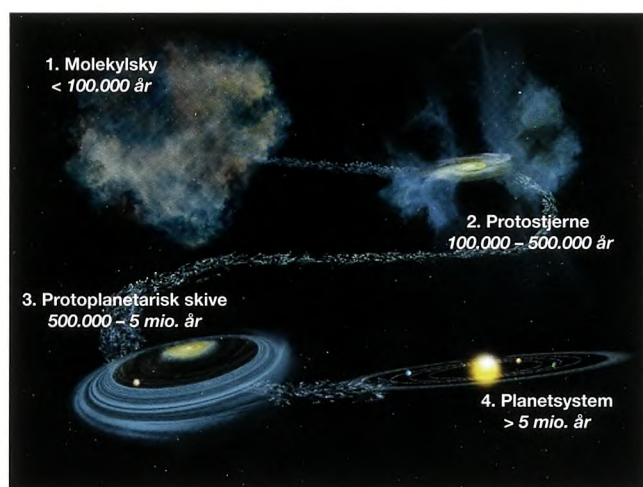


ALMA stiller skarpt på solsystemets og exoplaneters oprindelse

Jes Jørgensen, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Sidste år (2019) blev den ene halvdel af Nobelprisen i fysik tildelt Michel Mayor og Didier Queloz for den første opdagelse af en exoplanet kredsende om en anden sol lignende stjerne. Fundet af denne exoplanet var med til at starte en revolution inden for astrofysikken, og astronomer har siden påvist mere end 4000 exoplaneter. Disse opdagelser har fremhævet nogle af de spændende spørgsmål inden for astrofysikken: Hvordan bliver sådanne exoplaneter skabt, i hvilken grad ligner de planeterne i vores eget solsystem, og kan liv være opstået på nogen af disse planeter?

En måde at angribe disse store spørgsmål på er at studere fysikken og kemien i dannelsesprocessen for stjerner og planeter og undersøge, hvordan deres udvikling præger strukturen af det resulterende planetsystem. Vores generelle billede af den tidlige udvikling af stjerner og planeter er illustreret i figur 1: Stjerner dannes, når tætte områder i kolde, interstellare skyer af støv og gas, "molekylskyer", falder sammen pga. tyngdekraften. En del af dette støv og gas bliver til den unge "protostjerne", men på grund af impulsmomentbevarelse er der også en del, der samler sig i en "protoplanetarisk skive" omkring protostjernen. Støvet, der oprindeligt er i form af partikler med størrelser på op til en mikrometer, kan i denne skive gradvist klumpe sig sammen og vokse til større klippestykker, til protoplaneter og endeligt til et egentligt planetsystem.



Figur 1. Stjerner dannes, når tætte områder af støv og gas i kolde molekylskyer falder sammen pga. tyngdekraften og danner en ung protostjerne (1). Pga. bevarelse af impulsmoment samler en del af støvet og gassen sig i en protoplanetarisk skive omkring den unge protostjerne, mens resten falder ind i protostjernen, som dermed vokser i masse (2). Efterhånden forsvinder støvet og gassen omkring protostjernen (3). I skiven begynder støv at klumpe sig sammen og vokse sig større og ca. 5 mio. år efter skyen faldt sammen, er den unge stjerne omgivet af et system af (proto)planeter (4). Grafik: Bill Saxton (NRAO/AUI/NSF).

Ikke mindst takket være Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) har studier af stjerne- og planetdannelse flyttet sig meget frem inden for det sidste årti. ALMA er et internationalt teleskop placeret

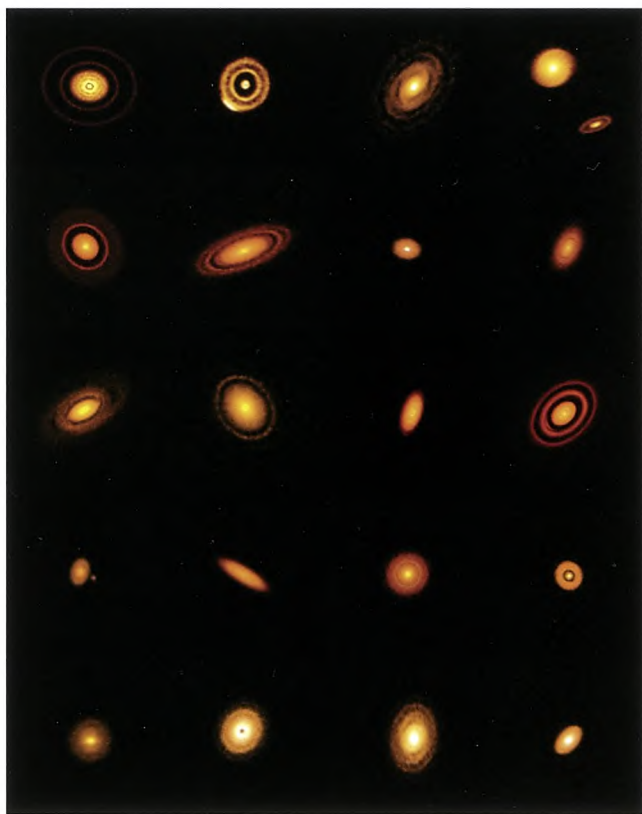
i 5 km højde på Chajnantor-plateauet i Andesbjergene i det nordlige Chile. ALMA består af 66 antenner – de fleste med en diameter på 12 m – der observerer stråling med bølgelængder mellem 0,3 og 3 mm. Ved at kombinere signalerne fra alle antennerne kan astronomer konstruere billeder, som var de observeret af et enkelt teleskop med en størrelse svarende til det område, antennerne er spredt udover. Dette kan være helt op til 16 km – dvs. ALMA kan give en opløsning, der er mere end tusind gange bedre, end hvad der kan opnås med blot en enkelt antenne. Derudover er ALMA utroligt følsomt og dermed velegnet til at observere de fine detaljer i fordelingen af støv og gas i protoplanetariske skiver.



Figur 2. Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) på Chajnantor-plateauet i det nordlige Chile. Ved at kombinere signalerne fra de 66 radioantenners kan man bruge ALMA til at lave billeder svarende til observationer fra et enkelt teleskop med en diameter svarende til udstrækningen af de 66 radioantenners. Foto: ESO/C. Malin.

En tydelig illustration af ALMA's muligheder for studier af planetdannelsesprocessen kommer fra et stort observationsprogram "Disk Substructures at High Angular Resolution Project (DSHARP)" [1]. I dette program observerede en gruppe astronomer støvet i 20 protoplanetariske skiver omkring stjerner med aldre på omkring 1 mio. år, og billederne af disse er vist i figur 3. Som man tydeligt kan se, viser billederne, at ringe er opstået i fordelingen af skivernes støv. Dette er et klart tegn på, at planetdannelse finder, eller endda har fundet, sted i skiverne: Enten at støvkornene i skiverne har

vokset sig større end bølglængden for den observerede stråling, dvs. større end 1 mm, eller at (proto)planeter allerede er tilstede og er begyndt at rydde skiverne for støv og gas.



Figur 3. ALMA's billeder af den termiske stråling fra støvkorn i 20 protoplanetariske skiver omkring stjerner, der er ca. 1 mio. år gamle. Alle skiverne viser ring-strukturen – en indikation af, at planetdannelse finder, eller har fundet, sted i skiverne tidligere i deres udvikling [1]. Grafik: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), S. Andrews m.fl.; NRAO/AUI/NSF, S. Dagnello.

En vigtig pointe er, at alle de observerede skiver udviser sådanne strukturer, dvs. at disse processer må starte endnu tidligere i protostjernens udvikling, mens den stadig er indhyllet i resterne af den tætte kerne i molekylskyen. ALMA-observationer af enkelte, nære protostjerner viser, at der allerede blot 100.000 år efter dannelsen af protostjernen rent faktisk findes støvkorn på én millimeter eller mere i skiverne [2]. Disse resultater viser, at planetdannelse starter tidligere, end vi hidtil har troet, og også at de fysiske, og kemiske, betingelser i molekylskyen omkring den unge stjerne sandsynligvis spiller en vigtig rolle for sammensætningen af de planetsystemer, der dannes der.

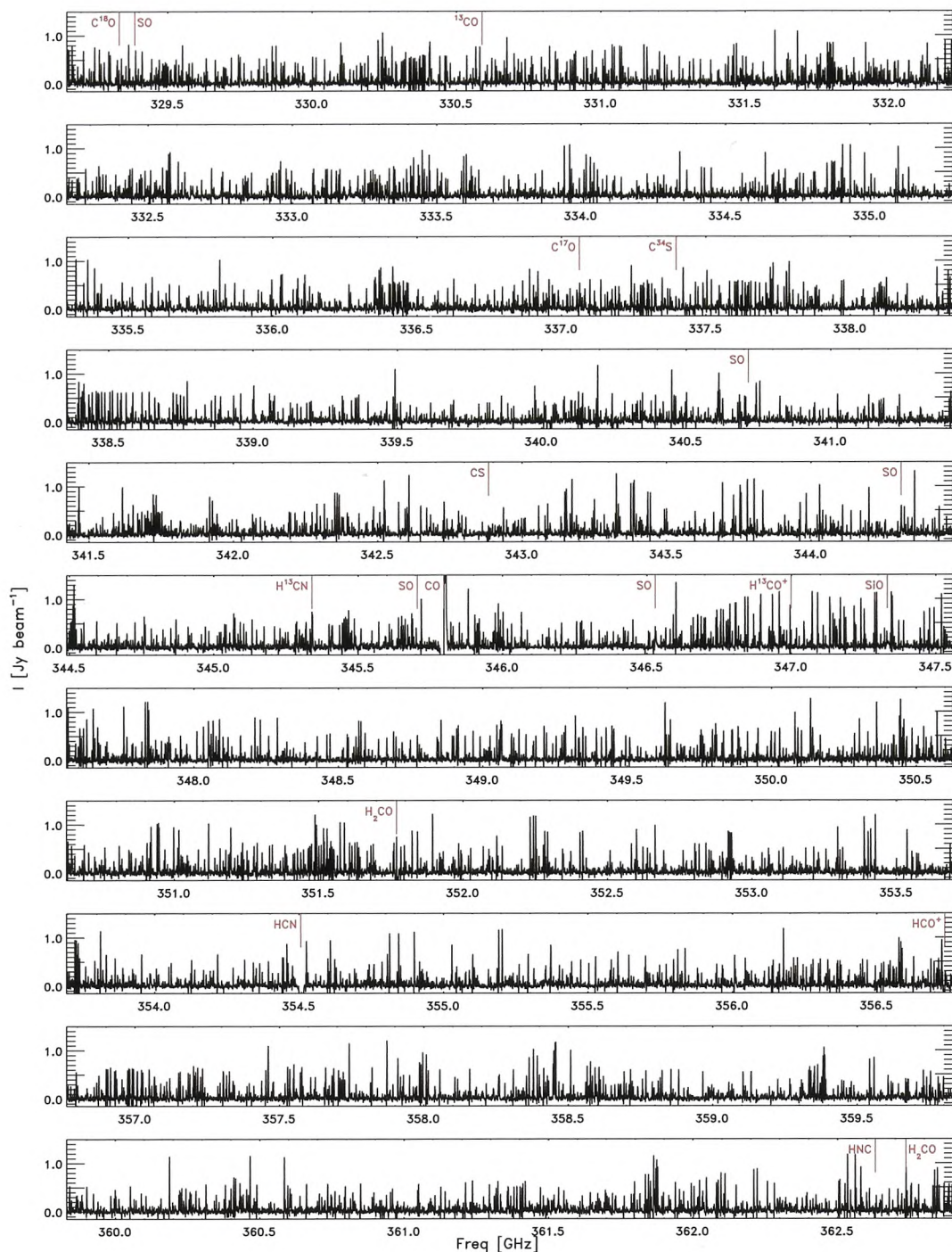
Andre meget vigtige bidrag fra ALMA omhandler lige præcis den kemiske kompleksitet, som kan opstå i stjerne- og planetdannende områder. Forskellige molekyler i gassen omkring de unge stjerner udsender stråling ved helt specifikke frekvenser svarende til, hvordan de bevæger sig (roterer og vibrerer). Disse "spektrale fingeraftryk" (se figur 4) kan astronomer sammenligne med spektroskopiske målinger fra laboratorier på Jorden og dermed kortlægge helt præcist hvilke molekyler, der befinder sig i gassen omkring unge stjerner, hvor hyppigt forekommende molekylerne er, samt hvilken temperatur gassen har [3].

Med ALMA's høje følsomhed kan molekyler med selv meget små forekomster rent faktisk måles. Fx har vi ved hjælp af ALMA vist, at der i gassen omkring helt unge stjerner findes relativt høje forekomster af (for astronomer) forholdsvis komplekse organiske molekyler, dvs. kulstofholdige molekyler med op til 10–12 atomer. Sådanne molekyler er interessante, da de måske kan udgøre nogle af de simpleste byggesten for liv, som vi kender det [4,5]. Et eksempel på dette fra ALMA's allertidligste dage var vores opdagelse af glykolaldehyd, $\text{CH}_2(\text{OH})\text{CHO}$, et simpelt, sukkerlignende molekyle som på Jorden er det første skridt i en reaktionskæde, der leder til dannelsen af ribose-sukker – grundstammen i RNA [6].

Men ALMA kan faktisk tage dette endnu et skridt videre og give indsigt i, hvordan disse molekyler dannes. ALMA giver os også mulighed for at måle forekomsten af såkaldte "isotopologer" af molekyler såsom glykolaldehyd, dvs. molekyler, hvor et eller flere af atomerne er udskiftet med sjældnere isotoper, fx brint udskiftet med deuterium eller ^{12}C udskiftet med ^{13}C . Selvom disse isotopologer er betydelig sjældnere end de "almindelige" molekyler, gør ALMA's høje følsomhed det muligt at detektere dem. Deres relative forekomster er igen meget afhængige af hvordan og under hvilke betingelser, molekylerne dannes.

Tilstedeværelsen af de organiske molekyler samt deres relative forekomster peger på, at støvkornene spiller en anden vigtig rolle under dannelsen af stjerner og planeter. Laboratorieforsøg og beregninger peger på, at det generelt er svært at danne en række af disse organiske molekyler i gassen omkring de unge stjerner. Tætheden af gassen er simpelthen for lav til, at kemiske reaktioner er effektive nok til at få dannet de pågældende molekyler i målelige mængder. Også forekomsterne af isotopologerne af de komplekse, organiske molekyler peger på, at andre processer er vigtige. En mulighed er, at molekylerne dannes i iskapper på overfladen af støvkornene: Ved molekylskyernes lave temperaturer vil simple molekyler som CO og H_2O fryse ud som is på overfladen af støvkornene. Der kan de reagere med andre molekyler og atomer og derigennem stige i kompleksitet. Når støvet og gassen så falder ind tæt på protostjernen, stiger temperaturen, og molekylerne fra isen fordamper ud i gassen, hvor vi observerer dem med ALMA. Dvs. både planetdannende skiver og komplekse organiske molekyler er til stede tæt på de unge stjerner tidligt i deres udvikling.

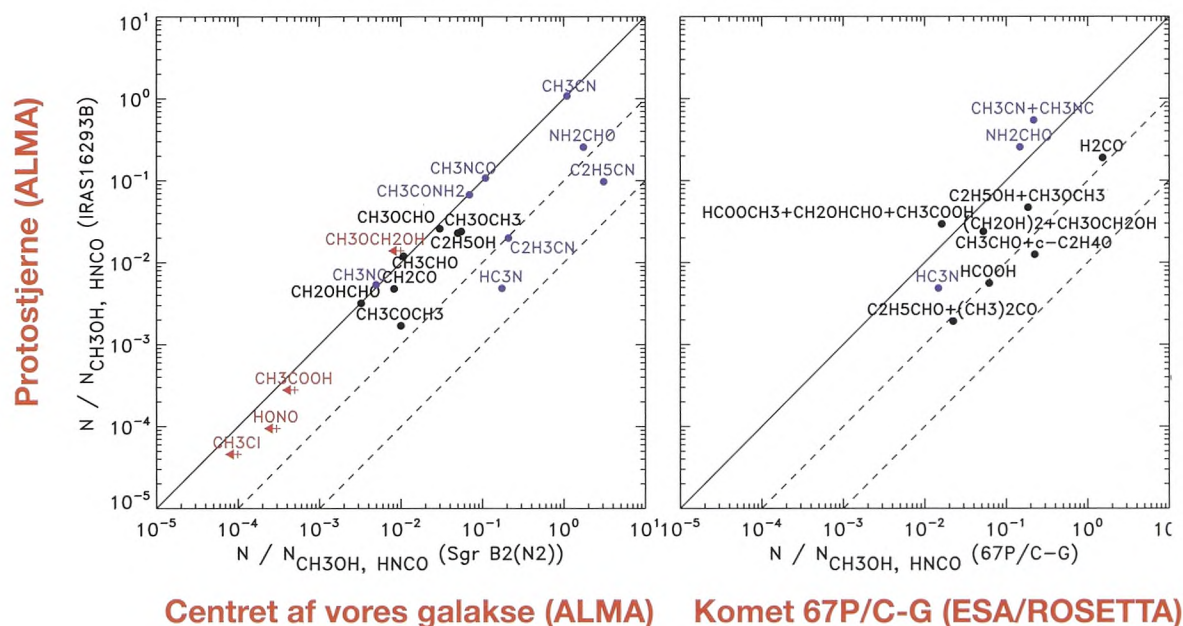
Et naturligt spørgsmål er hvor meget variation, der er i kemien blandt forskellige molekylskyer og dermed også, potentielt set, hvor stor kemisk variation, der er i materialet, der kan nedarves til nydannede planeter. Det venstre panel i figur 5 sammenligner forekomsten af en række organiske molekyler målt i retningen af en nær, sol lignende protostjerne blot 450 lysår borte, med deres forekomst i gas tæt på centret af vores egen galakse, Mælkevejen, mere end 25.000 lysår fra Solen. Tæt på centret af Mælkevejen findes en række molekylskyer, hvori stjerner er blevet dannet for nylig, inklusiv stjerner med betydeligt større masser end vores egen sol. Opvarmningen fra disse massive stjerner samt



Figur 4. Spektrum af gassen omkring ung protostjerne fra ALMA-observationer. Linjer fra en række simple molekyler er vist. Størstedelen af de resterende linjer (ca. 10.000 i alt) stammer fra komplekse organiske molekyler (mere end 100 forskellige) i den varme gas på skalaer svarende til udstrækningen af vores eget solsystem. Fra [4].

energigig stråling fra det sorte hul i centret af Mælkevejen gør, at fysikken i de molekylskyer adskiller sig signifikant fra betingelserne i de stjernedannende områder tæt på Solen. Alligevel viser figur 5, at forekomsten mellem disse områder stemmer overordentlig godt overens – altså, at kemien viser en stor grad af robusthed over for forskellene i fysik (se også [7]). Hvis dette resultat kan generaliseres til andre stjernedannende områder og andre trin i udviklingen af stjerner og planeter, vil det måske være en indikation af, at exoplaneterne også kun vil vise en lille diversitet – fx i den kemiske sammensætning af deres atmosfærer.

Et andet spørgsmål, som detektionerne rejser, er, om der kan trækkes en forbindelse mellem de skyer hvor der i dag dannes stjerner, og området, hvor vores eget solsystem opstod for godt 4,5 mia. år siden. En mulighed for at gøre dette er at sammenligne kemien i solsystemets kometer med sammensætningen af de stjernedannende områder. For få år siden sendte det Europæiske Rumagentur, ESA, Rosetta-missionen til kometen 67P/Churyumov–Gerasimenko (67P) og formåede bl.a. at lande en sonde på overfladen af kometen. Et af instrumenterne på Rosetta havde til formål at måle



Figur 5. Målinger af forekomsten af en række organiske molekyler i en nær, sol lignende protostjerne, IRAS16293B, fra ALMA (y-aksen) sammenlignet med målinger af forekomsten i en molekylsky i centret af vores galakse, Sagittarius B2(N2), også fra ALMA (x-aksen i venstre panel) og kometen 67P/Churyumov–Gerasimenko fra Rosina-instrumentet på ESA's Rosetta mission (x-aksen i højre panel). Den gode overensstemmelse mellem målingerne indikerer, at forekomsten af disse organiske molekyler i kometer i vores eget solsystem er nedarvet fra de tidligste stadier i stjerne- og planetprocessen. Fra [8].

forekomsten af forskellige molekyler i kometens atmosfære. Det højre panel i figur 5 sammenligner disse målinger med vores ALMA-målinger af gassen omkring den nære, sol lignende protostjerne (se også [9]). Igen viser de to datasæt en god overensstemmelse, hvilket understreger, at kometerne er levn fra de tidligste stadier i processen, der fører til dannelsen af stjerner og planeter. Da 67P også indeholder molekyler, der er interessante fra et biologisk synspunkt, fx aminosyren glycin, rejser det spørgsmålet, om den kemiske kompleksitet kan stamme allerede fra de stjernedannende områder og videre, om disse molekyler rent faktisk kan transporteres til overfladen af nydannede planeter.

Nogle af spørgsmålene rejst i denne artikel får vi muligvis svar på i løbet af den nære fremtid. Fra 2021 vil det næste store rumteleskop, James Webb Space Telescope (JWST), give ny information om det infrarøde univers. Observationer fra JWST vil bl.a. karakterisere den kemiske kompleksitet af isen på støvkorn i stjernedannende områder som et stærkt komplement til ALMA-observationerne af gassen. JWST vil også zoome ind og studere den varme del af støvet i de protoplanetariske skiver og dermed give ny information om deres sammensætning og vækst. Endelig vil JWST åbne helt nye muligheder for studier af atmosfærerne af exoplaneter – et område, som også vil være fokus for den næste generation af jordbaserede teleskoper ved optiske og infrarøde bølgelængder, bl.a. det europæiske Extremely Large Telescope (ELT). Sammen med udvidede studier med ALMA vil alle disse observationer måske kunne hjælpe med at svare på, om vores solsystem er unikt – eller blot ét blandt mange.

Litteratur

- [1] www.almaobservatory.org/en/press-release/alma-campaign-provides-unprecedented-views-of-the-birth-of-planets
- [2] spaceref.com/exoplanets/planet-formation-starts-before-star-reaches-maturity.html
- [3] www.almaobservatory.org/en/press-release/astrochemistry-enters-a-bold-new-era-with-alma
- [4] youngstars.nbi.dk/PILS
- [5] www.eso.org/public/denmark/news/eso1718/?lang
- [6] www.eso.org/public/denmark/news/eso1234/?lang
- [7] www.mpifr-bonn.mpg.de/pressreleases/2014/10
- [8] Jørgensen, Belloche og Garrod (2020) "Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics", i trykken.
- [9] www.eso.org/public/denmark/news/eso1732/?lang



Jes Jørgensen er ph.d. fra Leiden Universitet (2004) og har arbejdet ved Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics og Bonn Universitet. Siden 2010 lektor ved Niels Bohr Institutet. Jes forsker i de fysiske og kemiske processer, der finder sted, mens stjerner og planeter dannes. Modtog i 2015 Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskabs sølvmedalje for sin forskning.