

Galaksers rotation og mørkt stof

Louise Bro og Diana Juncher
Københavns Universitet

24. maj, 2005



Figur 1: NGC 4258

Indhold

1	Problemformulering	4
2	Generelt om galakser	4
2.1	Galakser	4
2.2	Klassifikation af galakser	5
3	Spiralgalakser	5
3.1	Spiralgalaksers bevægelse	5
3.2	Galaksen NGC 4258	6
3.3	Rotationskurver	6
4	NGC 4258	7
4.1	Observation af NGC 4258	7
4.2	Datareduktion - teori	7
4.3	Datareduktion - programmer	8
4.4	Lysfordeling og massefordeling	9
4.5	Sammenligning af massefordeling og rotationskurve	10
4.6	Fejlkilder og usikkerheder	12
5	Perspektivering	13
5.1	Mørkt stof	13
5.2	Baryonisk mørkt stof	14
5.3	Ikke-baryonisk mørkt stof	15
6	Konklusion	17
7	Referenceliste	18
8	Bilag	19
8.1	Observationsoversigt	19
8.2	Keplers love i spiralgalakser	20
8.3	Datareduktion med IDL	22
8.4	Program: mkBIAS.pro	28
8.5	Program: mkDARK.pro	29
8.6	Program: mkFLAT.pro	31
8.7	Program: mkReducescience	33
8.8	Program: mkCombine	35
8.9	Program: mkRotate.pro	38
8.10	Program: mkLys.pro	39
8.11	Kommandoer i Gnuplot	41

8.12	Integrale af lysfordelingsfunktionen	42
------	--	----

1 Problemformulering

I denne opgave vil vi undersøge fænomenet mørkt stof. Tidligere observationers uoverensstemmelser mellem massefordeling og stjernernes og gasskyernes rotation omkring centrum af spiralgalakser peger på, at der i galakser må befinde sig stof, som ikke lyser - mørkt stof.

Dette vil vi undersøge ved direkte observationer af galaksen NGC 4258 med henblik på at måle lysfordelingen i galaksen. Derudover vil vi ved hjælp af givne datasæt konstruere en rotationskurve for NGC 4258, der viser rotationshastigheden omkring centrum som funktion af radius. Vi vil så sammenligne disse to kurver, så vi kan se, om den lysende masse kan gøre rede for rotationsbevægelsen, altså om den udgør al massen i galaksen, eller om der mangler noget. Til sidst vil vi give nogle bud på, hvad dette manglende, mørke stof kan være.

Vi starter med i afsnit 2 at give en generel beskrivelse af galakser. I afsnit 3 går vi mere i dybden med spiralgalakser og deres stjerners rotationsbevægelser samt beskriver NGC 4258. I første halvdel af afsnit 4 gennemgår vi behandling af observationernes data teoretisk og praktisk, mens vi i den anden halvdel giver en vurdering af resultaterne og fejlkilder og usikkerheder på disse. Denne fører sammen med perspektivering i afsnit 5 til vores konklusion i afsnit 6. Bagerst i rapporten findes referenceliste og bilag.

2 Generelt om galakser

2.1 Galakser

¹En galakse er en samling af millioner af stjerner, gas og støv isoleret i rummet og holdt sammen af tyngdekraften. Galakserne i universet er ikke jævnt fordelt, men samlet i de såkaldte galaksehobe, som kan rumme tusinder af galakser, og som igen er samlet i de store superhobe. Vores galakse, Mælkevejen, er kun én ud af milliarder. Størrelsen af galakserne varierer meget - nogle er så blot 1/100 af Mælkevejen (som har en diameter på 160.000 ly), mens andre kan være op til 50 gange større.

Astronomen Edwin Hubble (1889-1953) opdagede blandt andet, at alle galakser ser ud til at bevæge sig væk fra os, og at der er en sammenhæng mellem deres hastighed og deres afstand til os - proportionalitetsfaktoren mellem de to kaldes Hubblekonstanten og beskriver et univers i udvidelse. Hubble udnyttede den såkaldte Doppler-effekt til at bestemme galaksernes hastighed - denne vil blive uddybet senere i afsnittet om spiralgalakser.

¹Afsnit 2.1, 2.2 og 3.1 er inspireret af Freedman, N.F. & Kaufmann, W.J., *Universe, 7th edition* (New York: W.H. Freeman & Co. 2004), kapitel 26

2.2 Klassifikation af galakser

Galakser klassificeres ud fra, hvordan vi ser dem. Hubble lavede et skema over de forskellige galaksetyper kaldet Hubbles Stemmegaffeldiagram. Overordnet inddeler skemaet galakserne i fire typer: elliptiske galakser, spiralgalakser, spiralgalakser med bjælke og irregulære galakser. Derudover inddeles de elliptiske galakser efter deres form fra E0-E7, hvor E0 er de rundeste og E7 de fladeste galakser. Begge typer af spiralgalakser inddeles i tre kategorier, a, b og c, alt efter, hvor stor disk de har, hvor veldefinerede armene er, samt efter hvor store deres centre er. De irregulære galakser er galakser, som ikke passer ind i nogle af de andre kategorier.

Stjernernes bevægelser i de forskellige galakser er ikke ens. For eksempel bevæger stjernerne i elliptiske galakser sig temmelig tilfældigt - for de meget runde er bevægelsen isotropisk, mens den for de meget flade er anisotropisk. Stjernerne i spiralgalakserne bevæger sig til gengæld i et ordnet kredsløb omkring centrum, som kan beskrives ved hjælp af Keplers love. Man mener, at måden stjernerne bevæger sig på, ligger til grund for, hvordan galaksen ser ud. F.eks. er grunden til at nogle spiralgalakser har veldefinerede arme, mens andre har enorme centre, at disse galaksers rotationshastighed er forskellig. Groft sagt er rotationshastigheden større for galakser med store diske.

3 Spiralgalakser

3.1 Spiralgalaksers bevægelse

Ud fra den antagelse, at stjernerne i en spiralgalakse udfører en ren cirkelbevægelse omkring centrum, og at deres masse er forsvindende lille i forhold til massen inden for bevægelsens cirkel, følger det af Keplers love², at:

$$v^2 = \frac{G \cdot M}{r} \quad (1)$$

Det ses, at kvadratet på stjernernes hastigheder er omvendt proportional med afstanden til centrum, forudsat at massen indenfor stjernens bane er konstant. Inde omkring centrum af spiralgalaksen ændres massen indenfor stjernernes baner kraftigt i forhold til ændringen af r . Når man derimod kommer tilstrækkelig langt væk fra centrum er tilvæksten af massen forsvindende lille i forhold til den masse, der allerede er indenfor stjernernes baner. Udenfor denne afstand forventes det derfor, at kvadratet på rotationshastigheden netop vil udvikle sig omvendt proportionalt med radius.

²Udledelsen er at finde i Bilag 1

3.2 Galaksen NGC 4258

NGC 4258³ er en spiralgalakse, der ligger i retning af stjernebilledet Ursa major (Store Bjørn). Helt præcist er dens koordinater:

RA: 12 : 18 : 57.52 og Dec: 47 : 18 : 14 : 20 (J2000)

Galaksen har en diameter på omkring 100.000 lysår⁴, og den er kendt for at indeholde en distribution af H_2O -masers (vand der forstærker mikrobølgestråling), som har en bemærkelsesværdig simpel geometri. Udfra disse har det været muligt at give en særlig præcis vurdering af afstanden, som ligger på 6.2 ± 0.7 Mpc⁵, hvilket svarer til lidt over $20 \cdot 10^6$ ly. Forklaringen på disse masers specielle placering og bevægelse menes at ligge i et enormt sort hul på 39 millioner solmasser beliggende i galaksens midte.

3.3 Rotationskurver

Vi vil ikke her gå i dybden med, hvordan rotationskurver for galakser bestemmes, da det ikke er en del af eksperimentet. Der findes flere forskellige metoder hvorpå disse kan findes - én af disse gør brug af dopplereffekten.

Bølger som udsendes fra en kilde, der nærmer sig, har en højere frekvens, end bølger fra en stationær kilde. Omvendt gælder det også, at bølger fra en kilde på vej væk har en lavere frekvens. Dette fænomen kaldes dopplereffekten og gælder for alle former for bølgefænomener - heriblandt lysbølger. For en observatør i hvile, der betragter en kilde, som bevæger sig væk med hastigheden v , er forholdet mellem frekvensen for $v = 0$, f_0 , og den observerede frekvens, v_{kl} , givet ved⁶:

$$\frac{v_0}{v_{kl}} = 1 + \frac{v}{c}$$

Ved at betragte dopplereffekten for kendte objekter i galaksen, eksempelvis masers eller tydelige bestemte typer stjerner, kan man bestemme deres indbyrdes hastigheder og derved opstille en rotationskurve for galaksen.

³NGC står for New General Catalogue. Kataloget består af 7840 objekter og blev lavet af Dreyer i 1888

⁴<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/sofue/rotation/fig2/4258.gif>

⁵Binney & Merrifield, Galactic Astronomy (Princeton University Press 1998), p. 413

⁶Dam, M., Introduktion til den specielle relativitetsteori (Niels Bohr Institutet 2004), p. 57

4 NGC 4258

4.1 Observation af NGC 4258

Formålet med eksperimentet er ved observation at kunne beregne lysfordelingen og dermed massefordelingen for galaksen NGC 4258 og sammenligne denne med galaksens rotationskurver.

På Brorfelde Observatorium tog vi natten mellem den 8. og 9. februar 2005 en række billeder af galaksen NGC 4258. Vi brugte observatoriets største teleskop - Schmidt-teleskopet. Teleskopets hovedspejl har en diameter på 77 cm, og selve teleskopet har en CCD-detektor på 2048 x 2048 pixels. CCD står for Charged Coupled Device. De mange pixels, som kan spore hver enkelt foton, de rammes af, ligger på en silicium chip. Silicium er et såkaldt halvledermateriale, hvilket vil sige det har meget små båndgab mellem lednings- og valensbåndene. Silicium har også den egenskab, at det kræver meget lidt energi for at frigive en elektron. Når en foton rammer cellen frigives en elektron og flyttes fra valensbåndet over til ledningsbåndet, og man kan så bestemme antallet af indkomne fotoner ved at aflæse antallet af elektroner i ledningsbåndet⁷.

Ved observationerne blev CCD'en eksponeret i et bestemt tidsrum gennem forskellige filtre, og det digitaliserede resultat udgør vores råbillede⁸. CCD'en bliver påvirket af mere end blot fotonerne fra nattehimmelen, og vi bliver derfor nødt til at tage højde for disse instrumentale effekter ved hjælp af datareduktion.

4.2 Datareduktion - teori

⁹Det kræver ekstra dataplads at tage højde for fortegn på pixelværdierne og dette gør målingerne mere begrænsede, idet deres dynamiske range formindskes. Derfor forsøger man at undgå negativt fortegn ved at sætte en lille spænding til CCD'en ved starten af hver udlæsning. Denne spænding giver naturligvis et ekstra signal, der kaldes bias-niveauet. For at tage højde for dette, optager man en række billeder uden eksponering - biasbilleder. Derefter tages gennemsnittet af disse og resultatet trækkes fra råbilledet. For hvert råbillede er der et overscan-område, der ikke eksponeres, men stadig udsættes for den lille startspænding. Middelværdien af dette område, bruges til at optimere bestemmelsen af bias-niveauet.

Hvis detektoren ikke er tilstrækkeligt nedkølet, kan elektronerne i valensbåndet blive påvirket af termiske udsving og rive sig løs. De vil ramme detektoren og blive opfattet som et signal. Dette korrigeres der for ved at tage en serie optagelser med lang eksponeringstid og lukkeren for, så den eneste påvirkning vil være fra

⁷Hey, T. & Walters P., *The New Quantum Universe* (Cambridge 2003), p. 27

⁸Se Bilag 2

⁹Følgende teori er baseret på Bilag 3

den såkaldte mørkestrøm. Bias-niveauet trækkes fra og det er nu muligt at finde påvirkningen pr sekund for hver pixel ved at sammenligne antallet af fotoner med eksponeringstiden. Gennemsnittet af dette trækkes fra råbilledet.

Da ikke alle pixeler på CCD'en er lige følsomme, er det også nødvendigt at korrigere for dette. Derfor tages et såkaldt flatfield billede. I vores tilfælde, blev der taget et dome flatfield billede, hvilket vil sige, at teleskopet rettes mod indersiden af kuplen, som er under ensartet belysning. Derved ved vi, at hver pixel har modtaget samme lysmængde. Da følsomheden afhænger af strålingens bølgelængde, er det nødvendig at tage et flatfield billede for hver filter, man skal benytte. For at bestemme flatfield billedet med en rimelig nøjagtighed tages mindst tre billeder, hvoraf det så er muligt at finde gennemsnittet for hver pixel.

Det endelige reducerede billede fås ved, at man trækker bias-niveauet og mørkestrømspåvirkningen pr. sekund fra råbilledet, og dividerer resultatet med flatfield-billedet for det pågældende filter.

$$\text{red. billede} = \frac{\text{råbillede} - \text{biasniveau} - \text{dark} * \text{eksponeringstid}}{\text{flatfield}} \quad (2)$$

Har man flere billeder taget med det samme filter, kan man tage gennemsnitsværdien for de reducerede billeder, for at få et endnu bedre resultat.

4.3 Datareduktion - programmer

Til datareduktionen blev følgende programmer anvendt: mkBIAS, mkDARK, mkFLAT, mkReducescience og mkCombine. De blev udført i IDL¹⁰ i nævnte rækkefølge. Programmernes kode kan ses i bilag 4-8.

mkBIAS blev brugt til at beregne et gennemsnitligt biasbillede for samtlige biasbilleder, efter overscanområdet var trukket fra.

mkDARK blev brugt til at beregne den gennemsnitlige mørkestrøm for billederne, efter overscanområdet og biasniveauet var trukket fra.

mkFLAT blev brugt til at normalisere pixelcellernes følsomhed i forhold til hinanden, efter overscanområdet, biasniveauet og mørkestrømmen som funktion af eksponeringstiden var trukket fra. I starten løv vores FLAT-værdi langt under 1, hvilket gav alt for store tal når vi senere i billedbehandlingen skulle dividerer med FLAT. Problemet var, at nogle af pixelværdierne i billedet var unaturligt høje, og derfor gav et forkert resultat. Dette blev løst ved at erstatte kommandoen `mean()` med `median()` i den sidste løkke.

¹⁰IDL: Interface Definition Language

mkReducescience blev brugt til at samle op på resultaterne fra de foregående 3 programmer. Først trækker det overscan, biasniveau og mørkestrøm fra, og til sidst deler det med flatfieldværdien. Program blev kørt for hvert af de tre filtre.

mkCombine blev brugt til at kombinere billeder, som var taget med de samme filtre.

Vi reducerede og kombinerede billederne for alle filtre B, I og R, så vi kunne lave det farvebilledet vist på forsiden af rapporten, men til selve dataanalysen brugte vi kun det reducerede billede taget med filter R.

4.4 Lysfordeling og massefordeling

To pixels i CCD'en dækker 2.48 buesekunder på himmelen¹¹ hvilket svarer til $\alpha = 0.000689^0$. Idet afstanden til galaksen er $a = 6.2$ Mpc, kan forholdet d mellem pixels og kpc bestemmes:

$$\begin{aligned} d &= a \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \Leftrightarrow \\ d &= 6.2 \text{Mpc} \cdot \tan \frac{0.000689^0}{2} \Leftrightarrow \\ d &= 0.037 \text{kpc/pixel} \end{aligned} \quad (3)$$

Da vores givne rotationskurve¹² er lavet langs en akse, der er drejet 150^0 i forhold til vores billede, er vi nødt til også at dreje vores billede, så deres akser passer sammen. Til dette brugte vi programmet mkRotate.pro (se Bilag 9).

Med programmet mkLys.pro (se Bilag 10) summerede vi samtlige fotoner langs y-aksen for hvert pixelpunkt på x-aksen. Resultatet viser lysfordelingen for galaksen langs den valgte akse og kan betragtes som en funktion af afstanden fra centrum. Sættes $x=0$ for galaksens centrum, ses det, at grafen for funktionen er tilnærmelsesvis symmetrisk omkring y-aksen. Dette skyldes selvfølgelig, at lysfordelingen blev målt over hele galaksens diameter, og at vi derfor har to lysfordelinger fra centrum og ud. For at opnå et mere præcist resultat, kombinerer vi de to funktioner ved at tage gennemsnittet af de y -værdier, som har den samme afstand til centrum.

I første udgave af programmet, tog vi ikke højde for mulige forstyrrende stjerner, og vi kunne da også se et stort udsving på den ellers jævne graf, som netop indikerede en stærk lyskilde udenfor galaksen. Vi tilføjede derfor en funktion til programmet, som gjorde, at optællingen ignorerede stjerner udenfor galaksen.

¹¹Oplysningen er hentet fra <http://www.astro.ku.dk/~ijaf/schmidt/JPL-CCD.html>

¹²Rotationskurven er hentet fra <http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~sofue/h-rot.htm>

Denne funktion gjorde brug af en såkaldt maske for billedet, som med pixelværdier værende enten 0 eller 1 indikerede, hvor der henholdsvis ikke var stjerner, og hvor der var. Bemærk at masken også blev drejet 150° .

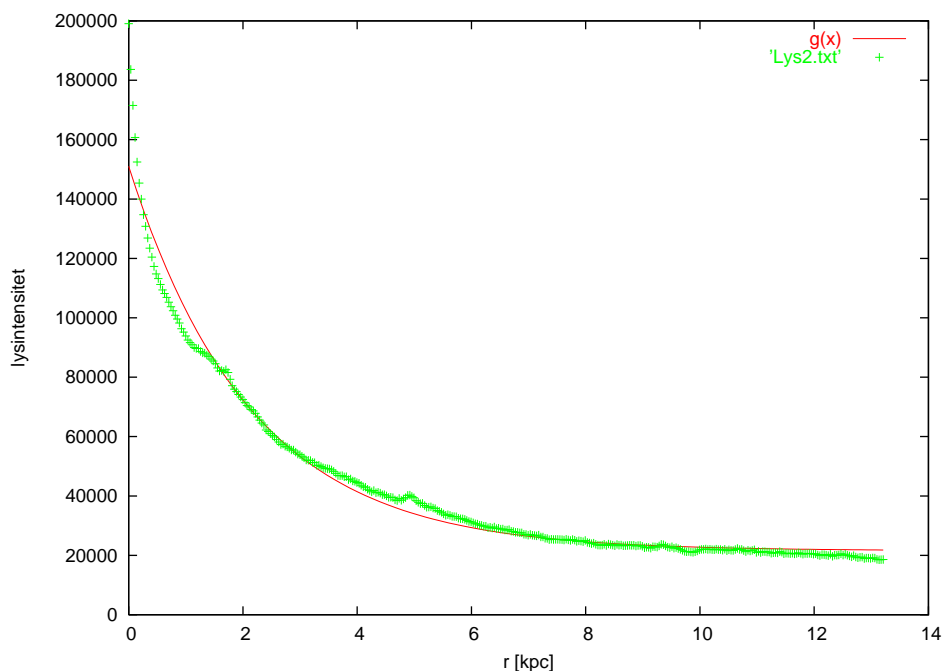
For at vise, at en del af galaksen består af mørkt stof, stater vi med at antage, at lysfordelingen er proportional med massefordelingen, hvilket tilnærmelsesvis må gælde hvis al massen er lysende. Kurven for lysfordelingen virker altså også som et udtryk for massefordelingen.

4.5 Sammenligning af massefordeling og rotationskurve

I programmet Gnuplot plottede vi punkterne for lysfordelingen med lysintensiteten som funktion af afstanden i kpc¹³. Med fit-kommandoen søgte vi at finde en funktion, der bedst muligt beskrev lysfordelingen. Denne er en funktion af formen:

$$f(r) = 129500 \cdot e^{-\frac{r}{2.14\text{kpc}}} + 21540 \quad (4)$$

Det ses at spiralgalaksens lysfordeling kan beskrives ved en eksponentialfunktion..



Figur 2: Lysintensitet som funktion af radius

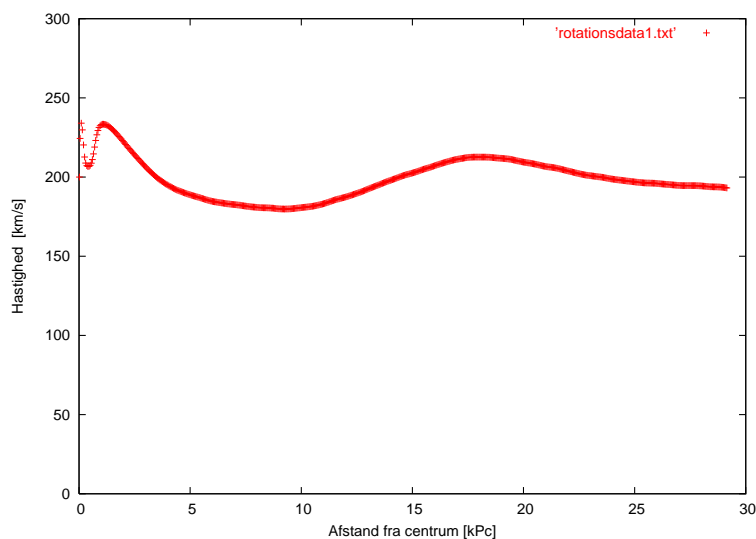
¹³De anvendte kommandoer i Gnuplot findes i bilag 9

Ved at betragte kurven for lysfordelingen (se Figur 2) ses det, at den går mod en konstant værdi på omkring 21500. Grunden til, at kurven flader ud et stykke over x-aksen, er, at vi ikke har kunnet tage højde for al baggrundslýset. En grænse på 21500 virker måske umiddelbart stor, men da det jo er summeret over 600 pixels svarer det til et baggrundslýs på omkring 30 pr. pixel. Denne værdi kunne vi verificere, ved at åbne billedet i programmet Skycat og aflæse værdien for baggrundslýset. Det vil altså sige, at kurven, når man ser bort fra baggrundslýset, går mod nul.

Kurven beskriver en galakse, hvor langt den største del af massen befinder sig indenfor en radius på 5kpc. Helt præcist kan vi ud fra funktionsforskriften se, at lysintensiteten falder med en faktor e for ikke mere end ca. 2 kpc. Det ubestemte integrale af funktionen er:

$$F(r) = -276710 \cdot e^{-\frac{r}{2.14kpc}} \quad (5)$$

Ved at sammenligne det bestemte integrale fra x=0 kpc til x=5 kpc med det bestemte integrale fra x=0 kpc til x=14 kpc ser vi, at over 90 procent af lyset, og dermed massen, ligger indenfor en radius af 5kpc¹⁴. Vi må altså forvente, at kvadratet på rotationshastigheden ifølge ligning (4) i afsnit 3.1 er omvendt proportionalt med radien længere ude end 5kpc .



Figur 3: Rotationshastighed som funktion af radius

På rotationskurven (Figur 3) ses det, at funktionen som forventet viser størst udslag inde omkring centrum. Dette skyldes som nævnt i afsnit 3.1, at massen in-

¹⁴Se bilag 10

denfor cirkelbevægelsen i forhold til den udenfor ikke udgør en betydelig del. Længere væk fra centrum går rotationshastigheden derimod mod en konstant værdi, hvilket ikke stemmer overens med vores lysfordelingsfunktion. Tværtimod indikerer den, at der ligger mere masse længere ude fra centrum ind vi umiddelbart kan se - ellers ville stjernerne (og gasskyernes) hurtige bevægelser omkring galakens centrum så langt ude slet ikke kunne lade sig gøre. Denne usynlige masse kaldes mørkt stof.

4.6 Fejkilder og usikkerheder

Usikkerheder

Usikkerheden i afstanden til galaksen medfører, at der også er en usikkerhed i vores beregnede forhold mellem kpc og pixel, d^{15} . Vi kender ikke til usikkerheden på hvor mange buesekunder af himmelen, de to pixel dækker, men da usikkerheden på afstanden ($6.2 \text{ Mpc} \pm 0.7$) er over 10%, antager vi, at den har langt den største indflydelse. Vi kan altså se bort fra usikkerheden på buesekunderne. Vi kan beregne usikkerheden på d ud fra ophobningsloven:

$$S_d = \sqrt{\left(\frac{\delta d}{\delta a} \cdot S_a\right)^2} \quad (6)$$

hvor S_d er forholdet mellem kpc og pixel, a er afstanden til galaksen og $S_a = 0.7 \text{ Mpc}$ er usikkerheden på afstanden. Den afledede af d med hensyn til a er:

$$\frac{\delta d}{\delta a} = \frac{\delta(a \cdot \tan \frac{\alpha}{2})}{\delta a} = \tan \frac{\alpha}{2} \quad (7)$$

Usikkerheden på d er da:

$$\begin{aligned} S_d &= \sqrt{\left(\frac{\delta d}{\delta a} \cdot S_a\right)^2} \Leftrightarrow \\ S_d &= \sqrt{\left(\tan \frac{\alpha}{2} \cdot 700 \text{ kpc}\right)^2} \Leftrightarrow \\ S_d &= 0.0042 \text{ kpc/pixel} \end{aligned} \quad (8)$$

d er altså givet ved $0.037 \text{ kpc/pixel} \pm 0.0042$, hvilket svarer til ca. 8.8%. Vi undersøger hvor meget denne usikkerhed kan påvirke vores resultater ved forsøgsvis at indsætte de to ekstremer, $0.037 \text{ kpc/pixel} \pm 0.0042$, i programmet Lys.pro. Som resultat får vi nu to nye lysfordelingskurver. Disse fittes i Gnuplot. Vi kan se på de to nye funktioner for lysfordelingen, at der stort set ingen ændring er. For den

¹⁵Ligning (3), afsnit 4.4

størst mulige værdi af d er den eneste ændring en forøgelse af b med 1 på det sjette decimal, mens der for den mindst mulige værdi af d slet ingen ændring er at se. Vi kan altså konkludere, at usikkerheden på d ikke påvirker vores resultater i betydelig grad.

Usikkerheden på den givne rotationskurve kendes ikke. Vi har altså ikke nogen ide om hvor mange stjerner, der er blevet målt på, og hvordan det har påvirket kurvens udsving. Dog ser det umiddelbart ud til, at antallet af målepunkter er tilstrækkeligt, idet det er en glat og sammenhængende kurve. Det vil sige at usikkerheden ikke burde påvirke resultatet markant.

Fejlkilder

Da pixelerne kun kan indeholde en vis mængde information, risikerer de at blive overeksponerede, hvis de modtager for meget lys. Det har ikke været det store problem i dette forsøg, bortset fra et par enkelte pixels inde i galaksens centrum. Vi har heller ikke kunne tage højde for lys fra eventuelle stjerner, der ligger i linje mellem jorden og NGC 4285, men da dette netop skulle resultere i mere modtaget lys, og vi fandt en distinkt mangel på lys, har dette ikke påvirket resultatet betydeligt.

Vi så i afsnit 4.5, at baggrundsstrålingen forskød grafen for lysfordelingen omkring 20000 enheder op af y -aksen. Dette skyldes, at vi ikke har taget højde for al baggrundsstrålingen i programmet `mkLys.pro`, men da det ikke ændrer på funktionens udseende, har det ikke påvirket vores resultater betydeligt.

Fejlkilder stammende fra CCD'en er gennemgået og behandlet i afsnit 4.2 og 4.3.

Vi startede med at antage, at stjernesystemerne bevæger sig i en cirkelbane omkring centrum, hvilket de selvfølgelig kun gør tilnærmelsesvist. Der vil altså forekomme en afvigelse i resultaterne, afhængig af hvor elliptisk stjernernes baner er. Denne vurderes til at ligge på omkring 20-30%, dog er den ikke stor nok til at ændre resultaterne radikalt. Der kan altså stadig konkluderes en mangel af stof, på trods af afvigelsen.

5 Perspektivering

5.1 Mørkt stof

Da vi nu har påvist, at der i galakserne findes en betydelig mængde stof, der er ikke-lysende, eller mørkt, er det næste spørgsmål, der melder sig: Hvad er dette mørke stof?

I følgende afsnit vil vi behandle netop dette spørgsmål og give nogle bud på mulige kandidater, da det er et endnu uløst spørgsmål i kosmologien. Det mørke

stof kan jo som sagt være næsten alt bortset fra stjerner, der jo udgør den lysende masse i galakserne. Traditionelt deler man kandidater til mørkt stof op i to hovedkategorier, nemlig baryonisk og ikke-baryonisk stof.

5.2 Baryonisk mørkt stof

Oprindeligt refererede baryoner til "tunge"partikler som protoner og neutroner i modsætning til de "lette"elektroner, der gik under betegnelsen leptoner. Når vi snakker om baryonisk stof i forbindelse med mørkt stof, mener vi derimod både protoner, neutroner og elektroner i modsætning til de andre partikler, som vi endnu ikke helt ved, hvad er. En væsentlig forskel på baryonisk og ikke-baryonisk stof er, at baryonisk stof vekselvirker elektromagnetisk, mens ikke-baryonisk ikke gør, hvilket gør baryonisk stof nemmere for os at detektere end ikke-baryonisk stof.

En kandidat til det mørke stof er de såkaldte MACHOs, som står for Massive Compact Halo Objects. Det er basalt set legemer, der ikke lyser kraftigt nok til at indgå i vores masseberegning, såsom exoplaneter, røde og brune dværgstjerner. I teorien kunne disse objekter findes i tilstrækkelig antal til, at de kunne udgøre om ikke alt det mørke stof, så i det mindste en væsentlig del. Hvis vi tænker os om, kan vi dog hurtigt udelukke exoplaneter. Hvis vi regner solsystemet som værende rimeligt repræsentativt, ses det hurtigt, at massen af planeterne i et system er ubetydelig i forhold til massen af stjernen, idet Solen udgør 98% af massen i Sol-systemet (se bilag 9). Selv hvis alle stjerner havde et planetsystem, hvilket ikke er sandsynligt, ville den samlede masse af planeterne være ubetydelig i forhold til den lysende masse, og derfor et ubetydeligt bidrag til den mørke masse.

Udover MACHOs er også gasskyer en kandidat til det mørke stof. Teorien er at gasskyerne ikke er kompakte nok til at kunne lyse. Men da gasskyerne jo godt kan være tætte og store, ville de derfor kunne give et vigtigt bidrag til det mørke stof. Gasskyerne findes ved observation af kendte stjerners emissionsspektrum. Hvis der ligger en gassky mellem stjernen og jorden, vil der være en tydelig linje ved hydrogen, da de fleste af disse skyer består af hydrogen. Observationer har dog vist, at selv i store hobe er mængden mindre end 20% af mørke stof¹⁶, hvilket jo så påkræver i hvert fald yderligere én form for mørkt stof.

Generelt er en af problemerne med baryonisk mørkt stof, at man simpelthen ikke kan finde nok af det til, at det kan gøre rede for alt det mørke stof. De røde dværgstjerner, der ellers har været en populær kandidat, har vist sig ikke at udgøre mere end 6% af det mørke stof i haloen¹⁷. De brune dværgstjerner, der ikke er kompakte nok til at forbrænde hydrogen, observeres som gravitationelle linser, dvs de forstærker lyset fra en given stjerne, når de passerer mellem denne og jorden.

¹⁶Spergel, D., Particle Dark Matter' (Princeton University Press 1997), p. 222

¹⁷Particle Dark Matter, p. 222

Det er altså muligt at undersøge hyppigheden af disse, og dermed bestemme om de brune dværgstjerner er en god kandidat til det mørke stof.

Et andet problem med, at det mørke stof udelukkende skulle bestå af baryonisk stof, er, at teorierne for dannelse af struktur på stor skala kun holder, hvis en del af det mørke stof er ikke-baryonisk. Modeller hvori universet kun består af baryonisk stof og fotoner passer ikke med de observationer af den kosmiske baggrundsstråling, der er gjort. Desuden har man fundet ud af, at de modeller, der passer bedst med den kosmiske baggrundsstråling og andre vigtige parametre som universets alder, H_0 (Hubblekonstanten) og stor skala hastigheder, har en total massetæthed ti gange større end tætheden af baryoner, hvilket kraftigt tyder på, at en del af det mørke stof må være ikke-baryonisk¹⁸.

Et tredje argument¹⁹ mod mørkt stof udelukkende bestående af baryonisk stof har at gøre med Big Bangs nukleogenese eller BBN, hvilket er den periode efter Big Bang, hvor de tungere grundstoffer som Deuterium, Helium og Lithium blev dannet. Hvis den observerede mængde af disse stoffer skal stemme overens med observationer skal den totale massetæthed være meget større end massetætheden af baryonisk stof. Problemet med dette argument er, at usikkerheden på bestemmelsen af forholdet mellem grundstoffer er ret høj, da disse stoffer også udsendes fra stjernerne, og forholdet mellem antallet af de tre grundstoffer bliver således ændret i forhold til det oprindelige forhold. Altså skal observationerne korrigeres for fejl fra "stjerne-grundstoffer".

I alt kan vi se, at der er mange argumenter for at størstedelen af det mørke stof må være ikke-baryonisk.

5.3 Ikke-baryonisk mørkt stof

Problemet med ikke-baryonisk mørkt stof er, at det er forfærdeligt svært at påvise eksistensen af. Dette skyldes, som før nævnt, at ikke-baryonisk stof ikke vekselvirker elektromagnetisk, og de fleste af de metoder, vi har til at påvise tilstedeværelsen af en given partikel, bygger på, at partiklen vekselvirker elektromagnetisk. Derfor er det ikke-baryoniske stof stadig ikke uafhængigt, empirisk eftervist.

En undtagelse herfor er neutrinoen. Denne partikel dannes i enorme mængder i stjernernes kerneprocesser, og det burde derfor være relativt simpelt at påvise eksistensen af bare en enkelt eller to, men det faktum, at der gik 24 år fra den teoretiske forudsigelse af neutrinoen til en eksperimentel påvisning²⁰, vidner om, at det ikke er en helt simpel ting at gøre. I og med at neutrinoen findes i så rigelige mængder, som det er tilfældet, ville den stort set egenhændigt kunne forklare

¹⁸Particle Dark Matter, p. 223

¹⁹De tre argumenter mod baryonisk mørkt stof er inspireret af Particle Dark Matter', p. 221-225

²⁰Goldsmith, D., Det kosmiske puslespil (Fremad 1997, p. 142

tilstedeværelsen af mørkt stof. Hvis de har en tilstrækkelig stor masse. Dette er nemlig det store problem. Har neutrinoen en masse og er den i så fald stor nok til at kunne forklare det mørke stof, eller er den masseløs? Dette spørgsmål er endnu ikke endegyldigt besvaret, men efter den første påvisning af neutrinoens masse i 1995²¹ er den blevet påvist flere gange, og idag går uenigheden mest ud på hvor stor massen af neutrinoen er. Los Alamos-gruppen, der i 1995 eksperimentelt viste, at neutrinoen har en masse, mente at have vist, at ligger mellem 10^{-5} og 10^{-6} af elektronmassen. Såfremt neutrinoens masse ligger i den øvre ende af denne skala, vil den samlede masse af neutrinoer være omkring fire gange så stor som massen af alt det synlige stof og dermed udgøre omkring halvdelen af alt mørkt stof²². Det vil sige at selv om neutrinoen sandsynligvis udgør en del af det mørke stof, kan den ikke forklare det hele, så det kan vise sig nødvendig at inkludere mere end blot een slags partikler i teorien for det mørke stof.

En anden type ikke-baryonisk mørkt stof er de såkaldte WIMPs, eller svagt vekselvirkende massive partikler (Weakly Interacting Massive Particles). WIMPs er ikke en enkelt type partikel, men nærmere en hel klasse, hvor fællesnævneren er, at partiklerne kun vekselvirker svagt med andet stof, hvilket igen gør det svært at iagttage dem. Derudover skal det selvfølgelig nævnes, at de har en masse, da de ellers ikke ville være meget bevendt som forklaring på det mørke stof. Indtil videre eksisterer WIMPs blot i teorien, da det ikke har været muligt at påvise nogen af dem endnu. I teorien blev WIMPs dannet i det tidlige univers ved et elektron-positron sammenstød, der resulterede i dannelsen af en WIMP og dens antipartikel. I det tidlige univers, hvor temperaturen var tilstrækkelig høj har antallet af WIMPs været sammenlignelige med antallet af baryoniske partikler, men efterhånden som temperaturen er faldet er dannelsen af WIMPs ophørt og dermed falder antallet af dem, da de stadig annihileres i en proces, der er omvendt i forhold til den førnævnte. Tilsidst er der så få WIMPs tilbage pr. volumen af universet, at deres halveringstid bliver meget stor, og antallet af WIMPs er derefter konstant. På trods af der er så relativt få WIMPs i universet er deres masse så stor (mellem et par GeV og et par hundrede GeV, til sammenligning er massen af en proton ca. 0.93 GeV²³), at de tilsammen kan have en betydelig effekt. De er dog, som før nævnt, endnu ikke påvist eksperimentelt, men der er mange eksperimenter undervejs, så hvis de eksisterer uden for teorien, skulle det være muligt for de eksperimentelle astronomer og partikelfysikere at finde dem indenfor en årerække.²⁴

Som det ser ud indtil videre er neutrinoer det bedste bud på ikke-baryonisk mørkt stof, men med de nye lovende eksperimenter²⁵, er der grund til at være

²¹Det Kosmiske Puslespil, p. 142

²²Det Kosmiske Puslespil, p. 142-143

²³Kompendium i fysik, p. 37

²⁴De to afsnit er inspireret af Particle Dark Matter, p. 227

²⁵Particle Dark Matter, 229-231

optimistisk.

6 Konklusion

Under observation af galaksen NGC 4258 tog vi en række billeder, som vi reducerede med forskellige programmer. Gennem analyse af det resulterende billede kunne vi lave en graf, der beskriver lysfordelingen i galaksen som funktion af afstanden fra centrum langs en valgt akse. Denne sammenlignede vi med en given rotationskurve lagt over samme akse, og vi kunne se, at bevægelserne i galaksen ikke stemte overens med lysfordelingen og dermed heller ikke med massefordelingen. Uoverensstemmelsen, konkluderede vi, må skyldes en mangel på observeret stof. Der findes altså ikke-lysende stof i galaksen, såkaldt mørkt stof. Det vides endnu ikke hvad dette mørke stof er på trods af ihærdig forskning. Indtil videre forventes det at være ikke-baryonisk stof. En god kandidat til ikke-baryonisk stof er neutrinoen, som findes i store mængder i universet, og som både er påvist og har en masse.

Gennem arbejdet med rapporten har vi stiftet bekendtskab med flere programmer, heriblandt Skycat og Gnuplot. Vi har beskæftiget os en hel del med at lave små programmer i simple scripts til IDL, som har vist sig at være et stærkt værktøj indenfor billedbehandling. Vi har skulle afsætte en hel del mere tid til rapporten end forventet, især til programmerne til databehandlingen, hvilket der heldigvis var plads til, da vi kom ud at observere temmelig tidligt i forløbet. Programmerne har været svære at arbejde med, men vejledernes hjælp gjorde det nemmere at håndtere.

7 Referenceliste

Bøger

Freedman, N.F. & Kaufmann, W.J., "Universe", 7th edition (New York: W.H. Freeman & Co. 2004), ISBN 0-7167-9884-0

Binney & Merrifield, "Galactic Astronomy"(Princeton University Press 1998), ISBN 0-691-00402-1

Dam, M., "Introduktion til den specielle relativitetsteori"(Niels Bohr Institutet 2004)

Hey, T. & Walters P., "The New Quantum Universe"(Cambridge 2003), ISBN 0-521-56457-3

Spergel, D., "Particle Dark Matter" in Bahcall & Ostriker: "Unsolved Problems in Astrophysics"(Princeton University Press 1997), ISBN 0-691-01607-0

Goldsmith, D., "Det Kosmiske Puslespil"(Fremad 1997), ISBN 87-557-2035-8

"Kompendium i Fysik", 4. udgave (Fysikforlaget 1994), ISBN 87-7792-003-1

Internetsider

<http://www.astro.ku.dk/~ijaf/schmidt/JPL-CCD.html>

<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~sofue/h-rot.htm>

8 Bilag

8.1 Observationsoversigt

Objekt	Filter	Eksponerings-tid [sek]	Starttid
BIAS	-	0	21:23:51, 07/02/05
BIAS	-	0	03:49:47, 08/02/05
BIAS	-	0	01:04:40, 09/02/05
DARK	-	400	21:29:47, 07/02/05
DARK	-	450	21:37:40, 07/02/05
DARK	-	400	22:08:35, 07/02/05
DARK	-	500	02:07:04, 08/02/05
DARK	-	25	04:44:40, 08/02/05
DARK	-	20	04:46:25, 08/02/05
DARK	-	60	04:47:53, 08/02/05
DARK	-	500	04:50:10, 08/02/05
DARK	-	450	20:46:22, 08/02/05
DARK	-	400	20:53:10, 08/02/05
DARK	-	300	21:38:57, 08/02/05
DARK	-	500	01:10:45, 09/02/05
DOME FLAT	I	25	03:56:05, 08/02/05
DOME FLAT	R	20	04:00:40, 08/02/05
DOME FLAT	B	500	04:12:40, 08/02/05
NGC 4258	R	300	22:45:15, 07/02/05
NGC 4258	R	300	22:54:00, 07/02/05
NGC 4258	R	300	23:00:35, 07/02/05
NGC 4258	I	300	23:06:55, 07/02/05
NGC 4258	I	300	23:13:13, 07/02/05
NGC 4258	B	500	23:20:11, 07/02/05
NGC 4258	B	500	23:23:43, 07/02/05
NGC 4258	R	300	21:58:10, 08/02/05
NGC 4258	R	300	22:04:24, 08/02/05
NGC 4258	I	300	22:10:50, 08/02/05
NGC 4258	I	300	22:14:20, 08/02/05
NGC 4258	B	500	22:26:26, 08/02/05
NGC 4258	B	500	22:56:53, 08/02/05

8.2 Keplers love i spiralgalakser

Kepler opstillede tre love for himmellegemers bevægelse. Da Kepler levede fra 1571-1630, altså længe før man blev opmærksom på galakser og deres strukturer, var lovene lavet med tanke på at beskrive planeternes bevægelse om Solen. Men da stjernerne i en spiralgalakse som nævnt bevæger sig på en tilsvarende måde, kan man anvende Keplers love til at beskrive deres bevægelse.

De tre love er som følger:

1. Hver planet bevæger sig i en elliptisk bane med Solen i det ene brændpunkt.
2. En linie mellem Solen og en givet planet overstryger lige store arealer i lige store tidsrum
3. Kvadratet på hver planets periode er proportional med kuben på den halve storakse af dens omløb.

Den første lov er meget ligefrem, omend den var noget kontroversiel, da den blev fremsat første gang. I forbindelse med galakser vil det sige, at hvert stjernesystem bevæger sig i en elliptisk bane med galaksens centrum i det ene brændpunkt. Den elliptiske bane for stjernerne i en spiralgalakse kan dog tilnærmelsesvis betragtes som en cirkelbevægelse. Vi har altså, at galaksens midte ikke er systemets ene brændpunkt, men selve dets centrum.

For et solsystem vil den anden lov betyde, at planeten vil bevæge sig hurtigere, jo tættere den befinder sig på solen. Denne lov kan ikke overføres på galakser, idet stjernernes bevægelser er langt mere komplekse, da massen ikke er koncentret i et punkt i midten, som i et solsystem, men ligger spredt ud indenfor bevægelsescirklen.

Den tredje lov kan hjælpe os med at bestemme hastigheden af et givet stjernesystem i forhold til dets afstand fra centrum af galaksen. Kepler's tredje lov kan også skrives som:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{G \cdot (M + m) \cdot a^3} \quad (9)$$

hvor T er omløbsperioden, G er gravitationskonstanten, M er massen af det legeme, legemet med massen m bevæger sig om, og a er den halve storakse. I vores tilfælde er altså a lig radien, r , af stjernens bevægelse. I tilfældet med stjerners bevægelse i spiralgalakser er stjernernes masse forsvindende i forhold til massen i centrum af galaksen: $M \gg m \Rightarrow M+m \approx M$. Vi har altså:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{G \cdot M \cdot r^3} \quad (10)$$

For en cirkelbevægelse gælder det at:

$$T = \frac{2\pi r}{v} \quad (11)$$

hvor v er hastigheden af det legeme, der laver cirkelbevægelsen. Indsættes ligning (10) i (11) får vi:

$$\frac{4\pi^2 r^2}{v^2} = \frac{4\pi^2}{G \cdot M \cdot r^3} \Leftrightarrow$$
$$v^2 = \frac{G \cdot M}{r} \quad (12)$$

8.3 Datareduktion med IDL

1

8.4 Program: mkBIAS.pro

;Der defineres 3 variabler: nframes, som fortæller hvor mange billeder det skal køre igennem, og xsize og ysize, som angiver billedernes dimensioner

```
nframes = 18
xsize = 2060
ysize = 2048
```

;Filen "BIAS.LIST", som indeholder stier til alle biasbillederne, åbnes

```
openr,1,'BIAS.LIST'
filename = strarr(1)
```

;Et array, vis argumenter består af de 3 variabler, laves

```
bigbias = fttarr(nframes,xsize,ysize)
```

;En løkke, som først beregner en værdi for overscanområdet og dernæst trækker den fra råbilledet, køres

```
for n=0,nframes-1 do begin
  readf,1,filename
  bigbias(n,*,*) = readfits(filename,header)
  print,'Read '+filename
  overscan = mean(bigbias(n,4:11,0:2047))
  bigbias(n,*,*) = bigbias(n,*,*)-overscan
  print,'Subtracted overscan of ',overscan
endfor
close,1
```

;En løkke, som beregner pixelmiddelværdierne for det nye billede, køres

```
BIAS = fttarr(xsize,ysize)
for nx = 0,xsize-1 do begin
  for ny = 0,ysize-1 do begin
    BIAS(nx,ny) = median(bigbias(*,nx,ny))
  endfor
endfor
print,'Calculated the master BIAS'
```

;Resultatet gemmes i filen "BIAS.fits"

```
writefits,'BIAS.fits',BIAS,header
print,'Wrote fits image with header equal to the header of the last bias frame'
end
```

8.5 Program: mkDARK.pro

;Der defineres 3 variabler: nframes, xsize og ysize

```
nframes = 12
```

```
xsize = 2060
```

```
ysize = 2048
```

;Filen "DARK.LIST", som indeholder stier til alle darkbillederne, åbnes

```
openr,1,'DARK.LIST'
```

```
filename = strarr(1)
```

;Et array, vis argumenter består af de 3 variabler, laves, og BIAS.fits-filen hentes

```
bigdark = ftarr(nframes,xsize,ysize)
```

```
BIAS = readfits('BIAS.fits')
```

;En løkke, som først beregner overscan og trækker det fra, dernæst trækker BIAS.fits-billedet fra og til sidst dividerer det resterende antal pixels med eksponeringstiden, køres. Vi har nu en darkværdi for hvert billede window,xsize=16,ysize=512

```
for n=0,nframes-1 do begin
```

```
readf,1,filename
```

```
bigdark(n,*,*) = readfits(filename,header)
```

```
print,'Read '+filename
```

```
overscan = mean(bigdark(n,4:11,0:2047))
```

```
tvsc1, bigdark(n,4:11,0:2047)
```

```
bigdark(n,*,*) = bigdark(n,*,*)-overscan-BIAS
```

```
print,'Subtracted BIAS and overscan of ',overscan
```

```
expt = smpar(header,'EXPTIME')
```

```
bigdark(n,*,*) = bigdark(n,*,*)/expt
```

```
print,'Normalised by dividing with an exposure time of ',expt
```

```
endfor
```

```
close,1
```

;En løkke, som beregner gennemsnittet af darkværdierne for billederne, køres

```
DARK = ftarr(xsize,ysize)
```

```
for nx = 0,xsize-1 do begin
```

```
for ny = 0,ysize-1 do begin
```

```
DARK(nx,ny) = median(bigdark(*,nx,ny))
```

```
endfor
```

```
endfor
```

```
print,'Calculated the master dark'
```

```
;Resultatet gemmes i filen "DARK.fits"  
writefits,'DARK.fits',DARK,header  
print,'Wrote fits image with header equal to the header of the last flat frame'  
  
end
```

8.6 Program: mkFLAT.pro

;Der defineres 3 variabler: nframes, xsize og ysize

```
nframes = 3
```

```
xsize = 2060
```

```
ysize = 2048
```

;Filen "FLAT.LIST", som indeholder stier til alle flatbillederne for et pågældende filter, åbnes

```
openr,1,'FlatI.LIST'
```

```
filename = strarr(1)
```

;Et array, vis argumenter er de 3 variabler, laves, og BIAS.fits- og DARK.fits-filerne hentes

```
bigflat = ftarr(nframes,xsize,ysize)
```

```
BIAS = readfits('BIAS.fits')
```

```
DARK = readfits('DARK.fits')
```

;En løkke, der beregner overscan og trækker det og BIAS.fits og DARK.fits ganget med eksponeringstiden fra, samt dividerer det resulterende billede med pixelmidelværdien i et område for hvert billede, køres

```
window,xsize=16,ysize=512
```

```
for n=0,nframes-1 do begin
```

```
  readf,1,filename
```

```
  bigflat(n,*,*) = readfits(filename,header)
```

```
  print,'Read '+filename
```

```
  overscan = mean(bigflat(n,4:11,0:2047))
```

```
  tvscl,bigflat(n,4:11,0:2047)
```

```
  bigflat(n,*,*) = bigflat(n,*,*)-overscan-BIAS
```

```
  print,'Subtracted BIAS and overscan of ',overscan
```

```
  expt = sxpar(header,'EXPTIME')
```

```
  bigflat(n,*,*) = bigflat(n,*,*)-expt*DARK
```

```
  print,'Subtracted DARK with an exposure time of ',expt
```

```
  norm = median(bigflat(n,500:1500,500:1500))
```

```
  bigflat(n,*,*) = bigflat(n,*,*)/norm
```

```
  print,'Normalised by dividing with a level of ',norm
```

```
endfor
```

```
close,1
```

;En løkke, der beregner gennemsnitsværdien af disse billeder, køres

```
for nx = 0,xsize-1 do begin
```

```
for ny = 0,ysize-1 do begin
  FLAT(nx,ny) = median(bigflat(*,nx,ny))
endfor
endifor
print,'Calculated the master Flat'

;Resultatet gemmes i filen FLAT.fits
writefits,'FlatI.fits',FLAT,header
print,'Wrote fits image with header equal to the header of the last flat frame'

end
```

8.7 Program: mkReducescience

```
;Der defineres 3 variabler: nframes, xsize og ysize
nframes = 4
xsize = 2060
ysize = 2048

;De ønskede navne på resultatfilerne defineres
Outnames = ['NGC 4258_1B','NGC 4258_2B','NGC 4258_3B','NGC 4258_4B']

;Filen "*.LIST", som indeholder stier til alle billederne for et pågældende filter,
åbnes
openr,1,'NGC 4258/B/B.LIST'
filename = strarr(1)

;Et array, vis argumenter er de 3 variabler, laves, og BIAS.fits-, DARK.fits- og
FLAT.fits-filerne hentes
bigscience = ftarr(nframes,xsize,ysize)
BIAS = readfits('BIAS.fits')
DARK = readfits('DARK.fits')
Flat = readfits('FlatB.fits')

;En løkke, der trækker overscan, BIAS.fits og DARK.fits ganget med eksponer-
ingstiden fra billedet og derefter dividerer med FLAT.fits for hvert billede, køres.
Resultatet gemmes
im = ftarr(xsize,ysize)
;Read in the frames, subtract overscan and BIAS, and divide by Flat
for n=0,nframes-1 do begin
readf,1,filename
bigscience(n,*,*) = readfits(filename,header)
print,'Read '+filename
overscan = mean(bigscience(n,4:11,0:2047))
bigscience(n,*,*) = bigscience(n,*,*)-overscan-BIAS
print,'Subtracted BIAS and overscan of ',overscan
expt = sxpar(header,'EXPTIME')
bigscience(n,*,*) = bigscience(n,*,*)-expt*DARK
print,'Subtracted DARK assuming with an exposure time of',expt
bigscience(n,*,*) = bigscience(n,*,*)/Flat
print,'Divided with the Flat-field images'
im(*,*) = bigscience(n,*,*)
writefits,Outnames(n)+'.fits',im[30:2050,20:2040],header
```

```
endfor  
close,1  
  
end
```

8.8 Program: mkCombine

;Der defineres 3 variable: nframes, xsize og ysize

```
nframes = 4
```

```
xsize = 2021
```

```
ysize = 2021
```

;De pågældende billednavne listes

```
Outnames = ['$NGC 4258_1I','NGC 4258_2I','NGC 4258_3I','NGC 4258_4I']
```

;En funktion, der kombinerer billederne køres. Hvert billede åbnes, og et punkt, der er det samme for alle billeder vælges manuelt (indenfor en margin på 50x50 pixels), så computeren kan lægge dem rigtigt sammen. For hver pixel findes en gennemsnitsværdi

```
xpos = findgen(nframes)
```

```
ypos = findgen(nframes)
```

```
for n=0,nframes-1 do begin
```

```
image = readfits(Outnames(n)+'.fits',header)
```

```
image = image(200:600,100:500)
```

```
x = [0,n_elements(image(0,*))]
```

```
y = [0,n_elements(image(0,*))]
```

```
window, xs=1.5*n_elements(image(0,*)), ys=1.5*n_elements(image(0,*))
```

```
a = max(image)-image
```

```
mina=max(image)-mean(image)-6000
```

```
maxa=max(image)-mean(image)+250.
```

```
top=255
```

```
sz = SIZE(a)
```

```
IF N_ELEMENTS(top) EQ 0 THEN top = 255
```

```
IF N_ELEMENTS(maxa) EQ 0 THEN maxa = MAX(a)
```

```
IF N_ELEMENTS(mina) EQ 0 THEN mina = MIN(a)
```

```
PLOT,[[0,0],[1,1]],/nodata,xstyle=4,ystyle=4,$
```

```
xtitle=",ytitle=",title=",$
```

```
xtickname=[' ',' ',' ',' ',' ',' ',' '],$
```

```
position=[0.05,0.05,0.95,0.95]
```

```
px = !x.window * !d.x_vsize
```

```
py = !y.window * !d.y_vsize
```

```
swx = px(1) - px(0)
```

```
swy = py(1) - py(0)
```

```
six = FLOAT(sz(1))
```

```
siy = FLOAT(sz(2)) aspi = 1.0*six / siy
```

```
aspw = swx / swy
```



```
for nx=0,xnewsize-1 do begin
for ny=0,ynewsize-1 do begin
nxoff = fix(xpos(n)-xmeanpos+0.5)+60.
nyoff = fix(ypos(n)-ymeanpos+0.5)+60.
comb(nx,ny) = comb(nx,ny)+image(nx+nxoff,ny+nyoff)
endfor
endfor
endfor

comb = comb/nframes

;Resultatet gemmes
writefits,'NGC 4258I_comb.fits',comb,header

end
```

8.9 Program: mkRotate.pro

```
;Stien til billedfilen og filnavnet på resultatet defineres
fitsin = ['NGC 4258_B/NGC 4258B_comb.fits']
fitsout = ['drejB.fits']

;Billedet hentes
oldim = readfits(fitsin, oldhd)

;Billedet drejes 150°
getrot, oldhd, angle
hrot, oldim, oldhd, newim, newhd, 150, -1, -1, 2, MISSING=0

;Det nye billede gemmes
writefits, fitsout, newim, newhd

end
```

8.10 Program: mkLys.pro

```
;Billedet og dets tilsvarende maske indlæses
billedR = readfits('drejR.fits')
MaskR = readfits('drejMR.fits')

;Grænserne for det stykke af billedet, der skal måles over, defineres. De vælges
symmetrisk lige langt fra galaksens centrum
ncols = 358
nrows = 300
x1 = 458-ncols
x2 = 458+ncols
y1 = 577-nrows
y2 = 577+nrows

;Navnet på de to outputfiler defineres
openw,1,'Lys.LIST'
openw,2,'Lys2.LIST'
filename = strarr(1)
results = ftarr(2,2*ncols+1)

;Baggrunden trækkes fra
billedR = billedR-420.

;Y-værdierne summeres langs x-aksen (der tages forbehold for maskeværdierne)
og resultatet gemmes. Inden resultatet gemmes omregnes afstandsvariabel fra pix-
els til kpc
for x=x1,x2 do begin
results(0,x-x1) = x
ii = where(MaskR(x,y1:y2) NE 0)
if (n_elements(ii) GE 2) then begin
print,x,min(ii+y1)
billedR(x,y1+ii) = 0.
endif
results(1,x-x1) = total(billedR(x,y1:y2))
z = (x-458)*0.037
k = total(billedR(x,y1:y2))
printf,1,z,k
endfor

;Resultatet plottes
```

```

plot,results(0,*),results(1,*),yra=[0,2e5]

close,1

;Den kombinerede lysfordelingskurve laves og gemmes
nhalf = n_elements(results(0,*))/2
radius = findgen(nhalf)
average = ftarr(nhalf)
for n=0,nhalf-1 do begin
average(nhalf-n-1) = (results(1,n)+results(1,358+nhalf-n))/2. r = radius(nhalf-n-
1)*0.037
printf,2,radius(nhalf-n-1),average(nhalf-n-1)
endfor
close,2

end

```

8.11 Kommandoer i Gnuplot

```
#Funktionen defineres:
```

```
>f(x)=a*exp(b*x)+c
```

```
#Der gives en vurdering af variablerne:
```

```
>a= 30000
```

```
>b= -0.5
```

```
>c= 20000
```

```
#Funktionen fittes til data:
```

```
>fit f(x) 'Lys2.txt' via c,d,e
```

```
#Programmet returnerer følgende resultat:
```

```
>Final set of parameters Asymptotic Standard Error
```

```
>=====
```

```
>
```

```
>a = 129503 +/- 1195 (0.9231%)
```

```
>b = -0.468365 +/- 0.008317 (1.776%)
```

```
>c = 21541.4 +/- 399 (1.852%)
```

```
>
```

```
>
```

```
>correlation matrix of the fit parameters:
```

```
> c d e
```

```
>c 1.000
```

```
>d -0.502 1.000
```

```
>e -0.027 -0.670 1.000
```

```
#Til sidst plottes fittet og data sammen:
```

```
>plot f(x), 'Lys2.txt'
```

8.12 Integrale af lysfordelingsfunktionen

Funktionen defineres. Da fittet blev lavet, måtte vi lægge omkring 20000 til forskriften at få denne til at passe, dette er nu ikke nødvendigt, da det er interessant at integrere, hvor funktionen går mod nul for x gå ende mod uendelig:

```
>f(x):=129503*exp(-0.468364*x);
```

Det ubestemte integral findes:

```
>int(f(x),x);
```

Herefter findes de bestemte integraler for $x=0$ kpc til $x=5$ kpc og for $x=0$ kpc til $x=14$ kpc (der ganges med to, da tallet for hele og ikke blot den halve galakse ønskes):

```
>2*int(f(x),x=0..5);  
499829.0440
```

```
>2*int(f(x),x=0..14);  
552216.2476
```

For at finde lysmængden inden for en radius af 5 kpc i forhold til lysmængden inden for en radius af 14 kpc (omtrentlig radius af galaksen) tages forholdet:

```
>499829.0440/552216;  
0.9051332160
```

Hvilket svarer til at lidt over 90 % af den lysende masse i galaksen befinder sig indenfor en afstand af 5 kpc til centrum.