



Alexis Brandeker

är universitetslektor i astronomi vid Stockholms universitet. Han är koordinator för de svenska bidragen till de kommande europeiska rymdteleskoperna CHEOPS och PLATO, ämnade att söka och karakterisera planeter runt andra stjärnor än solen. Han är även medinitiativtagare till det svenska rymdprojektet STARE med mål att söka efter en jordtvilling runt solens närmaste grannstjärna. Hans forskningsintressen inkluderar planetbildande miljöer runt unga stjärnor och astrobiologi.

Under de senaste 20 åren har sökandet efter andra planetsystem tagit fart på allvar, vilket gett ny näring åt frågan om hur unik vår egen planet är. Finns andra jordar någonstans där ute? Har liv uppstått även där? Alexis Brandeker skriver här om utmaningarna och om metoderna när vetenskapen söker svar på en av de allra äldsta existentiella frågorna.

*Bilden: Konstnärlig rekonstruktion av vy från ytan av planeten TRAPPIST-1f.
(Från NASA/JPL-Caltech)*

Jakten på andra jordar

Finns det fler världar som liknar vår egen? Det är en fråga som människan funderat över åtminstone sedan antiken, då Demokritos filosoferade över att jorden bara var ”en utav otaliga andra världar, några utan sol och måne, andra med flera”. Under årtusendena sedan dess har det inte varit brist på spekulationer om huruvida galaxen flödar över av jordlika planeter, eller om jorden är helt unik i universum, bildad genom en extremt osannolik kosmisk händelse. Det är först under de senaste decennierna som vi har kunnat angripa frågan utifrån en stadigare vetenskaplig grund, genom upptäckten av planeter runt andra stjärnor än solen, så kallade *exoplaneter*.

Den första upptäckten av en exoplanet runt en sollik stjärna publicerades 1995 av de schweiziska astronomerna Michel Mayor och Didier Queloz. Upptäckten var sensationell av flera skäl, inte minst för att planeten inte liknade något man förutspått skulle vara möjligt – en planet större än Saturnus i en omlopps bana så nära sin stjärna att den kretsar ett varv på 4 dygn! Det kan jämföras med den innersta planeten Merkurius i vårt solsystem, som tar 88 dygn på sig för ett varv runt solen.

Sedan denna första planetupptäckt för drygt 20 år sedan har forskningen om exoplaneter ökat explosionsartat, och vi känner idag till nära 4000 bekräftade exoplaneter. En sak observationerna lärt oss är att det finns en otrolig variation i typen av planeter, där de flesta inte alls är särskilt lika planeterna i vårt solsystem. Kanske mest anmärkningsvärt är att de allra flesta exoplaneter vi hittat är väldigt olika jorden. Visserligen är jorden speciell, men anledningen till att fler jordlika planeter inte hittats än är inte nödvändigtvis att det råder brist på sådana planeter, utan att andra typer av planeter är betydligt enklare att hitta. Viss förståelse för detta kan man få genom att titta i figur 1, som visar hur liten jorden är jämfört med Jupiter. I en galax full med planeter av olika sorter är det de största planeterna som oftast är lättast att upptäcka och därför upptäcks först.



BILD: WIKIMEDIA COMMONS.

Figur 1: Planeterna i solsystemet och deras relativa storlekar.

Hur man hittar en exoplanet

Kontrasten till den bländande ljusstarka stjärnan en planet kretsar kring är normalt så stor att det krävs exceptionella omständigheter för att existerande teleskop ska kunna observera dem direkt. Exempel på sådana omständigheter är följande:

- 1) Planeten är stor, helst större än Jupiter.
- 2) Planeten går i en vid bana runt sin stjärna, minst 10 gånger vidare än jordens bana runt solen. Samtidigt ska systemet inte vara för långt bort ifrån oss, så att våra teleskop har chans att separera planetens ljus från stjärnans.
- 3) Planetsystemet är så ungt att planeten fortfarande är varm nog efter sin tillblivelse att den strålar av sig själv i infrarött, dvs. den är inte beroende av uppvärmning från sin stjärna. Ju yngre planet, desto starkare lyser den i infrarött, så en önskvärd ålder är yngre än några tiotals miljoner år – verkligen ungt i astronomiska sammanhang.

Ingen av dessa tre punkter favoriserar jordlika planeter, som än så länge är omöjliga att direkt observera runt andra stjärnor. Det var länge tveksamt om det överhuvudtaget fanns planetsystem som

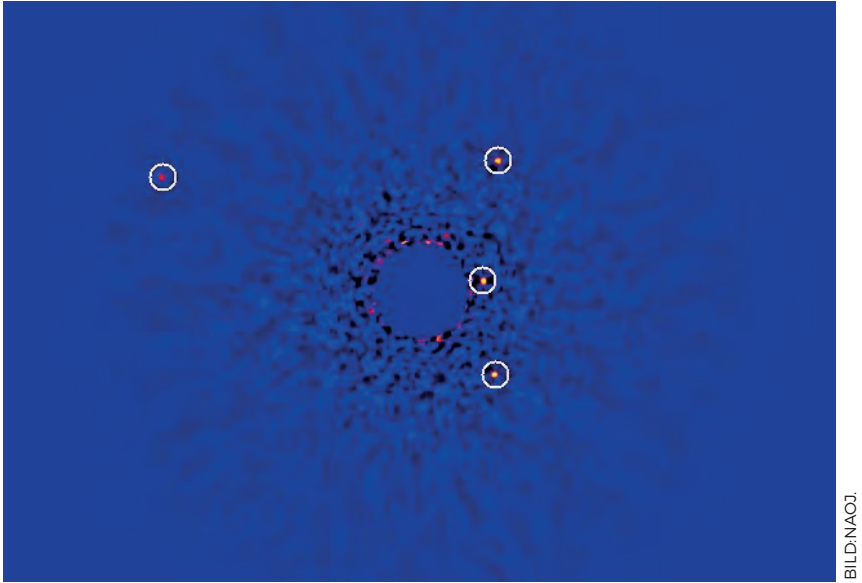


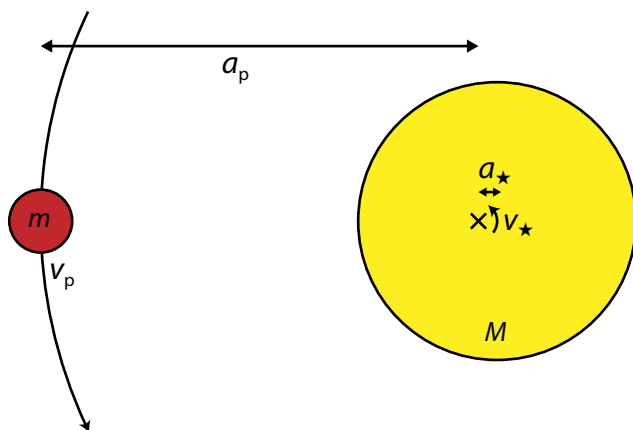
BILD:NAOJ

Figur 2: Planetsystemet HR 8799 avbildat av Subaru-teleskopet. Stjärnan är dold bakom en mask i mitten, medan planeterna är märkta med ringar.

kunde observeras direkt, men genom omfattande observationer vet vi idag att det finns en klass av extrema planetsystem som kan observeras på detta sätt, även om de är sällsynta; totalt rör det sig om ett dussintal observerade system (se figur 2 för det hittills mest kända exemplet).

För att utöka möjligheten att upptäcka planeter som är mer lika de vi har i vårt solsystem har astronomer tagit till *indirekta* metoder. Istället för att försöka observera planeten direkt utnyttjar man att en planet påverkar sin omgivning, särskilt ljuset som kommer ifrån stjärnan. Flera av dessa metoder har varit framgångsrika i att upptäcka exoplaneter. Låt oss se närmare på de viktigaste.

Radialhastighetsmetoden. En planet rör sig runt en stjärna på grund av stjärnans gravitation, men stjärnan rör sig också något på grund av planetens gravitation. I själva verket kretsar båda kropparna runt planetsystemets tyngdpunkt, som tack vare stjärnans dominerande massa befinner sig någonstans inuti stjärnan (figur 3). I det enklaste fallet, då stjärnan endast har en enda planet, så är rörelsen periodisk, och planeten och stjärnan rör sig ett varv runt tyngdpunkten på samma tid. Eftersom stjärnans bana är



Figur 3: En planet som rör sig runt en stjärna påverkar med sin gravitation stjärnans position: både stjärnan och planeten rör sig runt systemets gemensamma tyngdpunkt (markerad med ett kryss).

betydligt mindre än planetens, blir dess fart också betydligt mindre. Ju större planet och mindre stjärna, och ju mindre avstånd mellan planet och stjärna, desto högre blir farten hos planetens och stjärnans rörelser (se sidorutan här intill).

När ljus från ett objekt i rörelse når en observatör, kommer den observerade våglängden att bero på objektets hastighet projicerad på synlinjen till observatören, den så kallade *radialhastigheten*. När objektet – i detta fall en stjärna – närmar sig observatören blir våglängden kortare, vilket kallas för att ljuset blåförskjuts. När stjärnan avlägsnar sig blir våglängden i stället längre – ljuset rödförskjuts. Genom att mäta hur mycket våglängden förändras för kända spektrallinjer kan man bestämma stjärnans radialhastighet.

Det var en systematisk studie av stjärnors radialhastigheter som 1995 resulterade i den första upptäckten av en exoplanet runt en sollik stjärna. Planeten runt 51 Peg upptäcktes när stjärnan visade sig periodiskt ändra radialhastighet med upp till 110 m/s. Eftersom en planetbanas period beror på banans storlek kan man från perioden på 4,23 dygn sluta sig till att planeten befinner sig på avståndet 8 miljoner kilometer från sin stjärna, vilket är lite drygt en tjugondel av avståndet mellan jorden och solen.

Sedan planeten runt 51 Peg upptäcktes har flera hundra exoplaneter upptäckts med radialhastighetsmetoden.

Indirekta planetdetektioner

Såväl radialhastighetsmetoden som astrometrimetoden är indirekta såtillvida att de studerar hur stjärnans rörelse påverkas av planeten. I det enklaste fallet att det finns precis en planet i en cirkulär bana runt stjärnan är det lätt att med Newtons gravitations- och rörelselagar bestämma hur stor rörelsen blir. Kraften mellan de båda kropparna är

$$F_{\text{grav}} = -\frac{GMm}{a^2}$$

där $G \approx 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ är gravitationskonstanten, M är stjärnans massa, m planetens massa, och a avståndet mellan stjärnan och planeten. I en cirkulär bana motsvaras gravitationskraften av centripetalkraften

$$F_{\text{cent}} = -\frac{mv^2}{a}$$

där v är banhastigheten för planeten. Genom att sätta likhetstecken mellan krafterna får vi att planetens banhastighet är

$$v = \sqrt{\frac{GM}{a}}$$

Men hur mycket rör sig stjärnan? I uttrycket för centripetalkraften har vi försummat att planetens banrörelse inte har stjärnan exakt i centrum, så banans radie är något mindre än avståndet mellan stjärna och planet (se figur 3). I praktiken är skillnaden försumbar vad det gäller planeten, men om vi vill studera stjärnans rekylrörelse är skillnaden viktig. Både planet och stjärna rör sig runt deras gemensamma tyngdpunkt, vilket innebär att $Ma_* = ma$, där a_* är stjärnans banradie runt tyngdpunkten. Stjärnans banradie är alltså relaterad till planetens som $a_* = a(m/M)$.

Perioden P för planetens rörelse (dvs. ett ”år” för planeten) är avståndet den måste färdas på ett varv, dvs. omkretsen $2\pi a$, dividerat med banhastigheten v :

$$P = \frac{2\pi a}{v}$$

Men stjärnan har samma periodtid som planeten, så P kan lika gärna uttryckas som omkretsen hos stjärnans bana dividerad med stjärnans fart:

$$P = \frac{2\pi a_*}{v_*}$$

Högerleden i dessa båda uttryck för P kan därmed sättas lika med varandra, och vi har att

$$\frac{v_*}{v} = \frac{a_*}{a} = \frac{m}{M}$$

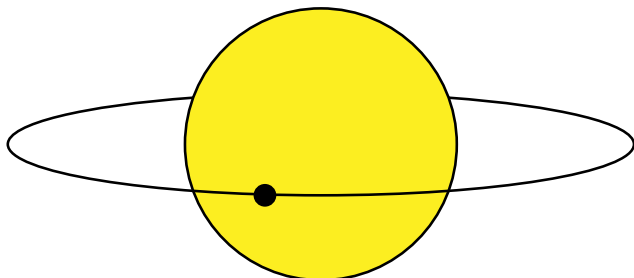
Om vi kombinerar detta med uttrycket för planetens fart v ovan, har vi slutligen följande uttryck för stjärnans banradie respektive hastighet:

$$a_{\star} = \frac{m}{M}a$$

$$v_{\star} = m\sqrt{\frac{G}{Ma}}$$

Vi ser att den astrometriska signalen – som bygger på hur mycket stjärnan flyttar på sig under rörelsen, alltså $a_{\star}$ – är direkt proportionell mot avståndet a mellan stjärna och planet. Planeter med stora banradier är i princip alltså lättare att detektera med astrometri, men bara så länge observationstiden är av samma storleksordning eller längre än banperioden. För radialhastigheten, som är banhastigheten projicerad på synriktningen mellan observatör och stjärna, så gäller det motsatta: radialhastigheten är här omvänt proportionell mot kvadratroten ur avståndet a , så planeter nära stjärnan är lättare att detektera. För båda metoderna gäller att signalen är proportionell mot planetens massa, så tyngre planeter är lättare att hitta. Samtidigt är signalen starkare för lättare stjärnor, där effekten är större för positionen (omvänt proportionell mot massan) än för hastigheten (omvänt proportionell mot kvadratroten ur massan).

För att ta vårt eget solsystem som exempel så är förflyttningen av solen orsakad av jorden endast 0,06 % av solens diameter, medan Jupiter orsakar en förflyttning på över en hel soldiameter. Förutom att Jupiter är 5 gånger längre bort från solen jämfört med jorden så är den också 300 gånger tyngre, vilket förklarar skillnaden. Skillnaden i radialhastighet är inte lika dramatisk: Jorden påverkar solen med 9 cm/s medan Jupiters påverkan är 12 m/s.



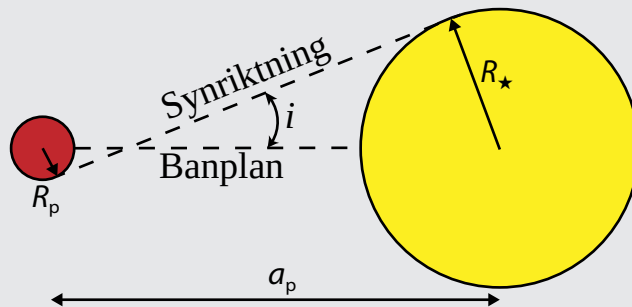
Figur 4: Om en planet passerar framför en stjärna skymmer en del av stjärnljuset.

Passagemetoden. Upptäckten av de första passageplaneterna innebar en revolution i sökandet efter exoplaneter. En passageplanet är en planet som i sin bana går emellan stjärnan och observatören, och på så sätt skymmer en del av stjärnans ljus (figur 4). Genom att mäta hur stor andel av ljuset som skymms kan man räkna ut hur stor planeten är jämfört med stjärnan.

För att en planet ska hamna mellan stjärnan och observatören krävs att planetbanans lutning är precis rätt, vilket – om man antar en slumpmässig synlinje – ger en sannolikhet som minskar med banans storlek (figur 5 i sidorutan nedan). Som ett exempel skulle en observatör av solsystemet från en slumpmässig riktning ha 0,5 % chans att se jorden passera framför solen – förutsatt att solen observerades kontinuerligt under ett helt år, så att jorden skulle hinna hela varvet runt.

För att framgångsrikt upptäcka exoplaneter med passage-metoden måste man alltså studera många stjärnor kontinuerligt under lång tid. Detta är svårt att göra från marken, eftersom jordens rotation gör att olika delar av stjärnhimlen är synlig vid olika tidpunkter. Atmosfär och väder gör dessutom mätningarna utmanande. Det stora genombrottet för passagemätningar kom därför genom mätningar med rymdteleskop, där särskilt *Keplerteleskopet* bidragit med majoriteten av hittills upptäckta planeter.

Passageplaneter



Figur 5: Sannolikheten för att en planet ska passera framför stjärnan sett från en observatör beror på stjärnans storlek och planetens avstånd från stjärnan.

För att en exoplanet ska ses passera framför sin stjärna måste planetbanans orientering vara tillräckligt upplinjerad med synriktningen, samtidigt som planeten är rätt positionerad i sin bana. Genom att studera stjärnan över en längre tid än en period undviker man den senare svårigheten, men om man antar att planetbanans orientering är oberoende av observatörens synriktning, så är det ganska osannolikt att banan löper just mellan stjärna och observatör. Hur osannolikt beror på stjärnans storlek och på planetens avstånd från stjärnan, se figur 5. För att planeten ska kunna ses passera stjärnan får

vinkeln mellan banplanet och observatörens synriktning mot stjärnan inte vara större än

$$i = \frac{R_{\star} + R_p}{a_p}$$

där $R_{\star}$ är stjärnans radie, R_p planetens radie och a_p avståndet mellan planet och stjärna. Sannolikhet för passage är den rymdvinkel för vilken riktning- en mot observatören är mindre än i från banplanet, dividerad med rymd- vinkeln för alla möjliga synriktningar. För små vinklar (som det ju här är fråga om) kan man visa att sannolikheten för passage blir $p \approx i$ (där vinkeln mäts i radianer). För en observatör av solsystemet från en slumpmässig rikt- ning innebär detta att jorden skulle passera solen med 0,5 % sannolikhet, och Jupiter endast med 0,1 %, förutsatt att man hade tålamod nog att ob- servera solsystemet kontinuerligt längre än ett Jupiter-år, dvs. 12 jordår. Det är något större sannolikheter att se passager för exoplaneter i den beboeliga zonen runt röda dvärgstjärnor, eftersom dessa planeter rör sig betydligt när- mare stjärnan. Exempelvis rör sig den jordstora TRAPPIST-1e på avståndet 4,4 miljoner km från stjärnan som har en radie på 84 000 km, vilket ger en passagesannolikhet på 2 %. Då omloppstiden för TRAPPIST-1e är så kort som 6,1 dygn behöver man dessutom inte vänta länge.

Förutom passagesannolikheten och perioden, så är *förmörkelsegraden* hos en passageplanet viktig för att avgöra hur lätt den är att detektera. För- mörkelsegraden A är andelen av en stjärna som förmörkas av en planet vid passage:

$$A = \left(\frac{R_p}{R_{\star}} \right)^2$$

För jorden och Jupiter är andelen 0,000 084 respektive 0,01, vilket illustrerar hur mycket lättare det är att detektera större planeter. För TRAPPIST-1e är andelen 0,005. Att andelen är så hög trots att det rör sig om en jordstor planet beror på att stjärnan i detta fall är så mycket mindre än solen. Till- sammans med faktumet att omloppstiden är 60 gånger kortare än jordens runt solen och att passagesannolikheten är 4 gånger större, visar detta varför det är så mycket lättare att hitta passageplaneter i den beboeliga zonen runt röda dvärgstjärnor än runt sollika stjärnor.

Astrometrimetoden. Precis som radialhastighetsmetoden utnyttjar astrometrimetoden faktumet att en planet påverkar stjärnans position, men i stället för att mäta hastigheten längs synlinjen så mäts stjärnans position med hög noggrannhet genom *astrometri*. Än så länge har denna metod inte upptäckt några planeter, men det är något som kommer ändras inom några år när det astrometriska rymdteleskopet *Gaia* rapporterar sina resultat. Det uppskattas att så många som 20 000 exoplaneter kan komma att upptäckas av *Gaia*, där de flesta kommer att ha en massa som Jupiter eller tyngre, och ha en omloppstid på åtminstone ett år. *Gaia* kommer alltså inte upptäcka jordlika planeter, men den kommer ändå få ett stort genomslag för exoplanetforskningen genom att utforska en typ av planeter som det hittills varit mycket svårt att hitta. Till skillnad från radialhastighetsmetoden och passagemetoden så är nämligen astrometrimetoden *mer* känslig för planeter som rör sig i vidare banor runt sin stjärna. Det beror på att stjärnans rörelse visserligen blir långsammare med större avstånd till planeten, men dess positionsändring blir å andra sidan större (se sidorutan på sid 139).

En annan viktig skillnad mot de två andra indirekta metoderna är att givet en exoplanet så ökar den astrometriska signalen ju närmare stjärnan är från oss. Det betyder att det i princip är enklast att hitta de minsta planeterna runt solens grannar. Rymdteleskopet *Gaia* är dock inte primärt byggt för att hitta exoplaneter; dess uppgift är att mer generellt fastställa över 1 miljard stjärnors positioner väldigt noggrant. Det gör paradoxalt nog de närmaste stjärnorna *svårare* att mäta, eftersom de är så ljusa att *Gaia* till stor del bländas.

Varför är det så svårt att hitta jorðar?

Även med allt mer förfinade sökmetoder är det fortfarande mycket svårt att upptäcka planeter som är så små som jorden, särskilt i jordlika omloppsbanor runt en sollik stjärna. Jordens relativt långa omloppsbana, lilla storlek och låga massa gör den svår att upptäcka med passagemetoden och radialhastighetsmetoden. I passagē förmörkar jorden solens ljus med 84 miljondelar, vilket är nära gränsen för vad Keplerteleskopet klarar av. En komplikation är att många stjärnor visat sig variera i ljusstyrka på den här nivån, så det är inte för alla stjärnor man kan uppnå tillräckligt hög mätnoggrannhet för att upptäcka jordstora planeter. Ett liknande problem

finns för radialhastighetsmätningarna: en stjärnas yta rör sig oregelbundet och bidrar till ett hastighetsbrus som ofta överröstar en typisk rekylrörelse på i storleksordningen 10 cm/s från en jord. De bästa spektrograferna som används till radialhastighetsmätningar just nu begränsas dessutom av att deras hastighetskalibrering kan variera med upp till 50 cm/s mellan olika år, så än så länge kan vi ändå inte hitta jordar med radialhastighetsmetoden.

Inte heller dagens astrometriska observationer hjälper oss här. Solens närmaste granne är trippelstjärnsystemet Alfa Centauri som ligger 4 ljusår bort. Systemet består av två sollika stjärnor nära varandra och en röd dvärg längre bort. En jordlik planet skulle förflytta en av de sollika stjärnorna med 3 mikrobågsekunder sett ifrån oss, vilket endast är en tvåtusendel av stjärnans diameter. Inte ens med sin bästa precision på 7 mikrobågsekunder hade Gaia kunnat upptäcka en jord i Alfa Centauri.

Att upptäcka nya jordar är alltså svårt, men det finns planer på att förbättra instrumenten och teknikerna för att göra det möjligt inom några år. En ny ultrastabil spektrograf, ESPRESSO, har precis tagits i bruk vid det Europeiska sydobservatoriet i Chile, och den ska klara att detektera radialhastighetsamplituder på ner till 10 cm/s, vilket närmar sig gränsen för att kunna upptäcka jordar runt stabila stjärnor. Förhoppningen är att kunna förbättra stabiliteten ytterligare till 2 cm/s med ett framtida instrument, HIRES, tänkt att installeras på Europas nya jätteteleskop ELT, som är under konstruktion i Chile. Målet för ELT är att tas i bruk 2024, men HIRES kan komma att dröja ytterligare något decennium. Den största utmaningen blir kanske det inneboende rörelsebruset som kommer från stjärnatmosfärens egen rörelse, men även där pågår både empiriska och teoretiska studier om hur dess påverkan ska minimeras. Än är det inte avgjort, och det är fortfarande möjligt att en jordlik planet förblir utom räckhåll för upptäckt med radialhastighetsmetoden.

Instrument och metoder förfinas även för passagemätningar, som för tillfället verkar vara den mest lovande metoden för att först hitta en riktig jordtvilling, dvs. en planet av samma storlek och massa, och med samma avstånd från en solliknande stjärna som vår egen jord. I april 2018 sköt NASA upp TESS, det senaste rymdteleskopet avsett för passagestudier över hela himlen, och tidigt 2019 kommer ESA att skicka upp CHEOPS som ska karakterisera exoplaneter genom att detaljstudera individuella passa-

ger. Ingendera av dessa rymdteleskop kommer dock ha kapaciteten att upptäcka jordtvillingar. För det måste vi troligen vänta på nästa stora rymdteleskop tillägnat passager: ESA:s PLATO med planerad uppskjutning 2026. PLATO använder sig av 26 stycken småteleskop (vardera med 12 cm öppning) som samarbetar för att samtidigt kunna se en stor del av himlen med hög känslighet. Precis som Kepler kommer PLATO stirra på samma stjärnor under flera år, men det större synfältet gör att stjärnorna i snitt kommer vara ljusstarkare, vilket ger större möjligheter att karakterisera potentiella exoplaneter. Tidiga uppskattningar är att PLATO kommer detektera ett dussintal jordtvillingar och tusentals planeter som är ganska lika jorden, men uppemot 10 gånger tyngre och något närmare sin stjärna.

Det finns en tredje möjlighet att upptäcka en jordtvilling först, och det är genom den astrometriska metoden. Att mäta en stjärnas absoluta position på himlen noggrant är svårt, men för att hitta en exoplanet med den astrometriska metoden behöver man egentligen bara mäta den *relativa* positionsändringen noggrant. Mätningarna blir känsligast för närbelägna stjärnor, vilket gör solens närmaste grannstjärnsystem Alfa Centauri särskilt lämpligt att studera. Förutom att vara nära består Alfa Centauri av två sollika stjärnor som kan utgöra astrometrisk referens för varandra. Det räcker i sådana fall att noggrant mäta hur stjärnorna rör sig i förhållande till varandra. I en studie som leds av Markus Janson vid Stockholms universitet undersöker vi möjligheten att konstruera en mikrosatellit för att kontinuerligt observera Alfa Centauri under två år. Målet för STARE, som förslaget kallas, är att uppnå en mät noggrannhet på 1 mikrobågsekund, vilket skulle räcka för att upptäcka en jordstor planet i en jordlik bana runt endera stjärnan. Noggrannheten uppnås genom att med extremt stabil och självkalibrerande optik mäta stjärnornas relativa positioner 50 gånger per sekund under två år. STARE genomgår för närvarande en förstudie och är än så länge bara ett förslag, men skulle i princip kunna genomföras inom 3 år om rätt finansiering dyker upp. Runt om i världen pågår det studier av liknande förslag av varierande ambitionsnivå, så det är inte omöjligt att den astrometriska metoden blir först med att hitta en jordtvilling, särskilt om det skulle finnas en sådan runt en av de sollika stjärnorna i Alfa Centauri (vilket förstås inte är givet).

Beboeliga jordar runt röda dvärgar

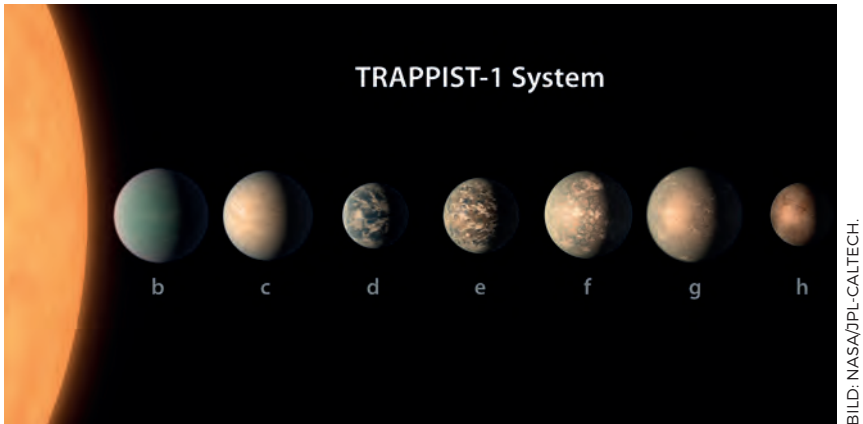
Men varför är vi egentligen intresserade av att hitta just jordtvillingar? Särskilt två skäl brukar anges: 1) Studiet av jordtvillingar hjälper oss att förstå vår plats i universum – hur vanligt det är med planeter som liknar vår egen. 2) Jorden är den enda planet där vi vet att det finns liv, och om vi vill hitta liv på andra platser är det rimligt att börja där förutsättningarna är så lika som möjligt.

Tyvärr är det som vi just sett mycket svårt att detektera just jordtvillingar. Men kanske kan vi söka lite bredare, och i stället inrikta oss på att hitta potentiellt livsdugliga planeter. Vad krävs egentligen för att det ska kunna finnas liv på en planet?

Allt liv på jorden är ju på något sätt beroende av flytande vatten, så det är naturligt att leta efter planeter där flytande vatten skulle kunna finnas på ytan. Detta definierar vad som brukar kallas för den *beboeliga zonen* runt en stjärna. Om en planet är för nära stjärnan så förångas vattnet, och är den för långt bort så fryser vattnet till is. I solsystemet sträcker sig denna beboeliga zon från något utanför Venus bana till något innanför Mars bana, med jorden ungefär i mitten. Flytande vatten kan visserligen finnas *under* ytan på många kroppar längre ut i solsystemet, men sådana platser kan vara knepiga att studera över astronomiska avstånd, särskilt om man är intresserad av potentiellt liv. Flytande vatten på en planets yta förutsätter förutom att det finns just en fast yta också att det finns en atmosfär, eftersom vatten utan tryck bara kan finnas som is eller ånga.

Vad som utgör den beboeliga zonen runt en stjärna beror på hur ljusstark stjärnan är, vilket i sin tur beror på dess massa. För sollika stjärnor skalar den utstrålade effekten – stjärnans *luminositet* L – med stjärnans massa M enligt den approximativa relationen $L \sim M^4$. Då den mottagna energin P för en planet beror på avståndet a till stjärnan som $P \sim a^{-2}$ betyder det att radien på den beboeliga zonen runt en given stjärna beror kvadratisk på stjärnans massa. Till exempel: För att en planet runt en stjärna med en massa hälften så stor som solens ska ta emot lika mycket energi som jorden gör från solen, måste planetens banradie vara en fjärdedel av jordens. Förhållandet blir än mer extremt ju mindre stjärnan är: den ultra-svala röda dvärgstjärnan TRAPPIST-1 är så ljussvag att den beboeliga zonen är 30 gånger mindre än för solen.

Just röda dvärgstjärnor är särskilt intressanta i detta samman-



Figur 6: Relativa storlekar hos planeterna i TRAPPIST-1-systemet, 40 ljusår bort i Vattumannens stjärnbild.

hang. Skälet är att det är betydligt enklare att upptäcka planeter i deras beboeliga zon än för sollika stjärnors, och det gäller både passagemetoden och radialhastighetsmetoden. Den mindre storleken hos stjärnan gör att en större andel av ljuset skymms när en planet passerar framför den. Samtidigt gör den mindre banan att tiden mellan passagera blir kortare, så att man under en given tidsrymd kan observera fler passager. Den lägre stjärnmassan och den mindre planetbanan gör dessutom att den variation i radialhastighet som planeten orsakar hos stjärnan blir större.

Det har därför startats flera initiativ för att leta efter jordlika planeter kring röda dvärgar, och några av dem har redan burit frukt. Mest känd är kanske TRAPPIST-1-systemet med sju jordstora planeter som regelbundet passerar framför en liten röd dvärgstjärna (figur 6). Om stjärnan hade haft en något lägre massa hade den varit en brun dvärg i stället. Planeternas banor är så nära stjärnan att den innersta planeten går ett varv på bara 1,5 dygn, medan den yttersta tar nära 19 dygn på sig. Planetsystemet upptäcktes med passagemetoden. Tre av planeterna befinner sig inom den beboeliga zonen, där temperaturerna möjliggör flytande vatten på planeternas ytor, om det finns en tillräckligt tjock atmosfär.

Med hjälp av radialhastighetsmetoden har man också upptäckt en jordtung planet i den beboeliga zonen kring solens absolut närmaste grannstjärna, den röda dvärgen Proxima Centauri. Man behöver inte vara statistiker för att inse att om till och med den närmaste grannstjärnan har en jordlik planet i den beboeliga

zonen, ja, då är det förmodligen väldigt vanligt med sådana planeter i galaxen. Än så länge finns det bara ett dussintal bekräftade jordstora exoplaneter i den beboeliga zonen runt röda dvärgar, men antalet kommer förmodligen snabbt att öka framöver.

Även med planeter som formellt uppfyller beboelighetskriteriet, är det förstas högst osäkert om planeterna verkligen är dugliga för liv som vi känner det. Även om förutsättningarna är de rätta för flytande vatten på planetens yta, är det inte säkert att det verkligen finns vatten där. Det finns också andra faktorer som kan påverka, och särskilt röda dvärgstjärnor har ofta egenskaper som kan vara negativa för liv. I förhållande till sin ljusstyrka strålar röda dvärgar ibland flera hundra gånger starkare än solen i ultraviolett och röntgen, vilket bryter sönder organiska molekyler om de inte skyddas av en ogenomtränglig atmosfär eller ocean. Beboeliga planeters närhet till sin stjärna innebär också att de utsätts för tidvattenkrafter, vilket gör att planetens rotation snabbt synkroniseras med sin omloppsbana, och därmed alltid visar samma sida mot stjärnan. Detta är ett välkänt fenomen för vårt eget solsystems större månar, där nästan alla har bunden rotation – så även vår egen måne, som ju ständigt visar samma sida mot jorden. Resultatet blir att ena sidan av planeten får ständig dag med stark upphettning, medan nattsidan kan bli så kall att en eventuell atmosfär fryser till is.

Den långsamma rotationen kan också innebära att planeten saknar ett magnetfält. Jordens magnetfält genereras just av en dynamo som får sin energi från jordens rotation. Ur beboelighetsperspektiv kan magnetfältet vara avgörande: det fungerar som en sköld som skyddar planeten från laddade partiklar. Förutom att vara direkt skadliga för liv så eroderar dessa partiklar atmosfären, vilket gör att en planet kan förlora sin atmosfär över en geologisk tidsrymd (hundratals miljoner år). På Mars har man hittat belägg för att just detta skett: en från början tjock atmosfär har av solvinden reducerats till den tunna atmosfär vi ser idag.

Även utvecklingsmässigt finns det potentiella problem med röda dvärgar. Grovt sett kan man dela in en stjärnas liv i tre stadier: före, under och efter det att stjärnans huvudbränsle är vätgas som omvandlas till helium. Det mellersta stadiet kallas stjärnans medelålder, eller att den befinner sig på "huvudserien", och är en stabil fas vars längd beror på stjärnans massa. För sollika stjärnor varar den tiotalet miljarder år medan mindre massiva stjärnor har en livstid på huvudserien upp till hundratals miljarder år, dvs. av-

sevärt längre än universums nuvarande ålder. Den långa tiden på huvudserien kan vara en fördel om uppkomsten av liv och dess utveckling är en osannolik eller långsam process. Men problemet är att den inledande fasen, den som föregår huvudserien, är betydligt längre än den tid det tar för planeter att bildas.

Under förstadiet till huvudserien pressas stjärnan fortfarande ihop av gravitation och krymper långsamt. Då den totala utstrålade effekten från stjärnan minskar med tiden, ändras också förutsättningarna för den färdigbildade planeten: den beboeliga zonen förflyttar sig inåt. Det betyder att en planet som vid stjärnans huvudseriefas befinner sig i den beboeliga zonen, befann sig långt innanför den i ett tidigare stadium, med temperaturer höga nog att förånga vatten. Tveksamheten gäller alltså om en planet som bildas under sådana förhållanden kan behålla sitt vatten. Med andra ord kanske det är så att det visserligen finns planeter i den beboeliga zonen runt röda dvärgar, men att de mestadels är torrlagda. Som ofta behövs det mer ingående forskning för att undersöka möjligheterna närmare – särskilt mer robusta och detaljerade modeller för hur det går till när planeter bildas.

Beboeliga jordar runt sollika stjärnor – sen då?

Även om det framöver kommer vara mycket fokus på jordar i den beboeliga zonen runt röda dvärgstjärnor, är målet fortfarande att hitta jordar runt sollika stjärnor. Om det finns jordar i de beboeliga zonerna runt solens närmaste grannar så kanske vi redan inom 5–10 år får det första tecknet genom astrometrimetoden. Annars kommer rymdteleskopet PLATO förmodligen bli först med att upptäcka sådana planeter, genom tålmodigt sökande efter deras passager. Med hjälp av en ny generation av radialhastighetsinstrument kommer planeternas massor, och därmed medeldensiteter, kunna bestämmas. Informationen kommer användas till att bättre förstå hur jordlika planeter bildas och hur vanligt det är med potentiellt livsbärande miljöer. Men sen, då?

Nästa utmaning blir att karakterisera planetens yta och atmosfär. Bara för de allra närmaste stjärnorna (som Alfa Centauri) finns hopp om att kunna göra det från marken med nästa generations extremt stora teleskop – för mer avlägsna stjärnor krävs det nya rymdteleskop. Än så länge finns det bara förstudier gjorda för dessa framtida rymdteleskop. En idé är en infraröd rymdinterferometer, där flera relativt små (diameter på 1–2 m) separata teleskop

samverkar för att tillsammans uppnå samma upplösning som hos ett betydligt större teleskop, ett med en diameter som avståndet mellan småteleskopen. Avståndet mellan teleskopen kan varieras från några meter till några kilometer, beroende på vilken upplösning som önskas. Utmaningen med konceptet är kanske främst att koreografera den noggranna positioneringen mellan teleskopen med nanometerprecision.

Ett annat förslag är att konstruera ett stort rymdteleskop med spegeldiameter någonstans mellan 8 och 18 m och sensorer som täcker in ljus från ultraviolett till infrarött. Detta kombineras med en friflygande stjärnskuggare som, korrekt placerad, kan täcka för ljuset från en stjärna medan ljuset från en närliggande planet obehindrat når teleskopet. Idén är enkel, men svårigheten är att faktiskt bygga och skjuta upp ett så stort teleskop med tillräcklig precision och utan att det tar skada. Som jämförelse är Hubble-teleskopets spegel 2,5 m i diameter, liten nog att få plats i den nu pensionerade rymdskytteln.

Båda förslagen har samma syfte: att registrera det svaga ljuset från en jordlik planet i den beboeliga zonen runt en sollik stjärna. Med hjälp av en spektrograf kan ljuset då analyseras, och från planetens spektrum kan slutsatser dras om både dess atmosfär och dess yta. Molekyler i atmosfären ger sina unika avtryck i spektrumet, vilket gör att man kan få reda på atmosfärens sammansättning. Denna ger i sin tur indikationer på förutsättningarna för liv på planeten, eller om det rentav finns liv där. Vi vet att jordens atmosfär är starkt påverkad av livet: utan fotosyntesen skulle till exempel luftens fria syre bindas upp i jordskorpan och försvinna från atmosfären på 10 000 år – en geologiskt väldigt kort tid. Kanske finns liknande mekanismer hos utomjordiskt liv som kan påverka atmosfärers kemiska balans. Det skulle i så fall öppna för möjligheten att på distans undersöka förekomsten av liv i universum.

Så jakten på nya jordar har bara börjat. Redan idag känner vi som sagt till flera exempel på jordlika planeter i den beboeliga zonen runt röda dvärgstjärnor. Genom förfinade instrument och tekniker väntar vi oss att under 2020-talet upptäcka de första verkliga jordtvillingarna – jordliknande planeter i den beboeliga zonen runt sollika stjärnor. Mer detaljerad karakterisering av förhållandena på planeterna – i fråga om yta och atmosfär – får nog vänta tills tidigast 2030-talet, och det förutsätter förstås att nuvarande

idéer om ambitiösa rymdteleskop faktiskt blir verklighet. Tanken svindlar inför möjligheten att kunna detektera liv över astronomiska avstånd. Kanske kan vi redan inom 20 år få svaret på frågan hur vanligt liv är i universum. ❖

För vidare läsning

- R. Jayawardhana, *Strange New Worlds: The Search for Alien Planets and Life beyond Our Solar System*, Princeton University Press, 2013 (ISBN-10: 069115807X). Om hur sökandet efter exoplaneter började, med biografiska inslag om de inblandade.
- M. Perryman, *The Exoplanet Handbook*, 2nd edition, Cambridge University Press, 2018 (ISBN-10: 1108419771). Ger gedigen bakgrund till de metoder som används för att söka efter exoplaneter.