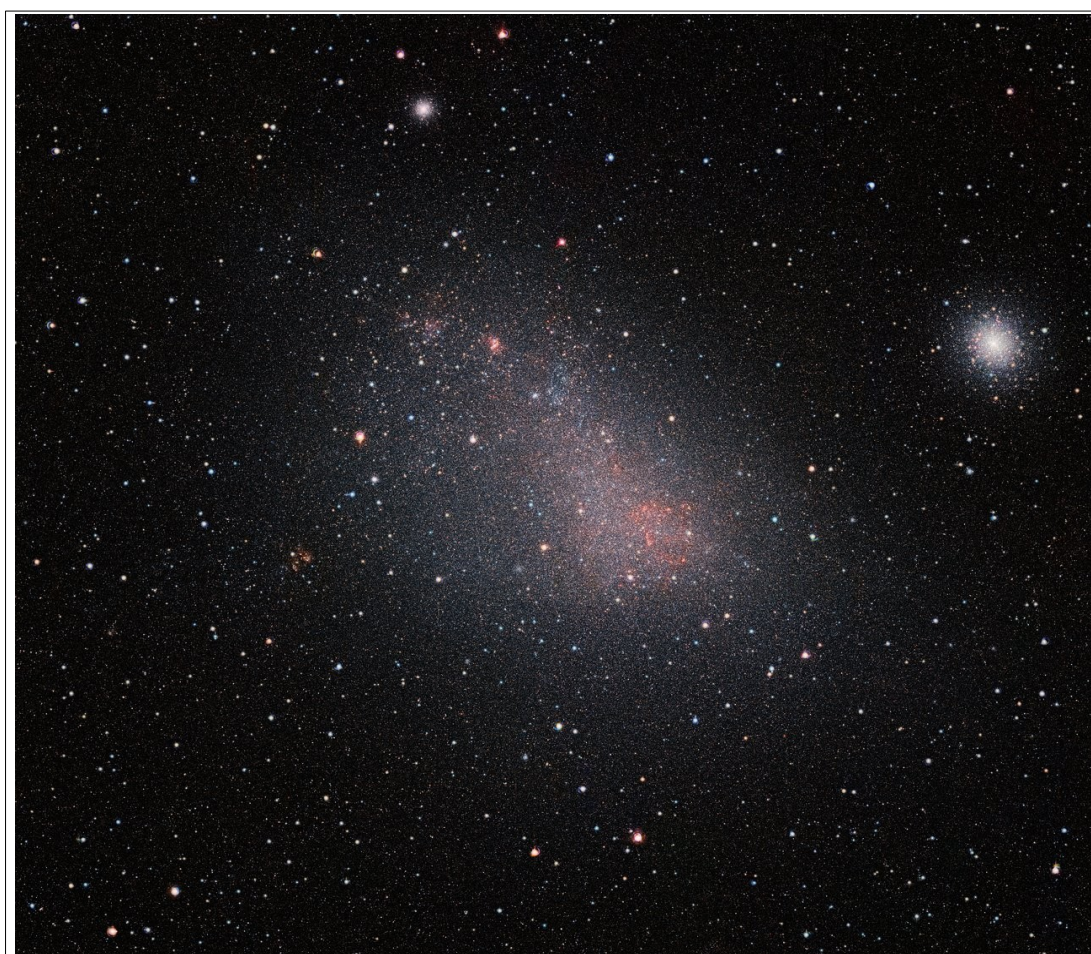


Afstandsmåling til Den lille magellanske sky, SMC, ved hjælp af cepheidemetoden



Figur 1: Den lille magellanske sky, SMC. ESO/VISTA VMC.

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 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.

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 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 billedfil. 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.

- Åbn *AstroImageJ* og klik på *Filer-Åbn*. (CTRL+O). Åbn filen `images_cepheids/smc_sc5.fits`. I billedvinduet skal du vælge *View* og hakke af i *Invert None*. Den cepheide, vi vil undersøge her, er placeret på pixelkoordinaterne $(x, y) = (439, 3435)$. Find den og brug evt. *Image-Adjust-Brightness/Contrast* (SHIFT+CTRL+C) samt *Zoom*-værktøjet til at hjælpe dig.

Små snapshots centreret i dette område er blevet ekstraheret til denne øvelse og vil blive anvendt nedenfor.

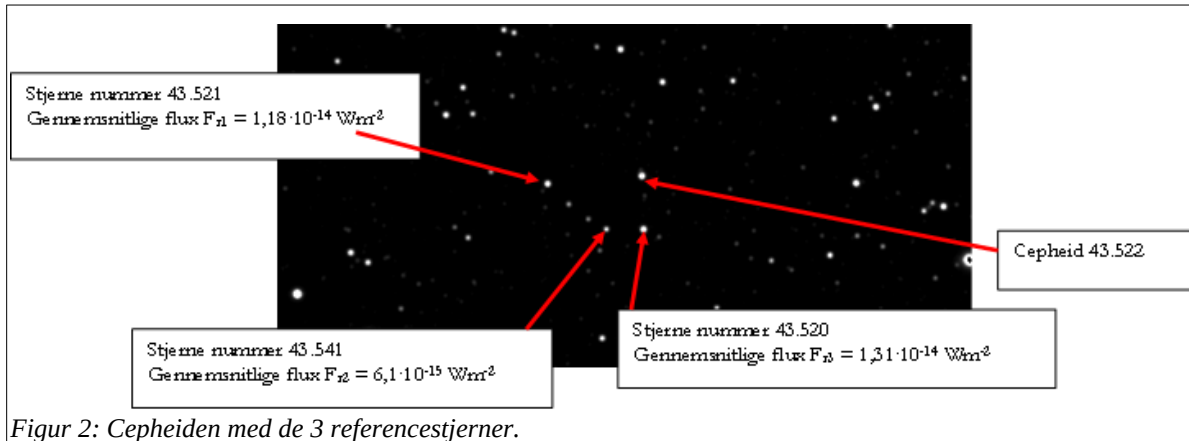
Fotometri med AstroImageJ

Ideen er at bruge sammenhængen mellem cepheids *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 tilsyneladende luminositet af 3 referencestjerner i billedområdet. En relativ kalibrering som beskrevet nedenfor vil være tilstrækkelig til at bestemme afstanden.

- Åbn billederne i mappen `images_cepheids` med *File-Import-Image Sequence*. Vælg mappen med billeder, og skriv *SMC* i filteret, så du kun får de relevante 20 billeder med.
- Hvis det er svært at se stjernerne, kan du flytte på markørerne i det blå felt nederst på

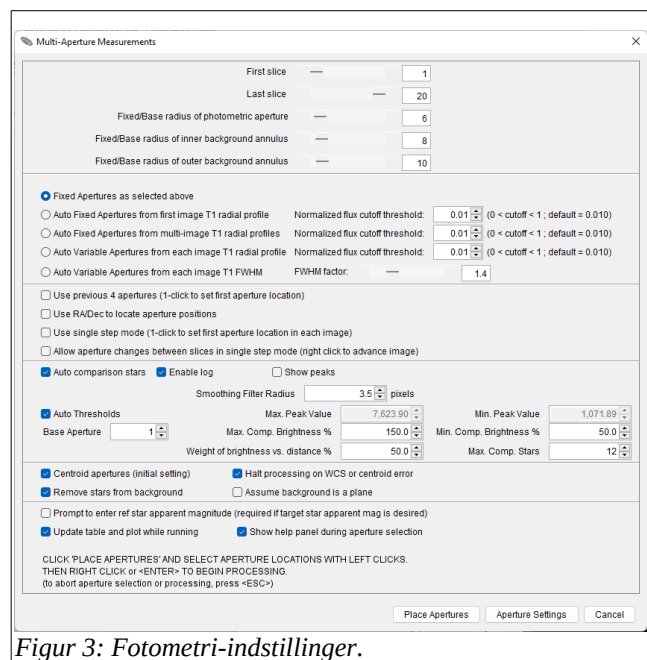
billederne. Du ændrer ikke på dataene – kun på fremvisningen af billederne.

5. 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.



Figur 2: Cepheiden med de 3 referencestjerner.

6. Zoom ind på en af stjernerne, vælg *Linie*-knappen i kommandovinduet og træk en streg gennem stjernen. Tryk *CTRL+K* og find den radius, der skal til for at alt lyset fra stjernen bliver målt.
7. Vælg derefter radier til at måle baggrundslyset.
8. Tryk på *Change Aperture settings* i billedvinduet og indtast de bestemte radier. Sørg for at *Centroid Apertures* er hakket af og klik på *OK*.
9. Tryk på *Perform Multi-Aperture Photometry*.
10. Tjek at indstillingerne er sat som i billedet vist i figur 3.
11. Tryk på *Place Apertures* og klik på cepheiden.
12. Klik nu på en af referencestjernerne.



Figur 3: Fotometri-indstillinger.

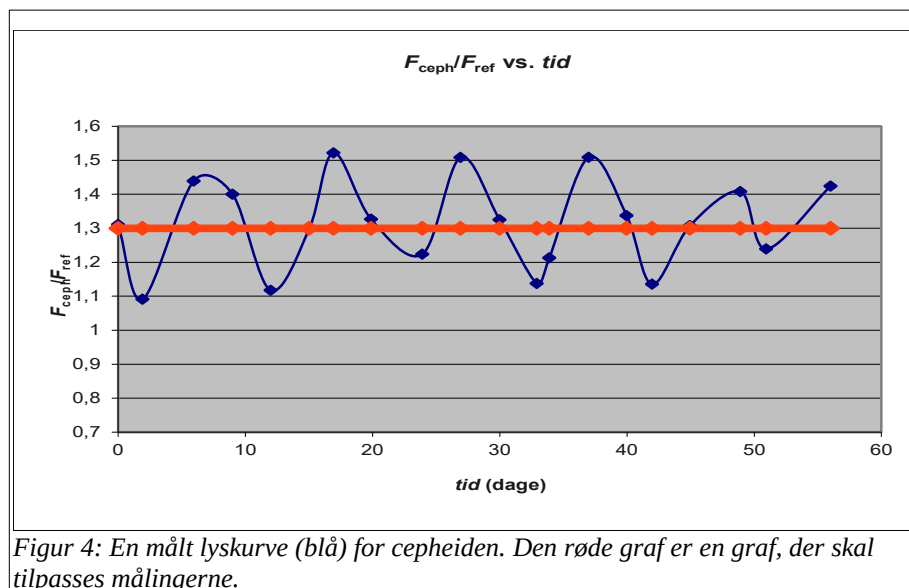
(Bemærk, at *AstroImageJ* sikkert allerede har valgt nogle af dem, og så er det ikke nødvendigt at vælge endnu en.) Tryk på *Enter*.

Nu udføres fotometri på alle billederne, og du kan gemme resultaterne som en kommasepareret fil. Bemærk at *AstroImageJ* også tegner en lyskurve, men da datoer ikke er gemt i fits-filerne, bliver grafen forkert. Hvis du vil have tiderne med, kan du i *Change Aperture Settings* indskrive parameteren *UT-DATE*, men det er ikke nødvendigt, da datoerne allerede er skrevet ind i det medfølgende regneark.

13. Åbn resultatfilen i *Notepad* eller lignende og erstat først alle kommaer med semikolon, og derefter alle punktummer med kommaer. Marker al teksten og kopier den.
14. Kopier Excel filen *Cepheider-svarfil.xlsx* ind på din computer og åbn den. Kolonnerne *dag og time*, da billedet blev taget og *Tidsinterval (dage)* er allerede udfyldt. Bemærk at du kan negligere minutter, men ikke timer.

15. Indsæt al teksten i arket med navnet *Målinger fra AstroImageJ*. Du kan se arket nederst i Excel.
16. Ser målingerne mærkelige ud, skal du vælge Fanebladet *Data* og vælge *Tekst til kolonner*. Tryk på *Afgrænset* og vælg semikolon som separator.
17. Find kolonnen *Source-Sky_T1* og kopier tallene ind i arket med navnet *Resultater* i kolonnen *Udstråling fra cepheiden*.
18. Find i arket *Målinger fra AstroImageJ*, kolonnen *Source-Sky_RX*, hvor *X* er nummeret på den valgte referencestjerne og kopier den ind resultatarkets kolonne *Udstråling fra referencestjerne*.
19. Svarfilen beregner automatisk $F_{\text{ceph}}/F_{\text{ref}}$ -forholdet i 5. kolonne. Regnearket tegner også variationen af $F_{\text{ceph}}/F_{\text{ref}}$, som funktion af tiden. (Se billedet nedenfor).

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



Figur 4: En målt lyskurve (blå) for cepheiden. Den røde graf er en graf, der skal tilpasses målingerne.

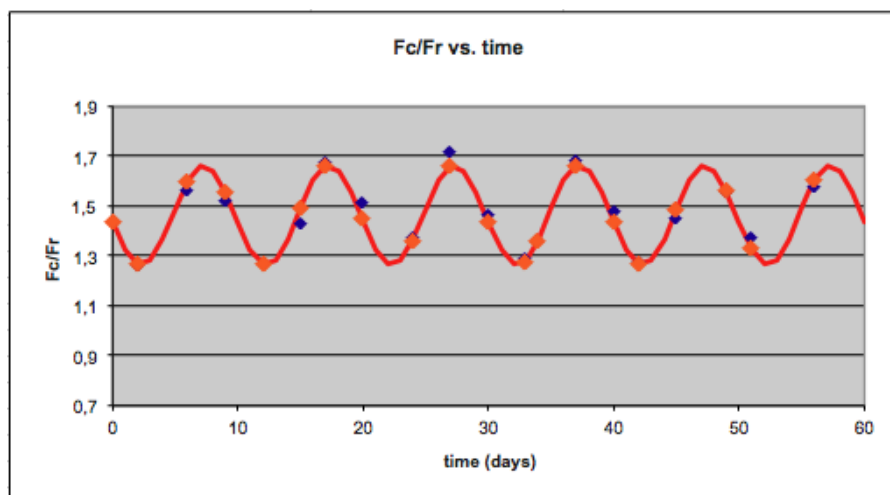
Fortolkning

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.

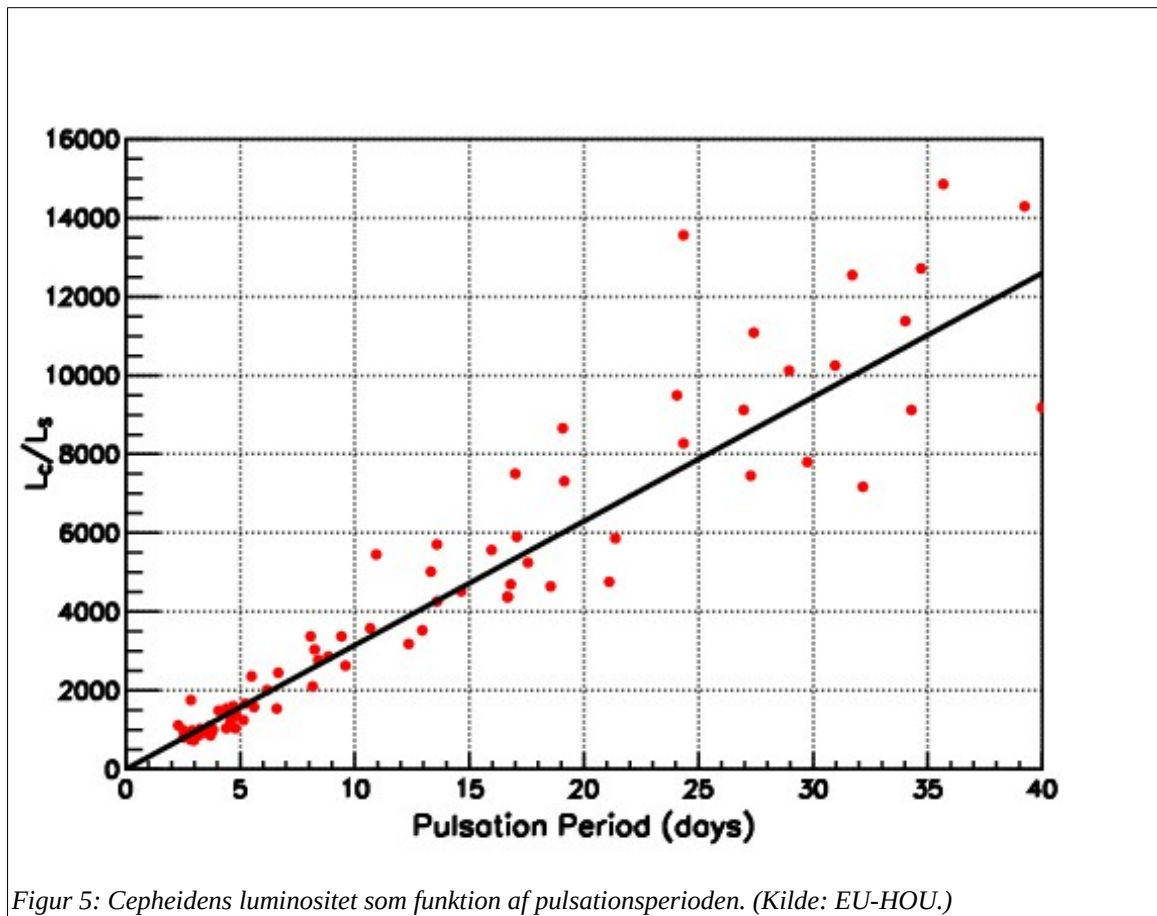
20. Ved bunden af kolonnen $F_{\text{ceph}}/F_{\text{ref}}$ kan du (med fed skrift) se den gennemsnitlige værdi af forholdet (når du har fyldt de 20 linjer). Ved hjælp af dette forhold og den gennemsnitlige flux af den referencestjerne, som du valgte (de kalibrerede enheder i W/m^2 kan du se i figur 2), 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.
21. Ved at bruge den kurve, der vises i Excel, kan du foretage et første estimat af pulsationsperioden.
22. 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 $F_{\text{ceph}}/F_{\text{ref}}$. B blev bestemt automatisk ved bunden af kolonnen $F_{\text{ceph}}/F_{\text{ref}}$.
 - 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 .

23. Noter disse omtrentlige værdier (A , T og φ) 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 $F_{\text{ceph}}/F_{\text{ref}}$. Denne blå kolonne er altså de teoretiske værdier beregnet med formlen ovenfor.
24. 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.



25. Grafen i figur 5 giver forholdet $L_{\text{ceph}}/L_{\text{sol}}$, målt i W, som funktion af cepheidens periode. Brug grafen til at bestemme $L_{\text{ceph}}/L_{\text{sol}}$ og indtast den i celle *E41* i svarfilen.
26. 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?



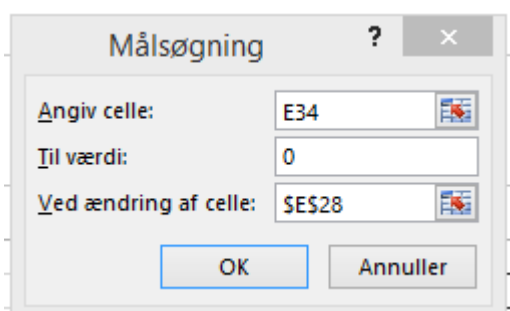
Tillæg

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

Den gennemsnitlige værdi af forskellene mellem de målte data og de teoretiske er skrevet i cellen $E34$ i din svarfil. Det gælder om at få denne værdi så tæt på 0 som muligt.

Klik på celle $E34$ i svarfilen. Denne celle er din *målcelle*. Klik nu på Excel-fanen *Data* vælg *What if-Analyse* 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 $E28$, $E29$ eller $E31$.)



Klik derefter på *OK*. Målcellen er tættere på nul nu, og din værdi af A , T eller φ 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.

Du skulle nu have en fremragende teoretisk tilnærmelse.