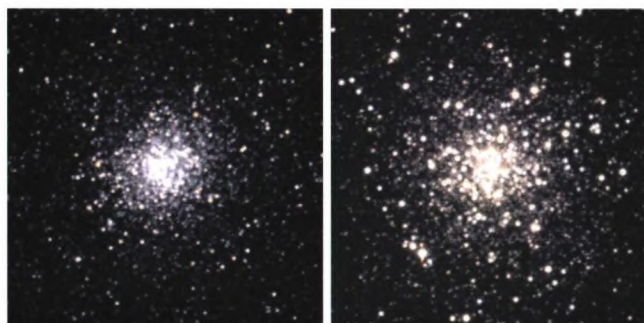


Dannelse af unge kuglehobe i andre galakser

Søren S. Larsen, Astronomisk Observatorium, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik.

Når man ser op på nattehimlen kan man godt få det indtryk at stjernerne er fordelt mere eller mindre jævnt i vores Galakse, og som hovedregel optræder enkeltvis. Dette er dog ingenlunde tilfældet: Mindst halvdelen af alle stjerner er medlemmer af *dobbeltstjernesystemer* hvor to eller flere stjerner kredser om hinanden, på samme måde som planeterne i solsystemet kredser om Solen. Men der er også en tendens til at stjerner klumper sig sammen i endnu større grupper, som vi benævner *stjernehobe*. I vores egen galakse findes der groft sagt to typer af stjernehobe: *åbne hobe*, som typisk indeholder 100 – 1000 stjerner, og *kuglehobe* som rummer 10^5 – 10^6 stjerner.

Plejaderne, som kan ses med det blotte øje, og udgør et smukt syn i en almindelig håndkikkert, er et typisk eksempel på en åben hob. En af de bedste kuglehobe på den nordlige halvkugle er M13 i stjernebilledet Hercules, som under gode betingelser netop kan skimtes med det blotte øje. Hvis man begiver sig sydpå vil man kunne se de to kuglehobe ω Centauri og 47 Tucanae, som begge er klart synlige uden hjælpemidler, og som i et mindre teleskop opløses i tusindvis af enkeltstjerner.



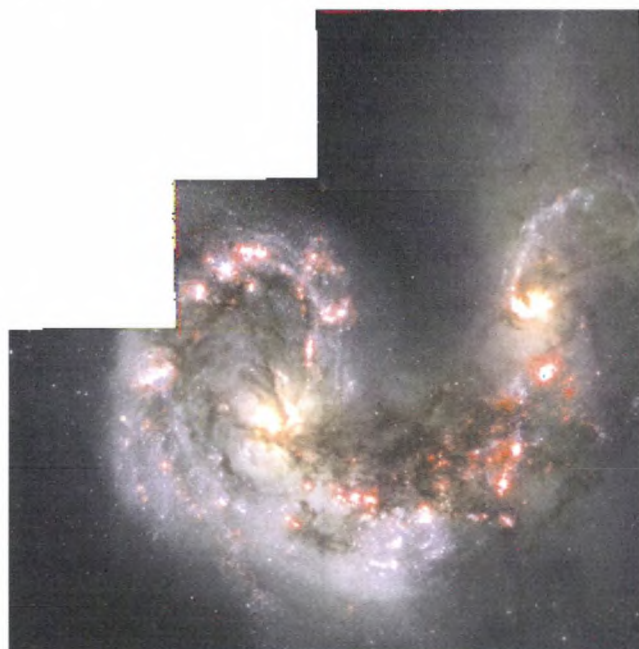
Figur 1. Til venstre: Den unge kugleformede stjernebob NGC 1866 i den Store Magellanske Sky. Til højre: En kuglebob i Mælkevejen (NGC 2298). NGC 1866's blå farve skyldes bobens lave alder, ca. 10^8 år. Billederne er taget af forfatteren med det danske 1.54 meter teleskop på La Silla, Chile.

De fleste åbne hobe er forholdsvis unge objekter med aldre på op til nogle få 100 millioner år, som primært findes i Mælkevejens skive hvor stjernedannelse finder sted. Grunden til at man ikke ser ret mange åbne hobe ældre end ca. 1 milliard år er formodentlig at de går i opløsning på deres tur rundt blandt de andre objekter i skiven. De få åbne hobe med højere aldre findes alle i stor afstand fra Mælkevejens centrum, hvor de destruktive kræfter er mindst. Mange af de stjerner der i dag ses som enkeltstjerner kan altså meget vel tænkes at have været medlemmer af en åben hob tidligere i deres liv, og studier af stjernedannende områder viser at praktisk talt alle stjerner fødes i stjernehobe. Mange af disse

hobe er dog ikke gravitationelt bundne og går hurtigt i opløsning, hvorimod andre altså er i stand til at overleve i længere tid.

I modsætning til de åbne hobe er kuglehobene alle meget gamle, med aldre på 10 – 15 milliarder år. Dermed var de blandt de første objekter som blev dannet i Mælkevejen, hvilket også ses af at de befinder sig i Mælkevejens *halo* som man regner med blev dannet før skiven. Harlow Shapley bemærkede allerede i 1918 [1] at kuglehobene ikke er jævnt fordelt på himlen. Specielt i retning mod stjernebilledet Sagittarius findes der mange kuglehobe, og ud fra en antagelse om at kuglehobene er symmetrisk fordelt omkring Mælkevejens centrum konkluderede Shapley at centret må befinde sig i den retning hvor tætheden af kuglehobe er størst, altså i Sagittarius. Han bestemte endda afstanden til centret til ca. 13 kpc (1 kpc = 1000 pc = ca. 3260 lysår), lidt større end den moderne værdi på omkring 8.5 kpc, men dog ganske godt ramt.

Shapley var således en af de første til at betragte kuglehobene som et samlet system, og ud fra egen-skaberne af dette system konkludere noget om den større sammenhæng som systemet var en del af – i dette tilfælde Mælkevejen. Derved blev årtiers omhyggelige studier af individuelle hobe sat ind i en større sammenhæng.



Figur 2. Billede fra Hubble Space Telescope af "Antenne-galaksen", NGC 4038/39. Der er tale om to kolliderende galakser med intens stjernedannelse. På dette billede er der identificeret mere end 1000 unge kuglehobe.

Kuglehobe i andre galakser

Siden forrige århundrede har det været kendt at vores nærmeste naboer, de Magellanske Skyer, indeholder et stort antal stjernehober, hvoraf de rigeste umiddelbart minder om de kuglehobe vi kender fra Mælkevejen. Det første systematiske studium af kuglehobe i andre galakser blev dog udført af Edwin Hubble, som i 1932 [2] publicerede observationer af 140 kuglehobe i Andromedagalaksen, M31. Med indførelsen af CCD detektorer i 1980'erne blev det muligt at observere kuglehobe i galakser uden for den lokale gruppe, og i dag findes der observationer af kuglehobe i mere end 100 galakser. I de fleste tilfælde er der tale om elliptiske galakser, hvilket primært skyldes at det teknisk set er enklere at detektere kuglehobe i elliptiske galakser, som på grund af deres forholdsvis simple struktur at lettere at "trække fra" billedet.

For at måle hvor mange kuglehobe en galakse indeholder definerer man den *specifikke hyppighed* S_N :

$$S_N = N_{GC} 10^{-0.4(M_V^T + 15)} \quad (1)$$

hvor N_{GC} er det totale antal kuglehobe og M_V^T er galaksens absolutte visuelle størrelsesklasse [3]. Størrelsesklasser er en logaritmisk enhed, hvor en forskel på 5 størrelsesklasser svarer til en faktor 100 i lysstyrke. Den *absolutte* størrelsesklasse angiver, hvilken størrelsesklasse et givent objekt ville have hvis det blev anbragt i en afstand på 10 parsec. S_N er altså et mål for hvor mange kuglehobe en galakse indeholder, normaliseret til galaksens lysstyrke. Derved er der taget højde for at ikke alle galakser er lige klare.

Det har vist sig at elliptiske galakser ofte indeholder langt flere kuglehobe end Mælkevejen og andre spiralgalakser. Spiraler har typisk en S_N værdi på omkring 2, hvorimod mange elliptiske galakser har $S_N = 5$ eller mere. De såkaldte cD galakser, som findes i centret af rige galaksehobe, har ofte ekstremt mange kuglehobe, med $S_N = 15 - 20$. Man har endnu ikke fundet nogen overbevisende forklaring på denne forskel.

Kuglehobene i de elliptiske galakser og i M31 minder så vidt man kan se om kuglehobene i Mælkevejen. Specielt har det vist sig at *luminositetsfordelingen* af kuglehobe omkring en galakse altid er den samme. Hvis man laver et histogram over de absolutte visuelle størrelsesklasser (M_V) for alle kuglehobe omkring en galakse, kan det altid tilnærmes af en Gauss-funktion med maksimum ved $M_V = -7.2$ og en spredning på $\sigma_v \sim 1.2$ [4]. Der er dog ikke nogen speciel fysisk grund til netop at vælge en Gauss funktion, og der findes andre analytiske funktioner der kan fitte luminositetsfordelingen ligeså godt.

Men hovedsagen er, at fordelingen altid er den samme. Dette er specielt svært at forstå, set i lyset af at den specifikke hyppighed S_N varierer så kraftigt. Disse to forhold udgør tilsammen et af hovedproblemerne indenfor forskningen i kuglehobe i andre galakser.

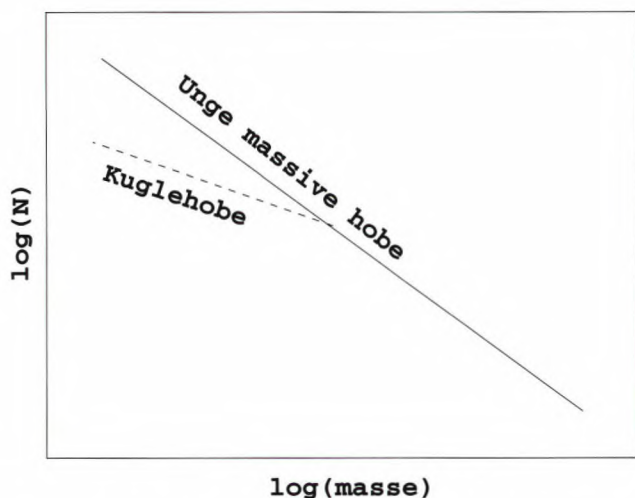
Unge kuglehobe?

Allerede fra starten havde man mistanke om at der var noget mystisk ved kuglehobene i de Magellanske Skyer: I modsætning til kuglehobe i Mælkevejen, som alle er domineret af lyset fra udviklede, røde kæmpestjerner og derfor som helhed betragtet også er røde, er mange af de kugleformede stjernehober især den Store Magellanske Sky (LMC, Large Magellanic Cloud) *blå*. Forskellen ses tydeligt på figur 1, som viser farvebilleder af en af de største hobe i LMC, NGC 1866 og en kuglebob i Mælkevejen, NGC 2298. I 1960'erne fik man efterhånden en bedre teoretisk forståelse af stjerners opbygning og udvikling, og ved at sammenligne teoretiske stjernemodeller med observationer af de blå hobe i LMC blev det klart at de "blå kuglehobe" er meget unge objekter. NGC 1866 har en alder på omkring 100 millioner år, altså svarende til en typisk åben hob i Mælkevejen, og der findes lignende, endnu yngre objekter.

Med en absolut visuel størrelsesklasse på ca. -9 er NGC 1866 klarere end de fleste kuglehobe i Mælkevejen. Man skal dog huske på at stjernehober med tiden falmer, idet de massive, lysstærke stjerner som giver de unge hobe deres blå farve, efterhånden forsvinder. Derfor kan man ikke umiddelbart omregne en forskel i lysstyrke til en masseforskel, uden også at kende aldersforskellen. NGC 1866 vil formodentlig falme med ca. 3 størrelsesklasser i løbet af de næste 10^{10} år, og vil altså til den tid have en absolut visuel størrelsesklasse $M_V \sim -6$, hvilket stadig er sammenligneligt med mange kuglehobe i Mælkevejen. Dermed er det også klart at NGC 1866 (og tilsvarende hobe i andre galakser) er ligeså tunge eller "massive" som kuglehobe i Mælkevejen, og derfor kaldes de også ofte for "unge massive hobe".

Op gennem 1990'erne har Hubble Rumteleskopet (HST) opdaget lignende unge massive hobe i adskillige andre galakser. Et af de mest berømte eksempler er "Antennen", som i virkeligheden består af to kolliderende galakser (figur 2). Der foregår intens stjernedannelse i Antennen, og HST observationerne har afsløret mere end 1000 unge massive hobe med aldre på 10 – 100 millioner år [5]. HST har også observeret andre kolliderende galakser, og der er fundet unge massive hobe i dem *allesammen*, ofte så klare som $M_V = -13$ eller klarere. Derudover har HST også fundet unge massive hobe i andre "starburst" galakser som f.eks. M82 og visse dværggalakser, alle med kraftig stjernedannelsesaktivitet. Så det ser ud til at unge kuglehobe dannes overalt hvor der er intens stjernedannelse.

De Magellanske Skyer er dog ikke deciderede "starburst" galakser, og man kender også nogle få andre eksempler på relativt "normale" galakser med unge kuglehobe, bl.a. M33 som kun er lidt længere væk end Andromedagalaksen og altså også tilhører den lokale gruppe.



Figur 3. Skematisk fremstilling af massefordelingen for gamle kuglehobe og unge massive hobe.

Det er endnu uafklaret hvilken sammenhæng der er mellem "rigtige" kuglehobe som dem vi kender fra Mælkevejen, og de unge massive hobe i LMC, M33 og i kolliderende galakser. Specielt har det været fremhævet at luminositetsfordelingen for de unge hobe ikke er den samme som for gamle kuglehobe: Luminositetsfordelingen for unge hobe kan beskrives som en simpel potensfunktion

$$N(L)dL \propto L^{-\alpha}dL \quad (2)$$

hvor L er lysstyrken, her i lineære enheder, og α typisk har en værdi på ca. -2 . Luminositetsfordelingen for gamle kuglehobe klarere end $M_V \sim -7.2$ kan i lineære enheder repræsenteres ved en lignende potensfunktion, hvorimod den svagere del af luminositetsfordelingen for gamle kuglehobe kan fittes af en potensfunktion med $\alpha \sim 1$. Hvis de unge hobes lysstyrke aftager med 3–4 størrelsesklasser i de næste 10^{10} år, skulle dette "turn-over" altså i dag findes ved $M_V \sim -10$, men det er *ikke* blevet observeret. Sagt på en anden måde er der for mange af de mindste unge hobe, i forhold til hvad man ville forvente hvis de virkelig skulle udvikle sig til kuglehobe med den samme luminositetsfordeling som man idag observerer i Mælkevejen og andre galakser. Imidlertid kan man sagtens forestille sig at de mindste hobe lettere går i opløsning end de mere massive, som er gravitationelt tættere bunde. På den anden side virker det usandsynligt at destruktions af lav-masse hobe har virket med samme effektivitet i de mange forskellige galakser hvor man idag har observationer af kuglehobe. Teoretiske beregninger af, hvordan en stjernebob udvikler sig dynamisk, er uhyre vanskelige, idet man skal simulere $10^5 - 10^6$ testpartikler over en periode på 10^{10} år, og tage hensyn til mange forskellige effekter som f.eks. stjerneudvikling, eksterne gravitationspåvirkninger og dannelse/opløsning af dobbeltstjernesystemer.

Unge kuglehobe i spiralgalakser

I sidste ende bliver det kun en strid om ord, hvorvidt unge massive hobe virkelig er nydannede udgaver af "rigtige" kuglehobe. Betragtet enkeltvis adskiller de sig kun ved deres alder, og der er god grund til at håbe på at vi kan lære en hel masse om dannelsen af kuglehobe ved at studere disse unge, massive hobe.

Et af de mest påtrængende spørgsmål er, hvorfor visse "normale" galakser som f.eks. LMC og M33, indeholder unge massive hobe medens andre (f.eks. Mælkevejen og M31) ikke gør. Det har været foreslået at der er en sammenhæng med den *morphologiske* type, dvs. med spiralstrukturen [6], dog uden nogen egentlig fysisk begrundelse.

Der har indtil nu kun været få systematiske studier af stjernebobe i andre "normale" galakser, når man ser bort fra de mange observationer af kuglehobe i elliptiske galakser. Spiralgalakser er vanskeligere at have med at gøre pga. deres komplicerede struktur og tilstedeværelsen af mange forskellige objekter som kan forveksles med stjernebobe, bl.a. individuelle, lysstærke stjerner og såkaldte "HII regioner" (områder med nydannede stjerner som stadig er indhyllet i den gas hvorfra de er dannet).

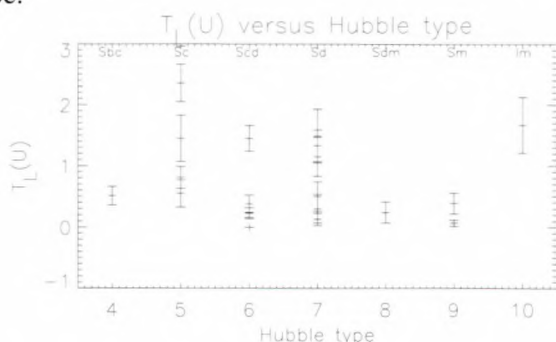
For at lære noget mere om unge massive hobe startede jeg for tre år siden på et projekt som gik ud på at lede efter unge massive hobe i et antal nære spiralgalakser. Observationerne er udført dels med det danske 1.54 meter teleskop på ESO's observatorium på La Silla, Chile, og dels med det Nordisk Optiske Teleskop (NOT) på La Palma. I alt blev der observeret 21 nære spiralgalakser, udvalgt således at de alle var mere eller mindre "face-on", dvs. set "ovenfra". Da vi forventede at unge massive hobe ville findes i galaksernes skiver, skulle problemer med absorption på denne måde blive mindst mulige. Observationerne og datareduktionen er beskrevet i detaljer i en serie artikler i *Astronomy & Astrophysics* [7–8], og jeg skal her kun fremhæve hovedresultaterne.

Grundet vore udvælgelseskriterier har vi en øvre aldersgrænse på omkring 500 millioner år for de hobe vi har detekteret. Samtidig er der en nedre grænse for massen på omkring $10^4 M_\odot$, hvilket er tungere end de mest massive, åbne hobe i Mælkevejen. Objekter som f.eks. NGC 1866 ville derimod blive inkluderet i vores undersøgelse.

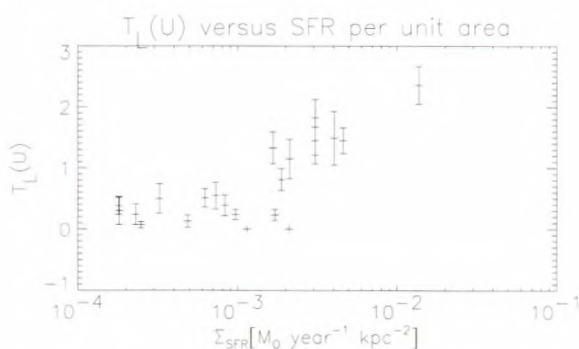
I lighed med den "specifikke hyppighed" S_N har vi defineret en tilsvarende størrelse T_N for de unge hobe. Her er det værd at understrege, at medens en galakse altid indeholder et veldefineret antal gamle kuglehobe, afhænger antallet af *unge* hobe af den nedre detektionsgrænse, og det er derfor væsentligt at specificere hvordan man har udvalgt de unge hobe. Dette problem kan man delvist undgå ved i stedet at operere med den specifikke *luminositet*

$$T_L = 100 \frac{L_{\text{hobe}}}{L_{\text{galakse}}} \quad (3)$$

hvor L_{hobe} og L_{galakse} er den samlede lysstyrke af hobe og af værtsgalaksen. T_L angiver altså, hvor meget lys vi modtager fra de unge hobe i en galakse, relativt til galaksen selv. Så længe eksponenten α i luminositetsfunktionen (2) er mindre end 2, stammer det meste af lyset fra de mest massive hobe, og det betyder derfor ikke så meget hvis man mangler nogle af de svagere hobe.



Figur 4. Den specifikke luminositet T_L som funktion af morfologisk type. Spiralstrukturen bliver gradvis mere "åben" fra Sbc – Sdm, og går til sidst helt i opløsning for de irregulære galakser (Sm og Im).



Figur 5. Den specifikke luminositet T_L som funktion af stjernedannelsesraten per areal enhed (Σ_{SFR}).

Først og fremmest fandt vi en stor variation i T_L fra galakse til galakse. Nogle galakser indeholdt altså et stort antal unge massive hobe, medens andre ikke gjorde. I figur 4 er T_L vist som funktion af den morfologiske type, og som det ses er der ikke nogen særligt tydelig sammenhæng. Fremfor alt er der en stor spredning i T_L ved enhver given type.

Derimod viste det sig, at T_L korrelerer kraftigt med stjernedannelsesraten Σ_{SFR} i galakserne (figur 5), dvs. hvor mange stjerner der dannes per år. Σ_{SFR} er bestemt ud fra den infrarøde lysstyrke af galakserne, som er en god indikator for stjernedannelsesaktivitet idet kraftig stjernedannelse fører til opvarmning af støvet i en galakse, der så udsender infrarød stråling. De infrarøde lysstyrker er målt af IRAS satellitten. For at opnå uafhængighed af både afstand og absolut størrelse er Σ_{SFR} desuden normaliseret til arealet af galaksernes skiver.

Umiddelbart virker sammenhængen mellem T_L og Σ_{SFR} måske ikke som et overraskende resultat: Jo flere stjerner der dannes, desto flere massive stjerne-

hobe dannes der også. Her er det imidlertid vigtigt at huske på, at galakserne selv også vil blive klarere når der forgår kraftig stjernedannelse, så en høj T_L værdi i galakser med en høj Σ_{SFR} betyder at der dannes flere hobe relativt til antallet af stjerner. I de 21 galakser, vi har observeret, varierer T_L i intervallet 0.1 – 2 (se f.eks. figur 5), hvorimod galakser med virkelig kraftig stjernedannelse som f.eks. Antennen har T_L værdier på måske 10 – 20.

Med vores nuværende observationer kan vi ikke svare på, om de aktivt stjernedannende galakser generelt indeholder mange stjernehobe, eller om de blot danner forholdsvis mange massive hobe hvorimod antallet af lav-masse hobe svarer til det, der ses i f.eks. Mælkevejen. Med andre ord har vi ikke tilstrækkeligt kendskab til luminositetsfordelingen af hobe i de galakser, vi har observeret – er det en simpel potensfunktion af samme form som (2), eller er der en fysisk betinget øvre grænse for, hvor massive hobe en given galakse kan danne? For at besvare disse spørgsmål kræves mere detaljerede observationer end vi har haft mulighed for at lave hidtil, f.eks. med det nye *Very Large Telescope* eller med Hubble Rumteleskopet, således at man også vil kunne detektere de mindre hobe.

Noget kunne dog tyde på at der måske er en øvre grænse, og at denne grænse varierer fra galakse til galakse: I Mælkevejen findes der stort set ingen åbne hobe tungere end ca. $10^4 M_{\odot}$ [9], selv om man statistisk set ville forvente en del hobe med noget højere masser hvis luminositetsfordelingen ikke havde nogen fysisk øvre grænse. I de Magellanske Skyer findes som allerede nævnt betydeligt tungere unge hobe, og i en af de rigeste galakser vi har observeret (M83) ser det ud til at der er en øvre grænse omkring $2 \times 10^5 M_{\odot}$.

Dannelse af stjernehobe

Hvad fortæller alt dette så om fysikken bag dannelse af stjernehobe, og om dannelsen af "rigtige" kuglehobe?

Der er meget lang vej igen, før dannelsen af stjernehobe kan siges at være velforstået. Indtil videre er der problemer nok med at forstå hvordan enkeltstjerner dannes, specielt de meget massive stjerner som udvikler sig hurtigt og påvirker deres omgivelser kraftigt, ikke mindst ved at eksplodere som supernovaer.

Det virker dog rimeligt at antage, at en stjernehob dannes ved at en tilpas stor mængde gas samles og begynder at trække sig sammen. Efterhånden vil tætheden i gasskyen vokse, og på et tidspunkt begynder der at dannes stjerner. Mælkevejen er det eneste sted, hvor vi kan studere denne proces i en vis grad af detalje. Her foregår det meste stjernedannelse i såkaldte GMC'er (kæmpemolekylskyer eller *Giant Molecular Clouds*), som primært findes i Mælkevejens spiralarme. GMC'er har typiske masser på $10^5 M_{\odot}$ og udstrækninger på ca. 50 pc, svarende til en middeltæthed på ca. 50 molekyler pr. cm^3 . Strukturen af GMC'er er dog meget inhomogen, og en stor del af deres masse er samlet i klumper

og kerner med tætheder på $10^3 - 10^5 \text{ cm}^{-3}$ eller mere. Det er i de tætteste dele af disse kerner, stjernedannelsen foregår.

For at få dannet en stjernebob, kræves der altså at en tilpas stor mængde gas samles, og opnår en tæthed på ca. 10^5 cm^{-3} . Man kan vise, at mindst 30 – 40% af gassen må omdannes til stjerner, idet hoben ellers ikke vil være gravitationelt bundet når den overskydende gas og det dertil hørende gravitationspotentiale blæses væk af de nydannede stjerner. For at opnå en tilstrækkelig høj stjernedannelseseffektivitet må stjernedannelsen foregå så hurtigt at stort set al gassen er blevet til stjerner inden de første massive stjerner eksploderer som supernovaer efter nogle få millioner år. For mindre hobe (mindre end ca. $1000 M_\odot$) hjælper det dog noget, at de statistisk set ikke vil danne stjerner som er massive nok til at gå af som supernovaer.

Man kan formode at massefordelingen af åbne hobe er snævert forbundet med massefordelingen af GMC'er. I Mælkevejen findes der kun meget få GMC'er tungere end $10^6 M_\odot$, og hvor massespektret under denne grænse følger en potensfunktion svarende til (2), falder det eksponentielt af over $10^6 M_\odot$. De hobe som dannes i GMC'er i Mælkevejen udgør normalt under 1% af GMC'ens totale masse, hvilket svarer nogenlunde til den observerede øvre grænse for massen af åbne hobe.

Vi er nu tilbage ved spørgsmålet om, hvorfor visse galakser danner langt mere massive stjernebobbe end Mælkevejen. Foregår stjernedannelsen i disse galakser mere effektivt, således at en hel GMC kan kontrahere til den nødvendige tæthed og danne en massiv stjernebob, eller er GMC'er simpelthen større i visse galakser, således at de dannede hobe også her udgør en relativt lille brøkdel af den totale masse i en GMC? Og hvilke grundlæggende egenskaber ved en galakse forårsager overhovedet denne forskel?

Man har i mange år vidst, at der er en sammenhæng mellem *gastætheden* i en galakse og dens stjernedannelsesrate. Dette er den såkaldte *Schmidt-lov* [10], som siger at stjernedannelsesraten (Σ_{SFR}) følger *gastætheden* (f.eks. i solmasser per pc^2) i en potens N :

$$\Sigma_{\text{SFR}} \propto \Sigma_{\text{gas}}^N \quad (4)$$

hvor N har en værdi på ca. 1.4 [11]. Når *gastætheden* vokser, stiger stjernedannelsesraten altså også, men hurtigere end *gastætheden* selv.

Dette resultat giver måske også et hint til, hvorfor galakser med en høj stjernedannelsesrate danner mere massive stjernebobbe: Den højere *gastæthed* gør det lettere at samle de store mængder gas, som er nødvendige for at danne massive hobe. Faktisk har man i visse galakser med en høj stjernedannelsesrate (bl.a. M83 og M51) observeret molekylskyer med masser på op til $6 \times 10^7 M_\odot$, såkaldte GMA'er ("Giant Molecular Associations"), som måske kunne være kandidater til fødesteder for unge massive hobe. Det er blevet foreslået at de gamle kuglehobe i Mælkeve-

jen og andre galakser dannedes i lignende "super-GMC'er" [12]. Disse super-GMC'er kunne være identiske med de såkaldte "Searle-Zinn" fragmenter, som iflg. visse teorier udgjorde de oprindelige byggeklodser som dannede galakserne.

Bortset fra at en høj *gastæthed* i sig selv kan tænkes at gøre det lettere at samle store mængder gas, mangler vi stadig en forklaring på, hvordan stjernedannelsen kan foregå tilstrækkelig effektivt til at danne en bunden hob med en masse på $10^5 M_\odot$. Der er teoretiske argumenter for, at en af de nødvendige betingelser for at danne en massiv, bunden hob er et højt *tryk* [13]: Et tilstrækkeligt højt tryk kan holde sammen på skyen, også efter at de første stjerner er blevet dannet, således at stjernedannelsen kan fortsætte og opnå den nødvendige høje effektivitet. En høj tæthed vil automatisk give et højt tryk, og den kraftigere stjernedannelse vil hæve temperaturen og dermed yderligere bidrage til et højt tryk i det interstellare medium. Dermed vil der være bedre betingelser for at få samlet store mængder gas ved en høj tæthed og danne massive hobe.

Endelig er det også muligt at stjernedannelse påvirker gasskyerne mere direkte via supernovaeksplosioner og "vinde" fra nydannede stjerner som sender chokbølger ud gennem det interstellare medium og hjælper med at komprimere gassen.

Der mangler dog mange brikker, inden hele puslespillet er lagt. Det er f.eks. ikke velforstået, hvilke fysiske mekanismer der fører til at GMC'erne selv dannes, og hvordan strukturer inden i dem udvikles. Temperaturen i en molekylsky er typisk kun nogle få K, hvilket er alt for lidt til at skabe balance mellem skyens selv-gravitation og dens interne tryk. GMC'er er med andre ord mange størrelsesordener tungere end den *Jeans* masse som svarer til deres temperatur og tæthed. GMC'er ville derfor kollapse under deres egen vægt i et frit fald, med mindre andre mekanismer forhindrer dem i det. Man regner med at GMC'er understøttes af en kombination af tryk udøvet af magnetfeltet i skyerne og turbulens, og sandsynligvis er disse mekanismer også bestemmende for hvordan strukturer internt i skyerne udvikler sig. For at opnå en teoretisk forståelse er man nødt til at støtte sig til numeriske simulationer som tager højde for alle disse processer, og samtidig har tilstrækkelig høj opløsning til både at beskrive skyen globalt og følge udviklingen af klumper og kerner. Først i de seneste år er det blevet muligt at udføre sådanne simulationer, og alt tyder på at gravitationelle kræfter kun er en ud af mange faktorer, man må tage med i beregningerne.

Sammenfatning

Vi har set at unge massive hobe findes overalt hvor der foregår kraftig stjernedannelse. Kolliderende galakser med deres ekstremt mange unge hobe udgør ikke et egentligt specialtilfælde, men repræsenterer blot det ene yderpunkt af en korrelation som strækker

sig fra galakser med relativt lav stjernedannelsesaktivitet (f.eks. Mælkevejen) over galakser med højere stjernedannelsesrater (de Magellanske Skyer, M83 og andre) til deciderede "starburst" galakser. Jo højere stjernedannelsesrate, desto flere og mere massive unge hobe dannes der. Denne sammenhæng skyldes muligvis at galakser med kraftig stjernedannelse har en høj gastæthed, som dels gør det lettere at samle de store mængder gas som kræves for at danne en massiv stjernebob, og som dels leverer det høje tryk som er nødvendigt for at holde sammen på gasskyen indtil størstedelen af gassen er blevet til stjerner.

En sammenhæng mellem stjernedannelsesrate og dannelse af massive hobe kunne også forklare de høje S_N værdier for de centrale cD galakser i rige galakse-hobe. cD'ere er muligvis dannet ved kollision af mange enkeltgalakser tidligt i Universets historie, hvilket utvivlsomt har ført til voldsom stjernedannelse ligesom det i dag observeres i f.eks. Antennen. Vi ville derfor også forvente at der dannedes mange massive hobe, præcist som observeret. Dette forklarer dog stadig ikke hvorfor luminositetsfordelingen for gamle kuglehobe er så universel.

For at forstå dannelsen af stjernebobbe til bunds må man også forstå dannelsen af enkeltstjerner i hobene, og det miljø som hobene dannes i – altså deres værts-galakser. Som astronom kan man jo ikke studere en hob i et laboratorium og betragte forskellige processer isoleret. Astronomiske objekter kan kun studeres på afstand i deres naturlige omgivelser, som normalt er alt for komplicerede og sjældent tilstrækkeligt velforståede til at vi kan beskrive alle relevante processer. Men det er vilkårene, og så meget desto mere tilfredsstillende er det, hver gang endnu en brik falder på plads.

Referencer:

- [1] H. Shapley, Astrophysical Journal **48** (1918) 154.
- [2] E. Hubble, Astrophysical Journal **75** (1932) 44.
- [3] W. E. Harris og S. van den Bergh, Astronomical Journal **86** (1981) 1627.

- [4] W. E. Harris, Ann. Rev. Astron. Astrophys. **29** (1991) 543.
- [5] B. C. Whitmore m. fl., fortryk (1999).
- [6] R. C. Kennicutt og Y.-H. Chu, Astronomical Journal **95** (1988) 720.
- [7] S. S. Larsen, Astronomy & Astrophysics Suppl. Ser., under trykning (1999).
- [8] S. S. Larsen og T. Richtler, Astronomy & Astrophysics **345** (1999) 59.
- [9] S. van den Bergh og A. Lafontaine, Astronomical Journal **89** (1984) 1822.
- [10] M. Schmidt, Astrophysical Journal **129** (1959) 243.
- [11] R. C. Kennicutt, Ann. Rev. Astron. Astrophys. **36** (1998) 189.
- [12] W. E. Harris og R. E. Pudritz, Astrophysical Journal **429** (1994) 177.
- [13] B. G. Elmegreen og Yu. N. Efremov, Ap. J. **480** (1997) 235.



Søren S. Larsen har netop afsluttet sin Ph.D ved Astronomisk Observatorium, NBIfAFG. Fra nytår 2000 arbejder han med kuglehobe ved Lick Observatoriet i Californien.

Læserbreve i Kvant

På bagsiden af sidste nummer af Kvant omtalte vi at civilingeniør Kay Akselbo havde rost bladet i "Ingeniøren", og at vi derfor havde foræret "Ingeniøren" et gratisabonnement, så de kunne pleje deres læsere lidt bedre. Redaktionen af "Ingeniøren" har i øvrigt siden pænt takket for abonnementet, og nu har redaktøren også modtaget et indlæg fra Kay Akselbo, hvori han skriver:

Det er en god ide med "petit-stof" på bagsiden. Et blad lever godt med anekdotisk materiale, og for den sags skyld kunne vi fordøje meget mere – og eventuelt blandet i det øvrige stof. Så når du nu har ladet dine læsere vide, at INGENIØREN har fået et gratis abonnement på grund af mig, kunne du sammesteds fortælle dem, at jeg også mener, at "det udmærkede magasin" KVANT kunne pleje både sine læsere og sine forfattere bedre – nemlig ved at ud-

vikle en levedygtig debat- og læserbrevside, hvor alle kunne stille spørgsmål, komme med forslag og øve kritik. I de første mange år lovede man os i hvert eneste nummer en sådan afdeling, men den kom aldrig. Burde man ikke undersøge hvorfor? Kan det f.eks. være, fordi man ikke gider vente på en dialog, der genoptages med så lange mellemrum – og iøvrigt sjældent til tiden, eller anses det måske ikke for god tone her i landet at diskutere andres arbejde? Den slags hæmninger har man ikke i de store internationale tidsskrifter, men de kommer jo altså også en gang om måneden, og det vil jo nok være for meget forlangt?

Redaktionen (som kan kontaktes på kvant@nbi.dk) giver hermed ideen videre til læserne!