige værdi af forholdet (når du har fyldt de 20 linjer). Ved hjælp af dette forhold og den gennemsnitlige flux af den referencestjerne, som du valgte (de kalibrerede enheder i W/m^2 kan du se i den første figur i dette dokument), kan du bestemme den gennemsnitlige flux af cepheiden. For at kunne gøre dette, er du nødt til at udfylde dataene i de grønne celler i din Excel-svarfil.
- Ved at bruge den kurve, der vises i Excel, kan du foretage et første estimat af pulsationsperioden.
- For at forbedre dette første gæt, kan du tilpasse data med en generisk sinusfunktion af formen: $f(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) + B$, hvor
 - A er amplituden af sinusfunktionen.
 - ω er vinkelhastigheden af svingningen, dvs $\omega = \frac{2\pi}{T}$, hvor T er pulsationsperioden.
 - B er den gennemsnitlige værdi af alle værdier af flux-forholdet F_c/F_s .
 - φ er fasen af funktionen. Dens værdi ligger i intervallet $[-\pi, \pi]$. Hvis de første punkter af kurven er mindre end B , er fasen negativ, hvis de større end B er fasen positiv.
 Fastslå med en enkelt observation af kurven, de omtrentlige værdier af A , T (og dermed ω), og φ . B blev bestemt automatisk ved bunden af kolonnen F_c/F_s .

18. Noter disse omtrentlige værdier (A , ω , φ og B) i de blå celler i din svarfil. Så snart alle værdier er indtastet, bliver den blå kolonne **Approximation** udfyldt automatisk ved siden af dine eksperimentelle værdier af F_C/F_S . Denne blå kolonne er altså de teoretiske værdier beregnet med formlen $f(t)$ fra ovenfor.

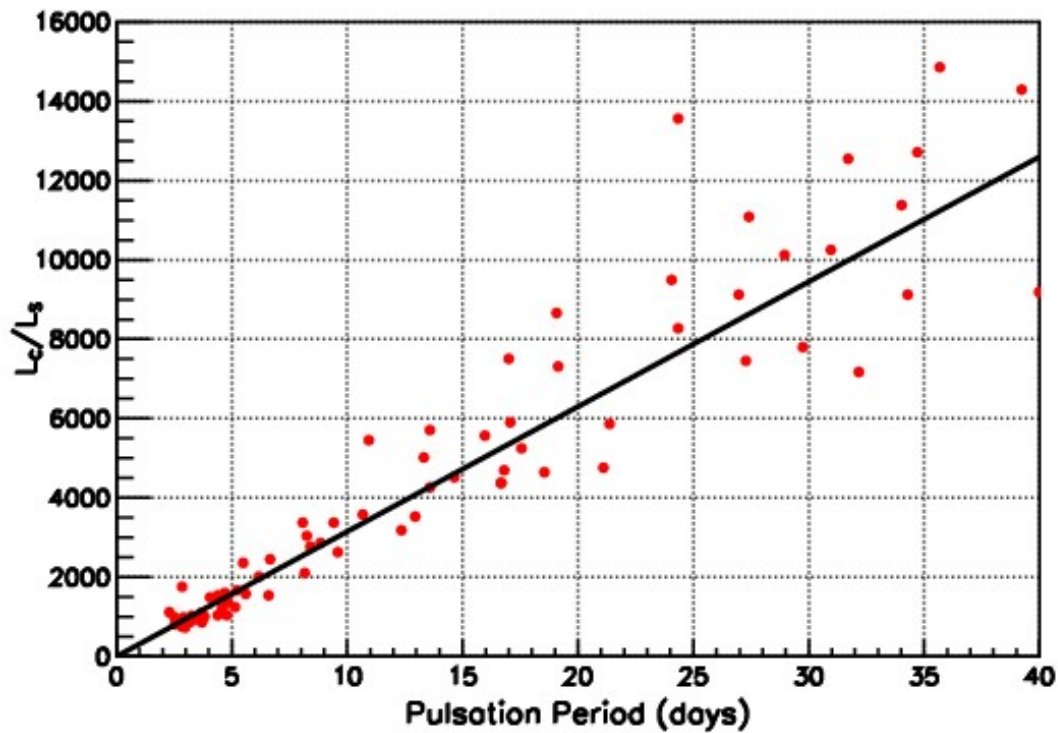
Værdien af cellen **solver** er kvadratsummen af forskellen mellem de målte værdier (fotometri på billederne) og de respektive teoretiske værdier ($f(t)$ med de angivne parametre: en nul-værdi betyder, at $f(t)$ passer nøjagtigt med de eksperimentelle data.

19. Den sinusformede model overlejres dine måledata. Punkterne på billedet nedenfor viser måledata med blå og modeltal med rødt. Sinuskurven er overlejret med rødt. For en bedre (og automatiseret) evaluering af sinus-parameter, skal du følge den procedure, der er beskrevet i tillægget.



20. Find T ved hjælp af værdien for $\omega = \frac{2\pi}{T}$. Skriv dit svar i den blå celle i din svarfil.

21. Grafen nedenfor giver forholdet L_C/L_{Sol} , målt i W , som funktion af cepheidens periode. Brug grafen til at bestemme L_C/L_{Sol} .



22. Det var i øvrigt Henrietta Swan Leavitt, der første gang opdagede sammenhængen mellem cepheiders absolutte lysstyrke og deres pulsationsperiode. (I 1912.) Beregn L_C idet $L_{\text{Sol}} = 3,846 \cdot 10^{26}$ W.
23. Afstandskvadratloven giver os, at den tilsyneladende lysstyrke, $l = F = \frac{L_C}{4\pi r^2}$. Så hvis vi kender cepheidens absolutte lysstyrke, L , samt den modtog flux F , kan vi beregne dens afstand r . Bestem afstanden r mellem cepheiden og Solen. Din svarfil kan hjælpe dig med at beregne afstanden i meter, ly^3 og i pc^4 . Da cepheiden er placeret i den Lille Magellanske Sky, har du lige fundet ud af afstanden til denne dværggalakse.
24. Sammenlign din fundne afstand til Den Lille Magellanske Sky med tabelværdien på 61 ± 4 kpc fra Solen. Hvad kan være usikkerhedskilder i observationen? Hvilken af dem er mest betydningsfuld?

³ 1 ly = $9,461 \cdot 10^{15}$ m

⁴ 1 pc = $3,086 \cdot 10^{16}$ m

Tillæg

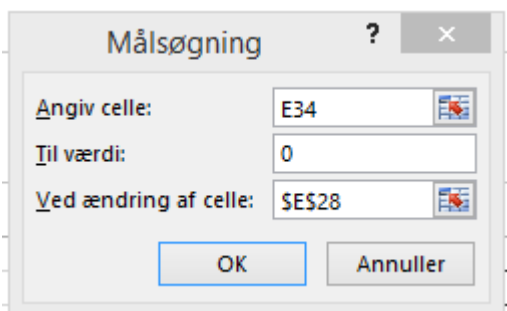
Nedenfor vil vi give en alternativ metode til at justere parametrene A , B , ω og φ .

Da Excel, i modsætning til anden software som f.eks. Regressi⁵, har ikke en funktion til at bestemme parametrene for en sinusfunktion; derfor vil vi bruge Excels Problemløser-funktionen. Det gør det muligt at forfine A , B , ω og φ .

Den gennemsnitlige værdi af forskellene mellem de målte data og de teoretiske er skrevet i cellen **value of the solver** i din svarfil. Det gælder om at denne værdi er så tæt på 0 som muligt.

Klik på cellen, som indeholder værdien af **value of the solver** (celle E34 i svarfilen). Denne celle er din **målcelle**. Klik nu på Excel-fanen **Data** vælg **What if-Analysis** og derefter på **Problemløser**.

Følgende vindue dukker op på skærmen. (Bemærk, at du selv skal skrive 0 i midterste celle, og at du i nederste celle kan veksle mellem cellerne E28 til E31.)



Kontroller, at cellen E34 er skrevet i **Angiv målsætning**. Hvis du ser tilbage på trin 19, ser du, at denne værdi skal være så tæt på 0 som muligt. Således vælger "lig med: Værdi af: 0".

Klik derefter på **OK**. Målcellen er tættere på nul nu, og din værdi af ω er blevet ændret en smule. Hvis du får en værre tilnærmelse til 0 i celle E34, skal du trykke på **annuller** og så prøve en af de andre celler.

Gentag trinnet for de øvrige justerbare celler A , B og φ . Du skulle nu have en fremragende teoretisk tilnærmelse. Er du ikke helt tilfreds med fittet, kan du gentage proceduren.

-0-

⁵ Regressi is et gratis Fransk softwareprogram <http://www.ac-nice.fr/audiberti/guppy/articles.php?lng=fr&pg=250>