

# Exoplaneter fundet med Kepler og CoRoT

## Analyse af data fra to forskningssatellitter

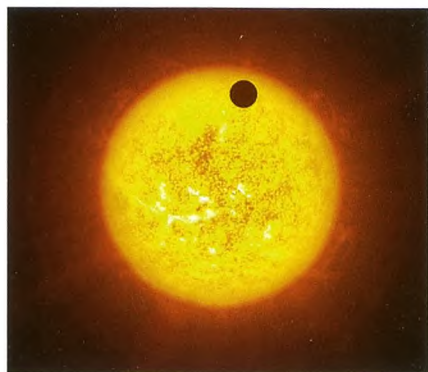
Af Hans Kjeldsen, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

I denne artikel demonstreres det hvordan man kan bestemme væsentlige parametre for en planet i kredsløb om en anden stjerne, hvis den passerer ind foran stjernen sådan at planeten absorberer en del af lyset fra stjernen.

### Exoplaneter

Exoplaneter betyder planeter omkring andre stjerner end Solen. I 1995 blev den første planet opdaget i kredsløb omkring en anden stjerne end Solen. Stjernen (hvis navn var 51 Pegasi) er omkredset af en planet af Jupiters størrelse, som fuldfører sin bane i løbet af 4,23 døgn. Denne epokegørende opdagelse var starten på en lang række opdagelser af exoplaneter (planeter i kredsløb omkring andre stjerner end Solen) og antallet af kendte exoplaneter er nu tæt på 500. Hvor undersøgelserne af exoplaneter i begyndelsen primært var fokuseret på at opdage nye planeter, er fokus i dag flyttet til opdagelse af mindre planeter (f.eks. planeter med masser og størrelser som Jordens) samt karakteristik af de fundne planeter og deres atmosfærer og skysystemer. Der findes flere metoder til opdagelse og undersøgelse af exoplaneter.

I denne artikel vil jeg fokusere på den såkaldte passagemetode (eller transitmetode, som den også kaldes). Idéen i passagemetode er at finde og undersøge planeter ved at måle den effekt, der opstår, når exoplaneten står i synslinien mellem moderstjernen og Jorden, sådan at planeten absorberer en del af lyset fra stjernen. Metoden virker naturligvis kun, hvis planetens baneplan ligger orienteret således, at den i sin omkredsning overhovedet kan komme til at befinde sig foran moderstjernen. I de tilfælde, hvor det kan finde sted, vil passagemetoden tillade ikke alene en detektion af planeten, men tillige en måling af planetens diameter og i visse tilfælde også af atmosfæren, der omgiver exoplaneten. I det følgende vil data fra to satellitmissioner, nemlig Kepler og CoRoT blive undersøgt og originale satellitdata stillet til rådighed for brug i bl.a. undervisningen.



**Figur 1.** En exoplanet befinder sig i synslinien mellem den stjerne, den kredser om, og Jorden. I denne situation er det muligt at undersøge exoplaneten. (Grafik: CoRoT (CNES)).

### Kepler- og CoRoT-satellitterne

I december 2006 og marts 2009 blev hhv. CoRoT og Kepler opsendt bl.a. med henblik på at finde planeter med diametre meget mindre end dem, Jupiter og Saturn har. Fra Jordens overflade er det umuligt at finde relativt små planeter ved passagemetoden, fordi stjernelyset på vejen gennem Jordens atmosfære bliver påvirket af den atmosfæriske scintillation. Dette gør det umuligt at måle med den nøjagtighed, som kræves for at se lyssvækkelsen, når en lille planet står i synslinien mellem Jorden og stjernen. For at finde planeter af Jordens størrelse fordres f.eks., at den relative målenøjagtighed er bedre end 1/10.000.



**Figur 2.** CoRoT-satellitten har siden december 2006 kredset omkring Jorden og bl.a. søgt efter exoplaneter blandt Mælkevejens stjerner. (Grafik: CoRoT (CNES)).

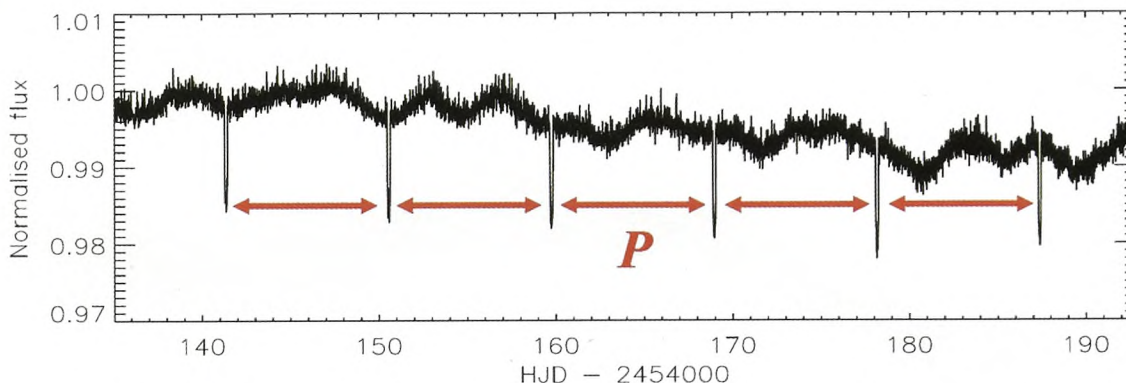


**Figur 3.** På Launch Pad 17-B på Cape Canaveral Air Force Station er en Delta-2 raket i november 2008 ved at blive gjort klar til opsendelsen af Keplersatellitten. Siden marts 2009 har Kepler i sin bane omkring Solen fundet 7 planeter og næsten 1000 potentielle planetkandidater (Foto: NASA).

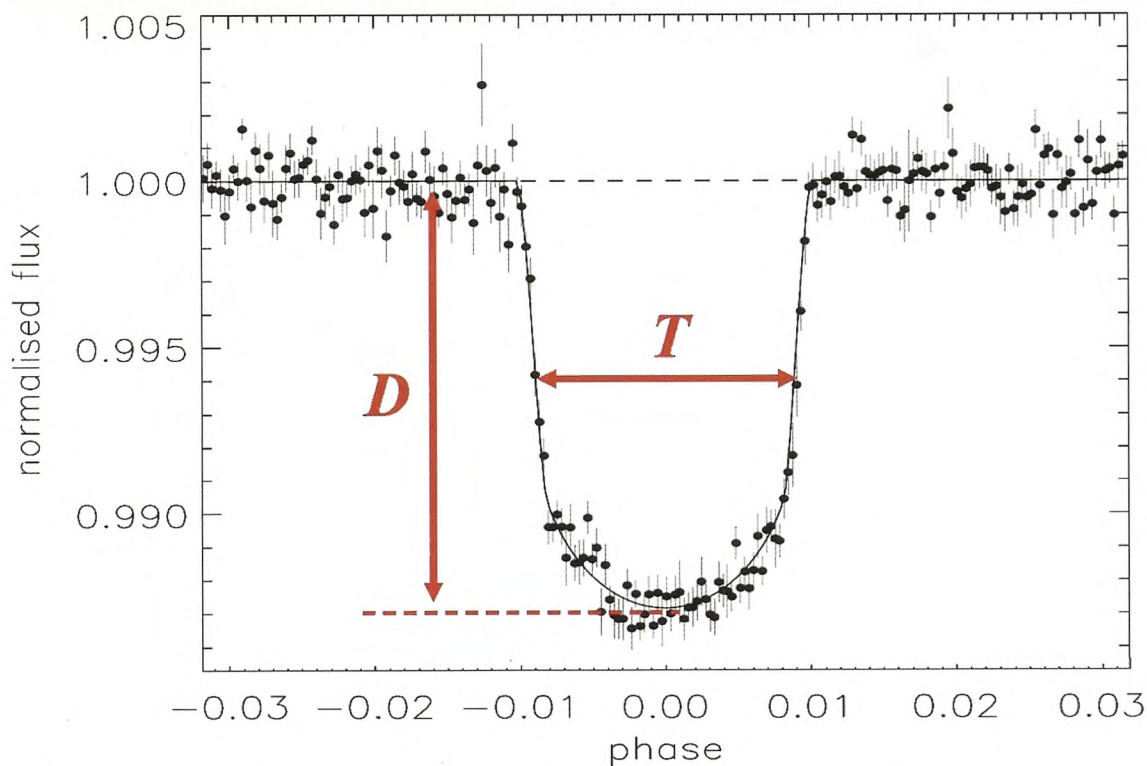
Med den franske CoRoT-satellit (se figur 2) og NASA's Kepler-satellit (se figur 3) er det muligt at måle nøjagtigt nok til at finde planeter med diametre væsentligt mindre end Saturns.

Data fra Kepler og CoRoT Siden opsendelsen har de to satellitter leveret et stort antal fantastiske målinger af mange tusinde stjerner, og antallet af planeter opdaget med de to satellitter er hastigt stigende (indtil september 2010 har Kepler fundet 7 planeter og CoRoT 14 planeter). Ikke alle data er endnu offentlige, men i det følgende beskrives data for 8 planeter (4 fra CoRoT og 4 fra Kepler), som er tilgængelige for alle interesserede for en nærmere analyse. Alle

data er i original form, svarende til de målinger som kommer ned fra CoRoT og Kepler. Som det er tilfældet med rigtige data, er der også enkelte af målingerne som indeholder fejl (f.eks. er der målepunkter med intensitet lig nul). Alle data kan hentes via følgende webside: <http://astro.phys.au.dk/KASC/kvant> En nærmere beskrivelse af indholdet af denne webside findes senere i artiklen. I det følgende vil jeg først gennemgå en del af den teori, som ligger til grund for anvendelsen af Kepler og CoRoT data og herefter beskrive den baggrundsinformation, som er nødvendig for at foretage hele den beskrevne analyse.



**Figur 4.** Tidsserien for en af de stjerner, hvor CoRoT har fundet en planettransit. Planetens omløbsperiode  $P$  ses tydeligt. Figur fra [1].



**Figur 5.** Tidsserien (zoom af passagen) for en af de stjerner, hvor CoRoT har fundet en planettransit. Passagen starter, når planetens skive "rammer" stjernens rand og slutter, når den sidste del af planetskiven "forlader" stjernens skive. På figuren er vist passagedybden,  $D$  og passagetiden,  $T$ . Figur fra [1].

## Analyse af en tidsserie med exoplanet passerer

Ud fra en analyse af tidsseriedata, som vist i fig. 4 og 5, er det muligt at bestemme flg. tre størrelser:

1. Omløbsperioden for planeten,  $P$
2. Passagegybden (mængden af lys som absorberes af planeten),  $D$
3. Passagetiden (den tid det tager planeten at krydse stjernen),  $T$

I det følgende antager vi, at vi foruden passageparametrene også via en analyse af stjernernes lys har bestemt stjernens masse, lysstyrke og overfladetemperatur

1. Stjernens masse,  $M_s$
2. Stjernens radius,  $R_s$
3. Stjernens overfladetemperatur,  $T_{eff}$

Værdierne for disse tre størrelser for de 8 Kepler og CoRoT tidsserier findes i tabellen sidst i denne artikel.

Vi anvender i det følgende Newtons version af Keplers tredje lov, som fortæller at

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)} \cdot a^3 \quad (1)$$

hvor  $P$  er planetens omløbsperiode,  $m_1$  og  $m_2$  er massen af stjernen, og planeten og  $a$  er den halve storakse af banen for planeten i forhold til stjernens tyngdepunkt (svarende til middelfstanden mellem planeten og stjernen).

Hvis vi antager, at planetens masse er meget mindre end stjernens masse, finder vi:

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{GM_s} \cdot a^3 \quad (2)$$

hvilket kan omskrives til

$$a = \left( \frac{GM_s}{4\pi^2} P^2 \right)^{1/3} \quad (3)$$

Kender vi således stjernens masse og planetens omløbsperiode, kan vi umiddelbart beregne planetens banehastighed:

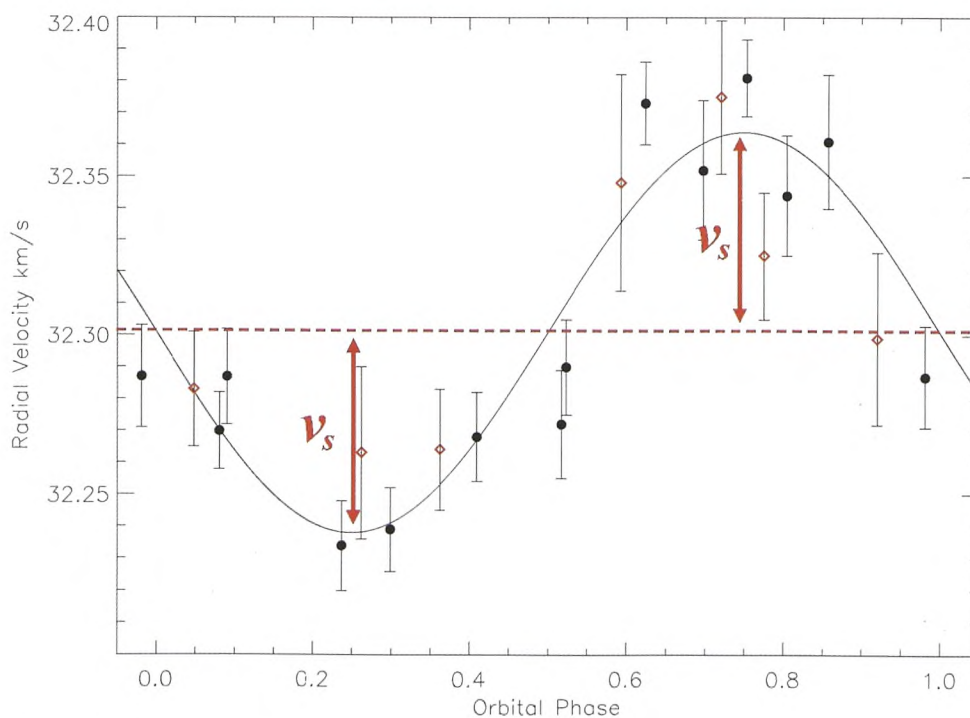
$$v_p = \frac{2\pi \cdot a}{P} = \left( \frac{2\pi \cdot GM_s}{P} \right)^{1/3} \quad (4)$$

Da stjernen og planeten kredser om deres fælles tyngdepunkt vil der ske en flytning af stjernen såvel som planeten. Vi kan således via en observation af stjernens hastighedsvariation (radialhastigheden) under omløbet af planeten, bestemme banehastigheden af stjernen;  $v_s$  (se figur 6). Dette kan nu bruges til en bestemmelse af planetens masse:

$$\frac{m_p}{M_s} = \frac{v_s}{v_p} \quad (5)$$

hvilket kan omskrives til

$$m_p = v_s \left( \frac{P \cdot M_2}{2\pi \cdot G} \right)^{1/3} \quad (6)$$



**Figur 6.** Måling af en stjernes radialhastighed som funktion af planetens fase giver mulighed for at bestemme stjernens banehastighed  $v_s$ . Figur fra [2].

Planetens radius kan bestemmes ud fra passagedybden (angivet som den procentvise svækkelse af lyset, se figur 5):

$$\frac{r_p}{R_s} = \sqrt{D} \quad (7)$$

Ud fra viden om planetens radius og masse er det nu muligt at bestemme middeldensiteten af planeten:

$$\bar{\rho}_p = \frac{3 \cdot m_p}{4\pi \cdot r_p^3} \quad (8)$$

Passagetiden  $T$  og planetens banehastighed og stjernens radius kan herefter anvendes til at bestemme baneplanens hældning i forhold til synsretningen (inklinationen,  $i$ ):

$$\sin(i) = \frac{\sqrt{4R_s^2 - (v_p T)^2}}{2a} \quad (9)$$

Og sluttelig kan stjernens overfladetemperatur, banens halve storakse  $a$  og stjernens radius samt en antagelse om den mængde af lys, som reflekteres fra planeten, albedoen  $A$ , bruges til at give et bud på den gennemsnitlige overfladetemperatur af planeten,  $T_p$ :

$$T_p = T_{\text{eff}} \cdot \sqrt{\frac{R}{2a}} \cdot \sqrt{1 - A} \quad (10)$$

## Data på websiden

På den webside, som er oprettet for at tillade adgang til CoRoT- og Keplerdata (i stort set samme form som det er blevet leveret fra satellitterne); <http://astro.phys.au.dk/KASC/kvant> [3] er det muligt at hente data for følgende 8 planeter; CoRoT-1b, CoRoT-2b, CoRoT-3b, CoRoT-4b, Kepler-4b, Kepler-5b, Kepler-7b, Kepler-8b. Det er tanken løbende at give adgang til flere data fra disse missioner i takt med at de bliver offentliggjort.

Data findes i følgende former (alle som tekst-filer):

1. **“Download data”** giver data i to søjler (tid i døgn og intensitet i absolutte fotontællinger)
2. **“Tids data”** og **“Intensitets data”** giver data i to filer (med angivelse af decimalbrøker via “.”)
3. **“Tids data (DK)”** og **“Intensitets data (DK)”** giver data i to filer (med angivelse af decimalbrøker via “.”)

Desuden findes plot af radialhastighederne for de 8 moderstjerner og angivelse af stjernernes masse, radius og overfladetemperatur (den effektive temperatur). Værdierne af disse størrelser findes også i tabellen herunder:

Stjerne	Radius/ R(sol)	Masse/ M(sol)	Effektiv temperatur
Solen	1,000	1,000	5778 K
CoRoT-1	1,11	0,95	5950 K
CoRoT-2	0,90	0,97	5625 K
CoRoT-3	1,56	1,37	6740 K
CoRoT-4	1,17	1,16	6190 K
Kepler-4	1,65	1,28	5855 K
Kepler-5	2,05	1,45	6295 K
Kepler-7	1,90	1,37	5935 K
Kepler-8	1,50	1,12	6215 K

Solens masse er  $1,989 \cdot 10^{30}$  kg og Solens radius er 695.500 km.

Analysen af disse data kan ske ved at hente en af de omtalte datafiler, fx filen for Kepler-7b, som ses herunder (tid i døgn i første søjle)

```
4.01099 16912.9\\
4.03143 16915.7\\
4.05186 16914.4\\
4.07229 16913.1\\
4.09273 16912\\
4.11316 16912.3\\
4.1336 16911.5\\
4.15403 16913.4\\
4.17446 16913.9\\
4.1949 16915\\
4.21533 16915.6\\
4.23576 16915.2\\
...
```

Ved at plotte de to søjler mod hinanden kan planetpassagerne lokaliseres som de systematiske svækkelser i lysintensiteten, der ses gennem tidsserien. Når de enkelte passager er lokaliseret, kan de basale passageparametre  $P$ ,  $D$  og  $T$  umiddelbart bestemmes.

Omløbsperioden findes bedst ved at finde tidspunkterne  $t(n)$  for alle de enkelte planetpassager og samtidigt nummerere de enkelte passager;  $n = 1, 2, 3, \dots, N$ . Omløbsperioden  $P$  findes nu ved lineær regression:

$$t(n) = t_0 + P \cdot n \quad (11)$$

$D$  og  $T$  bestemmes bedst som middelværdien af de enkelte målinger for hver enkelt passage.

## Eksempel

I det følgende vises et eksempel på brugen af ovenstående formler. Vi antager først, at vi på baggrund af en tidsserie har målt følgende størrelser for en exoplanet.

1.  $P=3,67$  døgn
2.  $D=0,87\%$
3.  $T=0,104$  døgn

Samtidig antager vi, at en analyse af stjernens lysstyrke og spektrum giver:

1.  $M_s=1,14 M_{\text{solen}}$
2.  $R_s=1,21 R_{\text{solen}}$
3.  $T_{\text{eff}}=5960$  K

Ved indsættelse i formlerne finder vi nu den halve storakse for planeten (AE er den astronomiske enhed = Jordens middelfastand fra Solen):

$$a = 7,2810^9 \text{ m} = 0,0486 \text{ AE} \quad (12)$$

Ud fra dette kan vi bestemme planetens banehastighed:

$$v_p = 144 \text{ km/s} \quad (13)$$

Vi antager nu, at en måling af radialhastigheden af moderstjernen giver en banehastighed for stjernen på 123 m/s. Hermed kan vi bestemme massen af planeten til:  $1,93 \cdot 10^{27} \text{ kg}$ .

Planetens radius findes fra passagedybden til: 78.780 km.

Ved indsættelse i formel (8) finder vi middeldensiteten til:  $942 \text{ kg/m}^3$ .

Ved indsættelse i formlen for inklinationen (9) finder vi at systemet hælder omkring 4 grader i forhold til synsretningen mod Jorden,

$$\sin(i) = 0,0745 \text{ og dermed } i = 4,3^\circ. \quad (14)$$

Sluttelig kan vi finde et udtryk for middeltemperaturen for overfladen (vi antager i dette tilfælde en albedo på 10 %):  $T_p = 1398 \text{ K}$ .

## Litteratur

- [1] Aigrain et al. (2008), *Astronomy & Astrophysics* **488**, L43-L46
- [2] Moutou et al. (2008), *Astronomy & Astrophysics* **488**, L47-L50.
- [3] Data til analyse af exoplaneters egenskaber, <http://astro.phys.au.dk/KASC/kvant>



Hans Kjeldsen er lektor i astrofysik ved Institut for Fysik og Astronomi ved Aarhus Universitet. Han har i sin forskning benyttet teleskoper over alt på Jorden og i rummet og har udviklet teknikker til observation og analyse af stjernesvingninger med meget lav amplitude. Han deltager i øjeblikket i to satellitprojekter (NASA's Kepler-projekt og det franske CoRoT-projekt).

## Få tre årgange af KVANT for 200 kr. inkl. forsendelse (i Danmark)

Denne pakke indeholder årgang 2007-2009, bortset fra enkelte udsolgte numre.

Der er 7 temanumre om bl.a.:

- "Videnskab og kunst"
- "Astronomi" (astronomiår 2009)
- "Large Hadron Collider"
- "Kvinder i forskningsfronten".

Derudover er der artikler om bl.a.:

- Istiden sluttede ekstremt hurtigt
- Totale solformørkelser
- Sorte huller
- Kulstof-14 datering
- Paradoxer i fysikken
- Tippetoppen
- Fra Aristoteles til Newton
- Solsystemets voldsomme fødsel
- Fysisk matematik
- Den globale opvarmning
- Gammaglimt uden supernova.

Pakken kan bestilles ved at sende en e-mail til [kvant@kvant.dk](mailto:kvant@kvant.dk), hvor du opgiver navn og adresse. Betaling sker via netbank eller girokort, som medfølger.

