



Universiteit  
Leiden  
The Netherlands

## From midplane to planets : the chemical fingerprint of a disk

Eistrup, C.

### Citation

Eistrup, C. (2018, October 16). *From midplane to planets : the chemical fingerprint of a disk*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/66260>

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/1887/66260>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/66260> holds various files of this Leiden University dissertation.

**Author:** Eistrup, C.

**Title:** From midplane to planets : the chemical fingerprint of a disk

**Issue Date:** 2018-10-16

---

## DANSK RESUMÉ

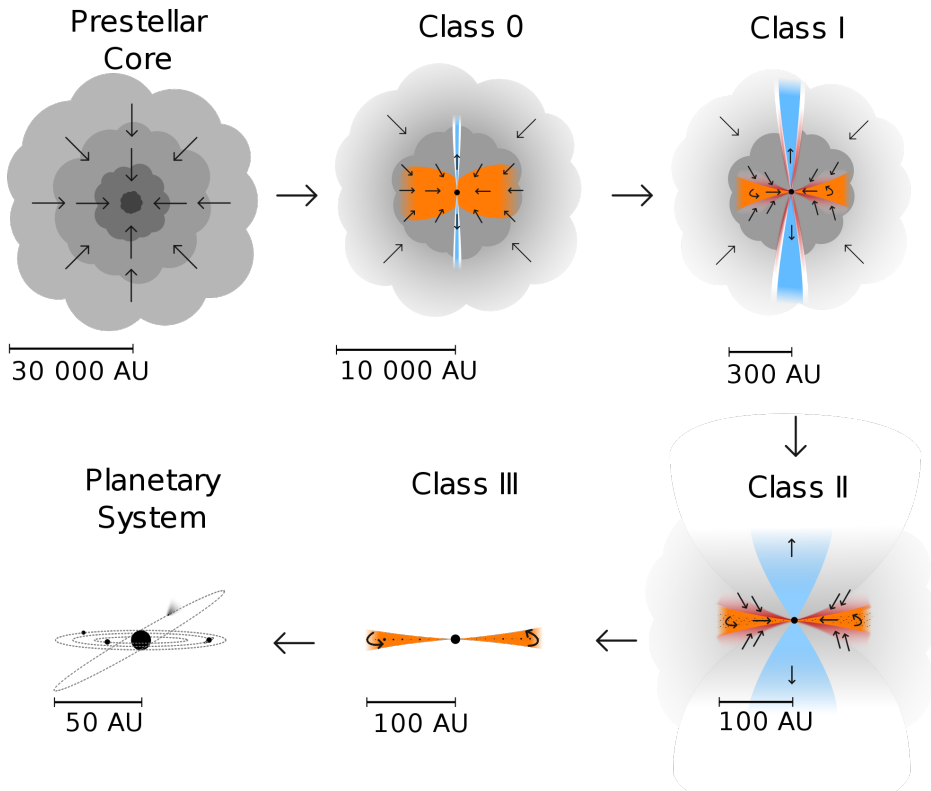
---

**Planeter, og jagten på liv i rummet.** Siden tidernes morgen har vi mennesker spekuleret over vores oprindelse. Hvor kommer vi fra, og er vi alene? Det sidste af disse spørgsmål relaterer sig til liv, og hvordan det kan opstå. Det eneste liv, vi kender og ved noget om, er livet her på vores egen planet: Jorden. Jagten på liv i det ydre rum er derfor ofte en søgen efter omgivelser og betingelser i verdensrummet, der minder om de livsunderstøttende omgivelser, vi har her på Jorden.

Livets oprindelse på vores planet går formentlig helt tilbage til planetens dannelse (der er fundet tegn på, at der allerede var liv på Jorden for ca. 3,6 milliarder år siden, hvorimod Jorden selv er 4,6 milliarder år gammel). De ingredienser, der er nødvendige for at liv kan opstå, er kommet hertil sammen med det materiale, som i sin tid dannede Jorden. For at forstå planetens udvikling, og hvordan liv er opstået, er det derfor vigtigt, både at forstå hvordan planeten blev dannet, men også hvilket materiale, den blev lavet af.

**Planetdannelse.** Planeter dannes rundt om stjerner, og stjerner dannes når store områder i rummet fyldt med gas og stjernestøv kolliderer på grund af tyngdekraften (se "Prestellar Core" i figur 5.15, hvor tyngdekraften trækker alt materialet ind mod midten af den grå sky, i pilenes retninger). Planetdannelse er et aktivt forskningsfelt indenfor astronomi. Feltet forsøger at beskrive, hvordan stjernedannelsesprocessen kan føre til at dele af materialet ender med at lave planeter, der kredser rundt om stjernen (illustreret ved de seks udviklingsstadier in figur 5.15). For at forstå diversiteten af de dannede planeter, for eksempel deres størrelser, sammensætninger, og deres baner rundt om deres stjerner, kræves der både viden om de fysiske og de kemiske processer, der finder sted under dannelsesprocessen.

Disse processer studeres på flere forskellige måder indenfor astronomisk forskning. Det sker gennem teoretisk forståelse af processerne, og derigennem forudsigelser af, hvad de vil føre til. Derudover sker det igennem astronomiske observationer af rummet, og det sker gennem laboratorieforsøg på jorden. I tilfældet med planetdannelse er den teoretiske forståelse af de fysiske processer skredet betydeligt frem i de seneste par år. Computersimuleringer har leveret forudsigelser om hvilke typer planeter, der bliver dannet, og hvor. Observationer af planeter, exoplaneter og planetdannende områder har afgrænset hvilke forudsigelser der stemmer overens med observationer, og laboratorieforsøg har bidraget til at forstå de molekyler, der eksisterer i rummet, hvordan man opdager dem og hvilke kemiske reaktioner, der ske imellem dem. Alt dette hjælper med til at forstå sammensætningen af det materiale, som planeterne bliver dannet af.

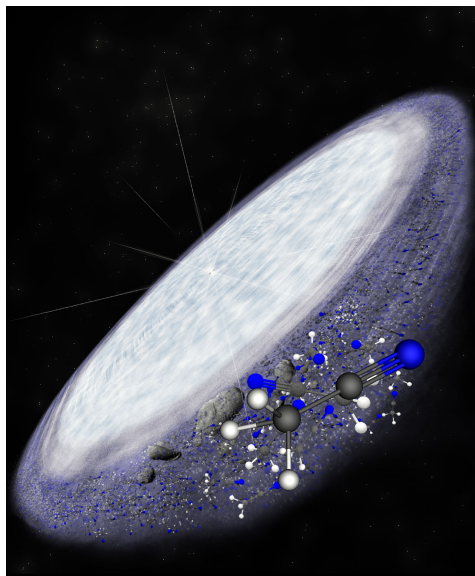


**Figur 5.15:** Forskellige stadier af stjerne -og planetdannelseprocessen. De kemiske simuleringer i denne afhandling fokuserer hovedsageligt på klasse 2 og 3, men der trækkes tråde til både den præstellare kerne, og til slutproduktet, nemlig planetsystemet. Billedkilde: "Current view of protostellar evolution" af Magnus Vilhelm Persson.

**Fysiske og kemiske processer under planetdannelsen.** Udover den frem-skredne forståelse af fysikken bag planetdannelse, har observationer af planetdannende områder i rummet (især med Atacama Large Millimeter / submillimeter Array Observatory (ALMA) i Atacamaørkenen i Chile), givet et væld af nye informationer om, og ny indsigt i, strukturen og de molekulære sammensætninger af sådanne områder. ALMA består af 66 radioantenner, der er placeret i 5000 meters højde i den tørreste ørken på Jorden. På grund af disse omgivelser er ALMA det bedste observatorium i verden til observationer af elektromagnetisk stråling med bølgelængder på omkring 1 millimeter. Det gør ALMA optimal til mange anvendelser, heriblandt til observationer af områder hvor stjerne- og planetdannelse finder sted, og til detektion af specifikke molekyler i områderne. Blandt andet er der blevet påvist flere såkaldte islinjer ved anvendelse af ALMA. En islinje er radiusen fra den centrale stjerne i et planetdannende område, der afgrænser tilstandsformen for et givent molekyle. Inden for islinjen er stjernen tæt nok på til at et molekyle (for eksempel kulilte) eksisterer på gasform, men udenfor islinjen er det så koldt, at molekylet kun kan eksistere som is på overfladen af støvkorn. De kemiske processer, der foregår under planetdannelsen, især i de planetdannende områder inden planeterne bliver dannet, er imidlertid ikke nær så velforståede. Kemiske reaktioner mellem molekyler i disse områder vil sandsynligvis finde sted både i gasfasen og når molekylerne er frosne på overfladen af små støvkorn.

Planetdannelsesmodeller har hidtil enten kun anvendt forenkledede kemiske modeller til at tage højde for kemiske reaktioner i planetdannende materiale, eller antaget, at der ikke sker nogle kemiske reaktioner, så materialets sammensætning ikke ændres over tid. I den forbindelse forsøger denne afhandling at forbedre forståelsen af, hvordan netop kemiske reaktioner i materialet, ændrer materialets sammensætning over tid. Det drejer sig især om, hvordan mængderne af forskellige molekyler ændrer sig over tid, og hvor meget af dette materiale, især hvor meget kulstof og ilt, der er i henholdsvis gas- og isfasen, når planeterne begynder at dannes. Det sker, ved at anvende en specialiseret computermodel der kan simulere en bred vifte af forskellige kemiske reaktioner, og ved at bruge modellen til at undersøge, hvilke tendenser i de kemiske forandringer af materialet der forekommer, i det planetdannende materiale, før planeterne bliver dannet. Resultaterne er til gavn for forskning i planetdannelse, men også i forhold til at forstå forekomsten af bestemte molekyler i planeters og i exoplaneters atmosfærer, og forekomsten af molekyler på kometer. Molekyler fortæller nemlig historier om dannelsen og udviklingen af disse planeter og kometer, og resultaterne her kan potentielt bruges til at forbinde planeter og kometer til hvor og hvordan, de blev dannet.

**Kapitel 2** gør brug af et computerprogram (BADASS-koden), der kan simulere kemiske reaktioner i rummet. Kapitlet undersøger, om kemiske reaktioner i det planetdannende materiale ændrer materialets sammensætning over tid. BADASS-koden gives oplysninger om det fysiske miljø, der findes i planetdannende områder, såsom temperatur, densitet og ioniseringsniveauet (hvor mange nye ioner per sekund, som bliver dannet af reaktioner mellem neutrale atomer eller molekyler og energisk kosmisk stråling). Programmet indstilles til, enten kun at simulere kemiske reaktioner i gasfasen, eller til også at tage højde for reaktioner, der finder sted mellem molekyler i isfasen på overfladen af støvkorn. Koden simulerer på



**Figur 5.16:** En stjerne bliver dannet i midten af en skive af molekyler og støvkorn (sidstnævnte kan ligne stykker af sten). Molekylerne kan reagere med hinanden, både i gasfasen, men også når de ligger som is på overfladerne af støvkornene. Billedkilde: B. Saxton (NRAO/AUI/NSF).

den baggrund en astronomisk tidsskala på 1 million år. Tiden, fra begyndelsen af stjernedannelsen, og indtil stjernen og de omkringliggende planeter alle er dannet anslås til at være omkring 10 millioner år.

Resultaterne af projektet viser, at kun i tilfælde hvor ioniseringsniveauet er lavt, og simuleringen starter med neutrale molekyler, er der ingen betydelige ændringer i den kemiske sammensætning af materialet. Der ses betydelige ændringer for alle andre begyndelsesbetingelser, og både kemiske reaktioner på støvkornenes overflader og ioniseringsniveauet viser sig at have stor indflydelse på, hvordan den kemiske sammensætning ændres.

**Kapitel 3** er en udbygning af simuleringsopsætningen fra Kapitel 2, igen med fokus på planetdannende områder i rummet. Der antages en længere astronomisk tidsskala (7 millioner år), og det antages at de fysiske forhold, såsom temperaturen i området, udvikler sig i løbet af de 7 millioner år (det bliver koldere med tiden), hvorimod de fysiske forhold i den anvendte model i Kapitel 2 ikke udvikler sig over tid. Hensyntagen til et ændret fysisk miljø komplicerer beregningerne, men det er mere realistisk, da ikke kun kemien, men også det fysiske miljø i det planetdannende område, rent faktisk forandrer sig over tid.

Vi finder frem til, at kemisk udvikling forårsager kontinuerte ændringer af den kemiske sammensætning af det planetdannende materiale indtil mindst 7 millioner år. Derimod gør udviklingen af de fysiske forhold ikke den store forskel for den kemiske sammensætning set i forhold til de statiske forhold fra Kapitel 2. Dog ser vi, at når temperaturen falder med tiden, så går flere molekyler fra at være i gas-fasen til at være is på overfladen af støvkorn. Kun tæt på stjernen, hvor

det forbliver varmt nok, vil de fleste molekyler stadig være i gasfasen. Det viser sig også, at den kemiske sammensætning af det planetdannende materiale efter 7 millioner års udvikling har udviklet sig hen imod en stabil tilstand, hvor sammensætningen er uafhængig af hvilken kemisk sammensætning (kun atomer eller kun stabile molekyler) simuleringen begynder med. Ovenikøbet er den stabile kemiske sammensætning ved simuleringens afslutning meget forskellig fra de kemiske sammensætninger der typisk bliver antaget i traditionelle planetdannelsesmodeller, som behandler de kemiske reaktioner i materialet mere simpelt.

Ideen til **Kapitel 4** udspringer af fundet af de store mængder af molekylær  $O_2$  is i kometerne 1P og 67P i Solsystemet, og det faktum at simuleringerne (for visse modelopsætninger) tilbage i Kapitel 2 viser, at  $O_2$  is bliver produceret i kemiske reaktioner i mængder svarende til dem, der findes i de to kometer. I Kapitel 4 bliver det undersøgt, hvordan, og under hvilke betingelser,  $O_2$  is kan produceres gennem kemiske reaktioner i isen på overfladerne af støvkorn i det område, hvor kometer blev dannet, tilbage dengang, da vores Solsystem stadig var under dannelse. Flere kemiske parametre for, hvordan reaktioner mellem ismolekyler finder sted, bliver undersøgt, og  $O_3$  is (som ikke er inkluderet i Kapitel 2) er som noget nyt inkluderet i programkoden, der bruges til simulationerne.

Resultaterne viser, at  $O_3$  is inkluderes i simulationerne, så er det  $O_3$  is, og ikke  $O_2$  is, der bliver produceret i store mængder. Det resultat stemmer ikke overens med mængderne af disse molekyler i de to kometer. De kemiske simuleringer kan kun reproducere de fundne mængder i kometerne, når simulationerne kører under nogle meget specifikke betingelser. Derfor er det mere sandsynligt, at  $O_2$  isen fundet på kometerne allerede befandt sig i det stjerne- og planetdannende område som dannede Solsystemet (Prestellar Core-stadiet i figur 5.15), før Solen blev dannet, i stedet for at været blevet dannet af kemiske reaktioner, efterfølgende. Imidlertid er kemiske reaktioner på overfladen af støvkorn ikke så velforståede som kemiske reaktioner i gasfasen. Derfor er de kemiske vekselvirkninger mellem  $O_2$  is,  $O_3$  is og andre, kemisk beslægtede atomer og molekyler, muligvis nødt til at blive undersøgt og studeret bedre, før det kan udelukkes, at  $O_2$  isen fundet i kometerne kunne være blevet produceret gennem kemiske reaktioner på de isbelagte støvkorns overflader, undervejs under dannelsen af Solsystemet.

**Kapitel 5** fortsætter på sporet af kometer. Kapitel 3 leverer simulerede mængder af mange forskellige ismolekyler, både som funktion af den astronomiske tidsudvikling, og som funktion af afstanden (radius) fra stjernen. Tanken er, at der kan laves et statistisk match mellem de simulerede mængder af ismolekyler, og mængderne af hvert molekyle detekteret i forskellige kometer. Målinger af mængderne af bestemte molekyler i forskellige kometer er tilgængelige i den videnskabelige litteratur. En  $\chi^2$  - metode anvendes til den statistiske sammenligning. Målet er at undersøge, om der kan drages statistiske konklusioner om, hvor det er mest sandsynligt, at kometerne oprindeligt blev dannet på baggrund af sammenligningen.

Ved hjælp af data fra 15 forskellige kometer med detekterede mængder af forskellige ismolekyler, peger vores statistiske analyse på, at 14 af kometerne sandsynligvis blev dannet i nærheden af islinjen for kulilte (CO). Dog er kometerne sandsynligvis blevet dannet på forskellige tidspunkter undervejs i dannelsen af Solsystemet. Metoden præsenterer derfor en mulig ny måde at kategorisere kome-

ter på: i stedet for at kategorisere dem direkte ud fra mængderne af hvert molekyle, der er detekteret i dem, så tager denne nye metode hensyn til de kemiske forandringer, der kan finde sted i materialet under udviklingen af Solsystemet, og den nye metode viser altså, at 14 ud af 15 kometer kan have dannet sig omkring den samme islinje, dog blot på forskellige tidspunkter.

### Hovedkonklusionerne fra denne Ph.D.-afhandling er som følger:

- Kemisk udvikling i planet -og kometdannende materiale, kan ændre materialets kemiske sammensætning betydeligt over tid. Dette kan påvirke de kemiske sammensætninger af både planeter, exoplaneter og kometer, som alle bliver dannet ud af materialet. Modeller, som simulerer planeters dannelse og sammensætning, ville drage fordel af at tage de kemiske forandringer af det planetdannende materiales sammensætning i betragtning.
- Den bedste forklaring på mængden af  $O_2$  is som er detekteret i kometerne 1P og 67P er fortsat, at  $O_2$  isen er blevet dannet, før de kemiske forandringer præsenteret her i afhandling fandt sted. Det vil sige, at  $O_2$  isen sandsynligvis allerede var tilstede, før Solsystemet blev dannet.
- Modeller, som simulerer kemisk udvikling i det ydre rum, kan bruges til at adressere, hvordan både planeter og kometer er blevet dannet. En statistisk sammenligning mellem detekterede molekyler i kometer i Solsystemet, og simulerede mængder af molekyler i et kometdannende område peger på, at næsten alle undersøgte kometer sandsynligvis blev dannet i nærheden af CO-islinjen.
- Kemiske reaktioner mellem iskolde molekyler på overfladerne af støvkorn spiller en vigtig rolle i forhold til at ændre den kemiske sammensætning af materialet i områder, hvor planeter bliver dannet. Disse reaktioner er imidlertid ikke ligeså velforståede som reaktioner mellem molekyler i gasfasen. Fremtidige laboratorieeksperimenter på Jorden vil være vigtige for fortsat at opnå en bedre forståelse af disse overfladereaktioner, og denne forbedrede forståelse vil være værdifuld i programkoder, som simulerer kemiske reaktioner i det ydre rum.