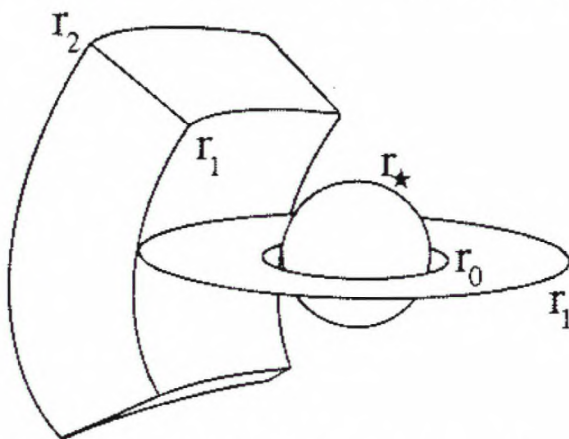


Dannelse af dobbeltstjerner

Jes K. Jørgensen, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik.

Tiltroen til de overordnede træk i vores standardbillede for, hvordan stjerner dannes, er efterhånden rimelig solid. Gravitationel sammentrækning af tætte, kolde kerner i kæmpe molekylskyer resulterer i en såkaldt YSO (young stellar object), dvs. en protostjerne omgivet af en tynd skive, der igen er omgivet af en skal af støv og gas (se figur 1). Igennem de næste par millioner år, vil materiale fra skiven og den omkringliggende skal dels falde mod stjernen og dels blive transporteret væk gennem de meget energirige jets og outflows, som observeres i de fleste stjernedannende molekylskyer, og på et tidspunkt vil så meget af materialet omkring stjernen være forsvundet, at den begynder at udsende synligt lys. Omtrent samtidig begynder kerneprocesser i de centrale dele af protostjernen, og stjernen bevæger sig langsomt mod hovedserien i Hertzsprung Russel diagrammet, hvor den vil tilbringe hovedparten af sine dage. Normalt opdeler man YSO stadiet i *protostjerne* fasen, hvor YSO'en ikke udsender synligt lys men må observeres ved millimeter og infrarøde bølgelængder og i præ-hovedserie (Premainsequence; *PMS*) fasen, hvor stjernen kan observeres ved visuelle bølgelængder.



Figur 1. En model for en YSO - ikke tegnet til korrekt skala. Den omkringliggende skal (som kun er skitseret ved et udsnit) er i virkeligheden langt større. Fra [8].

Der er selvfølgelig mange uafklarede spørgsmål i forbindelse med dette billede af stjernedannelse. F.eks. hvordan betingelserne i molekylskyerne påvirker de stjerner, der dannes der, og hvilken mekanisme (turbulens, magnetfelter, ...) der yder den vigtigste støtte i kernerne i molekylskyerne, balancerer tyngdekraften, og dermed f.eks. regulerer stjernedannelseseffektiviteten i en given sky. Problemet er blot, at vi måske leder det helt forkerte sted: Slutproduktet af vores stjernedannelsesmodeller er en enkelt stjerne, men observationer af udviklede hovedseriestjerner peger på at over 50% af alle stjerner rent faktisk er medlemmer af

et dobbelt (eller trippelt eller ...) system. Så noget tyder på, at modeller for dannelse af dobbeltstjerner har en stor betydning, når vi diskuterer stjernedannelse. Før jeg begynder at beskrive og diskutere nogen af disse teorier, vil jeg kigge lidt på nogle af de observationer af unge dobbeltstjerner, som kan være med til at forbedre vores forståelse inden for feltet.

Dobbeltstjerne statistik

Et meget interessant indblik i dannelsen af dobbeltstjerner får man ved at kigge på hyppighederne af dobbeltstjerner af forskellige typer og med forskellige separationer. Som nævnt i indledningen er mere end 50% af hovedseriestjernerne medlemmer af et system af to eller flere stjerner. Man kan udtrykke dette gennem den såkaldte *companion star fraction* (CSF), som tæller det gennemsnitlige antal " ledsagerstjerner " pr. system. Vores eget solsystem har således en CSF på 0, en hob af stjerner hvor alle systemerne er dobbelte en CSF på 1 osv. Umiddelbart kunne man jo sammenligne CSF'en for forskellige områder ved blot at gå i gang med at tælle ud til en given afstand, men man må være opmærksom på betydningsfulde udvalgs effekter, som f.eks. kan blive introduceret pga. afstanden til det observerede område – en given projiceret separation vil svare til forskellige egentlige separationer i givne områder, og derfor skal man være lidt forsigtig, når man sammenligner.

Et måske lidt overraskende resultat finder man, hvis man sammenligner CSF'en for hovedseriestjerner af samme type som solen, med hvad man finder for de nærtliggende stjernedannende områder: For PMS stjerner i områder såsom Taurus-Auriga og Corona Australis finder man CSF'er, der er 1.5 til 2 gange højere, end hvad man finder i solens omegn (en CSF på omkring 0.5). Denne observation er en interessant indikation af, at uanset hvilken mekanisme der danner dobbeltstjerner, må den virke tidligt i stjernedannelsesprocessen. Om der er en decideret aftagen i hyppighederne af dobbeltstjerner med alderen gennem de tidlige stadier, er dog ikke klart – fortolkningen af resultaterne afhænger meget af, hvilke korrektioner man foretager for at undgå førnævnte udvalgs effekter, samt af de aldre man antager for forskellige stjernedannende områder. Vi har deværre endnu ikke observationer nok til at kunne sige om CSF'en afhænger af alderen eller snarere af andre karakteristika for de stjernedannende områder såsom tætheden af unge stjerner. Men det er temmeligt utvetydigt, at der er flere unge end fuldt udviklede dobbeltstjerner.

Man ledes så naturligt til spørgsmålet, om vi kan se en nedre grænse for alle stjerner f.eks. er enkeltstjerner. Indtil for få år siden kendte vi næsten ingen protostjerner i dobbeltstjernesystemer (dvs. meget unge dobbeltstjerner), og det kunne friste en til at drage konklusionen at dobbeltstjerner bliver dannet tæt på overgangen mellem protostjerne og PMS stadiet. En anden meget sandsynlig forklaring kunne dog også være, at det er svært at observere egenskaberne for protostjerner: Opløsningen af vores observationer i submillimeter og millimeter områderne, hvor vi observerer protostjerner, er ikke tilstrækkelig til at kunne opløse tætte proto-dobbeltstjerner, og med forbedrede observations-teknikker er der i de sidste par år da også dukket flere observationer af stadig yngre proto-dobbeltstjerner op. Så det lader ikke til, at vi endnu har fundet de tidligste dobbeltstjerner og dermed ikke set "tidspunktet" for dannelse af dobbeltstjerner. Formentlig kan planlagte instrumenter som Atacama Large Milimeter Array (ALMA) yderligere belyse denne problematik og bidrage med yderligere information om egenskaberne ved de meget unge dobbeltstjerner.

Observationer af banebevægelser

Vi kan formentlig også få interessant viden om dannelsen af dobbeltstjerner ud fra observationer af deres banebevægelser. Det kunne f.eks. være interessant om dobbeltstjerner dannes hovedsageligt som lidt eller meget adskilte systemer, og om de så udvikler sig derfra i den ene eller anden retning, eller er om det er to forskellige mekanismer, der er ansvarlig for dannelsen af de to typer systemer. Fordelingen af hovedserie-stjernernes separationer er forholdsvis bred med en top omkring 30 AU. Undersøgelser af fordelingerne af separationer hos PMS dobbeltstjerner viser derimod mere spidse fordelinger, samtidig med at den typiske separation varierer fra område til område. Det er blevet foreslået [3], at dette skyldes, at den population, vi observerer som dobbeltstjerner på hovedserien, er sammensat af dobbeltstjerner fra forskellige områder, og fordelingen af separationer for hvert område afhænger af egenskaberne ved de enkelte molekylskyer, f.eks. turbulens, angulært moment og tilstedeværelsen af magnetfelter. Selvom der mangler en del observationelt arbejde, før vi kan fastslå, om dette er en generel tendens ved stjernedannelsesprocessen, må man sige, at det er en interessant tanke som hvis den er korrekt, vil kunne belyse mange basale spørgsmål om vores teorier for stjernedannelse.

En anden egenskab ved dobbeltstjerners baner ud over separationen, som kan give interessant information er sammenhængen mellem eccentricitet og periode. For hovedseriestjerner finder man, at der stort set ikke findes dobbeltstjerner med cirkulære baner højere end en given periode, og samtidig er der en tendens til at eccentriciteten vokser med perioden over alle observerbare perioder. Stort set samme konklusioner kan

drages for relationerne mellem periode og eccentricitet for PMS dobbeltstjerner. Samtidig ses, at dobbeltstjerner med alle typer eccentriciteter optræder for de yngste PMS stjerner – lige efter at de har overstået deres protostjerne fase. Noget tyder på at eksistensen af en maksimal grænse, under hvilken der ikke observeres dobbeltstjerner med cirkulære baner, er en effekt af dobbeltstjernernes udvikling. Det ses nemlig, at PMS dobbeltstjerner har en lavere "cirkularisations periode" end hovedseriestjerner. Altså tyder det på, at stjernedannelsesprocessen producerer dobbeltstjerner med alle typer eccentriciteter, og at dobbeltstjernerne så udvikler sig i retning af cirkulære baner gennem intern vekselvirkning.

Dannelses teorier

Disse omtalte observationer af unge dobbeltstjerners egenskaber kan så benyttes til at diskriminere mellem de forholdsvis mange konkurrerende teorier for dannelse af dobbeltstjerner. Jeg vil nu diskutere nogle af disse teorier og nogle af deres styrker og svagheder. En god pointe, som man skal holde sig øje, er, at vi stadig ikke har en enkelt teori, der kan forklare dannelsen af dobbeltstjerner: Hver teori har sine styrker og svagheder, og et godt spørgsmål er, om vi er på rette spor evt. med en kombination af flere af de gængse teorier, eller om vi skal helt over i en anden grøft.

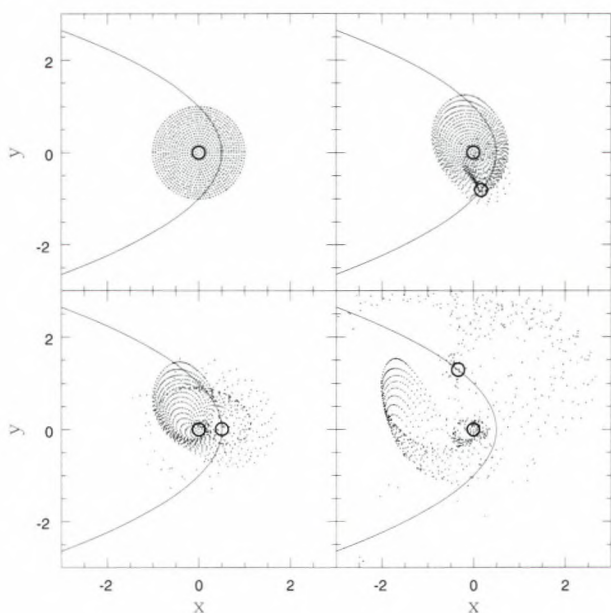
Groft set kan vi inddele teorierne for dobbeltstjernedannelse i 2 hovedgrupper: Enten involverer de en måde, hvorpå to ikke gravitationelt bundne stjerner kan blive bundet sammen eller en måde, hvorpå en protostjerne eller en kerne i en molekylsky kan blive delt i 2.

En af de ældste teorier er *fissions hypotesen*. Hovedargumentet for fissions hypotesen er, at der sker et tab af angulært moment igennem stjernedannelsesprocessen. Hvis vi sammenligner det angulære moment af klassiske T-Tauri stjerner (dvs. nydannede PMS stjerner) med det angulære moment af kerner i molekylskyer, ser vi at det typisk må aftage med en faktor 10^5 . Gennem den gravitationelle sammentrækning af en kerne vil dens rotationshastighed stige, og på et tidspunkt vil den blive ustabil over for perturbationer ikke rettet langs rotationsaksen, og kernen skulle så ifølge fissionshypotesen dele sig i to kerner. Et umiddelbart problem ved fissions hypotesen er, at den vil have svært ved at danne dobbeltstjerner med meget større separationer end den typiske udstrækning af kerner på omkring 0.1 AU. Numeriske simulationer har da også vist at resultatet af en ikke-aksial perturbation snarere ville danne to spiralarmer hvorigennem angulært moment og masse vil blive transporteret ud af og danne en cirkumstellar skive indeholdende en brøkdel af systemets totale masse. Mere sandsynligt er det at grunden til det store fald i angulært moment igennem de protostellare faser er de jets og outflows, der som før nævnt lader til at være en vigtig ingrediens af protostjernernes udvikling.

Indfangningsmekanismer

En række forskellige indfangningsmekanismer er blevet foreslået gennem tiderne. En mulighed er, at to stjerner ved en tæt passage kan excitere svingninger i hinanden, således at nok kinetisk energi bliver fjernet til, at stjernerne bliver bundet sammen. En anden mulighed er dynamisk indfangning, hvor tre stjerner passerer tæt på hinanden, således at den ene blive sendt afsted med en høj andel af den totale kinetisk energi, mens de to andre stjerner bliver efterladt bundet sammen gravitationelt. Et umiddelbart problem med begge disse teorier er, at de umiddelbart kræver en høj tæthed af stjerner, hvis de skal kunne producere en vigtig andel af det observerede antal dobbeltstjerner.

En ting, der lader til at være en uungåelig konsekvens af stjernedannelsen, er dannelsen af en skive omkring protostjernen. En sådan skive kan medvirke til indfangningen af en anden stjerne. Ved en tæt passage vil kinetisk energi kunne transporteres fra den ene stjerne til skiven, der så vil blive ødelagt og stjernen vil i stedet blive gravitationelt bundet (se figur 2).

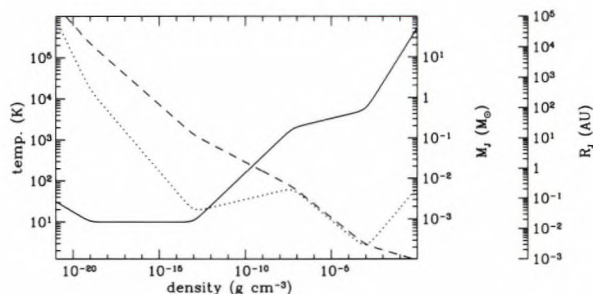


Figur 2. Indfangning vha. cirkumstellar skive. Fra [2].

Problemet med denne teori er som for de 2 øvrige indfangningsmekanismer, at de sandsynligvis ikke vil være betydningsfulde når tætheden af stjerner er lav. Derimod har simulationer vist, at stjerne-skive indfangning kan være betydningsfuld i små stjernehober (dvs. hobe med mindre end ca. 100 stjerner), hvor de vil kunne reproducere både den observerede hyppighed af dobbeltstjerner samt et realistisk bud på "the Initial Mass Function", dvs. fordelingen af masser for stjernerne. I stjernehober med et højere antal stjerner vil mekanismen på den anden side ikke bidrage væsentligt, siden de højere hastigheds dispersioner i sådanne hobe vil resultere i, at skiverne vil blive ødelagt uden at stjernerne vil blive bundne i dobbeltstjernesystemer.

Fragmentation

En gruppe teorier har vundet lidt mere indpas end de øvrige i gennem de sidste par år: Nemlig de teorier der overordnet set kan beskrives som fragmentationsmekanismer. Den overordnede ide i fragmentations-teoriene er at dele af en molekylsky under en gravitationel sammentrækning vil opleve en vækst i tæthed, og dermed lokalt vil kunne blive ustabil. Man kan inddele kollapset af en molekylsky i 4 stadier (se figur 3): Den første del af kollapset vil forløbe isotermt, gassen vil være optisk tynd og temperaturen konstant på omkring 10 K bestemt af balancen mellem opvarmning pga. gravitationel sammentrækning og køling gennem udstråling fra støvet i skyen.



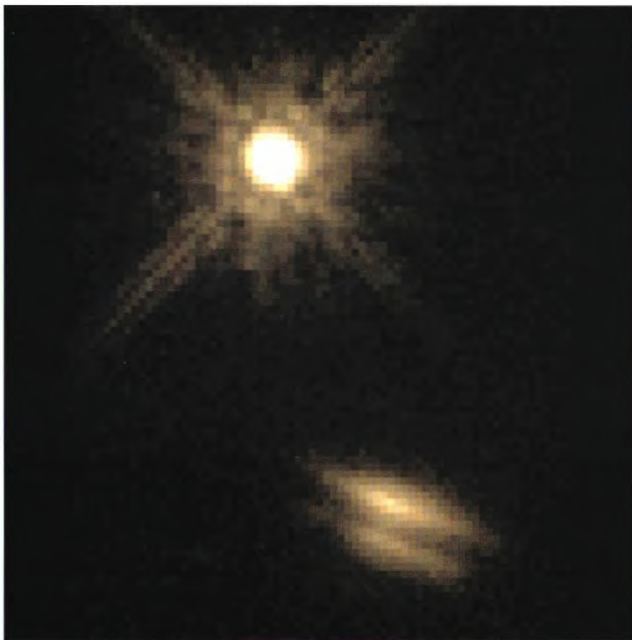
Figur 3. Forløbet af temperaturen (fuldt optrukken linie), Jeans massen (prikker) og Jeans radius (stiplet). Fra [2].

Denne isoterme fase vil vare, indtil skyen når en tæthed på omkring $10^{-13} \text{ g cm}^{-3}$. På dette tidspunkt vil gassen være optisk tyk nok til, at stråling, der ikke kan undslippe, vil give en stigning i temperaturen. Når temperaturen når omkring 2000 K vil H_2 molekyler dissociere og en del af den termiske energi således blive absorberet. Dermed vil skyen ikke længere have termisk energi nok til at kunne modvirke den anden kollapsfase. Dissociationen vil være næsten slut ved en temperatur på omkring 10^4 K og en kerne i hydrostatisk ligevægt vil være dannet, hvori temperaturen vil fortsætte med at stige pga. sammentrækning.

Forløbet af temperaturen gennem de 4 faser kan ses på figur 3 sammen med udviklingen af Jeans massen og radien, dvs. den mindste masse og den største radius for hvilke skyen eller dele af den vil være gravitationelt bundet sammenlignet med det termiske tryk. Fragmentation vil sandsynligvis forekomme nær de to minima for Jeans massen, idet den totale masse som indgår i fragmentationen skal være større end 2 Jeans masser, for at de to dannede fragmenter kan være ubundne. Hvis vi specielt kigger på tætte dobbeltstjerner, kan vi også se at fragmentationen sandsynligvis vil forekomme ved det andet minimum, da separationen mellem fragmenterne skal være større end Jeans radius – igen for at de to fragmenter skal være ubundne. I et ikke alt for langsomt kollaps vil man forvente at massen af fragmenterne vil blive omkring Jeans massen, dvs. $10^{-3} - 10^{-2} M_{\odot}$. Altså må fragmenterne have en betydelig tilvækst i masse, før de når PMS stadiet.

Ikke fordi det er usandsynligt med en rimelig tilvækst i masse: Både observationer og simulationer viser at hver af komponenterne i unge dobbeltstjerner typisk er omgivet af skiver, men også at hele systemet er omgivet af en skive. Et eksempel på en dobbeltstjerne (HK Tauri) med en cirkumstellar skive kan ses på figur 4. Øverst i venstre hjørne ses den lysstærkeste af de to komponenter og nederst i højre hjørne stjernen, der er omgivet af en skive. Skiven ses fra siden: De yderste lag (toppen og bunden) er oplyst af stjernen, mens centret af skiven (den mørke stribe på tværs) skjuler stjernen.

En typisk cirkumstellar skive har en skalalængde på nogle få hundrede AU, hvilket er sammenligneligt med separationen mellem komponenterne i ikke alt for tætte unge dobbeltstjerner. Så en betydelig vekselvirkning mellem komponenterne i en dobbeltstjerne og deres tilhørende skiver må absolut anses for sandsynlig. Problemet er blot at sådan tilvækst af masse på komponenterne efter fragmentationen gør det mere besværligt for fragmentationsmodellerne at komme med forudsigelser om egenskaberne for de nydannede dobbeltstjerner, så lidt kynisk (eller realistisk afhængigt af temperament) kan man spørge, om grunden, til at vi trods alt tror mest på fragmentationsmodellerne, er, at de ikke kommer med nogen forudsigelser, som vi kan modbevise gennem observationer.



Figur 4. Billede fra Hubble Space Telescope af et dobbeltstjernesystem, hvor den ene stjerne er omgivet af en skive. K. Stapelfeldt (JPL) & medarbejdere/NASA.

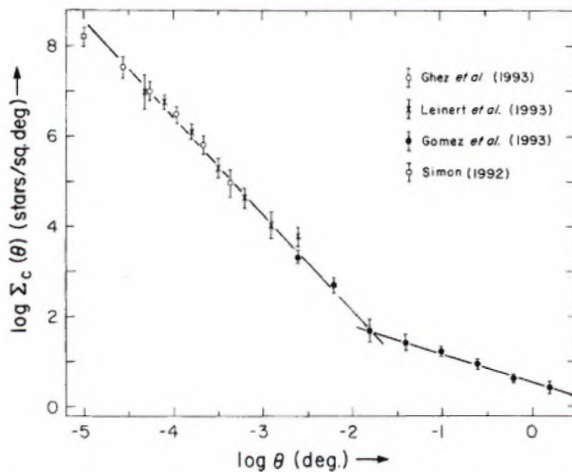
Der er da også argumenter, der taler decideret imod fragmentation under kollapse af en sky: Et stort problem er tæthedsprofilerne for kernerne i molekylskyer. Hvis en kerne har stejl tæthedsprofil ind mod kernen,

vil de inderste dele af kernen kollapse hurtigere end de ydre dele, hvilket vil gøre fragmentation umuligt. Simulationer og simple analytiske overvejelser viser, at profiler stejlere end $\rho \propto r^{-1}$ ikke umiddelbart vil kunne fragmentere. På den anden side viser observationer af kerner i nogle molekylskyer, at de har tæthedsprofiler tæt på $\rho \propto r^{-2}$ helt ind til centret af kernen (en sådan profil forventes også i et rent isotermt kollaps). Så der lader til at være en modstrid mellem det faktum at dobbeltstjerner tilsyneladende observeres i *alle* stjernedannende områder, hvorimod fragmentation kun er muligt i *nogle* områder. Det skal dog nævnes, at nogle observationer med høj opløsning af kerner viser, at en del kerner har en tæthedsprofil, der godt nok minder om $\rho \propto r^{-2}$ profilen i de ydre lag, men som derimod er fladere nær centret ($\rho \propto r^{-0.4}$). Om dette generelt er tilfældet, må vi afvente yderligere observationer (f.eks. med ALMA) for at få afklaret.

Det skal dog også nævnes at fragmentationsmodellerne også stadig er forholdsvis grove. Mange uafklarede spørgsmål er stadig tilbage f.eks. magnetfelternes rolle. Alene ved vores modeller for dannelse af enkeltstjerner har de en stor indflydelse på forløbet, og om de vil modvirke eller sørge for fragmentation, er et af de problemer, som teoretikerne vil fortsætte med at prøve at finde en afklaring på. Et andet aspekt er, hvilken rolle alternative fragmentationsmodeller, såsom fragmentering i skiven omkring dobbeltstjernerne eller fragmentation induceret af en ekstern kilde, f.eks. kollisioner mellem kerner i molekylskyer kan spille i sammensætningen af de observerede populationer af unge dobbeltstjerner.

Flerdobbelte stjerner vs. stjernehober

At der udover dobbeltstjerner også eksisterer systemer med 3, 4, 5 og flere stjerner giver lidt stof til eftertanke: Er dannelsen af dobbeltstjerner og stjernehober i virkeligheden et resultat af tilsvarende mekanismer, hvor det der adskiller, blot er skalaen over hvilken systemet dannes? Dette vil f.eks. være tilfældet, hvis vi betragter hierarkisk fragmentation, hvor vores oprindelige molekylsky fragmenterer i mindre fragmenter, der så igen kan fragmentere og dermed naturligt danne et hierarki af systemer fra dobbeltstjerner til associationer og hober af stjerner. Nogle associationer af stjerner f.eks. Orion OB associationen tyder nemlig på sådan en hierarkisk opbygning med underassociationer i associationer. En måde at teste dette på er at undersøge, om grupperingerne af stjerner har en eller flere foretrukne længdeskalaer f.eks. i sammenhæng med Jeans længden, eller om stjernedannelsesprocessen er skalaløs. En måde at gøre det på er ved at sammenligne fordelingen af nabostjerner som funktion af afstanden (hvilket f.eks. også gøres på lidt større skalaer i galakser og galaksehober med den såkaldte 2-punkts korrelations funktion).



Figur 5. Overfladetætheden af ledsagerstjerner som funktion af separationen. Fra [5].

En sammenligning kan ses på figur 5. Tydeligvis er der et afbræk ved en angular afstand svarende til omkring 0.017° og det ses at dataene må fittes med to potensfunktioner: En forholdsvis flad ved store skalaer (dvs. afstanden mellem stjernerne i hobe) og en mere stejl ved små skalaer (dvs. afstanden mellem stjernerne i f.eks. dobbelte eller tredobbelte systemer). Hvis vi havde at gøre med en stjernedannelsesproces uden en karakteristisk længde skala, ville vi forvente, at dataene kunne fittes med den samme potenslov på både store og små skalaer. Det tyder altså på, at vi på en eller anden måde har med forskellige processer at gøre – eller at der i hvert fald et sted i stjernedannelsesprocessen, bliver induceret en karakteristisk længde f.eks. ved et sammenspil mellem hvordan hobene bliver opløst og størrelsen og typen af dobbeltstjernepopulationer (har dobbeltstjernerne i givne hobe f.eks. typisk små eller store separationer?).

Interessant nok svarer fordelingen af stjerner på de store skalaer til en fraktal fordeling med en dimension 1.4 – og spørgsmålet er, om denne tilsyneladende fraktale struktur stammer fra en fraktale struktur af molekylskyerne, hvis en sådan findes. Dette bliver nemlig diskuteret flittigt i disse dage. Igen et eksempel på en problematik, som kan bidrage til puslespillet om hvordan stjerner – og måske dermed fuldstændigt

naturligt, hvordan dobbeltstjerner dannes.

Referencer:

- [1] I. A. Bonnel (1999) i “The Origin of Stars and Planetary Systems”, red. af N. D. Kylafis og C. J. Lada (Kluwer, Dordrecht).
- [2] P. Bodenheimer, A. Burkert, R. I. Klein og A. P. Boss (2000) i “Protostars and Planets IV”, red. af V. Mannings, A. Boss og S. Russel (University of Arizona Press, Tucson).
- [3] W. Brandner og R. Köhler (1998), *Astrophys. Journ.*, bind **499**, side L79.
- [4] A. Duquennoy og M. Mayor (1991), *Astron. Astrophys.*, bind **248**, side 485.
- [5] R. D. Larson (1995), *Mon. Not. Royal Astron. Soc.*, bind **272**, side 213.
- [6] S. Lubow og P. Artymowicz (2000) i “Protostars and Planets IV”, red. af V. Mannings, A. Boss og S. Russel (University of Arizona Press, Tucson).
- [7] R. D. Mathieu (1994), *Ann. Rev. of Astron. & Astrophys.* bind **32**, side 465.
- [8] P. C. Myers, F. C. Adams, H. Chen og E. Scharff (1998), *Astrophys. Journ.*, bind **492**, side 703.



Jes K. Jørgensen er specialestuderende ved Astronomisk Observatorium, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik, hvor han studerer stjernedannelse.

Index til Kvant?

Et par læsere har i forbindelse med Kvants 10 års jubilæum været så venlige at foreslå, at der udarbejdes et register over tidligere artikler i bladet. Opgaven overstiger nok, hvad redaktionens medlemmer kan tilbyde at udføre, men hvis der er en læser, der har mod på opgaven, kan Kvant tilbyde at honorere denne indsats med en komplet samling af de første 10 årgange af bladet.

Henvendelse herom kan ske til kvant@nbi.dk.

Du kan i øvrigt altid læse udvalgte artikler fra de tre nyeste nummer af Kvant på hjemmesiden <http://www.nbi.dk/dfs/KVANT.html>. Tidligere udgaver af bladet og klassesæt kan i mindre omfang bestilles også ved henvendelse til kvant@nbi.dk. Prisen for tidligere numre er 20 kr./stk.