Exoplanetdetektion

I denne øvelse skal du måle en lyskurve for en stjerne, når den krydses af en af sine planeter. Dataene er optaget af André van der Hoeven[1] fra Emmaus College i Holland. Den observerede exoplanet hedder Qatar-1b[2]. Ud fra lyskurven og kendskab til stjernens masse og radius skal exoplanetens radius og baneinklination bestemmes.

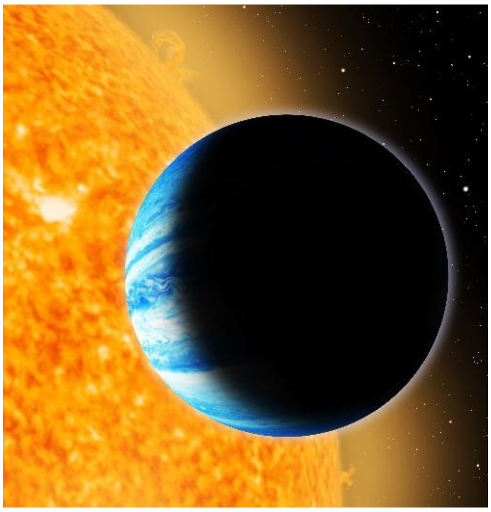

Illustration 1:Tegning af Qatar 1b. Kilde: http://star-www.st-and.ac.uk.

Observationsdato og klokkeslæt

31/10-2011 kl. 21:43.01 UT og fremefter. For første billede er midtpunktet af de 5 eksponeringer 21:45:08. Koordinater for observationssted: (l, b) = (4º 38' 51,01" E; 51º 50' 40,64" N)

Der er optaget 33 billeder.

Objektet

Exoplaneten hedder Qatar-1b. Den ligger i stjernebilledet Dragen. (Draco.) Koordinaterne for stjernen er (α; δ) = (20^h 13^m 32^s; +65º 09' 43”).

Information om observationsudstyret og billederne.

<u>Kamera</u>
SXV-H9.
CCD-detektor: 1392x1040.
Pixelstørrelse: 6,449219µm x 6,449219µm

<u>Kikkert</u>
Celestron C11 (27cm) reflektor. Brændvidde 2,800m. (Faktiske brændvidde er 3,39m.)

Billeder
Hvert af billederne består af 5 stackede eksponeringer à 60,00s eksponeringstid. Alle billederne er reducerede, dvs. der er foretaget flat-feltning, bias-subtraction og dark current-subtraction. Der er ikke lavet astrometrisk kalibrering. Der er ikke anvendt binning af pixler.

Et billede kan se et område på 18,19' i x-retningen og 13,58' i y-retningen. Den interesserede læser kan selv regne efter ved at bruge formlen $\phi = 2 \cdot \tan^{-1}(\frac{N \cdot d_{px}}{F})$, hvor N er antallet af pixler i hhv. x- og y-retningen, d_{px} er pixelstørrelsen målt i meter og F er kikkertens brændvidde målt i meter.

-o-

Stacking betyder, at man tager flere billeder af samme objekt for derefter at lægge dem sammen. Det giver tit et bedre resultat end at foretage én lang eksponering.

Flat-feltning, bias-subtraction og *dark current-subtraction* er tekniske metoder, man benytter, for at fjerne elektonisk støj og andre fejl og problemer ved kameraet. Bemærk at billederne dog stadigvæk har baggrundsstøj.

Binning er en metode, man nogle gange benytter, når stjernerne lyser meget svagt. (Man lægger pixler sammen på kamerachippen, så de bliver større. Det giver en større lysfølsomhed på bekostning af opløsningsevne.)

1 Oemstraat 5, 3341GH, HI-Ambacht, NL.
2 Her er Andrés datafremlæggelse: http://var2.astro.cz/EN/tresca/transit-detail.php?id=1320186591

Materialer

En computer med for eksempel SalsaJ eller Aladin version 7. Et regneark eller tilsvarende databehandlingsprogram.

Fremgangsmåde

En lyskurve er et diagram, hvor man aftegner størrelsesklasse som funktion af observationstidspunktet. Størrelsesklassen kan være enten standardstørrelsesklasse, eller den kan være differensen: $m_{stjerne}$-$m_{referencestjerne}$. At benytte differensen er smart, for det viser sig, at man kan nøjes med at anvende instrumentstørrelsesklasserne – uden at regne om til standardstørrelsesklasser. Se nærmere forklaring på side 3.

For at måle instrumentstørrelsesklasserne skal man gøre som følger:

1. Indlæs billederne i SalsaJ, Aladin (eller tilsvarende program) og identificer mindst én men gerne nogle flere referencestjerner og mål deres flux, F, samt baggrund. (Se hjælp nedenfor.)
2. Identificer stjernen med planeten og mål dens flux, F, samt baggrund. Sørg for at du får *hele* fluxen med!
3. Noter "Midpoint" i FITS-headeren, så observationstidspunktet kendes.
4. Noter tallene i et regnearket.
5. Gentag for alle billederne. (I kan f. eks. udmåle 4 billeder hver og derefter dele jeres resultater.)

Hjælp til identifikationen af stjernen

For at identificere stjernerne skal du bruge koordinaterne for stjernen oplyst ovenfor. Dernæst skal du indlæse et stjernekort over området og sammenligne stjernekortet med det optagne billede. Det gøres ved at åbne et ekstra vindue i Aladin og indtaste Qatar-1bs koordinater. Du kan også bruge nedenstående billede til identifikationen.

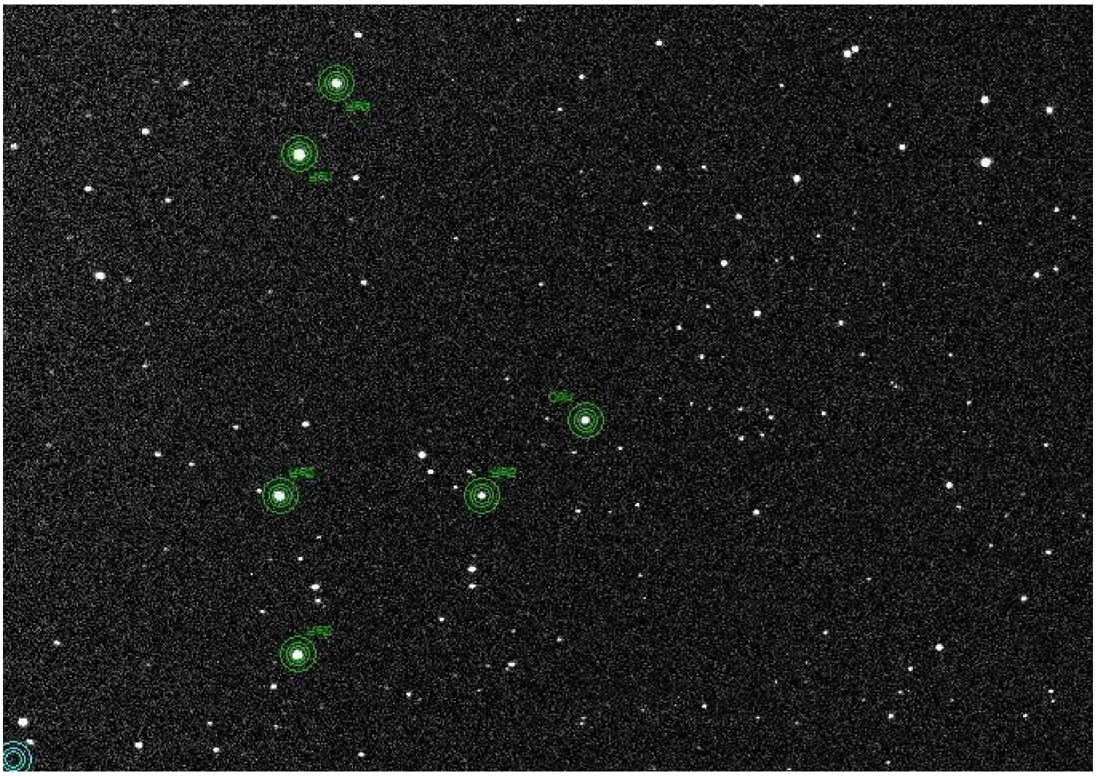

Illustration 2:Bemærk at billedet er spejlvendt for at det passer med fits-billederne. Qatar 1b ligger nærmest centrum.

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 luminositet og k er en konstant. En kikkert med detektor modtager en brøkdel af stjernens tilsyneladende luminositet. (Hvis kikkerten er stor kan brøkdelen godt være over 1.)

Konstanten k blev oprindeligt bestemt ved at betragte bestemte stjerner, som lyste konstant, og der blev benyttet et, på det tidspunkt, optimalt udstyr til at måle luminositeten. 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 flux, og hvis man benytter en CCD-detektor, vil fluxen være et tælletal, som er proportionalt med den faktiske tilsyneladende luminositet, l. (Man skal huske at fratrække baggrundsstøjen fra tælletallet for at finde $F_{målt}$.)

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 apparturer.

Man observerer en standardstjerne (st) samt sin ønskede stjerne (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 bidragene ud med hinanden.

Planetens radius i forhold til stjernens radius

Når stjernens lys ikke delvist spærres af planeten, modtager man fluxen F. I transitten modtages fluxen F_t. Vi måler jo både F og F_t, så de er kendte. Herunder sammenkædes de to målte størrelser med planetens- og stjernens radius:

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

På forrige side betegner I den effekt/areal, som udstråles fra stjernens overflade, og A er overfladearealet af hhv. stjernen og planeten. (Altså den skive af stjernen/planeten, som vender mod os.)

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

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

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

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

Ved at erstatte forholdet mellem fluxerne i formlen på side 3 med udtrykket for forholdet lige ovenfor fås:

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

Planetens banehældning

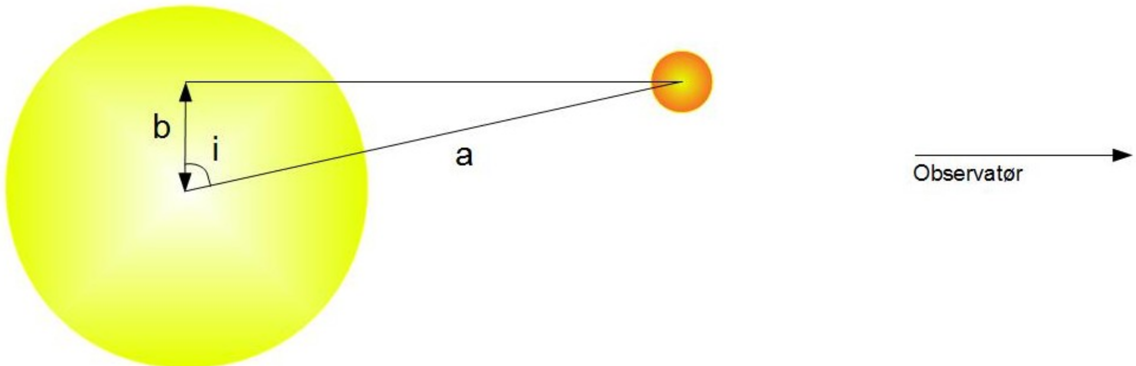

Illustration 3:Planeten, Jorden og stjernen står i konjunktion - dvs. på en lige linie. Planetens baneradius er angivet ved a. Bemærk at b=a·cos(i).

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*.

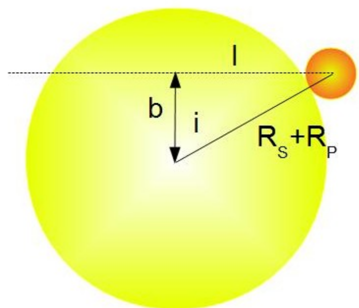

Illustration 4:Samme som ved ill. 3 - men nu set fra observørstedet.

Hvis man står hos observatøren, ser man en projicering af problemet ned på på himmelkuglen, dvs man ser et 2D-billede. 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 i øvrigt måle på lyskurven. Af illustrationerne kan vi se at den tilbagelagte afstand er givet ved udtrykket

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

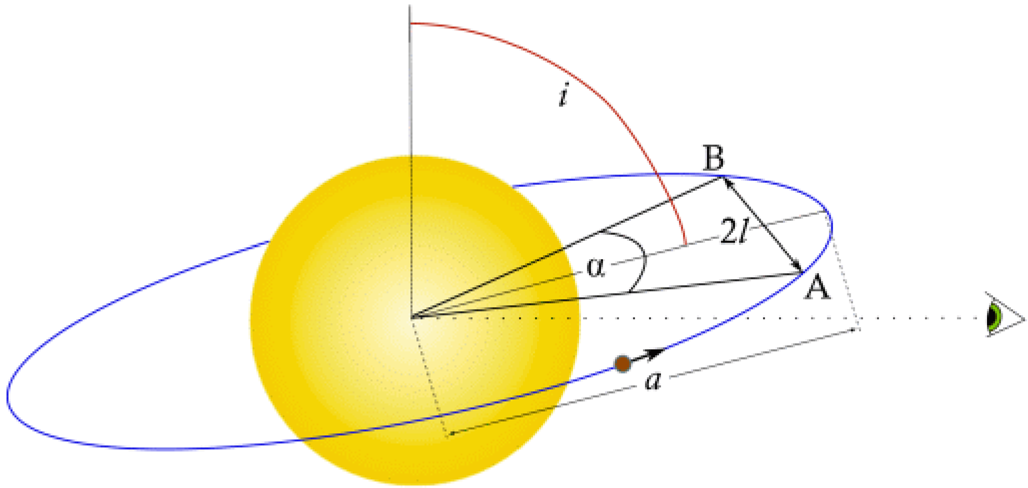

Illustration 5:2α er den vinkel, som planeten bevæger sig i transittiden. Planeten bevæger sig fra A til B, og observatøren ser den projicerede bevægelse markeret som 2·l. Kilde: paulanthonywilson.com.

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

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

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

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

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

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

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.

Databehandling

Beregn nu instrumentstørrelsesklasserne ved hjælp af formlen $m_{ins}=-2{,}5\cdot\log(F-F_{baggrund})$. Tegn en (t, δm)-kurve. Bestem transittiden, T, så godt du kan. Bestem den totale ændring i størrelsesklasse for stjernen.

Det er fra tidligere studier fundet, at planeten har en omløbstid, P = 1,42 dage og stjernen har en masse på $M_* = 0{,}85M_{\odot}$ samt en radius på $R_* = 0{,}823R_{\odot}$

Ovenfor blev nedenstående formler udledt, der kan give planetens radius, R_P, samt dens banes hældning, i, med himmelplanet:

$$\frac{R_P}{R_*} = \sqrt{1 - 10^{\frac{(m_{stjerne} - m_{transit})}{2,5}}}$$

$$i = \arccos\left[\pm\sqrt{\left(\frac{R_* + R_P}{a}\right)^2 - \sin^2\left(\frac{T \cdot \pi}{P}\right)}\right].$$

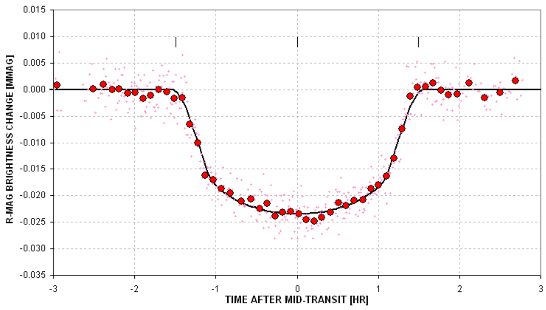

Illustration 6:Eksempel på lyskurve. Δm er dybden af lyskurven, og den er negativ. Kilde: brucegary.net.

Beregn planetens halve storakse, a. Beregn planetens radius R_P og beregn endelig inklinationsvinklen, i.

-o-

Programmer og data

Aladin: http://aladin.u-strasbg.fr/
SalsaJ: http://www.euhou.net/
Spitzerdata: http://www.euhou.net