

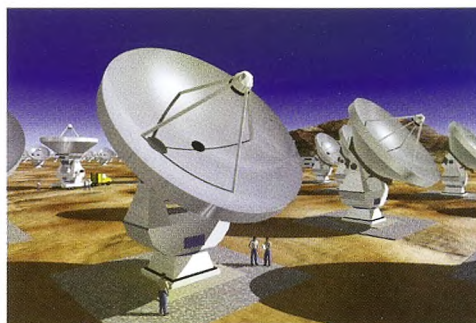
Er Solsystemet almindeligt blandt solsystemer?

Uffe Gråe Jørgensen, Niels Bohr Institutet fAFG, Københavns Universitet.

Indledning

Vi lever i et solsystem bygget efter universelle fysiske love og af de mest almindelige grundstoffer i Universet. Planeterne kredser om en ganske almindelig størrelse stjerne, af almindelig alder og af typisk sammensætning for dens alder. Der er af størrelsesordenen 100 milliarder stjerner i vores Mælkevej, hvoraf en stor del minder om Solen, og der er måske 100 milliarder mælkeveje i Universet. Intuitivt ville vi slutte at Universet huser et utal af solsystemer som vores, og sikkert også et utal kloder af Jordens slags – små faste himmellegemer der kan holde på en atmosfære og som har flydende vand ved overfladen. Hvis livet opstår spontant når de rette fysiske betingelser er til stede, vil vi endda fristes til at mene at livet er et udbredt fænomen i Universet.

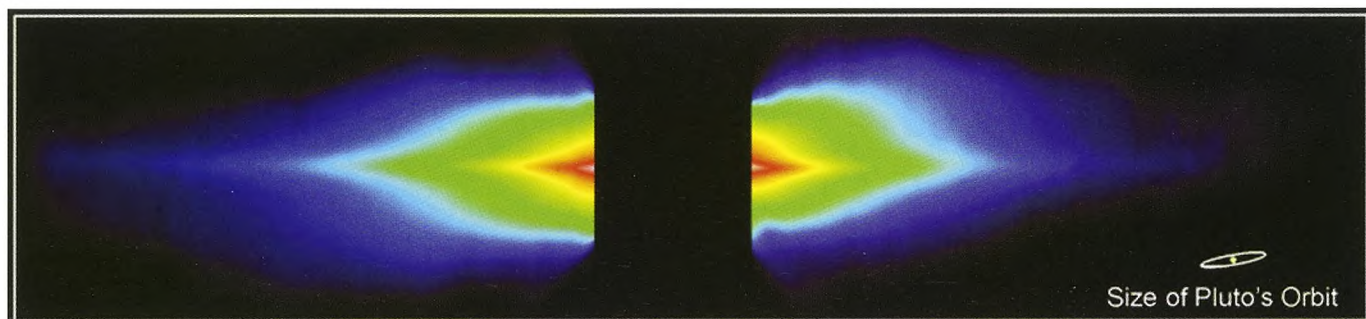
Faktum er imidlertid at vores teoretiske modeller for Solsystemets dannelse og udvikling *antager* at Solsystemet er almindeligt (– ikke viser det). Vi observerer nogle skyer om unge stjerner som vi tror er solsystemer under dannelse, skønt vi ved de oftest er langt større end vores solsystem og ingen af dagens instrumenter kan opløse dem i nogen form for brugbare detaljer. I 10 år har vi kendt til planeter omkredsende andre stjerner (kaldet exoplaneter eller ekstrasolare planeter), men ingen af dem ligner planeterne i vores solsystem (eller er bare i overensstemmelse med standardteorien for Solsystemets dannelse), og de eneste målinger der vil være istand til at identificere planeter som dem i vores eget solsystem har efter 10 års søgen kun været istand til at finde én. Betyder det at vi er meget mere alene i Mælkevejen end vi gerne vil tro, eller søger vi bare på den forkerte måde?



Figur 1. Det kæmpemæssige system af 65 sammenkoblede mikrobølgeteleskoper (ALMA) der er under opbygning i det nordlige Chile, forventes at ville give os de første detaljerede informationer om opbygningen af protostellare skyer – svarer de til standardmodellen for solnebulosen? – vil de ende som de exoplaneter vi kender, som Solsystemets planeter, eller som noget helt tredje?

Solsystemets dannelse: Standardmodellen

Det overordnede scenario for Solsystemets dannelse er et af de ældste endnu overlevende i moderne astronomi, med grundtræk der går helt tilbage til tanker af bl.a. Kant og Laplace: En stor, langsomt roterende, interstellar sky trækker sig sammen under sin egen tyngde. Balancen mellem tyngdekraften og centrifugalkraften tvinger skyen ud i en flad skive vinkelret på rotationsretningen. Det meste af skyens masse samler sig i centeret og bliver til Solen, mens planeterne og resten af Solsystemet formes af materiale fra den omkredsende skive. Idag udgør Solen ca 99,9% af Solsystemets samlede masse. Af de altså mindre end 0,1% af massen som ikke findes i Solen, findes 2/3 i Jupiter. Kun en forsvindende brøkdel af den samlede masse findes i komet, asteroider, måner, og andre smålegemer. Dynamisk set kan vi med god tilnærmelse tænke på Solsystemet som bestående af bare Solen og Jupiter.



Figur 2. Det smukke β Pictoris system – i lang tid troede man, at det var et solsystem under dannelse. Støvskiven er imidlertid mere end 100 gange diameteren af vores eget planetsystem, og indeholder ikke mere end nogle få procent af Jordens masse.

Når vi nu vil beregne hvordan den protosolare sky har set ud, har vi ikke noget andet valg end at skele til hvad der blev ud af den. Vi kender kun resultatet af ét sammenfald – kun ét solsystem. Derfor tager man alle planeterne i vores solsystem og breder i tankerne den del af deres masse der ikke er brint og helium ud i en kontinuert skive. Grundstofferne tungere end brint og helium udgør ca. 1% af Solens masse (indtil for ganske nyligt troede man at Solen indeholdt 2% tunge grundstoffer, og det er givet vis et tal vi er blevet så vant til, at det vil hænge ved i årevis eller måske årtier, men det rigtige tal efter dagens bedste viden er altså 1%). Man ganger dernæst denne masse med 100 (eller 50 hvis man vil holde fast ved de forkerte 2% tunge grundstoffer i Solen), og har så et minimumsmål for hvor meget masse der har været i nebuloen¹, og endda fladethedens fordeling ud gennem skyen. Det er idag det bedste gæt på hvordan enhver protostellar sky har set ud, og danner grundlaget for de fleste modeller for dannelsen af ekstrasolare planetsystemer.

Indirekte beviser for protostellare skyer, så som ekstra infrarød stråling, indikerer, at mellem 50 og 100% af alle unge stjerner omgives af en protostellar skive. Det er primært den termiske stråling fra støvet man ser, og kun meget få målinger viser os gaskomponenten. Ved at gange den estimerede støvmasse med hundrede, tyder målingerne på at typiske protostellare skyer har masser mellem 0,001 og 0,1 solmasser. Med Hubble Rumteleskopet er det lykkedes direkte at fotografere adskillige protostellare skiver, der oftest ses som små sorte silhuetter mod lyset fra bagvedliggende stjerner. Ingen teleskoper kan imidlertid opløse disse systemer i brugbare detaljer, så vi ved meget lidt om deres natur.

I de kommende år og årtier vil nye generationer af astronomiske instrumenter tillade os at opløse billeder af disse nebuloer i detaljer der vil kunne fortælle os hvordan de er sammensat, hvordan tryk, temperatur og tæthed forløber ud gennem skyen, hvor støvdannelsen finder sted, og dermed hvor planetdannelsen foregår. Det er data der kan sammenlignes direkte med den viden vi i disse år indsamler om ekstrasolare planetsystemer. Tilsammen vil det tillade os at bygge modeller for rigtige repræsentative solsystemer under dannelse (altså uden antagelsen om at de skal ende med at komme til at ligne vores eget system), og sige noget kvalificeret om vores egen lille blå priks mulige almindelighed eller ualmindelighed.

Den del af den protosolare skive der er af gas opretholder en hvis tykkelse pga. hydrostatisk ligevægt. Partikler der er store i forhold til gasmolekylerne vil derimod falde ned gennem gasskyen i en accelererende bevægelse der er bestemt af ballancen mellem tyngdekraften mod planen og viskositeten. Støvkorn der enten har været en del af den oprindelige interstellare sky eller er kondenseret ud af gasskiven, vil derfor

koncentreres mod gasskivens plan. På vej ned gennem gasskiven vil støvkornene støde sammen med andre støvkorn og vokse i størrelse. Simple overslagsberegninger viser at typiske støvkorn der falder ned gennem standardmodellen for solnebulosen, vil vokse til mellem én og nogle få mm inden de når skivens plan – det kommende ekliptika. Her vil sammenstød få dem til at klumpe sammen til endnu større partikler.

Partikler som er store nok til at dekooble fra gassen, vil rotere hurtigere rundt om skyens massemidtunkt end gassen og småpartiklerne, fordi gassen vil opleve en lidt mindre effektiv tyngdekraft (den egentlige tyngde minus gastryksgradienten) og derfor rotere langsommere end den rene Kepler-bevægelse som de dekooblede legemer følger. Herved vil de større partikler feje gennem skyen, kolliderer med mindre partikler, og derved hurtigt vokse i masse. Man kan vise at partiklerne ved denne process vokser til en bestemt størrelse der er bestemt af gassens tæthed, idet de kun kan feje småpartikler op indenfor en hvis afstand (den såkaldte Hill-radius). Ved de tætheder standardmodellen foreskriver i Jordens afstand, vil stoffet indenfor en tubus af en Hill-radius indeholde kondenserbart stof nok til at lave et legeme af ca. Månens størrelse. Da Jordens masse er ca. 100 gange Månens masse, må der altså på et tidligt tidspunkt have befundet sig mindst 100 Måne-masse himmellegemer – kaldet protoplaneter – i Jordbanens omegn. Disse legemer har nu gennem de næste millioner af år perturberet hinandens baner, således at de tilsidst alle er kollideret med hinanden og er blevet til Jorden. Målinger af radioaktive isotoper i Jordens overflade viser at disse kollisioner må have opbygget Jorden over en tidsskala på mellem 50 og 100 millioner år.

Standardmodellen har sin hovedstyrke i, at den kan forklare de fleste af de grundlæggende træk i vores nuværende solsystem. Den forklarer på en naturlig måde hvorfor alle planeterne roterer i samme retning og i samme plan, den forklarer hvorfor de indre planeter er små og faste mens de ydre er store og gasformige (se senere), den forklarer smålegemernes eksistens og placering (måner, kometer, asteroider og zodiakallys), og den forklarer hvorfor det meste af Solsystemets masse er i Solen. På den anden side har den problemer med tidsskalaerne for planetdannelsen, specielt de ydre, den har problemer med at få støvet til at klumpe sig sammen til protoplaneter inden det suges ind i Solen, og den har kvantitative problemer med at forklare hvor Solens impulsmoment er blevet af. Hvorvidt disse problemer betyder at modellen behøver justeringer og modifikationer eller den er fundamentalt forkert er naturligvis uvist. En af de mærkværdigheder der har undret astronomer i årevis, og har givet anledning til et utal af indbyrdes modstridende teorier, er hvorfor det meste af det materiale som de faste planeter er dannet af, tilsyneladende er

¹Den skive af gas og støv som planeterne blev dannet af, kaldes for *solnebulosen*, altså skyen der omgav Solen, men andre navne findes også.

samlet i form af små chokopvarmede og genstørknede millimeter-store glasagtige kugler, og ikke "bare støv".

Vands rolle for planetdannelsen

Vand spiller en helt central rolle for at forstå hvorfor de Jord-lignende indre planeter (Merkur, Venus, Jorden, og Mars) blev små og faste, mens de ydre planeter (Jupiter, Saturn, Uranus, og Neptun) blev kæmpemæssige gas-giganter uden en fast overflade. Vandet er dermed samtidig nøglen til at forstå hvorfor det var en overraskelse da man for 10 år siden begyndte at finde Jupiter-lignende exoplaneter i Merkur-lignende baner.

I James Jeans formulering af instabiliteten i en fritsvævende sky, er sammenfaldshastigheden en voksende funktion af gastætheden. Sammenstyrtningen er altså en indefra begyndende og udefter voksende proces. De indre dele vil hurtigst trække sig sammen og de ydre dele vil dernæst falde ind gennem den opståede skive. Dette er i overensstemmelse med observationer af de tidligste stjernedannelsesfaser, såkaldte FU Orionis stjerner, der har en meget lille protostjernekerne, og et stort masseindfald gennem en omgivende skive. Friktion mellem den eksisterende skive og det indfaldende stof vil opvarme skiven. Da indfaldet foregår over dynamiske (dvs. korte) tidsskalaer, er det en almindelig antagelse, at temperaturgradienten forårsaget af gnidningen kan beskrives ved en adiabat².

For Solsystemet skaleres adiabatens absolutte temperatur ud fra den observation, at meteoritter kommende fra den ydre del af asteroidebæltet er hydrerede (dvs. indeholder vand), mens meteoritter fra den indre del er dehydrerede. Dette fastlægger temperaturen på overgangen mellem den indre og den ydre del af asteroidebæltet til 170 K, og herved er den absolutte temperaturstruktur i protosolnebulosen fastlagt. Fra nebulosens indre til overgangen mellem den indre og ydre del af asteroidebæltet kan vand kun have eksisteret i gasfasen. Fra asteroideovergangen og ud til ca. Jupiters afstand kunne vand kondensere ud af nebulosen i form af hydrerede mineraler, og fra Jupiters afstand og udefter har vand kunnet kondensere direkte som sne og is. Vi kalder ofte den afstand hvor det var koldt nok til at vand kunne udkondensere direkte, for vandlinien eller med et mere dramatisk udtryk, snegrænsen. Da kometer består overvejende af is, må de være dannet udenfor vandlinien. Dynamiske overvejelser viser at der må have været mindst tusind milliarder kometer i det tidlige solsystem.

Vi forstår nu at de indre planeter må være dannet dehydrerede, mens den faste kerne af de ydre planeter må bestå af en kombination af refraktive stoffer (sten og metal) og flygtige elementer som vand-is. Da vand er det mest simple molekyle man kan konstruere af universets to mest hyppigt forekommende (ikke-ædelgas-) atomer (brint og ilt), vil den faste kerne af planeter dannet udenfor vandlinien, hurtigt vokse sig meget større

end planeter i den indre sne- og is-frie del af solnebulosen. Ved standardmodellens gastætheder vil den faste kerne af Jupiter hurtigt vokse sig så stor at den omkringliggende gas kolliderer ned på kernen. Da gasmassen i nebulosen er ca. 100 gange større end den kondenserbare masse, bliver Jupiter (og de andre ydre planeter) kæmpemæssige gasplaneter.

Bemærk at det er omdannelsen af potentiel energi gennem gnidning der bestemmer hvor vandlinien findes i en protostellar sky, og ikke lyset fra den dannende protostjerne. Pga. vores modelleringers skalering til vores eget Solsystem, har vi derfor a priori ingen bedre model end at antage, at vandlinien ligger samme sted for alle stjernetyper. I denne approksimation er vi i den paradoksale situation, at alle exoplaneter observeret til dato er i modstrid med vores forståelse af solsystemers dannelse. De er alle kæmpeplaneter der ligger indenfor vandlinien. Det er langt fra klart om det betyder, at Solsystemet og de kendte exoplaneter er dannet på to forskellige måder, eller om Solsystemet måske er dannet i halen af et parameterrum der gør det usædvanligt, eller om forskellen kun skyldes udvælgelseeffekter i observationsteknikkerne. Opdagelsen af exoplaneterne (og selvsagt også opdagelsen af vores eget Solsystem) er bundet til observationsteknikker der kun ville tillade opdagelsen af netop disse systemer.

Fra 1 til 10.000 kendte exoplaneter på 20 år

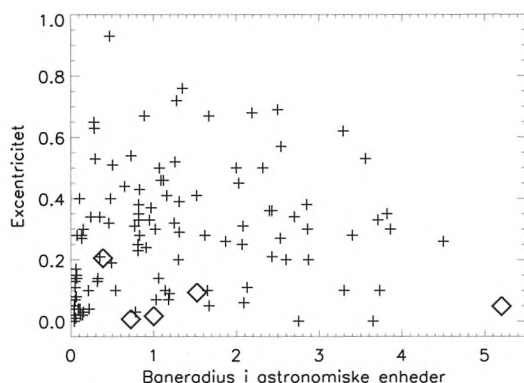
Vi kender idag ca. 125 planeter omkring 110 stjerner andre end Solen. På nær et par stykker er de alle opdaget ved hjælp af radialhastighedsmetoden: Stjernens bevægelse omkring stjernens og planetens fælles tyngdepunkt afsløres ved en periodisk ændring i stjernens radialhastighed, observeret som en periodisk forskydning af linierne i stjernens spektrum. Radialhastighedsmetodenplaneter (der får stjernens banehastighed om det fælles tyngdepunkt til at blive stor) i små baner (der får stjernens radialhastighedsperiode til at blive kort, således at den kan karakteriseres indenfor rimelig tid). Det er derfor ingen overraskelse, at metoden kun har afsløret ekstremt store planeter (op til mere end 15 gange Jupiters masse) i ekstremt små baner (mange af dem mindre end nogen kendt heliocentrisk bane, inklusiv Merkurs). Det overraskende er, at sådanne planeter overhovedet findes.

Ca. 5% af de over 2000 sol-lignende stjerner i Solens omegn som man har studeret har vist sig at omkredses af disse "varme Jupiter-lignende planeter". Udover at være små, er banerne også bemærkelsesværdigt excentriske, med en fordelingsfunktion der meget ligner den man finder for lav-masse stjernekomponenten i dobbeltstjernesystemer, og meget forskellig fra de næsten helt cirkulære baner af planeterne i vores Solsystem. Det kan betyde, at exoplaneterne er et andet fænomen end planeterne i vores Solsystem, måske dannet ved fragmentering af den oprindelige sky, ligesom komponenten

²adiabatisk – en reversibel termodynamisk proces der optræder uden tab af varme og uden ændring af entropien.

terne i dobbeltstjerner. Eksistensen af et stort antal fritsvævende planeter i unge stjernehober tyder herpå, mens en massefordelingsfunktion meget forskellig fra den for stjerner taler imod.

En anden mulighed kunne være at de kendte exoplaneter er dannet ved direkte gravitationelt gaskollaps i den protostellare skive (f.eks. ved en perturbation i den protostellare sky ved passage af en anden stjerne, eller ved interne forstyrrelser i en mere massiv sky end solnebuloen), mens Solsystemets planeter er begyndt ved en støvkondensering som beskrevet ovenfor. Denne opfattelse støttes bl.a. af det faktum, at den eneste exoplanet man har kunnet bestemme massefylden af, viser en så lav massefylde at den formentlig (i modsætning til gasplaneterne i vores Solsystem) ikke har nogen fast indre kerne, men består udelukkende af gas. Hvis denne opfattelse er rigtig, er exoplanetsystemerne altså noget andet – dannelsesmæssigt – end vores Solsystem, og i så fald har observationerne endnu intet lært os om solsystemer dannet som vores eget.



Figur 3. Excentriciteten i banebevægelsen som funktion af banens halve storakse (målt i enheder af jordbaneradien) for de kendte exoplaneter (krydser) og for de 5 inderste planeter i vores solsystem (diamantsymboler).

Radialhastighedsmetoden er ikke ny, men den store nøjagtighed i radialhastighedsbestemmelsen er ny. For 50 år siden var en nøjagtighed på 1 km/s fint, men den første exoplanet, 51 Peg b, blev detekteret i 1995 med et instrument med en nøjagtighed på 10 m/s. Det er samme hastighed som Jupiter slynger Solen rundt om deres fælles tyngdepunkt med, men 51 Peg b har en omløbstid på 4 døgn og Jupiter 12 år. Det tager mange års observationer at identificere en planet i en Jupiter bane, og man er endnu ikke der efter 10 års observationer. Selv med dagens bedste målenøjagtighed på under 1 m/s vil det tage måske 5 eller 10 år endnu inden vi kan forvente at se en egentlig Jupiter. Uranus og Neptun med deres hhv. 84 og 164 år lange omløb, vil naturligvis ikke kunne identificeres indenfor en menneskealder. En anden begrænsning er at metoden kræver meget højopløsnings spektroskopi, hvilket i praksis begrænser detektionerne til afstande af få hundrede lysår fra os for sol-lignende stjerner, og væsentlig kortere afstande for de universelt set langt mere almindelige M-type stjerner.

En metode der minder meget om radialhastighedsmetoden, men potentielt vil kunne sige noget om exoplaneter udenfor vandlinien og længere ud i Mælkevejen, er astrometri. Her måler man i stedet for komponenten frem og tilbage af stjernens bevægelse, bevægelsen fra side til side – ”slingrebevægelsen” hen over himmelkuglen. Alene fra vægtstangsprincippet kan man indse at jo større afstanden mellem stjernen og planeten er, desto større vil stjernens slingren blive. Imidlertid vil meget store planetbaner igen kræve meget lange tidsserier, og for at opnå den nødvendige nøjagtighed, er det nødvendigt at observere udenfor Jordens atmosfære. Flere satellitter er i støbeskeen, og flagskibet blandt dem er den europæiske Gaia-satellit der forventes at få en målenøjagtighed der ville kunne skelne siderne på en en-krone i 4 millioner km afstand, og nu er planlagt til opsendelse i 2010. Det forventes, baseret på statistikken fra radialhastighedsmålingerne og satellittens forventede levetid, at man vil kunne identificere 10.000 nye exoplaneter indenfor 600 lysår fra Solen, i baner der er som radialhastighedsplaneternes. Skulle det i fremtiden besluttes at opsende en ”Gaia II”, om f.eks. 25 år, ville det naturligvis markant forlænge basislinien for tidsserien, og dermed åbne muligheden for en stærkt forbedret statistik for planeter i Neptun- og Uranus-lignende baner.

Direkte fotografering af exoplaneter

Indtil for ganske nyligt var tanken om direkte at se en exoplanet nærmere science fiction end en realistisk forestilling. De første billeder af exoplaneter er imidlertid nok allerede taget. Ved at udnytte interferensen mellem lys fra den samme bølgefront opfanget af to forskellige teleskoper, kan man opnå en rumlig opløsning der tillader identifikation af Neptun-lignende planeter omkring de nærmeste stjerner. Det kræver ”blot” at lyset fra to eller flere involverede teleskoper føres til samme detektor med en vejlængde der er ens indenfor en brøkdel af en lysbølgelængde. Sådanne opstillinger har været funktionsdygtige indenfor det seneste års tid fra flere observatorier, bl.a. mellem de store europæiske VLT-teleskoper på Paranal i Chile. Herfra har man allerede nu optagelser der viser unge stjerner med himmellegemer der kunne være Neptuner i Neptun-lignende afstande fra stjernen. Spørgsmålet er, om det virkelig er Neptun-planeter, eller det er baggrundsstjerner der tilfældigvis ligger i den rigtige vinkelafstand. I princippet ville man naturligvis i løbet af et par hundrede års observation kunne se om de kredser om stjernen, men allerede indenfor et par år vil man kunne vise om de to legemer følges ad i deres baner på himmelkuglen, hvilket ville være usandsynligt hvis det var to tilfældige stjerner på forskellig afstand fra os, men hvilket ville være tilfældet hvis det er en stjerne og dens planet.

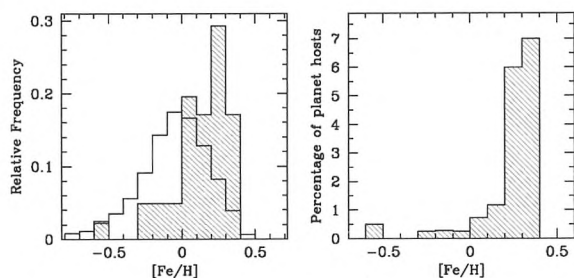
Da den rumlige opløsning skalerer lineært med afstanden mellem teleskoperne, ville man muligvis kunne skelne Jord-lignende planeter, hvis man anbragte sine

teleskoper i synkrone kredsløb om Jorden. Sådanne instrumenter er på tegnebrættet både hos ESA og NASA, og kan meget vel være en realitet indenfor et årti eller to. På længere sigt er det rumfartsorganisationernes ambition at blive i stand til direkte at fotografere terrestriske (jordlignende) exoplaneter i få pixels opløsning, således at man vil kunne identificere mulige kontinenter, oceaner, skysystemer, og polkalotforandringer – og ikke at forglemme kunne optage spektre der vil kunne afsløre om atmosfæren er i kemisk eller biologisk ligevægt.

Afhængigheden af metalliciteten

I standardmodellen for Solsystemets dannelse skulle man forvente, at store planeter vil være mere hyppige omkring stjerner dannet fra en sky med højt indhold af ilt end stjerner med lavt indhold af ilt. Mængden af ilt bestemmer nemlig mængden af vandmolekyler, der igen bestemmer hvor hurtigt massen af den faste planeterne kan vokse sig stor nok til at få den omkringliggende gassky til at kollapse over kernen og danne en gasgigant. Den relative hyppighed af de tunge grundstoffer (dvs. tungere end helium) er nogenlunde ens for alle (ikke alt for gamle) stjerner. Vi kan derfor udtrykke ilthypigheden ved hypigheden af hvilket som helst grundstof vi kan måle, og taler derfor oftest om stjernens metallicitet der betyder den procentdel af stjernens masse der ikke er brint og helium.

Exoplaneter er langt hyppigere omkring stjerner med høj metallicitet, og man har kun identificeret planeter omkring en enkelt stjerne som har mindre end 1/3 af Solens metallicitet (se fig. 4). Dette resultat fortolkes oftest som at stjernerne skal have en vis metallicitet før de kan have planetsystemer, men det er nok fornuftigere at begrænse sig til at konkludere, at kun over en vis metallicitet vil der dannes kæmpeplaneter identificerbare vha. radialhastighedsmetoden. De metalfattige stjernesystemer kunne meget vel tænkes befolket med terrestriske planeter inden for snegrænsen, og udenfor grænsen huse lidt større sten-is planeter der aldrig blev store nok til et gaskollaps der kunne omforme dem til gasgiganter og gøre dem identificerbare med radialhastighedsmetoden.



Figur 4. Hyppigheden af kendte exoplaneter som funktion af stjernernes metallicitet. Fra N.C. Santos et al. 2004

En bekræftelse af, at der ikke eksisterer varme Jupiter-lignende kæmpeplaneter omkring stjerner med

lav metallicitet, fik vi forrige år da én af de længste sekvenser af optagelser nogensinde foretaget med rumteleskopet viste, at stjernerne i den metalfattige stjernehop 47 Tucana havde mindst 10 gange lavere hyppighed af varme Jupiter-giganter end stjernerne i Solens omegn. Her anvendte man den såkaldte passagemetode, hvor man kigger efter periodiske dyk i stjernens lysstyrke som følge af passage af en kæmpeplanet hen foran stjerneskiven. Metoden har vist sig vanskeligere at anvende end først antaget, fordi flere andre fænomener end en planetpassage vil give et lignende periodisk dyk i stjernens lysstyrke, men et nulresultat er ikke til at misforstå. Ud af de 17 Jupiterpassager man havde forventet at se, hvis hyppigheden havde været den samme som for stjernerne i Solens omegn, så man nul.

Om få år vil to satellitter foretage dedikerede passagemålinger af stjerner i Solens omegn, og man håber at opnå så stor fotometrisk nøjagtighed, at man vil kunne se passagen af så små planeter som få gange Jordens diameter. Fra teleskoper på Jorden har man allerede gennemgået alle de kendte exoplaneter, og som statistisk forventet har netop én af planeterne periodiske passager hen over skiven på den stjerne den omkredser (med en periode på 3,5 døgn). Størrelsen af lysstyrkedykket under passagen viser os hvilken brøkdel af stjerneskiven der dækkes af planeten, og er dermed et mål for planetens radius (relativt til stjernens radius som antages kendt). Fra rumfanget og massen er massefylden af denne exoplanet unikt bestemt til $0,4 \text{ g/cm}^3$ – omkring halvdelen af Saturns $0,8$ som er den laveste blandt planeterne i vores eget solsystem. Som tidligere nævnt betyder det sandsynligvis at den målte exoplanet (i modsætningen til kæmpeplaneterne i vores solsystem) ikke har nogen fast indre kerne, men helt igennem består af gas.

Planeter som dem i vores eget solsystem

Den eneste af de mange metoder til opdagelse af exoplaneter som er følsom overfor planeter magen til dem i vores eget solsystem og som rækker over det meste af Galaksen, er den såkaldte mikrolinseteknik, og det er derfor sandsynligt at det er her vi skal søge det endelige svar på om Solsystemet er almindeligt eller unikt – om betingelserne ud gennem Mælkevejen for liv som vi kender det er gode eller dårlige. Man udnytter her at hvis to stjerner på forskellig afstand står i næsten samme retning på himlen, vil lyset fra baggrundsstjernen (kilden) set fra os afbøjges i tyngdefeltet fra forgrundsstjernen og dens eventuelle planeter (mikrolinsen). Størrelsen af afbøjningen var en af de første forudsigelser af den almene relativitetsteori som blev eftervist observationelt (ved Eddingtons berømte målinger under solformørkelsen i 1919). Geometriske overvejelser viser, at afbøjningen vil resultere i en intensivering af lyset fra kilden, som er størst når sigtelinien mellem linsen og kilden er mindst.

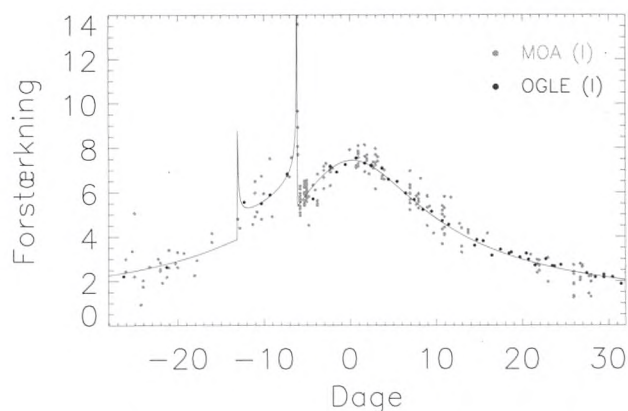
Pga. den store tæthed af stjerner i retningen mod Mælkevejens centrum, vil Mælkevejen hele tiden præsentere os for et antal nye stjerner der passerer hinanden tæt nok på himlen til at den forreste af stjernerne virker som en mikrolinse for den bagerste. Hvis linsen består af kun én stjerne, vil dens tyngdefelt være symmetrisk, og lysvariationen af baggrundsstjernen vil derfor variere symmetrisk i tiden mens den passerer linsen. Hvis derimod forgrundsstjernen omkredsnes af en planet eller en anden stjerne, vil det samlede tyngdefelt fra linsen være asymmetrisk, og kildens lysvariation følgelig være asymmetrisk i tiden. Asymmetrien er ikke en simpel lineær funktion af det samlede tyngdefelts styrke, men derimod en stærkt ulineær funktion, hvor kildens lys ændres næsten diskontinuert når sigtelinien til kilden passerer specielle linier i linseplanet. Disse såkaldte kaustiske³ linier danner tilsammen én eller flere lukkede figurer, kaldet kaustiske områder. Jo større en omkredsende planets masse er desto større vil disse figurer være, og deres placering i systemet er bestemt af afstanden mellem planeten og stjernen. Hvis observationerne foretages i tilstrækkelig tidsopløsning til, at man bl.a. kan slutte hvornår kilden bevægede sig ind og ud af linsens kaustiske område, kan man modellere figurens størrelse og placering i systemet, og derved slutte sig til masse og baneafstand af den planet der var anledningen til det kaustiske område. Man har så observeret en exoplanet omkring linsestjernen. Den nedre grænse for den detekterbare planetmasse er bestemt af tidsopløsningen og nøjagtigheden i fotometrien. I princippet vil planeter så små som Jorden eller mindre kunne detekteres, men sandsynligheden for detektion af Jupiter-masse planeter er større, fordi deres kaustiske områder er større.

Flere survey-instrumenter detekterer automatisk disse passager, ved med mellemrum at bestemme lysstyrken af millioner af stjerner i udvalgte felter af himlen i retning mod Mælkevejens centrum. Så snart en intensivering af lyset fra én af stjernerne tyder på begyndelsen af en linsebegivenhed, offentliggøres data som en mulig mikrolinse. Det mest omfattende eftersøgningsprojekt er det Polsk-Amerikanske OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment) der nu årligt afslører omkring 600 nye mikrolinsekandidater. Disse observationer er meget værdifulde for at bestemme f.eks. stjernernes massefordeling og Mælkevejens masse, men for sparsomme til i almindelighed at afgøre om linsestjernen omkredsnes af en exoplanet. Hertil kræves langt højere tidsopløsning i målingerne end man kan opnå under et survey.

For at få maksimal tidsopløsning, indgår den danske 1,5 m kikkert på La Silla i Chile for tiden i et internationalt samarbejde hvor vi løbende udvælger de mest lovende OGLE kandidater til observation i tilstrækkelig tidsopløsning til at kunne afsløre og karakterisere eventuelle exoplaneter i linsesystemet. Foruden den

danske kikkert deltager to observatorier i Australien og to observatorier i Sydafrika i projektet (kaldet PLANET; Probing Lensing Anomalies NETWORK), således at vi tilsammen kan observere udvalgte linsebegivenheder 24 timer i døgnet (når ellers vejret tillader det). Data reduceres løbende ved kikkerten og samles natten igennem i vores database i Paris. Medarbejdere analyserer dér de opnåede lyskurver, således at besked omgående kan gives tilbage til observatorierne hvis nogle begivenheder viser tegn på planeter, så observationerne kan intensiveres til fuld dækning af netop denne linse, så en sikker masse- og banebestemmelse af planeten kan foretages når passagen er forbi.

Efter få indledende observationer kan man i almindelighed beregne hvor tæt baggrunds- og linsestjernen vil passere hinanden, og som en tommelfingerregel kan man sige, at jo tættere de passerer hinanden, jo større er sandsynligheden for, at en eventuel planet i systemet vil kunne detekteres. Ironisk nok blev den første mikrolinse-exoplanet imidlertid identificeret i sommeren 2003 omkring en OGLE kandidat der havde relativt lille sandsynlighed for at vise en eventuel exoplanet, mens vi med den danske kikkert var optaget af at følge OGLE kandidater der havde større sandsynlighed for, at afsløre deres planeter. Resultatet er desværre, at karakteriseringen af den første mikrolinse exoplanet er ret dårlig, baseret på de relativt sparsomme OGLE og MOA (Microlensing Observations in Astrophysics) survey-data alene. Imidlertid er signalet (se Fig.5) fra exoplaneten ikke til at tage fejl af, og med rimelig sandsynlighed kan det konkluderes, at linsesystemet er en M dværgstjerne på knapt halvdelen af Solens masse der omkredsnes af en planet på halvdanden gange Jupiters masse i en bane med radius 3 AU. Det er tankevækkende at denne første mikrolinse-planet også er en "varm Jupiter" planet (ligesom radialhastighedsplaneterne) i modstrid med standardmodellen for solsystemers dannelse, til trods for at mikrolinseteknikken ikke er specielt følsom for denne slags planeter.



Figur 5. Lysstyrkevariationen der afslørede den hidtil eneste offentliggjorte mikrolinse-planet.

³kaustisk betyder egentlig brændende, men bruges her om et skarpt udslag.

Mikrolinseteknikken er en statistisk metode der kræver tålmodighed, og de vigtigste resultater vil først vise sig efter nogle års observationer. Hvis observationer af kildens passage gennem linseplanet ikke viser et kaustisk område kan det enten være (1) fordi der ikke var noget kaustisk område (dvs. stjernen var alene i rummet; tyngdefeltet var symmetrisk), eller (2) fordi vi ikke observerede kilden mens den passerede gennem det kaustiske område (den tidsmæssige opløsning i observationerne var for dårlig), eller (3) fordi planeten lå ”på den anden side af stjernen” (dvs kilden undgik det kaustiske område). Man kan således aldrig med sikkerhed sige at en given linsestjerne ikke havde en planet ud fra en negativ observationsserie, men man kan sige med hvilken sandsynlighed man ville have identificeret planeten hvis der var en.

Efter at have fulgt et statistisk signifikant antal linsebegivenheder med stor planet-detektions sandsynlighed i tilstrækkelig tæt tidsopløsning, kan man derfor udtale sig om hvor stor en brøkdel af stjernerne der har planeter med given masse og baneradius. Da stjernerne er tilfældigt valgt (af naturen selv) blandt Mælkevejens stjerner, kan man derfor endelig udtale sig om hvilken brøkdel af Mælkevejens stjerner der omkredses af planeter af en given type. Specielt er PLANET-eftersøgningen tilrettelagt således at hvis vi ikke identificerer en eneste exoplanet i det 3-års tidsrum projektet foreløbigt er fastsat til at vare, så kan vi konkludere, at mindre end 5% af Mælkevejens stjerner har solsystemer som vores med Jupiter-lignende gasplaneter i Jupiter og Saturns baneafstande. På den måde er PLANET-projektet på mange måder et af de få projekter hvor det mest interessante resultat måske ville være hvis vi netop ikke finder noget af det vi leder efter!

PLANET er i skrivende stund midt i andet år af sit program. Selvom det endnu er for tidligt at lægge tal på hvor stor en brøkdel af Mælkevejens stjerner der har solsystemer som vores, er et allerede sikkert: Det vrimer ikke med vores type af solsystemer, de er snarere ret sjældne universelt set.

Kant og Laplace havde formentlig stort set ret i, hvordan de opfattede Solsystemet dannet, men det synes mere og mere tvivlsomt om deres tanker kan overføres til stjerner i almindelighed. Giordano Bruno og andre af Middelalderens optimister tog sandsynligvis fejl når de troede, at fordi der er mange stjerner i Universet betyder det også mange Jordkloder med liv. Den optimisme der prægede opdagelsen af de første (”mærkelige”) exoplaneter for 10 år siden, er (for mig i det mindste) afløst af en fornemmelse af, at mindre end 5% af Mælkevejens stjerner har mærkelige systemer af

gasgiganter i uventede små baner, og mindre end 5% af Mælkevejens stjerner har solsystemer som vores eget. De resterende 90% har tilsyneladende hverken gasgiganter indenfor eller udenfor snegrænsen.

For at komme videre behøver vi bedre statistik for exoplaneter af Solsystemets type. Vi behøver bedre modeller for solsystemernes dannelse. Og vi behøver observationer af meget højere opløsning af de protostellare skyer der skulle have været, og måske er, solsystemer under dannelse. Men det store spørgsmål om Solsystemets mulige almindelighed er formentlig allerede blevet afløst af spørgsmålet om hvad der set fra vores perspektiv gik galt for hovedparten af de protostellare nebuloser – hvorfor blev de ikke til hyggelige små planetsystemer som de skulle? Hvad var det der var så ualmindeligt under Solsystemets dannelse at det lige præcis blev så velegnet – til os?

Artikler og hjemmesider

Nedenfor er angivet uddybende referencer til den videnskabelige litteratur indenfor emnerne *Exoplaneter* (ref. 1-4) og *Dannelsen af solsystemer* (ref. 5-7).

Referencer:

- [1] P. Bodenheimer og D.N.C. Lin (2002), *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* bind **30**, side 113-48.
- [2] M. Perryman (2000), *Rep. Prog. Phys.* bind **63**, side 1209-72.
- [3] PLANETS hjemmeside: planet.iap.fr
- [4] Jævnligt opdaterede kataloger: exoplanets.org og www.obspm.fr/planets
- [5] G.W. Wetherill (1980), *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, bind **18**, side 77-113.
- [6] C.J. Lada and N.D. Kylafis (eds.), *The Origin of Stars and Planetary Systems*, Kluwer 1999.
- [7] V. Mannings, A.P. Boss, and S.S. Russell (eds.), *Protostars and Planets IV*, Ariz. Press 2000.



Uffe Gråe Jørgensen arbejder på Niels Bohr Institutet fAFG, Københavns Universitet, indenfor exoplaneter, stjernemodeller og solsystemets dannelse.