

# Exoplaneter – det næste skridt: Hvordan ser atmosfærerne ud?

Af Uffe Gråe Jørgensen, Niels Bohr Institutet, Lars A. Buchhave, Niels Bohr Institutet og Tais W. Dahl, Statens Naturhistoriske Museum

Indenfor de næste få år vil menneskeheden få svar på et af årtusinders store spørgsmål: Bor der nogen på de nærmeste jordlignende exoplaneter? – vejen til at forstå hvem eller hvad der findes derude går gennem avancerede observationer af exoplanet-atmosfærer og nøjagtige numeriske modeller af, hvordan de observerede spektre skal forstås, men svaret er vidtrækkende: Enten bor der nogen eller også gør der det ikke!

## Det vrimler med planeter

Mere end 50 års ihærdigt pionerarbejde har løftet vores viden om exoplaneter fra fantasi til virkelighed. Fra spekulationer om hvorvidt de overhovedet findes, til viden om at der er flere planeter i Mælkevejen end der er stjerner. Et kvalificeret gæt kunne i dag være at der er omkring 500 milliarder planeter indenfor de nærmeste 50.000 lysår. Ti milliarder af dem er både af nogenlunde samme størrelse som Jorden og modtager nogenlunde den samme mængde varme fra deres stjerne som vi får fra Solen – det er dem vi kalder jordlignende exoplaneter i den beboelige zone.

En håndfuld af de jordlignende planeter vi har målt på, ser så besnærende jordlignende ud at man kunne fristes til at ønske sig at flytte derud. Men i realiteten kender vi endnu intet andet end massen og størrelsen af de mange exoplaneter der er opdaget. For nogle tusinde exoplaneter kender man deres baner. For de fleste af dem kender vi også deres størrelse (ud fra formørkelsesmetoden der viser, hvor meget stjernelys de skygger for under deres kredsløb). For nogle hundrede exoplaneter kender vi deres masse (fra radialhastighedsmetoden der viser hvor meget de hiver i den stjerne de kredser om). I nær fremtid vil vi få oplysninger om massen af nogle tusinde exoplaneter mere (fra astrometrimetoden der viser hvor meget stjernen trækkes fra side til side på himlen under planetens kredsløb).

Det er stort set alt vi ved, og egentlig ville vi jo gerne vide om vi er “alene i Universet”, om de jordlignende exoplaneter virkelig ligner Jorden, om vores eget solsystem, er specielt eller ligner alle de andre planetsystemer i Mælkevejen, om exoplaneterne er dannet under samme forhold som vores eget solsystem, om der skete noget specielt i vores eget solsystem som var årsagen til at vi er her, og hvad det i så fald var. Hvordan kommer vi videre i den retning ud fra det vi ved i dag?

## Søgen efter tegn på liv

Det næste realistiske skridt er at optage spektre af de nærmeste, største og varmeste exoplaneter. Når vi har øvet os på det og er blevet sikre på, at vi gør det rigtigt, vil vi også gerne kunne optage spektre af de nærmeste jordlignende planeter i deres habitable zone. Det afstandsinterval fra en stjerne hvor der ikke er for varmt ved en planets overflade til at eventuelt vand vil dampe af (som på Venus) og ikke så koldt at vand vil fryse til is (som på Mars) kaldes den *habitable*, eller beboelige, zone. Her er i alle fald én vigtig betingelse for at vi kunne bo der opfyldt, nemlig at vand i princippet kan

eksistere på flydende form – hvis der er vand. Det er naturligvis langt fra tilstrækkeligt til at sige om planeten er beboelig, og selvfølgelig slet ikke nok til at afgøre om den er beboet. Men når vi engang kan tage spektre af jordlignende exoplaneter i den beboelige zone, vil vi kunne sige om der bor nogle. Det er fuldt realistisk at forestille sig, at man når dertil i løbet af mindre end ti år, og så vil vi for første gang nogen sinde kunne sige, om der er levende organismer på planeter omkring andre stjerner. For første gang i menneskehedens historie vil spørgsmålet om, hvorvidt vi er alene i Universet overskride grænsen fra spekulation til videnskab.

Det er allerede nogle år siden, at de første exoplanetspektre blev optaget med Hubble Rumteleskopet. Set i bakspejlet må man nok indrømme, at de første spektre kun viste at der sandsynligvis *var* et spektrum. Siden da har teknikken været gennem en rivende udvikling. I dag kan vi se klare signaler af både vanddamp, skyer, og forskellige atomare linjer i spektret af exoplaneter optaget med rumteleskoperne Hubble og Spitzer, og vi kan også måle hvor stor temperaturforskelle, der er på planeternes dag- og natside.

## Modeller af planetatmosfærer

For at kunne sige mere end blot at visse stoffer eksisterer i planeternes atmosfære, må vi udvikle veltestede numeriske modeller, ligesom man gør det for at kunne sige noget om Jordens klima og om stjernernes struktur og udvikling. Kun med en robust og selv-konsistent modellering af planeternes atmosfærer vil vi ud fra spektrene være i stand til at sige, fx hvor meget vand og ilt der er i atmosfæren, om det er ved overfladen af planeten eller i toppen af atmosfæren, hvordan temperaturen ændrer sig igennem atmosfæren, hvordan klimaet ændrer sig fra sommer til vinter, osv. Forskellige forskningsgrupper afprøver i dag forskellige metoder. Én vej ville være at tage fungerende modeller for Jupiters atmosfære og modificere modellerne til de giver et spektrum, der ligner nogle af exoplanetspektrene. Modellerne har kun været delvis succesfulde til at forklare, hvordan Jupiter selv er opbygget, så de vil kræve nogle modifikationer. Det vil uden tvivl føje ny viden til forståelsen af planeterne i vores eget solsystem at kunne udfordre modellerne, ved at konfrontere dem med observerede spektre af mange forskellige Jupiterlignende exoplaneter under en myriade af forskellige fysiske og kemiske forhold.

En anden vej vil være at tage udgangspunkt i Jordens klimamodeller. De eksisterende modeller (både dem til

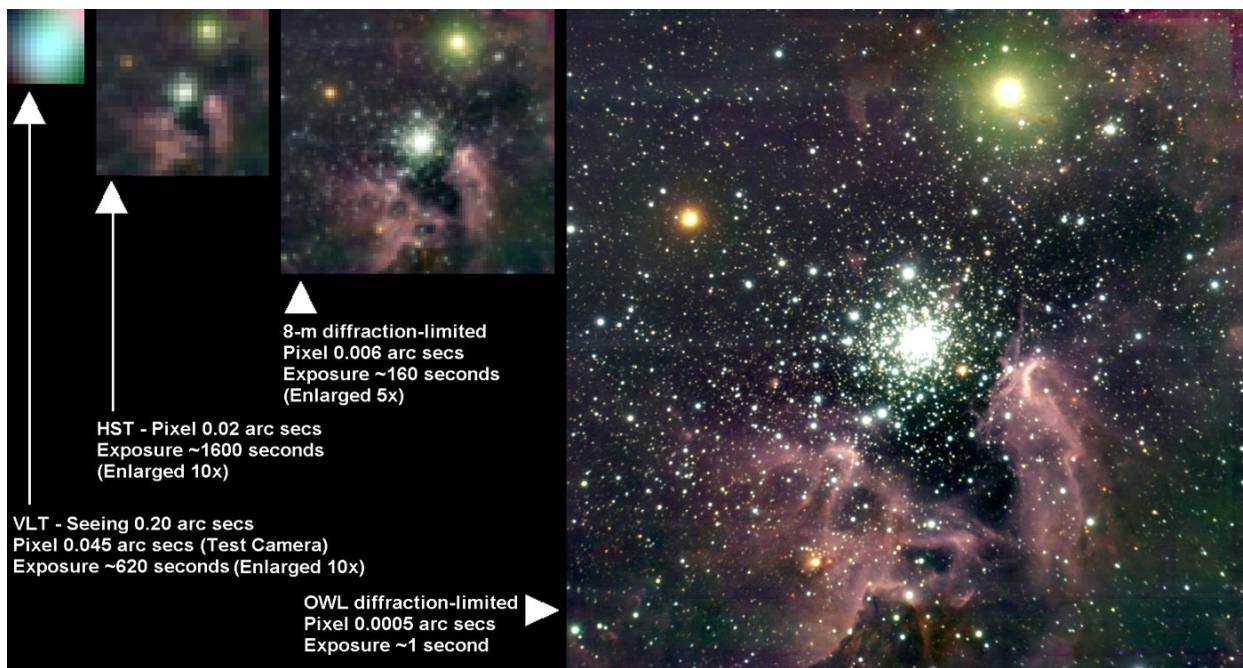
forudsigelse af vejret på kort sigt og klimaet på lang sigt) er begrænset til at beregne strukturen for en atmosfære, der ligner Jordens nuværende atmosfære ganske meget. De har den fordel, at de beskriver Jordens dynamiske vejrsystemer vældig godt, men de skal modificeres voldsomt på mange punkter for at kunne anvendes på jordlignende exoplaneter i den habitable zone, selv for planeter der kun afviger blot en lille smule fra Jorden selv. Som en variant af den metode kunne man bygge en numerisk kode op efter de samme principper som klimamodellerne, men undlade de forudsætninger der knytter dem specifikt til den nuværende Jord. Det ville samtidig have den fordel, at det formentlig ville give os værdifuld ny viden om betydningen af de antagelser der normalt gøres i forudsigelsen af Jordens fremtidige klima, og dermed som en sidegevinst måske bidrage til bedre klimamodeller.

Endelig kunne man tage udgangspunkt i eksisterende stjerneatmosfæremodeller og modificere dem til de koldere temperaturer, der oftest findes i planetatmosfærer. Det har den fordel at modellerne er vel testede for mange forskellige parametervalg. De koldeste

stjerner er næsten identiske med varme Jupiterlignende exoplaneter, men når man går til lidt koldere exoplaneter, mangler stjernemodellerne de mange dynamiske effekter som spiller en rolle for planeterne i vores eget solsystem, inklusive Jorden. Vores gruppe på Niels Bohr Institutet og Statens Naturhistoriske Museum eksperimenterer med flere af ovenstående metoder og forskellige hybrider af dem, og deltager i nogle af de mest omfattende observationelle projekter til optagelse af den næste generation af exoplanetspektre.

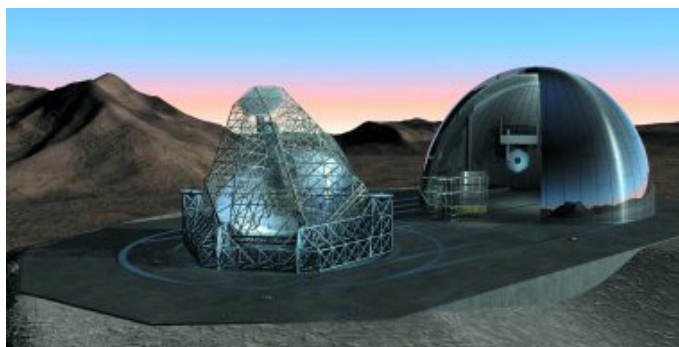
### Fjerne planeter og kæmpekikkerter

Planeterne er små fnug i forhold til stjerner, og de lyser kun ved at reflektere det stjerne- (eller sol-) lys der rammer dem. Jorden skinner ca. 10 milliarder gange svagere end Solen. Hvis vi stod på en exoplanet 10 lysår ude i rummet og kiggede ned på solsystemet, ville alle planeternes lys drukne i det meget stærkere lys fra Solen. Set gennem Jordens atmosfære "blikker" stjernerne lidt, fordi deres lys hele tiden flytter sig pga lufturoen, og planeterne ville forsvinde totalt i denne blinken.



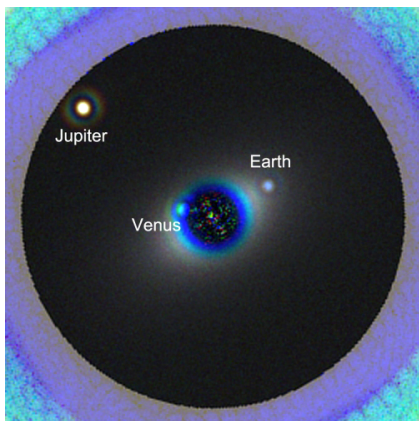
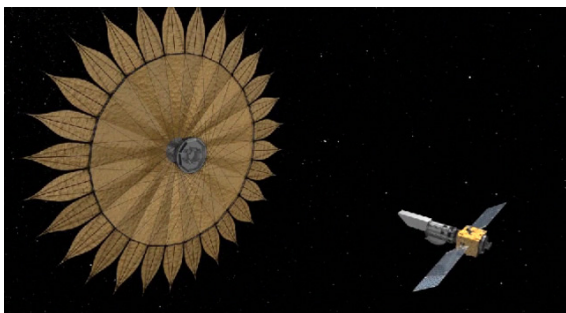
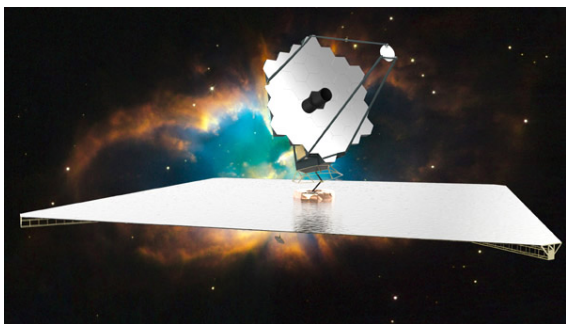
$$\Theta = \frac{\lambda}{D} \cdot 2,5 \cdot 10^5 \text{ buesekunder}$$

- $\Theta$  = opløsningen i buesekunder
- $\lambda$  = bølgelængden af lyset (i m)
- $D$  = diameteren af teleskopets spejl (i m)



**Figur 1.** Diffractionsgrænsen,  $\Theta$ , er den teoretisk set bedste opløsning man kan få i et billede taget gennem en kikkert med en given størrelse spejl,  $D$ , ved bølgelængden  $\lambda$ . Hvis spejlets diameter fx var 100 m (en kikkert kaldet "OWL", som ESO drømte om at bygge for nogle år siden men senere opgav) ville man kunne skelne to stjerner kun 0,0025 buesekunder fra hinanden. Det svarer til afstanden mellem Jorden og Solen set på en afstand af 60 lysår. Med et 40 m-spejl kan man i stedet skelne objekter, der er så langt fra hinanden som Jorden og Solen ud til 25 lysårs afstand, og med et 20 m-spejl ud til 10 lysårs afstand. Ved at lave kunstige stjerneformørkelser eller andre forbedringer inden i kikkerten, kan man forbedre observationerne. Nederst t.h.: "Overwhelmingly Large Telescope" (OWL). Grafik: ESO.

Men selv hvis der ingen atmosfære var, ville stjernens lys ikke være en uendelig lille prik, og prikkens størrelse ville afhænge af den kikkert man observerede med. Lyset fra stjernen ville fordele sig over detektoren som en normalfordeling med en halvværdibredde, der er omvendt proportional med diameteren af spejlet i den kikkert vi ser igennem (se figur 1). Det er stjernens diffraktionsgrænse vi ser – et velkendt fænomen fra optikken der afspejler lysets bølgenatur. Jo større kikkert, jo mindre og skarpere prikker. Derfor kan vi få skarpere billeder alene ved at bruge en større kikkert. For at få lyset fra en solliggende stjerne på 10 lysårs afstand til at tegne sig som en så skarp prik, at man vil kunne se en 10 milliarder gange svagere prik, der hvor en jordlignende exoplanet i en jordlignende bane burde være, skal kikkertens spejl være omtrent 40 meter i diameter eller større. Det er derfor verdens største kikkert, *European Extremely Large Telescope (E-ELT)*, som vil stå færdig i Chile i 2024, er projekteret til at have et spejl på næsten 40 meter.



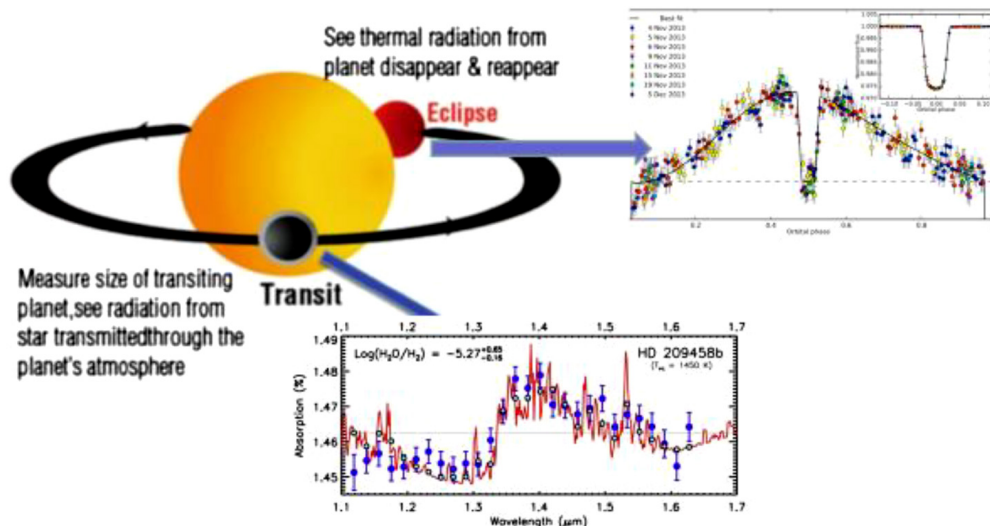
**Figur 2.** Øverste to figurer: Et af de mange rumprojekter som måske kommer til at se dagens lys inden for en årrække er LUVOIR (Large UV, Optical and InfraRed survey), her i to versioner. Det er en rumkikkert med et spejl på mellem 8 og 16 meter, med en kunstig formørkelsesmekanisme inden i kikkerten (en koronagraf) og udenfor kikkerten (en fritflyvende “stjerne-skygger” eller “kunstig måne”). Nederst: Simulering af observation af vores solsystem set fra 45 lysårs afstand. Grafik: NASA og L. Pueyo, M. N’Diaye (STScI).

Længere ude i fremtiden vil vi formentlig se kæmpekikkerter ikke bare på Jorden men også i rummet. Det har den fordel, at man effektivt vil kunne lave en kunstig stjerneformørkelse inde i kikkerten, ligesom når Månen skygger for sollyset og skaber en solformørkelse. Ved at skærme for stjernens lys vha. en kunstig måne foran kikkerten kan man pludselig se det svage lys fra jordlignende planeter i kredsløb om stjernen, ligesom man ser stjerner på himlen nær ved Solen under en total solformørkelse. To af de fire rumprojekter på tegnebrættet i det amerikanske “decadal survey” er dedikerede exoplanet-kikkerter. Med et spejl på mellem 8 og 16 meter og en kunstig måne både inde i kikkerten og flyvende foran kikkerten vil LUVOIR- og HabEx-projekterne (se figur 2) kunne producere uhørt detaljerede spektre af et stort antal jordlignende exoplaneter på endnu større afstande fra os end selv E-ELT-kikkerten nogen sinde vil kunne opnå. Samtidig vil placeringen i rummet sikre at man kan studere både det ultraviolette, det synlige og det infrarøde lys fra planeterne. Og allerede inden da vil vi formentlig møde en gruppe af nye specialiserede exoplanet-satellitter, der vil øge vores viden om de fysiske forhold på planeter, hvor levende organismer potentielt kan findes, inklusiv det Google-inspirerede TESS-projekt til opsendelse i 2018, og det endnu mere ambitiøse Europæiske PLATO-projekt til opsendelse i 2024, der vil skanne himlens én million klareste stjerner for formørkende exoplaneter, ligesom Kepler-satellitten gjorde det fra 2009 til 2013 for stjerner i et lille felt af himlen i stjernebilledet Svanen.

Med E-ELT vil vi komme til at optage de første billeder og direkte spektre af jordlignende planeter kredsende om de nærmeste solliggende stjerner. Sådanne spektre vil vise, om der er liv på planeterne, men mere om det nedenfor. Allerede længe inden da vil vi komme til at se spektre af større planeter på små afstande fra deres stjerne. Det er detaljer i transitfænomenet som på fascinerende måde tillader at optage et spektrum af planetens atmosfære, selv uden vi kan se planeten.

### Planetatmosfæren kan ses ved formørkelser

Når vi ser en planet gå hen foran en stjerne, vil den formørke stjernens lys en smule. Vi kender fænomenet fra Venuspassager og Merkurpassager i vores eget solsystem. Vi kan se de to planeter vandre hen over solskiven som sorte prikker. Merkur er en atmosfæreløs stenørken. Den vil derfor aftegne sig som en skarp sort skive ovenpå den lyse sol. Venus derimod, har en tyk atmosfære som vil tillade en lille smule af sollyset at passere. Under passagen vil Venus derfor ikke ses som en lige så skarp skive som Merkur, men se lidt “ulden” ud i kanten. For de bølgelængder som har let ved at gå gennem Venusatmosfæren, vil vi næsten ikke se atmosfæren. For de bølgelængder hvor Venus har en stærk absorption, vil atmosfæren skygge meget for sollyset. Det vil derfor se ud, som om Venus er en smule større når vi observerer bølgelængder der absorberes kraftigt i Venusatmosfæren end når vi observerer bølgelængder, der går mere uhindret igennem atmosfæren.



**Figur 3.** Ved omhyggeligt at måle spektret eller lysintensiteten af stjernen når exoplaneten er foran stjernen, ved siden af stjernen, og bagved stjernen, kan man indirekte få et spektrum af exoplaneten. Man kan også sige noget om forskellen i lyset fra exoplanetens dag- og natside. Fra [1] (modificeret).

Ved at måle Venus' diameter som funktion af den bølgelængde lys vi observerer, mens den passerer hen over solskiven, får vi derfor i realiteten et lavopløsnings-spektrum af Venus. I Venus' tilfælde kan vi jo også se den som en klar "stjerne" på nattehimlen, og de bedste spektre af Venus får man derfor simpelthen ved at kigge på den når Solens stærke dagslys er væk.

Men for exoplaneter, hvor vi ikke kan opløse billedet af planeten fra billedet af stjernen, kan vi alligevel få et spektrum af planeten ved at måle, hvor meget lys den tager væk fra stjernen under en transit som funktion af bølgelængden (se figur 3). På den måde kan man sige, at man på fascinerende vis optager et brugbart spektrum af planetens atmosfære uden nogen sinde at have set planeten selv.

### Planetatmosfæren trukket ud af stjernens lys

Et endnu bedre spektrum af planeten, kan i nogle tilfælde fås ved at optage et samlet spektrum af stjernen og planeten når planeten er henholdsvis *foran* stjernen, når den er *på siden* af stjernen, og når planeten er væk *bagved* stjernen. Ved at trække spektre af stjernen med og uden bidrag fra planetens lys fra hinanden kan man i princippet få et spektrum af planeten alene – igen uden nogen sinde at have set planeten. Selvfølgelig kræver det ultra nøjagtige målinger og det kan kun gøres hvis stjernen er ekstremt "rolig". Hvis stjernen fx har solpletter eller anden "magnetisk uro", vil det totalt ødelægge målingerne. Spektre af stjernen henholdsvis med og uden pletter vil adskille sig mere fra hinanden end spektre med og uden planeten, og for "urolige stjerner" kan man derfor ikke vide, om det er et spektrum af solpletten eller planeten man opnår ved metoden. Men hvis stjernen er rolig nok og målingerne nøjagtige nok, kan vi til gengæld opnå information om både planetens forside og bagside ved at trække de rigtige sæt af målinger fra hinanden. På den måde har man for eksempel lært, at nogle af de varme Jupiterlignende planeter i små baner har nogenlunde samme temperatur på dagsiden og natsiden. Det er ganske bemærkelsesværdigt, fordi de formentlig har

bunden rotation – dvs. altid vender den samme side ind mod stjernen og altid den samme side væk fra stjernen. Hvis de så alligevel har den samme temperatur på den ene og den anden side af planeten, må det betyde, at de har tykke atmosfærer og voldsomme jetstrømme i den øvre del af atmosfæren som meget effektivt og hurtigt bringer varmen fra dagsiden om på natsiden. På den måde har vi lært noget om vejret på exoplaneten, stadig uden overhovedet at have set planeten.

Men endnu er der kun tale om Jupiterlignende gasplaneter. Det er dem man indtil nu har kunnet optage spektre af med Hubble Rumteleskopet og eksisterende store kikkerter på Jorden.

### Formørkelsesspektre med James Webb

Til marts næste år (2018) forventes det nye og større rumteleskop, *James Webb Space Telescope (JWST)*, opsendt. James Webb Rumteleskopet kommer til at observere infrarødt lys, hvor forholdet mellem exoplaneternes og stjernernes lys er lidt mere gunstigt end ved synligt lys. Samtidig har JWST en spejldiameter på 6,5 meter – mere end to og en halv gange Hubble Rumteleskopets. JWST vil komme til at optage de første transit-spektre af "super-Jorde", planeter med størrelser imellem Neptun og Jordens størrelse. Neptunlignende planeter i små baner er en type planeter som er meget almindelige omkring andre stjerner men slet ikke findes i vores eget solsystem. Det er i øjeblikket ikke klart om alle Neptun-størrelse exoplaneterne er egentlig Neptunlignende – altså gasplaneter som Jupiter, blot mindre og med en stor iskerne – eller om nogle af dem er forvoksede jordkloder – altså faste klippeplaneter med en enorm masse i forhold til Jordens. Spektre fra JWST vil hjælpe os til at forstå, hvad det er for en slags planeter vi "mangler" i vores eget solsystem.

Men selv med James Webb Rumteleskopet er det kun indirekte transit-spektre vi kan optage. JWST er for lille, til direkte at kunne adskille lyset fra stjernerne og de planeter der kredser om dem. Hertil skal vi have større teleskoper.

## Ekstremt store teleskoper på Jorden

Den næste klasse af teleskoper på Jorden er allerede godt på vej med hele tre ekstremt store teleskoper, "extremely large telescopes" eller ELT'er, under konstruktion. De to amerikanske ELT-teleskoper kommer til at have spejldiameter på henholdsvis 24 og 30 meter, mens den kæmpemæssige fælleseuropæiske E-ELT-kikkert kommer til at have et spejl på knap 40 meter i diameter. Det tredje sekundærspejl i lysets gang gennem E-ELT-kikkerten er nærmest en slags kulstof membran der, baseret på laser-beams skudt op i jordens øvre atmosfærelag, justerer sin form 100 gange i sekundet for at kompensere for jordatmosfærens lufturo. Herved får man lige så skarpe billeder, som hvis man havde et 40 meter teleskop i kredsløb om Jorden, og bliver dermed i stand til at nå diffraktionsgrænsen for et 40 meter spejl (se figur 1). Sammenholdt med den enorme lysfølsomhed ved at have så stort et spejl, betyder det, at man direkte vil kunne tage højopløsningspektre af høj kvalitet af jordlignende exoplaneter i jordlignende baner omkring de nærmeste sollige stjerner.

## Bor der nogen på dem?

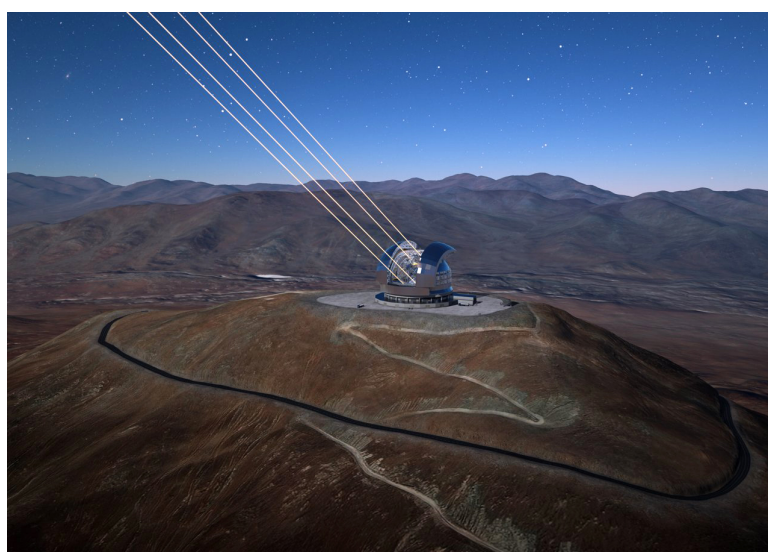
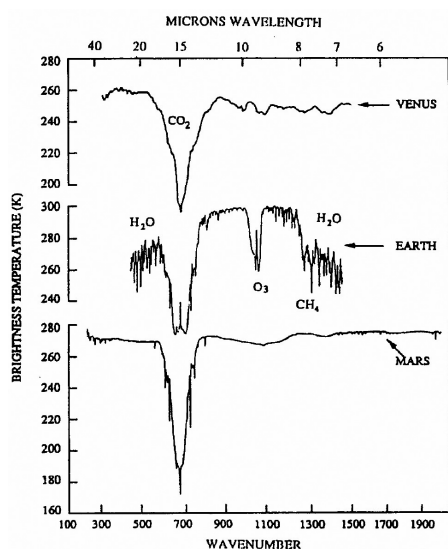
Når E-ELT-teleskopet står klart i midten af 2020'erne, vil vi kunne se, om atmosfæren af de nærmeste jordlignende exoplaneter i deres habitable zone er i kemisk ligevægt eller i "biologisk ligevægt". En plante på Jorden vil udskille ilt, et dyr  $\text{CO}_2$ , nogle bakterier vil udskille methan, og Jordens atmosfære vil også indeholde vand, som er essentielt for livet på Jorden. De fire gasser er ude af kemisk ligevægt med hinanden, og alle gasserne vil kunne ses i spektret af Jordens atmosfære. Derfor kalder vi dem *biomarkører*. Hvis vi så noget lignende på en jordlignende exoplanet ville vi tage det som en klar indikation af biologisk aktivitet. Hvis vi, når E-ELT'en står færdig, er klar med instrumenteringen, observationsteknikken og modelleringen

ved at have øvet os på de simplere HST- og JWST-spektre, vil vi vha. biomarkører kunne afsløre hvilken type beboere – hvis der er nogen – som findes på de jordlignende exoplaneter i kredsløb om de nærmeste sollige stjerner i rummet.

## Jorden set fra afstand med E-ELT

Hvis nogen havde stået med et E-ELT-teleskop på en planet 10 lysår herfra for 4 milliarder år siden og kigget på Jorden, ville de formentlig havde set en Jordklode med en atmosfære bestående udelukkende af  $\text{CO}_2$  (måske ville der også have været kvælstof som i dag, men det ville man ikke umiddelbart kunne se). Sådan ser Venus og Mars' atmosfærer ud den dag i dag (se figur 4). Her er atmosfærene i kemisk ligevægt med sig selv og planetoverfladen.

På Jorden vil udåndingen fra de første levende organismer snart have pustet gasser ud i atmosfæren der ikke var her før. Vi ved ikke hvad det har været for gasser, men de første organismer på Jorden var anaerobe og havde måske det samme stofskifte som nutidens metanproducerende bakterier. I så fald ville en tålmodig observatør 10 lysår herfra med et E-ELT-teleskop til rådighed, have kunnet se spektrallinjerner for metan i Jordens spektrum blive stærkere og stærkere efterhånden som årmillionerne passerede. De ville kunne gætte sig til at livet tog fodfæste på Jorden. Efter de første par milliarder år ville de se, at der begyndte at være ilt i atmosfæren. De ville konkludere, at fotosyntesen var i fuld gang på Jorden (se figur 5), og de ville kunne gætte på, at livet på Jorden havde en chance for at udvikle komplekse og måske intelligente væsener indenfor en overskuelig fremtid. Med ilt i atmosfæren åbnede der sig mulighed for den mere effektive metabolisme, der på Jorden var forudsætningen for udviklingen frem mod mere komplekse organismer. Vores tænkte observatør ville have kunnet gætte på, at komplekse livsformer var ved at finde fodfæste på Jorden.



**Figur 4.** En tegners opfattelse af hvordan E-ELT-teleskopet vil komme til at tage sig ud når det sender lasersignaler mod Jordens øvre atmosfære for at finjustere sine spejle natten igennem. (Tegning: ESO). Med sit næsten 40 m store spejl vil det kunne optage spektre af Jord- Venus- og Mars-lignende planeter omkring de nærmeste sollige stjerner. Hvis nogen stod med et E-ELT-teleskop 10 lysår ude i rummet og kiggede på Solsystemet, ville de se kuldioxid, metan, ilt, og vand i spektret af Jordens atmosfære, og konkludere at her er der liv på planetens overflade.



**Figur 5.** Nulevende stromatolitter (øverst) og 2,6 milliarder år gamle stromatolittfossiler (nederst). Stromatolitter ("mikrobemåtter") er sedimenter fra kolonier af cyanobakterier, der producerede den første ilt på Jorden for 3,5 eller flere milliarder år siden. Med tiden ændrede de Jordens atmosfære så drastisk, at man ville kunne have set det med et E-ELT-teleskop på lysårs afstand. Det forøgede iltindhold som cyanobakterierne skabte, muliggjorde udviklingen af mere komplekse biologiske celler på Jorden – det vi forbinder med højere livsformer. Fotos: Marvin Del Cid og T.W. Dahl.

Samtidig ville de med deres E-ELT-kikkert måske have set, at Venus og Mars blev ved med at have den samme atmosfæresammensætning som de havde fra starten. Her opstod der aldrig levende organismer til at bringe atmosfæren ud af kemisk ligevægt – der kom ingen biomarkører i atmosfæren. Måske vil de på Mars have set biomarkørerne træde frem i en kort periode for mellem 4 og 3,5 milliarder år siden, vi ved det ikke. På Venus ville de have set, at der i en kort periode kom kraftige spektrallinjer fra vand i atmosfæren, hvorefter signaturen for vand forsvandt totalt mens mængden af CO<sub>2</sub> steg til uanede højder. Her var verdensoceanerne dampet af og planeten løbet løbsk i en spiralerende drivhusopvarmning. På Mars ville de også have set vandlinjerne vokse op for herefter at forsvinde sammen med alle de andre spor af en atmosfære, og de ville måske konkludere, at Mars kølede for hurtigt af til at bibeholde sit magnetfelt og skærme for, at solvinden kunne blæse atmosfæren ud i det interplanetare tomrum. De ville måske undre sig over at livet aldrig opstod på Mars og Venus, eller konkludere, at det af ukendt årsag måtte være døet ud igen, kort tid efter det opstod.

Men de ville vide, at livet på Jorden havde udviklet sig til et robust og komplekst niveau, hvor ilt- og CO<sub>2</sub>-producerende organismer i store mængder lever i en nogenlunde økologisk balance med hinanden, med et islæt af metanproducerende organismer blandt sig, og at det er baseret på vand. Måske ville de mene, at eksistensen af ilt i atmosfæren havde en god mulighed for at underbygge udviklingen af intelligente væsener, og sende et radiosignal herved for at høre, om vi var kommet så langt at vi kunne kommunikere med radio, og havde oplevet noget vi havde lyst til at fortælle dem om.

## Er der liv?

Vi vil formodentlig stå i den samme situation i de kommende år når de første instrumenter vil afsløre om de nærmeste jordlignende exoplaneter i deres habitable zoner har en atmosfære i eller ude af kemisk ligevægt – altså er med eller uden biomarkører i deres spektre. Eller også vil vi opdage, at alle exoplaneter, så langt E-ELTs følsomhed rækker, er i kemisk ligevægt, og vi vil måske kigge på hinanden og undre os over, at der er så få af os i det kæmpemæssige univers der omgiver os.

## Litteratur

- [1] Laura Drake Deming & Sara Seager (2016), Illusion and Reality in the Atmospheres of Exoplanets, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1701/1701.00493.pdf>
- [2] Nikku Madhusudhan et al. (2016), Exoplanetary Atmospheres – Chemistry, Formation Conditions, and Habitability, *Space Science Reviews* **205**, p. 285-348, (arXiv:1604.06092).

*Uffe Gråe Jørgensen* er lektor i astrofysik ved Niels Bohr Institutet, hvor han arbejder med observationer af exoplaneter og numeriske modeller for stjerne- og exoplanet-atmosfærer. Han er medstifter af grundforskningscenteret for Stjerne- og Planetdannelse, og leder sektionen for Astrofysik og Planetforskning ved Københavns Universitet. Som Danmarks videnskabelige medlem af ESOs bestyrelse har han været ansvarlig for, at Danmark kom med i E-ELT-projektet.



*Lars A. Buchhave* er lektor i astrofysik ved Niels Bohr Institutet, hvor han arbejder med opdagelse og karakterisering af exoplaneter, med fokus på massebestemmelser og atmosfæreobservationer. Han har været tæt involveret i Kepler-missionen og er tæt engageret i NASAs TESS-mission som opsendes senere i år, og er international repræsentant i NASAs studiegruppe om kæmperumteleskopet LUVUOIR.



*Tais W. Dahl* er adjunkt ved Statens Naturhistoriske Museum og Carlsberg Distinguished Associate Professor. Han arbejder med geokemiske analyser af ældgamle havbundssedimenter samt modellering af Jordens biogeokemiske kredsløb igennem Jordens historie for at forstå, i hvor høj grad miljøet har påvirket livets udvikling og omvendt. Han er leder af Geobiologilaboratoriet på Københavns Universitet.

