Exoplanetdetektion med AstroImageJ

I denne øvelse skal du måle en lyskurve for en stjerne, når den krydses af en af sine planeter. Dataene kan du for eksempel hente hos Las Cumbres Observatories: LCO.global. Ud fra lyskurven og kendskab til stjernens masse og radius skal exoplanetens radius og baneinklination bestemmes.

Illustration 1:Tegning af TrES-3. Kilde: https://www.robotplanet.dk/astro/exoplanets.php?p=TrES-3_b .

1. Datasøgning

Du kan bruge Internettet til at lede efter billeder, der kan analyseres. Eller du kan f.eks. anvende søgeordene *Tres-1* eller *Tres-3* i arkivet hos LCO. (Skriv et af ordene ind i *Object*-feltet på arkivets hjemmeside.) De to søgeord bruges til at finde data for to forskellige exoplaneter.

1.2. Objektet

Hvis du vælger et af ovenstående forslag til at søge efter billeder, ligger exoplaneten på et af koordinatsættene:
TrES-1: (α; δ) = (19:04:09,8516; +36:37:57,445).
TrES-3:(α; δ) = (17:52:07,0185; +37:32:46,237).

Information om observationsudstyret og billederne.
Hvis du finder data hos LCO.global, så skal du sørge for at vælge data, der er reducerede, dvs. der er taget højde for elektronisk støj, ujævnheder i detekteoren osv. Det gør du ved i punktet *Reduction Level* at vælge *BANZAI.*

Du skal også kun vælge billeder fra ét enkelt filter. Det kunne f.eks. være *w* eller r_p.

Du skal downloade mange billeder – gerne over 100, og der må gerne være ca. 1 minut mellem hvert billede. Du kan evt. starte med at downloade et par billeder og åbne dem i AstroImageJ, så du kan kontrollere om billederne er tydelige og ikke overeksponerede. Man kan tjekke for overbelysning ved at zoome ind på en stjerne, vælge linieprofil og så trykke på CTRL-K. Hvis profilet er vandret i toppen er billedet overeksponeret, og du skal vælge billeder med kortere eksponereingstid eller billeder taget med en mindre kikkert. Der er vejledning til at lave et profilplot i filen *AstroImageJ-how to.pdf,* som findes på *astro-gym.dk/Tekster*.

2. Udstyr

En computer med programmet *AstroImageJ*. Et regneark eller tilsvarende databehandlingsprogram.

3. Lyskurver

En lyskurve er et diagram, hvor man aftegner den tilsyneladende lysstyrke eller størrelsesklasse som funktion af observationstidspunktet. I denne øvelse, kan du bruge den *relative tilsyneladende lysstyrke*, dvs. du måler stjernens lys i forhold til nogle referencestjerner, som *AstroImageJ* i første omgang selv vælger for dig. Ved at måle relativt til andre stjerner, får man mere præcise resultater. I eksemplet på illustration 2 kan man aflæse maksimum- og minimumlysstyrke samt tranisttiden, som er bredden af truget i grafen.

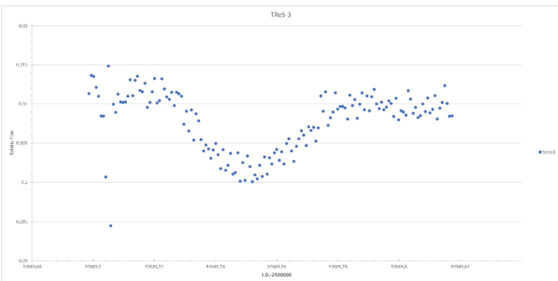

Illustration 2:Eksempel på lyskurve..

4. Teori

Når man måler en lyskurve, kan man aflæse den maksimale lysstyrke F_{maks} og lysstyrken F_{min} i bunden af kurven. Dermed kan den relative ændring i lysstyrken beregnes, og man kan dermed finde planetens radius i forhold til stjernens radius ved at benytte formlen

$$\Delta F_{rel} = \frac{F - F_t}{F} = \left(\frac{R_{planet}}{R_{stjerne}}\right)^2 . \qquad (1)$$

Formlen er udledt på side 4. Ved opslag på Internettet kan stjernens radius findes, og dermed kan exoplanetens absolut radius også bestemmes.

Hvis man har så lang en tidsserie, at der er to formørkelser, kan man aflæse planetens periode, *P*. Hvis datamængden ikke dækker over så lang en periode, må man søge efter planetens periode på Internettet.[1] Ved hjælp af planetens periode og kendskab til stjernens masse, kan man anvende Keplers 3. lov til at bestemme planetens halve storakse, *a*.

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{M_{stjerne}}{M_{sol}} \qquad (2)$$

I formlen ovenfor skal perioden indsættes i enheden år og den halve storakse får enheden AU. (En astronomisk enhed.)

Transittiden, *T*, kan aflæses som bredden af truget på lysskurven. Dermed kan planetens inklination, dvs. banehældning beregnes af formlen

$$i = \arccos\left(\pm\sqrt{\left(\frac{R_{stjerne} + R_{planet}}{a}\right)^2 - \sin^2\left(\frac{\pi \cdot T}{P}\right)}\right) \qquad (3)$$

Formlen er udledt på side 5. Man skal ved beregningen naturligvis sørge for at R_i og *a* har samme enhed og det samme gælder for *T* og *P*.

5. Fremgangsmåde

Det kan være en fordel at hente vejledningen *AstroImageJ-how to.pdf* på astro-gym.dk og have den liggende, inden databehandlingen starter.

1. Indlæs billederne i *AstroImageJ*. (Brug funktionen *File-Import-Image Sequence.*)
2. I koordinatfeltet markeret med teksterne *RA* og *DEC*, skal du skrive koordinatsættet for den stjerne, som du vil undersøge. Dermed kommer en gul cirkel på skærmen, og hvis du zoomer ind (pil op/ned) på markeringscirklen, bør der være en stjerne i cirklens centrum.
3. Vælg linie-ikonet og træk en linie tværs gennem stjernen. Tryk på CTRL-K. Et profilplot, der viser hvordan stjernens lys er spredt på billedet kommer frem, og du skal nu aflæse hvor stor radius blænden skal have, for at alt lyset fra stjernen bliver målt af computeren. Find også passende start- og slutværdi for den skal, hvor baggrundsslys måles. Luk derefter profilplottet og afmarker den tegnede linie.
4. Tryk nu på *Multiple Aperture Photometry*-knappen.
5. Start med indtaste blænderadius, og baggrundsskallens start- og slutværdi.
6. Sørg for at der er ikke er hakket af i feltet *Use previous xx apertures,* og at der ér hakket af i *Use Ra/Dec to locate aperture position.*

---

1 Se for eksempel kildelisten. (NASA Exoplanet Archive.)

7. Tryk på *Place Apertures* og tryk nu i midten af den gule markeringscirkel. Der skulle gerne blive skrevet bogstavet *T* samt et nr. (T betyder target.)
   Programmet leder derefter efter referencestjerner, og man kan se status i det vindue, der åbner og som hedder *Multi Aperture Log.*
8. Hvis du ikke ønsker at tilføje en referencestjerne, skal du trykke på *ENTER*, hvorefter analysen af samtlige billeder starter. Bemærk, at der åbnes en masse vinduer.

I næste afsnit er kort beskrevet, hvad de forskellige vinduer bruges til.

5.1 Vinduernes anvendelse

5.1.1. Vinduet Multi-plot-Y-data

Her kan du vælge targetstjernen samt referencestjernerne. Vælg i første omgang dem alle sammen, da det er vigtigt at forvisse sig om at referencestjernerne ikke varierer i lysstyrke. Lad *X-data* være J.D.-2400000 og lad *Y-data* være rel_flux_T1, rel_flux-C1 osv.

5.1.2 Vinduet Multi-plot Main

Her kan du vælge titler til billedet, og du kan skalere akserne.

5.1.3. Vinduet Plot of Measurements

Kontroller at referencestjernernes grafer er vandrette. Finder du en stjerne, der ikke giver en vandret graf, så noter nummeret og besøg vinduet *Multi-plot Reference Star Settings* og fjern hakket for den pågældende stjerne.

5.1.4. Vinduet Multi-plot Reference Star Settings

Her kan du se hvilke stjerner, der bruges som referencestjerner, når den relative lysstyrke bliver beregnet. Du kan selv vælge, hvilke stjerner, du vil bruge.

Når du er tilfreds, så tryk på knappen *Save Table.* Den foreslår filnavnet *Measurements.xls.*Her bør du ændre fil-efternavnet så filen for eksempel kommer til at hedde *Målinger.csv*. I filen er samtlige data, du kan indlæse i et regneark for mere detaljeret databehandling. Bemærk at man i Danmark bruger komma som decimalseparator, og filen benytter punktum. Derfor skal du i Notesblok eller et tilsvarende tekstlæsningsprogram gøre følgende:

Søg efter alle kommaer og erstat dem med semikolon. Søg derefter efter alle punktummer og erstat dem med komma. Marker så teksten, indsæt den i Excel, vælg fanebladet *Data*, og vælg så Tekst til kolonner, hvis teksten ikke allerede er sat ind i kolonner.

6. Databehandling

Print grafen som pdf-fil og benyt Adobe Readers lineal-funktion til at bestemme F_{maks}, F_{min} og T. Giver dataene dig mulighed for det, så aflæs også P.

Benyt formlerne 1-3 til at beregne planetbanens halve storakse, planetens radius og inklination.

Vurder nøjagtigheden af dine resultater og sammenlign dit resultat med resultater fra NASAs exoplanetarkiv. (Se kildelisten for websted.)

-o-

Hvis du vil vide, hvordan de benyttede formler er udledt, kan herunder læse mere om det.

7. Differentialfotometri

Vi kender fra tidligere, at størrelsesklassen, *m*, for en stjerne er defineret ved formlen $m=-2{,}5\cdot\log(l)+k$, hvor *l* er den tilsyneladende lysstyrkeet og *k* er en konstant. En kikkert med detektor modtager en brøkdel af stjernens tilsyneladende lysstyrkeet.

Konstanten *k* blev oprindeligt bestemt ved at betragte bestemte stjerner, som lyste konstant, og der blev benyttet et ganske bestemt slags udstyr til at måle lysstyrken. De færreste mennesker har samme udstyr, som oprindeligt blev anvendt, og derfor vil størrelsesklassen for en given stjerne måles forskelligt for forskelligt apparatur. Vi siger, at det benyttede apparatur giver en *instrument-størrelsesklasse*, m_{ins}, som er givet ved formlen $m_{ins}=-2{,}5\cdot\log(F_{målt})$. *F* er den målte lysstyrke, og hvis man benytter en CCD-detektor, vil *F* være et tælletal, som er proportionalt med den faktiske tilsyneladende lysstyrke, *l*. (Man skal naturligvis huske at fratrække baggrundsstøjen fra tælletallet for at finde $F_{målt}$.) Dvs. $F=\alpha\cdot l$, hvor α er en proportinalitetskonstant.

For at finde den faktiske størrelsesklasse skal man derfor også måle på standardstjerner foruden sin ønskede stjerne, så man kan bestemme sammenhængen mellem standardværdier og ens målte værdier. (Man kalibrerer altså sine målinger.)

Nogle gange er ovenstående kalibrering dog unødvendig – f. eks. når man vil måle forskelle i lysstyrke, og det vil vi jo netop gøre i denne øvelse. Derfor vises nedenfor, at forskelle mellem størrelsesklasser er ens for forskellige slags appartur.

Man observerer en referencestjerne også kaldet standardstjerne (st) samt sin ønskede targetstjerne (obj).

Anvendt udstyr	**Referenceudstyr**
$m_{ins}(st)=-2{,}5\cdot\log(F_{st})$ $m_{ins}(obj)=-2{,}5\cdot\log(F_{obj})$ $F=\alpha\cdot l$ $\delta m=m_{ins}(obj)-m_{ins}(st)$ $\delta m=-2{,}5\cdot[\log(F_{obj})-\log(F_{st})]$ $\delta m=-2{,}5\cdot\log(\frac{F_{obj}}{F_{st}})=-2{,}5\cdot\log(\frac{\alpha\cdot l_{obj}}{\alpha\cdot l_{st}})$ $\delta m=-2{,}5\cdot\log(\frac{l_{obj}}{l_{st}})$	$m_{ref}(st)=-2{,}5\cdot\log(l_{st})+k$ $m_{ref}(obj)=-2{,}5\cdot\log(l_{obj})+k$ $dm=m_{ref}(obj)-m_{ref}(st)$ $dm=-2{,}5\cdot[\log(l_{obj})-\log(l_{st})]$ $dm=-2{,}5\cdot\log(\frac{l_{obj}}{l_{st}})$
$\delta m=dm.$	

Strengt taget skal man også tage højde for atmosfærens spredning/aborption af lys, men det viser sig også her, at så længe man måler forskelle i størrelsesklasser går korrektionerne ud med hinanden.

8. Planetens radius i forhold til stjernens radius

Når stjernens lys ikke delvist spærres af planeten, modtager man lysstyrken *F*. I transitten modtages fluxen F_t. Vi måler jo både *F* og F_t, så de er kendte. I beregningen nedenfor betegner *I* den middelintensitet[2] (effekt/areal), som udstråles fra stjernens overflade, A_i er tværsnitsarealerne af hhv. stjernen og planeten. Herunder sammenkædes de to målte størrelser med planetens- og stjernens

2 Vi ser bort fra randformørkning.

radier:

$$\Delta F_{rel}=\frac{F-F_t}{F}=1-\frac{F_t}{F}=1-\frac{(A_{stjerne}-A_{Planet})\cdot I}{A_{stjerne}\cdot I}=1-\frac{A_{stjerne}-A_{Planet}}{A_{stjerne}}=\frac{A_{planet}}{A_{stjerne}}=\frac{\pi\cdot R_{planet}^2}{\pi\cdot R_{stjerne}^2}=\left(\frac{R_{planet}}{R_{stjerne}}\right)^2.$$

Hvis man foretrækker at anvende størrelsesklasser i stedet for fluxer fås:

$$m_{normal}=-2{,}5\cdot\log(F_{stjerne})\wedge m_{transit}=-2{,}5\cdot\log(F_{transit})\Rightarrow\Delta m=m_{normal}-m_{transit}=-2{,}5\cdot\log\left(\frac{F_{stjerne}}{F_{transit}}\right).$$

$$\Delta m=m_{normal}-m_{standard}+m_{standard}-m_{transit}=\delta m_{normal}-\delta m_{transit}=-2{,}5\cdot\log\left(\frac{F_{stjerne}}{F_{transit}}\right)\Leftrightarrow$$

$$\Delta m=+2{,}5\cdot\log\left(\frac{F_{transit}}{F_{stjerne}}\right)\Leftrightarrow\frac{F_{transit}}{F_{stjerne}}=10^{\frac{\Delta m}{2{,}5}}.$$

Ved at erstatte forholdet mellem lysstyrkerne i formlen på side 4 med udtrykket for forholdet lige ovenfor fås:

$$1-\frac{F_t}{F}=1-10^{\frac{\Delta m}{2{,}5}}=\left(\frac{R_{planet}}{R_{stjerne}}\right)^2\Leftrightarrow\frac{R_{planet}}{R_{stjerne}}=\sqrt{1-10^{\frac{\Delta m}{2{,}5}}}.$$

9. Planetens inklination/banehældning

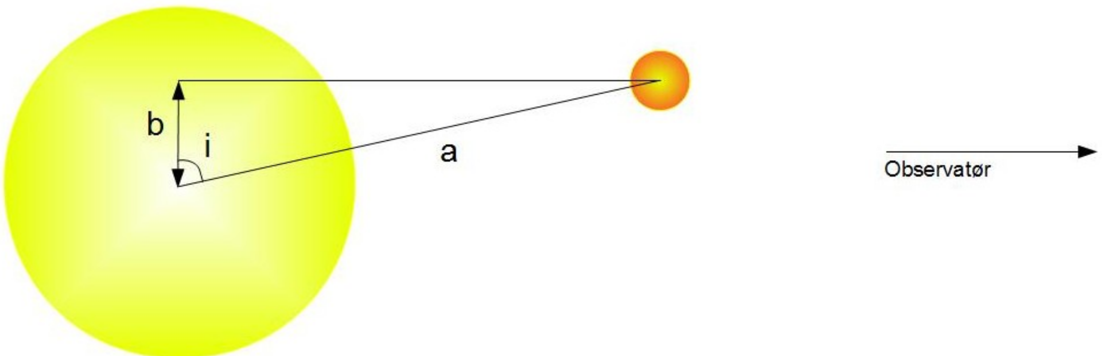

Illustration 3:Planeten, Jorden og stjernen står i konjunktion - dvs. på en lige linie. Planetens halve storakse er angivet ved a. Bemærk at b=a·cos(i).

En planetbane hælder ofte i forhold til himmelplanet. Derfor vil planeten krydse stjernens bane skævt set fra Jorden. Se illustration 3. Man kalder længdestykket b for *stød-parameteren*.

Observatøren ser en 2D-projektion af problemstillingen. Dette er forsøgt vist på illustration 4.

Af illustration 4 kan man se, at det for observatøren ser ud som om, at planeten i transittiden bevæger sig $2\cdot l$ henover skiven. Denne transittid kan vi måle på lyskurven. Af illustrationerne kan vi se at den tilbagelagte afstand er givet

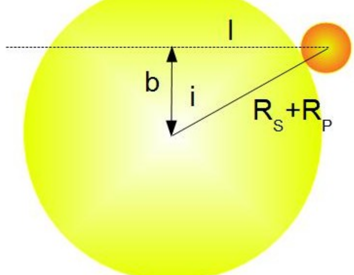

Illustration 4:Samme som ved ill. 3 - men nu set fra observørstedet.

ved udtrykket

$$b=a\cdot\cos(i)\wedge b^2+l^2=(R_s+R_p)^2 \Leftrightarrow \sqrt{(R_s+R_p)^2-(a\cdot\cos(i))^2}=l.$$

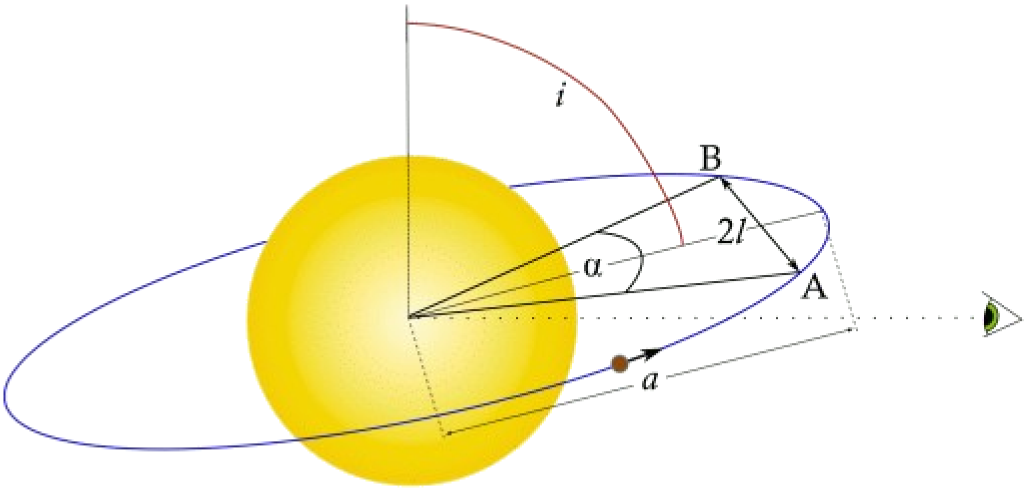

Illustration 5:2α er den vinkel, som planeten bevæger sig i transittiden. Planeten bevæger sig fra A til B, og observatøren ser den projicerede bevægelse markeret som 2·l. Kilde: paulanthonywilson.com.

Betragt illustration 5. Man ser, at følgende relation må gælde: $\frac{\alpha}{2\cdot\pi}=\frac{T}{P}$, hvor T er transittiden, P er planetens omløbstid og 2α brøkdelen af den vinkel, som planeten krydser af sin tilsyneladende bane henover stjernen. (Der er antaget jævn cirkelbevægelse.)

Betragt nu illustration 5. Her ser man, at

$$\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)=\frac{l}{a}=\frac{\sqrt{(R_{stjerne}+R_{planet})^2-a^2\cdot\cos^2(i)}}{a}\Leftrightarrow$$

$$\sin\left(\frac{\pi\cdot T}{P}\right)=\frac{\sqrt{(R_{stjerne}+R_{planet})^2-a^2\cdot\cos^2(i)}}{a}\Rightarrow$$

$$\sin^2\left(\frac{\pi\cdot T}{P}\right)=\frac{(R_{stjerne}+R_{planet})^2-a^2\cdot\cos^2(i)}{a^2}\Leftrightarrow\sin^2\left(\frac{\pi\cdot T}{P}\right)=\frac{(R_{stjerne}+R_{planet})^2}{a^2}-\cos^2(i)\Leftrightarrow$$

$$\cos^2(i)=\frac{(R_{stjerne}+R_{planet})^2}{a^2}-\sin^2\left(\frac{\pi\cdot T}{P}\right)\Rightarrow$$

$$i=\arccos\left(\pm\sqrt{\left(\frac{R_{stjerne}+R_{planet}}{a}\right)^2-\sin^2\left(\frac{\pi\cdot T}{P}\right)}\right)$$

Vi kan måle transittiden, T, som den største bredde af lysdæmpningen på lyskurven, og ved at måle tidsrummet fra en transit til den næste, kan vi finde planetens omløbstid, P.

Ved kendskab til den observerede stjernes masse, kan vi bestemme planetbanens halve storakse a ved at indsætte i Keplers 3. lov for at finde a.

Dermed kan man altså bestemme den vinkel, som planeten hælder i forhold til himmelkuglen.

10. Programmer og data

1. AstroImageJ: https://www.astro.louisville.edu/software/astroimagej/

2. Aladin: http://aladin.u-strasbg.fr/
3. Spitzerdata: http://www.euhou.net
4. NASA Exoplanet Archive: https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/