

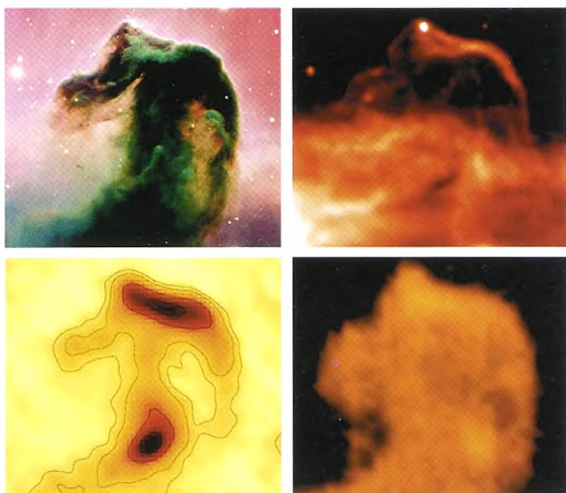
Rendezvous med ALMA

Af Holger Nielsen

På den flade højslette *Llano de Chajnantor* ca. 40 km øst for den lille chilenske ørkenby *San Pedro de Atacama* har et internationalt konsortium opbygget verdens mest ambitiøse submillimeter-observatorium i en højde af 5000 m. Her ligger ALMA, *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*, som er opbygget af ikke mindre end 66 store parabolteleskoper, der kan anbringes med op til 16 km indbyrdes afstand. Ved hjælp af interferometri og en supercomputer er det blevet muligt at skaffe information om og konstruere billeder af astronomiske objekter, der er meget koldere, end de stjerner, som vi forbinder med nattehimmelen. De første resultater er nu begyndt at indløbe.

Stråling fra rummet

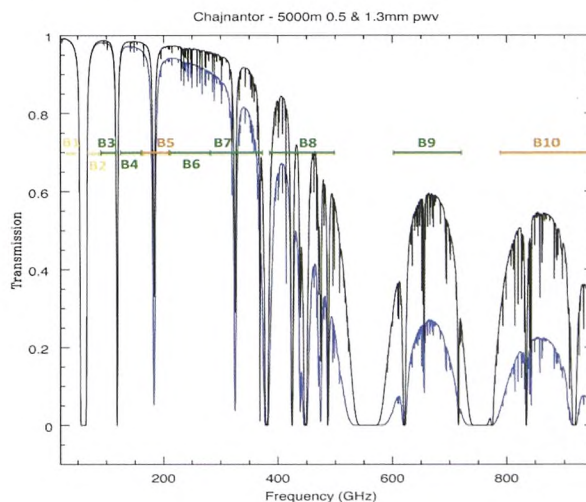
Vores øjne er som følge af evolutionen konstrueret, så de fungerer optimalt i sollys: Nethindens følsomhed er højest ved en bølgelængde på omkring $\lambda = 500$ nanometer tæt på maximum i spektret af Solen. Vi kan se det synlige spektrums farver fra violet til rødt med bølgelængder rundt regnet i intervallet 400 til 700 nm. Det er absorption i Jordens atmosfære ved bl.a. vanddamp, oxygen og ozon, som forhindrer anden stråling i at nå overfladen.



Figur 1. Det sete afhænger af øjnene der ser. Her vises den berømte *Hestehovedtåge*, der er en del af et kompleks af molekyleskyer i stjernebilledet Orion og hvis afstand er ca. 1500 lysår. Tågen er en tæt samling af gas og støv, der danner en silhuet mod baggrunden af spredt lys fra nydannede stjerner i nærheden. De fire billeder viser objektet i forskellige spektralområder: I synligt lys ser man den mørke støvsky (øverst til venstre). I det infrarøde område (øverst til højre) dukker varme, glødende gasskyer op inde i tågen. Billedet nederst til venstre viser Hestehovedet registreret af ALMA i submillimeterområdet, dog endnu ikke med maximal vinkelopløsning. Nederst til højre ses tågen i radiobølgeområdet (ESO/ESA/CSO/ALMA).

I mange århundreder var astronomiens erfaringsområder begrænset til den synlige del af spektret. I 1800 rapporterede astronomen *William Herschel* opdagelsen af infrarød stråling, de første målinger i radioområdet af spektret blev udført af ingeniøren *Karl Jansky* i 1931, og med moderne rumteleskoper (bl.a. *Hubble*, *Chandra* og det kommende *James Webb Rumteleskop*, planlagt opsendt i 2018) er hele det elektromagnetiske spektrum blevet tilgængeligt, se figur 1. Nu er det jo begrænset,

hvor store instrumenter man kan sende i kredsløb, så jordbaseret astronomi spiller stadig hovedrollen.



Figur 2. Gennemskinneligheden af Jordens atmosfære i submillimeterområdet. Til frekvenser på hhv. 200 og 800 GHz svarer bølgelængder på hhv. 1499 og 375 μm . Vi ser, at der findes en del "vinduer" i spektret med god transmission markeret "B1" til "B10". Den blå kurve gælder for et vanddampindhold på 1,3 mm pwv, den sorte for 0,5 mm pwv; her står "pwv" for "precipitable water vapor" og betyder, at såfremt al vanddamp i atmosfæren over stedet kunne fortættes til vand, så ville tykkelsen af vandlaget være som angivet. For "almindeligt vejr" herhjemme ligger værdierne mellem 10 og 70 mm; ved ALMA normalt mellem 0,5 og 2 mm, rekorden er på 0,12 mm. På Sydpolen kan man typisk komme ned på 0,1 mm, og ved den højtliggende iskappe *Dome A*, der regnes for Jordens koldeste sted (-90°C), helt ned til 0,025 mm.

Når det drejer sig om stråling i mikrometer- og millimeterområdet (submillimeter), er det først og fremmest vanddamp, der absorberer. For at observere effektivt i disse dele af spektret må man derfor finde steder, der ligger højt (for at undgå så meget atmosfære som muligt) og hvor luften er meget tør. Det mest optimale sted er Sydpolen, som ligger i 2835 m højde og hvor den stærke kulde giver en ekstremt tør atmosfære, og her findes da også to submm-observatorier, *BICEP* og *Keck Array*. Et sted, der er noget mere tilgængeligt, ville være ønskeligt, og det har man fundet i Chiles *Atacama-ørken*. Figur 2 viser, at der findes vinduer i mikrobølgeområdet, men også, at gennemsigtigheden i disse er meget følsom overfor mængden af vanddamp, som der er meget lidt af i Atacama-ørkenen.

Generelt om ALMA

I 1995 begyndte flere astronomiske organisationer at udføre "site testing" i Chile med henblik på at finde den bedste beliggenhed for et stort submillimeterobservatorium. Et område i den østlige udkant af Atacamaørkenen blev udpeget som optimalt. Området, der vises på figur 3, ligger langt længere inde i landet end de store optiske observatorier. Der blev indgået en overenskomst mellem *Det Europæiske Syd Observatorium* (ESO), det amerikanske *National Science Foundation*, *National Research Council of Canada* og den chilenske stat om at bygge og drive ALMA (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*; "alma" = "sjæl" på spansk og portugisisk). Det første spadestik på *Llano de Chajnantor*¹ blev taget i 2003. Siden har Japan og Taiwan tilsluttet sig projektet. Opførelsen har kostet omkring 1,5 milliarder dollar. Efter nogle år med afprøvning blev observatoriet indviet den 13. marts 2013.



Figur 3. Landskabet ved og omkring submillimeterobservatoriet ALMA. Området midt i billedet er eksterriortalt og her ligger *Operations Support Facility* (OSF) i en endnu menneskevenlig højde på 2928 m. Her blev ALMAs antenner monteret og testet, og herfra styres samlingen af antennerne på *Array Operations Site* (AOS), som ligger 28 km fra OSF i 5059 m højde. Navne skrevet med gul skrift betegner markante udslukte vulkaner. Kort fremstillet med *Google Earth*.

ALMA befinder sig på et eksterriortalt område, dvs. at Chile ikke har adgang til f.eks. vejbyggeri eller minedrift her. Det er lejet ud i 99 år mod, at astronomer tilknyttet chilenske institutioner råder over op til 10 % af observationstiden (og den bruger de!).

Organisatorisk består ALMA af tre dele: En administrativ enhed i Santiago de Chile samt "Operations Support Facility" (OSF) og "Array Operations Site" (AOS), se figur 3. De to operative enheder er forbundne med et 28 km langt gigahertz fiberkabel.

Observationstid tildeles efter ansøgning ud fra en vurdering af den videnskabelige betydning, idet projekter fra de bidragende lande favoriseres; Danmark er med via ESO. ALMAs videnskabelige stab udfører observationerne afhængigt af vejrforhold og antennernes opstilling. Der observeres døgnet rundt, bortset fra perioder med teknisk vedligeholdelse. Det første

år efter en observation er det kun ansøgerne, som har adgang til data, herefter bliver de alment tilgængelige.

ALMA kan nu foretage målinger ved bølgelængder mellem 0,42 og 3,6 mm (svarende til frekvenser på 84-720 GHz) og fuldt udbygget mellem 0,32 mm og 10 mm (31-950 GHz). De tilgængelige spektralbånd fremgår af figur 2. ALMA er billeddannende, synsfeltet er dog begrænset til ca. 2° (ca. fire månediameter), men opløsningsevnen er overordentlig høj: 10 millibuesekunder. Det svarer til diameteren af en 20-krone-mønt i en afstand på 557 km! Eller detaljer på knap 20 m på Månens overflade. Den rumlige opløsning er 10 gange bedre end hos radioobservatoriet VLA (i New Mexico) og 5 gange bedre end for *Hubble Rumteleskopet* i det optiske. ALMA er dermed det største og mest følsomme instrument i millimeter- og submillimeterområdet. Man kan observere både dag og nat (også Solen og Månen), men dagtimerne er frem til indvielsen mest blevet brugt til teknisk indkøring.

Antennerne

Det nu færdigbyggede observatorium består af i alt 66 store antenner, hvoraf 54 har en diameter på 12 m og er leveret af de europæiske og amerikanske deltagere, mens tolv med en diameter på 7 m er leveret af Japans NAOJ. Antennerne kan anbringes på 192 forskellige fundamenter spredt ud over landskabet. Den mulige indbyrdes afstand mellem antennerne strækker sig fra 15 m til ca. 16 km. Antennerne er alle bygget til at kunne opfylde en række stringente kriterier, herunder følgende:

- Afvigelse fra ideel paraboloidform: 25 μ m for 12 m antenner og 20 μ m for 7 m antenner.
- Retningsnøjagtighed:
 - Absolut afvigelse over hele himlen på højst 2,0".
 - Relativ afvigelse inden for felt på 2° på højst 0,6".
- Omgivelsestemperaturer mellem -20 °C og +20 °C.
- Vindhastigheder på op til 9 m/s.
- Fuld solpåvirkning.
- Antennerne skal kunne tåle flytning og have en forventet levetid på 30 år.

Den relative position af antennerne på jordoverfladen har kunnet bestemmes i 3D med en nøjagtighed på 65 μ m! For at opnå dette har man benyttet observationer af kvasarer, hvis positioner på himlen er kendt med meget stor nøjagtighed.

I antennebrændpunktet sidder en række modtagere anbragt i en *kryostat*. Det er nemlig nødvendigt at nedkøle antennemodtagerne for at varmestråling fra dem ikke generer signalet fra rummet. Kølingen af kryostaten sker med heliumgas med en temperatur på nogle få kelvin.

Antennerne køres i adskilt tilstand til OSF (højde 2928 m), hvor de samles og testes. Flytningen af de 100 ton tunge antenner op til AOS (højde 5059 m) foregår ved hjælp af to specialkonstruerede U-formede(!) køretøjer, *Otto* og *Lore*, fremstillet af det tyske firma *Scheuerle Fahrzeugfabrik*, se figur 4.

¹Det flot klingende navn udtales (med tysk skrivemåde) "Tschach-nan-toor" – og man må gerne rulle på 'r'-et! På lokalt indianersprog betyder det "Stedet for afsked" (med de døde). Sletten tager navn efter den nærliggende vulkantop Cerro Chajnantor (som på *Google Earth* noget misvisende betegnes "Purico Complex", et navn som dækker hele det omkringliggende pyroklastiske skjold).



Figur 4. *Otto* ankommer til AOS med den første antenne efter en køretur på 28 km fra OSF (23. september 2009). Køretøjet kan styres både fra førerhuset nederst i højre side og med en håndholdt styrepult, her båret af manden med seletøjet og gul hjelm. Det har 14 par individuelt styrbare hjul med hver to dæk og kan vende rundt på stedet. Målene på køretøjet er 10 m × 20 m × 6 m og massen er 130 tons.

Antennen omfavnes af køretøjet, der trækker den op på sin rampe og låser den fast. Antennen køres nu i løbetempo de 28 km op til AOS. Her lader man dem forsigtigt glide ned på ét af 192 betonfundamenter med tre sokler af stål anbragt i hjørnerne af en ligesidet tre-

kant. *Otto* og *Lore* bruges i dag til at flytte antennerne, når man ønsker en ny geometrisk opstilling af dem, se figur 5.

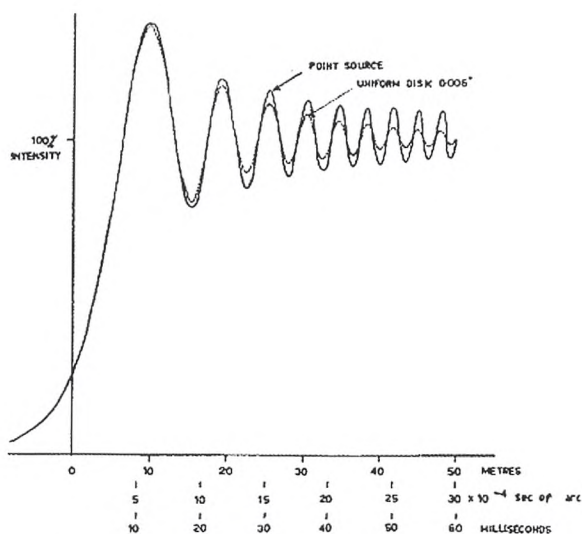
Interferens

ALMAs virkemåde bygger på fænomenet *interferens*, der skyldes, at lys, lige som lyd, har bølgeegenskaber: Hvis to vandbølger løber mod hinanden, og det er to bølgetoppe (eller to bølgedale) der mødes, så vil der ske *konstruktiv interferens*: Der dannes en ekstra stor bølgetop (eller bølgedal). Hvis en bølgetop og en bølgedal mødes, indtræffer *destruktiv interferens*: Der dannes et svækket eller intet udslag.

At et tilsvarende fænomen kan optræde for lys blev første gang påvist gennem et berømt forsøg udført af Thomas Young i 1803, der viste, at lys plus lys kan resultere i mørke. Man kan med lidt fingersnilde selv konstatere fænomenet: Hold den ene hånds tommel og pegefinger tæt mod hinanden; brug en finger fra den anden hånd som støtte til at fastholde en ganske lille afstand mellem de to andre fingre. Holder man nu dette mellemrum op mod et øje og sigter gennem det mod en lys flade, vil man i gabet kunne se en række lyse og mørke striber som tegn på interferens.



Figur 5. Luftfoto af antennerne på Llano de Chajnantor fra december 2012 fire måneder inden indvielsen af ALMA den 13. marts 2013. De mange trekantede flader er betonfundamenter, som antennerne anbringes på. De giver den mekaniske stivhed, som kræves til en præcis retningsindstilling, og de leverer elektrisk strøm og kølegas til driften samt dataforbindelse til AOS via optisk fiberkabel. Antennerne placeres af to specialkonstruerede køretøjer med en nøjagtighed på 2 mm. Midt i billedet ses en tæt gruppe på tolv 7-meter og fire 12-meter antenner. De udgør *ALMA Compact Array*, som bruges til iagttagelse af udstrakte objekter (molekyleskyer, nære galakser). Desuden kan tælles 32 af de i alt 66 store antenner på 12 m, der giver anlægget den store opløsningsevne. Til højre finder vi *Technical Building*, som rummer supercomputeren og beskedne faciliteter for ingeniører og andre medarbejdere. Man overnatter ikke her. I mellemgrunden ses det karakteristiske bølgede landskab dannet af sporadiske regnskyl mellem december og februar, hvor en jetstrøm kan skifte retning og sende fugtig luft ind østfra. Bagerst i billedet ser vi toppen af den imponerende stratovulkan *Licancabur*, hvis sne er næsten bortsmettet på dette sommerbillede. Foto: Clem & Adri Bacri-Normier/ESO.



Figur 6. Under en måneokkultation forsvinder en stjerne bag Månen og dukker senere op igen. På grund af *diffraction* af lyset ved Månens rand sker disse begivenheder ikke brat. Graferne viser det teoretiske forløb af intensiteten ved stjernens genopdukken. Nulpunktet angiver, hvor stjernen ville blive synlig, hvis der ikke var diffraction. Faktisk ses den lidt før, intensiteten vokser hurtigt til over 100 % og nærmer sig så det normale niveau efter en række svingninger. Den ydre kurve viser forløbet for en punktførm stjerne, den indre for en stjerne med en jævnt lysende overflade og en vinkeldiameter på 6 millibuesekunder. På de tre første akser vises dels mønsterets udstrækning ved jordoverfladen, udstrækningen på himlen i buesekunder samt tidsforløbet; vi ser, at registrering kræver et hurtigt tidsopløsende fotometer!

Hvordan kan ALMA danne billeder af områder på himlen ved at lade stråling fra de mange antenner interferere? Dette er et overordentligt kompliceret problem, så lad os i stedet betragte en simplere situation. Når Månen bevæger sig hen over himlen, vil den uundgåeligt med mellemrum komme til at dække stjerner. Man taler om en *måneokkultation*, og det er ganske charmerende at opleve begivenheden i en lille kikkert. Mange amatørastrofysikere brugte tidligere tid på at bestemme tidspunkter for okkultationer for at forbedre kendskabet til Månens bane. Men der er også en anden videnskabelig mulighed. For det menneskelige øje vil en stjerne, der kan opfattes som et lyspunkt, forsvinde eller genopdukke øjeblikkeligt. På grund af lysets bølgenatur er situationen mere kompliceret, der vil optræde afvigelser fra retlinjet udbredelse, kaldet *diffraction*. Det mønster, som optræder ved en okkultation, er vist på figur 6. Allerede inden stjernen geometrisk set burde være synlig, bøjer noget af dens lys sig rundt om Månens rand, og der viser sig herefter et bølgemønster i intensiteten, som hurtigt dæmpes og bliver konstant.

Men selv om stjerner er langt væk, er de ikke punktluskilder, men små lysende skiver. Det samlede signal bliver da summen af bidragene fra de forskellige dele af stjerneskiven. Da en top fra én del af skiven kan mødes med en dal fra en anden del, bliver det fremkomne mønster mere udtværet, se igen figur 6. Man måler nu intensitetsforløbet ved stjernens genopdukken og tilpasser data med en model, der indeholder stjernens vinkelradius; hvis data er gode nok, vil man også kunne udtale sig om intensitetsforløbet hen over stjerneskiven!

Pointen er altså, at man ved interferometriske målinger kan slutte sig tilbage til lysfordelingen på himlen. Og det er netop, hvad man gør med ALMA. Andre observatorier benytter også interferometri. Det ældre radioobservatorium *Very Large Array* i New Mexico består af 27 antenner (det var mange i sin tid!) og ESOs optiske *Very Large Telescope* (med fire separate 8,2 m-teleskoper) er eksempler. Her lader man dog strålingen fra de forskellige kilder interferere fysisk og registrerer det derved fremkomne signal. Ved ALMA derimod registreres og digitaliseres output fra de mange antenner, hvorefter man matematisk forener de digitaliserede signaler.

ALMAS korrelator og behovet for oxygen

Styring af de mange radioteleskoper og især databehandling af deres målinger er en meget omfattende proces. Det har derfor været nødvendigt at forsyne anlægget med slagkraftigt dataudstyr. Dette er lokaliseret i *Technical Building* nær antennekomplekset og består af to *korrelatorer*, supercomputere der opererer med 17 petaflops/s ($1,7 \cdot 10^{16}$ operationer per sekund med flydende tal). Den ene korrelator kan bearbejde signaler fra op til 64 store antenner. Output fra hvert par af disse antenner giver et interferenssignal, som afhænger af de to antenners geometriske placering. Med 64 antenner bliver det op til $64 \cdot 63/2 = 2016$ samtidige par af signaler, som korrelatoren skal bearbejde for at producere et billede. Den anden korrelator betjener *ALMA Compact Array* (se figur 5). I bygningen findes også en lokal oscillator til frembringelse af ekstremt stabile frekvenser (et "atomur"). Den matematiske model, som er udviklet til brug for den løbende datareduktion, tager bl.a. hensyn til 1) den såkaldte "Chandler-wobble", dvs. det fænomen, at Jordens rotationsakse ikke ligger helt fast i den geometriske jordfigur, men ved polerne flytter sig i en uregelmæssig cirkellignende figur med en radius på 0,14" (svarende til 4 m) og en periode på 433 døgn samt 2) effekter fra almen relativitetsteori. Korrelatoren beskrives fint i [6].

Under opstillingen af korrelatoren blev luften i bygningen tilført ekstra oxygen for at ingeniører og teknikere kunne holde hovedet klart. Dette system kan stadig tages i brug om nødvendigt. Også som besøgende skal man kunne klare opholdet i de store højder. Ved portnerbygningen ved indgangen til området bliver man indlagt til at se en video om sikkerhedsforskrifter i forbindelse med besøget. Efter en køretur på 15 km (grøn rute på figur 3) når man AOS i 2928 m højde. Her undersøger en læge ens blodtryk og iltoptagelse, og kun i tilfælde af en opadrettet tommelfinger får man lov til at komme videre op. En pressemedarbejder hos ALMA står for transporten de sidste 28 km op til OSF (5059 m, cyan rute på figur 3) og rundvisningen her. Turen foregår i en jeep udstyret med iltflasker til nødstilfælde og guiden skal melde sig over radio for hver 10 kørte kilometer; man tager sikkerheden meget alvorligt. Chajnantor-sletten er et fortryllende sted, omgivet af mange imponerende (udslukte) vulkantoppe. Landskabet er ørkenagtigt og flere steder bølgende.

Himlen er markant mørkere end ved havoverfladen, og mængden af ultraviolet stråling er høj. Og så skal man pga. den lave iltkoncentration bevæge sig stille og roligt når man går rundt!

Resultater

ALMA opererer i et område af det elektromagnetiske spektrum, som svarer til termisk stråling udsendt fra meget kolde objekter. Ifølge *Wiens forskydningslov* gælder for varmestråling, at

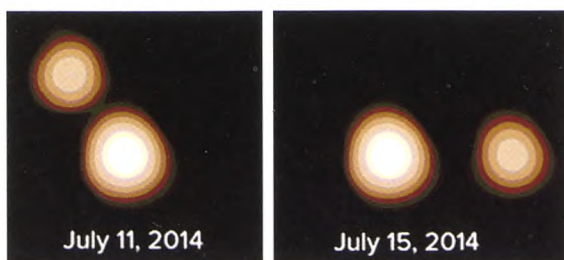
$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{konstant} \quad (1)$$

hvor $\lambda_{\max}$ er den bølgelængde ved hvilken objektets strålingsstrøm er størst og T er dets absolutte temperatur. I indledningen blev det nævnt, at vores øjne er mest følsomme ved den bølgelængde, hvor Solen ($T = 5788$ K) udsender mest lys, nemlig ca. $\lambda_{\max} = 500$ nm. Med forskydningsloven til rådighed er det nu en smal sag, at vise, at ALMAs bølgelængdeområde mellem 0,32 mm og 10 mm svarer til temperaturer på hhv. 9 K og 0,3 K. ALMA er altså i stand til at måle på ekstremt kolde himmellegemer.

ALMA har fem primære arbejdsområder: 1) Stjerneudvikling og Solen, 2) cirkumstellare skiver (f.eks. protoplanetsystemer), exoplaneter og Solsystemet, 3) interstellart stof, stjernedannelse og astrokemi (lav temperatur!), 4) galakser og galaksekerner samt 5) kosmologi og det fjerne Univers. I det følgende beskriver jeg nogle af de resultater, som man hidtil har opnået.

Pluto-Charon-systemet

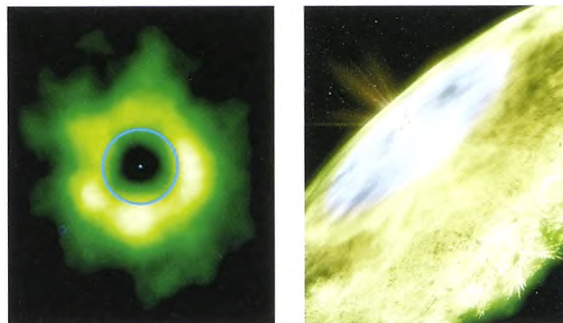
ALMA er noget usædvanligt brugt til astrometri, nemlig til at fastlægge nøjagtige positioner på himlen af dværgplaneten Pluto og dens store måne Charon. Det er sket, fordi NASA har rumsonden *New Horizons* på vej mod Pluto og dens system af 5 måner, hvortil den ankommer i juli 2015. Plutos position var hidtil kun kendt med en nøjagtighed på omkring 1000 km. Når man betænker, at afstanden er 4,5 milliarder km, så er det ikke så tosset endda. Men for at spare så meget som muligt på sondens brændstof, må positionen så tidligt som muligt kendes så nøjagtigt som muligt. Et forskerhold fik derfor lov til at udnytte, at ALMA har en vinkelopløsning, der er 5 gange bedre end *Hubble Rumteleskopet*, og kan måle positioner i forhold til meget fjerne kvasarer (læs: meget fjerne himmellegemer, der ikke flytter sig på himlen!), se figur 7. Man kan nu foretage en sikrere kurskorrektur af *New Horizons*.



Figur 7. Astronomer ved *National Radio Astronomy Observatory* har observeret Pluto og dens måne Charon med ALMA i november 2013 samt i april og juli 2014 (vist herover). De indhøstede data bruges til markant at forbedre kendskabet til Plutos position. Fotos: NRAO/AUI/NSF.

Is og støv omkring TW Hydrae

Denne stjerne, som befinder sig i en afstand af 176 lysår og skønnes at have en masse på 0,8 solmasser, tilhører klassen af *T Tauri*-stjerner. Her er der tale om helt unge stjerner, som stadig er under sammentrækning og endnu ikke har nået den langvarige hydrogenforbrændende fase. Halvdelen er omgivet af en cirkumstellare skive og TW Hydrae er det nærmeste medlem af denne type. Den skønnes at have en alder på kun 5-10 mio. år. Man har brugt 26 af ALMAs antenner til undersøgelse af systemet, og resultatet vises i figur 8.

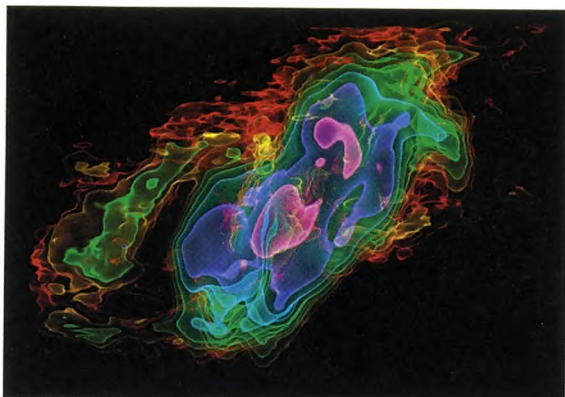


Figur 8. Venstre: Den unge stjerne TW Hydrae som ALMA har observeret den. Stjernen selv er for varm til at give sig til kende i submillimeterområdet. Radius i den blå cirkel svarer til Neptuns afstand i Solsystemet. Grøn farve markerer, hvor der er blevet påvist sne af carbonmonoxid (CO) og det begynder i en afstand på ca. 30 au (astronomiske enheder, 1 au = 149.597.870.700 m, omtrent Jordens gennemsnitsafstand fra Solen) fra stjernen. Højre: En tegners fremstilling af is- og gasskiven omkring stjernen. Snegrænsen for CO, inden for hvilken der er for varmt til, at der kan dannes CO-sne, ses ved overgangen fra den indre gas- og støvskive med H₂O og CO₂-is markeret med blå og den ydre grønt tegnede CO-sneskive. Grænsen er observeret netop, hvor man teoretisk formodede, at den ville være. Foto og grafik: ESO og Chunhua Qi.

På figur 8 (t.v.) ser vi næsten lodret ind på den protoplanetariske skive omkring stjernen. ALMA har målt stråling fra molekyleionen N₂H⁺ (diazetyl), som er kraftigt strålende ved frekvensen 93,174 GHz, svarende til bølgelængden 3,22 mm, hvilket jo lige er guf for ALMA. Fidsen er, at diazetyl let ødelægges af CO på gasform. Når det kan påvises i de ydre områder, må det være fordi CO her er frosset til is. Der findes også snegrænser for hyppige molekyler som H₂O, CO₂ og CH₄. For en solignende stjerne ligger snegrænsen for vand i en afstand fra Solen mellem Mars og Jupiter, og for carbonmonoxid omtrent i Neptuns afstand, som vist på figur 8 (t.h.). De forskellige istyper kondenseres på støvkorn, der bliver klæbrige. Det forbedrer muligheden for sammenklumpning og for dannelse af *planetesimaler*, de kilometerstore byggesten, som er forstadiet til planeter.

Starburst-galaksen NGC 253

ALMA kan måle *radialhastigheder* med en nøjagtighed på 50 m/s. Et objekts radialhastighed er jo den del af bevægelsen, som foregår i synslinjens retning. Den ændrer signalets bølgelængde og frekvens og kendes fra passerende udrykningskøretøjer, der nærmer sig med en højere og fjerner sig med en lavere frekvens end den hvilende lydkilde.



Figur 9. Hvad ser vi her? Det kunne være et billede til en Rorschach-test, men det viser slet ikke et fysisk objekt, men derimod et snit gennem en 3D-fremstilling af bevægelsesforholdene for gas omkring centret af galaksen NGC 253, hvor der finder en voldsom stjernedannelse sted. I vandret retning vises gassens afstand fra centret, i lodret retning dens hastighed; farverne indikerer strålingens styrke med magenta som stærkest og rødt som svagest. De to magenta områder nær midten af billedet svarer til gasbobler, som udsendes i hver sin retning fra centret. En roterende 3D-illustration kan findes via [8]. Grafik: ALMA/ Erik Rosolowsky.

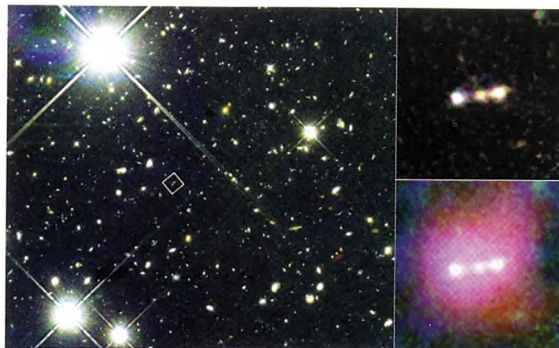
Spiralgalaksen NGC 253 befinder sig i en afstand på 11,3 mio. lysår fra Mælkevejsgalaksen og er af *starburst*-typen, dvs. der finder en usædvanligt voldsom stjernedannelse sted i dens centrale områder. Dette er en forholdsvis kortvarig fase i en galakses udvikling, fordi en stor mængde interstellar gas omdannes til stjerner. En gruppe på tolv astronomer har med ALMA målt stråling udsendt af ^{12}CO -molekyler, som er den mest almindeligt anvendte sporgas for molekyleskyer. Resultatet af deres analyse vises på figur 9. For første gang har man iagttaget udslyngningen af store mængder kold gas fra en galakses centrale del som følge af det tryk, som de mange nydannede stjerner udøver. Det skønnes, at starburst-området årligt mister omkring 9 solmasser og at gastætheden her om 60-120 millioner år vil være reduceret så meget, at stjernedannelsen falder markant fra den nuværende høje rate.

“Himiko”, et galaksefoster

Figur 10 illustrerer et eksempel på anvendelse af ALMA til undersøgelse af det fjerne Univers og på, at det kan være nyttigt at sammenholde resultater opnået i forskellige dele af spektret. Det indrammede område viser tre lysende klumper, som først blev undersøgt med det japanske Subaru-teleskop på Mauna Kea (Hawaii) og kaldt “Himiko” efter en legendarisk japansk dronning. Det infrarøde rumteleskop *Spitzer* har leveret data, der fører til en samlet masse på omkring 40 milliarder solmasser. De tre stjerneklumper forventes i fremtiden at smelte sammen og danne en galakse.

I nære galakser har ALMA påvist store mængder af carbon (i form af CO-molekyler), men man har intet fundet i *Himiko*. Forklaringen er nærliggende: Den gas, som blev dannet kort efter *Big Bang*, bestod praktisk taget udelukkende af H og He. Tungere grundstoffer som C og O blev først dannet senere i det indre

af stjerner og siden, bl.a. ved supernovaeksplosioner, spredt ud i det interstellare stof. Men *Himiko* er så ungt et objekt, at der endnu ikke har været tid til at producere tungere grundstoffer. Vi ser her et objekt, som består af førstegenerations-stjerner!



Figur 10. Billedet til venstre viser et lillebitte himmelområde fotograferet af *Hubble Rumteleskopet*. Det lille firkantede område vises forstørret øverst til højre. Lyset i de tre pletter er udsendt da Universet kun var 800 millioner år gammelt. Udstrækningen er ca. 55.000 lysår. Nederst til højre ses de tre klumper omgivet af en enorm sky af hydrogen. Vi ser her en galakse under dannelse i det tidlige Univers. Fotos: NASA, ESA og Masami Ouchi.

Egnen omkring San Pedro

ALMA OSF ligger 33 km sydøst for ørkenbyen *San Pedro de Atacama*, se figur 3. Byen og egnen omkring den er afgjort et besøg værd: Vest for byen finder man *Valle de la Luna* og *Valle de la Muerte*, der rummer fantastiske landskabsformer og farver, og hvor der ikke er faldet nedbør i flere hundrede år. Der er mulighed for udflugter f.eks. til den irgrønne bolivianske sø *Laguna Verde* med flamingoer og *vicuñaer* (en vild lamaart) eller til *El Tatio*-gejserne i morgensol. Man kan også køre til saltsletterne i Atacama-ørkenen syd for byen. Endvidere arrangerer flere operatører aftenfremvisning af stjernehimlen, en af dem har ti teleskoper opstillet til at vise hver sit interessante objekt på den sydlige himmel og slutter med servering af varm kakao. Der findes udmærkede hoteller i San Pedro, som kan nås i bil på en fortrinlig asfaltvej fra lufthavnsbyen Calama.

Afslutning

I maj 2014 endte den første observationscyklus (*Cycle 1*), hvor man ikke benyttede indbyrdes antenneafstande større end 1,5 km. I juni 2014 gik ALMA ind i *Cycle 2*. Her vil man i første omgang øge til afstande op til 10 km og efterhånden til maximum på 16 km. Man vil herefter skifte mellem kompakte opstillinger (der kan registrere udstrakte himmelobjekter) og udbredte konfigurationer (der giver stor opløsningsevne) alt efter, hvad de godkendte videnskabelige projekter kræver. Mens en antenne flyttes, kan de øvrige stadig observere.

Af hensyn til de læsere, som ikke kan få tiden til at gå en søndag eftermiddag, kan som et kuriosum nævnes, at en japansk(!) medarbejder ved ALMA har konstrueret ark, som kan klippes ud og samles til bevægelige modeller af et radioteleskop hhv. en antennetransportør, se henvisning [9].

Litteratur

- [1] ALMAs hjemmeside: <http://www.almaobservatory.org>
- [2] ESOs hjemmeside om ALMA, <http://www.eso.org/sci/facilities/alma.html>
- [3] ALMA Newsletters (informativ, men går kun frem til februar 2012), <http://almascience.eso.org/news/newsletters/aggregator>
- [4] *60 minutes* om ALMA (30 min, fornem formidling, men reklamebelastet), <http://www.cbsnews.com/videos/alma-peering-into-the-universes-past>
- [5] *The Birth of the ALMA Observatory* (reklamefri, 52 min, grundig, amerikansk stil), <https://www.youtube.com/watch?v=lQ2m-GSaX8E>
- [6] ALMAs korrelator, <http://almaobservatory.org/en/visuals/videos/521-esocast-51-all-systems-go-for-highest-altitude-supercomputer>
- [7] Indvielse med mere, 6 min, <http://www.eso.org/public/videos/eso1312b>
- [8] 3D visualisering af CO-gas i NGC 253, <http://www.eso.org/public/usa/videos/eso1334b>
- [9] Kartonmodeller, <http://alma.mtk.nao.ac.jp/e/multimedia/papercraft>



Holger Nielsen er cand.scient. i astronomi og fhv. lektor i fysik, matematik og astronomi ved Støvring Gymnasium. Han medvirkede i 1990'erne i arbejdet med at få indført astronomi som gymnasiefag. Han har i 25 år deltaget i forevisninger ved Urania Observatoriet i Aalborg. Holger og konen var i februar 2014 inviteret på besøg ved ALMA.

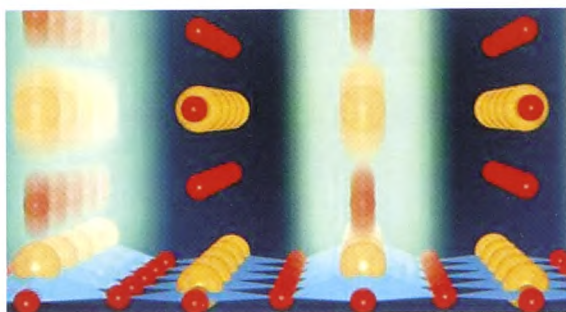
KVANT-nyheder

Af *Sven Munk*, KVANT

Superleder ved stuetemperatur?

FASTSTOFFYSIK. Man kender efterhånden mange materialer/stoffer, som bliver superledende ved meget lave temperaturer. Det vakte opmærksomhed, da man opdagede, at et keramisk materiale kunne blive superledende ved en relativ høj temperatur. Det drejer sig om det nu velkendte materiale Yttriumbariumkobberoxid (YBaCuO eller blot "YBCO"). Sidste år blev det påvist, at samme materiale kortvarigt kan blive superledende ved stuetemperatur, ved bestråling med en "IR-laser-blitz".

Forskerne giver følgende beskrivelse af mekanismen bag dette fænomen: Krystalgitteret i YBCO har skiftevis et ledende og ikke-ledende lag. Superledende strøm gennem det ikke-ledende lag kan normalt kun løbe, når temperaturen er langt under stuetemperatur.



Billedet illustrerer krystalstrukturen i YBCO. Det antyder, at atomerne er i bevægelse.

At IR-stråling kan fremkalde superledning virker ikke som en nærliggende idé, men forskerne udførte følgende eksperiment: IR-stråling blev sendt ind i en krystal af YBCO. Umiddelbart efter en IR-laser-puls fulgte en Röntgen-puls, hvis opgave var af afsløre, om der var sket ændringer i selve krystalstrukturen. Her blev det så afsløret, at det ikke-ledende

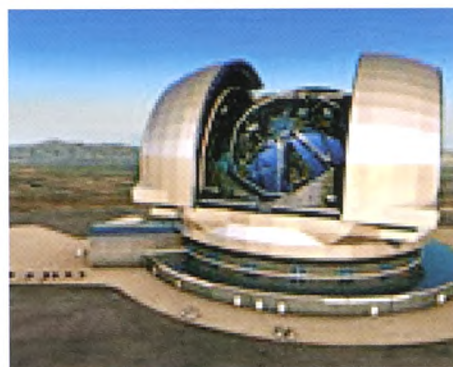
lag kortvarigt blev en lille smule tyndere. Herved forbedres muligheden for at opretholde en superledende strøm. Dette forhold underbygges af de teoretiske beregninger, forskerne har udført. Andre superleder-forskere vil utvivlsomt finde resultatet interessant. Hvornår stuetemperatur-superledere bliver en del af hverdagen, tør ingen spå om.

Kilder: R. Mankowsky et al., "Nonlinear lattice dynamics as a basis for enhanced superconductivity in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ ", *Nature* 2014, <http://dx.doi.org/10.1038/nature13875>; Roman Mankowsky, Max-Planck-Institut für Struktur und Dynamik der Materie, <http://qcemd.mpsd.mpg.de/index.php/roman-mankowsky.html>.

Europæisk superteleskop: E-ELT

ASTRONOMI. ESO (European Southern Observatory) har besluttet at bruge én mia. euro på at bygge European Extremely Large Telescope (E-ELT). Teleskopet placeres på højderyggen Cerro Armazones i Atacama-ørkenen, Chile. Spejlet får en diameter på 39 m, og bliver således blandt de største i verden.

Ifølge planerne forventes det at være helt færdigt om 10 år, men det ser ud til at nogle typer af målinger kan begynde tidligere. Teleskopet skal arbejde i det synlige og nære infrarøde område af spektret. Temaer for forskningen vil være exoplaneter, stjerner i de nære galakser og det fjerne univers.



Kilder: <http://www.eso.org/public/about-eso/faq/faq-e-elt>; <http://www.eso.org/public/archives/releases/sciencepapers/eso1440/messenger.pdf>