

Fjärran atmosfärer i sikte



Nu är CRIRES+ på plats på VLT – spektrografen full med svenska delar som ska lära oss mer om exoplaneters atmosfärer. Vi tar en titt på hur den funkar.

av Linn Boldt-Christmas

Mitt ute i Atacamaöknen, någonstans uppe i Andernas bergskedja, ligger en observatorieanläggning under stjärnklar himmel: Paranal-observatoriet, en del av det Europeiska sydobservatoriet (Eso). Där finns ett instrument som heter CRIRES+, vilket står för *Cryogenic InfraRed Echelle Spectrograph* (ungefär ”kryogenisk infraröd echelle-spektrograf”). CRIRES+ är ett av de nyaste instrumenten inom astronomi – en spektrograf som ska hjälpa astronomer att studera stjärnor och planeter i andra planetsystem, bland annat genom att hjälpa oss identifiera exakt vilka ämnen som finns i de observerade planeternas atmosfärer, som till exempel syre eller vatten. Plustecknet indikerar att instrumentet är en uppgradering av det gamla instrumentet CRIRES som fanns fram till 2014. Uppgraderingen blev klar 2020 och har varit i aktivt bruk sen slutet av 2021.

En del av ett banbrytande teleskop

CRIRES+ är inte ett teleskop i sig, utan ett instrument som sitter på ett teleskop. Teleskopet är VLT, vilket står för *Very Large Telescope* (”väldigt stort teleskop”) – ett så kallat optiskt teleskop som i sin tur består av fyra ihopkopplade teleskop på ungefär åtta meter var, där CRIRES+ sitter på teleskop nummer tre.

VLT började användas 1998, och har sedan dess varit en enormt viktig del av astronomisk forskning. Det står bakom flera historiska händelser som till exempel den första direkta avbildningen av en exoplanet (Beta Pictoris b) och banbrytande observationer av hur stjärnor rör sig runt svarta hål.

Spektroskopi – att dela upp ljuset

Ljus från rymden når CRIRES+ via teleskopets speglar. Först reflekteras

ljuset av ett gitter och blir utspritt via dispersion. Detta ger oss ett regnbågspektrum som visar exakt hur mycket av de olika färgerna finns i det ”vita” (icke-uppbrutna) ljuset som nått oss.

Beroende på objektet som observeras finns det olika mängder av ljus i olika våglängder; en väldigt varm stjärna har mycket blått ljus och UV-ljus, medan en kallare stjärna har mer ljus i röda och infraröda våglängder.

Genom att bryta upp ljuset för att se hur mycket av vilket slags ljus kommer från ett objekt kan vi lära oss mer om det – lite som om du kunde ta isär din favoriträtt på en restaurang och dela upp den i dess ingredienser för att lära dig hur den lagas.

Även om två stjärnor av liknande temperatur strålar ut ljus i liknande våglängder så finns det en annan faktor som har inflytande över exakt vilket slags ljus vi ser från dem: kemi.

Stjärnor som vår sol består av mer än 98 % väte och helium, men i deras

atmosfärer kan vi se andra ämnen som till exempel kol och syre. I kallare stjärnors atmosfärer kan ännu fler ämnen överleva, och där finns t.o.m. mer komplicerade molekyler som vatten (H_2O) och titanmonoxid (TiO).

Vi kan detektera vilka ämnen som finns i rymden och i stjärnors atmosfärer tack vare hur atomer och ljus interagerar. I varje gas eller plasma har atomer och molekyler vissa exakta våglängder av ljus som de kan, eller inte kan, släppa igenom. Resultatet blir att ljus som reser igenom en mängd atomer eller molekyler tar på sig en slags ”färg” – en väldigt exakt kombination av de vissa specifika våglängder som inte absorberas – så om ljuset som når oss inte har en viss ”färg” kan vi härleda vilka atomer eller molekyler som finns i denna atmosfär.

Denna process – att studera exakt vilka våglängder som kan eller kan inte överleva en resa genom en viss gas – heter spektroskopi, och är ett av de viktigaste verktygen som en astronom har tillgång till. Det är så vi vet vad solen, planeter, och alla andra himlakroppar som vi inte kan nå faktiskt består av.

Mätningar med spektroskopi är just vad spektrografen CRIRES+ är byggd för att åstadkomma. Genom att bryta upp ljus kan CRIRES+ mäta exakt hur mycket ljus från exakta våglängder som har nått oss, och därmed studera den kemiska sammansättningen av fjärran objekt.

Spektroskopi i sig är något som människor har gjort i över 150 år. Ett av de viktigaste ämnena i universum, helium, upptäcktes 1868 när man började studera solen med spektroskopi. Då fann man en ny kombination av våglängder, vilket indikerade ett nytt ämne. Det nya ämnet fick därför namnet helium efter den grekiska solguden Helios.

Sveriges viktiga roll

Skillnaden mellan tidigare spektroskopiska instrument och CRIRES+ ligger i dess precision och höga prestanda. CRIRES+ är en så kallad högupplösningsspektrograf, vilket betyder att den kan detektera extremt små skillnader i ljuset från den ena

LÄR DIG MER: SPEKTROSKOPI

När vi lär oss om hur elektroner befinner sig runt atomens kärna (gjord av protoner och neutroner) så ritas vi oftast elektronerna som om de vore på små omloppsbanor runt ett centrum. Sanningen är egentligen lite suddigare eftersom elektronernas exakta positioner beror på kvantmekanik, men vi kan föreställa oss att elektronerna sitter ungefär som på illustrationen nedan – lite som medlemmar av en publik i en amfiteater.

Elektroner är förankrade runt atomkärnan på grund av den elektromagnetiska attraktionen mellan de positivt laddade protonerna i kärnan och de negativt laddade elektronerna. Precis som två magneter blir attraktionen svagare när elektronerna är längre bort, så elektroner i de innersta skalerna runt atomkärnan sitter mycket tryggare där än elektronerna i de yttre skalerna. Likt vår publik i amfiteatern vill elektronerna hellre sitta på första raden – det kallar vi för att elektronerna är i en låg energinivå.



- 1) När en bit ljus – en foton – åker in i en gas och kolliderar med en gasatom så kan den överföra sin energi till en av atomens elektroner.
- 2) Elektronen kan då temporärt ta sig från en lägre energinivå till en högre energinivå, men bara om fotonen har exakt samma energi (det vill säga har en viss exakt våglängd) som behövs för att skjuta elektronen från en nivå till en annan.
- 3) Eftersom energi varken kan förstöras eller skapas så måste den ta vägen någonstans – så efter några nanosekunder åker elektronen ner igen, och förlorar då energin antingen som värme eller som en ny foton.

Den nya fotonen har en extremt liten chans att bli emitterad i exakt samma riktning som den kom ifrån, så därför kommer majoriteten av ljuset inte längre fram på samma bana som den reste på innan interaktionen. Det betyder att fotoner vars våglängder matchar energin som behövs för att interagera med en atoms elektroner kommer att bli uppslukade på detta vis, men andra fotoner överlever och reser igenom gasen utan att bli absorberade. Vilka energier – alltså vilka våglängder – som behövs för att fotoner ska bli absorberade beror på exakt vilken atom eller molekyl som är på plats.

- 4) Vilka fotoner som överlever resan beror alltså på vilka ämnen ljuset åker igenom. När vi observerar stjärnljuset som har tagit sig igenom en exoplanet-atmosfär observerar vi alltså de resterande fotonerna och kan därmed förstå vilka ämnen som fanns på vägen.

våglängden till den andra jämfört med andra spektrografer. På samma sätt som en skärm ger en bättre upplösning ju fler pixlar som är tillgängliga, så kan en spektrograf ge oss mer detaljerad information om den har högre upplösning, och det är just denna höga upplösning som behövs för att se mer detaljerade skillnader mellan olika ämnen.

För att bygga ett så pass avancerat instrument har det krävts samarbete mellan flera europeiska länder. Sverige har haft en stor roll genom Uppsala universitet, där Nikolai Piskunov leder arbetet.

– Uppsala universitet har haft en avgörande roll både genom att föreslå och utveckla de nya instrumenten, berättar han. Vi har bidragit med viktiga delar såsom toppmoderna infraröda detektorer och mjukvara för datareduktion.

Genom ett bidrag från Knut och Alice Wallenbergs stiftelse har Sverige stått för nära hälften av de totala kostnaderna för CRIRES+, vilket gör instrumentet till en av de största svenska investeringarna i astronomiska instrument den senaste tiden.

På jakt efter exoplaneter

Att ha hög upplösning är särskilt angeläget när vi använder CRIRES+ för ett av våra primära mål med detta instrument: att studera exoplaneters atmosfärer. Exoplaneter är en förkortning för extra-solära planeter, alltså planeter bortom vårt

solsystem som är i omloppsbanor runt andra stjärnor.

Den första exoplaneten upptäcktes under 1990-talet, och slutet av seklet såg enbart några enstaka fler upptäckter – men tack vare nya teleskop och förbättringar i våra metoder, instrument och datorer så har antalet upptäckta exoplaneter exploderat under det senaste årtiondet. Under de första 20 åren efter den första upptäckten kunde vi sakta men säkert bekräfta existensen av ungefär 1 000 exoplaneter, men under endast de följande tio åren efter det upptäcktes över 4 000 till. I mars 2022 nådde vi vår senaste milstolpe: över 5 000 exoplaneter har nu upptäckts, med en fantastisk variation i storlekar, avstånd och uppbyggnad.

Stjärnljuset avslöjar exoplaneterna

En av de mest populära metoderna för att upptäcka exoplaneter är den så kallade transitmetoden. Exoplaneter förflyttar sig runt sina moderstjärnor precis som våra planeter rör sig runt solen. För ett system som vi har turen att se från sidan betyder det att om vi väntar tålmodigt kan vi förvänta oss att exoplaneten så småningom kommer att passera förbi framför sin stjärna och ge oss en liten stjärnförmörkelse – en passage, eller en transit, över sin stjärnas ansikte – men bara om vi ser exoplanetsystemet från rätt vinkel. Genom att titta på hur mycket ljus som blockeras kan vi beräkna hur stor planeten är jämfört med sin stjär-

na, och genom att kombinera det med hur länge transiten varar kan vi lära oss om många av planetens egenskaper: till exempel radie, hastighet och avstånd från sin stjärna.

Vad finns i exoplaneters atmosfär?

Under en transit blir planeten upplyst bakifrån av sin stjärna, och en bråkdel av stjärnans ljus åker därför igenom exoplanetens övre atmosfär. Den delen av stjärnljuset som åker igenom planetatmosfären blir då spektroskopiskt påverkad i tre steg: först av stjärnans atmosfär när den lämnar stjärnans yta, sedan av exoplanetens atmosfär under transiten, och till sist av jordens atmosfär som den åker igenom på sin väg till våra markbelägna teleskop.

Med noggranna modeller av hur stjärnans och jordens atmosfär bör bete sig kan vi göra modeller av vilka våglängder som bör absorberas i dessa steg. Vi kan då subtrahera deras spektroskopiska inflytande på ljuset, och dra slutsatsen att de ljuseffekter som är kvar kommer från exoplanetens atmosfär.

Men det är inte lätt att observera exoplaneters transiter och få tag på den lilla delen av ljuset som åker igenom exoplanetens atmosfär. De tusentals exoplaneter vi har upptäckt idag ligger allt ifrån några enstaka ljusår till tiotusentals ljusår ifrån oss. Planeterna är också nästan alltid fysiskt mindre än stjärnorna kring vilka de kretsar, och är mycket svårare att

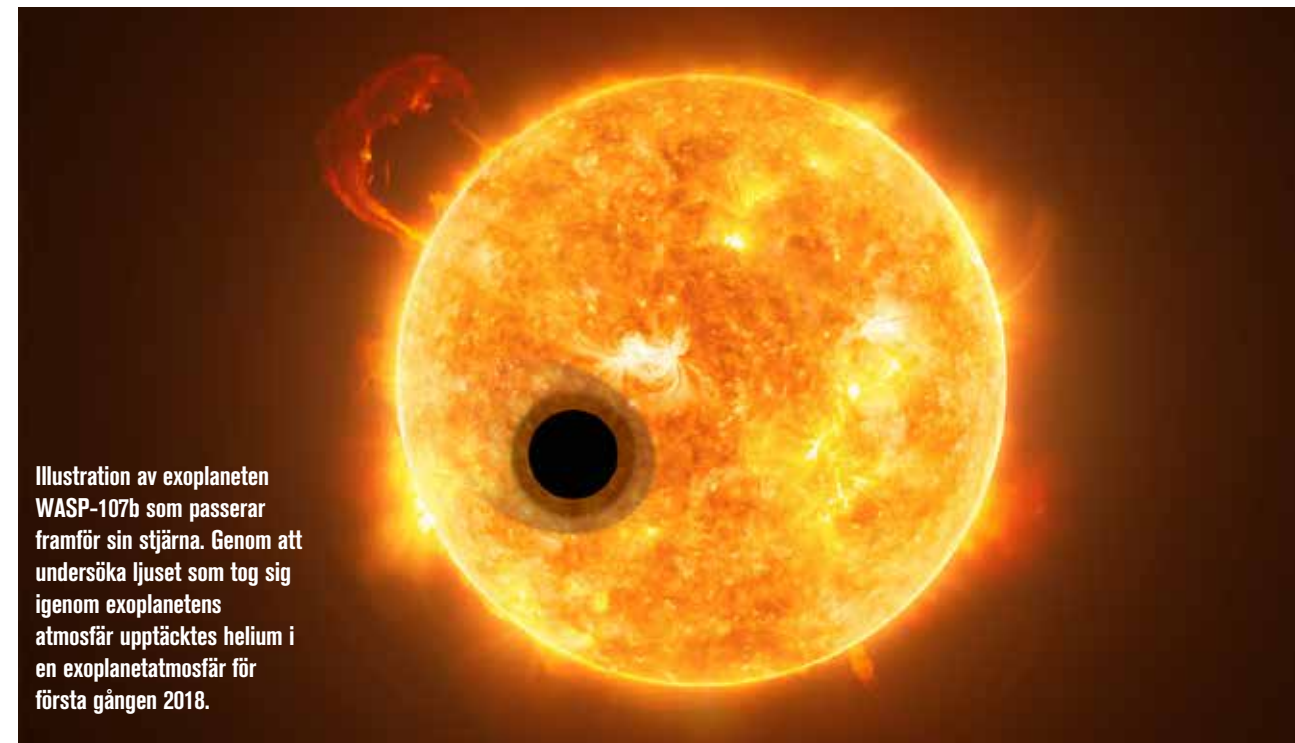


Illustration av exoplaneten WASP-107b som passerar framför sin stjärna. Genom att undersöka ljuset som tog sig igenom exoplanetens atmosfär upptäcktes helium i en exoplanetatmosfär för första gången 2018.

se eftersom de inte strålar lika starkt. Exoplaneter är inte starka ljuskällor i sig själva som stjärnorna är, och det är därför vi behöver passa på när stjärnan som planeten kretsar kring lyser upp den. Eftersom vi måste isolera exoplanetens ljus från stjärnans ljus är det bara några bråkdelar av en procent av signalen som når oss, och som vi faktiskt kan använda för att studera exoplaneten, varför vi verkligen behöver god signalstyrka och hög upplösning.

Våglängdsområdet som CRIRES+ täcker är "nära infrarött" (på engelska *near-infrared*, NIR) ljus, vilket betecknar de längre våglängder som angränsar till synligt ljus och som fortfarande har optiska egenskaper. Just detta område är extremt användbart, eftersom det är här vi hittar flera viktiga spektroskopiska ljuseffekter som hjälper oss identifiera några av de mest intressanta molekylerna för exoplanetatmosfärer, till exempel vatten (H₂O), koldioxid (CO₂) och metan (CH₄).

Samarbete med Webbteleskopet

Under det senaste årtiondet har få konversationer angående teleskop ägt rum utan att någon nämner James Webb-teleskopet, ett rymdteleskop

designat och byggt av Esa och Nasa som skickades upp juldagen 2021 med raketerna Ariane 5. Webbteleskopet är ett rekordbrytande teleskop på många sätt: Det enorma teleskopets primära spegel är 6,5 meter i diameter, vilket gör att Webbteleskopet är det största (och därmed dyraste) teleskopet som människan någonsin har skickat upp i rymden. Efter mer än ett halvår har Webbteleskopet nu äntligen klarat av sin resa till sin Lagrangepunkt L₂, där den ligger förankrad bortom månen på ett avstånd på nästan 1,5 miljoner kilometer från jorden. Det har redan börjat skicka spektakulära bilder till oss på jorden.

Webbteleskopet täcker stora delar av samma våglängdsområde som CRIRES+, vilket betyder att dessa två extremt olika teleskop också har väldigt mycket gemensamt. Webbteleskopet är också en slags spektrograf i infrarött, och har även det i uppdrag att studera bland annat exoplaneters atmosfärer. Det betyder att JWST och CRIRES+ kompletterar varandra väl. Där CRIRES+ har begränsningen att den måste kompensera för jordens atmosfär, så har JWST, som ligger 1,5 miljoner kilometer från jorden, inte samma problem. Å andra sidan är upplösningen på CRIRES+ nästan 100 gånger högre än Webbteleskopets.

Att dessa två teleskop har bör-

jat sina uppdrag ungefär samtidigt betyder att vi förhoppningsvis kan förvänta oss mycket samarbete mellan de två och kunna kombinera det bästa av de båda teleskoperna.

– CRIRES+ är ett unikt verktyg för att studera exoplaneter och atmosfären hos jordlika exoplaneter i synnerhet, säger Nikolai Piskunov. Det är ett viktigt komplement till Webbteleskopet, eftersom vi med det kan göra kemiska analyser av exoplaneters atmosfärer och få fram fysiska förhållanden på ytan av beboeliga världar, som de som Webbteleskopet kan upptäcka.

CRIRES+ kommer att förhoppningsvis ge oss nya resultat under många år framöver. Till skillnad från rymdbaserade teleskop, där möjligheten till underhåll är mycket begränsad, har markbaserade teleskop fördelen att de kan repareras när det behövs. Och i takt med att våra kapaciteter utvecklas kan det uppgraderas igen. Kanske får vi se ett CRIRES++ i framtiden? ★



LINN BOLDT-CHRISTMAS är doktorand i astrofysik vid Uppsala universitet, där hon studerar exoplaneters atmosfärer, och har arbetat med kommunikation vid Esa.



CRIRES+ på plats inuti teleskop nummer 3 på VLT.

BILD: ESA