

DET KONGELIGE DANSKE VIDENSKABERNES SELSKABS PJECE SERIE

GRUNDVIDENSKABEN I DAG

25



BENGT STRÖMGREN

ASTRONOMIENS UDVIKLING I DE
SIDSTE HALVTREDS ÅR

UDGIVET AF FOLKEUNIVERSITETET I KØBENHAVN

1980

Redaktion:

professor, dr. phil. MOGENS BLEGVAD
administrator, dr. phil. ERIK DAL
professor H. HØJGAARD JENSEN

BENGT STRÖMGREN, professor i astrofysik, er født i 1908 og blev dr. phil. i 1929. Han blev udnævnt til professor ved Københavns universitet i 1938 og virkede 1950–67 i U.S.A., til 1957 som direktør for Yerkes Observatory og McDonald Observatory, derefter som professor ved Institute for Advanced Study i Princeton, New Jersey. Fra 1967 var han professor i astrofysik ved Københavns universitet og tillige i en periode direktør for NORDITA (Nordisk Institut for Teoretisk Atomfysik). I 1939 blev han medlem af Videnskabernes Selskab, 1969–1975 selskabets præsident. Han var præsident for International Astronomical Union 1970–73. Bengt Strömgren er æresdoktor ved Harvard University, Lunds universitet, universitetet i Cordoba, Argentina, og Uppsala universitet. Han har modtaget Royal Astronomical Society's guldmedalje, Ole Rømer medaljen og H. C. Ørsted medaljen.

Bengt Strömgren har skrevet en række afhandlinger i inden- og udenlandske tidsskrifter om problemer om stjernernes struktur og udvikling, om stoffet i det interstellare rum og vedrørende bestemmelse af stjerners kemiske sammensætning og alder. Han har udgivet en populær bog, *Universets udforskning* (1940, 2. udg. 1955).

*Hæfte 21–25 er støttet af Niels Bohr Legatet,
dette hæfte desuden af NORDITA.*

Forlag:

Folkeuniversitetet i København
Købmagergade 52
1150 København K

Bengt Strömgren

ASTRONOMIENS UDVIKLING I DE SIDSTE HALVTREDS ÅR

I tidsrummet 1920–80 har astronomien gennemgået en vældig udvikling, og især de sidste halvtreds år har bragt en lang række meget betydningsfulde nye forskningsresultater.

I dag er man fortrolig med de kernefysiske processer, der medfører frigørelse af energi i solens og stjernernes indre, og som er afgørende for disse himmellegemers udstråling af lys. Solens og stjernernes kemiske sammensætning og tillige denne sammensætnings ændring med tiden er blevet kendt. Den galakse, som solen befinder sig i, har man kortlagt med hensyn til både struktur og bevægelsesforhold. Galakser udenfor vor egen har kunnet studeres, for de nærmestes vedkommende i detaljer, for fjerne galakser – til afstande på ca. 10 milliarder lysår – i et sådant omfang, at væsentlige egenskaber vedrørende universets struktur og dynamik ud til den nævnte enorme afstand er blevet kendt. Endelig er det i dag muligt at gøre rede for væsentlige træk i universets ændringer med tiden gennem milliarder af år. *I 1920 var ikke et af disse astronomiske forskningsresultater nået.*

Atomfysikkens, kvantefysikkens og derefter atomkernefysikkens udvikling har været helt afgørende for opnåelsen af mange af de omtalte fremskridt indenfor astronomien. Af største betydning har også den tekniske udvikling været – den udvikling, som gjorde det muligt at konstruere ikke blot stadig større og lysstærkere optiske kikkerter og radioteleskoper, men også rum-teleskoper til udforskning af stråling fra verdensrummet, der ikke kan gennemtrænge jordatmosfæren. Som følge af denne udvikling kan slutninger vedrørende stjerners og galaksers egenskaber i dag drages på grundlag af iagttagelser af strålings-spektret lige fra kortbølget gammastråling og røntgenstråling over ultraviolet, synlig og infrarød stråling-til kortbølget såvel som langbølget radiostråling.

Endelig må det nævnes, at en traditionelt meget vigtig gren af den teoretiske astronomi og astrofysik, nemlig den som baseres på omfattende numeriske beregninger, har gennemgået en stor og frugtbar udvikling, efter at elektroniske regnemaskiner og elektronisk data-behandling kom ind i billedet.

I det følgende gøres der rede for hovedpunkter i astronomiens udvikling i de sidste 50–60 år, med særlig vægt på visse afgørende fremskrift – milepæle i denne forsknings historie.

Først skal dog, i de næste tre afsnit, det astronomiske verdensbillede af i dag kort skitseres: *Hvad* ved vi om stjerner og galakser, om fordelingen i rummet og om dimensioner, masser og energiudstråling. Derefter fortælles der i de følgende tre afsnit om, *hvordan* man er nået til resultaterne. Endelig vender vi i denne fremstillings sidste afsnit tilbage til beskrivelsen af nutidens astronomiske verdensbillede, idet vi ser på spørgsmål om universets ændring med tiden gennem milliarder af år: Universets evolution.

Der er i de sidste halvtreds år sket så mange og store fremskridt indenfor astronomien, at det ved udarbejdelsen af denne redegørelse har været nødvendigt at træffe et valg: Beret-

ningen om milepæle i forskning vedrørende vor galakse, dens stjerner og dens interstellare stof, er ret udførlig. Derimod er fremstillingen vedrørende udforskning af galakser udenfor vor egen mere kortfattet og derfor suppleret med litteraturhenvísninger. Udforskningen af solsystemets planeter og måner har ved indsats af rumsatellitter givet resultater, der i detaljerigdom nærmer sig geologiens og jord-meteorologiens. En redegørelse herfor udgør i dag et stort kapitel for sig, som ikke er medtaget i denne fremstilling.

1. Om de iagttagne himmellegemers plads i rummet

For at kune bestemme et himmellegemes plads i rummet må man foruden retningen også kende afstanden, og afstandsbestemmelse indtager derfor en central plads indenfor astronomien. For solens, planeterens og planetmånerens vedkommende blev opgaven løst alle-

Tabel 1

	Meter	Lysår
Jordens radius	6×10^6	
Solens radius	7×10^8	
Middelafstand sol-jord	1.5×10^{11}	
Middelafstand sol-Pluto	6×10^{12}	0.0006
	Meter	Lysår
1 lysår	1×10^{16}	1
Gennemsnitsafstand fra stjerne til nabostjerne i solens omegn	4×10^{16}	4
Afstand sol-mælkevejssystemets centrum	3×10^{20}	30 000
Mælkevejssystemets største diameter	1×10^{21}	100 000
	Meter	Lysår
Afstand sol-Magellanske skyer	2×10^{21}	200 000
Afstand til Andromedatågen	2×10^{22}	2 millioner
Afstand til Virgo-galaksehoben	5×10^{23}	50 millioner
	Meter	Lysår
Afstand indenfor hvilken der findes en million galakser	2×10^{24}	200 millioner
Fjerneste elliptiske galakser, til hvilke afstanden er målt	5×10^{25}	5 000 millioner
Fjerneste iagttagne kvasarer	1×10^{26}	10 000 millioner

Fig. 1. Skematisk billede af vor galakse, set »fra siden«, dvs. fra et punkt i det hovedplan, som angiver systemets største udstrækning.



rede i 1700-tallet med en nøjagtighed, som var tilstrækkelig til et godt oversigtsbillede af solsystemet. Gennem 1800-tallet lykkedes det at bestemme afstande til forholdsvis nært beliggende fiksstjerner (indenfor 100 lysår) ved målinger af ændringen af retningen til stjernen alt efter jordens stilling i sin bane omkring solen.

Til afstandsbestemmelse for fjernere fiksstjerner udvikledes i vort århundrede metoder, som beror på, at stjerners tilsyneladende lysstyrker afhænger af afstanden. Herom nærmere i afsnit 4. Om metoder til bestemmelse af afstande til galakser udenfor vor egen berettes i afsnit 6. Her skal der kort gøres rede for *resultater* af målinger af afstande – resultater som udgør en væsentlig bestanddel af det astronomiske verdensbillede.

Tabel 1 giver en oversigt over dimensioner og afstande i verdensrummet. Vi begynder med jordens radius, ca. 6000 kilometer eller, udtrykt i meter, 6×10^6 m, dvs. 6 efterfulgt af 6 nuller. (Tallet er afrundet, da det her drejer sig om en oversigt. Størrelsen af jordens ækvator-radius er kendt med meget stor nøjagtighed, dvs. med mange betydende cifre, og det samme gælder også andre af de anførte værdier). Derefter følger solens radius, som er ca. 100 gange større, efterfulgt af afstanden sol-jord, som igen er ca. 200 gange større og endelig gennemsnitsafstanden fra solen til den yderste planet i solsystemet, Pluto – 40 gange større.

Springet fra jordens radius til afstanden sol-Pluto er karakteriseret ved en faktor på 1 million. I anden afdeling af tabel 1 begynder vi med den i astronomien meget anvendte afstandsenhed 1 lysår, dvs. den længde, som lyskvanter (fotoner), idet de bevæger sig med en hastighed på 300 000 kilometer pr. sekund, tilbagelægger i løbet af 1 år. Det således definerede lysår udgør 1×10^{16} meter (dvs. 1 efterfulgt af 16 nuller meter, eller 10 billioner kilometer). I tabellen er dernæst anført gennemsnitsafstanden fra stjerne til nabostjerne i solens omegn, nemlig 4 lysår. Afstanden fra solen til den nærmeste fiksstjerne er meget

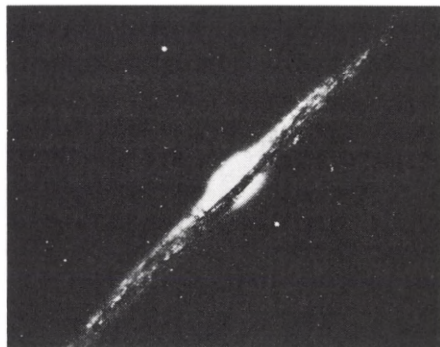


Fig. 2. En spiralakse (Messier 51), set i en retning som er vinkelret på det plan, i hvilken galaksen har sin største udstrækning.

nær lig 4 lysår, og dette tal karakteriserer på betydningsfuld måde strukturen af det system af stjerner, som solen tilhører. Sammenligner man den nævnte afstand på 4 lysår eller 4×10^{16} meter med solradien på 7×10^8 meter, konstaterer man et spring på 60 millioner. Nu er solen, som vi skal se i det følgende, med hensyn til radius en typisk stjerne. Der findes både større og mindre stjerner, men gennemsnitsradien er ikke meget forskellig fra solradien. Stjernernes dimensioner er således meget små i forhold til deres indbyrdes afstand i det system – mælkevejssystemet eller vor galakse – som de tilhører. Anderledes udtrykt, stjernerne udfylder kun en overordentlig lille brøkdel af det rum, som de befolker. I solens nærmere omegn indenfor vor galakse er denne brøkdel ca. en billiontedel af en billiontedel.

De næste to tal i tabel 1 vedrører vor galakse. Stjernerne i dette stjernesystem befolker et område i verdensrummet, der har form som en ret fladtrykt skive med en udbuling i midten. Figur 1 viser skematisk vor galakse set fra siden, dvs. fra et punkt i det hovedplan, som angiver systemets største udstrækning, og man bemærker fladtrykningen. Set udefra, i en retning vinkelret på hovedplanen, fremtræder galaksen derimod omtrent cirkelformet. Solen ligger ekscentrisk i systemet i en afstand, anført i tabel 1, på 30 000 lysår fra centret.

Fig. 3. En spiralakse set »fra siden«, jfr. fig. 1.



Galaksens diameter i systemets hovedplan udgør 100 000 lysår. Springet fra jordens radius til denne dimension er ca. 150 billioner. I afsnit 4 vender vi tilbage til spørgsmål om vor galakses struktur og dynamik.

Oversigten over dimensioner og afstande i verdensrummet fortsættes i tabel 1 i tabellens tredie afdeling. Her anføres afstanden til vor galakses nærmeste naboer i rummet, de Magellanske skyer. Det drejer sig om to stjernesystemer, der ligesom vor galakse består af et meget stort antal enkeltstjerner, men som dog er betydelig mindre systemer. Dernæst følger Andromeda-galaksen, som i størrelse og struktur ikke er meget forskellig fra vor egen galakse. Afstanden er 200 000 lysår til de Magellanske skyer og 2 millioner lysår til Andromeda-galaksen. Sammenholder vi disse tal med det, der angiver størrelsen af vor galakse, og dermed også omtrentlig størrelsen af Andromeda-galaksen, så finder vi, at vel er afstandene større end dimensionerne, men ikke overordentlig meget større. Her er en slående kontrast mellem forholdene indenfor hver enkelt galakse og i galaksernes verden: Stjernerne i en galakse udfylder kun en umådelig lille brøkdel af det rum, de befolker, medens den tilsvarende brøkdel i galaksernes verden er langt mindre ekstrem. Den udgør noget mindre end en timilliontedel, i modsætning til en billiontedel af en billiontedel for stjernernes vedkommende.

Vor galakse, de Magellanske skyer samt Andromeda-galaksen udgør sammen med mellem 20 og 30 andre galakser (alle mindre end vor egen og Andromeda-galaksen) et slags oversystem, en såkaldt galaksehob. I galaksernes verden spiller sådanne hobe en afgørende rolle, idet langt de fleste galakser tilhører en hob. Fordelingen af galakser i verdensrummet er med andre ord ujævn. Nogle galaksehobe er langt større end den lokale hob, som vor galakse tilhører. Den nærmeste meget store galaksehob ses i retning af stjernebilledet Virgo (Jomfruen) og kaldes Virgo-galaksehoben. Dens afstand udgør, som anført i tabel 1, 50 millioner lysår. Springet fra jordens radius er nu 100 000 billioner.

I den fjerde og sidste afdeling af tabel 1 angives den afstand, indenfor hvilken der findes en million galakser, til 200 millioner lysår. En elementær beregning giver da som resultat, at man i sfæriske volumener med en radius på 2 millioner lysår gennemsnitlig skulle forvente at finde 1 galakse. Det virkelige antal galakser inden for en afstand af 2 millioner lysår er over 10 gange større, og dette beror på, at vor galakse som allerede nævnt er med-

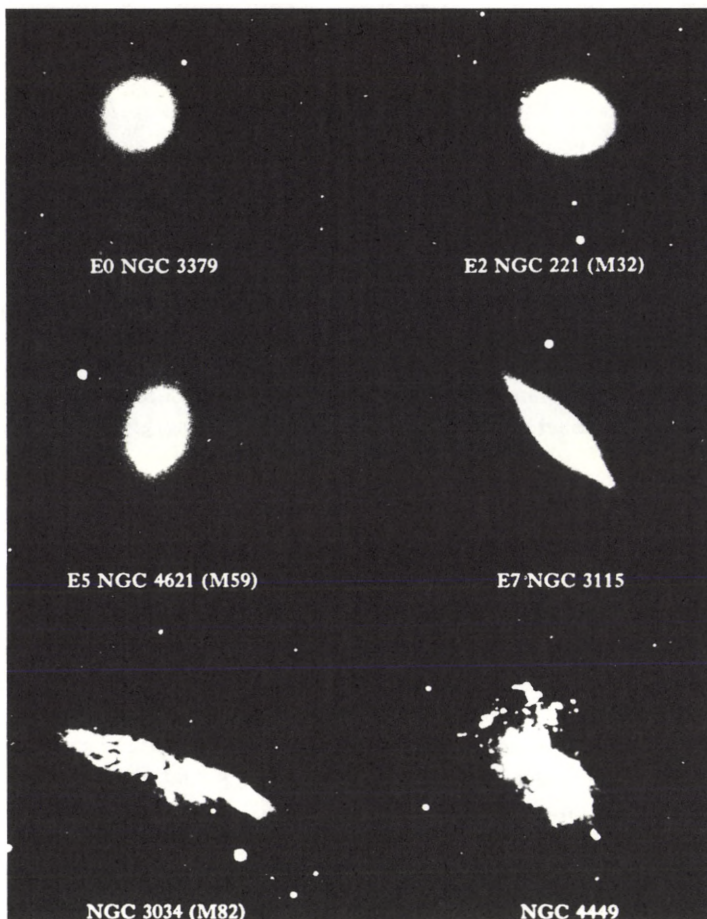


Fig. 4. Forskellige typer af galakser, foruden fire elliptiske galakser med forskellig grad af fladtrykning også to galakser med uregelmæssig form, af en klasse, der kaldes irregulære galakser.

lem af en galaksehob. På den anden side, hvis man tilsvarende beregner det forventede antal galakser indenfor en afstand af 2000 millioner lysår, så finder man tallet 1 milliard, og dette stemmer meget godt med iagttagelserne (galakse-tællinger i stikprøvearealer på himlen). Vi er her stødt på et forhold, som er karakteristisk for fordelingen af galakser i verdensrummet: I det »små«, over afstande af få millioner lysår, er fordelingen meget ujævn, men i det »store«, dvs. over afstande på en milliard lysår eller mere er fordelingen jævn. I denne fremstillings afsnit 6 vender vi tilbage til dette spørgsmål.

I galaksernes verden findes mange arter af galakser med vidt forskellig struktur og af vidt forskellig størrelse. Figur 2 viser en *spiralgalakse* set i en retning, som er vinkelret på galaksens hovedplan, dvs. det plan i hvilken galaksen har sin største udstrækning. I figur 3 er afbildet en spiralgalakse set »fra siden«, dvs. i en retning omtrent beliggende i hoved-

planet, hvorved den fladtrykte skiveform kommer frem, medens spiralstrukturen i hovedplanet ikke ses. Vor egen galakse har en struktur af denne art (jfr. fig. 1).

Fig. 4 viser forskellige typer af galakser, foruden *irregulære* også såkaldte *elliptiske galakser*, der udmærker sig ved en regelmæssig, noget fladtrykt form, uden spor af spiralstruktur, og med stærk koncentration af galaksens lysudstråling mod et centrum. De største af alle galakser er de *elliptiske gigant-galakser*, men blandt de elliptiske galakser findes også *dværg-galakser* med meget mindre dimensioner og masser.

Den næstsidste linie i det fjerde afsnit af tabel 1 giver afstanden til de fjerneste iagttagne elliptiske gigant-galakser, nemlig 5 milliarder lysår. Endelig anføres i tabellens sidste linie afstanden til de fjerneste iagttagne *kvasarer*, og dermed den største hidtil målte afstand, 10 milliarder lysår. Kvasarer er galakser med en uhyre stærkt strålende kerne. De er de stærkest udstrålende af alle kendte objekter i galaksernes verden.

Springet fra første til sidste linie i tabel 1 – fra jordradien til den største iagttagne afstand – måles ved en faktor 1.5×10^{19} , dvs. 15 milliarder milliarder (15 trillioner).

Vi har her kort skitseret vigtige egenskaber ved stoffets fordeling i verdensrummet. Stjerner udgør grundenheden, de er samlede i stjernesystemer, galakserne, der hver for sig indeholder fra mange millioner til over 1000 milliarder stjerner. Millioner af sådanne galakser kan iagttages, og indenfor den afstand på 5 milliarder lysår, ud til hvilken de lysstærke gigant-galakser kan iagttages, findes formentlig mange milliarder galakser. I afsnittene 6 og 7 vender vi tilbage til spørgsmål vedrørende galaksernes verden.

Springet fra afstanden sol-jord til den størst målte afstand i verdensrummet måles ved en faktor på knap 10^{15} – en million milliarder. Selve dette spring kan man næppe gøre sig anskueligt direkte, men man får et indtryk af det ved at opdele det i mindre spring, netop som det er gjort i tabel 1. Problemet kendes jo fra dagliglivet. Lad os f. eks betragte springet fra møntenheden 1 øre til USA's nationalprodukt – et spring på ca. 10^{15} . Også her får man et indtryk af, hvad springet betyder, ved at opdele det i mindre spring: Fra øre til krone, til månedsindtægt og årsindtægt, til millionbeløb og milliardbeløb, som daglig omtales, og videre op til USA's nationalprodukt.

2. Om stjernernes masser, dimensioner og energiudstråling

Vi har i afsnit 1 set, at stjerner udgør grundenheden i stoffets fordeling i verdensrummet, og at de er samlede i stjernesystemer – galakserne. I dette afsnit omtales resultater opnået med hensyn til stjerners masser, dimensioner og energiudstråling – resultater, der ligesom de i afsnit 1 omtalte udgør en vigtig del af det astronomiske verdensbillede af i dag.

Den bedst kendte stjerne er solen. Solens masse har man kunnet bestemme ved at sammenligne tyngdetiltrækningen fra solen på de omgivende planeter med tyngdetiltrækningen fra legemer på jordens overflade, hvis vægt i kilogram man kender. Til måling af den sidstnævnte tyngdetiltrækning har man benyttet meget fintmærkende laboratorieapparater og derved bestemt solens masse med betydelig nøjagtighed. På tilsvarende måde er jordens masse, udtrykt i kilogram, blevet bestemt ud fra kendskabet til tyngdetiltræk-

ningen fra jorden som helhed, som den viser sig ved tyngdeaccelerationen på jordens overflade.

Stjernemasser har kunnet bestemmes i sådanne tilfælde, hvor to stjerner bevæger sig i rummet omkring et fælles tyngdepunkt, idet de udgør et dobbeltstjernesystem. Man har gennemført målinger af banerne for komponenter i dobbeltstjerner, derpå afledt de gensidige tyngdetiltræknings størrelse og derigennem bestemt de to stjerners masser. Relativt nøjagtige bestemmelser kan gennemføres for stjerner i solens nærmere omegn. Her udgør dobbeltstjerner en betydelig brøkdel af alle stjerner, og der foreligger derfor et betragteligt antal af velbestemte stjernemasser.

Solens radius, udtrykt i meter, kan findes ud fra den kendte afstand sol-jord og den målte vinkelradius for solskiven. For stjerner er problemet langt vanskeligere. Vel er stjerneafstanden i mange tilfælde kendt, men vinkelradierne er for stjernerne så små, at de ikke kan bestemmes ved direkte kikkert-iagttagelser: Fiksstjernerne ses selv i store teleskoper som punktformige lyskilder, blot en smule udtværet på grund af virkningen af uregelmæssig lysbrydning i jordens atmosfære. Ved anvendelse af en forfinet interferometer-teknik, som også omtales i afsnit 4, er det dog lykkedes at bestemme stjerneradier.

En stjernes samlede energiudstråling til det omgivende verdensrum kan findes ved måling af den energimængde som, kommende fra den pågældende stjerne, rammer et givet areal (et teleskop-objektiv) på jorden. Resultatet af en sådan måling må kombineres med en bestemmelse af stjernens afstand (som jo fastlægger overfladearealet af en kugle med centrum i stjernen og gående gennem teleskopet på jorden).

Ved måling af energiudstråling for stjerner spiller det en væsentlig rolle, at den ultraviolette del af strålingen, med bølgelængder under 3000 Ångström, ikke kan gennemtrænge jordens atmosfære og derfor ikke bliver inkluderet ved iagttagelser fra jordens overflade. Her har i de sidste år målinger foretaget fra rum-satellitter på væsentlig måde suppleret de tidligere undersøgelser.

Tabel 2

	Masse i enheder af solmassen	Radius i enheder af solradius	Gennemsnitlig tæthed i gram pr. kubikcentimeter	Energiudstråling pr. sekund i enheder af solens
Hvid hovedseriestjerne	15	10	0.02	30 000
Hvidgul hovedseriestjerne (Sirius)	2.5	1.8	0.6	20
Gul hovedseriestjerne	1	1	1.4	1
Rød hovedseriestjerne	0.2	0.3	10	0.006
Rød super-kæmpestjerne	15	500	$2 \cdot 10^{-7}$	50 000
Rød kæmpestjerne	2.5	15	0.001	50
Hvid dværgstjerne	0.5	0.015	200 000	0.006
Neutronstjerne	1.4	0.000015	$6 \cdot 10^{14}$	

Iagttagelserne viser, at mangfoldigheden i stjernernes verden er meget stor, hvad angår radius og energiudstråling, medens stjernemasser ikke udviser så store forskelle.

Resultater af målinger af stjerners masser, radier og energiudstrålinger er sammenstillet i tabel 2. I denne tabel er tillige anført den gennemsnitlige tæthed (dvs. vægtfylde), som den beregnes ud fra massen og radien. Værdier er anført for otte forskellige arter af stjerner.

De fire første linier i tabel 2 giver oplysninger om stjerner, som tilhører den såkaldte hovedserie af stjerner. Flertallet af stjerner er netop *hovedseriestjerner*, og som vi skal se i det følgende, er dette stjerner, som befinder sig på et trin af deres udvikling, hvor de forandrer sig relativt langsomt med tiden, og hvor stjerne-egenskaberne i hovedsagen er givet ved stjernens masse.

Første linie i tabel 2 giver data for en hvid hovedseriestjerne, der har en masse lig 15 gange solens masse. Radius er 10 solradier, og stjernens gennemsnitlige tæthed (vægtfylde) er 0.02 gange vands tæthed, dvs. 0.02 gram pr. kubikcentimeter. Stjernens energiudstråling pr. sekund udgør 30 000 gange den tilsvarende størrelse for solen, dvs. 6×10^{37} erg pr. sekund, eller anderledes udtrykt 6 efterfulgt af 27 nuller kilowatt.

I tabellens anden linie anføres tilsvarende værdier for en hvidgul hovedseriestjerne med en masse lig 2.5 gange solens masse. Radius er her 1.8 gange solens, den gennemsnitlige tæthed 0.6 gram pr. kubikcentimeter, medens energiudstrålingen er 20 gange solens. Sirius, den klareste stjerne på himlen, svarer omtrent til denne stjerne.

Tredie linie i tabellen repræsenterer solen, en gul hovedseriestjerne, og i fjerde linie følger en rød hovedseriestjerne med en masse lig 0.2 gange solens. Her er radien 0.3 solradier og gennemsnitstætheden 10 gram pr. kubikcentimeter. Energiudstrålingen pr. sekund udgør seks tusindedele af solens.

Hovedseriestjernerne befolker hele det i tabel 2 repræsenterede masseinterval fra 15 solmasser til 0.2 solmasser. Radius, gennemsnitstæthed samt energiudstråling pr. sekund afhænger af massen, og navnlig er der en udpræget aftagen af energiudstrålingen, når man går til stjerner med relativt små masser.

Der findes hovedseriestjerner med masser større end 15 solmasser, helt op til ca. 100 solmasser, men de er i forhold til stjernerne med mindre masser meget sjældne. Langt den største del af hovedseriestjernerne har masser, som er mindre end solmassen. De »uanselige« stjerner med masser på nogle tiendedel solmasser og tilsvarende ringe energiudstrålinger er de hyppigst forekommende i stjerneverdenen. Men på grund af deres relativt ringe lysevne er de overhovedet ikke repræsenteret blandt de med blotte øje synlige stjerner, og det var først systematisk anlagte, statistiske undersøgelser af stjernerne i et givet område af rummet, f. eks. indenfor en afstand af 100 lysår, som afslørede den store rolle, de spiller i helhedsbilledet.

I tabel 2 er på femte og sjette linie to stjerner repræsenteret, som er vidt forskellige fra hovedseriestjerner med de samme masser. Det drejer sig om *røde kæmpestjerner*. Her svarer til en masse på 15 solmasser en radius, som er 500 gange så stor som solens. Derved bliver stjernens gennemsnitlige tæthed overordentlig lille, kun $2 \cdot 10^{-7}$ gram pr. kubikcentimeter, dvs. to timilliontedele af vands tæthed. Til sammenligning: For hovedseriestjernen med samme masse er den gennemsnitlige tæthed 0.02 gange vands tæthed. Der er altså tale

om en helt anden stjerneart. For den pågældende røde kæmpestjerne er energiidstrålingen pr. sekund – 50 000 gange solens – derimod ikke meget forskellig fra, hvad den er for hovedseriestjernen med samme masse.

I tabellens sjette linie er anført data for en anden rød kæmpestjerne, i dette tilfælde dog mindre ekstrem. Massen er 2.5 solmasser, radien er her 15 solradier – at sammenligne med 1.8 solradier for hovedseriestjernen med samme masse – og gennemsnitstætheden en tusindedel af vands tæthed. Endelig er energiidstrålingen pr. sekund 50 gange solens.

De meget ekstreme røde kæmpestjerner som den i tabellens femte linie beskrevne kaldes supergiganter, til forskel fra den lige omtalte mindre ekstreme art.

Vi kommer nu i tabellens to sidste linier til stjerner, der igen er ekstreme, men nu til den anden yderlighed, idet de har overordentlig store gennemsnitlige tætheder. Først beskrives en såkaldt *hvid dværgstjerne*. Massen udgør her 0.5 solmasser, men radien er kun 0.015 gange solens, ikke meget større end jordradien. Derved bliver den gennemsnitlige tæthed meget stor, nemlig 200 000 gram pr. kubikcentimeter. Energiidstrålingen pr. sekund er 0.006 gange solens. Såvel radius som energiidstråling er meget mindre end for hvide og hvidgule hovedseriestjerner (jfr. tabellens to første linier), deraf navnet, hvid dværgstjerne.

På sidste linie i tabel 2 karakteriseres en stjerne, som er endnu mere ekstrem end den hvide dværgstjerne, nemlig en *neutronstjerne* med enormt høj gennemsnitstæthed. Massen er 1.4 solmasser, radius udgør kun 0.000015 solradier, dvs. 10 kilometer, og gennemsnitstætheden for neutronstjernen er da 6×10^{14} gange vands tæthed – 600 millioner tons pr. kubikcentimeter. Navnet neutronstjerne hidrører fra, at størstedelen af stjernen består – ikke af elektroner og atomkerner, som igen er sammensat af protoner og neutroner, men af uhyre tæt sammenpressede neutroner (herom nærmere på side 34).

De her kort beskrevne resultater vedrørende stjernerne er fundet gennem et forskningsarbejde, som begyndte i første halvdel af 1800-tallet med målinger af stjerneafstande og undersøgelser af dobbeltstjerner banebevægelser. Arbejdet fortsattes årti for årti også gennem 1900-tallet og kulminerede med opdagelsen, i 1968, af neutronstjernerne og den derefter følgende udforskning af deres egenskaber.

Tilsammen giver disse resultater et billede af en mangfoldig stjerneverden. I afsnit 5 skal vi se, hvorledes det i løbet af de sidste 50 år er lykkedes at skabe sammenhæng i billedet gennem undersøgelser af stjernernes udvikling – af forandringerne i deres egenskaber gennem millioner eller milliarder af år. Disse undersøgelser har også givet nøglen til forståelse af de fysiske og kemiske forhold i stjernernes indre, som betinger den store mangfoldighed.

Til sidst i dette afsnit skal omtales et vigtigt forhold vedrørende stjerneverdenen i vor galakse. Det drejer sig om forekomsten i rummet af koncentrationer af stjerner, de såkaldte stjernehober. De *kugleformede stjernehober* indeholder hundredetusinder af stjerner (i nogle tilfælde over en million), som holdes sammen, ved deres indbyrdes tyngdetiltrækning, indenfor et omtrent sfærisk område i rummet med en radius på typisk 100 lysår. I vor galakse findes nogle hundrede af disse objekter, hvilket vil sige, at mange millioner stjerner er medlemmer af kugleformede stjernehober. Vel er dette et stort antal, men tallet er dog lille i forhold til det samlede antal stjerner i vor galakse, over 100 milliarder. De såkaldte *åbne stjernehober* er betydelig mindre stjernesamlinger, typisk med en radius på ca. 10

lysår. De indeholder hver for sig langt færre stjerner end de kugleformede stjernehobe, fra omkring hundrede til nogle tusinde stjerner, men koncentrationsgraden af stjerner i rummet er omtrent lige så stor som for de kugleformede stjernehobe. Plejaderne (Syvstjernen) og Hyaderne i stjernebilledet Tyren er kendte åbne stjernehobe, og man kender adskillige hundrede af denne art objekter.

Som vi skal se i følgende afsnit har undersøgelser af stjernerne i stjernehobe givet vigtige bidrag til udforskningen af stjernernes udvikling, fordi man i en stjernebob har med stjerner at gøre, som er dannet omtrent samtidig og altså er omtrent lige gamle.

3. Om stoffet i rummet mellem stjernerne

I afsnit 1 er omtalt, at stjernernes dimensioner er uhyre små i forhold til deres indbyrdes afstande, dvs. at de kun udfylder en meget lille brøkdel af det rum, de befolker i vor galakse. Rummet mellem stjernerne er dog ikke fuldstændig tomt: Der findes stof i rummet mellem stjernerne, ganske vist stof af uhyre ringe tæthed.

Dette *interstellare stof* består dels af små støvkorn, dels af en yderst fortyndet luftart indeholdende atomare partikler, nemlig atomer, molekyler, ioner og desuden fri elektroner. Luftarten udgøres overvejende af grundstoffet brint, og gennemsnitlig er tætheden omkring 1 brintatom pr. kubikcentimeter. Idet brintatoms vægt er 1.6×10^{-24} gram ses det, at gennemsnitstætheden kun er lidt over 10^{-24} gram pr. kubikcentimeter. Men i denne forbindelse må det erindres, at det pågældende interstellare stof udfylder umådelig store volumener. Når man beregner den samlede masse af interstellart stof, skal man derfor multiplicere en meget lille tæthed med et meget stort volumen. Resultatet af sådanne beregninger er, at vor galakse indeholder interstellart stof med en samlet masse på adskillige milliarder gange solens masse. Tallet er betydelig mindre end galaksens totalmasse, som er ca. 200 milliarder gange solens masse, men forholdet er dog det, at stoffet mellem stjernerne udgør ca. fem procent af vor galakses stofmængde.

Som nævnt indeholder det interstellare stof støvkorn og er således en blanding af en yderst fortyndet luftart og faste partikler. Støvkornene har typisk diametre på nogle tiendedele af en mikron (1 mikron er lig en tusindedel millimeter). Medens luftarten består af brint samt mindre mængder af helium og meget mindre andele af tungere grundstoffer, indeholder de faste partikler overvejende tungere grundstoffer som kulstof, kvælstof, ilt, silicium og jern. Masseforholdet er omtrent 99 procent luftart og 1 procent faste partikler.

Stoffets fordeling i rummet mellem stjernerne er meget ujævn. Det meste findes i interstellare skyer, typisk med en diameter på 10–20 lysår, en gennemsnitstæthed på ca. 20 brintatomer pr. kubikcentimeter og en masse på 10–100 solmasser. Disse skyer fylder til sammen kun nogle få procent af rummet mellem stjernerne. Imellem skyerne er det interstellare stof yderst fortyndet, med en tæthed, som er yderligere nogle hundrede gange mindre end den, man finder i skyerne.

Ved siden af disse interstellare skyer finder man også større sky-komplekser med omtrent samme gennemsnitstæthed som for de mindre skyer, men med diametre på 100–

500 lysår og tilsvarende større masser, typisk mellem 10 000 og 100 000 solmasser. Antallet af sådanne sky-komplekser er imidlertid langt mindre end antallet af små skyer. Således findes der indenfor en afstand af 2000 lysår fra solen henimod 100 000 af de små skyer, men kun 5 store sky-komplekser. Størstedelen af det interstellare stof findes således i de små skyer.

En vigtig omend kvantitativt meget mindre del af det interstellare stof udgøres af relativt meget små skyer med forholdsvis stor tæthed. Diameteren er her nogle få lysår, i nogle tilfælde mindre end 1 lysår, medens tætheden er fra 1000 op til henimod 100 000 brintatomer pr. kubikcentimeter, altså meget større end for de små skyer og for sky-komplekserne. Masserne er typisk 20 solmasser. Disse små skyer forekommer dels som fortætninger i sky-komplekser, dels som uafhængige enheder i det interstellare rum. Som vi skal se i det følgende, spiller de en vigtig rolle i diskussionen af spørgsmålet om dannelse af stjerner ud fra interstellart stof.

4. Udforskningen af vor galakses struktur og bevægelsesforhold

Som understreget i afsnit 1 er muligheden af afstandsbestemmelse til stjerner en afgørende forudsætning for udforskningen af vor galakses struktur. Vi skal nu komme nærmere ind på spørgsmålet og se, hvorledes denne forskningsgren har udviklet sig gennem de sidste 50-60 år.

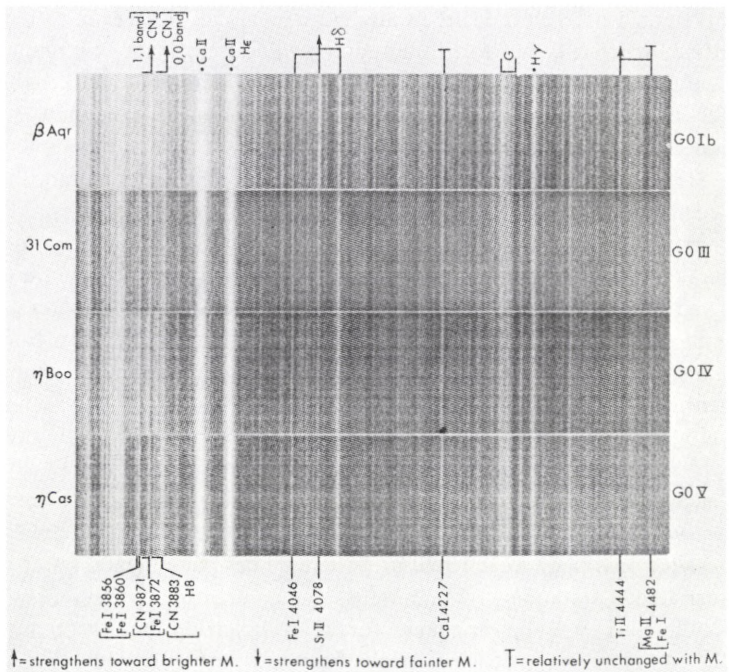
Den direkte bestemmelse af afstanden til en stjerne ved måling af størrelsen af de af jordens bevægelse omkring solen fremkaldte forandringer af retningen til stjernen kan kun gennemføres med rimelig nøjagtighed for de nærmeste stjerner – indenfor en afstand af 100 lysår. Man taler her om *trigonometrisk afstandsbestemmelse*. For fjernere stjerner bliver de pågældende retningsforandringer så små, at de ikke kan måles med en nøjagtighed, som er tilstrækkelig god til en pålidelig afstandsbestemmelse. Med andre ord, metoden baseret på trigonometrisk afstandsbestemmelse svigter.

Her kommer nu den *fotometriske afstandsbestemmelse* ind i billedet. Den beror på, at man som et mål for afstanden benytter stjernens tilsyneladende lysstyrke, dvs. den lysintensitet, stjernen måles at have, iagttaget fra jorden. Men her er det fra begyndelsen klart, at den tilsyneladende lysstyrke tillige må afhænge af størrelsen af lysudstrålingen fra den pågældende stjerne – af det man kalder stjernens absolutte lysstyrke, eller lysudstrålingen, som den ville iagttages fra en given standardafstand. Med andre ord, hvis en stjerne fra jorden iagttages som meget svagt lysende, betyder det ikke nødvendigvis, at den er meget langt borte. Det kan også bero på, at stjernens absolutte lysstyrke er meget lille.

Fotometrisk afstandsbestemmelse kan derfor kun gennemføres, hvis det lykkes at finde metoder til bestemmelse af stjerners absolutte lysstyrker.

I 1920'erne udvikledes på Mount Wilson-observatoriet i Californien en metode til bestemmelse af stjerners absolutte lysstyrke gennem detaljerede undersøgelser af deres spektre. Det grundlæggende princip er her, at hvis to stjerner ved detaljerede spektroskopiske undersøgelser viser sig at have identiske spektre – og her drejer det sig om sammen-

Fig. 5. Et lille uddrag af et stort atlas over stjernespektre, udgivet af W. W. Morgan, H. A. Abt og J. W. Tapscott. De afbildede spektre er for stjerner med samme overfladetemperatur og farve (omtrent som solens), men med forskellige absolutte lysstyrker. Man ser, at visse spektrallinier ændrer styrke alt efter den absolutte lysstyrke. I figuren er stjernen med størst absolut lysstyrke anbragt øverst.



fald med hensyn til beliggenhed i spektret og styrke for hundreder eller tusinder af absorptionslinier – ja, så må de to stjerner også være ens med hensyn til graden af energiudstråling, dvs. med hensyn til absolut lysstyrke. Og hvis nu den af de to stjerner, som har størst tilsyneladende lysstyrke, er beliggende så nær ved jorden og solen, at dens afstand kan bestemmes ved den trigonometriske metode, så kan også den fjernere og tilsyneladende lyssvagere stjernes afstand findes. Man antager her gyldigheden af den lov, der siger, at en lyskildes tilsyneladende lysstyrke er omvendt proportional med kvadratet på afstanden. *Et eksempel:* Dersom den ene stjerne ses 10 000 gange lyssvagere end den anden, så beregner man, at den lyssvageres afstand må være 100 gange større ($100^2 = 10000$), idet jo analysen af spektrene havde godtgjort, at de to stjerner havde samme absolutte lysstyrke. Og hvis den lysstærkere stjerne ved trigonometrisk afstandsbestemmelse havde vist sig at have en afstand af 30 lysår, så beregner man den lyssvage stjernes afstand til 3000 lysår.

Det var imidlertid først i 1930'erne og 1940'erne, at den skitserede metode udvikledes til anvendelse i praksis i stort omfang. Stjernerne blev inddelt i et betydeligt antal grupper, således at de stjerner, som hørte til en bestemt gruppe, havde identiske spektre. Det som gjorde metoden simpel og effektiv i praksis var, at man ved inddelingen i grupper efter spektrenes udseende benyttede sig af standardstjerne-spektre for udvalgte stjerner, en for hver gruppe. Fig. 5 illustrerer metoden.

Vi skal i det følgende se, at anvendelsen af den beskrevne metode til afstandsbestemmelse for stjerner har ført til betydningsfulde fremskridt i udforskningen af vor galakses struktur. Først skal vi dog gøre rede for en fundamental vanskelighed vedrørende anvendelsen af den fotometriske metode til afstandsbestemmelse samt se, hvorledes vanskelighederne har kunnet overvindes.

Som fremhævet beror den simple metode til fotometrisk afstandsbestemmelse på gyldigheden af loven om, at den lysintensitet, som en stjerne iagttages at have, er omvendt proportional med kvadratet på dens afstand. Den pågældende lov gælder imidlertid kun, hvis der ikke finder nogen svækkelse af stjernelyset sted på lysets vej fra stjernen til iagttageren – ved lysspredning og lysabsorption. Hvis lyset på sin vej passerer gennem et fuldstændigt tomt rum, gælder loven. Nu har det allerede været nævnt, at der findes stof i rummet mellem stjernerne, og i 1920'erne var man klar over virkningen af lystab, når lys passerer gennem de i forrige afsnit omtalte mørke skyer – de større sky-komplekser. Men dengang antog man, at lystabet var forsvindende lille, når den betragtede stjerne ikke netop set fra jorden befandt sig bag en af de forholdsvis få kendte store mørke skyer. Man mente derfor dengang, at den fotometriske metode i almindelighed skulle give korrekte afstandsværdier. Det var et afgørende fremskridt, da man i 1930'erne indså, at dette ikke var tilfældet, og derefter udviklede metoder til at bestemme det pågældende lystab og således nå frem til korrigerede afstande.

Allerede i 1920'erne var enkelte forskere imidlertid opmærksomme på, at de dengang ved den fotometriske metode bestemte afstande kunne være vildledende. Forholdet var det, at man på den ene side var kommet til den slutning, at solen befandt sig omtrent centralt i et system af stjerner, hvis største udstrækning lå i mælkevejens plan, og hvis radius udgjorde ca. 10 000 lysår, medens systemets udstrækning i en retning vinkelret på mælkevejens plan var ca. 3000 lysår. På den anden side havde bestemmelser af de kugleformede stjerners afstande, som Harlow Shapley gennemførte 1915–18, ført til det resultat, at disse objekter var fordelt omkring et centrum – i retning af stjernebilledet Sagittarius (Skytten) – som lå i meget stor afstand fra solen, noget over 60 000 lysår.

Disse resultater, fundne ved fotometrisk afstandsbestemmelse uden hensyntagen til lystab i det interstellare rum, blev forenet til et billede af en galakse med en diameter på over 100 000 lysår, et centrum ca. 60 000 lysår fra solen, og en udpræget fortætning af stjerner i solens nærmere omegn, et såkaldt lokalsystem.

At dette billede ikke kunne opretholdes, blev først klart ved banebrydende arbejder af Bertil Lindblad og Jan Oort, i sidste halvdel af 1920'erne, som klarlagde hovedtræk af bevægelsesforholdene i vor galakse.

Allerede omkring 1900 forelå der et betydeligt iagttagelsesmateriale vedrørende stjerners bevægelse i rummet i forhold til solen, baseret på målinger af fortsatte ændringer af retninger til stjerner, udtrykt ved egenbevægelsen, eller vinkelbevægelsen pr. år. Dertil kom nu et voksende materiale af stjerne-radialhastigheder (dvs. hastigheder i synsliniens retning) bestemt ved meget nøjagtig måling af absorptionsliniers beliggenhed i stjernernes spektre: Den såkaldte Doppler-effekt bevirker, at en spektrallinies bølgelængde forskydes mod større værdier, når lyskilden (dvs. her stjernen) bevæger sig bort fra iagttageren, om-

vendt når stjernen bevæger sig henimod iagttageren, og forskydningen er proportional med den pågældende hastighed.

Ved en omfattende analyse af de foreliggende iagttagelser af stjerners bevægelse i forhold til solen fandt Lindblad og Oort nu, at ikke blot bevæger stjernerne sig i forhold til solen – typisk med rumhastigheder på 10–50 kilometer i sekundet – men hele systemet af stjerner omkring solen, inklusive solen selv, bevæger sig i en enorm cirkelbane omkring centret i Sagittarius med en hastighed af ca. 250 kilometer i sekundet.

Resultaterne viste, at tanken om et begrænset lokalsystem med solen i centrum måtte opgives. Under rotationen omkring centret i Sagittarius ville et sådant system gå i opløsning. Det var da nærliggende at slutte, som Lindblad og Oort gjorde, at forestillingen om et lokalt system med solen som centrum var en illusion, fremkaldt derved, at lystab i det interstellare rum svækker de fjernere stjerners lys i en sådan grad, at det ser ud som om stjernetætheden i afstande på over ca. 10 000 lysår i mælkevejens plan er forsvindende lille. Med andre ord, der opstod en sikker formodning om, at en korrektion af de fotometriske bestemte afstande for lystabet ville føre til et helt andet billede af stjernesystemets struktur end det, som dengang forelå. Dette, at Sharpley havde fundet, at de kugleformede stjerne-hobe er koncentreret om et fjernt centrum i Sagittarius, stred ikke imod en sådan tydning. De kugleformede stjerne-hobe befinder sig nemlig gennemsnitlig i meget store afstande fra mælkevejens plan, så store at lyset fra stjernerne i disse objekter ikke vil svækkes særlig stærkt, dersom det interstellare stof, som volder lystabet, er stærkt koncentreret mod mælkevejens plan.

Det endelige gennembrud på dette vigtige område kom i løbet af 1930'erne og 1940'erne, da den lyssvækkende virkning af interstellart stof blev sikkert påvist og nøjagtige metoder til bestemmelse af lystabet blev udviklet. *Nu kunne stjerneafstande bestemt ved den fotometriske metode korrigeres for virkningen af lystab i det interstellare stof.*

Den sikre påvisning af lyssvækkelsen ved det interstellare stof kunne gennemføres ved at stjerner som omtalt ovenfor (jfr. fig. 5) blev inddelt i grupper med identiske (eller meget nær identiske) absorptionsliniespektre. Indenfor hver gruppe måtte man forvente, at fordelingen af lysintensiteten over farverne var den samme, men dette var ikke tilfældet. Lyssvage og derfor fjernere stjerner i gruppen var rødfarvede i forhold til de lysstærkere og nærmere. Dette måtte skyldes lystab ved lysets gang gennem det interstellare stof – et lystab, som er større jo kortere stjernelysets bølgelængde er. Fænomenet er analogt med solens rødfarvning, når den står lavt over horisonten: Når sollyset har længere vej gennem jordens atmosfære, er lystabet større, og det kortbølgede violette og blå lys svækkes mere end det langbølgede gule og røde. Resultatet er rødfarvning af solen.

Kvantitative undersøgelser af disse forhold viste, at lyssvækkelsen i spektret mellem 3000 og 10 000 Ångström er omtrent omvendt proportional med bølgelængden. For eksempel er den ved bølgelængden 3500 Ångström omtrent dobbelt så stor som ved bølgelængden 7000 Ångström. Lyssvækkelsen skyldes ganske overvejende de små støvpartikler i det interstellare stof.

Ved en udvikling, som begyndte i 1930'erne, er det blevet muligt at angive lyssvækkelsen ved interstellart stof for hver enkelt undersøgt stjerne og derved nå frem til *korrekte foto-*

metriske afstande. Metoden er den ovenfor antydede: Inddeling af stjerner i grupper efter absorptionsliniespektrets udseende (jfr. fig. 5) fortæller, hvad stjernefarven ville være, hvis lyset ikke svækkedes i det interstellare rum. Sammenligning med den faktisk målte stjernefarve bestemmer rødfarvningen, og ud fra graden af rødfarvning kan man slutte sig til lystabets størrelse ved en given bølgelængde.

Vi skal nu gøre rede for nogle vigtige landvindinger i udforskningen af vor galakses struktur, som er blevet målt ved anvendelsen af den beskrevne metode. Men først skal yderligere en vigtig omstændighed i forbindelse med anvendelsen af den fotometriske metode til afstandsbestemmelse omtales.

Ved udforskningen af vor galakses struktur har man benyttet sig af, at visse arter af stjerner kan indordnes i grupper med indbyrdes ens absolutte lysstyrker, uden at man behøver at studere deres spektre. Af særlig betydning er her en type *variable* eller *foranderlige stjerner*, som kaldes pulsationsvariable eller cepheider (efter prototypen, stjernen δ Cephei). Disse specielle stjerners lysudstråling forandrer sig stadig, lysstyrken vokser og aftager, og forandringerne gentager sig med stor nøjagtighed efter en for hver cepheide karakteristisk periode. For en type cepheider, de kortperiodiske cepheider (ofte kaldet RR Lyrae-stjerner), er perioden mindre end et døgn. For en anden type, de langperiodiske cepheider, ligger perioden mellem et døgn og et par måneder. Årsagen til, at lysstyrken for en cepheide veksler, er at den pulserer, dvs. stjernen vil skiftevis trække sig sammen og udvide sig igen. Disse radiale pulsationer foregår periodisk, idet sammentrækning og udvidelse gentager sig i tiden med stor nøjagtighed.

I stjerneverdenen er cepheider sjældne undtagelsestilfælde. Langt de fleste stjerner er stabile og pulserer ikke. Men ved udforskningen af vor galakses struktur spiller det en betydelig rolle, at man kan inddele cepheider i grupper efter perioden og lysvekslingens art (lyskurven), således at stjernerne i hver gruppe har samme absolutte lysstyrke. Dette betyder igen, at det her ikke er nødvendigt at studere spektret for at inddele i grupper af identiske stjerner, når man vil gennemføre afstandsbestemmelse. Bestemmelse af lyskurven er mulig selv for stjerner, der ses meget lyssvage. Samtidig hører cepheiderne til de absolut lysstærkeste blandt stjernerne, og derfor kan *cephaiders afstande bestemmes, selv når disse afstande er meget store.* I afsnit 6 skal vi se, at dette har stor betydning også ved udforskningen af de nærmere galakser udenfor vor egen.

Et meget vigtigt fremskridt i udforskningen af vor galakses struktur fandt sted i 1950'erne: Det blev fastslået, at visse typer af stjerner i vor galakse viser stærk koncentration mod spiralarme beliggende i galaksens hovedplan. Dette kom meget tydeligt frem, når de i det foregående nævnte åbne stjernehober blev kortlagt i rummet, takket være at deres afstande nu kunne bestemmes med god nøjagtighed. Koncentrationen af åbne stjernehober mod spiralarme trådte særlig tydeligt frem, når man i analysen kun medtog dem, som indeholdt de absolut lysstærkeste stjerner. Også de langperiodiske cepheider, ligeledes absolut lysstærke stjerner, udviste koncentration mod spiralarmene. I det følgende afsnit, hvor resultaterne af bestemmelser af stjerners alder omtales, skal vi se, at de pågældende stjerner hører til de yngste, dvs. sidst dannede, af galaksens stjerner, og det fundne resultat kan da udtrykkes således: *I vor galakse forekommer de yngste stjerner (al-*

der under 50 millioner år) *koncentreret i spiralarme*. De ældre stjerner er derimod jævnt fordelt uden nævneværdig tendens til forekomst i spiralarmene.

Dette vigtige forskningsresultat svarer til et andet, som vedrører spiralgalakser udenfor vor egen (jfr. fig. 2). Også i disse stjernesystemer ses de yngste stjerner koncentreret mod spiralarmene (jfr. afsnit 6).

Et andet betydningsfuldt fremskridt for galakseforskningen vedrører stjernernes fordeling omkring *centret i Sagittarius* (jfr. side 16). Når man tog hensyn til virkningen af det lystab, som var forårsaget af interstellart stof, blev resultatet, at stjernetætheden, dvs. antallet af stjerner per rumfangsenhed, vokser når man fra solens omegn bevæger sig i retning mod galaksens centrum. Indenfor en afstand af 1000 lysår fra centret er stjernetætheden mange gange større end i solens omegn, og selve centret markeres af en udpræget kerne med en diameter på nogle få lysår, indenfor hvilken stjernetætheden er over en million gange større end den er i solens afstand fra centret. Vi vender tilbage til spørgsmål vedrørende denne galakse-kerne, og det skal her kun nævnes, at undersøgelsen af kernen vanskeliggøres ved at dens lys svækkes overordentlig stærkt af interstellart støv på vejen fra centret til iagttageren. I de sidste år er vanskelighederne imidlertid blevet kraftigt reduceret, idet man har udviklet teknik til astronomiske observationer i det infrarøde (helt ud til 10–20000 Ångström), hvor lystabet er langt mindre end for synligt lys.

Et tredje såre vigtigt fremskridt i udforskningen af galaksens egenskaber er gjort ved studiet af den såkaldte *halo* af stjerner, som omgiver det i hovedsagen fladtrykte galaksesystem, og som i fig. 1 side 5 er markeret som en fortyndet fortsættelse af dette – et omtrent sfærisk system omkring centret i Sagittarius, med en diameter på ca. 100000 lysår. Til denne halo hører de allerede af Shapley for over 60 år siden undersøgte kugleformede stjernehober, men de sidste årtiers undersøgelser har vist, at haloen befolkes af stjerner, der tilsammen udgør et antal, som langt overgår det i alle de kugleformede stjernehober tilsammen indeholdte. I haloen er stjernetætheden langt mindre end i galaksens hovedplan, men til gengæld er haloens rumfang meget større end den galaktiske fladtrykte skive, således at antallet af stjerner i haloen tilsammen udgør adskillige procent af galaksens stjerner.

I 1950'erne gjorde man nu en opdagelse vedrørende halostjernerne, som betegner endnu en milepæl i udforskningen af vor galaksens egenskaber. Man fandt ved analyse af halo-stjerners absorptionsliniespektre, at disse stjerner kun indeholder relativt meget små mængder af alle de grundstoffer, som har større atomvægt end grundstofferne brint og helium. Nogle tal: I solen såvel som i stjerner i den fladtrykte galaktiske skive udgør disse tungere grundstoffer ca. 2 procent af stoffet efter vægt, men for en typisk halo-stjerne er det tilsvarende tal 0,01 procent. Halo-stjernerne består ganske overvejende af brint og – som det senere har vist sig – helium (godt trefjerdedele efter vægt udgøres af brint, knap en fjerdedel af helium). I det følgende afsnit skal vi se, at disse *halo-stjerner er de ældste stjerner i vor galakse*.

I dette afsnit om udforskningen af vor galakse skal vi nu til sidst komme ind på fremskridt, som vedrører kendskabet til den vigtige del af galaksen, som det interstellare stof udgør. Vi har set, at eksistensen af det interstellare stof længe betød en hindring ved vor galaksens udforskning, men at hindringerne efterhånden blev overvundet. På den anden

side blev det gradvist klart, at dette yderst fortyndede stof spiller en meget vigtig rolle i galaksens evolution, og at undersøgelser af dets egenskaber måtte indtage en fremskudt plads i galakseforskningen som helhed.

I 1920'rne var man som nævnt klar over, at der i de mørke sky-komplekser findes interstellart støv, men man havde fundet, at massen af dette støv kun udgjorde en meget lille brøkdel af stjernernes samlede masse – langt mindre end en tusindedel. Ved undersøgelser i de følgende årtier blev det fastslået, at det interstellare støv var mere udbredt (jfr. afsnit 3), men stadigvæk udgjorde dette kendte interstellare stof kun en meget ringe del af galaksens masse.

Fra århundredets begyndelse og gennem dets første årtier havde man studeret en anden komponent af interstellart stof, som gav sig tilkende ved forekomsten af absorptionslinier af calcium i visse stjerners spektre – absorptionslinier som ikke kunne skyldes tilstedeværelsen af calcium i de pågældende stjerners egne atmosfærer. Men også her forholdt det sig således, at mængden af det interstellare calcium, som fremkaldte absorptionslinien, var meget lille.

Endvidere kendte man et antal lysende tåger, hvis stråling i hovedsagen var koncentreret i spektrallinier, såkaldte emissionslinier. Den bedst kendte repræsentant for sådanne emissionslinie-tåger er Orienttågen. I løbet af 1920'rne og 1930'rne blev det klart, at de pågældende tåger udgøres af en overordentlig fortyndet interstellar luftart, som bringes til at lyse ved energitilførsel, i form af meget kortbølget ultraviolet stråling, fra en eller flere lysstærke stjerner med meget høj overfladetemperatur, som befinder sig i eller i umiddelbar nærhed af tågen. Hovedbestanddelen er brint, helium forekommer i noget mindre mængder, medens de tungere grundstoffer, bl.a. ilt, findes i meget mindre mængder.

Indtil midten af 1930'rne var nu forholdet det, at også massen af interstellart stof, som fandtes i samtlige kendte emissionslinie-tåger, stadigvæk kun udgjorde en meget lille brøkdel af den samlede masse for stjernerne i det rum, som de pågældende tåger befolkede.

Et gennembrud fandt på dette område sted i sidste halvdel af 1930'rne. Da påviste Otto Struve ved brug af en særlig lysfølsom spektrograf, at store områder i mælkevejen lyser ganske svagt i de samme spektrallinier af brint, som kendes fra Orienttågens spektrum. Sådanne store områder med brintlinie-emission sås, hvor der i mælkevejen var lysstærke stjerner tilstede af en art, som har stærk udstråling af meget kortbølget ultraviolet stråling. En nøjere analyse førte til følgende antagelse: En stærkt fortyndet luftart, hovedsagelig bestående af brint, findes overalt i rummet mellem stjernerne i vor galakses fladtrykte skive. Den bringes til at lyse i de kendte emissionslinier af brint, der hvor der i nærheden findes stjerner, som stråler stærkt i den meget kortbølgede ultraviolette del af spektret. Den fysiske mekanisme er den, at disse stjerners ultraviolette stråling ioniserer den interstellare brint – dvs. slår brintatomerne i stykker i brintioner og fri elektroner – hvorefter fri elektroner og brintioner i det interstellare rum igen forener sig til brintatomer, hvilket sker under udsendelse af lys i de kendte spektrallinier af brint.

Antagelsen om, at interstellar brint i form af en yderst fortyndet luftart findes overalt i det interstellare rum i galaksens fladtrykte skive, fik en fuldstændig bekræftelse ved undersøgelser i begyndelsen af 1950'rne, udført ved hjælp af en ny teknik, nemlig *iagttagelse af*

Fig. 6. Radioteleskop ved Onsala radio-observatorium nær Göteborg. Diameteren af det drejelige og styrbare metalspejl er 25 meter.



radiostråling fra kosmos. Vi skal nu kort beskrive denne udvikling af observations-astronomien, men straks understrege, at bekræftelsen af antagelsen om brintens enorme udbredelse i rummet mellem stjernerne betød en radikal ændring i billedet af vor galakse. Det var nu klart, at den samlede mængde af interstellart stof var langt større end tidligere antaget, og at *det interstellare stof måtte udgøre adskillige procent af galaksens samlede masse* og derved spille en væsentlig rolle i galaksens hele husholdning.

Allerede i 1930'rne var det blevet påvist, at jorden rammes af radiostråling, som kommer fra områder langt udenfor vort solsystem. Efter 1945 tog undersøgelserne af radiostråling fra verdensrummet fart, og ved begyndelsen af 1950'rne var adskillige radioteleskoper taget i brug.

Et radioteleskop består af en metalantenne, der har form som et hulspejl, og som samler radiostråling, der kommer fra en bestemt retning, i et brændpunkt, ligesom et hulspejl i et optisk teleskop samler indfaldende lys. Omkring radioteleskopets brændpunkt er anbragt meget følsomme detektorer til registrering af radiostrålingen og måling af dens intensitet. Fig. 6 viser et radioteleskop med en spejldiameter på 25 meter. Radioteleskoper med diametre op til 100 meter er i dag i brug.

Her skal nu omtales en række resultater opnået med radioteleskoper, som har fået særlig betydning for udforskningen af det interstellare stof i vor galakse. I det følgende afsnit 6 beskrives radio-astronomiske undersøgelser vedrørende galakser udenfor vor egen.

a. Vi har omtalt, at områder af det interstellare rum, i hvilke brint er ioniseret, udsender emissionslinier i synligt lys (de såkaldte Balmer-linier). I 1940'rne blev det af to astrofysikere, van de Hulst og Sklovski, vist, at interstellar brint i områder, hvor brinten ikke er ioniseret (dvs. hvor den består af neutrale brintatomer), må forventes at udsende stråling i en spektrallinie i radioområdet med en bølgelængde på 21 cm. Også her er der tale om stråling, fremkaldt ved energitilførsel fra stjerner, men til forskel fra forholdet i de områder, hvor brinten er ioniseret, kræves der ikke bestråling fra de specielle (og sjældne) stjerner, som udsender intens stråling i den meget kortbølgede del af spektret. Den svage stråling fra stjernebefolkningen i vor galakse som helhed, og som findes overalt i det interstellare rum, betyder en energitilførsel, som er tilstrækkelig til at bevirke, at de interstellare brintatomer udsender 21 cm-stråling.

Det betød en milepæl, da 21 cm-stråling fra interstellar brint blev påvist ved brug af radioteleskoper, først i 1950 ved Harvard University, og nogle måneder senere af hollandske astronomer. Dels bekræftede analysen af observationerne rigtigheden af den tidligere fremsatte antagelse om, at brint er tilstede overalt i det interstellare rum i galaksens fladtrykte skive, dels havde man herved fået et nyt middel til udforskning af vor galakses interstellare stof, og vel at mærke ved observationer, som ikke hæmmedes ved det strålingstab, som interstellart støv bevirker: *Radiostrålingen i 21 cm-linien svækkes i modsætning til synligt lys praktisk talt ikke, når den passerer gennem interstellart støv.*

Hertil kom, at analysen af iagttagelserne af radiostrålingen i 21 cm-linien førte til helt ny information vedrørende de udstrålende brintatomer. Det viste sig nemlig muligt med stor nøjagtighed at måle bølgelængden for den pågældende 21 cm-spektrallinie og dermed fastslå Doppler-forskydningen (jfr. s. 16) og følgelig de udstrålende interstellare brintatomers hastigheder i sigteliniens retning. Hermed var givet et helt nyt iagttagelsesmateriale vedrørende de interstellare brintatomer, et iagttagelsesmateriale, som kunne fortælle om brintatomernes bevægelser ud til afstande på 100 000 lysår, dvs. ud til galaksens grænser. Analysen af dette iagttagelsesmateriale baseredes på billedet af den fladtrykte galakseskive, som roterer omkring galaksens centrum. Et af de vigtige resultater, som blev opnået herved, var en påvisning af den interstellare brints koncentration til spiralarme (jfr. s. 19), og nu en påvisning, som omfattede langt større dele af galaksen, netop fordi 21 cm-iagttagelserne ikke hæmmes ved lystab i det interstellare støv. Andre vigtige resultater af 21 cm-iagttagelserne opnåedes ved studium af galaksens centrale dele. Her gjaldt det den nærmere undersøgelse af den tidligere omtalte stærke koncentration af massen af stellart og interstellart stof omkring centret, svarende til stoftætheder over en million gange større end i solens nærmere omegn. Undersøgelser ved hjælp af 21 cm-linien har ført til resultater vedrørende de interstellare brintmassers bevægelser omkring centret, som bekræfter tilstedeværelsen af en meget betydelig masse tæt ved galaksens centrum, en masse med tilsvarende stor tyngdetiltrækning på de nævnte brintmasser.

b. Ved konstruktion af stadig større radioteleskoper og mere følsomme detektorer til registrering og måling af den kosmiske radiostråling, som samles omkring et radioteleskops brændpunkt blev det i løbet af 1960'rne og 1970'rne muligt at nå langt videre end før ved udforskningen af de områder i galaksens fladtrykte skive, hvor den interstellare

brint er ioniseret. Som allerede nævnt udsender brinten i disse områder synligt lys i spektrallinier (Balmer-linierne), nemlig når fri negativt ladede elektroner indfanges af positivt ladede brintioner. Sådanne Balmer-linier præger udstrålingen fra objekter som Oriontågen. Men ved disse indfangningsprocesser udsendes også radiobølger i et kontinuert spektrum, som er særlig fremtrædende for relativt kortbølget radiostråling – i centimeterområdet. Endvidere udsendes radio-spektrallinier, f. eks. en linie med bølgelængde tæt ved 6 cm. Da radioteleskoperne og deres detektorer blev tilstrækkeligt følsomme, kunne denne kortbølgede radiostråling måles, ikke blot fra velkendte områder indeholdende ioniseret brint såsom Oriontågen, men også fra analoge, men meget fjernere områder, der ikke havde kunnet iagttages ved hjælp af Balmer-linierne i synligt lys, fordi det synlige lys i modsætning til radiobølgerne her svækkes overordentlig stærkt af det interstellare støv. Dette vil sige, at man havde fået en ny metode til kortlægning af den interstellare brint, hvor den er *ioniseret*, en metode der rakte ud til meget store afstande, og som gav resultater, der på væsentlig måde supplerede de data, analysen af 21 cm-iagttagelserne havde givet med hensyn til områderne med *neutral* (ikke-ioniseret) brint.

Af vigtighed var især påvisningen af talrige områder som Oriontågen, blot endnu større med masser helt op til omkring 100 000 solmasser, men alligevel usynlige i Balmerlinielys på grund af lystabet i det interstellare støv. Disse nyfundne store områder med ioniseret brint er i den fladtrykte galaktiske skive beliggende i en ring omkring galaksens centrum med afstande fra centret mellem 10 000 og 20 000 lysår, altså nærmere centret end solen, og de viser koncentration til spiralarme.

Et andet betydningsfuldt resultat var påvisning ved radioteknikken af områder med ioniseret brint beliggende indenfor mørke skyer i dele af disse, hvor tætheden af interstellart stof er særlig høj. Også for disse områder gælder det, at interstellart støv netop på grund af stoffets koncentration skjuler dem fuldstændigt for iagttagelse i synligt lys (Balmer-linierne).

Endelig har man ad denne vej kunnet påvise eksistensen af relativt kompakte skyer af ioniseret brint, beliggende kun ca. 100 lysår fra galaksens centrum, som bevæger sig bort fra centret med hastigheder på nogle hundrede kilometer per sekund, altså vidnesbyrd om *en kraftig udstrømning af stof fra det egentlige galakse-centrum*.

c. Forøgelsen af radioteleskopernes ydeevne har givet muligheder for iagttagelser ikke blot af centimeter-bølger, men også af radiostråling med bølgelængder i millimeterområdet. Dette har ført til en række vigtige opdagelser med hensyn til forekomsten af molekyler i det interstellare rum. Således har man påvist forekomsten af molekylet CO (kullilte) overalt i relativt uigennemsigtige interstellare skyer, idet CO-molekylet udsender stråling ved en bølgelængde på 2,6 millimeter. Ved systematiske eftersøgninger baserede på laboratorieundersøgelser af molekylers udstråling af radiobølger er det lykkedes at påvise forekomsten af en lang række molekyler i det interstellare rum, ialt over 50. Nogle af disse molekyler indeholder et betydeligt antal atomer, hovedsagelig brint, kulstof, kvælstof og ilt, således f. eks. etanol, $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$. Disse opdagelser har givet et betydningsfuldt indblik i det interstellare stofs fysik og kemi, navnlig hvad angår de tættere interstellare skyer.

d. Ovenfor, under *b*, er omtalt undersøgelser af kortbølget radiostråling (centimeter-området), som udsendes af interstellare områder, hvor brinten er ioniseret. Ved længere bølgelængder, i meter-området, iagttages et kontinuert spektrum, som skyldes udstråling af en helt anden art, der ligeledes har sin oprindelse i galaksens fladtrykte skive. Denne udstråling af radiobølger fremkommer på en helt anden måde, nemlig når elektroner med meget store hastigheder – nær lysets hastighed – bevæger sig i et magnetfelt. Udstråling af denne art bærer navnet *synkrotronstråling*, fordi den blev iagttaget i en type laboratorie-accelerator, som kaldes synkroton.

De nævnte hurtigtløbende elektroner i den fladtrykte galaktiske skive er en del af den såkaldte *kosmiske stråling*. Den udgøres foruden af elektroner af hurtigtløbende brintioner (dvs. protoner) samt – i mindre mængder – tungere ioner. Det drejer sig her om en komponent af interstellart stof, som selv i sammenligning med de allerede omtalte komponenter er uhyre fortyndet, men hvor til gengæld de enkelte elektroner og ioner har meget store hastigheder, og dermed meget store kinetiske energier.

Det magnetfelt, som elektronerne i den kosmiske stråling påvirkes af, således at radiobølger udsendes, findes overalt i galaksens fladtrykte skive, men det er et meget svagt magnetfelt, kun nogle få milliontedele af en Gauss, dvs. over titusind gange svagere end magnetfeltet på jordens overflade. Forholdet er det, at vekselvirkningen mellem en ganske uhyre fortyndet komponent af hurtigtløbende elektroner og et overordentlig svagt magnetfelt bevirker udstråling i meter-området af radiobølger, som har tilstrækkelig intensitet til, at de kan registreres og måles på jordens overflade – fordi udstrålingen kommer fra så umådelig store områder i rummet.

Den før omtalte radiostråling fra områder med ioniseret brint kaldes *termisk radiostråling*, fordi dens egenskaber er bestemt ved temperaturen for den udstrålende luftart. I modsætning hertil benævnes synkrotronstrålingen også *ikke-termisk radiostråling*. Den fremkaldes under ganske specielle omstændigheder, som netop eksistensen af meget hurtigtløbende elektroner udgør. Som vi skal se i de følgende afsnit, står disse omstændigheder i forbindelse med kosmiske eksplosioner i stor skala.

Et såre vigtigt resultat af undersøgelserne af de ikke-termiske radiobølger er påvisningen af intens stråling fra et overordentlig lille område lige i midten af den på s. 19 og s. 22 omtalte koncentration af masser af stellart og interstellart stof omkring galaksens centrum. Retningen til dette lille område er blevet bestemt ved de radioastronomiske målinger med en nøjagtighed bedre end et buesekund. Dette betyder en nøjagtighed i bestemmelsen af retningen fra solen til galaksens centrum, der er over titusind gange bedre end den nøjagtighed, som opnåedes sidst i 1920'erne, *et slående eksempel på udviklingen i de sidste 50 år*.

Ved anvendelse af en højt udviklet interferometer-teknik indenfor radioastronomien har man kunnet måle vinkeldiametrene for selv meget små kosmiske radiokilder. Man benytter her samtidig iagttagelse af en og samme kosmiske radiokilde – f.eks. det lige omtalte område i galaksens centrum – med radioteleskoper anbragt i afstande på mange tusind kilometer fra hinanden (i Europa og Amerika). For radiokilden i galaksens centrum har man ad denne vej bestemt vinkeldiameteren til en tusindedel buesekund. Dette svarer til en

lineær diameter på kun en titusindedel lysår, eller ca. en milliard kilometer, dvs. kun nogle få gange jordbanens diameter. Og indenfor dette begrænsede rum må stof med en samlet masse på mere end en million solmasser være koncentreret.

Sammenholder man alle gjorte iagttagelserr vedrørende galaksens centrum – den enorme massekoncentration og stofbevægelser bort fra centret med hastigheder på flere hundrede kilometer i sekundet – så får man et billede af en aktiv galakse-kerne, hvor de fysiske forhold er radikalt forskellige fra dem, vi kender i andre dele af galaksen. I det følgende afsnit skal vi se, at der blandt galakserne findes typer, hvis kerner ligeledes viser aktivitet, men i langt, langt større målestok – de såkaldte kvasarer.

Efter at vi i underafsnittene *a*, *b*, *c* og *d* har omtalt resultater af undersøgelser vedrørende det interstellare stof opnået på grundlag af radioastronomiske iagttagelser, skal vi nu til sidst i dette afsnit gøre rede for den vigtige rolle *rumforskning* har spillet på dette område.

I løbet af 1960'erne lykkedes det at opsende astronomiske rumsatellitter udrustet med teleskoper og hjælpeinstrumenter som spektrografer og fotometre. Disse satellitter bevæger sig i baner omkring jorden i nogle hundrede kilometers højde, de kan manipuleres fra kontrolrum på jorden, og rum-teleskopet kan rettes mod opgivne himmellegemer. De iagttagelses-data, som indsamles med det astronomiske udstyr, kan løbende kommunikeres tilbage til jorden.

Af afgørende betydning er det nu, at de astronomiske rumsatellitter bevæger sig så højt oppe, at jordatmosfærens absorberende virkning på strålingen fra himmellegemer undgås. Fra jordens overflade kan stråling med bølgelængder mindre end ca. 3000 Ångström overhovedet ikke iagttages, den indtages praktisk talt fuldkommen af jordatmosfæren. Det gælder det fjerne ultraviolette spektrum samt Røntgenstråling, og det gælder desuden en stor del af det infrarøde spektrum.

Særlig vigtige resultater med hensyn til udforskning af det interstellare stof blev opnået med den såkaldte Copernicus-satellit, der opsendtes i 1973. Ved hjælp af dennes teleskop og tilhørende spektrograf registreredes et betydeligt antal stjernespektre i det fra jordoverfladen helt utilgængelige bølgeområde fra ca. 1000 til ca. 3000 Ångström. I dette område af spektret finder man i stjernespektre talrige absorptionslinier, som skyldes absorption ved interstellare atomer og ioner langs lysvejen fra stjernen til iagttageren. På s. 20 er omtalt den absorptionslinie, som fremkaldes af interstellart calcium. Den ligger netop i det fra jordens overflade iagttagelige bølgelængdeområde, men forholdet er det, at for de fleste af de hyppigst forekommende grundstoffers vedkommende er de tilsvarende absorptionslinier beliggende under 3000 Ångström-grænsen. De kunne ikke iagttages fra jordens overflade, men blev nu registrerede med Copernicus-satellitten. Dette gav helt nye muligheder for den spektroskopiske analyse af den kemiske sammensætning af det interstellare stof, og førte til pålidelige bestemmelser af mængdeforholdene mellem grundstofferne i rummet mellem stjernerne.

Resultatet af analysen af iagttagelserne med Copernicus-satellitten var i denne henseende en bekræftelse af en tidligere på langt mindre omfattende grundlag opstillet formodning: Den kemiske sammensætning af det interstellare stof er meget nær den samme

som for stjerner (når undtages de ældste stjerner i galaksen, se s. 19). Af analysen fremgik det endvidere, at de grundstoffer, der er tungere end brint og helium, er nogenlunde ligelig fordelt mellem den yderst fortyndede interstellare luftart og de interstellare støvkorn, medens brint og helium hovedsagelig findes i luftarten.

Et resultat af analysen af iagttagelserne med Copernicus-satellitten skal særlig fremhæves. Det lykkedes at registrere de interstellare absorptionslinier, som skyldes *brintmolekyler*, og det blev fastslået, at medens brint i de interstellare skyer, der har relativt lille lysabsorption (se s. 13), ganske overvejende findes i atomar form (atomer og ioner), så forekommer brint i tætte stærkt absorberende skyer overvejende i molekylær form. Dette hænger sammen med, at lysabsorption i de tættere skyer beskytter brintmolekyler mod dissociation ved stråling, som oprindeligt stammer fra galaksens stjerner.

Af det i dette afsnit omtalte fremgår det, at der ved en lang række fremskridt gennem de sidste 50 år er skabt et nyt billede af vor galakse: Vort stjernesystem udgør en enhed med tre karakteristiske komponenter 1. den roterende fladtrykte *skive*, befolket af stjerner og interstellart stof, med dens spiralarme, i hvilke systemets unge stjerner er koncentreret, og 2. den centrale massekoncentration med en aktiv *kerne* i midten, samt 3. den kun langsomt roterende næsten sfæriske *halo*, indeholdende systemets ældste stjerner. Galaksens stjernebefolkning er præget af stor mangfoldighed, som beskrevet i afsnit 2. Det interstellare stof er ujævnt fordelt, i større eller mindre skyer, dets fysiske forhold afhænger af påvirkningen fra stjernebefolkningen, og ialt udgør dette stof en ikke ubetydelig del af galaksens hele masse. I det følgende afsnit 5 skal vi se, dels hvorledes mangfoldigheden i stjerneverdenen forklares ved, at stjerneegenskaberne afhænger af to faktorer: Stjerne-massen og stjernealderen. Hertil kommer for de ældste stjerners vedkommende endnu en faktor, nemlig den kemiske sammensætning. I afsnit 5 omtales tillige den vekselvirkning i enorm skala, som finder sted mellem stjerner og interstellart stof i kraft af stjerners udvikling, fra stjernefødsel til stjernedød. Der er her tale om en gigantisk mekanisme, som gennem milliarder af år har ført til vældige ændringer i galaksens egenskaber.

5. Udforskningen af stjernernes opbygning og udvikling

Allerede i 1800-tallet havde enkelte forskere forsøgt at danne sig et billede af stjerners indre opbygning, og fysikerne Helmholtz og Kelvin havde udviklet en teori om solens udvikling ved sammentrækning – en sammentrækning ved hvilken efter deres beregninger netop så meget energi skulle frigøres, at energitabet ved solens udstråling blev dækket. I 1920'erne og 1930'erne blev disse undersøgelser taget op med fornyet kraft, og nu på baggrund af fysikkens skelsættende landvindinger ved udviklingen af atomteorien og kvantemekanikken.

Blandt stjernerne er solen naturligt den, som kendes bedst. Dog er det således, at den del af solen, som kan iagttages direkte, nemlig solatmosfæren, men hensyn til masse kun udgør en umådelig lille brøkdel af hele solen. Kendskab til solens indre struktur kan kun

opnås ad indirekte vej, ved teoretiske beregninger. Udgangspunktet for sådanne beregninger er imidlertid resultaterne af detaljerede undersøgelser af solatmosfæren.

Udforskningen af den egentlige solatmosfære – den såkaldte fotosfære – som består af de lag, der direkte udsender sollyset til det omgivende verdensrum, udgør et meget vigtigt kapitel af astrofysikken. Teorier for fotosfæren gør rede for tilvæksten i tryk, tæthed og temperatur, når man går fra fotosfærens højere til dens dybere lag, og tillige for de overordentlig talrige arter af atomprocesser, der skaber strålingsfeltet i fotosfæren og dermed frembringer udstrålingen. Et såre vigtigt mål for de teoretiske undersøgelser af fotosfæren er redegørelse for det udstrålede solspektrum. Her drejer det sig om en meget detaljeret redegørelse, som omfatter titusinder af absorptionslinier svarende til grundstofatomers og ioners spektrallinier. Løsningen af denne opgave giver svar på et fundamentalt spørgsmål: Hvad er fotosfærens kemiske sammensætning, dvs. hvilke er mængdeforholdene mellem de forekommende grundstofatomer. Med andre ord, kvantitativ spektralanalyse kan gennemføres.

I hele dette kapitel af astrofysikken er det afgørende, at fotosfæren kun udgøres af gennemgangslag, som nok omformer den passerende stråling og giver solspektret dets endelige udseende, men som hverken kan trække fra eller lægge til, hvor det drejer sig om den samlende energimængde: Energien kommer fra områder i solens indre, og dens mængde forandres ikke ved passagen gennem atmosfæren.

I 1920'rne skete betydelige fremskridt i udforskningen af fotosfæren, og et afgørende gennembrud fandt sted i slutningen af 1930'rne, da Rupert Wildt identificerede den atomare proces, som frembringer størstedelen af det synlige sollys. Forholdet er det, at langt det meste af brinten i fotosfæren findes i form af neutrale brintatomer, medens metallerne, som ganske vist forekommer i langt mindre mængde, overvejende er ioniserede og derved en kilde til fri elektroner i solens fotosfære. Disse fri elektroner kan nu indfanges af de neutrale brintatomer, hvorved der dannes stabile negative brintioner bestående af en brintkerne (protonen) og to negative elektroner. Det er ved sådanne indfangningsprocesser, at hovedparten af sollyset i det kontinuerte spektrum udsendes. Den negative brintions egenskaber kunne i 1930'rne beregnes teoretisk i kraft af den udvikling, som var mulig gjort ved atomteori og kvantemekanik, og herved var forudsætningerne skabt for et afgørende fremskridt i udforskningen af solens og stjernernes atmosfærer.

Det omtalte gennembrud medførte væsentlige fremskridt med hensyn til bestemmelse af den kemiske sammensætning af solens atmosfære samt atmosfærerne for stjerner af lignende type som solen. De resultater, som på dette område nåedes i slutningen af 1930'rne, er blevet bekræftede ved undersøgelser i de følgende årtier. De fortsatte undersøgelser har navnlig haft betydning for udforskningen af stjerneatmosfærer for andre typer af stjerner, med både meget højere og betydelig lavere temperaturer. Teorien for stjernernes atmosfærer er gennem 1960'rne og 1970'rne blevet yderligere udviklet navnlig derved, at man har kunnet benytte sig af store elektroniske regnemaskiner til detaljerede beregninger af molekylers, atomers og ioners påvirkning af strålingsfeltet i stjerneatmosfærerne ved lys-emission og lysabsorption i titusinder, ja hundredtusinder af spektrallinier.

Udenom solens fotosfære findes stoflag med langt mindre tæthed, som udgør den så-

kaldte kromosfære og – endnu længere ude og med endnu mindre tæthed – solens korona. Disse højere lag er af stor astrofysisk interesse, men deres samlede udstråling er så relativt ringe (koronaens samlede udstråling er kun ca. en milliontedel af fotosfærens), at de ikke i nævneværdig grad påvirker solens energihusholdning og indre struktur. Her forbigår vi dette interessante kapitel af solfysikken og nævner kun et af de i de sidste halvtreds år opnåede forskningsresultater: Den yderst fortyndede korona har en temperatur på over en million grader, og fra den udgår en strøm af overordentlig fortyndet stof bestående af hurtigløbende energirige partikler, som gennemtrænger solsystemet, den såkaldte solvind. Vi vender tilbage til dette afsnits hovedtema, stjernernes indre opbygning.

Som nævnt i indledningen til dette afsnit er udgangspunktet for de teoretiske beregninger, som giver kendskab til solens indre struktur, netop resultaterne af undersøgelserne af solatmosfæren. Her kendes – fra lag til lag – tryk, tæthed og temperatur samt den kemiske sammensætning. Hvordan kan man nu slutte videre til egenskaberne for de dybere liggende, usynlige lag?

At det kan lade sig gøre, beror på, at solen er et himmellegeme i *ligevægt*. Dette betyder for det første, at man kan beregne trykstigningen i det luftformige solstof fra lag til lag indad gennem stjernen, idet trykket i ethvert lag er givet ved vægten af de lag, der ligger længere fra centret. Vægten af et givet lag bestemmes ved tyngdetiltrækningen, der overalt er rettet mod solcentret. For den luftart, som solstoffet udgør, kan man endvidere beregne den såkaldte tilstandsligning, dvs. en sammenhæng mellem tryk, tæthed og temperatur. Denne beregning kan dog kun gennemføres, når man kan gøre nøje regnskab for graden af ionisation for de indgående grundstoffer, dvs. atomernes sønderdeling i ioner og fri elektroner, i afhængighed af tæthed og temperatur. Her betød nu i 1920'erne og 1930'erne udviklingen af atomteori og kvantemekanik et afgørende fremskridt.

For et himmellegeme i ligevægt kan temperaturstigningen fra lag til lag indad mod centret beregnes. Denne temperaturstigning skal nemlig være lige netop så stor, at den udad gennem stjernen driver en strøm af energi, som har den rette størrelse. Og den rette størrelse vil her sige, at strømmen gennem ethvert lag i solens indre skal svare til den energimængde, som af stjernestoffet produceres indenfor dette lag.

Disse ræsonnementer viser, at man i princippet kan beregne ændringen af tryk, tæthed og temperatur fra lag til lag indad gennem solen fra fotosfæren, hvor de fysiske forhold er kendt, og helt ind til centret. Men til den faktiske gennemførelse af beregningerne kræves det, at man har indgående kendskab til egenskaberne hos solstoffet i det indre. Det drejer sig ikke blot om det allerede omtalte problem, beregningen af tilstandsligningen, men tillige om detaljeret redegørelse for energitransporten udad gennem solens indre, dels ved stråling, dels ved stofstrømninger, og her kræves kendskab til solstoffets absorption og emission af stråling. Igen var det i 1930'erne af afgørende betydning, at atomteori og kvantemekanik havde nået en udvikling, som gjorde det muligt at gennemføre de pågældende beregninger angående vekselvirkningen mellem solstoffet og strålingen.

Et slående resultat af de beregninger vedrørende solens indre, som gennemførtes i 1920'erne, navnlig af den engelske astrofysiker A. S. Eddington, var, at det kunne vises, at solstoffet helt igennem – fra fotosfæren lige til centret – er en sammentrykkelig luftart. I

afsnit 2 er det nævnt, at solens gennemsnitstæthed er 1.4 gange vands tæthed. I de indre dele er tætheden betydelig større, og ikke desto mindre drejer det sig om en luftart. Forholdet er det, at stoffets ionisation på grund af dets høje temperatur er så vidt fremskredet, at hovedbestanddelene er *atomkerner og fri elektroner*, begge dele partikler, hvis diametre er langt mindre end atomers. *Derpå beror det, at stoffet kan sammenpresses til tætheder, som er mange gange vands tæthed, og alligevel opføre sig som en sammentrykkelig luftart.* Hvad her er anført vedrørende solen, har vist sig også at gælde for hovedseriestjerner og kæmpestjerner i al almindelighed (jfr. tabel 2, s. 10).

Ovenfor blev det nævnt, at det ved gennemførelsen af beregningen af solens opbygning er nødvendigt at gøre rede for energiproduktionen, som bestemmer energistrømmen udad gennem hvert enkelt lag og dermed også temperaturens stigning fra lag til lag indad gennem solen. Vi skal nu berette om den udvikling af astrofysikken, der fandt sted i slutningen af 1930'erne, og som førte til løsningen af det fundamentale problem om, hvorledes energiproduktion i solens indre finder sted.

I midten og mod slutningen af 1930'erne var man i beregningerne vedrørende solens indre nået så vidt, at den kemiske sammensætning, temperaturen og tætheden af solstoffet i solens centrale dele var kendt. Beregningerne havde kunnet gennemføres uden kendskab til mekanismen for energiproduktion, alene under den forudsætning – hvis rigtighed senere undersøgelser fuldt ud bekræftede – at energiproduktionen finder sted i og er begrænset til et relativt lille område omkring centret. Resultatet var dengang, at størstedelen af solstoffet i det indre udgøres af brint, så følger helium, medens tungere grundstoffer kun udgør nogle få procent efter vægt. Stoffet er højt ioniseret og består således hovedsagelig af atomkerner og fri elektroner. Temperaturen i solcentret blev anslået til at være 13 millioner grader og tætheden til ca. 100 gange vands tæthed. De anførte resultater svarer nær til de i dag antagne.

Den opgave, som nu forelå, kunne formuleres således: *De fysiske og kemiske betingelser i de centrale dele er kendt. Hvilke atomkerneprocesser finder der sted under disse betingelser, hvor hurtigt forløber de, og hvor stor er den tilsvarende energiproduktion, per sekund og per gram af solstoffet?*

Denne fundamentale opgave blev i 1938 løst af fysikeren H. A. Bethe. De store fremskridt i fysikken gennem 1920'erne havde bragt klarhed vedrørende atomernes struktur. I 1930'erne førte omfattende eksperimentel såvel som teoretisk forskning til ny fundamental viden om atomkernerne og de elementarpartikler – protoner og neutroner – hvoraf de består. Dette var den anden del af baggrunden for Bethe's undersøgelse.

Ved en systematisk gennemgang af de mulige processer mellem atomkerner, som de findes i solstoffet, samt beregning af reaktionshastigheder under de givne temperatur- og tæthedsforhold viste Bethe, at langt det vigtigste resultat af de stedfundne atomkerneprocesser var *opbygning af brint til helium*: Fire brintkerner (dvs. protoner) og to elektroner forsvinder, og en heliumkerne (med atomvægt fire og kerneladning to) opstår. Da nu fire protoner plus to elektroner vejer noget mere end en heliumkerne (masseforskellen udgør ca. 0,7 procent), omsættes ved denne omdannelse masse til energi – efter Einstein's ligning: energi lig masse gange lyshastigheden i anden potens. Dette betyder, at der ved de

pågåeldende atomkerneprocesser produceres energi, der i første omgang kommer det lokale solstof til gode, og som derved bidrager til strømmen af energi udad gennem solen – den strøm, der ender som udstråling fra solen til det omgivende rum.

Energiproduktionens størrelse bestemmes ved antallet af heliumkerner, som dannes af brintkerner og fri elektroner. Bethe kunne nu beregne størrelsen af den samlede energiproduktion i solens centrale dele og fandt, at den *stemte overens med solens udstråling*. Beregningerne viste, at energiproduktion afhænger af stoffets temperatur: Den vokser meget stærkt med stigende temperatur. Dette er grunden til, at kun solens centrale dele, hvor temperaturen er højest, bidrager kendeligt til energiproduktionen. Tillige demonstrerer disse beregninger, at solen kan betragtes som en kæmpemæssig maskine i ligevægt, en ligevægt som opretholdes på den måde, at temperaturen i centrum er lige netop så stor, at energiproduktionen når en værdi svarende til solens energitab ved udstråling. Hvis energiproduktionen var mindre end udstrålingen, ville solen trække sig sammen, temperaturen i centrum ville stige, og energiproduktionen ville vokse, indtil den var netop så stor som energitabet ved udstråling.

En meget vigtig konsekvens af disse overvejelser er følgende: Idet energiproduktionen i solens centrale dele sker ved omdannelse af brint til helium, vil *solens kemiske sammensætning gradvis blive ændret, dvs. solen må gennemgå en udvikling – forandre sig med voksende alder*.

Undersøgelserne vedrørende atomkerneprocesser i stjernernes indre fortsattes, navnlig i tiden efter 1950. Det blev klarlagt, at også heliumkerner kan reagere med hinanden, men at dette kræver temperaturer, der er meget højere end de i solens indre herskende – ca. 200 millioner grader. Som vi straks skal se, realiseres sådanne forhold i kæmpestjernernes indre.

Et sammenstød mellem to heliumkerner, som følges af indfangning af endnu en tredje heliumkerne, fører til dannelsen af en kulstofkerne, og sådan omdannelse af helium til kulstof finder sted ved den nævnte højere temperatur. Ved atomkerneprocesser, der involverer successiv indfangning ved tungere atomkerner af protoner og heliumkerner, kan grundstoffer opbygges – fra kulstof videre til ilt og helt op til grundstofferne af jerngruppen (jern, nikkel og krom), men sådan opbygning kræver endnu højere temperaturer.

Det er nu af stor betydning, at der ved successiv opbygning af stadig tungere grundstoffer, op til jerngruppen, hele tiden *frigøres atomenergi*. Men dermed er det også slut: Ved en opbygning, som er forløbet fra brint over helium og kulstof til jerngruppen, er reservoiret af atomkerneenergi, som kan frigøres ved grundstofomdannelse, blevet opbrugt. Som vi skal se, spiller dette forhold en vigtig rolle ved stjerners udvikling.

Endnu et resultat af undersøgelserne vedrørende grundstofopbygning i stjernerne skal nævnes, nemlig at det under ganske specielle omstændigheder, hvor der i stjernestoffet frigøres neutroner, kan finde en opbygning sted fra jerngruppen og helt op til de tungeste kendte grundstoffer. Imidlertid spiller de pågåeldende processer ingen væsentlig rolle for energihusholdningen, og i denne sammenhæng må det også erindres, at de pågåeldende grundstoffer, tungere end jerngruppen, tilsammen kun udgør en meget lille, omend særdeles interessant del af stoffet i kosmos.

Efter denne omtale af hovedresultater af undersøgelserne vedrørende grundstofopbyg-

ning og energiproduktion i stof, der har meget høj temperatur, skal der nu berettes om den astrofysiske forskning, som under benyttelse af netop disse resultater har ført til et billede af solens og stjernernes udvikling – deres forandring med alderen, fra stjernedannelse til stjernedød.

Lad os først betragte udviklingen for en stjerne med en masse lig solens masse. I afsnit 4 er omtalt, at der i interstellare skyer forekommer udprægede fortætninger, og at analysen af radiostråling fra sådanne fortætninger har vist, at der her finder dannelse af stjerner sted. En masse af størrelse som solmassen, der har skilt sig ud fra det interstellare stof – en proto-stjerne – vil trække sig sammen under indflydelse af tyngdekraften fra massen i proto-stjernen selv, og tætheden, som ved udviklingens begyndelse er uhyre lille, vil gradvis vokse. Proto-stjernen vil udsende stråling, og da der ikke finder nogen kendelig energiproduktion sted i dens indre, vil den trække sig sammen – i overensstemmelse med den på s. 26 omtalte af Helmholtz og Kelvin udviklede teori, som finder anvendelse her (men ikke for solen på dens nuværende udviklingstrin). Ved sammentrækningen vil stjernens centrumtemperatur stige, og når udviklingen er forløbet så vidt, at radius kun er noget større end den nuværende solradius, er temperaturen tilstrækkelig høj til, at energiproduktion i det indre begynder, først dog ikke i tilstrækkeligt omfang til at dække energitabet ved udstråling. Nu fortsætter udviklingen efter det mønster, som er beskrevet på s. 30, dvs. indtil centrumtemperaturen er blevet netop så høj, at energiproduktionen dækker tabet ved udstrålingen. Stjernen er da et himmellegeme i ligevægt, og i sine egenskaber ligner den solen meget. Den er nu en *hovedseriestjerne* (jfr. s. 11). Hele udviklingen fra proto-stjerne til hovedseriestjerne forløber relativt hurtigt, i løbet af mindre end 100 millioner år.

Som hovedseriestjerne vil dette himmellegeme gradvis, omend nu meget langsomt, forandres. Det, som sker, er, at brint i de centrale dele opbygges til helium. Efter et tidsrum, som svarer til vor sols alder, nemlig 4,5 milliarder år, vil omtrent halvdelen af den brint, som findes i de centrale dele, hvor energiproduktion finder sted, være blevet opbygget til helium. Denne forandring i den kemiske sammensætning, som berører de centrale dele, men ikke den ydre kappe af solen, bevirker en forandring – *en udvikling* – af himmellegemet. Ved alderen 4,5 milliarder år ligner det fuldstændig vor sol – samme masse og samme alder giver samme radius og samme energiudstråling, og dermed samme overfladetemperatur og farve for stjernen.

Følger man nu udviklingen videre, vil man komme til en situation, hvor al brint i den del af stjernen, som har tilstrækkelig høj temperatur til, at energiproduktion finder sted, er omdannet til helium. *Brændstoffet for energiproduktion i stjernens centrale dele er opbrugt*, og stjernen har nu en kerne bestående af helium. For en stjerne med en masse lig solens finder dette sted ved en alder, som er noget under 10 milliarder år.

Nu finder en udvikling sted, som bringer stjernen ind i *kæmpestjerne-stadiet*. I 1950'erne og 1960'erne lykkedes det at gennemføre teoretiske beregninger, som i detaljer gjorde rede for denne udvikling. Indgående kendskab til stjernestoffets fysik var her af afgørende betydning, men meget vigtigt var det også, at beregningerne nu kunne gennemføres ved hjælp af store elektroniske regnemaskiner.

Efter at brændstoffet i de centrale dele af stjernen er opbrugt, ændres ifølge disse beregninger stjernens struktur på en sådan måde, at stjerneradius forøges, samtidig med at temperaturen stiger i de centrale dele og tillige, hvad der her er afgørende, i lagene lige uden om den kerne, som består af helium, og hvor der endnu findes brint. Nu kan energiproduktion finde sted her, og i kemisk henseende betyder det, at massen af den centrale kerne, som består af helium, vokser.

Under den fortsatte forandring af stjernen med alderen vokser radien, hvorved gennemsnitstætheden aftager, og stjernen bliver til en kæmpestjerne (jfr. tabel 2, s. 10). De teoretiske beregninger viser imidlertid, at mens gennemsnitstætheden aftager, vil tætheden i den centrale kerne bestående af helium vokse. Kontrasten bliver til sidst så stor, at stjernekerne udvikler sig videre, ret uafhængig af forholdene i den ydre kappe. Man kan udtrykke det således, at stjernekerne lever sit eget liv. Et stadium nås, hvor temperaturen i stjernekerne bliver så høj, at dens helium nu begynder at omdannes til kulstof og ilt (jfr. s. 30), dette under energiproduktion.

Hele udviklingen fra hovedseriestjerne til kæmpestjerne forløber meget hurtigere end udviklingen i selve hovedseriestadiet, dog langsommere end i det tidlige udviklingsstadium, hvor energiproduktion i stjernens indre endnu ikke er begyndt. Den sidste del af udviklingen i kæmpestjernestadiet præges af, at der nu strømmer masse ud fra stjernens kappe til det omgivende verdensrum, ikke eksplosivt, men med hastigheder af størrelsesordenen 10 kilometer per sekund. Stjernen deler sig, idet kappen bliver til en ekspanderende tåge, som gradvis opløses og bliver til interstellart stof, medens stjernekerne udvikler sig videre som en stjerne, der ikke længere har karakter af kæmpestjerne. I den egentlige stjerne løber opbygningen fra helium til kulstof og ilt til ende, og i det betragtede tilfælde – dvs. en stjerne, som begyndte sin udvikling med en masse lig solens, og som nu har en masse på omtrent halvdelen heraf – er stjernens centrumtemperatur ikke høj nok til, at videre opbygning fra kulstof og ilt til tungere grundstoffer kan finde sted. *Det tilgængelige brændstof er opbrugt*, og stjernen trækker sig nu sammen, indtil en endelig ligevægtstilstand karakteriseret af meget høj stjernetæthed er nået. Stjernen er nu en *hvid dværgstjerne* af den art, som er omtalt s. 12 (jfr. tabel 2).

Omend der i en hvid dværgstjerne ikke produceres atomkerneenergi, er der dog nogen energi til rådighed i form af stoffets varmeenergi. Ved den ganske vist meget svage udstråling (jfr. tabel 2, s. 10) formindskes dette forråd af varmeenergi til stadighed. Stoffet i stjernens indre afkøles gradvis, udstrålingen bliver mindre og mindre, og slutstadiet er et udslukt himmellegeme bestående af stof af meget høj tæthed.

Lad os dernæst betragte stjerner, hvis masse ved stjernens dannelse ud fra interstellart stof er større end solens masse – *mellem 1 og 4 solmasser*. De teoretiske beregninger viser her et udviklingsforløb, der i store træk svarer til det, som lige er beskrevet for en stjerne med solmasse, *blot forløber udviklingen hurtigere*, med større hastighed, jo større stjernemassen er. Efter et stadium, i hvilket stjernen meget hurtigt trækker sig sammen, nås hovedseriestadiet. Igen er det dette stadium, som har den længste varighed, for en stjerne med massen 4 solmasser dog kun ca. 100 millioner år, i modsætning til knap 10 milliarder år for 1 solmasse. Hovedseriestadiet følges af et kæmpestjernestadium, idet udvidelsen af

stjernen og dannelsen af en stjernekerne med stor tæthed her forløber meget hurtigt. Igen finder der i sidste fase af kæmpestjerne-stadiet en ikke-eksplosiv udstrømning af stof sted fra den kappe, som omgiver stjernekerne. Selv stjerner, som begynder deres udvikling med en masse lig 4 solmasser, reduceres herved til stjerner med masser omkring 1 solmasse, og slutstadiet bliver igen en hvid dværgstjerne af høj tæthed, der gradvis udslukkes.

Også for stjerner med begyndelsesmasser en smule mindre end solens er forløbet det samme, dog nu langsommere end for solmassen. Hvis massen ved stjernens dannelse er *betydelig mindre end 1 solmasse*, f. eks. 0.5 solmasser, forløber udviklingen så langsomt, at *stjernen ikke kan nå ud over hovedseriestadiet* i tidsrum, som er mindre end vor galakses alder, noget over 10 milliarder år. Dette gælder således røde hovedseriestjerner af en type, som i tabel 2, s. 10. Hvis begyndelsesmassen er under ca. 0.05 solmasser, når centrumstemperaturen for stjernen ved stjernens sammentrækning aldrig op i tilstrækkelig højde til, at atomkerneproduktion kan komme i gang. Dette gælder f. eks. himmellegemer som planeterne i vort solsystem.

I stjernebefolkningen i vor galakse, beskrevet i afsnit 2, genfinder man de stjernetyper, som lige er omtalt. Ved udførlige undersøgelser har man kunnet skærpe sammenligningen mellem iagttagelse og teori på en sådan måde, at man for enhver iagttaget stjerne type kan angive masse og alder. Det skal dog understreges, at det her drejer sig om stjernebefolkningen i galaksens fladtrykte skive, hvor langt den største del af stjernerne har en kemisk sammensætning nær lig solens. De tilhører den såkaldte population I. Går man til galaksens halo, finder man stjerner, deriblandt medlemmerne af kugleformede stjernehober, for hvilke det relative indhold af tunge grundstoffer er meget lille, og her viser beregningerne et udviklingsmønster, som er kvantitativt set anderledes. Der drejer sig som nævnt s. 19 om galaksens ældste stjerner, og det betyder, at i denne såkaldte population II er stjerner med masser over ca. 1.5 solmasser overhovedet ikke repræsenteret. Populationens alder er nemlig så høj, at de større masser alle har gennemløbet såvel hovedseriestadiet som kæmpestjernestadiet og nu kun findes i form af svagt udstrålende stjerner i slutstadiet.

I denne redegørelse for resultater af undersøgelser vedrørende stjernernes udvikling kommer vi nu til et sidste vigtigt kapitel. Hvordan forløber udviklingen for stjerner, som dannes med *store masser* – 10 solmasser, 15 eller endnu større? Også her begynder udviklingen med sammentrækning af stjernen, til den når hovedseriestadiet, nu som en hvid stjerne (jfr. tabel 2, s. 10). Hovedseriestadiet gennemløbes i løbet af mindre end 10 millioner år og følges af et kæmpestjernestadium. Ligesom for de mindre masser (1–4 solmasser) er der her dannet en stjernekerne, og nu med endnu højere tæthed og temperatur. Der finder igen et vist massetab sted fra stjernens kappe, men udviklingen i stjernekerne forløber så hurtigt, at massetabet ikke når at blive af større betydning. I stjernekerne er temperaturen så høj, at opbygning af grundstoffer finder sted, fra kulstof helt op til jerngruppen som beskrevet s. 30, hvorved frigørelsen af energi ved atomkerneopbygning ophører. Den høje temperatur bevirker også, at tætheden i stjernens centrale dele under udviklingen kan nå op på meget højere værdier end hvad man finder selv i de hvide dværgstjerner.

Også denne udvikling til enormt høje temperaturer og tætheder har man navnlig i de sidste år kunnet følge ved teoretiske beregninger takket være fremskridt på fysikkens om-

råde. Under de ekstreme fysiske betingelser kommer nye fænomener ind i billedet, f. eks. omfattende energitransport ved neutrinoer, der udsendes under atomkerneprocesser, og som i modsætning til strålingens fotoner kan bevæge sig gennem hele den ydre stjerne- kappe uden kendelige energitab.

Resultatet af de teoretiske beregninger peger i retning af, at der igen sker en deling af kæmpestjernen, men nu ved en voldsom kosmisk eksplosion, et *supernova-udbrud*. Ved delingen strømmer det meste af stjernens masse ud i det omgivende rum med hastigheder på tusinder af kilometer i sekundet. Der bliver en stjerneverest tilbage, og i denne stjerneverest er tætheden svarende til forholdene i stjerne-kernen lige inden eksplosionen overordentlig stor, over en milliard gange større end i typiske hvide dværgstjerner.

De foreliggende teoretiske beregninger er endnu ikke nøjagtige nok til, at man ad denne vej med sikkerhed kan slutte, at der dannes en stjerneverest med uhyre høj gennemsnitstæthed. Det er derfor af stor betydning, at man ad *iagttagelsens vej* har kunnet vise, at der i hvert fald i visse tilfælde ved supernova-udbrud bliver en stjerneverest tilbage med egenskaber netop som omtalt.

Den såkaldte Krabbetåge udgøres af en meget fortyndet luftart, som udvider sig med en hastighed på ca. 1000 kilometer i sekundet, bort fra et centrum, hvor der i år 1054 ifølge kinesiske optegnelser indtraf, hvad vi i dag kalder et supernova-udbrud. Iagttagelserne vedrørende Krabbetågen passer helt til forestillingen om, at store dele af stjernen eksplosivt strømmer ud i det omgivende rum ved et supernova-udbrud.

I 1968 fandt nu forskere ved et stort radio-observatorium hørende til Cavendish-laboratoriet i Cambridge, England, en helt ny type radiokilder (jfr. afsnit 4), som stødvis udsender radiostråling på en sådan måde, at tidsrummet mellem to på hinanden følgende radioimpulser holder sig overordentlig konstant. Denne nye type af radiokilder blev kaldt *pulsarer*. Tiden fra impuls til impuls, dvs. perioden, var forskellig fra pulsar til pulsar, men altid meget kort, ofte langt under et sekund.

Det blev hurtigt klart, at sådanne radiosignaler kun kunne frembringes af hurtigt roterende stjerner med meget lille radius, og at radiosignalerne udsendtes, fordi disse roterende stjerner har et stærkt magnetfelt. Den nærmere analyse viste, at pulsarerne måtte være stjerner med en radius på kun ca. 10 kilometer, og at de derfor måtte have overordentlig store tætheder.

Lige i centrum af Krabbetågen blev nu fundet en pulsar, en stjerne med en rotationsperiode på kun 0.033 sekund. Senere blev der på nøjagtig samme sted på himlen fotograferet en svagtlysende stjerne, hvis lys viste sig at variere netop med perioden 0.033 sekund. Der kunne ikke være tvivl om, at det drejede sig om *stjerneveresten* efter supernova-eksplosionen i år 1054.

Analysen af det nu foreliggende omfattende iagttagelsesmateriale vedrørende pulsarer har i kombination med teoretiske beregninger over den indre opbygning af stjerner med overordentlig store tætheder ført til et billede af disse objekter, som fuldtud bekræfter, at de har overordentlig høje gennemsnitstætheder. Undersøgelserne vedrørende den indre opbygning har vist, at stoffet i store dele af stjernen består af fri neutroner. Atomkerner er blevet sønderdelt i elementarpartiklerne protoner og neutroner, og protonerne er i stor ud-

strækning blevet forenet med elektroner til neutroner. Af denne grund kaldes objekterne *neutronstjerner* (jfr. tabel 2, s. 10).

De teoretiske undersøgelser over strukturen af stjerner med meget høje tætheder har vist, at typen hvid dværgstjerne kan eksistere som stabilt himmellegeme med masser op til 1.4 solmasser, medens den tilsvarende øvre grænse for typen neutronstjerne er større, ca. 2 solmasser. Hvad nu hvis et supernova-udbrud af en meget tung stjerne skulle give en stjerneverest på betydelig over 2 solmasser? En sådan stjerneverest ville trække sig sammen til endnu højere tæthed, og beregninger på grundlag af Einstein's relativitetsteori har vist, at objektet derved ville blive afskåret fra vekselvirkning med omverdenen i form af udstråling, men derimod manifestere sig ved tyngdetiltrækning. Et sådant objekt har man kaldt et *sort hul*.

Nu er forholdet det, at de teoretiske beregninger ikke har ført til nogen sikker forudsigelse af, at der ved stjerneeksplosion skulle kunne opstå stjerneverester med så store masser, at den videre udvikling førte til dannelsen af et sort hul. Med hensyn til iagttagelserne gælder det, at der endnu ikke foreligger nogen sikker påvisning af, at en stjerneverest har udviklet sig til et sort hul.

Vi har nu set, hvorledes undersøgelserne af stjernernes udvikling har ført til en forståelse af mangfoldigheden i galaksens stjernebefolkning og til en tydning af de forskellige stjernetyper som repræsenterende stjerner af forskellig masse og forskellig alder. Forholdet mellem iagttagelse og teori belyses, når man sammenholder egenskaberne for stjernetyperne i tabel 2, s. 10, med de ovenfor gengivne beregningsresultater. Med hensyn til den i afsnit 4 omtalte inddeling af stjerner i grupper efter absorptionsliniespektrets udseende (jfr. fig. 5), så er det nu klart, at hver enkelt gruppe indeholder stjerner (af population I), der indbyrdes har meget nær samme masse og samme alder.

Til sidst i dette afsnit skal grundlæggende spørgsmål vedrørende vekselvirkningen mellem stjerner og interstellart stof i vor galakse omtales.

Først må det understreges, at hver gang en stjerne dannes, sker der en formindskelse af mængden af interstellart stof. Ganske vist kommer ved stjernens udvikling noget af stoffet tilbage til det interstellare rum, nemlig som vi har set ved udstrømningen fra kæmpestjerner samt ved supernova-udbrud. Størstedelen af stoffet bindes imidlertid i stjerner, dels i de relativt meget talrige røde hovedseriestjerner, som ikke har nået at udvikle sig ud over hovedseriestadiet i galaksens levetid, dels i de to typer af stjerneverester, nemlig de hvide dværgstjerner og neutronstjerne. Resultatet er, at galaksens komponent af overordentlig stærkt fortyndet stof, som ved galaksens oprindelige dannelse som selvstændig enhed udgjorde den hele stofmængde, aftager med galaksens alder. I galaksens nuværende udviklingsfase udgør denne komponent, det interstellare stof, kun ca. 5 procent af galaksens masse, mod 95 procent i form af stjerner. *Gennem galaksens levetid på noget over 10 milliarder år har den således på afgørende måde forandret struktur.*

Også med hensyn til kemisk sammensætning har vor galakse gennemgået en slående udvikling. Iagttagelserne vedrørende galaksens ældste stjerner vidner om, at galaksestoffet oprindeligt bestod ganske overvejende af brint og helium. Gennem milliarder af år er derefter opbygningen af tungere grundstoffer i stjernerne kommet det interstellare stof til

gode: Ved den ovenfor beskrevne udstrømning af stof fra stjerner i et sent udviklingsstadium *beriges det interstellare stof gradvis med tunge grundstoffer*, og følgelig har stjerner, som er dannet i en senere udviklingsfase af galaksen, et større indhold af tunge grundstoffer. At solen, solsystemet og vore omgivelser på jorden er præget af mangfoldigheden af molekyler, skyldes denne berigelsesproces.

Det er dog kun en mindre del af de i stjernerne dannede tungere grundstoffer, som kommer ud i det interstellare rum. Det meste er låst inde i de røde hovedseriestjerner, som endnu ikke er nået ud over hovedseriestadiet, samt i stjerneresterne, dvs. i hvide dværgstjerner og neutronstjerner. Den væsentligste kilde til berigelsen er supernova-udbrud af stjerner med store masser. Her strømmer en relativt stor del af de dannede tunge grundstoffer ud i det omgivende rum.

Den beskrevne vekselvirkning mellem stjerner og interstellart stof præger således vor galakses udvikling. Samspillet er i virkeligheden mere indviklet end beskrevet i denne fremstilling. Både udstråling og udstrømmende stof, især fra stjerner med store masser, påvirker det interstellare stofs fordeling i rummet. Interstellare skyer kan gå i opløsning ved sådan påvirkning, og på den anden side kan påvirkningen føre til fortætning af skyer og dermed sætte ny stjernedannelse i gang.

Hertil kommer indvirkningen på de interstellare skyers bevægelser, som skyldes tyngdetiltrækningen fra stjernebefolkningen som helhed. En vis koncentration af skyerne til spiralarme og en generel forøgelse af skyernes tæthed, når de befinder sig i spiralarme, bevirkes herved. Dette fører igen til en stærkere tendens til stjernedannelse ud fra interstellart stof netop i spiralarme, og derved en koncentration af helt unge stjerner i spiralarmene, et fænomen, som er omtalt s. 18.

De i dette afsnit omtalte problemer er naturligvis af betydning ikke blot for vor galakse, men generelt i galaksernes verden.

6. *Udforskningen af galaksernes verden*

Allerede i 1860'erne var det blevet klart, at de himmelobjekter, der ses som lysende tåger, omfatter to vidt forskellige klasser. Spektroskopiske undersøgelser viste da, at tåger som Oriontågen udsender et liniespektrum, medens den art tåger, der i dag betegnes som galakser (f.eks. Andromedatågen), har et kontinuert spektrum gennemtrukket af mørke absorptionslinier i lighed med de allerfleste fiksstjerner. Det måtte antages, at det drejede sig om stjernetaåger, dvs. objekter i hvilke stjernerne ses så tæt ved hinanden, at deres lys flyder sammen til en tågemasse. En af pionererne på dette i 1860'erne og 1870'erne nye forskningsområde var, ved siden af den engelske astronom William Huggins, den første bestyrer af det i 1859 nyoprettede astronomiske observatorium ved Københavns Universitet, H. C. d'Arrest.

Der forløb imidlertid over halvtreds år, før det med sikkerhed blev fastslået, at stjernetaågerne er stjernesystemer af meget store dimensioner, beliggende langt uden for vor egen galakse.

Nytårsdag 1925 forelagdes ved et møde i American Astronomical Society et arbejde af Edwin Hubble, i hvilket det vistest, at der i Andromedatågen, også benævnt Messier 31, samt i endnu en spiraltåge Meisser 33, på astrofotografier optaget med Mt. Wilson-observatoriets 2.5 meter teleskop kunne skelnes enkeltstjerner. Endvidere vistest, at der blandt disse forekom variable stjerner af den på s. 18 omtalte type, nemlig langperiodiske cepheider. Ved den på s. 18 beskrevne fremgangsmåde kunne Hubble bestemme afstanden til de to spiraltåger, og fastslå, at de lå langt udenfor vort stjernesystem. Andromedatågens dimensioner var af nogenlunde samme størrelse som vort eget stjernesystems. Der var ganske givet tale om sideordnede galakser.

Hermed begyndte en udforskning af galaksernes verden, som i løbet af de sidste halvtreds år har ført til resultater af afgørende betydning for det astronomiske verdensbillede.

Ved bestemmelse af *afstande til galakser* har den lige nævnte cepheide-metode været meget vigtig. Indtil nu er afstande blevet fundet ad denne vej for 13 galakser med afstandsværdier op til 10 millioner lysår. Fra disse resultater er man gået videre til fjernere spiralgalakser, idet man også i disse på fotografier har kunnet skelne nogle af de allerstærkest strålende stjerner i galaksen. Antager man nu, at de *allerstærkest strålende stjerner i spiralgalakserne* har samme absolutte lysstyrke, kan man bestemme forholdet mellem afstandene. Fremgangsmåden er i princippet den samme som beskrevet i afsnit 4 vedrørende stjerner i vor egen galakse. I galakseforskningen har man den store fordel, at der ikke finder nævneværdigt lystab sted i rummet mellem galakserne, så at de fotometrisk bestemte afstande ikke skal korrigeres, som det var tilfældet indenfor vor galakse. Den nævnte fremgangsmåde har gjort det muligt at bestemme afstande til spiralgalakser på helt op til 100 millioner lysår, fordi de allerstærkest lysende stjerner i spiralgalakser er mange gange lysstærkere end cepheiderne.

Af særlig betydning er det, at man ad denne vej har kunnet bestemme afstanden til den i afsnit 1 omtalte galaksehob i stjernebilledet Virgo (jfr. tabel 1, s. 4). Nu kunne man for de mange forskellige galaksetyper, som findes i denne rige hob, angive den totale udstråling. Derved sættes man i stand til at gå endnu længere ud i rummet, til andre langt fjernere galaksehobe, idet man bestemte afstandene ved den fotometriske metode. Her viser det sig, at man opnår rimelig nøjagtighed ved at antage, at den stærkest strålende galakse i en rig galaksehob har en karakteristisk total udstråling, ens for alle rige galaksehobe. Således har for galaksehobe afstande beløbende sig til flere milliarder lysår kunnet måles.

Lad os kort resumere fremgangsmåden ved bestemmelse af afstande i rummet. Det begynder, som vi har set i afsnit 4, med afstandsbestemmelse ved den *trigonometriske metode* for de nærmeste stjerner, beliggende indenfor 100 lysår. Ved den *fotometriske metode*, udbygget ved studiet af stjernespektre (jfr. s. 15), måles derefter afstande til stjerner i vor egen galakse op til mange tusind lysår, bl. a. også til åbne stjernehobe (jfr. s. 12). I adskillige åbne stjernehobe findes langperiodiske cepheider, og det betyder, at disses absolutte lysstyrke kan bestemmes i afhængighed af lysvekslingens periode. Derved har man etableret en *standardlyskilde*, som kan anvendes ved bestemmelse af afstande til de nærmeste galakser, således som beskrevet ovenfor i dette afsnit. Herfra går man videre, idet man anvender de *lysstærkeste enkeltstjerner* i spiralgalakser som standardlyskilder ved foto-

metrisk afstandsbestemmelse. Således når man ud til den rige galaksehob i Virgo og kan derved etablere *de galakser, der har stærkest total udstråling, som standardlyskilder*. Derefter kan afstandsbestemmelse til galaksehobe gennemføres ud til afstande på adskillige milliarder lysår.

Er der nu svage led i denne lange kæde? Man må være opmærksom på muligheden, men det skønnes, at den kosmiske afstandsskala i dag er korrekt indenfor 30 procent helt ud til de største målte afstande. Det må dog erindres, at i 1952 førte nye iagttagelser opnået af W. Baade med 5 m-teleskopet på Mount Palomar til en revision af galakseafstande, med fordoblede værdier som resultat. Lignende revisioner for de større galakseafstandes vedkommende fandt sted i 1960'erne.

Vi skal nu kort referere såre vigtige resultater vedrørende *bevægelsesforhold i galaksernes verden*: I årene efter at Hubble havde bestemt afstandene til Andromedatågen og Messier 33 påviste han, at galakserne i vor galakses nærmere omegn bevæger sig bort fra os, og at de pågældende hastigheder er proportionale med afstanden. Påvisningen gennemførtes ved måling af bølgelængder for spektrallinier, som ses i galakseres spektre. Spektrallinierne viste *rødforskydning*, og dette tydedes som en *Doppler-effekt* (jfr. s. 16), dvs. de pågældende galakser måtte bevæge sig bort fra os. Da rødforskydningen viste sig at være proportional med galakseafstanden, formuleredes *Hubble's lov*: Galakserne fjerner sig fra vor galakse med hastigheder, som er proportionale med afstanden fra os.

Det er vigtigt at indse, at det fundne fænomen ingenlunde betyder, at vor galakse er et unikt centrum, hvorfra alle andre galakser fjerner sig. En simpelt geometrisk ræsonnement viser, at *Hubble's lov indebærer, at alle afstandene mellem galakser vokser med tiden*, og at Hubble-fænomenet vil iagttages med en hvilken som helst galakse som udgangspunkt. Der er her tale om et kosmisk fænomen af enorm udstrækning, *universets udvidelse*.

Når alle afstande mellem galakser vokser med tiden, betyder det omvendt, at afstandene aftager, når man følger dem tilbage i tiden. Dette har ført til følgende konklusion: For ca. 15 milliarder år siden befandt alt det stof i universet, der i dag iagttages i galakserne, sig indenfor et meget mindre volumen, og stoftætheden i universet var dengang uhyre meget større end i dag.

Det må understreges, at det kræver komplicerede beregninger at nå frem til dette resultat, idet det er nødvendigt at holde regnskab med galaksehastighedernes forandring under indflydelse af de gensidige tyngdekræfters virkning, og beregningerne må udføres på grundlag af Einstein's almene relativitetsteori. To fundamentale iagttagelsesdata er nødvendige for beregningernes gennemførelser: (1) Man må kende udvidelseshastigheden, udtrykt i kilometer pr. sekund pr. lysårs afstand mellem to betragtede galakser. Den i dag gældende værdi er 20 kilometer pr. sekund pr. million lysårs afstand. Således vil f. eks. en galakse i afstanden 1500 millioner lysår fjerne sig fra vor galakse med en hastighed på 30000 kilometer pr. sekund, eller ca. en tiendedel af lysets hastighed. (2) Man må endvidere kende den gennemsnitlige stoftæthed i universet i dag for at kunne beregne de gensidige tyngdekræfters virkning på udvidelseshastigheden. Resultatet er her, at stoftætheden er så lav, at udvidelseshastighedens ændring med tiden ikke er udpræget, hvorved man når til den slutning, at universets udvidelse vil fortsætte ubegrænset fremover i tiden.

Der er i løbet af de sidste årtier gjort en meget stor indsats både for at fremskaffe relevante iagttagelser og for kritisk at gennemprøve de ræsonnementer, der fører til den slutning, at universet for ca. 15 milliarder år siden havde en helt anden karakter end i dag. Resultatet er, at billedet af det nuværende universums begyndelse for ca. 15 milliarder år siden i en eksplosiv udvidelse fra et universum af meget stor stoftæthed – den såkaldte *Big Bang-teori* – i dag er almindelig godkendt. Adskillige rivaliserende teorier har været fremsat, men de har ikke bestået den prøve, som ligger i konfrontationen med iagttagelserne.

Den russisk-amerikanske fysiker G. Gamow forudsagde på grundlag af Big Bang-teorien, at hele det nuværende univers skulle være gennemtrængt af *mikrobølge-stråling*, dvs. radiobølger i centimeter- og millimeter-området. Da eksistensen af sådan stråling, som rammer jorden fuldstændig ligeligt fra alle sider, blev påvist i 1965 af Penzias og Wilson, betød det en styrkelse af tiltroen til Big Bang-teorien. De sidste års nøjagtige målinger, bl. a. fra satellitbårne radioobservatorier, har vist, at det drejer sig om en overalt tilstedeværende, ganske svag stråling svarende til den, som udsendes fra et homogent udstrakt legeme ved en temperatur af 3° over det absolutte nulpunkt. Denne iagttagelse har været af stor betydning for den videre udformning af Big Bang-teorien.

Hvis man nu går ud fra den universelle gyldighed af Hubble's lov om sammenhængen mellem afstand og rødforskydning, så kan man beregne en galakses afstand, når rødforskydningen er målt, og derved finde afstande, også når bestemmelse efter de i det foregående skitserede metoder ikke har været gennemført. Ad denne vej har man nået vigtige resultater om galakseres fordeling i rummet og specielt vedrørende galaksehobe. I afsnit 1 er omtalt, at galaksernes fordeling i rummet er ujævn i den forstand, at de fleste galakser tilhører mindre eller større galaksehobe. Det blev i afsnit 1 også nævnt, at medens fordelingen i det »små«, over afstande af få millioner lysår, er ujævn, er den jævn over meget store afstande. Hvor store afstande? Her har netop de sidste års forskning på grundlag af målte rødforskydninger af spektrallinier i galakseres spektre givet vigtige resultater.

I afsnit 1 er omtalt Virgo-galaksehoben (jfr. tabel 1, s. 4), beliggende i en afstand af 50 millioner lysår. Denne rige galaksehob har en diameter på lidt over 10 millioner lysår. Undersøgelser baseret på omfattende målinger af rødforskydninger for spektrallinier i galaksespektre og deraf afledede afstande har nu vist, at Virgo-galaksehoben er en udpræget fortætning i et endnu større *superkompleks* af galakser, som tillige indeholder adskillige andre fortætninger, der fremtræder som noget mindre galaksehobe. Dette superkompleks har form som en fladtrykt skive og dets største udstrækning udgør ca. 100 millioner lysår. Ved samme fremgangsmåde er der fundet et antal lignende superkomplekser, beliggende i rummet med indbyrdes afstande på ca. en milliard lysår. Man har derimod ikke fundet tegn på super-superkomplekser, med andre ord, den hierarkiske opbygning fra stjerner til galakser, derfra til galaksehobe og videre til superkomplekser synes ikke at fortsætte. Svaret på det lige omtalte spørgsmål er derfor, at fordelingen af galakser er jævn, når man betragter antallet af galakser i volumener med diametre på nogle tusind millioner lysår.

I de sidste årtier har der været udført intens forskning vedrørende *mangfoldigheden i galaksernes verden*. I afsnit 1 er omtalt forskellige typer af galakser, specielt de to hoved-

typer, nemlig spiralgalakser og elliptiske galakser (jfr. fig. 2, 3 og 4). Til en rig mangfoldighed i former kommer en mangfoldighed i dimensioner: Den største kendte spiralgalakse har en diameter af den optisk lysende del på ca. 600 000 lysår, og på den anden side har man iagttaget elliptiske dværggalakser med diametre på kun nogle få tusind lysår. En lignende mangfoldighed finder man med hensyn til lysudstrålingen. De stærkest strålende spiralgalakser og elliptiske galakser lyser noget over 100 milliarder gange stærkere end solen, og næsten 10 gange stærkere end Andromedagalaksen, eller hele vor egen galakse, medens dværggalakser har lysstyrker mellem 1 million og 100 millioner gange solens. Galaksers masser har i visse tilfælde kunnet bestemmes ud fra målte tyngdevirkninger, f. eks. på galaksens rotationsbevægelse, eller på en nærliggende galakse. Også her er der et meget stort spænd mellem de største galaksemasser, som er nogle gange større end vor galakses, ned til de mindste.

Undersøgelser vedrørende arten af de stjerner og det interstellare stof, som galakserne indeholder, har givet væsentlige resultater. Spiralgalakser som Andromedatågen ligner vor egen galakse derved, at de i spiralarmene indeholder en koncentration af interstellart stof samt af unge stjerner af population I, medens galaksens halo indeholder gamle stjerner af population II (jfr. s. 26). Forholdet mellem massen af interstellart stof og massen af stjernerne er omtrent som i vor galakse. I modsætning hertil indeholder de elliptiske galakser relativt meget mindre interstellart stof og har tilsvarende et forsvindende eller meget ringe indhold af unge stjerner. De elliptiske tåger synes at have nået et udviklingsstadium, hvor omsætningen af interstellart stof til stjerner er løbet næsten tilende.

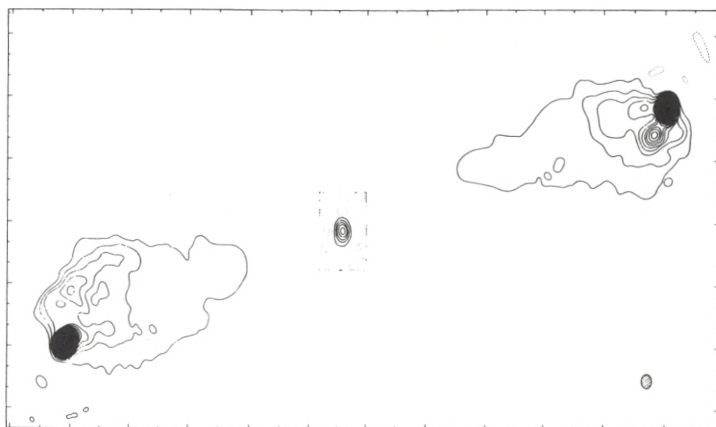
Et meget vigtigt kapitel i galakseforskningen vedrører udsendelsen af radiostråling. I afsnit 4 er omtalt forskellige typer af radiostråling udsendt af det interstellare stof i vor galakse. En iagttagelse, som observerede vor galakse udefra – fra en nabo-galakse – og sammenlignede den totale radiostråling med visse andre galaksers, ville kalde den en *svag radiostråler*. I modsætning hertil finder man i galaksernes verden *stærke radiostrålere*.

I 1954 kendte man omkring hundrede objekter på himlen, som udsendte stråling i radiobølge-området, og disse radiokilders positioner på himlen kunne dengang udmåles med en nøjagtighed på ca. 10 bueminutter. Denne nøjagtighed var tilstrækkelig til, at man kunne identificere enkelte radiokilder med galakser. I dag er radioastronomerne nået langt videre. Ved den interferometerteknik, som er beskrevet på s. 24, kan man kortlægge områder af himlen med hensyn til radiostråling med samme opløsningsevne, som opnås ved astrofotografier for det synlige lys. Radiokilders positioner kan bestemmes med en nøjagtighed på brøkdele af buesekund, dvs. mange tusind gange bedre end i 1954.

Disse enorme fremskridt for den radioastronomiske teknik har ført til den erkendelse, at en ikke ubetydelig brøkdel af de stærkere lysende galakser er stærke radiostrålere, dvs. at udstrålingen i form af radiobølger omfatter energi af nogenlunde samme størrelsesorden som udstrålingen i de kortere bølgelængder.

Fig. 7 viser resultatet af en detaljeret kortlægning af radiostrålingen fra en galakse af denne type. Her, som i talrige lignende tilfælde, ses den optiske galakse i objektets centrum, medens radiostrålingen er koncentreret til to vældige, modsat rettede udløbere. Nøjere analyser har bekræftet det umiddelbare indtryk, at det her drejer sig om virkningen

Fig. 7. En kortlægning af radiostråling (bølgelængde 6 cm) fra radiogalaksen Cygnus A. Radiostrålingen er hovedsagelig koncentreret til to områder (afbildet sorte), der befinder sig i nøjagtigt modsatte retninger omtrent et bue-minut fra galaksens optiske centrum. Herfra udsendes der også radiostråling, dog af langt mindre styrke. Kortlægningen er



foretaget i Cambridge, England, af P. J. Hargrave og M. Ryle med et interferometer bestående af 8 metalspejle anbragt langs en 4,6 km lang linie. Cygnus A har en afstand på 800 millioner lysår, og radiogalaksens største udstrækning er 500 000 lysår.

af en eksplosion i enorm skala, udgående fra den optiske galakses centrum. Mekanismen omfatter udsendelse af højenergi-partikler, hvorved hurtigløbende elektroner, der bevæger sig i et magnetfelt af kæmpemæssig udstrækning, udsender ikke-termisk synkrotronstråling, som beskrevet s. 24.

En særlig type galakse med stærk radiostråling er de såkaldte *kvasarer*. Her udstråler et overordentlig lille volumen – med en diameter på mindre end et lysår – enorme energimængder i form af både radiobølger og optisk, fotograferbart lys samt – som det i de sidste år er blevet påvist – Røntgenstråling. Energistrålingen fra dette lille volumen er betydelig større end fra selv de stærkest strålende galakser, typisk 10–100 gange Andromedagalaksens udstråling.

Kvasarer blev først iagttaget som radiokilder med meget lille diameter, derefter fandt man billeder på astrofotografier i samme positioner. Navnet hidrører fra, at de optiske billeder er næsten som stjerner – »quasi-stellar«. I 1963 viste M. Schmidt på Palomar-observatoriet, at spektret af en kvasar indeholdt emissionslinier af brint, stærkt rødfor-skudt svarende til, at det lysende objekt fjernede sig fra iagttageren med en hastighed på ca. 50 000 kilometer i sekundet. I de følgende år er lignende iagttagelser blevet gjort for en lang række kvasarer, og man er nået til den slutning, at kvasarerne befinder sig i meget store afstande fra vor galakse, og at de har overordentlig stor energiidstråling.

Undersøgelser i de sidste år har i flere tilfælde påvist eksistensen af en konstellation bestående af en kvasar, som befinder sig i centrum af en elliptisk galakse. Kvasaren stråler meget stærkere end den elliptiske galakse, hvorfor påvisning er vanskelig. Det må antages, at en kvasar generelt udgør et overordentlig aktivt centrum i en galakse.

I optisk lys udmærker kvasarerne sig ved, at den kortbølgede del af spektret er meget stærkere end den langbølgede. Dette forhold har ført til opdagelsen af kvasarer, som strå-

ler overordentlig stærkt i optisk lys, men kun svagt i radiobølgeområdet. At det drejer sig om kvasarer, har man kunnet vise ved at undersøge spektrene og påvise stærkt rødforskudt spektrallinier. Det drejer sig også her om objekter i meget store afstande, med en enorm energiudstråling fra et overordentlig lille område – sandsynligvis om stærkt aktive galakse-kerner.

Galakser med stærk radiostråling, af den type som er vist i fig. 7, samt kvasarer er de himmelobjekter, der kan iagttages ud til de største afstande – afstande på milliarder af lysår. Strålingen har bevæget sig fra objekt til iagttageren med lyshastighed, og vi ser derfor disse objekter, *således som de var for milliarder af lysår siden*. Ad iagttagelsens vej er det således muligt at få et indblik i universets udvikling gennem milliarder af år.

Et meget vigtigt resultat er allerede nået ved udnyttelsen af denne mulighed: Enormt aktive galakse-kerner synes at have været et meget hyppigere forekommende fænomen i universet for mange milliarder år siden, end det er i dag.

Vi befinder os her ved den astronomiske forsknings yderste grænser, og det må understreges, at der endnu må herske nogen tvivl om rigtigheden af analysen af iagttagelserne. Især må det nævnes, at man i dag ikke er nået frem til forståelse af den fysiske mekanisme, som muliggør de enorme energiudstrålinger fra aktive galakse-kerner. Alligevel er det ønskeligt at sammenfatte de opnåede enkeltresultater til et helhedsbillede af universets udvikling.

7. Universets udvikling

Ifølge Big Bang-teorien medførte udvidelsen af det volumen, hvori universets stof befandt sig, en enorm reduktion af stoffets tæthed og temperatur i løbet af få sekunder. Ved processer mellem elementarpartiklerne omdannedes stoffet, således at det efter ganske kort tid kom til at bestå ganske overvejende af brint og helium (efter vægt ca. 80 procent brint og ca. 20 procent helium). Denne første drastiske ændring af stoftilstanden fandt sted for ca. 15 milliarder år siden. Udvidelsen fortsatte, og efter ca. 1 million år nåedes et stadium, hvor de fysiske forhold ikke var radikalt forskellige fra dem, der hersker i vor galakses interstellare skyer, med tætheder på nogle hundre brintatomer pr. kubikcentimeter og temperaturer på nogle tusind grader. Teoretiske beregninger har vist, at hvis der i dette stadium fandtes små ujævnheder i stoffets fordeling, så ville disse under den følgende ekspansion vokse til store ujævnheder. Derved opdeltes stoffet i store enheder, som ved den følgende udvikling blev til de i forrige afsnit omtalte superkomplekser. Inden for hvert superkompleks dannedes fortætninger, de senere galaksehobe, og en videre opdeling af stoffet fandt sted med dannelse af galakser til følge. Ved de beskrevne opdelinger af stoffet og dannelsen af galakser *vender udviklingen*, idet den universelle ekspansion afløses af en sammentrækning af stoffet i de enheder, der har skilt sig ud, og som udvikler sig til galakser. Fra nu af har i hver enkelt galakse tiltrækningskræfterne efter Newtons tyngdelov

overtaget. Dette finder sted nogle få milliarder år efter den oprindelige ekspansions start. I det tidlige stadium af denne fase er galakser med stærkt aktive kerner hyppigt forekommende. Mangfoldigheden i galaksernes verden skyldes dels, at de pågældende enheder har forskellige masser og tillige forskellige rotationsmomenter, dels at hver galakseenhed i den senere galaksebob udsættes for forskellige påvirkninger fra nabo-enheder.

Indenfor hver enkelt galakse sker der nu en udvikling, hvorved interstellært stof gradvis omdannes til stjerner med en kemisk udvikling af galakserne til følge, alt således som beskrevet for vor galakses vedkommende i afsnit 5. Denne udvikling forløber med ulige hastighed i forskellige typer af galakser, og i elliptiske galakser er den i den nuværende udviklingsfase næsten løbet tilende.

Efter det omtalte vendepunkt i udviklingen dannes i galakserne stadig flere stjerne rester (hvide dværgstjerner og neutronstjerner) med *uhyre store tætheder*, medens samtidig alle galakser som følge af universets fortsatte udvidelse fjerner sig fra hinanden, hvorved den *uhyre ringe stof tæthed* i universet som helhed bliver stadig mindre.

Det beskrevne helhedsbillede er forment væsentlig på grundlag af forskningsresultater opnået gennem de sidste halvtreds år. De næste halvtreds års fremskridt vil sandsynligvis medføre ændringer i billedet, men væsentlige træk vil nok finde fuld bekræftelse.



Fig. 8. Et landskab på planeten Mars fotograferet fra en landet Vikingsatellit. En del af satelliten ses i forgrunden. Billedet bringes for at minde om de meget store fremskridt i kendskabet til solsystemets planeter og måner, som rumforskningen har bragt, men som ikke er omtalt i den foreliggende fremstilling (jfr. s. 4). De resultater, der her er opnået, har allerede bidraget til opklaring af nogle af de mange problemer vedrørende planeternes og månernes dannelse.

Litteraturhenvisninger

Tidsskriftet *Naturens Verden* bringer artikler om astronomi. Fra de senere år kan nævnes:
Richard M. West: Det ny verdensrum, I-VI, 1973 s. 209, 309, 401 og 1974 s. 20, 41, 107.
Erik Zeuthen: Fra stjernestøv til liv, 1973 s. 354.
Per Kjærgaard Rasmussen og Ole Ulfbeck: Scenerier fra universets drejebog, 1977 s. 185.
Richard M. West: Voyager fotograferer Jupiter og dens måner, 1979 s. 139.

Af artikler i *Astronomisk Tidsskrift* skal her nævnes:

Ib Lundgaard Rasmussen: Studier af den galaktiske partikelstråling, 1978 s. 6.
Bengt Strömgren: Galaksernes udvikling i det ekspanderende univers, 1978 s. 69.
Poul Erik Nissen: Rumteleskopet, 1979 s. 149.
Kjeld Gyldenkerne: Kosmisk gammastråling, 1980 s. 20.

Endvidere:

Henning Jørgensen (udg.): *Astronomi*. København 1979. 495 s.

Grundvidenskaben i dag er navnet på en række af 30 foredrag, som Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab afholdt i 1976–79. Fremtrædende forskere, hovedsagelig medlemmer af Selskabet, søgte ved at fortælle om udviklingen i den sidste menneskealder inden for de forskellige videnskabsgrene at bidrage til større forståelse af den forskning, der ikke direkte stiler mod praktisk anvendelse, men mod forøget indsigt i sammenhængen i verden.

Pjeceserien bygger på disse foredrag. Fremstillingen er gjort så almen, at de enkelte hæfter kan tjene som udgangspunkt for videre beskæftigelse med de behandlede fag og emner. Hertil hjælper også omfattende litteraturhenvisninger.

Foredragene udgives i 30 hæfter (3 bind). De 20 første er udsendt 1977–80 med titelark i hæfte 10 og 20. Nu foreligger de nedennævnte hæfter, incl. begyndelsen af 3. bind. Prisen incl. 20,25 % moms er kr. 13,10, fra nr. 11 dog kr. 14,25. Hæfterne kan købes i boghandelen, eller man kan få dem tilsendt fortløbende og portofrit ved at abonnere hos Folkeuniversitetet i København.

1. Mogens Pihl: Hvad er grundvidenskab?
2. Erling Bjøl: Politik som videnskab.
3. Søren Egerod: Det fjerne Østens sprog – sammenhænge og påvirkninger.
4. C. Møller: Omvæltninger i fysikernes tankesæt i vort århundrede.
5. Arne Noe-Nygaard: Jordens nye ansigt.
6. Olaf Pedersen: De eksakte videnskabers historie.
7. P. Nørregaard Rasmussen: Økonomisk vækst.
8. Erik A. Nielsen: Hvad kan litteraturvidenskaben?
9. Ingmar Bengtson: Musikvidenskab – nu og i fremtiden.
10. Ole Maaløe: Biologiens molekylære grundlag.
11. Bernhard Gomard: Retsvidenskabens opgaver og særpræg.
12. C. Overgaard Nielsen: Økologi som grundvidenskab.
13. Arild Hvidtfeldt: Religionssociologiens plads blandt humaniora.
14. H. H. Ussing: Om årsagerne til elektriske fænomener i levende organismer.
15. Niels Thomsen: Historiske opinionsstudier.
16. I. K. Moustgaard: Psykologien som eksperimentalvidenskab.
17. Werner Fenchel: Om matematikkens begreber og metoder.
18. Arne Strid: Evolution – det moderne syn på tilpasning og artsdannelse.
19. Morten Simonsen: Den biologiske skellen mellem eget og fremmed.
20. C. Barker Jørgensen: Dyrenes og årstidernes vekslen.
21. Fredrik Barth: Sosialantropologien som grunnvitenskap.
22. C. J. Becker: Hvad sker der i dansk arkæologi?
23. Erik Fischer: Om kunsthistorie.
24. Allan R. Mackintosh: Fra kaos til orden – faststoffysik i det tyvende årh.
25. Bengt Strömgren: Astronomiens udvikling i de sidste halvtreds år.