



Universiteit
Leiden
The Netherlands

A molecular journey : tales of sublimating ices from hot cores to comets
Bogelund, E.G.

Citation

Bogelund, E. G. (2019, March 14). *A molecular journey : tales of sublimating ices from hot cores to comets*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/69725>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/69725>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/69725> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Bogelund, E.G.

Title: A molecular journey : tales of sublimating ices from hot cores to comets

Issue Date: 2019-03-14

DANSK RESUMÉ

Vores galakse, Mælkevejen, er hjemsted for omkring 400 milliarder stjerner. Én af disse stjerner er Solen. Omkring Solen kredser otte planeter. Fire af disse planeter er såkaldte klippeplaneter, det vil sige at de hovedsageligt består af klipper og sten og at de har faste overflader. Blandt klippeplaneterne er vores hjem: Jorden. De resterende fire planeter er såkaldte gaskæmper. Disse planeter er langt større og tungere end klippeplaneterne og består hovedsageligt af gas. Udover planeterne kredser mindre klippestykker, kaldet asteroider, samt mindre klumper af is og støv, kaldet kometer, også omkring Solen. Til sammen udgør Solen, planeterne, asteroiderne og kometerne vores solsystemet.

Set med astronomiske briller er Solen ikke nogen særlig speciel stjerne. Faktisk er de fleste af Mælkevejens stjerner meget lig Solen: De har nogenlunde samme masse, de består af det samme slags materiale og de har mere eller mindre samme størelse. Planeter i kredsløb omkring stjerner er heller ikke ualmindelige og det ser ud til at de fleste af Mælkevejens solignende stjerner omkredses af mindst én planet. Det der virkelig gør solsystemet til noget specielt er kombinationen, og den indbyrdes konfiguration af planeter, samt det faktum, at det er det eneste sted i hele universet, hvor vi er sikre på at der er liv. Med hvad er det, der har gjort det muligt for liv at udvikle sig i solsystemet? Og måske endnu mere spændende, hvad er chancen for at liv har, eller vil, udvikle sig et andet sted i universet? For at besvare disse spørgsmål er det nødvendigt først at forstå hvordan solsystemet og livet på Jorden blev til. Dette indbefatter at forstå hvordan stjerner og planetsystemer bliver til, men også hvordan de molekyler (strukturer af atomer bundet sammen af kemiske forbindelser) der udgør de basale byggesten for liv, er blevet dannet.

Dannelsen af stjerner og planetsystemer

Områder hvor nye stjerner bliver født kaldes stjernedannelsesområder. Disse områder består af skyer af gas og små støvpartikler. De mest almindelige typer af gas i stjernedannelsesområderne er brint og helium, mens ilt, kulstof og kvælstof kan findes i mindre mængder. Disse grundstoffer er af særlig interesse for liv fordi ilt, kulstof, brint og kvælstof tilsammen udgør de fire mest almindelige grundstoffer i den menneskelige krop. Figur 1 viser et billede af et af Mælkevejens stjernedannelsesområder. På det spektakulære billede ses et utal af nye stjerner, der er i færd med at blive dannet af støvet og gassen i den stjernedannende sky.

Når en stjernedannende sky har opnået en tilstrækkelig masse, bliver den ustabil og begynder at kollapse. Dette kollaps sker som konsekvens af tyngdekraften, der trækker alle skyens atomer og støvpartikler mod hinanden. Efter at skyen er kollapsede, dannes en nyfødt stjernes i dens centrum. Denne nyfødte stjerne kaldes for en protostjerne. Omkring protostjernen dannes en skive af materiale, som fodre den nye stjerne med støv og gas fra den stjernedannende sky, og derved hjælper protostjernen med at vokse. Med tiden



Figur 1: Det 'Mystiske Bjerg' i stjernetågen Carina fotograferet af *Hubble*-rumteleskopet. Dette stjernedannelsesområde befinder sig cirka 7500 lysår fra os i stjernebilledet Kølen (Carina) på den sydlige himmelkugle. Billedet her viser bjerge og søjler af støv og gas hvori stjernefødselsstuer er gemt. Gassen og støvet i søjlerne bliver trykket sammen og formet på grund af den stærke stråling der udsendes af de nyfødte stjerner. Denne sammenpresning resulterer i endnu flere nydannede stjerner. Ved toppen af søjlerne ses nyfødte stjerne der er skjult i strømme af gas. Langs kanterne af strukturen ses strømme af varm, ioniseret gas. Rundt omkring ses slør af støv og gas der bliver oplyst af lyset fra omkringliggende stjerner. Den høje koncentration af støv og gas i de indre dele af søjlerne forhindrer at disse bliver eroderet af strålingen. Foto: NASA, ESA, M. Livio and the Hubble 20th Anniversary Team (STScI).

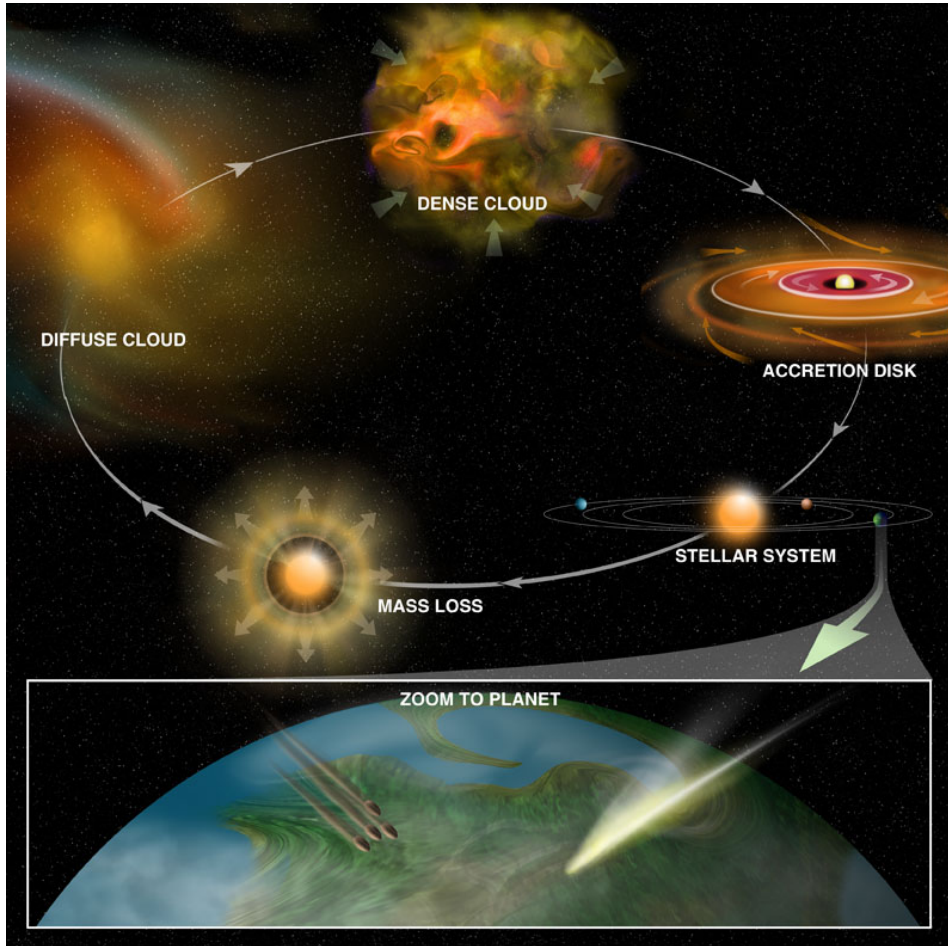
begynder materialet i skiven at klumpe sammen. I takt med at protostjernen og dens skive udvikler sig, begynder de større materialeklumper i skiven at opsamle de mindre klumper, og vokser på den måde til såkaldte planetesimaler. Nogle af disse planetesimaler vokser sig til planeter mens andre forbliver små. Disse mindre klumper kaldes for asteroider hvis de hovedsageligt består af klippestykker og for kometer hvis de hovedsageligt består af is. Gassen i skyen som protostjernen dannes af bliver opvarmet på grund af tyngdekraften der fortsat trækker skyen sammen og derved omdanner gravitationsenergi til varme. Når protostjernes temperatur når cirka 1 million grader, antændes de første fusionsreaktioner mellem atomkernerne i protostjernes centrum. Disse reaktioner omdanner deuterium til helium indtil temperaturen i den nydannede stjernes centrum når cirka 10 million grader hvorefter også brintfusion antændes. Energien der frigives ved disse reaktioner er enorm og efter at brintfusionsreaktionerne er sat i gang, er strålingen fra den nydannede stjerne så stærk, at resten af materialet i den omkringliggende skive blæses væk. På dette tidspunkt er den nye stjerne og dens planetsystem færdigdannet. Afhængigt af den nyformede stjernes masse vil den blive kategoriseret som enten en stjerne med høj masse eller en stjerne med lav masse. Som tommelfingerregel har stjerner med lav masse (lavmassestjerner) en masse der er mindre eller sammenlignelig med Solens masse mens stjerner med høj masse (højmassestjerner) kan være mere end 100 gange tungere. Afhængigt af dens masse, vil forskellige grundstoffer blive dannet i stjernen i løbet af dens liv. Når stjernen dør vil disse grundstoffer blive kastet tilbage ud i rummet hvor de bliver inkorporeret i nye stjernedannelsesområder. Figur 2 viser en skematisk oversigt over de forskellige stadier af stjernedannelsesprocessen.

Dannelsen af en stjerne og et planetsystem er kun første skridt på vejen mod en beboelig planet. I solsystemets tilfælde gik der yderligere cirka 4,6 milliarder år fra Solen og planeterne blev dannet til Jorden så ud som vi kender den i dag. I løbet af denne periode gennemgik solsystemet betydelige forandringer. De mest dramatiske af disse forandringer er en formodet ændring af gaskæmpernes baner samt de konstante kollisioner mellem større og mindre objekter som også finder sted i solsystemet i dag. For Jorden omfatter de mest betydningsfulde forandringer bl.a. dannelsen af en atmosfære samt tilstedeværelsen af vand på planetens overflade. Specielt vandet spiller en betydningsfuld rolle fordi det antages, at tilstedeværelsen af vand på den unge Jord var nøglen til fremkomsten af de første livsformer. Potentielt kan molekylerne, der udviklede sig til disse tidligste livsformer, være blevet leveret til Jorden af nedstyrtende kometer eller asteroider.

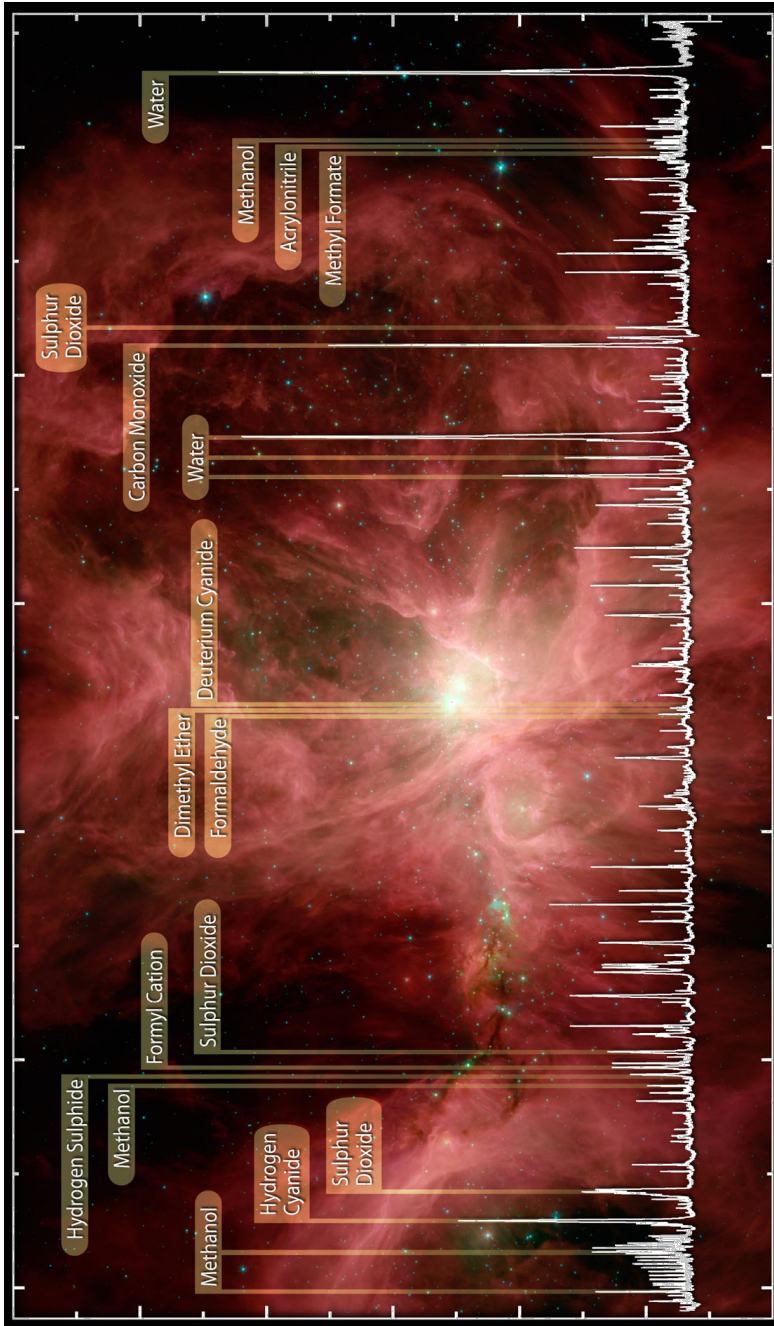
For vi ikke direkte kan undersøge hvordan solsystemet så ud lige efter det blev til, vender vi i stedet vores opmærksomhed mod lignede systemer, der i øjeblikket er ved at blive dannet. Ved at observere disse systemer og studere molekylerne der er til stede der, kan vi få en ide om hvad der skete da vores eget solsystem blev dannet. Brugen af avancerede teleskoper, der i stand til at zoome ind på de stjernedannende områder og som kan detektere de mange atomer og molekyler der er til stede der, er nødvendig for at kunne studere disse systemer.

Hvordan studeres atomer og molekyler i rummet?

Det mest effektive værktøj, når man studerer atomer og molekyler i rummet, er brugen af spektroskopiske fingeraftryk. På samme måde som menneskelige fingeraftryk, har atomer og molekyler deres egne og unikke fingeraftryk, hvormed de kan identificeres. Disse fingeraftryk består af et veldefineret mønster af linjer, der opstår når atomet eller molekylet udsender stråling. Mønstret af linjer kan måles i laboratorieforsøg og kaldes for atomets eller molekylets spektrum. Hvis flere atomer eller molekyler er til stede i et område og



Figur 2: Skematisk oversigt over dannelsesprocessen af en stjerne med tilhørende planetsystem som del af cyklusen af interstellart materiale. Et såkaldt protostjernesystem bliver dannet af en tæt sky af støv og gas (Dense Cloud). Dette system består af en protostjerne der er placeret i midten af en roterende skive af støv og gas (Accretion Disk). Den roterende skive transporterer materiale fra skyen til det nydannede system, og det er af stoffet i skiven, at planet og komet senere i processen vil blive dannet. I takt med, at systemet udvikler sig, stiger tætheden (densiteten) og temperaturen i centrum af protostjernen indtil fusionsreaktioner (kernereaktioner) antændes. I disse reaktioner bliver lette atomkerner omdannet til tungere atomkerner under frigørelsen af enorme mængder af energi. Strålingen fra den nydannede stjerne fjerner gas og støv fra skiven således at kun planeter, komet og små støvpartikler er tilbage i kredsløb om stjernen (stellar system). Et zoom til en af systemets planeter viser hvordan organisk materiale kan være blevet leveret til planetens overflade via passerende komet og asteroider. I løbet af stjernens udvikling bliver det materiale der er dannet i dens midte via fusionsreaktioner kastet tilbage ud i det interstellare rum. Processerne der deriver denne udkastning af materiale omfatter vinde fra stjernes overflade men også supernovaeksplosioner når stjerner dør (Mass Loss). Med tiden vil det materiale der er blevet dannet i stjernerne og kastet tilbage ud i rummet, begynde at trække sig sammen igen og danne nye skyer hvorfra nye stjerner kan dannes (Diffuse Cloud). Figur: B. Saxton, NRAO/AUI/NSF.



Figur 3: Detaljeret spektrum (vist i hvidt) af Orion stjernetaågen (baggrundsbillede). Orion stjernetaågen befinder sig cirka 1300 lysår fra os, hvilket gør den til en af de allernærmeste stjernedannende områder i Mælkevejen. Dette spektrum er målt med HIFI-instrumentet ombord på *Herschel*-rumobservatoriet. Mønsteret af linjer der ses i spektret opstår fordi atomerne og molekylerne, der er til stede i Orion stjernetaågen, udsender lys ved bestemte bølgelængder, der svarer til atomare overgange fra et højere til et lavere energiniveau. Et spektrum som dette kaldes derfor også for et linjespektrum. Nogle af de mest prominente linjer er markerede. Disse indbefatter bl.a. vand (water, H₂O), kulilte (carbon monoxide, CO), formaldehyd (formaldehyde, H₂CO), metanol (methanol, CH₃OH), dimetylæter (dimethyl ether, CH₃OCH₃), blåsyre (hydrogen cyanide, HCN), svovloxyd (sulphur oxide, SO) og svovldioxyd (sulphur dioxide, SO₂).
 Figur: ESA/HIFI/HEXOS; NASA/Spitzer (baggrundsbillede).

udsender stråling samtidigt, vil mange spektroskopiske fingeraftryk blive observeret på samme tid. Figur 3 viser et spektrum der indeholder fingeraftrykkene fra mange forskellige molekyler detekteret i retning mod et stjernedannende område der befinder sig i stjernebillede Orion. Ved at sammenligne observationerne af dette område med de spektre der måles i laboratoriet, kan molekylerne, som er til stede i stjernedannelsesområdet, identificeres. Mange af de identificerede molekyler er såkaldte organiske molekyler. Dette navn refererer dog ikke til noget levende, men blot det faktum at molekylerne indeholder konstellationer af brint- og kulstofatomer. Molekyler som disse må også have været til stede på den unge Jord. De organiske molekyler er af særlig interesse, fordi de er forstadier for vigtige biologiske molekyler. Dannelsen af disse molekyler kan derfor betragtes som det første skridt på vejen mod udviklingen af liv. At observerer disse såkaldte præbiotiske molekyler i et stjernedannelsesområde som Orion kan give vigtig information om, hvordan sådanne molekyler bliver til i stjernedannende miljøer.

Denne afhandling

I min afhandling har jeg undersøgt hvilke molekyler, der er til stede i en række forskellige stjernedannelsesområder. Jeg har sammenlignet de forskellige områders tilstedeværende molekyler for at finde ud af, om nogle molekyler er unikke for bestemte typer af miljøer. Herved forsøger jeg at forstå hvilke betingelser der skal være til stede i et stjernedannende område for at forskellige typer af molekyler kan dannes der. Jeg har også undersøgt den molekylære sammensætning af to af solsystemets kometer. Ved at sammenligne sammensætningen af molekyler i henholdsvis de stjernedannende områder og kometerne, kan der drages en parallel mellem disse områder og vores solsystem. Dette er muligt, fordi kometerne indeholder materiale fra den sky som solsystemet blev dannet af.

Afhandlingen er opdelt i fem kapitler. I det første kapitel introduceres teorien for stjerne- og planetdannelse samt de kemiske processer der er forbundet hermed. De efterfølgende kapitler præsenterer resultaterne af den dybtgående analyse af hvert af de undersøgte områder. De overordnede resultater samt konklusioner der er draget på baggrund af disse analyser opsummeres som følger:

Kapitel 2: I dette kapitel har jeg undersøgt indholdet af metanol (CH_3OH) i det stjernedannende område NGC 6334I. I dette område dannes nye højmassestjerner, det vil sige stjerner der er mange gange tungere end Solen. Metanol er af særlig interesse fordi det er et af de mest almindelige organiske stoffer der findes i stjerneføddannelsesområder. Metanol bruges derfor ofte som reference når den molekylære sammensætning af forskellige områder sammenlignes med hinanden. Det er derfor vigtig at indholdet af metanol i et stjernedannende område er bestemt så præcist som muligt. Analysen som er udført i dette kapitel afslørede, at indholdet af metanol i området NGC 6334I er meget lig indholdet af metanol i områder der ligeledes danner højmassestjerner. Desuden viste analysen at indholdet af metanol i NGC 6334I er forskelligt fra indholdet af stoffet i områder hvor der dannes lavmassestjerner, det vil sige stjerner med masser svarende til Solens. Med udgangspunkt i teoretiske modeller konkluderer kapitlet, at denne forskel i indholdet af metanol kan skyldes, at temperaturen af de støvkorn der er til stede i de forskellige områder, ikke er ens. Hvis det er tilfældet, var temperaturen af støvkornene i NGC 6334I sandsynligvis højere end temperaturen af støvkornene i de områder hvor der dannes lavmassestjerner.

Kapitel 3: Dette kapitel fortsætter undersøgelsen af området NGC 6334I, denne gang med fokus på simple kvælstofholdige molekyler. Specifikt har jeg undersøgt molekylerne metanimin (CH_2NH), metylamin (CH_3NH_2), formamin (NH_2CHO) og acetonitril (CH_3CN). Disse molekyler er interessante i forbindelse med søgen efter livets byggesten fordi kemiske forbindelser der indeholder kvælstof er afgørende for dannelsen af forskellige biologiske strukturer som for eksempel de grundlæggende bestanddele af DNA. I denne forbindelse antages især molekylet CH_3NH_2 for at have en nøglefunktion. Hidtil er CH_3NH_2 kun sikkert detekteret ét sted i rummet, nemlig i et område af højmassestjerner beliggende nær Mælkevejens centrum. Hvis det er korrekt at CH_3NH_2 udgør en vigtig byggesten for biologiske molekyler, er det forventeligt at molekylet er til stede i langt større udstrækning end i blot et enkelt stjernedannende område. For bedre at forstå hvordan CH_3NH_2 dannes, og hvor vigtigt det er for dannelsen af mere komplekse biologiske molekyler, er det vigtigt at forsøge at detekterer CH_3NH_2 i andre områder af Mælkevejen. Dette kapitel præsenterer den første detektion af CH_3NH_2 i området NGC 6334I. Resultaterne der præsenteres i kapitlet indikerer, at CH_3NH_2 sandsynligvis ikke er et sjældent molekyle men at årsagen til at det ikke er detekteret før er, at dets spektroskopiske fingeraftryk er meget svagt.

Kapitel 4: Dette kapitel præsenterer en dybdegående analyse af det molekylære indhold af protostjernen AFGL 4176. AFGL 4176-systemet er interessant fordi det er ét af kun en håndfuld kendte systemer bestående af en højmassestjerne med omkredsede materialeskive. I modsætning til lavmassestjerner, der næsten altid er omgivet af en materialeskive, ses materialeskiver omkring højmassestjerner kun sjældent. Spektrumet af AFGL 4176 afslører tilstedeværelsen af i alt 23 forskellige typer af molekyler. Størstedelen af de tilstedeværende molekyler er iltholdige, det vil sige, at de indeholder mindst et iltatom. Færre af molekylerne indeholder et atom af kvælstof eller svovl. I dette kapitel sammenligner jeg de forskellige molekyler, der er detekteret i henholdsvis AFGL 4176-systemet og i andre stjernedannelsesområder. Herved står det klart, at AFGL 4176 har mere til fælles med lavmasseprotostjernen IRAS 16293–2422B end med det stjernedannende område kaldet Sagittarius B2(N), der danner højmassestjerner. Lighederne mellem de molekylære indhold af højmassesystemet AFG 4176 og lavmassesystemet IRAS 16293–2422B indikerer, at dannelsen af de detekterede molekyler ikke afhænger kritisk af typen af objekt (højmasse- versus lavmassestjerne). En alternativ forklaring på det lignende indhold af molekyler i AFGL 4176 og IRAS 16293–2422B er, at molekylerne er dannet allerede i den stjernedannende sky og derfor til stede i systemet endnu før protostjernen dannes.

Kapitel 5: I dette kapitel har jeg undersøgt de to kometer C/2012 F6 (Lemmon) og C/2012 (ISON). Kometer er klumper af støv og is, dannet omkring det samme tidspunkt og af det samme materiale som solsystemets planeter. I modsætning til planeterne er materialet i kometerne forblevet forholdsvis uforandret siden de blev dannet. Derfor kan kometerne opfattes som en slags fossiler, der indeholder dybfrosne prøver af det materiale som fandtes i den skive af støv og gas som kredsede omkring den nyfødte Sol, og som sidenhen udviklede sig til solsystemet. Studier af kometerens materiale kan derfor give et billede af sammensætningen af de molekyler der var til stede i den stjernedannende sky hvorfra Solen blev født, og det planetsystem der omkredser Solen idag. Det meste af deres liv befinder kometerne sig langt væk fra Solen og deres materiale forbliver derfor dybfrosent. Hvis en komet derimod kommer tæt på Solen, vil dens is begynde at fordampe. I dette kapitel analyserer jeg observationer af en række forskellige molekyler, der frigives fra de to kometer, i takt med at disse opvarmes af Solen. Jeg modellerer observationerne

for at finde ud af hvilke af de detekterede molekyler der frigives direkte fra kometerne, såkaldte forældremolekyler, og hvilke der dannes som følge af reaktioner mellem forældremolekyler, såkaldte dattermolekyler. Herved får vi indsigt i hvilke molekyler der var til stede i materialeskiven der omgav den unge Sol.

På baggrund af de enkelte kapitlers resultater er afhandlings overordnede konklusion, at størstedelen af de molekyler, som er til stede i både høj- og lavmassetjernedannende områder, også er at finde i solsystemets kometer. Dette indikerer, at mange af de samme molekyler der var til stede da solsystemet blev dannet og som efterhånden udviklede sig til livet på Jorden, også er til stede i andre stjernedannelsesområder. Det vil sige, at selvom der endnu ikke er påvist liv noget andet sted i universet end på Jorden, er de grundlæggende byggesten for livets molekyler i høj grad at finde i stjerne- og planetdannende systemer. Ved fortsat at undersøge disse systemer kommer vi tættere på at finde de stykker af information, der stadig mangler, for at spørgsmålet om hvordan og hvorfor livet har kunnet udvikle sig i solsystemet, endelig kan besvares.