

Kepler-missionen – jagten på jordlignende planeter

Af Lars A. Buchhave, Niels Bohr Institutet og StarPlan, Københavns Universitet

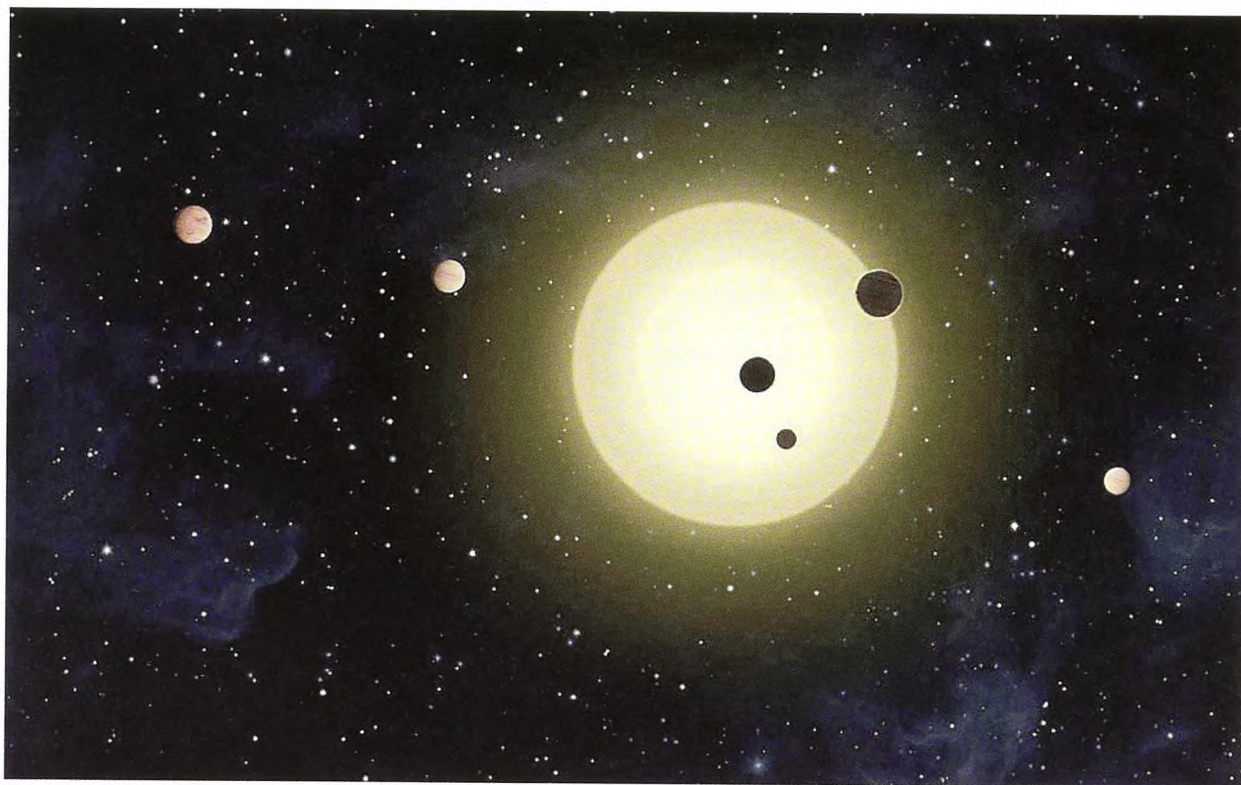
NASAs rummission Kepler, hvis hovedformål er at finde formørkende exoplaneter (planeter omkring andre stjerner end Solen), er i færd med at revolutionere exoplanet-feltet med sine opdagelser. Senest er over 1200 formørkende planetkandidater blevet offentliggjort, hvilket har mere end tredoblet antallet af kendte planeter og næsten tredoblet antallet af kendte formørkende planeter. Vi kan hermed begynde at få et indblik i hyppigheden af forskellige planettyper omkring andre stjerner, og i den nære fremtid måske besvare spørgsmålet om, hvorvidt Jorden er unik eller almindelig i Mælkevejen. Blandt dette væld af planetkandidater er blandt andet det tætpakkede Kepler-11-system, som består af ikke mindre end seks formørkende planeter.

Introduktion til exoplaneter

Den første exoplanet omkring en sollignende stjerne blev opdaget i 1995, og med den opstod et forskningsfelt indenfor astronomien, som siden har været i rivende udvikling. I dag kender vi over 500 exoplaneter, hvoraf flere end 120 er formørkende planeter. Kepler-missionen har i februar 2011 offentliggjort over 1200 formørkende planetkandidater (se forklaring af begrebet kandidater nedenfor). Jeg har tidligere skrevet om formørkende planeter og NASAs Kepler-mission (KVANT nr. 2, maj 2009, [1]), og vil derfor her blot give en kort introduktion til emnet.

De fleste af de over 500 exoplaneter er fundet via radialhastighedsmetoden, hvor man måler refleksbevægelsen af værtsstjernen, når planeten bevæger sig rundt i sin bane omkring den. Ud fra radialhastighederne og viden om værtsstjernen kan man bestemme planetens

masse, men da orienteringen af baneplanet er ukendt, kan man kun finde den nedre grænse for planetens masse. Den observerede masse er givet ved $M \cdot \sin i$, hvor M er planetens sande masse, og i er inklinationen af baneplanet. Mange af planeterne er glohede Jupiterlignende planeter, som i modsætning til vores egen Jupiter, der har en omløbstid på over 4000 dage, har utrolig korte omløbstider, helt ned til nogle få dage. Den korte omløbstid betyder, at disse planeters afstand til deres værtsstjerne er meget lille, de modtager en enorm mængde stråling, og har derfor meget høje overfladetemperaturer. Disse planeter hører sandsynligvis til sjældenhederne, men er alligevel den type planeter, der er fundet flest af, fordi de simpelthen er nemmere at opdage, da de på grund af deres store masse og korte omløbstid påvirker deres værtsstjerne mere, end hvis de havde en mindre masse, og/eller befandt sig længere væk.



Figur 1. En kunstners fortolkning af Kepler-11-systemet med seks formørkende planeter.

Når en planets baneplan er orienteret således, at den passerer ind foran værtsstjernen, og dermed formørker dennes lys, er der tale om en formørkende planet. Formørkende planeter giver os muligheden for at bestemme ikke blot den eksakte masse af planeten (da vi nu kan bestemme inklinationen af baneplanet) men også planetens radius, som er direkte proportional med lysstyrkeændringen af værtsstjernen, når planeten formørker denne. Dermed kan vi bestemme planetens gennemsnitlige tæthed, hvilket kan hjælpe os med at forstå planeternes sammensætning og indre struktur. Ud over bestemmelse af planeternes masse, radius og tæthed, giver formørkende planeter os muligheden for at udføre et væld af spændende opfølgende observationer. Der er eksempler på sådanne observationer af planetatmosfærer, hvor stoffer som metan, kulmonooxid og vand er opdaget. Der er også foretaget observationer af exoplaneters sekundære formørkelse, altså når de glohede "hot-Jupiters", som på grund af deres høje temperatur stråler kraftigt i det infrarøde, selv bliver formørket af værtsstjernen. I forbindelse med dette er det blevet postuleret, at vi har set de første beviser på vejrsystemer på exoplaneter, da planeterne er gravitationelt bundet, således at den samme side altid peger mod stjernen, og man kan observere, at varme bliver transporteret via kraftige vinde fra denne glohede "dag-side" til den koldere "natte-side" af planeterne.

Kepler-missionen og de første resultater

Kepler-missionen består af et rumbaseret fotometer, der blev opsendt i marts 2009. Keplers hovedformål er at udforske vores "nabolag" i Mælkevejen for Jordlignende planeter i eller i nærheden af den beboelige zone (den afstand fra værtsstjernen hvor der kan være flydende vand på overfladen af planeterne), og dermed vurdere hvor mange af de milliarder af stjerner i vores galakse, der kan have sådanne planeter. Kepler er specificeret til at opnå en utrolig præcision i målingerne, lysændringer på kun 20 milliontedele, og vil observere det samme felt i hele missionens levetid på 3,5 år.

I februar 2011 offentliggjorde Kepler-holdet over 1200 planetkandidater fra de første fire måneders observationer [2]. Til sammenligning har det taget over 10 år at opdage de over 100 formørkende planeter, vi kendte inden Kepler-missionen.

Falske positiver

Planeterne opdaget af Kepler betegnes "kandidater", fordi der er andre astrofysiske fænomener end planeter, som kan være årsag til lyskurverne. Disse kaldes "falske positiver", og kan f.eks. være formørkende dobbelt- eller tripelstjernesystemer, som f.eks. består af en kæmpestjerne og et par mindre stjerner, som formørker hinanden. Listen over mulige systemer, som kan efterligne en planets lyskurve, er lang.

Det er med andre ord nødvendigt at bekræfte, at de lyskurver man observerer, faktisk stammer fra planeter. For hovedparten af de over 120 formørkende planeter vi kender til i dag, er radialhastighedsmetoden (RH)

blevet brugt som uafhængig bekræftelse. Når planeterne bevæger sig i deres bane omkring stjernen, trækker deres tyngdekraft nemlig i deres værtsstjerne, og denne "rokken" kan måles som en Dopplerforskydning af stjernens spektrum. Hvis man observerer den samme periodicitet i formørkelserne i lyskurven, som man ser i Dopplerforskydningen af stjernens spektrum, er det en meget stærk indikator på, at det faktisk er en planet, man observerer, da man med to helt uafhængige målemetoder finder den samme periodicitet.

For langt hovedparten af de over 1200 planetkandidater Kepler har opdaget, findes ingen radialhastigheder, dels fordi det kræver mange ressourcer at observere et så stort antal stjerner og dels fordi radialhastighedsamplituden, for de fleste af Keplers planeter, vil være så lille, at vi simpelthen ikke kan opnå en høj nok præcision til at detektere dem. Det skyldes blandt andet, at mange af planeterne simpelthen er så små, at signalet drukner i målestøjkluder, og at mange af Keplers værtsstjerner er meget lyssvage, og dermed svære at måle på.

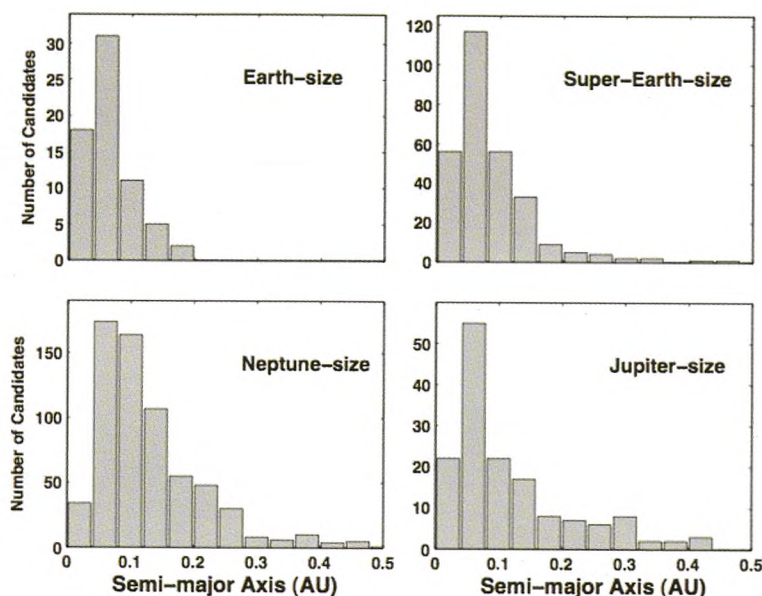
For at sætte opfølgingsarbejdet med radialhastigheden lidt i perspektiv er her et hurtigt estimat af, hvor lang tid det vil tage at lave radialhastighedsmålinger på de 1200 kandidater. Der er meget stor forskel på, hvor lang observationstid hver planet kræver for at opnå en passende radialhastighedspræcision, men et eksempel på observationstiden for en typisk Keplerkandidat er omkring 30 minutter for et enkelt radialhastighedspunkt. For at kunne bestemme planetens bane og dermed dens masse, skal man have ca. 10 sådanne punkter. Et gæt på den samlede observationstid for alle 1200 kandidater er altså 6000 timers(!) nettoobservationstid, og dette er endda temmelig underestimeret, da hovedparten af de små kandidater har behov for længere observationstider (hvis vi altså havde spektrografer med den nødvendige præcision). På en typisk observationsnat er der ca. seks timers nettoobservationstid, hvilket giver 1000 nætters observationer, men da Keplerfeltet kun er synligt i ca. fem måneder om året, vil det tage næsten syv år at observere radialhastigheder for alle 1200 kandidater med et enkelt teleskop ud fra dette "back-of-the-envelope" gæt.

Keplerholdet har dog gjort sig store anstrengelser for at sikre, at langt hovedparten af planetkandidaterne faktisk er planeter. Lyskurverne og et væld af opfølgende jordbaserede observationer er blevet gennemanalysert for at sikre, at planeterne faktisk er planeter, og hver kandidat har fået en karakter som skal illustrere, hvor sikker den er. Keplerholdet skønner, at omkring 80 % af de gode kandidater er planeter, mens det for de kandidater, som er markeret med dårligere karakterer, nok kun er 60 %, som vil vise sig at være planeter. Der foreligger med andre ord et enormt arbejde med at verificere kandidaterne, og der er samtidigt brug for nye metoder til at opnå dette mål. Keplerholdet, inklusiv undertegnede, arbejder i øjeblikket målrettet på netop dette, men det vil være for omfangsrigt at komme ind på detaljerne af det arbejde her.

Keplers 1200 planetkandidater

Når man kigger på de over 1.200 planetkandidater, må man altså tage et hav af forbehold. Dels ser vi kun planeter med korte baner, da vi jo kun ser på Keplers resultater fra de først fire måneders observationer. Samtidigt er de stjerner som Kepler observerer valgt på en sådan måde, at der er større sandsynlighed for

at opdage planeter omkring dem, og de er altså ikke repræsentative for alle stjerner i Mælkevejen. Og dels vil en del af kandidaterne vise sig ikke at være planeter, som beskrevet ovenfor. Dertil kommer, at kandidaternes radier på nuværende tidspunkt er baseret på en knap så robust bestemmelse af værtsstjernes radier, så størrelserne af kandidaterne er altså heller ikke sikre.



Figur 2. Antallet af planetkandidater som funktion af planetens afstand fra værtsstjernen. Antallet af alle typer af planeter er højere tættere ved stjernen, men falder ved ca. 0,04 AU (AU: 1 astronomisk enhed = afstanden fra Solen til Jorden). Antallet af jordlignende planeter falder hurtigt efter 0,2 AU, dels fordi sandsynligheden for, at planeten formørker værtsstjernen, er mindre her, og dels fordi der skal højere præcision til at detektere små planeter.

Type	Radius (R) i Jordradier	Antal af planetkandidater
Jord-størrelse	$R_p \leq 1,25$	68
Super-Jord-størrelse	$1,25 < R_p \leq 2,0$	288
Neptun- størrelse	$2,0 < R_p \leq 6,0$	662
Jupiter- størrelse	$6,0 < R_p \leq 15$	165
Meget store	$15,0 < R_p \leq 22,4$	19
Ikke-planeter	$R_p > 22,4$	15

Tabel 1. Antallet af forskellige typer planetkandidater Kepler har opdaget i de første fire måneders data. Før Kepler var kun en håndfuld af formørkende planeter kendt med størrelser mindre end eller lig med Neptuns. Kepler har fundet over 1000 kandidater med radier på størrelse med eller mindre end Neptuns.

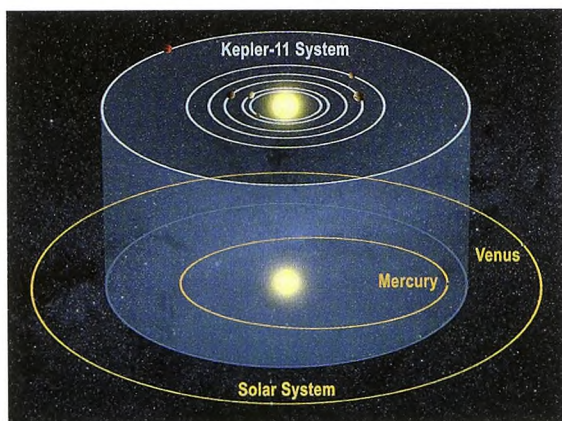
På trods af alle forbeholdene er det naturligvis meget spændende at se på sammensætningen af de mange planetkandidater. I figur 2 og i tabel 1 kan antallet af de forskellige planetkandidater ses, og tabel 1 definerer desuden fire forskellige typer af planeter ud fra deres størrelse. Før Kepler kendte vi kun til en håndfuld af formørkende planeter på størrelse med eller mindre end Neptun, men nu er der altså over 1000 sådanne planetkandidater; 300 af disse er af typerne super-Jorde eller Jorde, som vi før kun kendte to af. De første data tyder altså på, at mindre planeter er ganske almindelige.

Større planeter, der er tættere på deres stjerne, er de letteste at opdage, men antallet af Jupiterplaneter dominerer ikke antallet af planeter som Kepler har opdaget. Man kan derfor umiddelbart konkludere, at mindre planeter tæt på deres stjerne er mere almindelige end

store Jupiterplaneter. Desuden ses et fald i antallet af planeter helt tæt på stjernen, og dette må også formodes at være et virkeligt fænomen, da det, som sagt, er lettere at finde planeterne tættere på stjernen. Derimod kan faldet i antallet af jordlignende planeter længere væk end 0,2 astronomiske enheder sandsynligvis tilskrives, at der simpelthen er mindre geometrisk sandsynlighed for, at små planeter formørker deres værtsstjerne, og at det kræver højere målepræcision at finde mindre planeter. Antallet af observerede formørkelser vil stige i takt med, at Kepler opsamler mere data, og signaltil-støj forholdet af formørkelserne vil således stige, så vi bedre kan finde mindre planeter længere væk fra værtsstjernen.

Kepler-11-systemet

Nogle af Keplers 1200 planetkandidater er blevet valideret, karakteriseret, offentliggjort og dermed officielt navngivet. De har fået navnet Kepler-xb, hvor x er et fortløbende tal og b indikerer, at der er tale om den første planet i systemet. Kepler-1b til Kepler-3b var planeter, der allerede var opdaget i Keplerfeltet inden missionen blev sendt op. Kepler-4b til Kepler-8b er de første fem Keplerplaneter, som blev publiceret, hvor vi for Kepler-7b benyttede det Nordisk Optiske Teleskop på La Palma til at bestemme massen. Kepler-9 er et system bestående af to Saturn-masse-planeter samt en meget lille planet helt tæt på værtsstjernen og Kepler-10b er Keplers første verificerede planet med en fast overflade, som har en gennemsnitstæthed tæt på jern.



Figur 3. En kunstners fortolkning af Kepler-11-planetsystemet sammenlignet med vores eget Solsystem. Alle seks planeter i Kepler-11-planetsystemet befinder sig tættere på deres stjerne end Venus på Solen. Kepler-11 er således et særdeles tætpakket planetsystem sammenlignet med vores eget Solsystem. Stjernen er ca. 8 mia. år og har en lysstyrke svarende til Solen. Planeterne befinder sig således ikke i den beboelige zone og er for varme til at der findes flydende vand på dem. Der kan stadig gemme sig flere planeter længere ude.

Kepler-11 er et fantastisk system bestående af 6 planeter (se figur 1 og 3), som alle formørker deres værtsstjerne, 3 af dem endda på samme tid! Jeg vil anbefale interesserede at se en film [3] af Kepler-11-systemet, hvor man får et godt indtryk af, hvor kompakt systemet er.

Når flere planeter kredser omkring en stjerne i et så kompakt system, vil planeterne påvirke hinandens baner. Hvis kun én planet kredser omkring en stjerne, vil en eventuel formørkelse ske efter nøjagtig samme tidsinterval, hver gang; planeten vil altså have samme periode hele tiden. Formørkelsestidspunktet for de forskellige planeter i Kepler-11 systemet vil derimod ændre sig en smule på grund af planeternes indbyrdes gravitationelle påvirkninger. Dette fænomen kaldes "transit timing variations" eller TTV, og ved at modellere dette kan man for det første verificere, at der er tale om et system af planeter og derudover også estimere planeterne masser.

Det lader til at de super-Jorde, der hidtil er opdaget, hvor vi både kender radius og masse, har meget forskellige kompositioner, fra Neptun-lignende gasplaneter til jordlignende planeter med en fast overflade og alt derimellem. F.eks. har super-Jorden GJ 1214, som vi fandt med MEarth observatoriet i slutningen af 2009, en gennemsnitlig tæthed, som indikerer, at planeten består næsten udelukkende af vand (dette debatteres dog stadig).

Fremtiden

Med Kepler-missionens offentliggørelse af satellittens første resultater står det klart, at Kepler vil komme til at revolutionere exoplanetfeltet. Allerede nu kan vi begynde at se de første indikationer på, hvordan sammensætningen af planeter i vores omegn af Mælkevejen ser ud. Og i takt med at Kepler indsamler mere og mere data, vil vi få en mere komplet viden om, hvad hyppigheden af forskellige planettyper er omkring andre stjerner. I særdeleshed er hyppigheden af jordlignende planeter i og omkring den beboelige zone, hvor der er mulighed for flydende vand, uhyre interessant. I de kommende år vil vi få at se, om Kepler er i stand til at besvare spørgsmålet om, hvorvidt Jorden er en unik planet i vores galakse, eller om vores planet er en helt almindeligt forekommende planettype, der også findes omkring andre stjerner.

Mængden af ny information fra Kepler-satellitten er overvældende, og jeg håber, at denne artikel giver et indblik i, hvor stort et opfølgingsarbejde, der er nødvendigt før Keplers data kan omsættes til endegyldige opdagelser og statistiske resultater. Kepler-missionens levetid er i øjeblikket sat til 3,5 år, hvilket er den tid det vil tage at observere tre fortløbende formørkelser af en jordlignende planet i en jordlignende bane omkring en sollignende stjerne.

Litteratur

- [1] Lars Buchhave (2009), Exoplaneter og Kepler-missionen, KVANT nr. 2, maj 2009.
- [2] Borucki et al. (2011)
- [3] Kepler-11-film, http://www.nbi.ku.dk/english/news/news11/the_universe_is_teeming_with_planets/video_kepler/



Lars A. Buchhave er Carlsberg Fellow ved Niels Bohr Institutet og StarPlan ved Københavns Universitet. Han er bl.a. involveret i det spektroskopiske opfølgingsarbejde af formørkende planetkandidater fra NASAs Keplermission, MEarth og HATNet-projektet.