

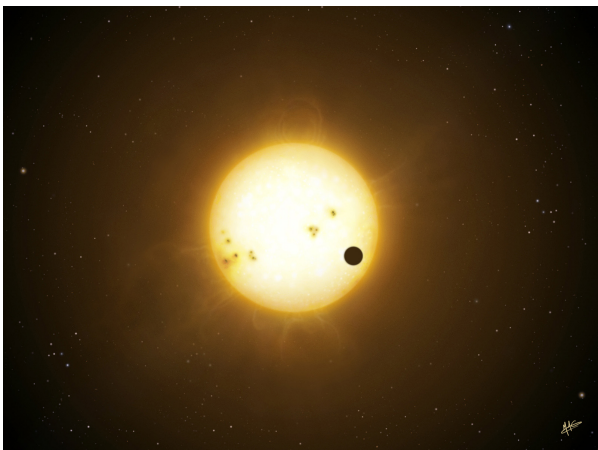
Exoplaneter og Kepler-missionen

Af Lars Buchhave, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet og Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA, USA

Vi står på tærsklen til at finde svaret på nogle af astronomiens største spørgsmål: er Jorden unik, og findes der liv andre steder i Universet? Kepler, en NASA rummission som netop er blevet opsendt, vil tage et stort skridt i retning af at besvare et af disse spørgsmål. Keplers hovedformål er at finde formørkende exoplaneter, dvs. planeter omkring andre stjerner end Solen, hvis baneplan ligger således, at de formørker lyset fra deres værtsstjerne ved at passere ind foran denne. Når dette sker, kan man bestemme planetens masse, radius og dermed dens gennemsnitstæthed, og det er muligt at udføre et væld af spændende opfølgende observationer, bl.a. at observere planetens atmosfære. Karakteristiske træk i atmosfæren på formørkende planeter kan måske inden for en overskuelig fremtid give os indikationer på, om der eksisterer liv andre steder i universet.

Introduktion

Udviklingen inden for exoplaneter er gået utrolig hurtigt, efter den første planet omkring en sollignende stjerne blev opdaget i 1995. Siden er næsten 350 planeter blevet opdaget, de fleste ved hjælp af radial-hastighedsmetoden, hvor man måler refleksbevægelsen af værtsstjernen, når planeten bevæger sig rundt i sin bane omkring den. Refleksbevægelserne er yderst små (fx 12 m/s for Solens påvirkning fra Jupiter), og det kræver høj præcision og stabilitet over en længere periode at kunne måle bevægelserne. Desværre giver metoden kun en nedre grænse for planetens masse, da inklinationen af planetens baneplan normalt er ukendt, så man kun finder $M \cdot \sin i$, hvor M er planetens masse og i er inklinationen af planetens baneplan, altså vinkelen af planetens baneplan i forhold til vores synsvinkel.



Figur 1. En kunstners billede af en formørkende planet (M.A. Garlick).

Der er fundet 8 planeter via mikrolinseteknikken, som Danmark også er involveret i. Teknikken benytter, at planeten og dens værtsstjerne virker som en gravitationel linse, som forstærker lyset fra en fjern baggrundsstjerne. Når en planet er til stede i linsen kan det ses i det forstærkede signal af baggrundsstjernen. Mikrolinseteknikken har den fordel, at den kan finde planeter

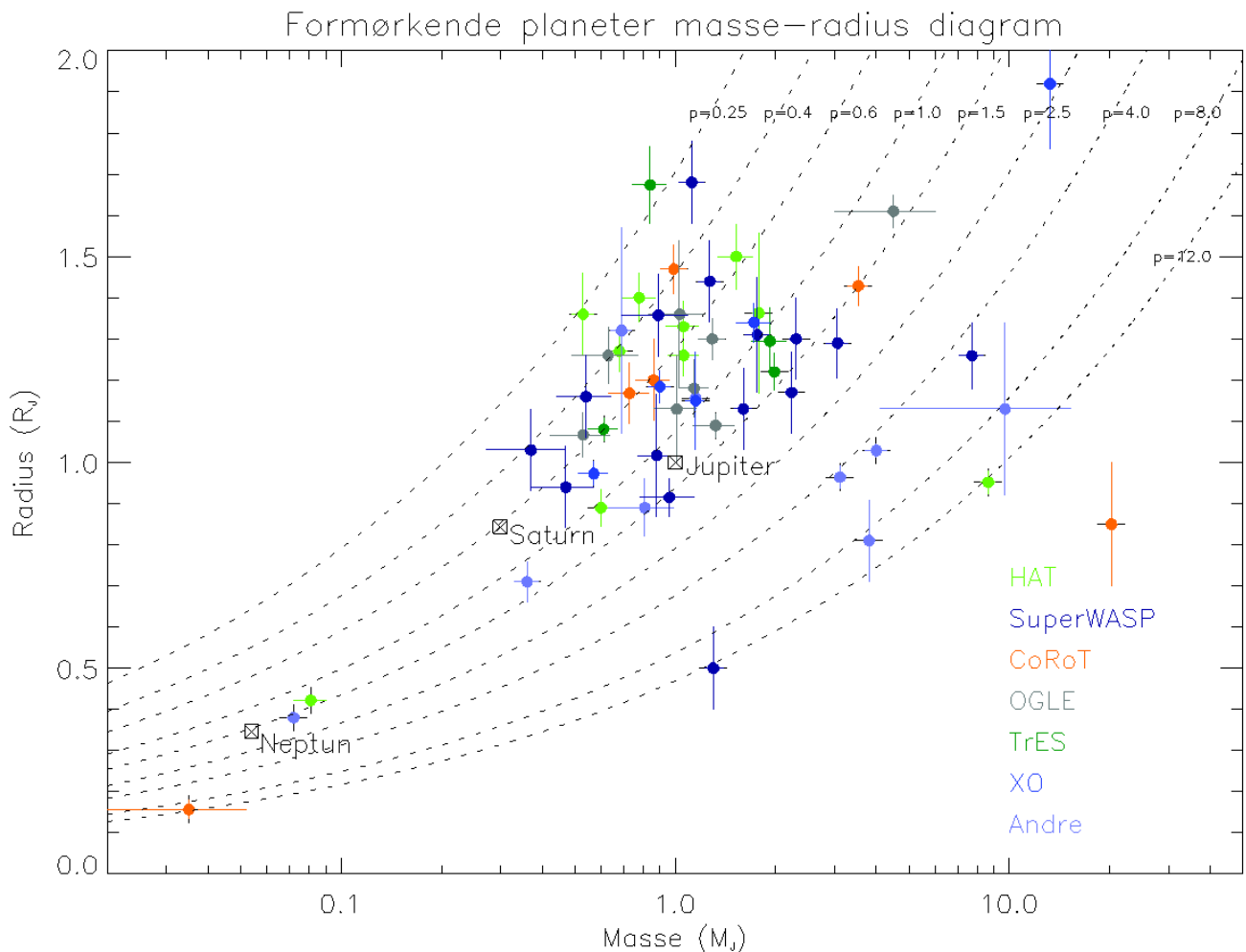
med små masser, som befinder sig langt fra deres værtsstjerne, et parameterområde hvor andre teknikker ikke har tilstrækkelig følsomhed. En anden fordel er, at observationerne kan udføres med forholdsvis små teleskoper; således hjælper amatører med at observere begivenhederne. Desværre er det ikke muligt at udføre opfølgende observationer, efter at mikrolinsebegivenheden er overstået, da selve værtsstjernen normalt er så svag at den ikke kan ses.

Formørkende planeter

Over 50 af de 350 planeter er formørkende planeter: planeter hvis baneplan tilfældigvis ligger således, at planten passerer ind foran værtsstjernen og dermed formørker denne. Når en planet formørker sin værtsstjerne, er det muligt at bestemme både den eksakte masse og radius af planeten og dermed den gennemsnitlige tæthed, som kan hjælpe os til at forstå planetens sammensætning og indre struktur. Derudover muliggør en formørkende planet et væld af interessante opfølgende observationer, som beskrives senere i artiklen, bl.a. observationer af planetens atmosfære.

I figur 2 ses et masse-radius plot, som viser mangfoldigheden af de planeter, der er fundet indtil nu. Forskelligheden i de fundne planeter og planetsystemer – og ikke mindst forskellene fra vores eget solsystem – har overrasket. De eksisterende teorier kan ikke forklare denne store mangfoldighed af planetsystemer, og det er derfor vigtigt at udfylde parameterrummet med endnu flere planeter for bedre at sætte grænser for dannelses-teoriene.

En klasse af planeter, der ikke var forudset, er de "varme Jupiterplaneter", som er tunge gasplaneter med masser mange gange større end Jupiters og med meget korte omløbstider, helt ned til én dag. Da man ikke mener, at disse planeter kan dannes tæt på deres værtsstjerne, må de have flyttet sig fra deres dannelsessteder længere ude, ind til deres nuværende position – en vandring, man endnu ikke helt forstår.



Figur 2. Masse-radius diagram af formørkende planeter opdaget indtil nu. Radius og masse er indikeret i enheder af Jupiters masse. De stiplede linjer repræsenterer en bestemt tæthed i g/cm^3 .

Ser man på de forskellige tætheder af planeterne i figur 2, opdager man, at tætheden varierer over et utroligt stort spænd. De varme Jupiterplaneter er opustede på grund af den kraftige opvarmning fra den meget nære værtsstjerne, men selv ikke denne oppustning kan forklare de meget lave tætheder, man ser i figur 2, helt ned til $0,25 \text{ g/cm}^3$. I den anden ende af skalaen er der nogle ufattelig kompakte planeter, med gennemsnitstætheder helt oppe på 12 g/cm^3 – svarende til planet lavet af massivt bly!

Søgning efter formørkende planeter

Et antal projekter er i øjeblikket i gang med at lede efter formørkende planeter, både fra jorden og i rummet. De mest succesfulde jordbaserede søgninger er HATnet, SuperWASP, XO og TrES. I rummet er to missioner nu undervejs, den europæiske CoRoT, et 27 cm fotometrisk teleskop med et FOV (field-of-view eller synsfelt) på 7,8 kvadratgrader opsendt i december 2006 og NASAs Kepler, et 95 cm teleskop med et FOV på 105 kvadratgrader, opsendt den 6. marts 2009.

Tilsammen har de forskellige projekter fundet over 50 formørkende planeter. Det er naturligvis lettest at finde store planeter, som er tæt på deres værtsstjerne, da disse medfører et større fald i værtsstjernens lysstyrke.

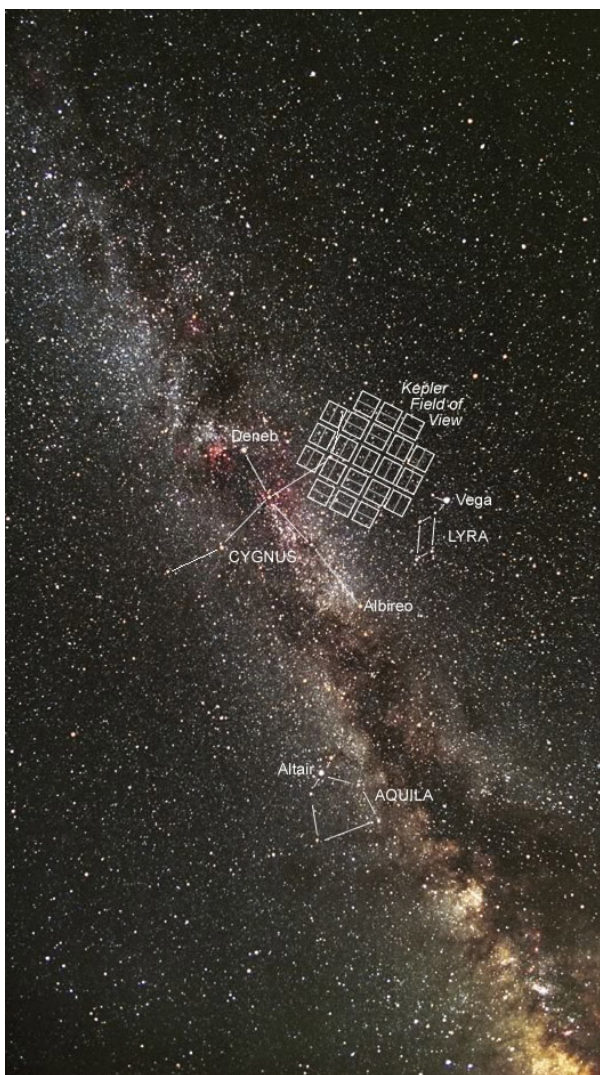
Det giver derfor en overvægt af disse typer planeter, som tydeligt fremgår af figur 2, hvor der kun ses få planeter med en radius mindre end $0,5 R_J$. Kepler vil nå ned til mindre radier og masser og dermed befolke masse-radius diagrammets nedre del.

CoRoT er den første rumbaserede fotometriske planetsøgning. Efter cirka 2,5 år har CoRoT kun fundet 7 planeter, færre end forventet. Den sidste planetkandidat, der blev fundet i februar 2009 (men stadig ikke er helt bekræftet), har en meget lav masse på 11 jordmasser og er derfor den klart mindste formørkende planet fundet endnu.

Kepler

Kepler er, som CoRoT, også en fotometrisk mission, hvis hovedformål er at finde formørkende planeter. Kepler blev opsendt 6. marts 2009 og opnåede "first light" (første detektion af lys fra teleskopet) 8. april 2009. Alt ser ud til at virke, som det skal. Fotometeret har en diameter på 0,95 m, og detektoren består af 42 CCD'er (95 Mpix), som dækker et felt på 105 kvadratgrader (se figur 3). Kepler har en utrolig præcision i målingerne af lysintensitet – 20 milliontedele eller bedre – og vil observere det samme felt i hele

missionens levetid på 3,5 år. Over 100.000 af de 14 millioner stjerner i feltet er blevet omhyggeligt udvalgt, således at missionen giver det største udbytte, da der ikke er kapacitet til at transmittere hele feltet ned til Jorden med tilstrækkelig høj frekvens.



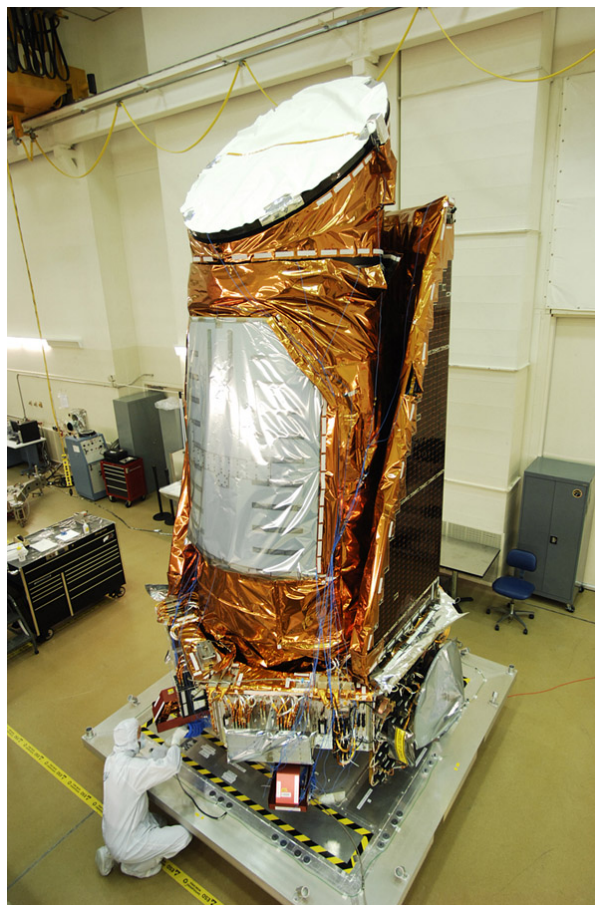
Figur 3. Kepler-feltet ligger mellem stjernebilledet Svanen og stjernen Vega. Kasserne repræsenterer de 42 CCD'er, som udgør Kepler feltet.

Da vi endnu ikke ved, hvor almindelige jordlignende planeter er, er det ikke muligt at forudsige udbyttet af Kepler uden at lave antagelser. De følgende forudsigelser er baseret på en række antagelser, bl.a. at sådanne planeter er almindelige, dvs. at der gennemsnitlig findes to jordlignende planeter mellem 0,5 og 1,5 AU om hver stjerne (1 AU er Jordens afstand fra Solen), som i vort eget solsystem. Med jordlignende planeter menes de såkaldte "super Earths", planeter der overvejende består af silikater og har masser op til 10 gange Jordens masse.

Kepler forventer at finde mellem 50 og 600 jordlignende planeter i indvendige baner (baner mindre end eller af samme størrelsesorden som det indvendige Solsystem der indeholder Merkur, Venus, Jorden og Mars), afhængig af hvad jordlignende planets gennemsnitsradius viser sig at være, og 135 gasplaneter

i indvendige baner. Det forventes, at nogle af disse jordlignende planeter vil ligge i den beboelige zone ("the habitable zone" eller HZ), som løseligt defineres som den afstand fra værtsstjernen, hvor betingelserne er gunstige for liv, som vi kender det på Jorden.

Et spændende resultat af Kepler vil være frekvensen af jordlignende planeter. Er vores Jord en helt almindelig planet i Mælkevejen, eller er vores Jord enestående i vores galakse? Kepler er designet således, at selv et negativt resultat vil være interessant, fordi det vil betyde, at Jorden *er* enestående i Mælkevejen, hvis Kepler ikke finder nogen planeter som ligner Jorden.



Figur 4. Kepler satellitten inden opsendelsen. Billede: Ball Aerospace.

Keplers fotometriske observationer kan også bruges til asteroisologi, og Danmark leder denne spændende indsats (se artiklen herom andetsteds i bladet). Med planetbriller på kan den asteroisologiske analyse fortælle om vigtige parametre for værtsstjernen, så som masse, radius og alder. Da vore værdier for planetens masse og radius er direkte proportionale med de antagne værdier for værtsstjernen, er det naturligvis yderst vigtigt, at disse bestemmes med størst mulig nøjagtighed.

Opfølgende observationer

Når Kepler detekterer et dyk i lyset fra en stjerne, kan dette signal skyldes en lang række andre hændelser end en planetpassage, f.eks. en partielt formørkende

dobbeltstjerne, tre – eller flerdobbelte stjernesystemer, kæmpestjerner osv. For at udelukke en del af disse scenarier bruges bl.a. opfølgende spektroskopiske observationer. Fx kan en dobbeltstjerne hurtigt udelukkes, da de store masser giver langt større variationer i radialhastighed end en planet. En række lignende tests kan udføres for definitivt at afgøre, om der er tale om en planet, men det ville være for detaljeret at komme ind på her.

For at finde planetens masse bestemmes værtsstjernens bane omkring dens og planetens fælles tyngdepunkt ved meget nøjagtige spektroskopiske observationer. For en formørkende planet kan hældningen af baneplanet bestemmes, og dermed kan vi finde planetens eksakte masse relativt til stjernens. Forholdet mellem planetens og værtsstjernens radier er direkte proportional med dybden af dykket i lyskurven, så planetens radius og dermed dens middeltæthed kan hermed bestemmes. Det er dog yderst vanskeligt at måle radialhastigheder, der skyldes en planet med masse og bane som Jorden omkring en stjerne af soltype, da de tilsvarende ændringer i radialhastighed er utrolig små, cirka 50 cm/s.

Danmark er involveret i disse opfølgende spektroskopiske målinger, og det Nordisk Optiske Teleskop (NOT) på La Palma benyttes til observationerne. Jordlignende planeter kræver dog endnu højere stabilitet og man er derfor ved at bygge en ny ultra-præcis spektrograf, HARPS-NEF, specifikt designet til at finde og karakterisere sådanne planeter. HARPS-NEF er en videreudvikling af den nuværende rekordholder HARPS på 3,6 m teleskopet ved European Southern Observatory i Chile.

En formørkende planet tillader en række spændende opfølgende observationer. Præcise målinger af tiderne for formørkelserne kan afsløre tilstedeværelsen af hidtil usete planeter i systemet. Den såkaldte Rossiter-McLaughlin effekt i hastighederne kan bruges til at bestemme hældningen mellem planetens bane og stjernens rotationsakse, og dette kan bruges til at lægge bånd på dannelsesteorier for planetsystemer.

De mest interessante opfølgende observationer er nok af exoplaneters atmosfære. Når planeten formørker værtsstjernen, vil en lille del af lyset passere igennem planetens atmosfære, og noget af lyset bliver absorberet. Hvis man observerer stjernens spektrum både under formørkelsen og umiddelbart før eller efter og trækker det sidste fra, har man isoleret planetens spektrum. Denne teknik kaldes transmissionsspektroskopi. Nogle af de inderste, ekstremt varme Jupiterplaneter stråler desuden selv så meget i det infrarøde område, at denne emission kan observeres ved en lignende teknik.

Observationer af stjerne og planet udføres her under og lige før eller efter den sekundære formørkelse (hvor planeten passerer *bag* værtsstjernen), og forskellen mellem disse er så emissionspekteret fra planeten. Med disse teknikker er der observeret bl.a. vand, natrium og metan i atmosfærerne på exoplaneter.

Fremtidsudsigter

Exoplaneter har en spændende fremtid foran sig. Kepler vil inden for de næste 3,5 år finde hyppigheden af jordlignende planeter, herunder et par beboelige, hvis de eksisterer, samt fylde masse-radius diagrammet med data for et væld af nye planeter og dermed hjælpe os til at forstå, hvordan planeter og planetsystemer dannes.

Man har allerede observeret atmosfæren på et par af de varme Jupiterplaneter, og James Webb Space Telescope (JWST), et 6,5 m infrarødt rumteleskop, som bliver opsendt i 2013, vil give os mulighed for at gå endnu længere. JWST vil måske muliggøre observationer af en jordlignende planets atmosfære, hvis det lykkes at finde en formørkende planet af denne type omkring en kraftig stjerne i nærheden af vores solsystem.

Et meget spændende perspektiv er muligheden for at finde såkaldte biomarkører i atmosfæren på en sådan planet. Biomarkører betegner stoffer som f.eks. O₂ og CH₄ (ilt og metan), hvis tilstedeværelse i større koncentrationer indikerer en biologisk oprindelse. Fotosyntese danner ilt, biologisk aktivitet danner metan, og hyppigheden af disse stoffer på Jorden er langt større, end hvis liv ikke eksisterede på Jorden. Simultan detektion af ilt og metan vil være den stærkeste indikation på liv, vi kan få fra en exoplanets atmosfære, og et stort skridt i retning af at besvare spørgsmålet, om der eksisterer liv andre steder i Universet.

Litteratur

- [1] Charbonneau, D., Brown, T. M., Burrows, A., Laughlin, G. (2007), When Extrasolar Planets Transit Their Parent Stars, 2007 prpl.conf..701C.
- [2] <http://kepler.nasa.gov>



Lars Buchhave er ph.d.-studerende ved Niels Bohr Institutet og ved Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA, USA og er involveret i det spektroskopiske opfølgingsarbejde af formørkende planetkandidater fra NASAs Keplermission og HATnet projektet.