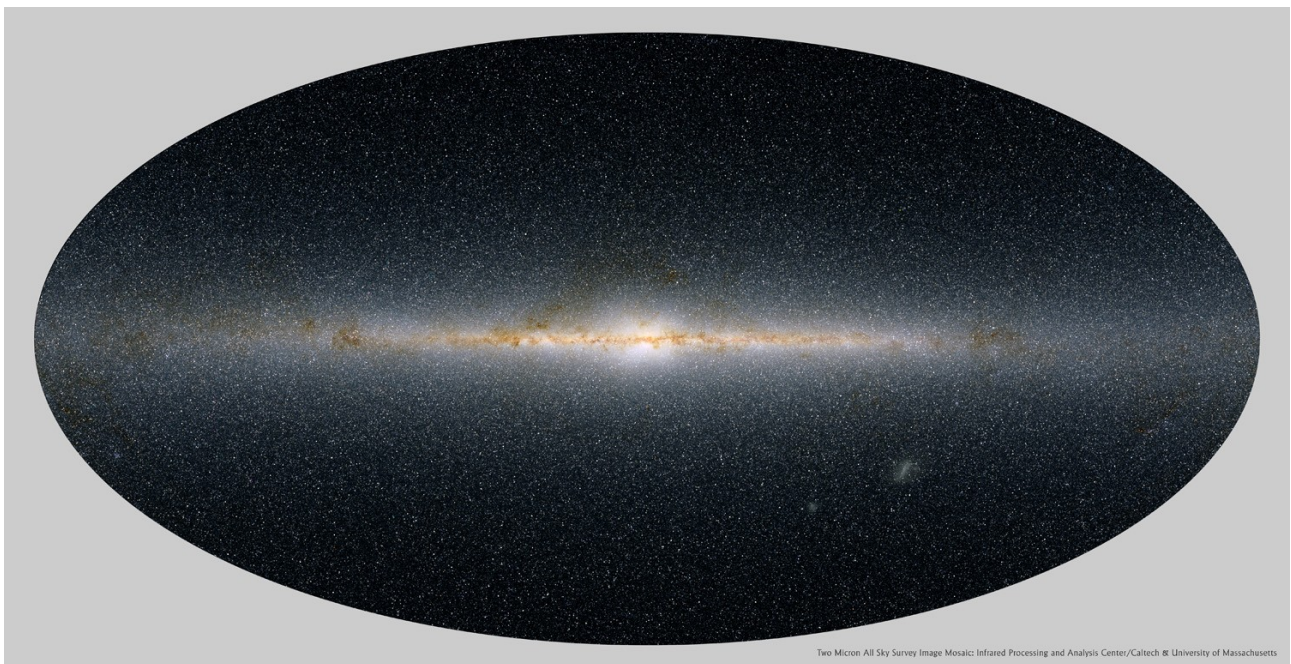


Mælkevejen

og andre galakser



Figur 1: Mælkevejen målt ved bølgelængden 2 μm . [1]

Af Michael Andrew Dolan Møller
Redigeret juni 2026

Indholdsfortegnelse

1 Mælkevejen.....	3
1.1 Introduktion.....	3
1.2 Mælkevejens opbygning.....	3
1.2.1 Skivepopulationerne.....	5
1.2.2 Kernen.....	7
1.2.3 Øvelse – massen af et sort hul.....	8
1.2.4 Den ydre halo.....	8
1.2.5 Mørkt stof-haloen.....	9
1.2.6 Opsamling på Mælkevejens struktur.....	12
1.3 Solens plads i Mælkevejen.....	14
1.4 Fremmede planetsystemer.....	14
1.5 Mælkevejens dannelse og udvikling.....	14
1.5.1 Begyndelsen.....	14
1.5.2 Eksempel - masse af kollapsende gassky.....	14
2 Andre galakser.....	15
2.1 Spiral-, ellipse- og irregulære galakser.....	15
3 Dannelse af de forskellige typer galakser.....	18
3.1 S-galakser.....	18
3.2 E-galakser.....	18
3.3 Irregulære galakser.....	19
4 Galaksters udvikling og deres placering i hobe.....	19
4.1 Galaksehobe.....	20
5 Sammenfatning.....	21
6 Opgaver.....	22
6.1 Målinger på M51.....	22
6.2 Afstanden til SMC.....	23
6.3 Klassificer galakser.....	23
6.4 Mælkevejens rotationskurve.....	23
6.5 Andromedagalaksens inklinations og rotationskurve.....	24
6.6 5.6. Spiralgalaksen NGC 7083s masse.....	24
6.7 Densitetsprofil af galakse.....	24
7 Bilag 1.....	25
8 Bilag 2.....	26
9 Bilag 3.....	27
10 Referencer.....	28

1 Mælkevejen

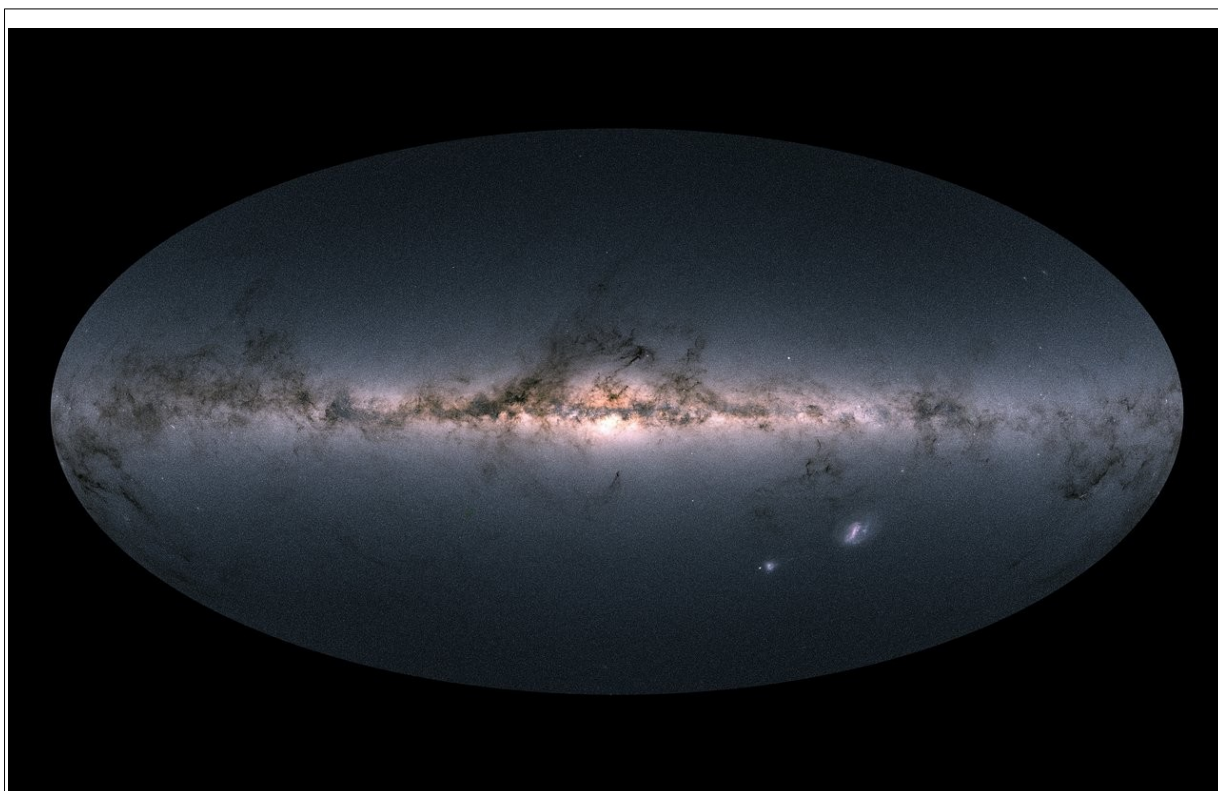
1.1 Introduktion

I denne note vil vi gennemgå opbygningen af vor egen *galakse* Mælkevejen, og derefter vil vi undersøge andre galakser.

En galakse er en enorm samling af stjerner, der er gravitationelt bundne; det vil sige at gravitationskræfter holder stjernerne bundet fast til systemet.

Galakser kan indeholde mellem ca. 1 milliard og 1 billion stjerner, og galaksers udseender kan være ganske forskellige. Nogle galakser er spiral- eller linseformede, andre er 1-aksede, dvs. runde som en bold og der findes endda 2-aksede (oblate) og 3-aksede legemer. Endelig findes der irregulære galakser, som ikke har en ”pæn” form.

1.2 Mælkevejens opbygning



Figur 2: Mælkevejen, som GAIA-teleskopet har optaget det. Vi ser ind på siden af Mælkevejen. Der er ”kun” 1,7 milliarder stjerner på dette billede. [2]

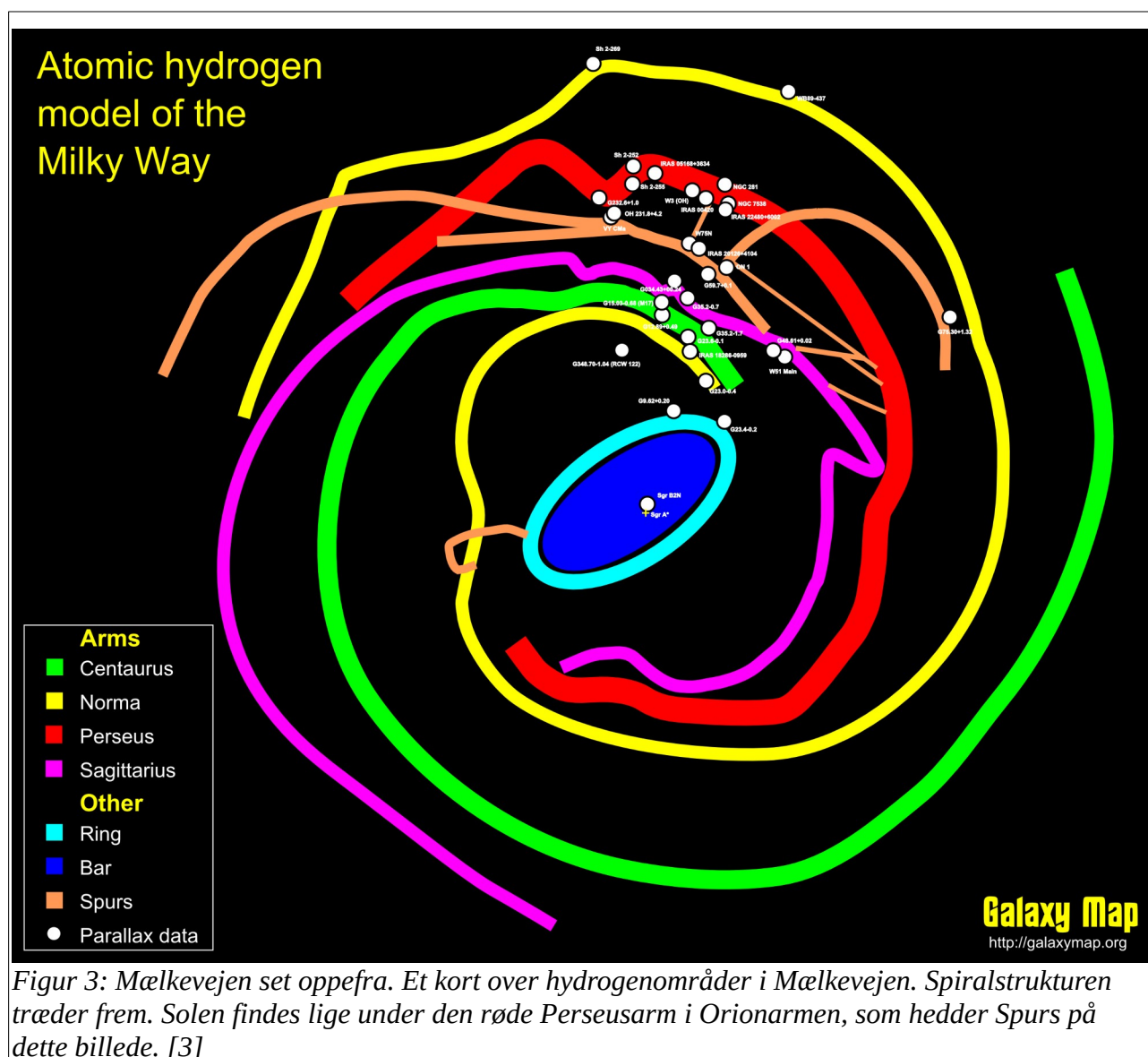
Mælkevejen er en såkaldt *spiralgalakse*. Vi kan ikke se spiralstrukturen særlig godt, da vi bor nede i Mælkevejens flade skive, hvor støv spærrer for en del af stjernernes synlige lys. Figur 2 viser et tværsnit af Mælkevejen. Billedet er taget fra et rumteleskop.

Hvis man måler på 21 cm-linjen fra hydrogen, som findes i rigelige mængder i skiven, kan man finde både placering og afstand til brintskyerne. Her træder spiralstrukturen frem, som figur 3 viser.

Mælkevejen består altså af en skive men der findes også en kerne, en halopopulation samt en fordeling af såkaldt mørkt stof. Det skal vi undersøge nærmere på de følgende sider.

Skiven er nok den mest kendte del af Mælkevejen, da vi kan se et lille udsnit af nogle af dens spiralarme på nattehimmelen. På plastikstjernekortet er armene markeret som et lyseblåt bånd. Disse spiralarme er mere lysende end omgivelserne, fordi der er flere stjerner i armene, og det er derfra Mælkevejen har fået sit navn – og galakser har også fået deres navn derfra, da *galaxias* betyder mælkevej på græsk.

Har du et stjernekort kan du se, at stjernebillederne *Kusken*, *Perseus*, *Cassiopeia*, *Cepheus*, *Svanen*, *Ørnen* og *Skytten* alle ligger i Mælkevejsstriben.



En anden model af Mælkevejen er vist på figur 4.

1.2.1 Skivepopulationerne

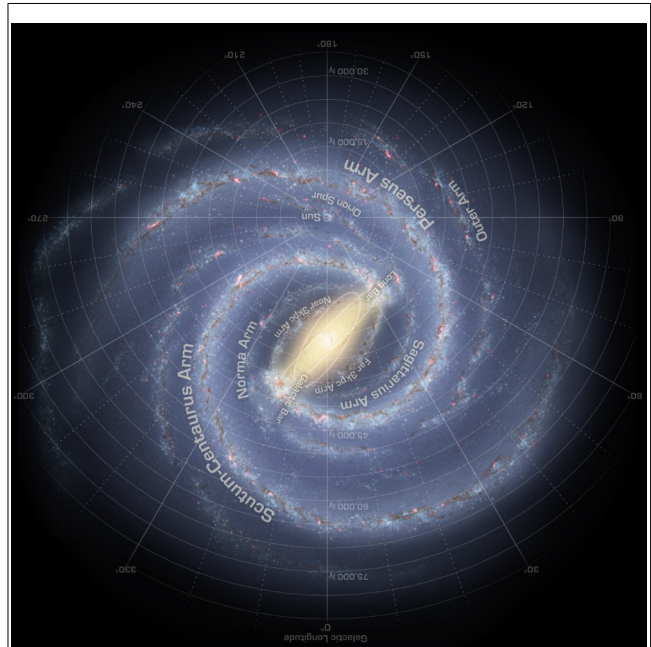
Skiven består af 2 dele, en tyk skive og en tynd skive. Overordnet set aftager stjernetætheden, fra centrum af skiven og vinkelret derpå, eksponentielt og med skalahøjder¹ på henholdsvis ca. 1 kpc (1 kpc = 3260 lysår) og 249 pc. Stjernerne bevæger sig næsten i cirkelbaner rundt omkring Mælkevejens centrum overlejret med en oscillerende bevægelse op og ned i skiven. Et omløb tager for Solens vedkommende ca. 230 Myr.

Stjernetætheden for skivens 2 dele som funktion af afstanden z fra skivens plan i vores afstand fra centrum er givet som følger, hvor ν er en normaliseret stjernetæthed

$$\nu = \frac{\varrho_0(z)}{\varrho_0(0)} = 0,959 \cdot e^{-\frac{z}{249 \text{ pc}}} + 0,041 \cdot e^{-\frac{z}{1000 \text{ pc}}} \quad (1)$$

Ovenfor kan man se to skalahøjder, hvor den første værdi gælder for den tynde del af skiven, og den anden værdi gælder for den tykke skivedel. Dvs. Mælkevejsskiven er omtrent 2-3000 pc tyk. Man ser også af funktionen, at den tynde skive har den højeste stjernetæthed. Det er i denne skivekomponent, man finder Solen. [5, p. 27] Der er ca $50 \text{ GM}_\odot$ i den tynde skive, og ca. $5 \text{ GM}_\odot$ i den tykke skive. [6, p. 55]

Den radiale fordeling, dvs. målt fra Mælkevejens centrum og ud i skiven, aftager også eksponentielt, og skala-afstanden er ca. 5 kpc. Den tykke skive roterer med en fart på ca. 175 km/s, dvs. den roterer lidt langsommere end den tynde skive, som roterer som Solen med en fart på 227 km/s. [7] En løs model af stjernetætheden af den tykke disk som funktion af højden, z , over galaksens plan og afstanden fra centrum, R , ser ud som følger



Figur 4: Tegning af Mælkevejen, og denne gang med et passende koordinatsystem indtegnet. [4]

$$\nu(R, z) \propto e^{-\frac{z}{h_{z,td}}} e^{-\frac{R}{h_{R,td}}} \quad (2)$$

hvor $h_{z,td} = 1,0 \text{ kpc}$ og $h_{R,td} = 4 \pm 1 \text{ kpc}$. [5, p. 35]

Ud fra den radiale skalahøjde, kan man se, at Mælkevejsskiven er omtrent 13-20 kpc i radius. Solens afstand fra centrum af galaksen er 7,9 kpc. [7]

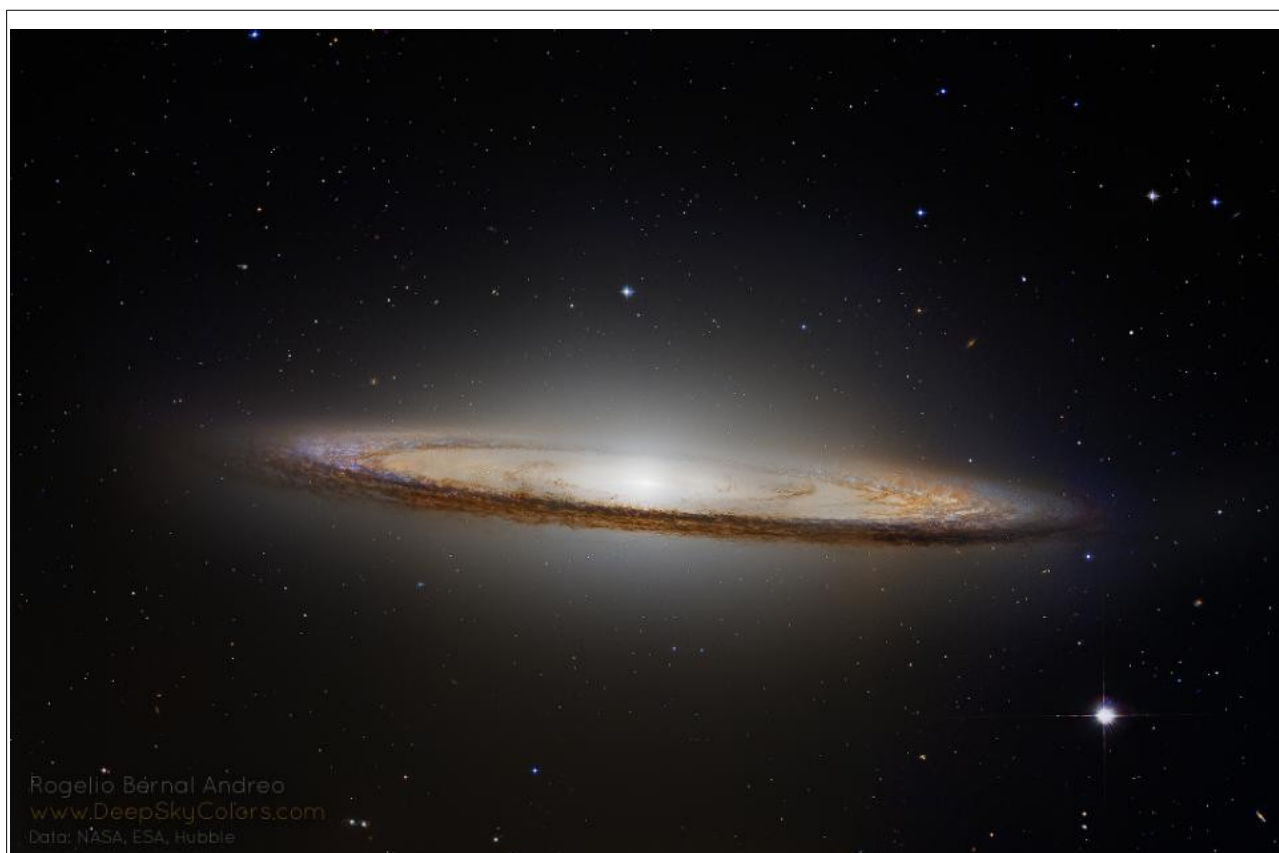
De to skiver er ikke helt ens mht. grundstofsammensætning. For den tynde skive gælder, at stjernernes grundstofsammensætning er meget lig Solens, dvs. det er population I-stjerner; dog er indholdet af tungere grundstoffer stigende, jo længere man kommer ind mod kernen. Stjernernes aldre går fra stjerner, der er ved at blive dannet, til stjerner, der er ligeså gamle som Mælkevejen. (Mælkevejen er mindst 10 Gyr gammel.)

¹ En skalahøjde er et mål for hvornår stjernetætheden er faldet til $1/e$, hvor $e = 2,718...$ Tallet kaldes *Eulers tal*.

I den tykke skivepopulation er stjernerne primært population II-stjerner, dvs. metalfattige stjerner. (Under $\frac{1}{4}$ af Solens indhold af tungere grundstoffer.) Derudover er de også meget gamle, dvs. væsentligt ældre end Solens 4,5 milliarder år. Det er muligt, at den tykke skive er en fortsættelse af den tynde skive, og hvis denne antagelse er korrekt, er det nødvendigt, at den tynde skive er blevet kraftig påvirket i en fjern fortid. Dette kunne for eksempel være i form af en stavformet struktur. [5, p. 35-36]

Skivens form minder om en samlelinse, men hvis man ser på den ovenfra, vil man se, at der ikke er tale om en homogen skive, men nærmere om et sæt spiralarme, som figur 3 og 4 også viser. Armene består af relativt nydannede og store stjerner, og det er disse nydannede stjerner, der lyser op som spiralarme – der er dog *også* stjerner i de mørke områder i skiven, men de lyser ikke ligeså kraftigt, som de store stjerner. Numeriske beregninger viser, at spiralarme for eksempel dannes, når en lille dværggalakse absorberes af Mælkevejen.

Vi kan ikke i praksis rejse væk fra skiven og betragte Mælkevejen udefra, så vi må i stedet for observere stjernerne i Mælkevejen indefra og derefter modellere den overordnede struktur ud fra observationerne. Dette er forbundet med visse vanskeligheder. For eksempel er der meget gas og støv i skiven, og som figur 5 viser, absorberes meget lys fra dette materiale. Derfor er det yderst svært at se mere end nogle få kpc i skiven. Heldigvis kan infrarødt lys slippe forbi støvet, hvilket alligevel gør det muligt at konstatere, at Mælkevejen faktisk er en spiralgalakse. Se figur 1 og 2 for billeder af Mælkevejen og figur 3 og 4 for modeller set oppefra.



Figur 5: Sombrerogalaksen, M104. Læg mærke til støvbåndene som findes i skiven, og som forhindrer en observatør i skiven i at observere med synligt lys, hvis man vil se over større afstande gennem skiven. [8]

1.2.2 Kernen

Omkring centeret af Mælkevejen findes en kugleformet kerne, hvis masse er ca. $10\text{ }GM_{\odot}$, samt et sort hul. [6, p. 55] Dette sorte hul har en masse på $4 \cdot 10^6\text{ }M_{\odot}$. Se figur 7 for et billede hullets omgivelser.

Observationerne tyder på, at stjernetætheden i kernen beskrives bedst ved en potensfunktion af formen

$$\nu(R) \propto R^{-1,8}, \text{ for } R \leq 1\text{ kpc} \quad (3)$$

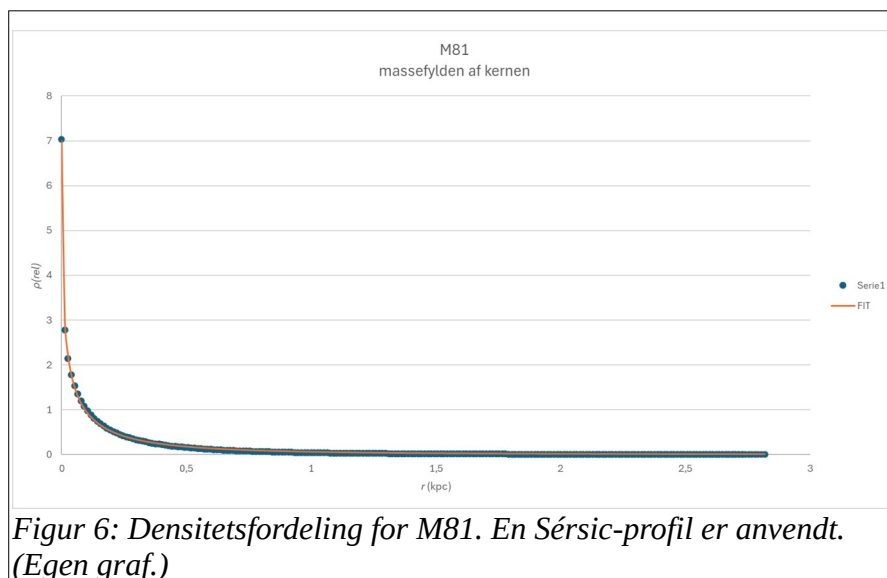
Den kemiske sammensætning viser, at stjernerne i galaksekernen har et indhold af tungere grundstoffer end helium på ca. det dobbelte af Solens. [5, p. 51]

I området 1-3 kpc er det endnu ikke lykkedes at finde en forskrift for stjernetætheden. Stjernerne er gamle i dette område, dvs. især population II-stjerner. [5, p. 32]

Kernen ligger i retningen af *Skytten (Sagittarius)*, hvis koordinater er $(\alpha, \delta) = (17^{\text{h}}42^{\text{m}}29,5^{\text{s}}; -28^{\circ}59'20'')$.

Hvis man betragter andre spiralgalakser, så følger den rumlige stjernetæthed en såkaldt *Sérsic-profil* med indeks $n = 2,8$. F. eks. ser tætheden for M81 ud som vist på figur 6. Forskriften for densiteten er

$$\nu(r) = \frac{\varrho(r)}{\varrho_0} = \exp\left(-5,33 \cdot \left(\frac{r}{1,211}\right)^{1/2,831}\right) \quad (4)$$



Figur 6: Densitetsfordeling for M81. En Sérsic-profil er anvendt. (Egen graf.)

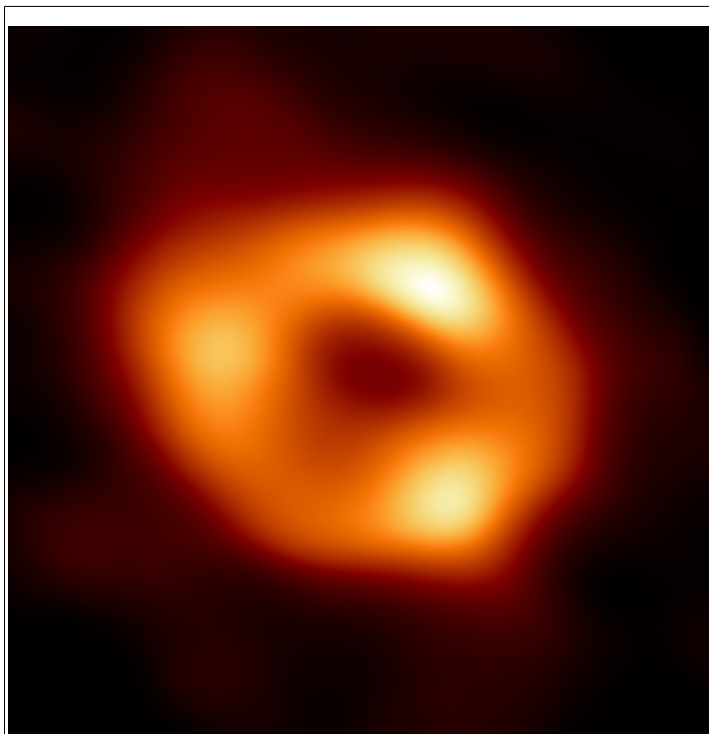
For galakserne M51, M81, NGC 772 og NGC 7582 passer funktioner af samme type som formel 4 ret godt; og det endda på trods af at M51 har en nabogalakse, der forstyrrer kernen og NGC 7582 er en såkaldt *Seyfert type 2*-galakse, som betyder, at den har en kraftig lysudsendelse fra kernen. (Tallet under r varierer dog for galakserne, og det gør ρ_0 også.)

Derfor er det nærliggende at antage, at Mælkevejens kerne også kan beskrives af samme type funktion.

1.2.3 Øvelse – massen af et sort hul

- Kopier billedet fra figur 7 ind i *AstroImageJ* og mål diameteren af det lysende område med linealværktøjet. (Mål fra midt-til-midt af ringen.) Hvis du ikke kan se billedet, så tryk på *Contrast* og vælg *Auto Brightness & Contrast*. Genindlæs billedet.
- I hovedmenuen skal du vælge *Analyze-Set Scale* og skrive 51.8 i boksen *Known Distance*.
- Mål nu radius af det sorte hul og omregn det til radianer.
- Beregn radius i m. Denne radius er *fotonradius*, der svarer til 1,5 schwarzschildradier.
- Omregn til schwarzschildradius.
- Beregn det sorte huls masse.

-o-



Figur 7: Et billede af omgivelserne omkring det sorte hul i midten af Mælkevejen. Det lysende område er en tilvækstskive af gas, der omkranser det sorte hul, som vi naturligvis ikke kan se direkte. [9] Diameteren af den lysende gassky er 51,8 mikrobuesekunder. [10]

1.2.4 Den ydre halo

Rundt om hele skive/kernesystemet ligger en sfærisk symmetrisk halo. Haloen består af en masse kuglehobe, som er kugleformede samlinger af gamle population II-stjerner, der har et ganske lille indhold af tungere grundstoffer, dvs. $Z < 0,002$. Til sammenligning er $Z_{\odot} = 0,0148$. [11] Stjernerne er gravitationelt bundne til hinanden, og en kuglehob er en stabil konfiguration. I en kuglehob er der omtrent 10^5 - 10^7 stjerner. Figur 8 viser hvordan, en kuglehob ser ud. Derudover er der i haloen ca. 100 gange flere feltstjerner end kuglehobe. Feltstjernerne er enlige stjerner spredt rundt omkring galaksen. Kuglehobene er de ældste dele af Mælkevejen, dvs. de er mange milliarder år gamle, måske helt op til 12 milliarder år.

Kuglehobene ligger jævnt fordelt rundt om kernen og de inddeles i 2 typer – halohobe og diskhobe. Halohobene har en stjernetæthedsfordeling, der beskrives som en potensfunktion med eksponenten $-3,5$, og hobene roterer ikke omkring Mælkevejens centrum. Inde i selve kuglehobene bevæger stjernerne sig tilfældigt rundt mellem hinanden.



Figur 8: Kuglehoben M13 i stjernebilledet Herkules. [12]

Diskhobene beskrives ved en stjernetæthedsfunktion, der er mindre stejl end for halohobene, dvs. eksponenten i loven ligger lidt tættere på 0 end -3,5. Derudover er indholdet af tungere grundstoffer i diskhobene lidt højere end for halohobene, men dog stadigvæk meget mindre end for population I-stjerner. Diskhobene roterer også rundt om Mælkevejens centrum, selvom rotationshastigheden kun er ca. $\frac{1}{2}$ så stor, som for skivestjernerne. [5, p. 55f] (For Solens vedkommende er rotationshastigheden omtrent 227 km/s. [7])

1.2.5 Mørkt stof-haloen

Rotationskurver viser, at der 'mangler' masse i Mælkevejen. I Opgaven *Mælkevejens Rotationskurve* [13] måles og fortolkes en rotationskurve fra Mælkevejens centrum og ud til Solen. På figur 9 er vist en rotationskurve målt med et skoleteleskop. Hvis man måler ud til mere end dobbelt så stor afstand end vist på grafen, er rotationshastigheden ca. den samme som grafens maksimalværdi, dvs. grafen bliver næsten vandret.

Hvis man betragter al det lys, der er på nattehimmelen, kan man anslå hvor meget synligt stof, der er i Mælkevejen. Det ser ud som, at det meste stof ligger inden for Solens bane.

Eftersom stof (og energi) påvirker legemer med gravitationskræfter, er det muligt at beregne hvordan skivestjernernes rotationshastighed bør være. Vi benytter os af Keplers 3. lov og antager cirkelbevægelse for skivestjernerne. Dvs.

$$\frac{r^3}{T^2} = \frac{G \cdot M(r)}{4 \cdot \pi^2} \wedge v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T} \quad (5)$$

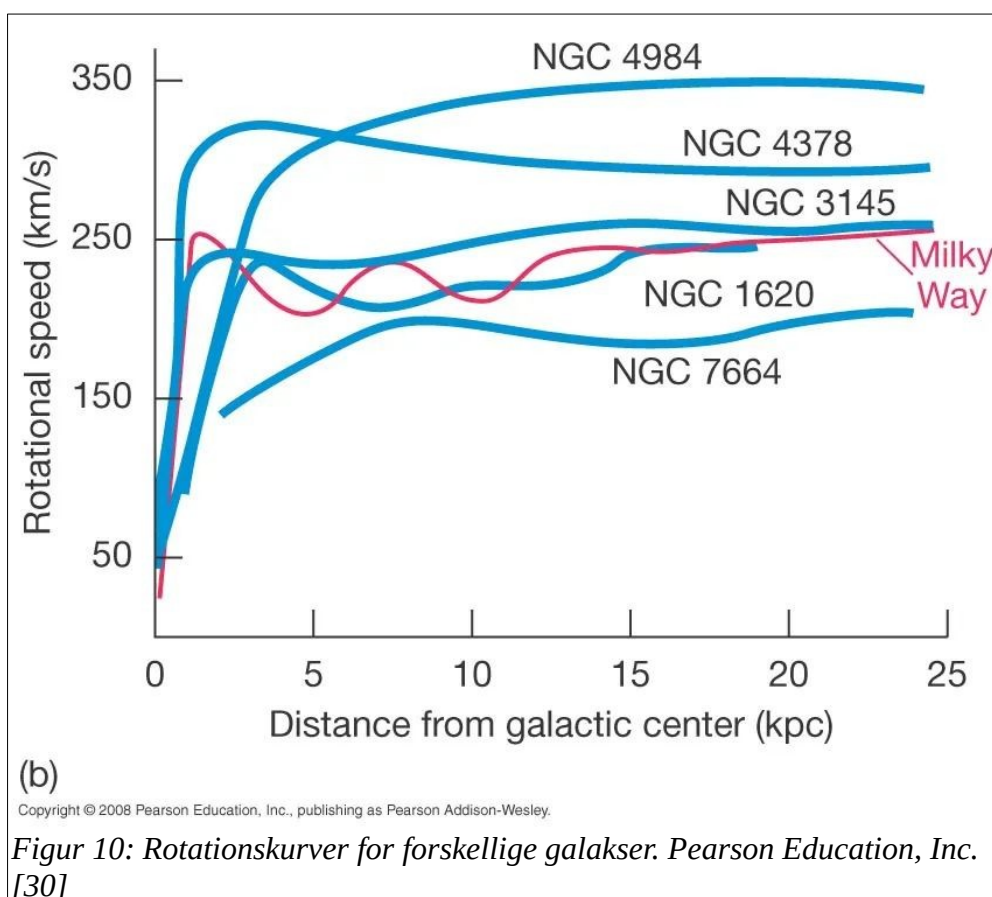
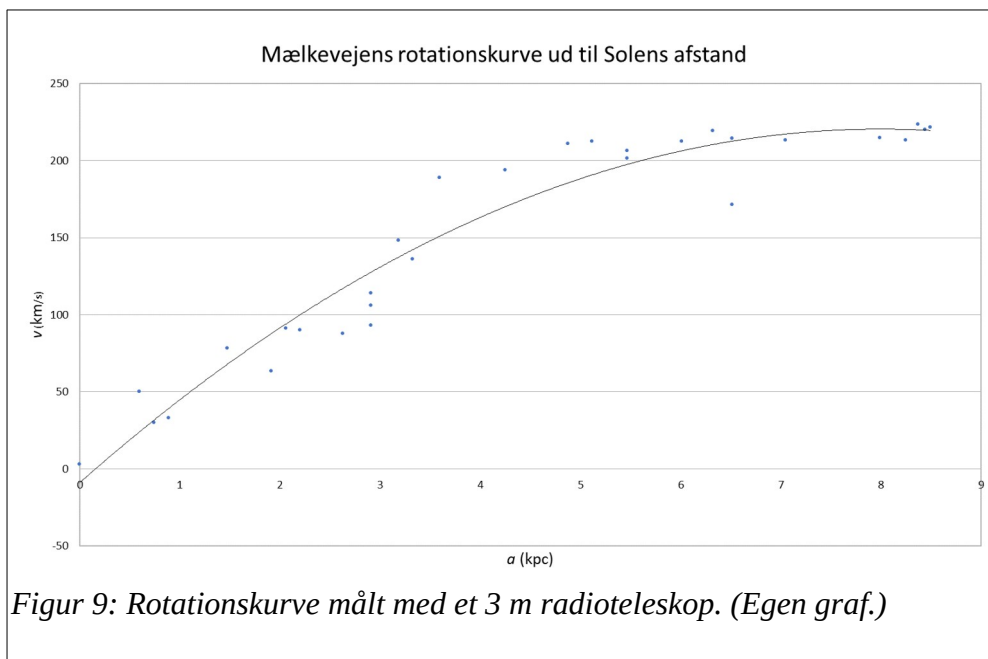
Hvis vi bortsubstituerer omløbstiden, T , i formlerne 5 får vi

$$v(r) = \sqrt{\frac{G \cdot M(r)}{r}} \quad (6)$$

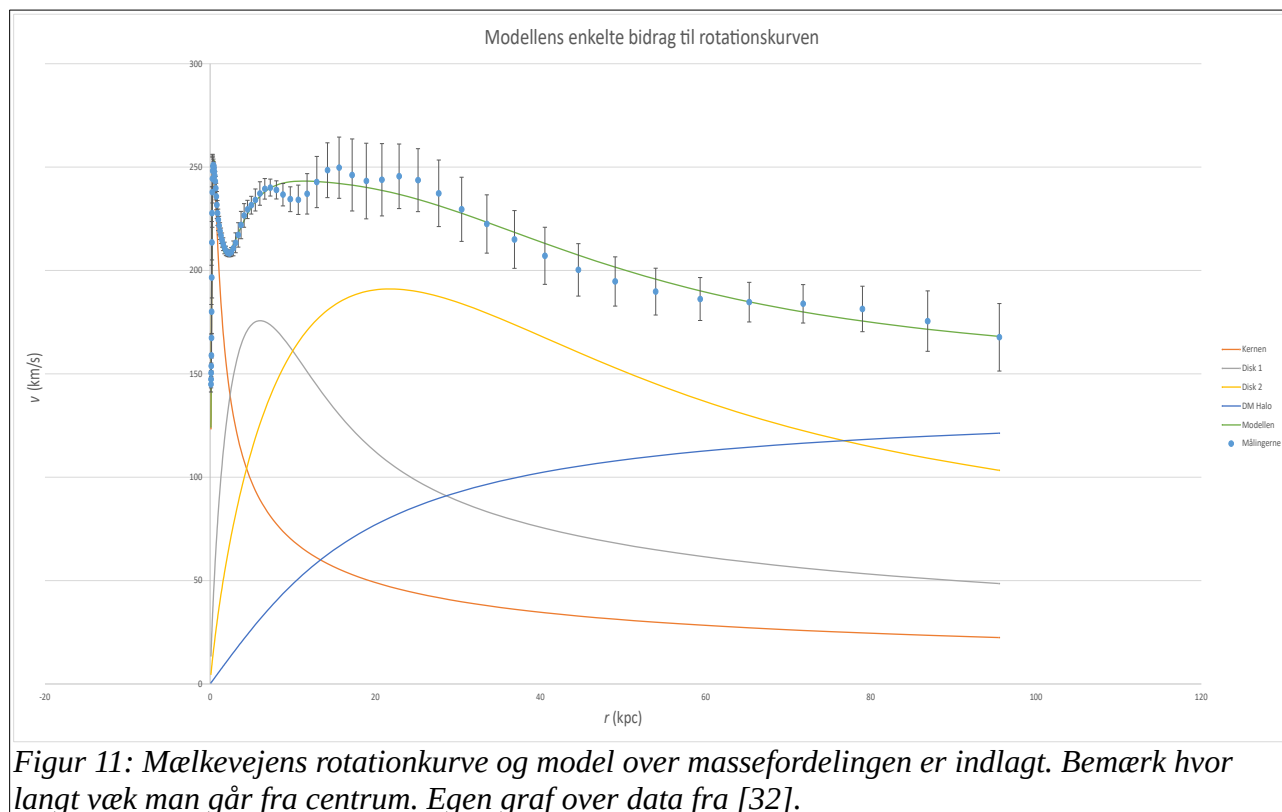
Hvis vi måler hastigheden $v(r)$ for Mælkevejen og andre spiralgalakser ser vi, at grafen efter galaksekerneområdet *ikke* aftager som funktionen viser i formel (6). Faktisk viser figurerne 9 og 10, at hastigheden forbliver konstant, når vi når ud til afstande større end ca. 4-5 kpc.

Hvis hastigheden er konstant, som funktion af afstanden, r , må det betyde, at massen afhænger ligefrem proportionalt med r . Men der er næsten intet lys at observere for afstande større end ca. 15 kpc, og det viser sig, at der ikke er væsentlige mængder neutral gas eller lignende for afstande større end 15 kpc. Det er altså noget ukendt stof i disse afstande, og vi kalder det i mangel af bedre for *mørkt stof*. (Usynligt stof er egentligt en bedre betegnelse.) Forslag til, hvad mørkt stof er lavet af, er f. eks. neutrinoer, brune dværge, planeter, WIMPs² eller noget helt femte. På figur 10 er vist rotationskurver for andre spiralgalakser. De ser tilsyneladende ret ens ud.

² WIMP betyder Weakly Interacting Massive Particle, som er en partikel, der vejer mange gange protones masse.



Betragt figur 11. Her er vist en rotationskurve for Mælkevejen ud til store afstande. Den grønne kurve er en teoretisk tilpasning til målingerne. Jeg har forsøgt at tilpasse modellen, så den passer med målingerne for store afstande.



Figur 11: Mælkevejens rotationkurve og model over massefordelingen er indlagt. Bemærk hvor langt væk man går fra centrum. Egen graf over data fra [32].

For afstande mindre end ca. 20 kpc er der derfor en del afvigelser mellem model og målinger. Problemet med at få fittet til at passe med målingerne for små afstande skyldes muligvis, at modellen ikke tager højde for den asymmetri, som opstår, fordi Mælkevejen har en stav i kernen. (Se figur 3.)

Modelparametrene giver, at der er en kerne, som har massen $11 \text{ } GM_{\text{sol}}$, to skivepopulationer som har masserne $52 \text{ } GM_{\text{sol}}$ og $222 \text{ } GM_{\text{sol}}$ og en mørkt stof halo med en masse på $327 \text{ } GM_{\text{sol}}$. Dvs. Mælkevejens samlede masse er ifølge modellen $612 \text{ } GM_{\text{sol}}$.

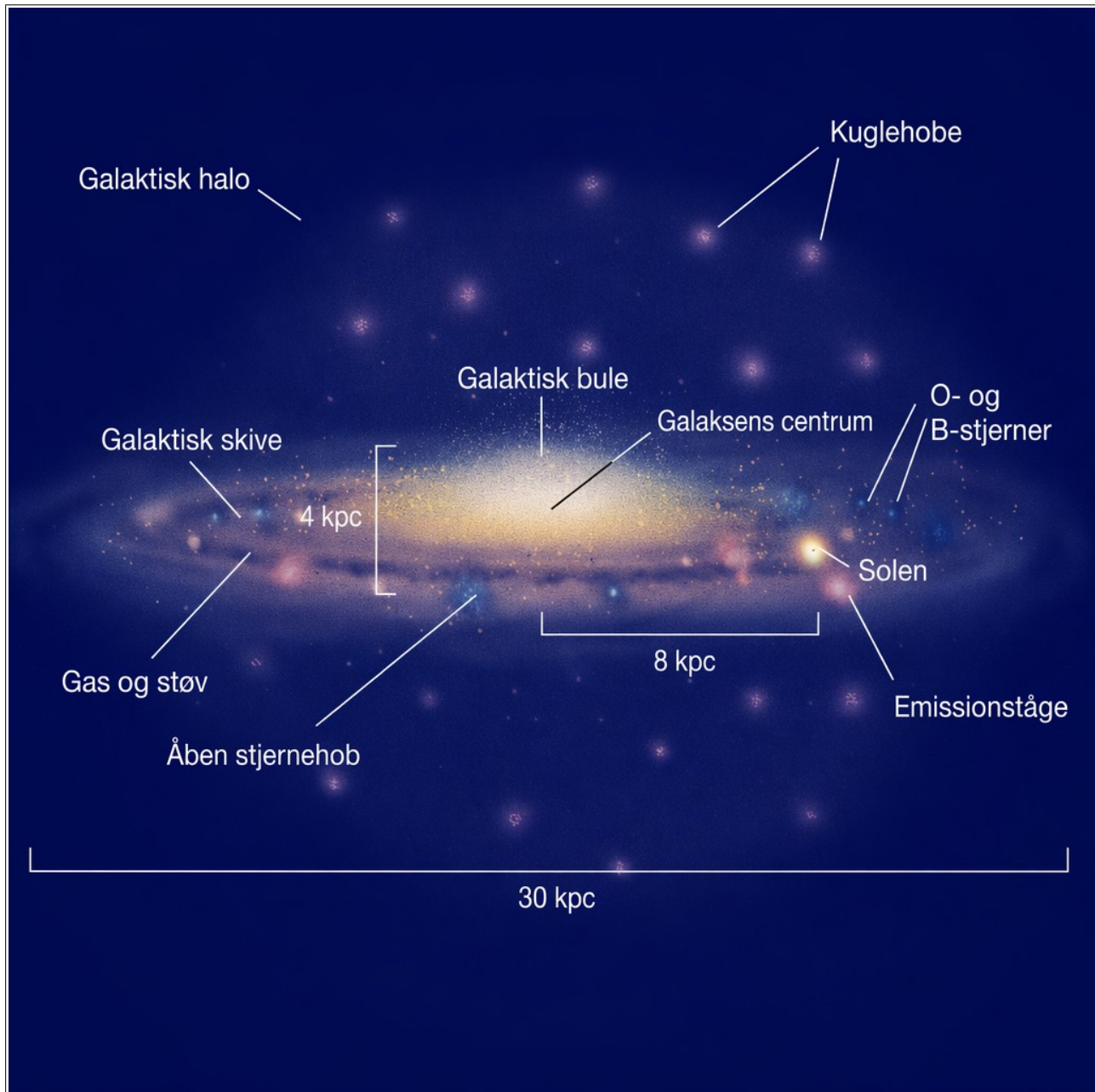
Kernens core³-radius er ca. 0,3 kpc, skivens skalalængder er hhv 2,8 kpc og 10 kpc og mørkt stof-haloens skalalængde er 14,5 kpc.

Den model, som er anvendt til at tegne figur 11, vil vi ikke gå i detalje med her, men det er muligt at lave en SRP-opgave i samarbejde med et studieretningsfag på A-niveau, hvor læseren kan prøve kræfter med rotationskurver. Den interesserede læser kan læse mere i [33].

³ Der er brugt en såkaldt *Plummer*-model, og 2xcore-radius svarer til den afstand, hvori halvdelen af kernes masse findes.

1.2.6 Opsamling på Mælkevejens struktur

Hvis vi sammenkæder alle oplysningerne ovenfor, kan vi nu opstille en detaljeret model for, hvordan Mælkevejen ser ud. Se modellen på figur 12.



Figur 12: Mælkevejens opbygning. [14. Oversat til dansk vha. Miira.dk]

En sammenfatning af nogle størrelser for Mælkevejen og Andromedagalaksen, M31 er vist i tabel 1.

Tabel 1: [5, p. 334]

	M31 (Andromeda)	Mælkevejen
Kernen		
Luminositet, $L_{\odot}$	$7,7 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^9$
Luminositet. (Brøkdel af totalen.)	25 %	12 %
Effektive radius (kpc)	2,2	2,7
Akseforhold (b/a)	0,57	0,85
Antal kuglehobe	400-500	160-200
Disken		
Luminositet, $L_{\odot}$	$2,4 \cdot 10^{10}$	$1,7 \cdot 10^{10}$
Skalælængde, kpc.	6,4	5,0
$B-V$	0,76	0,85
HI-gasindhold, $M_{\odot}$.	$3 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^9$
Rotationshastighed, km/s	260	220
IRAS infrarød luminositet, $L_{\odot}$.	$2,6 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^{10}$

Ovenfor betyder effektive radius den afstand, hvori halvdelen af kernens lys udsendes.

1.3 Solens plads i Mælkevejen

Som anført i afsnit 1.2.1 findes Solen i den tynde skive i en afstand af 7,9 kpc. Solen udfører en karussellignende bevægelse rundt om kernen med en omløbstid på ca. 230 Myr. Bevægelsen betyder, at stjernerne ikke holder en konstant indbyrdes afstand – nogle gange vil stjerner komme tættere på hinanden end ellers, og dette vil muligvis betyde, at kometer og asteroider påvirkes af det ændrede gravitationsfelt. Derved kan deres banebevægelser ændres, og de kan blive slynget mod den nærmeste af stjernerne. Man får en såkaldt *kometstorm*. Det øgede indfald af kometer kombineret med Jordens tætte placering ved Solen kan give øget risiko for komet- eller asteroidenedslag på Jorden, hvilket igen betyder noget for livet på Jorden. I Noten *Solsystemet og livsbetingelser* er gennemgået, hvilke konsekvenser nedslag på Jorden giver.

1.4 Fremmede planetsystemer

Solen er ikke den eneste stjerne, der har kredsende planeter omkring sig – det har i de senere år vist sig, at der er planeter omkring mange stjerner. Således er der pr. 6/4-2026 fundet 6298 planeter, og der er foreløbigt knap 8000 flere potentielle kandidater, som dog mangler at blive verificeret. [15] Der er fundet alle mulige slags planeter. Nogle er gas-, andre er stenplaneter, og nogle er sågar lavet af vand. I noten *Exoplaneter* er gennemgået to metoder, *transitmetoden* og *radialhastighedsmetoden*, til at finde exoplaneter.

1.5 Mælkevejens dannelse og udvikling

Vi har nu gennemgået, hvordan Mælkevejen ser ud i dag. Det næste spørgsmål er, hvordan galaksen blev dannet, og på trods af at spørgsmålet er enkelt nok, er svaret ikke helt så enkelt. Det er svært at se galakser i dannelsesprocessen (proto-galakser), fordi de alle blev lavet for omtrent 11-13 mia siden. Derfor skal vi se langt væk for at kunne se tilbage til den tid (Rødforskydningstallet ligger i intervallet 2-10) – og derfor er der primært teoretiske modeller at forlade sig på. Disse teorier er numeriske og dermed ret indviklede at forstå. Derfor vil det nedenstående også blive ganske ufuldstændigt.

1.5.1 Begyndelsen

En galakse dannes af en gigantisk gassky med en masse på ofte flere hundrede milliarder solmasser. Hvis gassens massefylde er stor nok, og den samtidig er kold nok, kan gasmolekylernes bevægelse ikke holde gassen i ligevægt, og skyen vil pga. gravitationskræfter kollapse. Det viser sig, at en gassky skal have en vis masse, *jeansmassen*⁴, for at være i stand til at kollapse. Jeansmassen er givet ved følgende udtryk

$$M_{\text{Jeans}} = 10^2 \cdot T^{1,5} \cdot n^{-1/2} \cdot M_{\text{Sol}} \quad (7)$$

Hvor M_{Jeans} er jeansmassen, T er temperaturen af gassen målt i K, n er antalstætheden målt i antal partikler pr. cm^3 og $M_{\text{Sol}} = 1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$. Temperaturen af gassen er omtrent 10^4 K og antalstætheden er af størrelsesordenen 10 cm^{-3} . [5, p. 284]

1.5.2 Eksempel - masse af kollapsende gassky

En gassky med en antalstæthed på 10 partikler pr. cm^3 og temperaturen 10^4 K giver en jeansmasse på

$$M_{\text{Jeans}} = 10^2 \cdot (10^4)^{1,5} \cdot 10^{-1/2} \cdot M_{\text{Sol}} = 31,6 \cdot 10^6 M_{\text{Sol}}.$$

⁴ Massen er opkaldt efter astronomen *James Jeans*.

Hvis antaltætheden er på 1 cm^{-3} og temperaturen er på 10^6 K bliver jeansmassen $10^{11} M_{\odot}$.

-0-

Modeller antyder, at Mælkevejen er dannet på følgende måde:

1. Først var der en gigantisk svagt roterende gassky med temperatur og tæthed som angivet i eksempel 1.5.2. Gasskyen var ikke helt homogen, dvs tætheden var større i nogle områder end i andre. Tætheden aftog muligvis væk fra centrum af skyen. Gasskyen tænkes at have fået sin rotation ved at vekselvirke via tidekræfter⁵ med andre gasskyer i Universets barndom.
2. Små gasskyer kollapsede og dannede kuglehobe i den store protogalakse. Kernens stjerner var altså dannet før diskens. (Pga. gasindstrømning til kernen, har der været kraftig stjernedannelse herinde siden.)
3. Derefter kollapsede protogalaksen, dvs. den store gassky. Under kollapset blev halostjernerne dannet. De er altså af samme alder som galaksen, og de deltager kun svagt i galaksens rotation. Dette kollaps tog i størrelsesordenen $\sim 10^8 \text{ yr}$.
4. Under kollapset blev gas spredt ud i en skive. Denne gas er en anelse mere rig på tungere grundstoffer end haloen, fordi der under kollapset blev dannet store stjerner, som døde efter få millioner år. Og disse stjerner lavede tungere grundstoffer.
5. I skiven har der lige siden været stjernedannelse. [16]

Det er ikke alle galakser, der dannes på ovenstående måde. Nogle (store) galakser dannes ved at sammensmelte forskellige galakser. Denne metode kaldes *merging*. Se Bilag 1 for et eksempel på en simulering af to kugleformede galakser, der støder sammen. I næste afsnit vil vi se på forskellige typer galakser og deres mulige dannelseshistorie.

2 Andre galakser

2.1 Spiral-, ellipse- og irregulære galakser

Der findes mange milliarder galakser i det synlige univers, og de er inddelt i 2 hovedtyper: *Spiralgalakser* og *elliptiskgalakser*. Mælkevejen er, som forklaret i afsnit 1, en spiralgalakse med en stav igennem kernen. Spiralgalakserne inddeles i forskellige typer:

Sa, Sb, Sc, Sd

Sa er galakser med tæt vundne spiralarmer og *Sd* er galakser med løst vundne spiralarmer. Tætheden af kernerne følger også bogstavbetegnelsen ovenfor. Således kaldes galakser med en stor kerne i forhold til skivestrukturen for *Sa*-galakser, og galakser med en lille kerne kaldes for *Sd*-galakser. Det er altså ikke nødvendigt at se en galakse ovenfra for at være i stand til

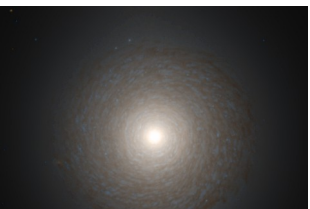


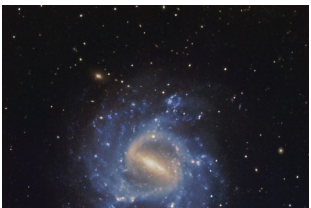
Figur 13: Andromedagalaksen, M31. Galaksen er 0,61 Mpc væk fra Mælkevejen, og den ca. lige så stor som Mælkevejen. Strukturen er nogenlunde den samme, men der er ingen stav i dens center. Galaksen klassificeres som en *Sb*-galakse. Bemærk de omkredsende dværg-elliptiske galakser. (Kilde: David Dayag.)

⁵ Tidekræfter er gravitationskræfter. For eksempel vil et menneske mærke en aftagende tyngdekraft, des længere væk fra Jorden, det bevæger sig. Men kraften vil føles konstant over hele kroppen. Dette skyldes, at mennesket er meget mindre end Jorden. Hvis 2 legemer derimod er sammenlignelige i størrelse, vil de ikke påvirke hinanden med den samme gravitationskraft overalt. Forskellige områder mærker forskellige gravitationskræfter, og derved påvirkes legemerne forskelligt.

at klassificere den. De galakser som har en stav igennem sig anføres som *SBa-SBd*. Mælkevejen er en *SBb*-galakse.

Endelig forekommer der spiralgalakser *uden* spiral-arme. De kaldes for *S0*-galakser. Den tæthedsbølge, der er årsag til den kraftige stjernedannelse i skiven, er muligvis forsvundet pga. påvirkninger fra nærtliggende galakser. Derved er spiralgalaksens struktur bevaret på nær i skiven, hvor armene er blevet rykket i stykker. Eksempler på galaksetyper er vist i tabellen herunder.

Sa: M104	Sb: M31	Sc: M51	S0: NGC 1387
			
[8]	David Dayag	[18]	[22]

SBa: NGC 4725	SBb: NGC 1300	SBc: NGC 1073	SBd: NGC 2903
			
[19]	NASA/HST	[20]	[21]

Ellipsegalakser har former fra helt sfæriske galakser (kuglerunde) til stærkt ellipseformede galakser. De mest elongerede ligner nærmest fodbolde, som man sidder på. (*Oblate* galakser.) Det er altså 2- eller 3-aksede legemer. Galakserne inddeles i rækkefølgen

$$E0-E7$$

hvor *E0* svarer til de helt kuglerunde galakser, og *E7* er de mest elongerede. Tallet efter *E*'et i klassifikationen ovenfor kan beregnes ved følgende formel

$$n=10\cdot\left(1-\frac{b}{a}\right) \quad (8)$$

hvor *n* er tallet efter *E*, *b* er galaksens halve lilleakse og *a* er galaksens halve storakse. Bemærk, at man ikke på billeder kan bestemme om galakserne er 3-aksede eller ej, da vi jo ser galaksen fra en eller anden side, men teoretiske modeller kan også fortælle os om deres forme.

Hvis galaksen er meget lille, dvs. der kun er i omegnen af en milliard stjerner i galaksen, kaldes den for en dværggalakse og den betegnes som ovenfor, nu bare med et '*d*' foran. For eksempel vil en

sfærisk symmetrisk dværggalakse benævnes *dE0*. I Andromedagalaksen kan man se et par dværggalakser, der er ved at sammensmelte med Andromeda. Se figur 13.

De galakser som ikke er hverken spiral- eller elliptiske galakser kaldes under et for *irregulære galakser*. Eksempler på irregulære galakser kan se på næste side. *SMC* er den lille af de to magellanske skyer, som man kan se med det blotte øje, hvis man befinder sig på den sydlige halvkugle. På billedet herunder, kan man i øvrigt også se Mælkevejens kuglehob 47 *Tuc*.

LMC er også en irregulær galakse, og den har muligvis engang været en stavgalakse. Den er vist herunder.

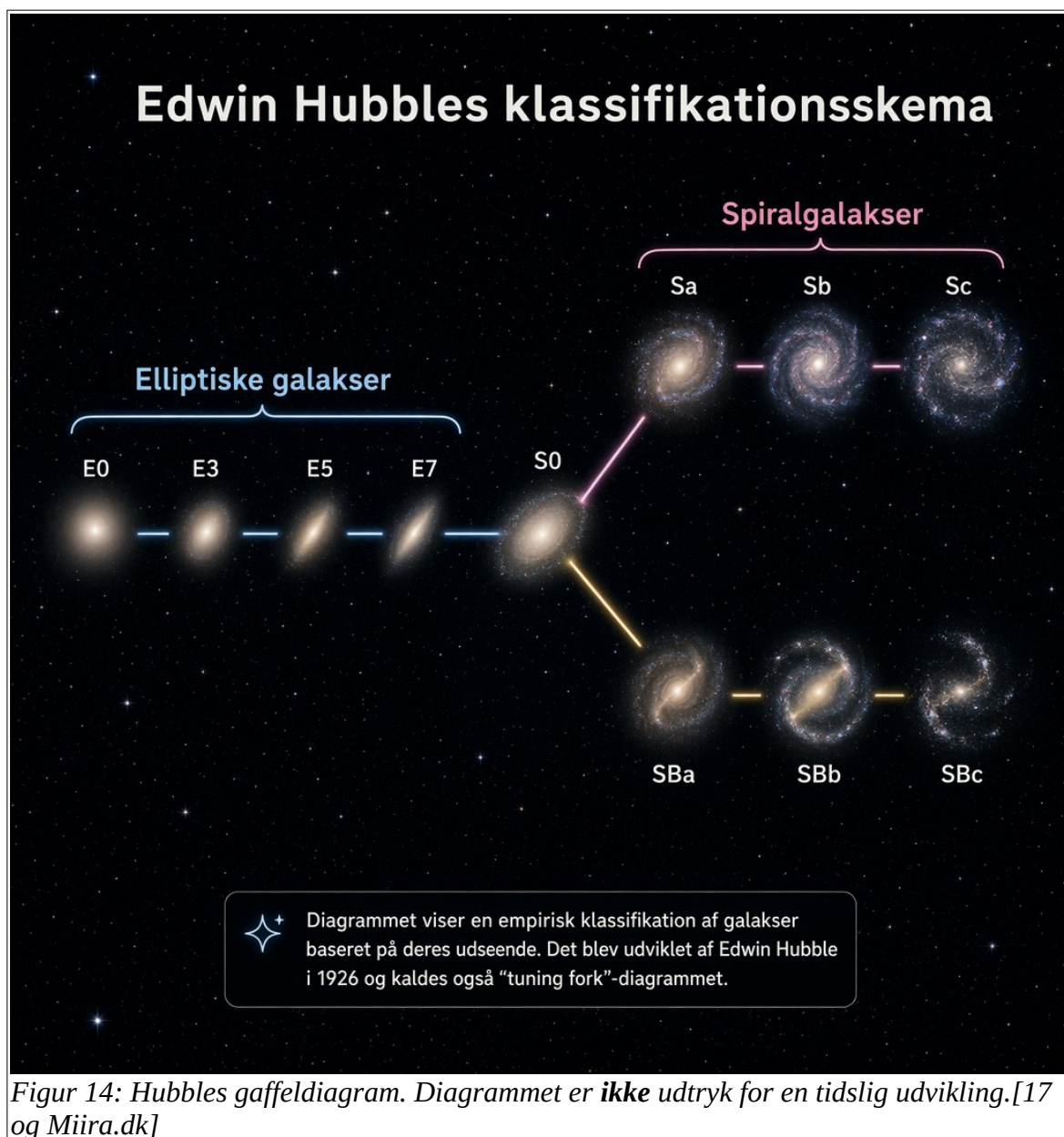
Førhen inddelte man irregulære galakser i flere typer, men det gør man oftest ikke mere, men hvis læseren undersøger litteraturen, kan man altså godt finde flere typer. [25]

En optælling på himmelen over de forskellige galakser viser, at der er 61% spiralgalakser, 22 % *S0*-galakser, 13% *E*-galakser og 4% irregulære galakser.

Man bør bemærke, at galakser ikke altid har været det, de er nu. Når 2 spiralgalakser kolliderer med hinanden, ender de med at blive til en stor *E*-galakse. Dvs. procenterne ovenfor vil ændre sig, jo ældre Universet bliver.

Vi kan afslutte dette afsnit med at opsummere galaksers struktur i Edwin Hubbles berømte gaffeldiagram, som er vist på figur 14.

<i>Irr - LMC</i>	<i>Irr - SMC</i>
	
[24]	[23] Kuglehoben 47 Tuc, der hører til i Mælkevejen ses til højre på billedet.



3 Dannelse af de forskellige typer galakser

3.1 S-galakser

Det er nærliggende at antage, at alle spiralgalakser er dannet nogenlunde som beskrevet for Mælkevejen i afsnit 1.5. De findes overalt i Universet – også langt fra andre galakser, og derfor må man antage, at de kan dannes uafhængigt af andre galakser.

3.2 E-galakser

Hvis man betragter optællingen ovenfor, ser man, at der ikke er nær så mange elliptiske galakser som spiralgalakser. Da E-galakser kun findes i galaksehobe eller i sammenhæng med andre galakser, er det nærliggende at antage, at disse galakser dannes ved sammensmeltning (merging) af

andre galakser. Faktisk findes der i centeret af flere galaksehobe, enorme *E*-galakser indeholdende flere billioner solmasser. De er antageligvist dannet ved merging. Computermodeller viser også, at *E*-galakser, der merges, forbliver med at være *E*-galakser. Se Bilag 1-Bilag 3.

Modeller viser dog også, at med de rette begyndelsesbetingelser, kan der dannes *E*-galakser ved ren sammentrækning. Dværgellipsegalakserne er måske dannet på den måde. Muligvis kan de store ellipsegalakser ikke dannes ved sammentrækning af en gassky, fordi de enorme gasskyer, der skal til at danne store *E*-galakser nærmest altid roterer, og derfor ender med at danne spiralgalakser.

3.3 Irregulære galakser

De magellanske skyer *LMC* og *SMC* var oprindeligt muligvis hhv. en *S*- og en *dE*-galakse. Da de ligger tæt på Mælkevejen (ca. 215 kpc), er de påvirkede af gravitationsfeltet fra Mælkevejen, og det har ændret så meget i galaksernes struktur, at de nu er blevet til irregulære galakser. Se figurerne i afsnit 2.1.

4 Galakters udvikling og deres placering i hobe

Nedenfor vil galakters udvikling og storskalastruktur kun blive beskrevet kursorisk. Læseren opfordres til selv at søge oplysende artikler i litteraturen.

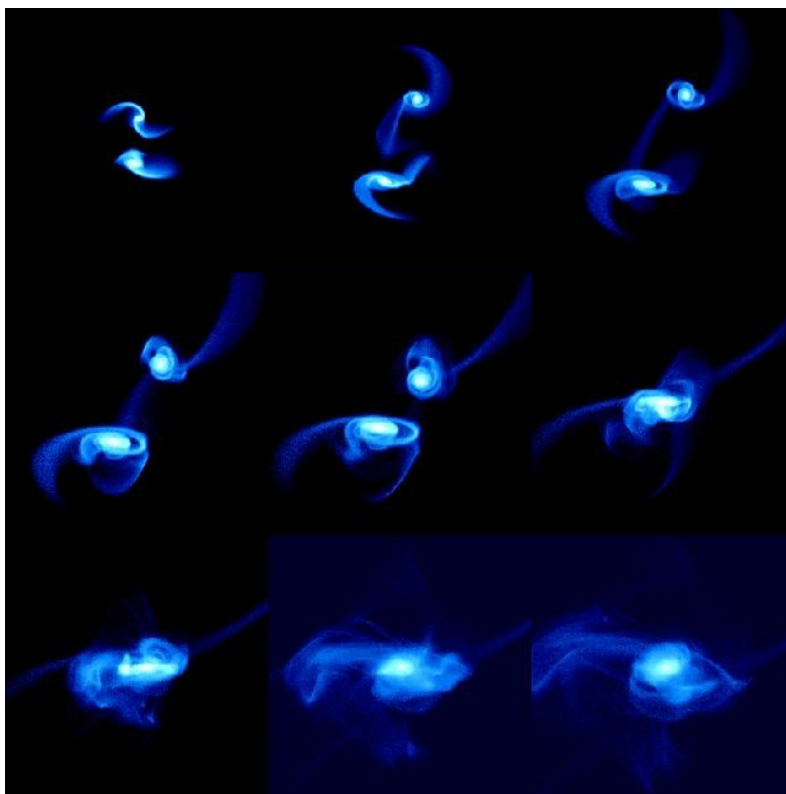
En galakse er ikke et statisk system. Galaksen ændres konstant fordi

1. Der konstant dannes/forsvinder stjerner.
2. Galakser påvirker hinanden gravitationelt uden at kolliderere.
3. Galakser kolliderer.

Stjernedannelse i spiralgalakser sker gennem det meste af galaksens liv, såfremt de interstellare tåger kan påvirkes til at trække sig sammen. Det kan for eksempel ske ved påvirkning fra supernovaer eller ved at tåger rammer ind i hinanden. *E*-galakser standser deres stjerneproduktion efter få milliarder år pga. gasmangel.

Noget, der især kan generere stjernedannelse, er, hvis to galakser glider sammen. På figur 15 er vist en simulering af, hvordan Mælkevejens og Andromedagalaksens skæbne kommer til blive om ca. 5 milliarder år.

I simuleringen har man ikke taget højde for den ekstra stjerne-



Figur 15: En simuleret kollision mellem Andromedagalaksen og Mælkevejen. [26]

dannelse, der vil komme, når tidekræfter påvirker gasskyer i de to galakser, men det er tydeligt at se, at de to spiralgalakser ikke længere har en veldefineret form. Den sammensmeltede galakse er nu blevet en *E*-galakse med nogle lysende arme, som stikker ud. Armene vil med tiden forsvinde.

Dette fænomen er ganske almindeligt i Universet. Gravitationskraften trækker galakser mod hinanden, og mange af disse gravitationelt bundne galakser ender med at smelte sammen. Stjernerne i de kolliderende galakser kommer ikke nødvendigvis til at ramme hinanden, da der er enorme 'tomme' områder i galakserne, men gasskyer i galakserne vil blive påvirket, og dermed vil der ske kraftig stjernedannelse. Meget af gassen bliver også skudt ud af galakserne, så den færdige *E*-galakse ikke har nævneværdig stjernedannelse.

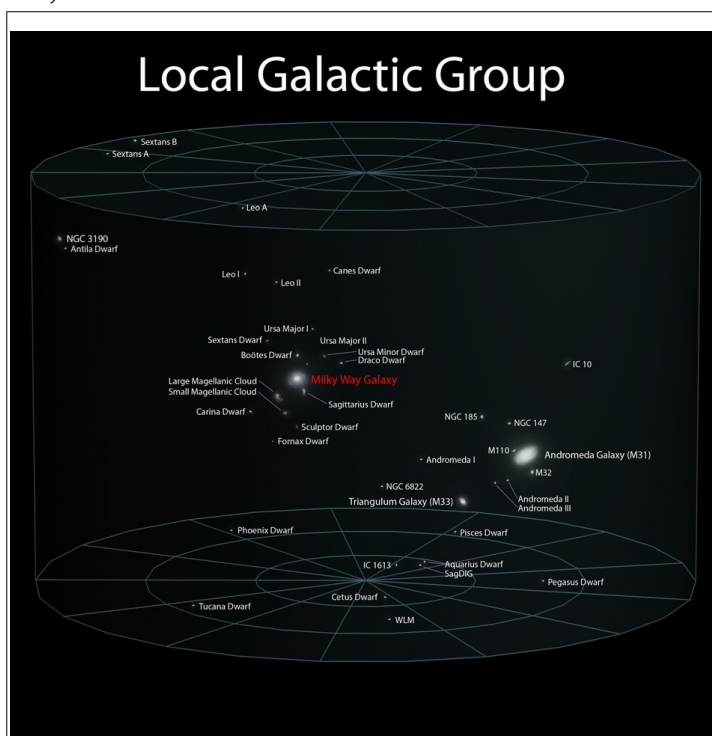
4.1 Galaksehobe

De galakser, som er gravitationelt forbundne, vil modstå den kosmologiske ekspansion⁶, og vi ser dem i store hobe. Disse hobe er samlet i endnu større hobe, som kaldes *superhobe*, og superhobene påvirker naturligvis også hinanden. Derfor har Universet en 'filamentlignende' struktur.

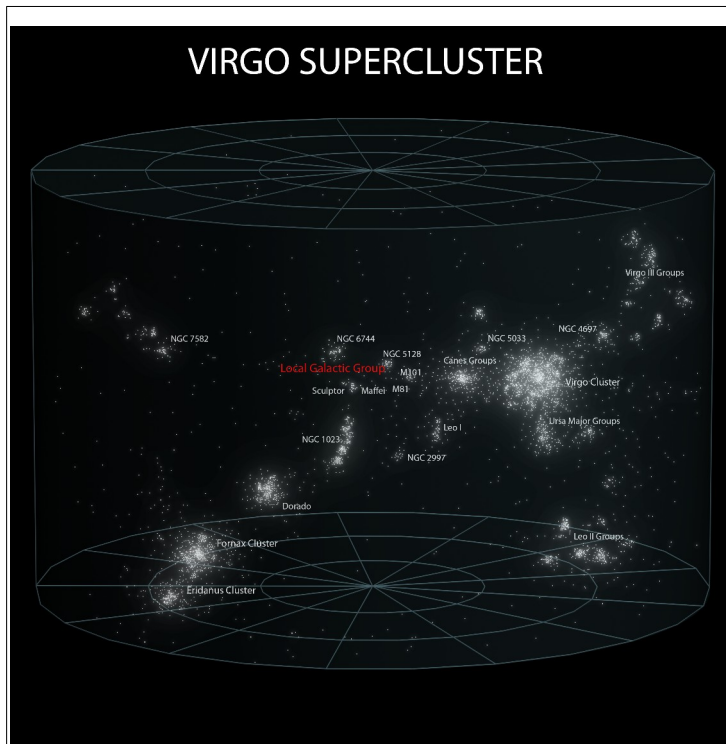
På figur 16 ser man, at den lokale gruppe af 41 galakser, især er centreret omkring Mælkevejen og Andromeda-galaksen. Afstanden til Andromeda-galaksen er 0,61 Mpc, dvs. det tager lyset 2 millioner år at rejse mellem de to galakser. Det er meget for et menneske, men for en galakse, der er ca. 10 milliarder år gammel er det ingenting, så vi kan godt konkludere, at galaksen ikke har ændret sig meget, hvis vi kunne flyve derhen og kigge efter.

Hvis man zoomer ud på endnu større skalaer, ser Universet ud som vist på figur 17.

Her ser man tydeligt, at der er områder med galakser, og områder med nærmest ingenting. Området er ca. 33 Mpc i diameter, og der er tusindvis af galakser.



Figur 16: Den lokale gruppe af galakser. Mælkevejen er markeret med rødt. [27]



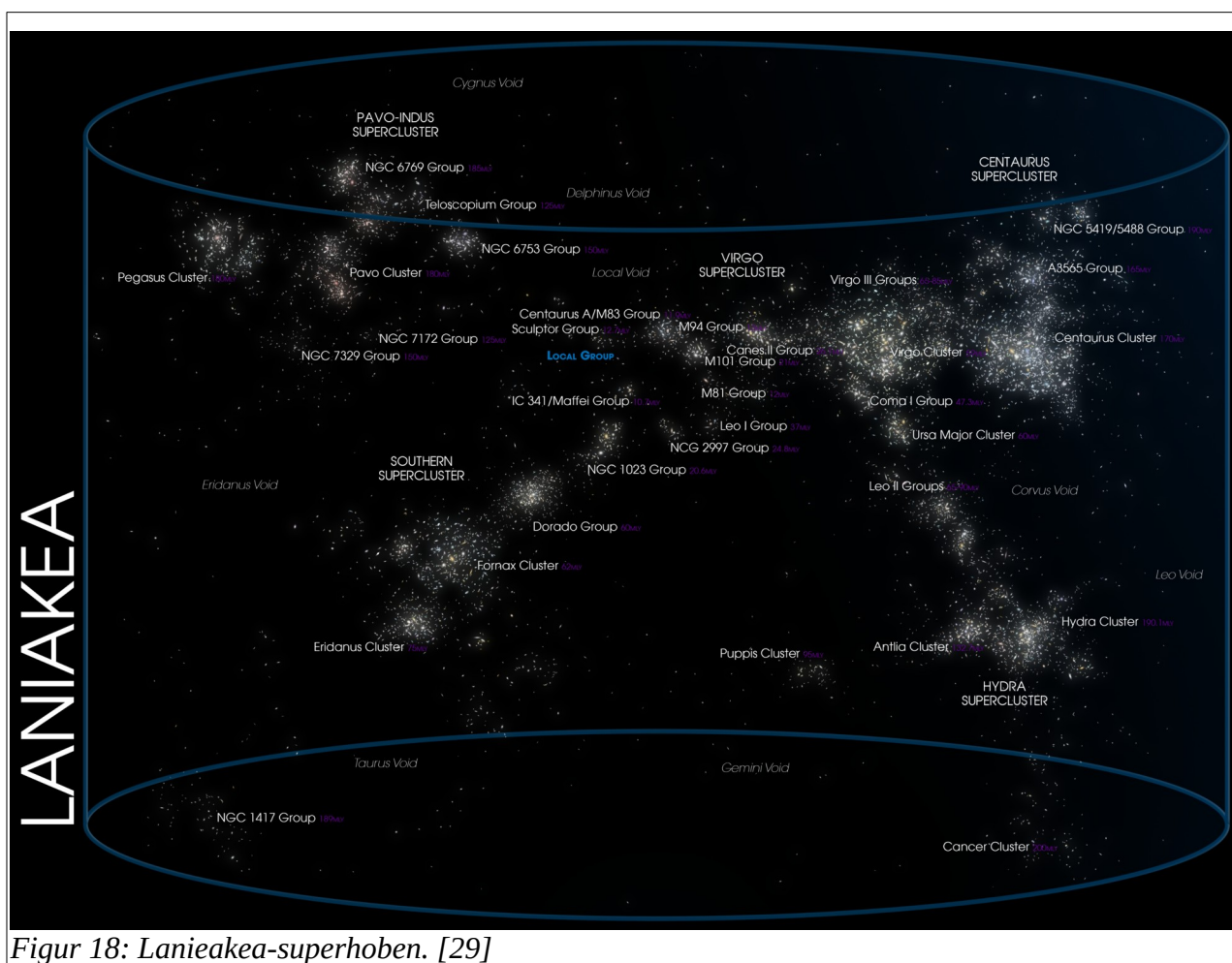
Figur 17: Virgo-superhoben med ca. 10 000 galakser. [28]

⁶ Universet udvider sig, som vi skal se mere til i emnet *Kosmologi*.

Virgohoben, som vi bor i udkanten af, indeholder ca. 2000 galakser, mens Virgo superhoben indeholder mindst 100 galaksehobe.

Den største superhob, vi indtil nu har kortlagt er *Lanieakea*, som dækker et område på 160 Mpc. Der er over 125 000 galakser i denne kæmpehob. Hvis man betragter kortet over den på figur 18, ser man, at på disse afstandsskalaer er Universet filamentformet.

Hvis vi betragter områder af størrelsesorden ca. 3-400 Mpc formoder vi, at Universet ser homogent og isotropt ud, og med den antagelse, kan man løse Einsteins feltligninger for hele Universet. Dette bliver undersøgt i noten *Kosmologi*.



Figur 18: Lanieakea-superhoben. [29]

5 Sammenfatning

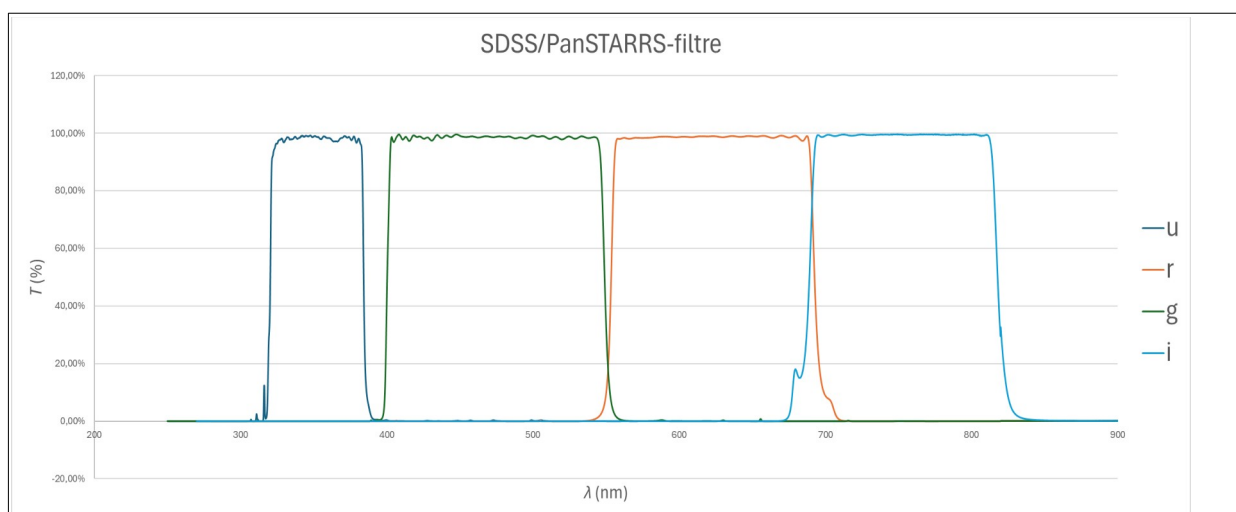
Vi har nu set hvordan galakser ser ud, og vi har undersøgt Mælkevejens form i lidt større detalje. Vi har set på, hvordan galakserne er fordelt i Universet, og det giver os startstødet til at komme i gang med emnet, der dækker hele Universet – nemlig Kosmologien.

6 Opgaver

6.1 Målinger på M51



Figur 19: M51. Fra Wikipedia.



Figur 20: Filteregenskaber for SDSS/PanSTARRS-filtre. Bemærk at de valgte farver for hvert filter godt kan snyde. Kilde: <https://LCO.global>

I denne øvelse skal du lære at downloade astronomi-billeder fra et arkiv og derefter manipulere med dem.

- a) Download *FITS*-billeder af M51 fra <https://archive.lco.global/>.
 - i. Skriv *M51* i søgefeltet, som hedder *Point*.
 - ii. *Reduction level* skal være *BANZAI*.
 - iii. Download billeder optaget med filtre, der muliggør konstruktion af et farvebillede.
- b) Indlæs et af billederne i *AstroImageJ*, som findes på serveren *astro.rosborg-gym.dk*.
- c) Brug linealværktøjet (i hovedvinduet) til at måle diameteren af den største af de to galakser. Husk at du skal måle den største diameter, du kan finde, da galaksen muligvis inklinerer i forhold til himmelbaggrunden.
- d) Kig i *FITS*-headeren, så du kan se billedopløsningen, dvs. hvor mange buesekunder en pixel svarer til. Tallet står i variabelen *PIXSCALE*.
- e) Beregn vinkelbredden af galaksen.
- f) Afstanden til M51 er $d = 7,1$ Mpc. Beregn diameteren af galaksen.
- g) Gentag for kernen af galaksen.
- h) Ekstra: Prøv at lave en billedmosaik af de tre billeder, så du får et farvebillede.
 - i. Benyt kommandoen *Image-Colour-Merge Channels*.
 - ii. I *billedvinduet* kan du evt. vælge *Color-Composer*, hvis du vil ændre i farverne.

NB: Hvis kikkerten ikke eksakt peger samme sted hen ved de tre billeder, kan man justere for driften ved at bruge kommandoerne:

- A) Kommandovindue: *Image-Stacks-Images to stack*. (Hak af i *Keep Source Images*.)
- B) Kommandovindue: *Plugins-Image Stabilizer*. (Vælg *affine*.)
- C) Kommandovindue: *Save as Image Sequence*. Vælg en ny mappe.

6.2 Afstanden til SMC

På webstedet <https://astro-gym.dk/Aktiviteter> kan du finde en opgave, der hedder *Cepheidemetoden til at finde afstanden til SMC*.

Download opgavetekst og svar-regnearket og løs opgaven.

6.3 Klassificer galakser

På webstedet <https://astro-gym.dk/Aktiviteter> kan du finde en opgave, der hedder *Klassificer galakser*.

Benyt en lineal, lommeregner samt dit skarpe øje til at klassificere spiral-, ellipse- og irregulære galakser.

6.4 Mælkevejens rotationskurve

På webstedet <https://astro-gym.dk/Aktiviteter> kan du finde en opgave, der hedder *Mælkevejens rotationskurve*.

Mål en rotationskurve for Mælkevejen ved at observere brintskyer med et radioteleskop. Øvelsen er en oversættelse af en aktivitet fra [EU-HOU](#). Til øvelsen findes også en kineæstetisk øvelse, som

eleverne kan udføre, hvis de har svært ved at visualisere tågernes bevægelser i Mælkevejen. Man kan også se en engelsksproget [video, der forklarer øvelsen her](#). (16^m.)⁷

Øvelsen kræver at man får en konto til EU-HOU's studenterteleskoper, men der findes også en simulator på webstedet, hvor man kan lave målingerne uden adgang til teleskoperne.

6.5 Andromedagalaksens inklinations og rotationskurve

På webstedet <https://astro-gym.dk/Aktiviteter> kan du finde en opgave, der hedder *M31's inklinations og rotationskurve*.

Mål Andromeda-galaksens inklinations, find ud af hvornår den rammer Mælkevejen og tegn en rotationskurve, så galaksens masse kan estimeres.

6.6 5.6. Spiralgalaksen NGC 7083's masse

På webstedet <https://astro-gym.dk/Aktiviteter> kan du finde en opgave, der hedder *Spiralgalaksen NGC 7083's masse*.

I denne øvelse vejer man en spiralgalakse samt bestemmer afstanden til den. Der er billeder og spektrum vedlagt i zip-filen. Du skal have et program, der kan læse FITS-filer.

6.7 Densitetsprofil af galakse

På webstedet <https://astro-gym.dk/Aktiviteter> kan du finde en opgave, der hedder *Densitetsprofil af galakse*.

I denne opgave skal du downloade eller optage et billede af en galakse, og derefter måle overfladelysstyrken, som funktion af afstanden R fra kernen, og bagefter regne densitetsprofilen ud som funktion af den rumlige afstand r . Det er en større opgave, og den kan muligvis bruges ifm. projektarbejde. (SRP f. eks.)

⁷ Pr. 9/6-2026 virker filmlinket ikke, men måske kommer det op at køre igen, så linket bliver stående i teksten her.

7 Bilag 1

1.1

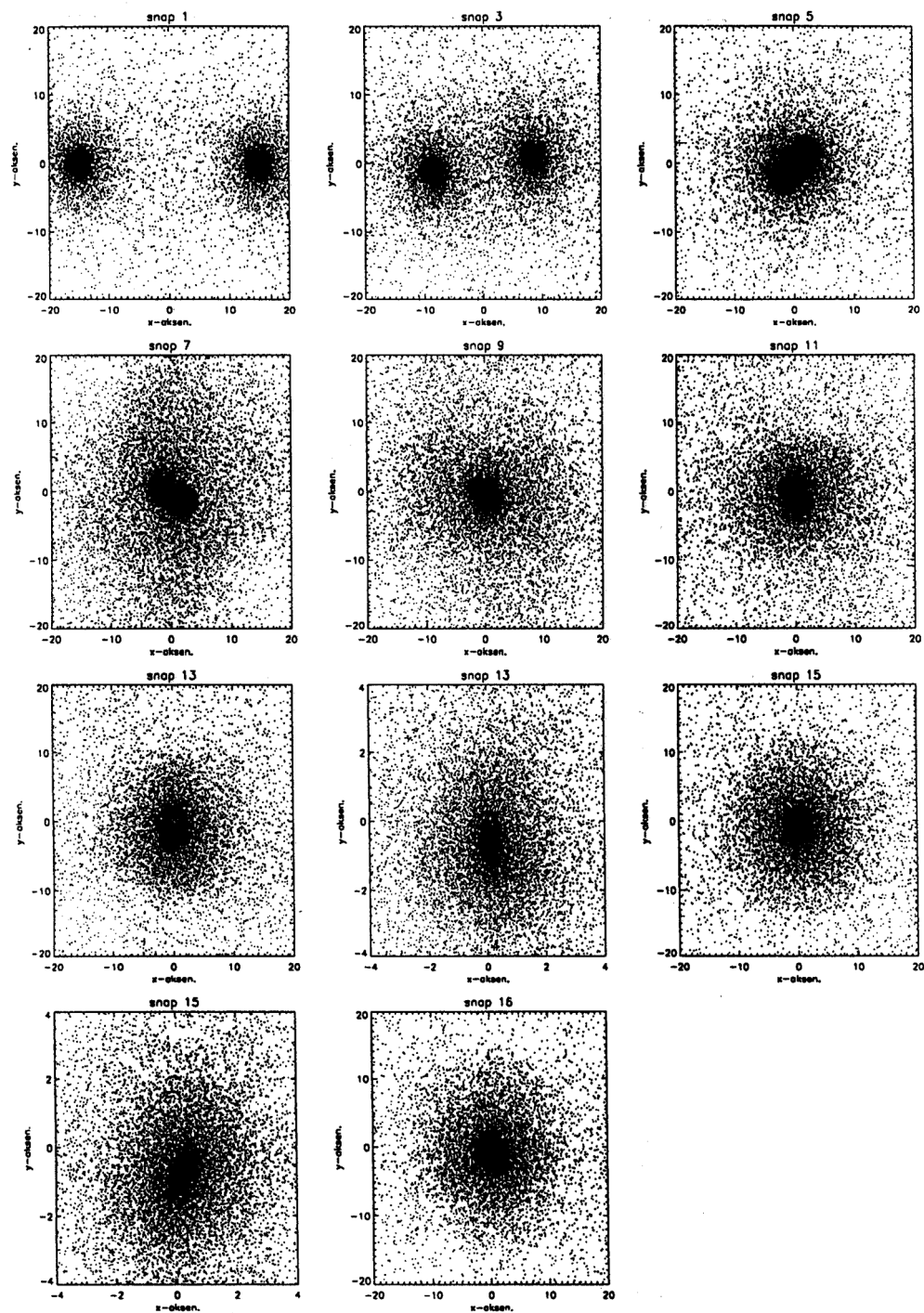
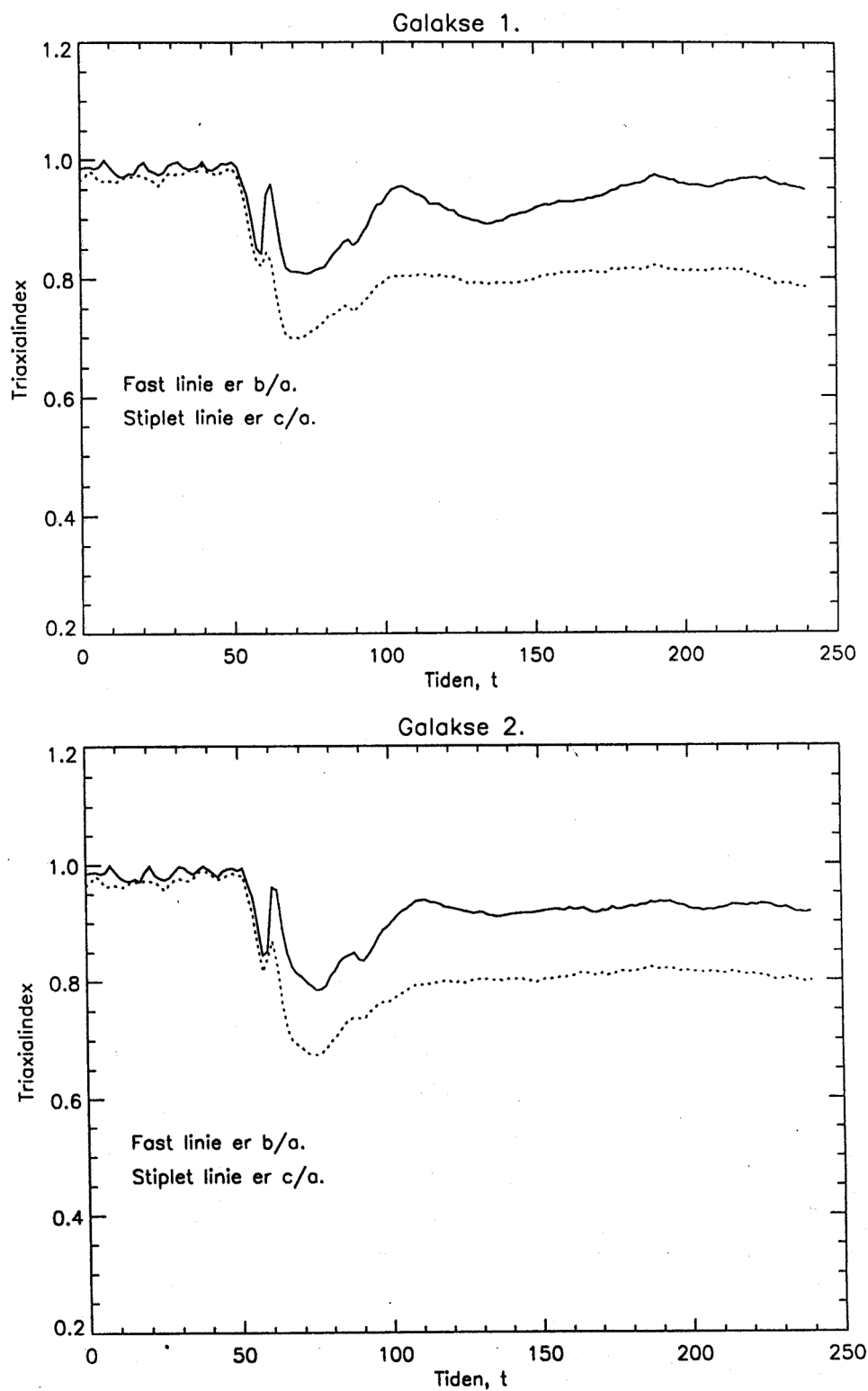


Fig. 7.1.c. Snapshots af $R_p = 1$ simuleringen. Bemærk billed 8 og 10 er forstørrede billeder. snap001

svarende til $t = 0$, snap003 svarer til $t = 20$, snap005 svarer til $t = 44$, snap007 svarer til $t = 66$ osv.

8 Bilag 2

1.2

Fig. 7.2 c. Akseforhold for $R_0 = 1$ simuleringen.

9 Bilag 3

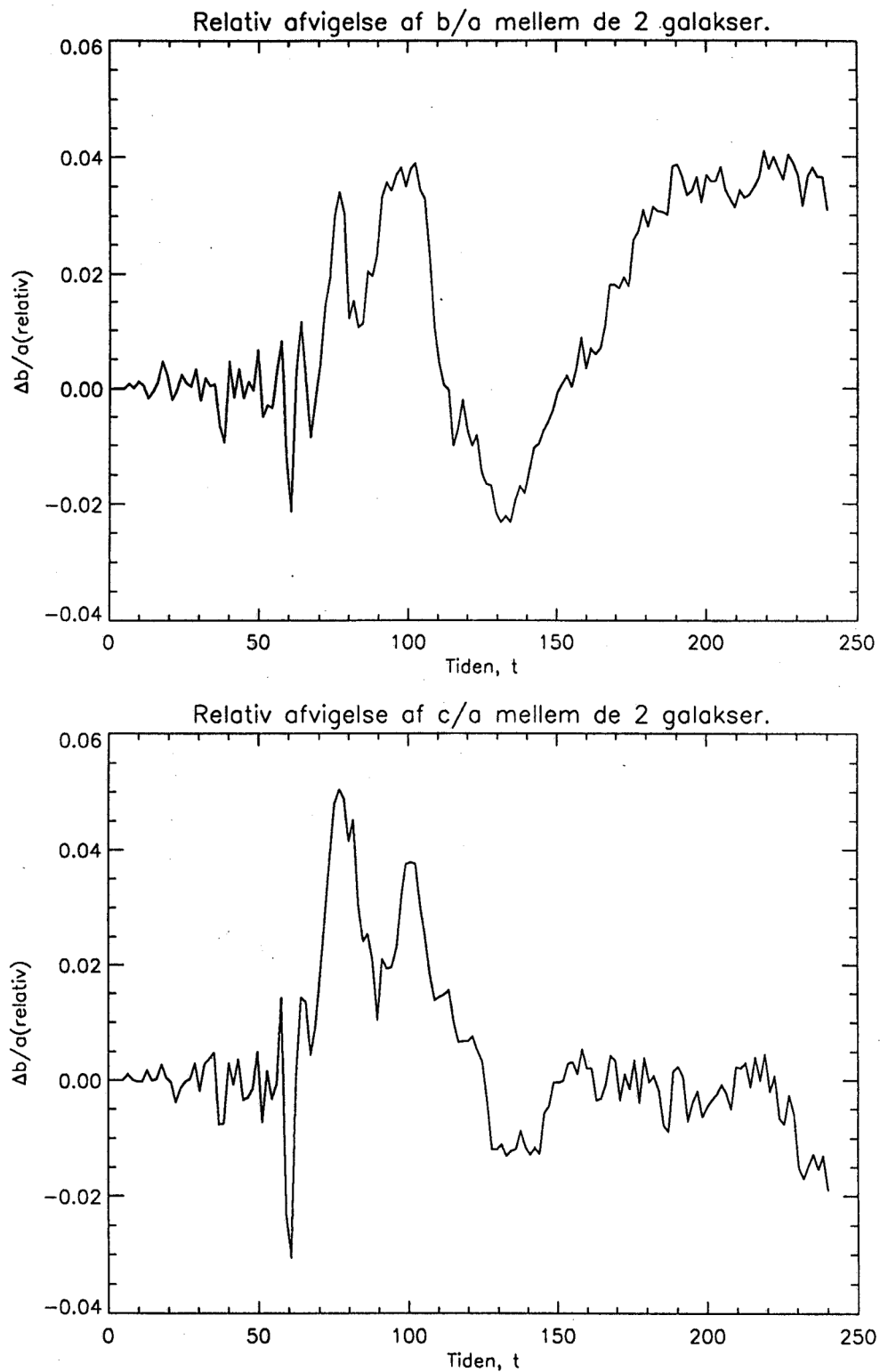


Fig. 7.2.d. Figuren viser den relative forskel i akseforhold mellem de 2 fordelinger, der skydes sammen. ($R_p = 1.$)

10 Referencer

1. *Atlas Image obtained as part of the Two Micron All Sky Survey (2MASS), a joint project of the University of Massachusetts and the Infrared Processing and Analysis Center/California Institute of Technology, funded by the National Aeronautics and Space Administration and the National Science Foundation.*
2. <https://www.eso.org/public/denmark/images/eso1908e/>
3. http://galaxymap.org/book_images/face_on/model_illustration_large.png
4. NASA/JPL-Caltech/R. Hurt. (SSC/Caltech.) <https://solarsystem.nasa.gov/resources/285/the-milky-way-galaxy/>
5. *The Milky Way as a Galaxy* af G. Gilmore, I. King og P. van der Kruit, University Science Books, Mill Valley, California, 1990.
6. *Galaxy Formation and Evolution* af Houjun Mo, Frank van den Bosch og Simon White, Cambridge University Press, 2014.
7. <https://www.universetoday.com/148997/a-new-measurement-puts-the-sun-2000-light-years-closer-to-the-center-of-the-milky-way/>
8. <https://science.nasa.gov/m104-sombrero-galaxy>
9. <https://eventhorizontelescope.org/blog/astronomers-reveal-first-image-black-hole-heart-our-galaxy>
10. The EHT Collaboration et al. 2022 ApJL, **930**, L12.
<https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ac6674>
11. Lodders, K. 2020, *Solar Elemental Abundances*, in The Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science, Oxford University Press.
12. <http://www.sidleach.com/m13.htm>
13. <https://astro-gym.dk/aktiviteter/>
14. Pearson Education, Inc.
15. <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>
16. <https://svs.gsfc.nasa.gov/11534>
17. <https://esahubble.org/images/heic9902o/>
18. <https://esahubble.org/images/heic0506a/>
19. <https://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/SINGS/galaxies/ngc4725.html>
20. <https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Goranen>
21. NASA/GALEX/WikiSky http://www.wikisky.org/?object=NGC+2903&img_source=GALEX
22. https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Fabian_RRRR
23. <https://www.eso.org/public/denmark/images/eso1714a/>
24. <https://www.eso.org/public/denmark/images/eso1914a/>
25. <https://www.britannica.com/science/galaxy/Irregular-galaxies>
26. www.physics.uc.edu/~hanson/ASTRO/LECTURENOTES/MW
27. <https://www.sun.org/images/our-local-group>
28. <https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Azcolvin429>
29. <https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Azcolvin429>
30. <https://saoastronews.wordpress.com/2012/04/20/no-dm-in-solarneighbourhood/>
31. https://www.youtube.com/watch?v=bwIriJ_6epQ
32. Sofue, Yoshiaki: *Rotation Curve of the Milky Way and the Dark Matter Density*, 12. februar 2020. <https://arxiv.org/abs/2004.11688> og kilder deri.
33. Michael Andrew Dolan Møller: *Mælkevejens rotationskurve – en teoretisk model*, 2025.
<https://astro-gym.tekster>
34. Data fra tabel 2 i Bhattacharjee Chaudhury & Kundu, *Astrophysical Journal*, 785:63 (13pp), 2014 April 10.