

Forside

Eksamensinformationer

NFYB05035E - Bachelorprojekt i de fysiske fag, Niels Bohr Institutet - ID:zpk191 (Christopher Nick Andersen)

Besvarelsen afleveres af

Christopher Nick Andersen
zpk191@alumni.ku.dk

Administration

Eksamensteam, tel 35 33 64 57
eksamen@science.ku.dk

Bedømmere

Johan Peter Uldall Fynbo
Eksaminator
jfynbo@nbi.ku.dk
☎ +4535325983

Besvarelsesinformationer

Tro og love-erklæring: Ja

Rotation i spiralgalakser af Hubble-typer SB og SC

Hvordan informationen fra rotation kan bruges til at undersøge evidensen for
mørkt stof og dets fordeling i disse galakser

Christopher N. Andersen

Vejleder: Johan Peter Uldall Fynbo

Juni 2021

Københavns Universitet
Det natur og biovidenskabelige fakultet
Niels Bohr Institutet
Blegdamsvej 17
2100 København Ø

Abstract

The purpose of this project is to analyse spectres of spiral galaxies in order to create rotation curves and analyse these curves for evidence of dark matter and systematic differences of dark matters distribution in spiral galaxies as well as analyse the galaxy spectres for signs of star birth. By using Newtons mechanical laws of circular motion and potential along with Doppler shifts, to accurately describe the motion of stellar mass in spiral galaxies. The rotation curves are created on the basis of these physical laws along with the galaxy spectre, using python codes that can read the gathered data.

The results of this research showed that spectres with strong H- α emission lines showed signs of higher star birthrate than the galaxies with strong NaD absorption lines. The rotation curves of all SB and SC galaxies showed no sign of dark matter having different mass distribution between these Hubble types. The results however show that dark matter in these galaxies is spherically distributed throughout the galaxy.

Indhold

1	Indledning	3
1.1	Motivation	4
2	Teori	4
2.1	Newtonsk potentiale og cirkelbevægelse	4
2.2	Doppler effekt	5
2.3	Galaktisk bule	6
2.4	Den stellare skive	7
2.5	Interstellart medium	7
2.6	Mørkt stof halo	8
2.7	Navarro-Frank-White og Hernquist profilen	8
2.8	Mørkt stof	9
3	Rotationskurver	10
3.1	21 cm hydrogen linjer	11
3.2	Spiralgalakser: typer og klassificering	12
3.3	Elliptiske galakser: Forskelle i rotationskurver for dem i forhold til rotationskurver for spiralgalakser	12
4	Metoder	13
4.1	Dataindsamling	13
4.2	Databehandling	13
5	Resultater	14
6	Diskussion	16
6.1	Udfordringer ved målinger af rotationskurver	18
7	Konklusion	18
8	Bilag	21

”Um die totale Masse oder die Gravitationsmasse zu bestimmen, sind wir auf die fünf Fälle angewiesen, wo man auf spektrographischem Weg einen Rotationseffekt hat feststellen können”
Knut Lundmark [8]

1 Indledning

Rotationskurver for spiralgalakser er interessante at undersøge, fordi de viser os, hvordan massefordelingen i de observerede galakser fordeler sig. De viser desuden, at der er en betydelig masse ”tilovers”, fraregnet den masse, som det baryonske materiale bidrager med. Det er dette materiale, man kalder mørkt stof.

Formålet med mit projekt at undersøge galaksespektre og dertil hørende rotationskurver med fokus på spiralgalaksernes dynamik samt vise, hvordan rotation kan bruges til at undersøge evidensen for mørkt stof i galakserne. Jeg undersøger spiralgalakser af typen SB og SC og ser på, om der er systematiske forskelle i det mørke stofs fordeling, samt analyserer de enkelte galakseres spektrum for tegn på stjernedannelse.

Til fremstilling af spektre og rotationskurver anvender jeg data, fra det Nordisk Optiske Teleskop (NOT), opsamlet på La Palma i de sidste 4-5 år. Teleskopet er udstyret med instrumentet AIFOSC, som kan lave spektroskopi med en spektral opløsning. Denne opløsning er passende for min undersøgelse af galaksespektrene, fordi de målte hastigheder er i en størrelsesordenen af 100 km/s. Datasættene beregner jeg ved brug af tre pythonkoder med hver deres funktion.

Den teoretiske afsæt for fremstilling af rotationskurver hviler på Newtonsk potentiale og cirkelbevægelse, som det er beskrevet i J.Binney & S.Tremaine (2011), samt rødforskydning i B.W.Carroll & D.A.Ostlie (2017).

Himmellegerer i spiralgalakser roterer i cirkelbane om de respektive galakseres centrum, og det gør Newtons love om cirkelrotation meget velegnede til at estimere massen af spiralgalakser for en given radius. Jeg benytter disse love om cirkelrotation til at fremstille rotationskurver for en galakse ud fra dens spektrum.

Derefter sammenstiller jeg og diskuterer resultater af min undersøgelse. Jeg viser, hvordan informationen fra rotationskurverne kan bruges til at undersøge evidensen for det mørke stof.

Inden for kosmologi arbejder man med Λ CDM modellen. Denne model inkluderer den kosmologiske konstant Λ og koldt mørkt stof (cold dark matter). Denne teori diskuterer jeg efter gennemgang af mine resultater.

Jeg begrænser mig til at undersøge rotationskurver for spiralgalakser, fordi det er netop i spiralgalakser muligt at foretage præcise, brugbare målinger med det tilgængelige i dag udstyr.

Jeg bruger gængse begreber inden for astrofysikken. Enkelte begreber, som ikke nemt kan oversættes til dansk, præsenterer jeg også på engelsk, i parenteser.

1.1 Motivation

For at forstå, hvordan vores univers er opbygget, fortager man observationer og målinger af de forskellige dele af universet. Allerede tilbage i 1930 forudså Knut Lundmark ud fra sine observationer, at der må være mere masse i galakserne, som ikke udsender lys. Han kaldte denne masse mørkt stof. I 1983 skrev Vera C. Rubin[12] en artikel om, hvordan resultater fra hendes og andre forskers observationer indikerer, at op mod 90% af massen i vores univers ikke udsendte bølgelængder som vi kunne detektere. Vi ved altså, at der må være mørkt stof i universet. Men selv i dag er det begrænset, hvad vi ved om det mørke stof natur og fordeling i universet. Derfor er det et vigtigt forsknings felt.

2 Teori

I det følgende præsenterer jeg de relevante teorier, som er anvendt i mit projekt.

2.1 Newtonsk potentiale og cirkelbevægelse

Newtons to teoremer om sfærisk symmetriske potentialer lyder således:

Newtons første teorem *"A body that is inside a spherical shell of matter experiences no net gravitational force from that shell."*

Newtons andet teorem *"The gravitational force on a body that lies outside a spherical shell of matter is the same as it would be if all the shell's matter were concentrated into a point at its center."*

Ud fra disse teoremer kan vi udlede en sammenhæng mellem gravitationsfeltet og gravitationspotentialet, angivet hhv. som $\vec{g}(\vec{x})$ og $-\vec{\nabla}\Phi$.

Newtons første potentiale teorem betyder, at $\vec{\nabla}\vec{\Phi} = -\vec{g}(\vec{x}) = 0$

Evaluerer vi potentialet i skaldens centrum, får vi

$$\Phi = -\frac{GM}{R} \quad (1)$$

Ifølge disse to teoremer for en sfærisk fordelt densitet vil massen inden for en radius r opleve, at tyngdekraften påvirker den med kraften

$$\vec{F}(r) = -\frac{GM(r)}{r^2}\hat{e}_r = -\frac{d\Phi}{dr} \quad (2)$$

hvor massen fordeler sig på følgende måde ved sfærisk symmetri

$$M(r) = 4\pi \int_0^r dr' r'^2 \rho(r') \quad (3)$$

Når vi undersøger galakser, kan vi anvende klassisk mekanik til at komme med et godt estimat af massen for en galakse inden for en bestemt radius. Ifølge Newtons anden lov er den totale kraft, som udøves på et objekt

$$\vec{F}_{net} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = m \vec{a} \quad (4)$$

Newton kunne bruge denne lov sammen med sin første og tredje lov, samt Keplers tredje lov til at formulere sin gravitationslov. Ifølge Keplers tredje lov er der en sammenhæng mellem en planets omløbstid og deres gennemsnitlige afstand fra solen

$$P^2 = a^3 \quad (5)$$

Newton omskrev Keplers tredje lov til $P^2 = kr^3$ ved at overveje, hvordan en lille masse m ville bevæge sig i en cirkel rundt om en meget stor masse M $M \gg m$. Her er k en proportionalitetskonstant og r er afstanden mellem de to objekter. Omløbstiden for en cirkelbane med konstant hastighed v kan nu skrives som

$$P = \frac{2\pi r}{v} \quad (6)$$

Ved at indsætte P fra ligning 6 ind i ligning 5 samt gange med mr^{-4} på begge sider i ligning 5, får vi

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{4\pi^2 m}{kr^2} \quad (7)$$

hvor venstre side af ligningen er centripetalkraften, og højre side er den gravitationele kraft, som holder m i kredsløb omkring M . Newton brugte denne overvejelse til at formulere sin endelige gravitationslov[9]

$$F = \frac{GMm}{r^2} \quad (8)$$

Bevægelse af gasser i spiralgalakser er domineret af rotation. Observationer viser, at gassen bevæger sig næsten cirkulært inden for en radius R . Derfor kan vi sætte centripetalkraften lig den gravitationele kraft for at finde et estimat af massen for galaksen inden for en radius R via ligningen[3]

$$\frac{V^2(R)}{R} = \frac{GM(< R)}{R^2} \quad (9)$$

2.2 Doppler effekt

Doppler effekten beskriver ændringen af bølgelængden, som kan observeres, når bølgens kilde eller den observerende bevæger sig. Det betyder, at der er en sammenhæng mellem ændringen af kildens bølgelængde og hastigheden, som den bevæger sig med i forhold til den observerende.

Rødforskydningen af lys er givet ved

$$z \equiv \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{rest}}{\lambda_{rest}} \quad (10)$$

Men for ikke-relativistiske hastigheder, som er mere relevante for dette projekt, kan følgende formel benyttes

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{rest}}{\lambda_{rest}} \simeq \frac{v_r}{c} \quad (11)$$

hvor v_r er den radiale hastighed (radial velocity), som beskriver, hvor hurtigt lyskilden bevæger sig imod eller fra os. I mit projekt bruger jeg en korrektion til disse standardligninger for at få et mere nøjagtigt resultat. Man kan finde et objekts pekulier hastighed (peculiar velocity) via $v_p = cz - H_0 D$, hvor H_0 er Hubble konstanten, D er afstanden mellem den, der måler lyset og lyskilden, og v_p er pekulier hastighed, som er objektets hastighed i forhold til objektets egen "rest frame". Denne approksimation tager dog ikke højde for, at lyskildens egen bevægelse også tilfører en rødforskydning til det lys, der bliver udsendt. Derfor benytter vi os af sammenhængen $v_p = cz_p$ og $(1 + z) = (1 + \bar{z})(1 + z_p)$ til at finde den korrekte pekulier (peculiar) rødforskydning [14]

$$z_p^{correct} = \frac{z - \bar{z}}{1 + \bar{z}} \quad (12)$$

Denne korrektion til rødforskydning indgår ligeledes i den kode, som jeg har brugt til at fremstille spektrene og rotationskurverne for at opnå mere præcise resultater.

I det følgende gennemgår jeg de forskellige dele af galaksen og deres bidrag til den samlede masse i galaksen.

2.3 Galaktisk bule

Den galaktiske bule (Galactic bulge) er en galakses centrale tyngdepunkt og indeholder flere hundrede millioner stjerner. Det er et af de tætteste stjernesystemer i universet. Der findes ofte sorte huller i disse buler, og formen af disse buler er typisk sfærisk. I spiralgalakser vil bulen have en mere rund form, og nogle gange have en bjælke igennem den, alt efter galaksens Hubble type. Mens i elliptiske galakser vil bulen have form af en fladtrykt sfære af forskellig grad. Oftest kan bulens overfladelysstyrke approksimeres via Sersics' s formel

$$I(R) = I(0) \exp \left[- \left(\frac{R}{R_0} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \quad (13)$$

hvor $n=1$ gælder for disken i en spiral galakse, mens $n=4$ er de Vaucouleurs formel, som beskriver lysfordelingen for elliptiske galakser og galaktiske buler generelt. Det er fordi galaktiske buler minder om små elliptiske galakser. [7]

Densiteten af bulen er givet ved en fladtrykt sfærisk power law model for $q_b < 1$. Her defineres densiteten som [18]

$$\rho_b(R, z) = \rho_{b0} \left(\left(\frac{m}{a_b} \right)^{-\alpha_b} \right) \exp \left(\left(\frac{-m^2}{r_b^2} \right) \right) \quad (14)$$

hvor m er givet ved

$$m = \sqrt{R^2 + \frac{z^2}{q_b^2}} \quad (15)$$

2.4 Den stellare skive

Den stellare skiven, eller disken, er en disk, som samlet beskriver den tynde og tykke disk i en spiralgalakse. Lysstyrken for hver disk forventes at falde eksponentielt med radiussen R , som givet ved Sersics' s formel, ligning (13). Tætheden i disken vil man beskrive som værende afhængig af z og R , hvor z er afstand fra galaksens midtplan og R er diskens radius. Denne afhængighed af z er baseret på observationer fra forskellige galakser. Densiteten er nu givet ved

$$\rho_d(R, z) = \Sigma_d e^{-R/R_d} \left(\frac{\alpha_0}{2z_0} e^{-|z|/z_0} + \frac{\alpha_1}{2z_1} e^{-|z|/z_1} \right) \quad (16)$$

hvor $\alpha_0 + \alpha_1 = 1$, Σ_d er den centrale overfladedensitet af disken, R_d er disk skalalængden og z_0, z_1 er skalahøjde for den tynde og tykke disk. Skala længder og højder kan måles ud fra observationer. Typiske værdier for skalahøjden er $(z_0, z_1) = (0.3kpc, 1kpc)$. I en halo domineret galakse vil en typisk værdi for $R_d = 3.2kpc$, og $R_d = 2kpc$ for en ikke halo domineret galakse. [15]

2.5 Interstellart medium

Det interstellare medium, ISM, er alt det støv og gas, som befinder sig mellem stjernerne i en galakse. Det er her, stjerner fødes, og efter deres død vil rester af dem vende tilbage til det ISM og derved fortsætte cyklussen. Det er et meget komplekst system, som kræver meget præcise udregninger for at kunne modellere det [10].

Dens tæthed er i grove træk angivet som

$$\rho_g(R, z) = \frac{\Sigma_g}{2z_g} \exp \left(-\frac{R}{R_g} - \frac{R_m}{R} - \frac{|z|}{z_g} \right) \quad (17)$$

Det ISM har en diskliggende form, hvor $R_m = 4kpc$ og $z_g = 80pc$. De to parametre Σ_g og R_g afhænger af de to parametre Σ_d og R_d fra ligning (16) under den antagelse, at $R_g = 2R_d$ og det ISM bidrager med 25% til overfladetætheden af den totale disk. [16]

2.6 Mørkt stof halo

Mørkt stof haloen (dark matter halo) er i princippet ikke en halo, men mere en sfærisk fordeling i og omkring en spiralgalakse. Det er sådan vi forventer, at det mørke stof fordeler sig ud fra målte rotationskurver, som flader ud ved store afstande. Altså de går som $\frac{1}{R^2}$, som er typisk for en sfærisk fordeling. Hvis vi antager at hastigheden V er konstant og indsætter $M = \frac{4}{3}\pi\rho R^3$ ind i ligning (9) og isolere for ρ fås

$$\rho = \frac{3V^2}{4\pi GR^2} \quad (18)$$

Man forventer, at densiteten af haloen kan modelleres på følgende måde:

$$\rho_h(R, z) = \rho_{h0} \left(\frac{m}{a_h}\right)^{\alpha_h} \left(1 + \frac{m}{a_h}\right)^{\alpha_h - \beta_h} \quad (19)$$

De fem parametre, $(\rho_{h0}, a_h, \alpha_h, \beta_h, q_b)$ fitter man ud fra de dynamiske begrænsninger, fordi mørkt stof ikke udsender lys, og derfor kan vi ikke bruge spektroskopi på samme måde som for lysgivende himmellegemer. Massen m , kan findes via ligning (15). Man finder de dynamiske begrænsninger ved at undersøge, hvordan lys opfører sig omkring mørkt stof [19]. En måde at undersøge haloens massefylde er via simulering.

2.7 Navarro-Frank-White og Hernquist profilen

Navarro-Frank-White og Hernquist profilen er to modeller der bygger på samme simulering.

Navarro-Frank-White (NFW) og Hernquist profilen er baseret på numerisk simulation af mørkt stof.

Observationer af elliptiske galakser viser, at luminositetsdensiteten kan approksimeres som en power law for både lave og høje radiusser, med en glidene overgang til mellemstore radiusser.

Numerisk simulation af mørkt stof har påvist, at massetætheden i mørkt stof haloen kan ligeledes beskrives via en power law, som det er tilfældet for elliptiske galakser.

I simuleringen er densiteten defineret som

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{\left(\frac{r}{a}\right)^\alpha \left(1 + \frac{r}{a}\right)^{\beta - \alpha}} \quad (20)$$

Her er a og ρ_0 frie parametre, hvor a er en vilkårlig afstand og ρ_0 er densiteten i centrum af haloen. Forskellige værdier af α og β i simuleringen giver forskellige modeltyper.

En mørk stof halo modelleres efter $\beta \simeq 3$ og $\alpha = [1, 1.5]$. Man bruger $(\alpha, \beta) = (1, 3)$ for NFW-profilen, og $(\alpha, \beta = 1, 4)$ for Hernquist-profilen.

Ifølge ligning (NFW) kan massen af haloen bestemmes til

$$M(r) = 4\pi\rho_0 a^3 \int_0^{r/a} ds \frac{s^{2-\alpha}}{(1+s)^{\beta-\alpha}} \quad (21)$$

For NFW-profilen er ovenstående integral evalueret og beregnet til

$$M(r) = 4\pi\rho_0a^3 \left(\ln(1+r/a) - \frac{r/a}{1+r/a} \right) \quad (22)$$

NFW-profilen viser, at massen for haloen vil divergere logaritmisk med r . $M(r)$ for Hernquist-profilen kan findes på samme måde, ved at evaluere integralet. Det evaluerede integral er dermed givet ved

$$M(r) = 4\pi\rho_0a^3 \frac{(r/a)^2}{2(1+r/a)^2} \quad (23)$$

Massen ifølge Hernquist-profilen vil derimod asymptotisk nærme sig en endelig værdi som $r \rightarrow \infty$. [17]

2.8 Mørkt stof

Før man har fremstillet de første rotationskurver for galakser, forventede man, at hastigheden ville falde igen efter at den peakede. Dette er primært, fordi man observerede færre lysgivende objekter længere ude i galakserne. I stedet viste rotationskurver, at hastigheden forblev nogenlunde konstant efter dennes peak. Det måtte betyde, at der var mere masse i universet, end hvad man kunne observere via synligt lys. Og udover det viste kurverne, at der var større koncentration af masse længere ude i galaksen i forhold til midten. Fordi denne masse ikke udsendte lys, kaldte man den for mørkt stof. Mørkt stof er nævnt så tidligt, som 1930 af Knut Lundmark [8].

Man kan derimod godt observere effekter af det mørke stofs eksistens.

Eksempelvis beholder spiralarmene i spiralgalakserne deres form netop, fordi det mørke stof må udøve en kraft på gassen, så den forbliver i spiralarmene. Derfor kan mørkt stof sammenlignes med en slags lim, idet den udøver en kraft på galakser, og dermed holder på galaksens form.

Vi ved, at mørkt stof påvirker bl.a lys via dens egen gravitation, altså det må have en masse. Det er også blevet diskuteret, om dette materiale betyder, at vi skal genoverveje nogle af de fysiske love, vi arbejder ud fra, som fx gravitation. [2]

Λ CDM modellen inkluderer den kosmologiske konstant Λ og koldt mørkt stof (cold dark matter). Teorien om koldt mørkt stof bygger på den antagelse, at mørkt stof er en ny partikel, kaldet WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles), som bevæger sig meget langsomt og hovedsageligt kun interagerer med materiale via dens gravitation.[11] Den kosmologiske konstant er vakuum energi, og dens værdi er ikke velbestemt endnu, fordi det kræver kvantefelt teori udregninger, som ikke er fuldført på nuværende tidspunkt.[13] Hypotesen om, at mørkt stof formentlig er WIMPs, bygger blandt andet på, at der er en mangel af elektromagnetiske interaktioner hos WIMPs[4] på samme måde, som blandt neutrinoer.

3 Rotationskurver

Rotation er den dominerende kinetik for spiralgalakser, hvor en stjerne såvel som HI gas bevæger sig i en næsten cirkulær bane omkring galaksens centrum. Afvigelsen fra deres bane er så lille, at den kan ignoreres.

Derfor er man i forhold til spiralgalakserne specielt interesseret i atomar hydrogen emission, som udsender stråling ved en bølgelængde på 21 cm. Denne emissionslinje er meget velegnet til at plote rotationskurver, fordi gassen har meget lav temperatur. Hvilket betyder, at hydrogenatommerne i gennemsnit bevæger sig langsomt nok til, at man kan måle dem direkte.

Massen bestemmes ud fra komponenternes densitets fordeling og det lys, man kan observere fra dem. Det gør man ved at sætte gravitationskraften lig centripetal accelerationen via ligning (9) $\frac{V^2(R)}{R} = \frac{GM(<R)}{R^2}$.

En rotationskurve for en spiralgalakse kan modelleres med fire komponenter.

Det er det interstellare medium (ISM), disken, bulen og mørkt stof haloen. Den målte rotationskurve vil vise summen af massebidraget fra disse komponenter.

Rotationskurven kan deles op som i figur 5.20[5] (som jeg omtaler i det følgende som fig. 1, se bilag), så man kan se, hvordan hver af de fire komponenter bidrager til galaksens samlede masse.

Figur 1 er rotationskurven for spiralgalaksen NGC 7331, som var målt ved at observere galaksens atomare hydrogengas. Denne gas vil jeg beskrive nærmere senere i dette kapitel. Som det fremgår af teksten under figur 1, skal der tilføjes en halo af mørkt stof for at rotationskurven passer med målingerne.

Figuren illustrerer, at bulens bidrag falder, jo længere ude i galaksen vi observerer, hvilket stemmer med viden om, at bulen ligger i galaksens centrum. Mens bidraget fra ISM og disken stiger først og derefter falder igen, hvilket indikerer, at både gassen og disken ligger koncentreret længere ude fra galaksens centrum.

Bidraget fra mørkt stof bliver imidlertid ved med at stige, jo længere ude i galaksen vi observerer. Det peger på, at mørkt stof dominerer massefordelingen i ydre delen af galaksen, men den findes overalt i galaksen. Eksistensen af mørkt stof kan bl.a. forklare, hvorfor målinger viser, at massen i en spiralgalakse forbliver konstant i ydre krogene frem for at falde.

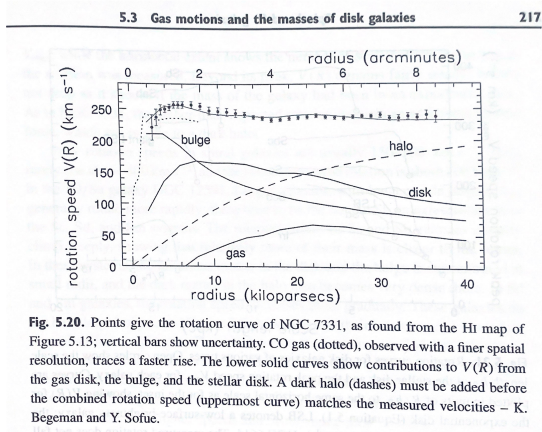
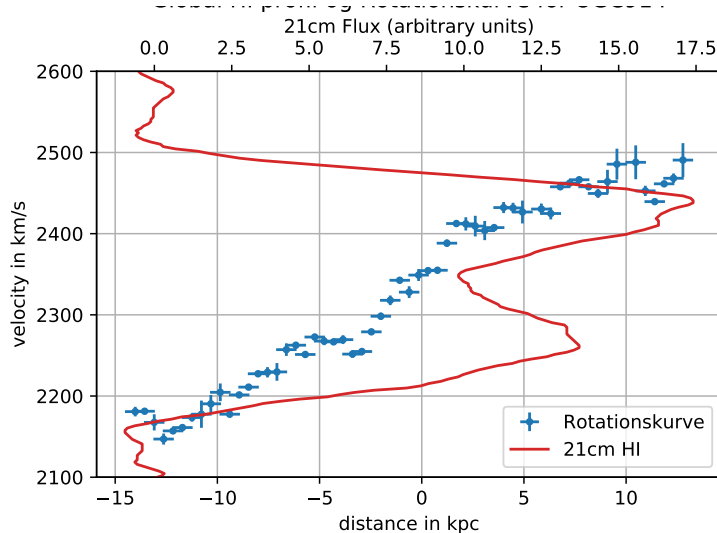


Fig. 5.20. Points give the rotation curve of NGC 7331, as found from the HI map of Figure 5.13; vertical bars show uncertainty. CO gas (dotted), observed with a finer spatial resolution, traces a faster rise. The lower solid curves show contributions to $V(R)$ from the gas disk, the bulge, and the stellar disk. A dark halo (dashes) must be added before the combined rotation speed (uppermost curve) matches the measured velocities – K. Begeman and Y. Sofue.

Figur 1: Rotaionskurve for NGC7331



Figur 2: Den blå kurve viser rotationskurven for UGC914 og den Røde kurve er 21cm HI-profilen for UGC914.

3.1 21 cm hydrogen linjer

Denne type stråling forekommer ved en bølgelængde på 21cm. Strålingen bliver udsendt, når elektronens spin i hydrogenatomet vendes om, altså den peger modsat protonens spin. Sandsynligheden for denne type stråling er meget lille for et individuelt atom, selv om der er store mængder af denne gas i spiralgalakser. Det betyder til gengæld, at disse emissionslinjer forbliver optisk tynde over kosmiske afstande. Når linjen forbliver optisk tynd betyder, at den er proportional med densiteten af neutral hydrogen. Vi har derved et relativt præcist mål for mængden af gas.

Det meste af HI-gassen i spiralgalakser ligger ved afstande, hvor $V(r)$ er forholdsvis konstant. Når man plotter det ud, får man to peaks. Disse peaks kan man bruge til at bestemme den maksimale rotationshastighed, og via Tully-Fischer relationen kan man estimere sammenhængen mellem rotationshastighed og luminositeten af en galakse. Denne sammenhæng viser, at mere lysklare galakser vil have større indre rotationshastigheder.

HI profilen som denne for UGC914 er repræsentativ for spiralgalakser.

Her kan vi se, hvordan det atomare hydrogen gas bevæger sig i forhold til rotationskurven. I forhold til galaksen selv bevæger HI-gassen sig med en hastighed på op til 100km/s over en afstand på 10kpc. Denne profil ser ud på den måde, fordi det meste af HI-gassen ligger ved afstande, hvor $V(r)$ er forholdsvis konstant. Vi kan ligeledes se, at de to peaks ligger ved pekulier hastigheder på omkring 100km/s. Det øverste peak i tegningen med en flux på 17.5 har bevægelse fra os, og det nederste peak med en flux på omkring 14 har bevægelse mod os.

3.2 Spiralgalakser: typer og klassificering

Spiralgalakser kendetegnes bl.a. ved, at de har spiralarme og en stellar disk (disken). De klassificeres efter Hubble typer SA-SD og SBa-SBd.

Blandt disse er SA og SBa galakser dem, der har den største bule, mens SD og SBd galakser har den mindste bule.

SA-SD er disk galakser, hvor spiralarme udspænder sig fra bulen, mens SBa-SBd er bjælkegalakser. Bjælkegalaksers spiralarme spirer fra bjælkens to endepunkter, og bjælken går midt igennem bulen.

I dette projekt har jeg undersøgt galaksespektre fra SB og SC galakser samt hvordan rotationskurverne eventuelt viser forskelle mellem Hubble typerne.

3.3 Elliptiske galakser: Forskelle i rotationskurver for dem i forhold til rotationskurver for spiralgalakser

Elliptiske galakser har formen af en kugle, som er fladtrykt i forskellig grad. Man kategoriserer dem fra E0-E7, hvor 0 er næsten kugleformet. Bevægelsen af stjerner i elliptiske galakser er, i modsætning til spiralgalakser, meget kaotisk.

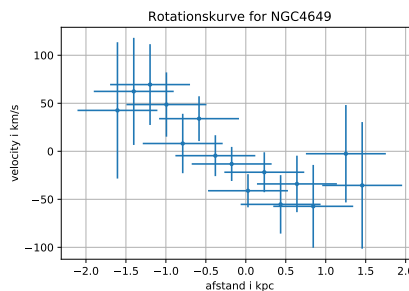
NGC4649 er en elliptisk galakse, og den har følgende rotationskurve.

Som vi kan se, er der meget stor usikkerhed på de rotationshastigheder, der måles. Derfor måler man hastighedsdispersionen (velocity dispersion) for elliptiske galakser, for at bestemme deres masse.

Man kan bruge Faber-Jackson relationen $L \propto \sigma^4$, altså luminositeten er proportional med hastighedsdispersionen. Dette kan bruges til at lave et overslag af galaksens masse ud fra dens luminositet. Ved udregninger skal man også huske at tage højde for det mørke stof, som man formoder, fordeler sig sfærisk i elliptiske galakser, på samme måde som i spiralgalakser.

Oftest indeholder elliptiske galakser ikke meget koldt gas, men man har lavet målinger på enkelte elliptiske galakser, som fx NGC 5266. Denne galakse havde en tilstrækkelig mængde kold gas, derfor kunne man benytte de samme teknikker, som når man undersøger 21 cm hydrogenlinjen for spiralgalakser. Man målte en nogenlunde konstant rotationshastighed på $V(R) \approx 250 \frac{km}{s}$ i en radius af 50kpc.

Så under antagelse af, at NGC5266 ellers er identisk med andre elliptiske galakser, som inderholder mindre mængder af kold gas, må ydre delene af elliptiske galakser også bestå hovedsageligt af mørktstof.



Figur 3: Rotationskurve for NGC4649. De store usikkerheder skyldes stjernernes tilfældige bevægelse

4 Metoder

I det følgende gennemgår jeg fremgangsmåde og metoder, anvendt til dataindsamling og behandling.

4.1 Dataindsamling

Som det er nævnt ovenfor, anvender jeg til fremstilling af spektre og rotationskurver data, opsamlet med det Nordiske Optiske Teleskop (NOT) på La Palma. Teleskopet er udstyret med instrumentet AIFOSC, som kan lave spektroskopi med en spektral opløsning. Teleskopet er blandt de 50 største i verden, og optikken er af højeste kvalitet og bliver løbende opdateret. [1] Målingerne er fortaget af studerende på en sommerskole på La Palma over de sidste 4-5 år og stammer fra galakser, observeret "edge-on".

Ved disse undersøgelser tog man et billede af en galakse først, og derefter indstiller man AIFOSC så den er oplinieret med galaksens storakse. Efterfølgende indsætter man en tynd spalte på billedet langs galaksens storakse, og herved kan man optage et spektrum, der kan bruges til at måle rotationshastigheder af stjerner og gas i galaksen. Observationer via spektroskopi i høj grad er baseret på det lys vi modtager, derfor er det vigtigt at tage højde for forstyrrelse. Udfordringen ved den type målinger er det faktum, at vores atmosfære og galaktisk støv gør det udsendte lys mere rødt, når det passerer igennem disse. Derfor er 21cm linjen meget brugbar, fordi den ikke forstyrres af støv og atmosfæren i samme grad, som synligt lys gør. Derudover er det vigtigt at sørge for, at galaksen vender sådan, at vi både kan måle pekulier hastigheder mod os og fra os, ellers kan vi ikke måle hastigheder fra galaksen. De skal være "edge-on".

4.2 Databehandling

Jeg analyserer data fra NOT-teleskopet ved brug af tre pythonkoder, disse er vedlagt under bilag. Jeg fremstiller rotationskurver for 8 galakser for at se, om der er eventuelt systematiske forskelle i evidens for mørkt stof i forskellige Hubble-typer.

1. "Bachelormeasure.ipynb" (Measure) bruger jeg til at lave et spektrum over en galakse og beregne relevant data til at lave en rotationskurve. Dette spektrum bruger jeg til at finde de særligt relevante emissions eller absorptions linjer, som jeg fremstiller rotationskurver ud fra. Jeg har modificeret koden således, at den også printer de ønskede resultater ud.

Informationsfilen, info(galaksenavn).txt, har en række data, hvor de to vigtigste dele er det første tal n , som er antallet af bins til fittet, og den syvende linje, som er et gæt på start bølglængden. Antallet af bins bestemmer, hvor langt ude fra galaksens centrum vi måler. Positive afstande indikerer afstande væk fra os, mens negative afstande indikerer bevægelse mod os. Startgættet af bølglængde kan bruges til at finde et bedre fit ved en afstand, givet at vi har en god måling. Measurement bruges til at finde afstanden fra centrum af den galakse vi måler på, bølglængden vi målte ved den givne afstand og

fejlen på målingen af bølglængden. Koden `measurement` bruges til at måle efter tydlige emission/absorptions linjer. Til de spektre, som jeg har inkluderet i billag, NGC2769 og NGC4649, kan vi se NaD absorptionslinjer. Resten af spektrene viser H- α emissionslinjer. Dataen fra disse målinger af spektrene bruger jeg til at lave en datafil. Se bilag fig. 6-14 for alle spektre. Jeg har lavet rotationskurver ud fra disse datafiler med målinger ved brug af den anden kode `Rotcurve.ipynb` (Rotcurve).

2. `Rotcurve.ipynb` (Rotcurve) bruger jeg til at lave en rotationskurve for en anden galakse. Koden tager målingerne fra galaksespektrene og plotter hastigheden v [km/s] som funktion af afstanden i kpc. I koden er der også taget højde for, hvordan galaksernes bevægelse, i forhold til dem selv, bidrager til rødforskydningen, som vi måler. Den målte hastighed ved en afstand, $V(r)$, kan dermed bruges til at bestemme massen, $M(r)$, ved brug af ligning (9). I koden har jeg tilføjet en linje, der kan beregne en nedre grænse for en galakses masse ved brug af ligning (9). Den tager galaksens yderste punkt fra centrum blandt de positive afstande, samt hastigheden af dette punkt, og returnerer den nedre grænse for galaksens masse.

Se bilag fig. 15-20 for alle rotationskurver.

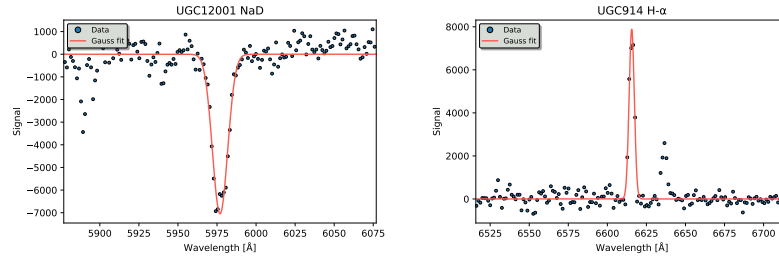
3. `Plotcurve21cm.ipynb` (plot21cm) koden kan plotte et spektrum for 21cm hydrogen linjen over en rotationskurve for en galakse, givet at der er en tilstrækkelig mængde hydrogen i galaksen. Den har jeg brugt til at sammenligne resultater fra to forskellige spektre og vurdere, hvorvidt de stemmer overens. Se bilag fig. 21-24 for alle 21cm plots.

5 Resultater

Som det kan ses i spektre i fig. 6-14 findes der H- α emissionslinjer i de fleste galaksespektre, som jeg undersøger. I galakserne NGC2769 og NGC4649 har jeg i stedet målt rotationskurver ud fra NaD absorptionslinjer. For NGC4649 giver det god mening, fordi den er en elliptisk galakse, og de mangler ofte H- α emissionslinjer, grundet deres manglende stjernedannelse.

Typisk ville man se mere tydelige NaD absorptionslinjer i spektre for ældre (late) stjernetyper som G og K stjerner. Jeg finder tydelige NaD linjer i SB-galakserne, mens jeg finder mere tydelige H- α emissionlinjer i SC-galakserne. Tegn på stjernedannelse er typiske emissionslinjer fra yngre (early) stjernetyper, som O og B, fordi de lyser så kraftigt i forhold til ældre stjernetyper, at det overdøver deres lys. O og B stjerner især viser tydelige hydrogenlinjer i deres spektrum, og meget utydelige NaD linjer. 4viser en tydelig NaD absorptionslinje (NGC2769) og en tydelig H- α emissionslinje (UGC914).

H- α emissionslinjer kan ses bedst i A og G stjerner, hvor A stjerner har en relativ kort levetid, op til 1Gyr, når de er på "main sequence" delen af deres liv, mens G stjerner kan leve op til 10Gyr i "main sequence". Denne emissionslinje sammen med andre tydelige hydrogenlinjer viser tegn på, at der foregår stjernedannelse i en vilkårlig galakse, og derved kan man indsnævre



Figur 4: Til venstre kan vi se en tydelig NaD absorptionslinje i UGC12001, og til Højre kan vi se en H- α emissionslinje for UGC914

galaksens klassifikation ved at udelukke, at det er en elliptisk galakse. SB galakser indeholder kold gas nok til, at der stadig er stjernedannende regioner i deres spiralarme. H- α emissionslinjerne kommer fra stjernedannelse, og de er mere fremtrædende i spektre fra stjernetyper A. Dette peger på mere aktiv stjernedannelse i UGC914, end for UGC12001.

I 5 kan vi se to rotationskurver, som er fremstillet af målinger fra galaksen UGC914.

Denne galakse er en type Sc. Den røde linje viser det baryoniske bidrag til rotationskurven i denne galakse, altså alt det synlige materiale. Sammenligner vi den med vores målte rotationskurve, kan vi se en markant forskel i hastighed.

Vi kan se, at galaksens pekulær velocity går fra 0 km/s til 100-150 km/s over en afstand af 10-13 kpc. Den baryoniske rotationskurve går fra 0 til 60-70 km/s over den samme afstand.

Den blå rotationskurve er den målte rotationskurve for galaksen. Den består af galaksens gas, dens disk, bule, samt dark matter haloen.

Positive hastigheder er udtryk for den del af galaksen, som bevæger sig væk fra os, når vi observerer den, altså de er rødforskudte.

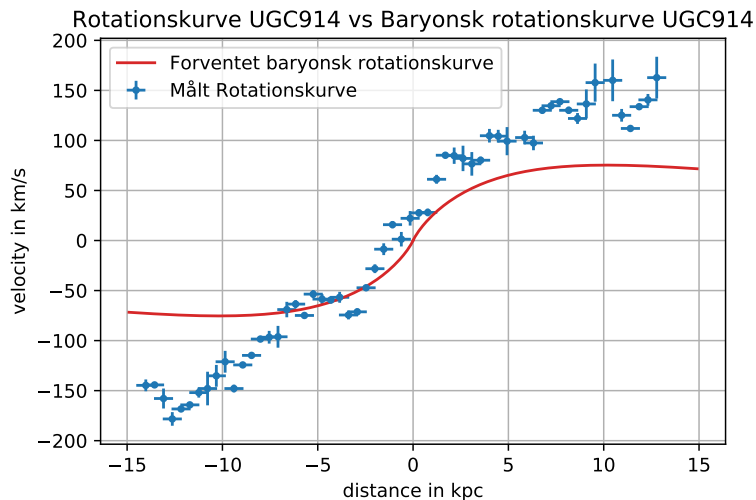
Negative hastigheder er blåforskudte, og indikerer, at vi ser på den del af galaksen, som roterer mod os.

Ud fra kurven kan vi se, at jo længere ude i forhold til galaksens centrum vi befinder os, jo hurtigere bevæger materialet sig, op til en peak hastighed, som i grove træk fastholdes. En periode for cirkelbevægelse tager længere tid, jo længere væk fra centrum noget befinder sig. Ligning (9) forudsiger en

sammenhæng mellem masse og hastighed givet ved $\frac{V^2(R)R}{G} = M(< R)$ som tydeligt viser, at ved større afstande og eller større hastigheder, må der ligeledes være større masse. For UGC914 fandt jeg, at den nedre grænse for massen var $M(R) = 6.72 * 10^{10} M_{\odot}$ for $V(R)=151.06 \text{ km/s}$ og $R=12.78 \text{ kpc}$.

I det følgende sammenligner jeg de målte rotationskurver med hindanden.

Vi kan se, at både NGC5714 og UGC914, som begge er SC-galakser, opnår en rotationshastighed i omegn af 150-160 km/s ved en afstand på 10 kpc. Mens NGC5714 når en hastighed af 150 km/s allerede 5 kpc fra galaksens centrum.



Figur 5: De blå punkter er rotationskurven for UGC914, og den røde linje er den rotationskurve for baryonsk materiale

Galaksen UGC9579 forventes at være en SB eller SC galakse. Sammenligner vi de to SC-galakser med UGC9579, ser vi, at den opnår rotationshastigheder på op til 200km/s, 10kpc fra galaksens centrum.

Rotationskurven for UGC9579 minder mere om NGC5714 i og med, at rotationshastigheden stiger forholdvis hurtigt og er oppe på 100km/s allerede efter 2kpc. Til sammenligning viser rotationskurven for UGC914, at hastigheden ved den afstand er omkring 60km/s.

De rotationskurver, hvor hastigheden bliver hurtigt konstant, som i UGC9579, skyldes at mere af galaksens masse ligger omkring dens centrum. Det kan formentlig forklares med en mere massiv bule.

Galakserne NGC5907 og UGC9579 ser ud til at have mest masse omkring centrum i forhold til de andre galakser, men generelt viser alle spiralgalakserne samme tendens, bortset fra UGC914, hvor galaksens masse ligger mindre centreret omkring centrum.

Vi kan desuden se, at fordelingen af masse har samme tendens i de forskellige SB og SC galakser. Rotationskurverne viser, at hastighederne forbliver relativt konstante ved en afstand af 5-10kpc fra galaksens centrum. Derfor forventer jeg, ud fra 1, at længere ude i galaksen, ved en afstand af 20-30kpc, vil rotationshastigheden stadig holde sig nogenlunde konstant.

6 Diskussion

Ud fra antagelsen, at alt masse i en galakse udsender lys, vil man forvente at se, at rotationshastigheden når et maksimum til en given radius for derefter at

falde, jo længere væk fra centrum vi måler. Dette ville indikere, at der er lidt masse længere ude i galaksen i forhold til galaksens centrum, ud fra ligning (9). Rotationskurver til de spiralgalakser, som jeg har undersøgt, viser imidlertid et helt andet mønster. Ifølge mine rotationskurver 'flader' rotationshastigheden ud efter peaket og forbliver nogenlunde konstant. Rotationskurver måles via lys, som de forskellige dele af galaksen udsender, eller via radiobølger fra atomar hydrogengas, HI-gassen, ved den unikke bølgelængde af 21cm. Som det fremgår af rotationskurven for UGC914, er der tydelig forskel mellem de rotationshastigheder, vi måler, og dem, vi kan forvente ud fra det baryoniske materiale. Dette tyder på, at der findes masse i denne galakse, som ikke udsender lys, og derved er der en betydelig masse i ydre krogende af denne spiralgalakse, som må være mørkt stof.

Vi kan desuden se på rotationskurverne for alle de spiralgalakser, jeg undersøgte (Fig 15-20, bilag), at størstedelen af de målte punkter har lav usikkerhed, med undtagelse af SB galaksen NGC2769 hvor signalet ikke har været stærkt. Rotationskurvernes errorbar viser, at positionen typisk har større "usikkerhed" end hastigheden. Dette er på grund af, at positionen er målt ud fra bins i koden, og i den sammenhæng er positionen et interval, fremfor et specifikt punkt. En større usikkerhed blandt målinger af hastigheden kan forekomme, fordi der har været dårligt signal, altså mindre lys. Men generelt har målingerne af spiralgalakserne en lav usikkerhed, og de er meget præcise. Dette gør rotationskurver meget velegnet til at give præcist overblik over massefordelingen i galakserne.

Vi kan se ud fra kurven tilhørende UGC914, at rotationshastigheden når op på 150km/s og derefter forbliver mere eller mindre konstant ved en afstand på 10-15 kpc med enkelte målinger, der afviger fra dette. Vi kan ligeledes se samme fordeling for de andre SB og SC galakser, som jeg analyserer, med rotationshastigheder op til 230km/s og konstant hastigheder allerede ved 5-10kpc. Rotationskurver hvor hastigheden hurtigt bliver konstant, som i UGC9579 (Se fig. 19 bilag), indikerer, at mere af denne galakses masse befinder sig tæt på dens centrum, og at denne galakse har formentlig en mere massiv bule. Mine resultater peger altså på, at der ikke er en systematisk forskel mellem disse forskellige galaksetyper og fordelingen af mørkt stof. De store usikkerheder i rotationskurven for elliptisk galakse NGC4649 (fig. 3, bilag) kan forklares med, at stjerner i elliptiske galakser bevæger sig tilfældigt. Rotationskurven for NGC4649, som er den eneste elliptiske galakse, jeg undersøger, illustrerer, hvor kaotisk bevægelsen i disse galakser er. Vi kan se store afvigelser på målingernes hastigheder og positioner af de enkelte punkter. Det giver derfor ikke mening at fremstille rotationskurve for at måle massen af denne galakse, fordi stjernerne bevæger sig kaotisk, og vi kan derfor ikke bruge ligning (9). Hastighedsdispersionen ville være mere velegnet til at estimere galaksens masse ud fra Faber-Jackson relationen, $L \propto \sigma^4$.

Denne galakse har heller ikke hydrogen gas nok til, at vi kan måle 21 cm linjer for den, som vi kunne det i spiralgalakserne, inkluderet i bilag. Men det er muligt at måle efter atomar hydrogen for elliptiske galakser, som man ville gøre det for en spiralgalakse, hvis de har en tilstrækkelig mængde af HI.

Ved undersøgelse af den elliptiske galakse NGC5266 [6], hvor man kunne måle 21cm hydrogen linjer, opdagede man, at den atomare gas i denne galakse bevægede sig i cirkelbane, som det er typisk for spiralgalakser.

Under antagelse af, at NGC5266 minder om den typiske elliptiske galakse, må det betyde, at mørkt stof fordeler sig på samme måde i elliptiske galakser som i spiralgalakser, altså at ydre delene hovedsageligt består af mørkt stof.

Men jeg mener ikke, at metoderne, som benyttes til rotationskurver er velegnet til at måle massefordelingen af elliptiske galakser, fordi stjernerne bevæger sig så tilfældigt i dem. Desuden er det sjældent, at man kan finde tilstrækkelig mængder atomar hydrogen gas nok til at måle en rotationskurve af en elliptisk galakse.

Mine resultater giver mig heller ikke grundlag for at kunne konkludere noget om naturen af mørkt stof, og hvorvidt mørkt stof er WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles). WIMPs er imidlertid den mest benyttede hypotese i kosmologi om, hvad mørkt stof er.

6.1 Udfordringer ved målinger af rotationskurver

Observationer via spektroskopi er i høj grad baseret på det lys, vi modtager, derfor er det vigtigt at tage højde for forstyrrelser. Vores atmosfære og galaktisk støv gør lyset mere rødt, når det passerer igennem.

En anden udfordring er, at spektroskopi tillader os at måle galaksens rotationshastigheder ved en maksimal afstand på 10-20kpc fra galaksens centrum, givet der er tydeligt lys fra denne galakse, hvilket er relativt korte afstande.

Det begrænser os dermed også i forhold til, hvor store afstande vi kan måle over i rotationskurver.

21cm hydrogen linjen giver os derimod mulighed for at kunne måle større afstande, grundet det udsender radiobølger, som kan rejse langt uden at forstyrres.

Det er desuden vigtigt at sørge for, at galaksen, som vi måler spektrum af, vender på en måde, at vi både kan måle pekulier hastigheder mod os og fra os, ellers kan vi ikke måle hastigheder fra galaksen.

7 Konklusion

Spektrene, som jeg undersøgte, viser tydeligere NaD linjer i UGC12001 og NGC4649, mens SC galakserne UGC914 og NGC5714 samt SB galakserne NGC5907, NGC7393 og UGC9579 havde mere fremtrædende H- α linjer. Galaksen NGC2769 viser tegn på mindre stjernedannelse end de ovennævnte galakser med fremtrædende H- α linjer, men signalet for dens NaD linje er svagt.

Jeg konkluderer ud fra dette, at galakserne med tydeligere H- α linjer viser tegn på højere stjerneproduktion, end galakserne med tydelige NaD linjer.

Jeg konkluderer, ud fra rotationskurver til spiralgalakser, udregnet ved brug af NaD absorptionslinjer eller H- α emissionslinjer samt via Rotcurve, at der er forskelle i rotationshastigheder samt under hvilke afstande disse hastigheder bliver konstante. SB galakser i mine rotationskurver havde de højeste hastigheder, og deres hastigheder voksede hurtigst. Jeg konkluderer ud fra dette, at SB galakserne viser tegn på mere masse omkring centrum, hvilket peger på, at de har en mere massiv bule i forhold til galakserne UGC914 og NGC2769.

Derimod er der ikke nogen tegn på systematiske forskelle i det mørke stofs fordelingen inden for en radius af 10-15kpc i min undersøgelse.

Jeg konkluderer dermed, at der ikke er systematisk forskel i det mørke stofs fordeling i spiralgalakser. Altså mørkt stof er sfærisk fordelt, og dets densitet går som R^{-2} .

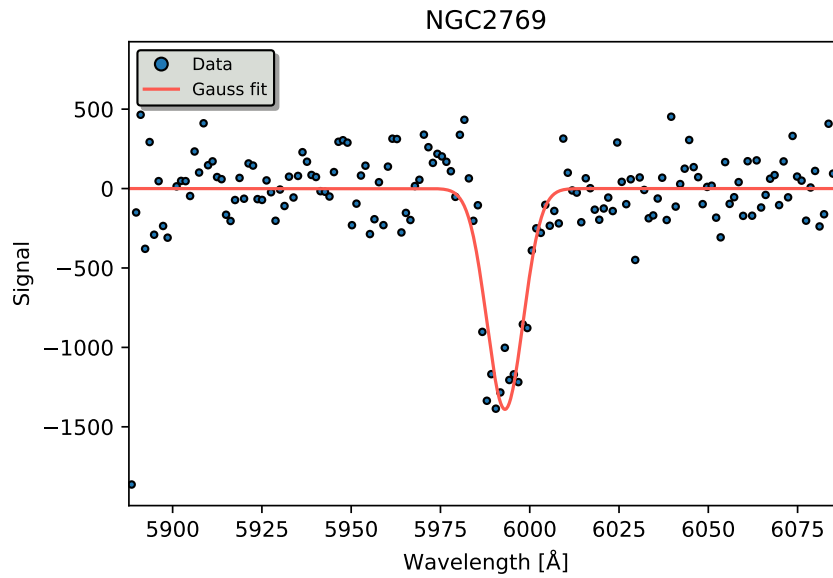
Litteratur

- [1] URL: <http://www.not.iac.es/general/newnot/>. (sidst besøgt kl. 9.30 d. 16/2/2021).
- [2] Giuseppe Bertin. *Dynamics of Galaxies: Second Edition*. Cambridge University Press, 2000, s. 45. ISBN: 0-521-47855-3.
- [3] Linda S. Sparke & John S. Gallagher III. *Galaxies in the Universe An introduction*. Cambridge University Press, 2019, s. 214–217. ISBN: 978-0-521-67186-6.
- [4] Linda S. Sparke & John S. Gallagher III. *Galaxies in the Universe An introduction*. Cambridge University Press, 2019, s. 357. ISBN: 978-0-521-67186-6.
- [5] Linda S. Sparke & John S. Gallagher III. *Galaxies in the Universe An introduction*. Cambridge University Press, 2019, s. 217. ISBN: 978-0-521-67186-6.
- [6] Linda S. Sparke & John S. Gallagher III. *Galaxies in the Universe An introduction*. Cambridge University Press, 2019, s. 274. ISBN: 978-0-521-67186-6.
- [7] Linda S. Sparke John S. Gallagher III. *Galaxies in the Universe An introduction*. Cambridge University Press, 2019, s. 236–237. ISBN: 978-0-521-67186-6.
- [8] Knut Lundmark. “Über die Bestimmung der Entfernungen, Dimensionen, Massen und Dichtigkeiten für die nächstgelegenen anagalaktischen Sternsysteme”. I: (1930), s. 13.
- [9] Bradley W. Carroll & Dale A. Ostlie. *An introduction to Modern Astrophysics, second edition*. Cambridge University Press, 2017, s. 31–33. ISBN: 978-1-108-42216-1.

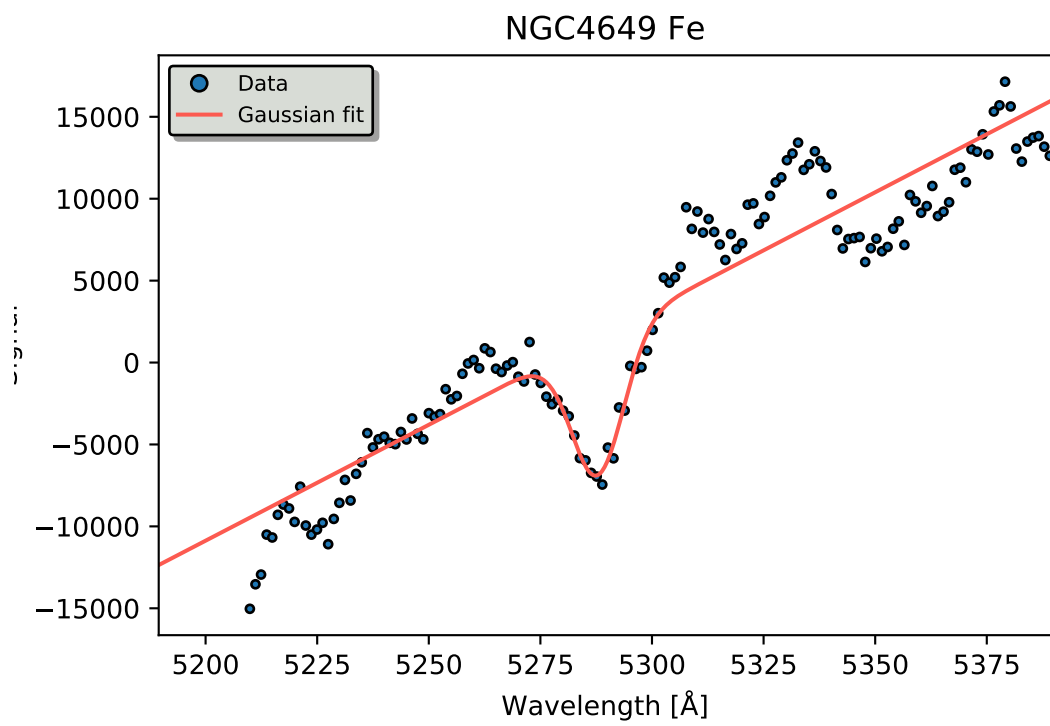
- [10] Bradley W. Carroll & Dale A. Ostlie. *An introduction to Modern Astrophysics, second edition*. Cambridge University Press, 2017, s. 398–399. ISBN: 978-1-108-42216-1.
- [11] Bradley W. Carroll & Dale A. Ostlie. *An introduction to Modern Astrophysics, second edition*. Cambridge University Press, 2017, s. 1232–1233. ISBN: 978-1-108-42216-1.
- [12] Vera C. Rubin. “Dark Matter in Spiral Galaxies”. I: *Scientific American* 248.6 (1983), s. 96–109.
- [13] Barbara Ryden. *Introduction to Cosmology: Second Edition*. Cambridge University Press, 2017, s. 63–67. ISBN: 978-1-107-15483-4.
- [14] Tamara M. Davis & Morag I. Scrimgeour. “Deriving accurate peculiar velocities (even at high redshift)”. I: *Monthly Notices of the ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY* 442 (2014), s. 1117–1122.
- [15] James Binney & Scott Tremain. *Galactic Dynamics: Second Edition*. Princeton University Press, 2011, s. 112. ISBN: 0691130272.
- [16] James Binney & Scott Tremain. *Galactic Dynamics: Second Edition*. Princeton University Press, 2011, s. 112. ISBN: 0691130272.
- [17] James Binney & Scott Tremain. *Galactic Dynamics: Second Edition*. Princeton University Press, 2011, s. 70–71. ISBN: 0691130272.
- [18] James Binney Scott Tremain. *Galactic Dynamics: Second Edition*. Princeton University Press, 2011, s. 111–112. ISBN: 0691130272.
- [19] James Binney Scott Tremain. *Galactic Dynamics: Second Edition*. Princeton University Press, 2011, s. 112. ISBN: 0691130272.

Johan P. U. Fynbo har stillet til rådighed de tre pythonkoder Bachelormeasure, Rotcurve og plotcurve21cm. Disse er vedlagt i bilag.

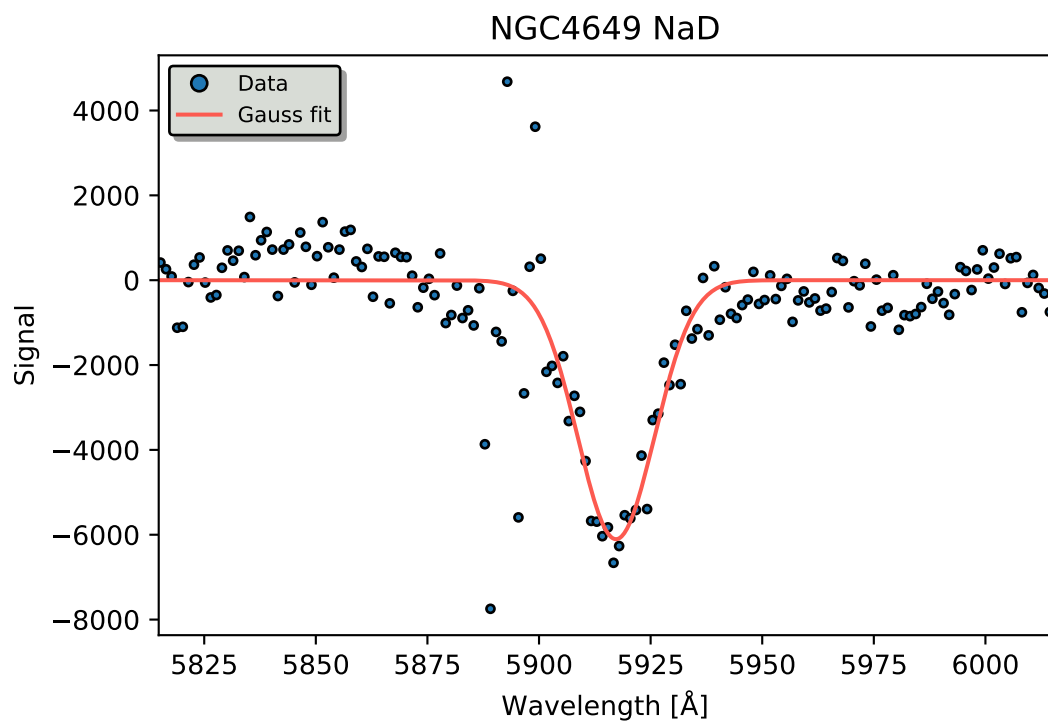
8 Bilag



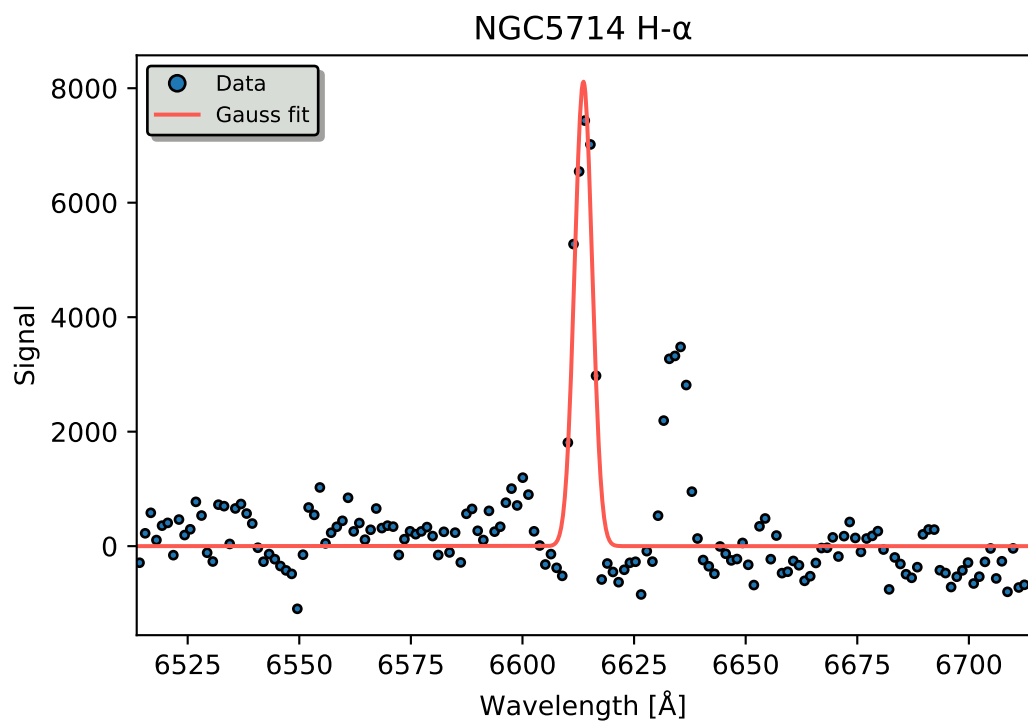
Figur 6: Her er en NaD absorptionslinje fra spektret af NGC2769. Signalet er ikke helt stærkt for denne galakse.



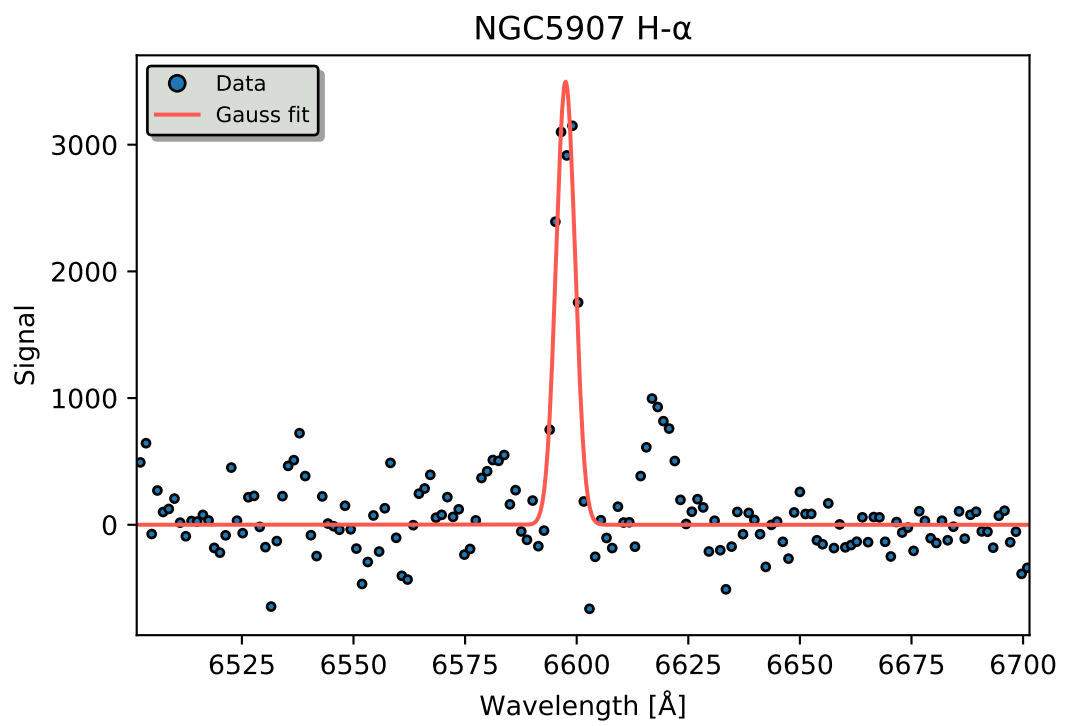
Figur 7: Figuren viser en jern absorptionslinje fra spektret af NGC4649.



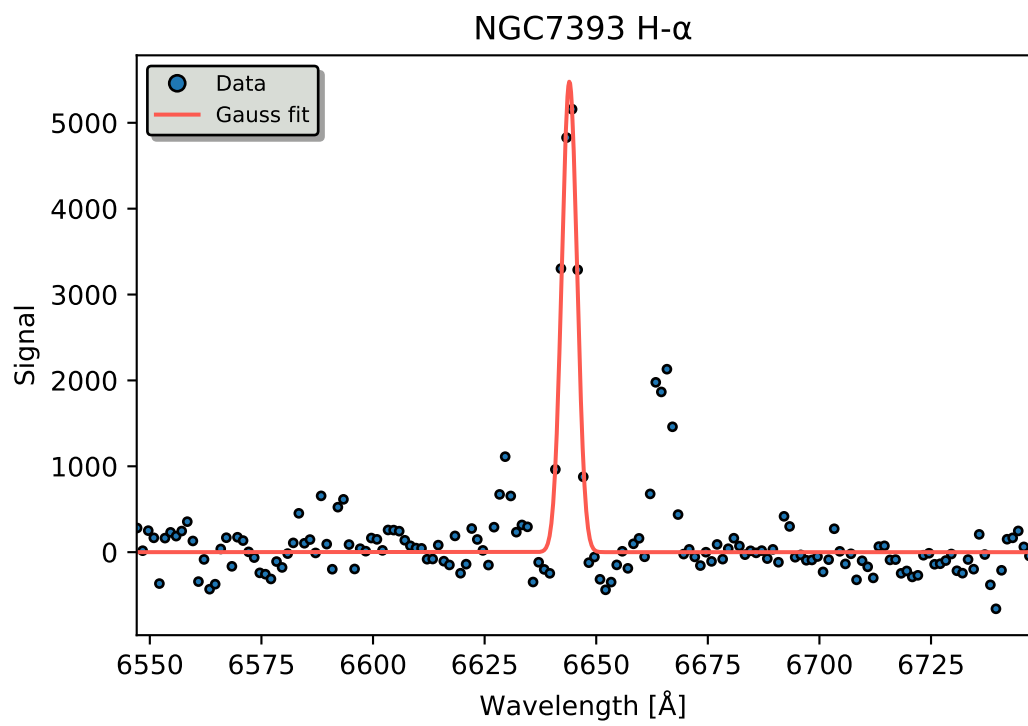
Figur 8: Figuren viser en NaD absorptionslinje fra spektret af NGC4649.



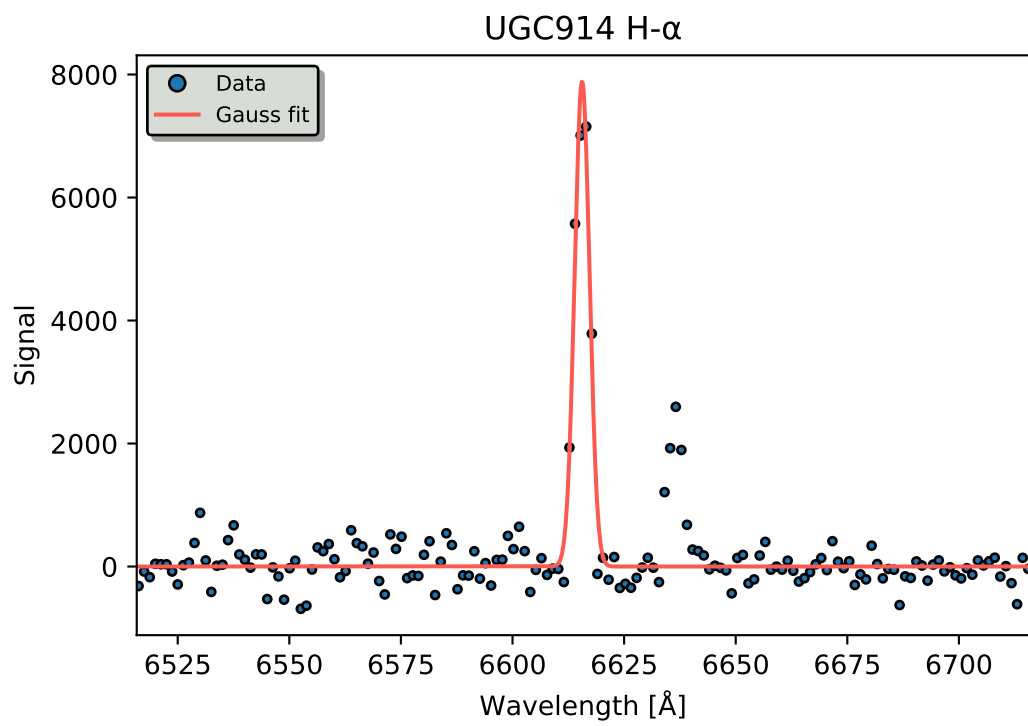
Figur 9: Her er en H- α emissionslinje fra spektret af NGC5714.



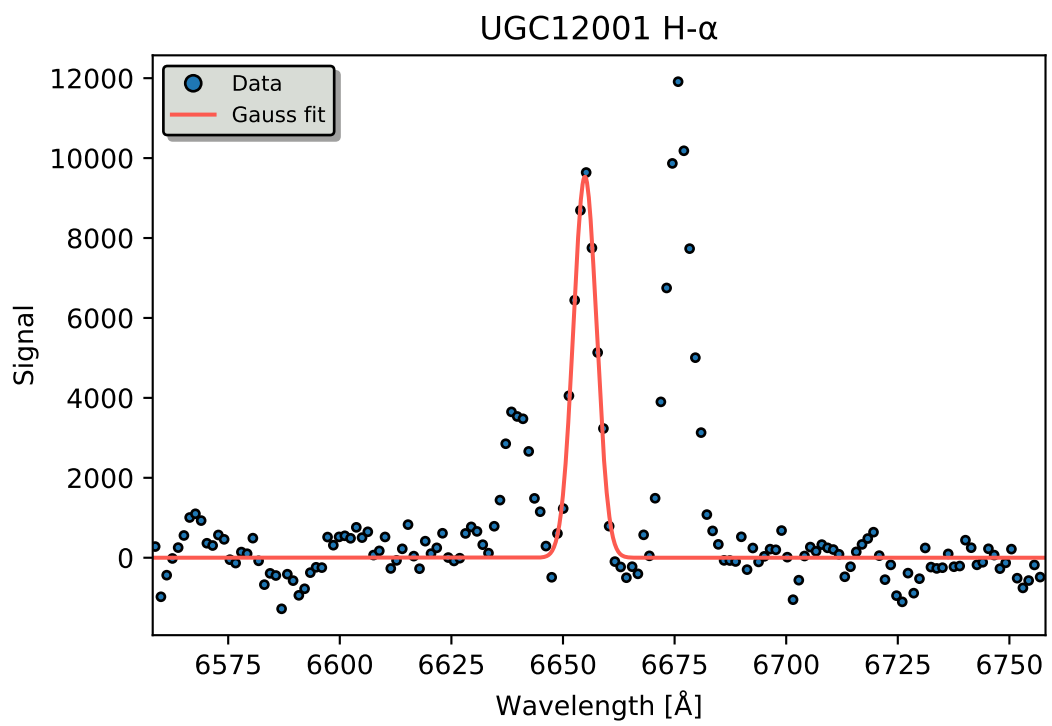
Figur 10: H- α emissionslinje fra spektret af NGC5907.



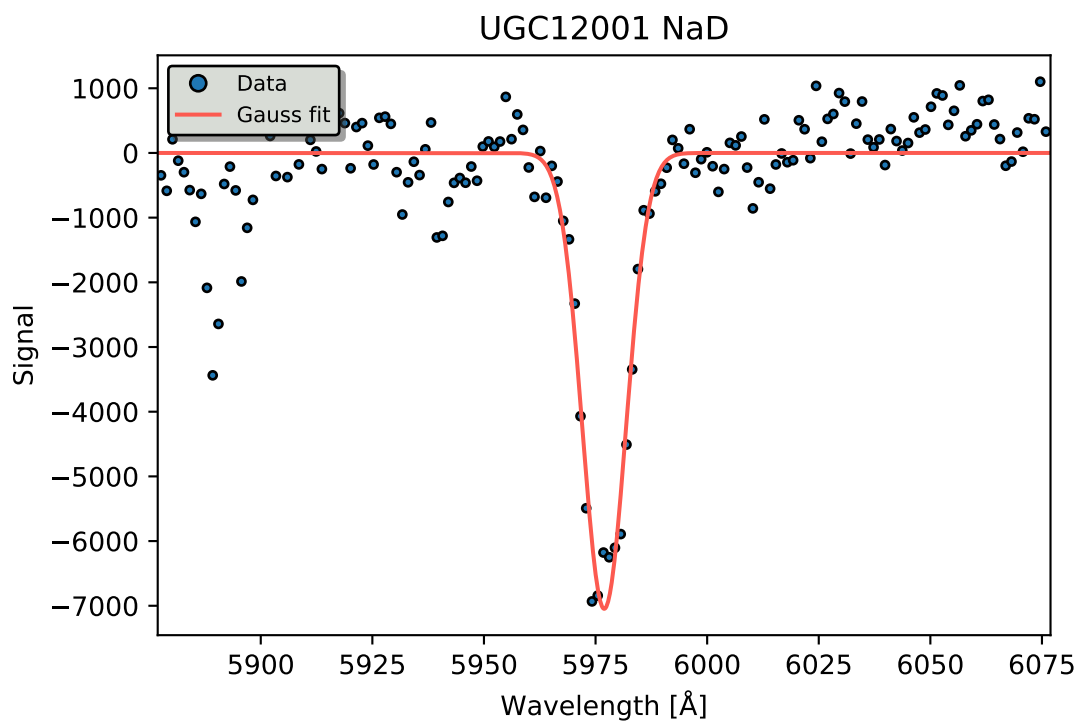
Figur 11: Her er en H- α emissionslinje fra spektret af NGC7393.



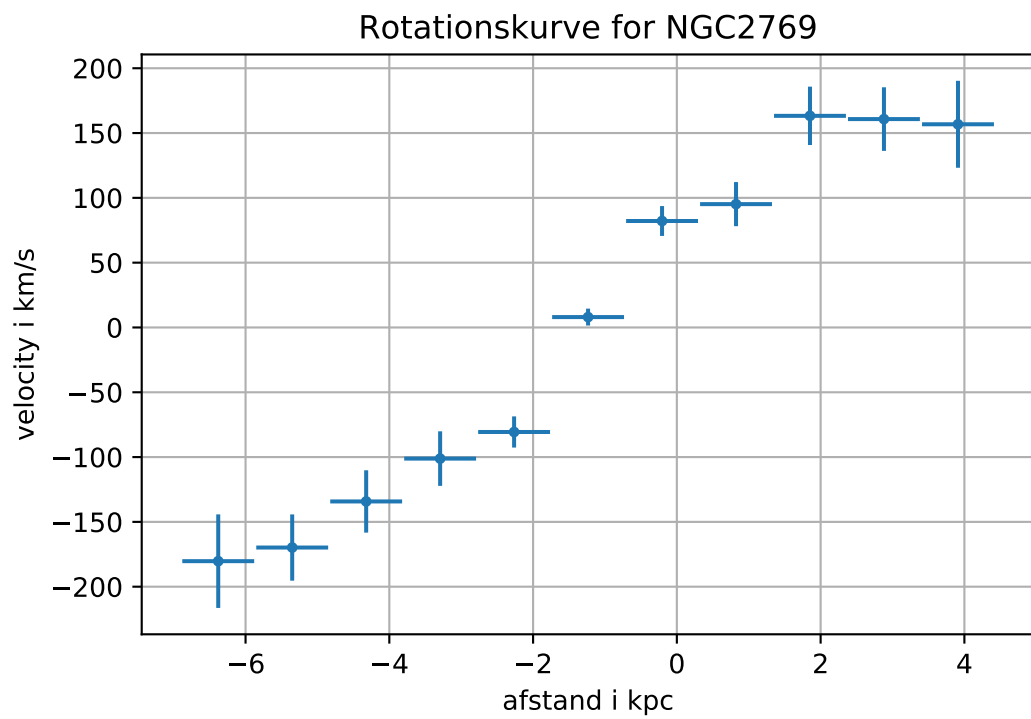
Figur 12: Her er en H- α emissionslinje fra spektret af UGC914.



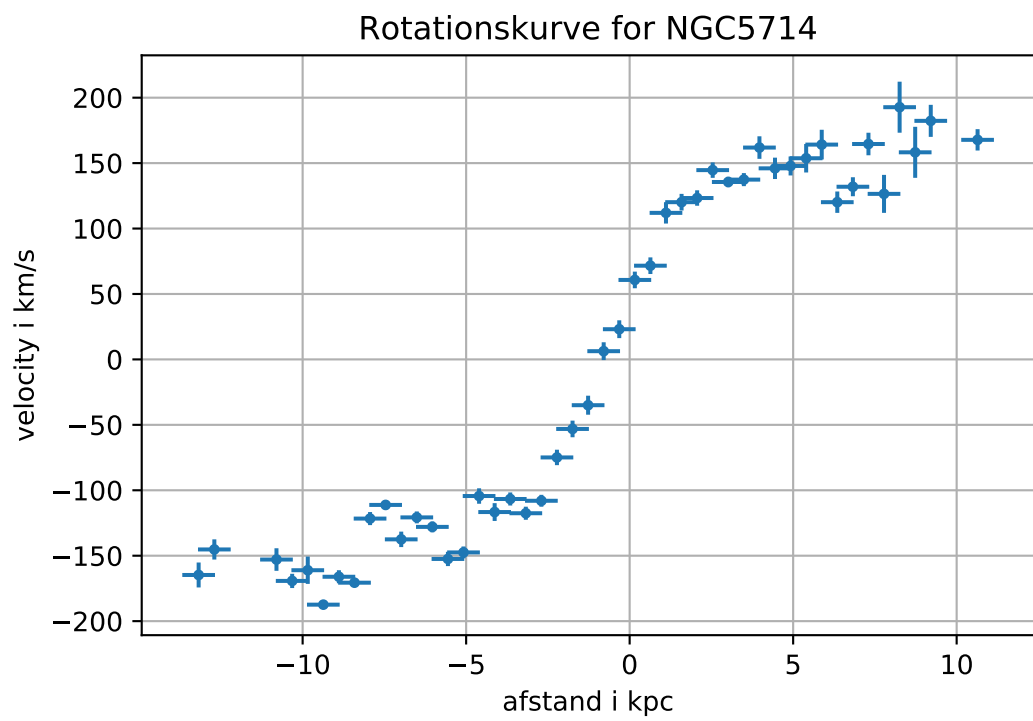
Figur 13: Her er en H- α emissionslinje fra spektret af UGC12001.



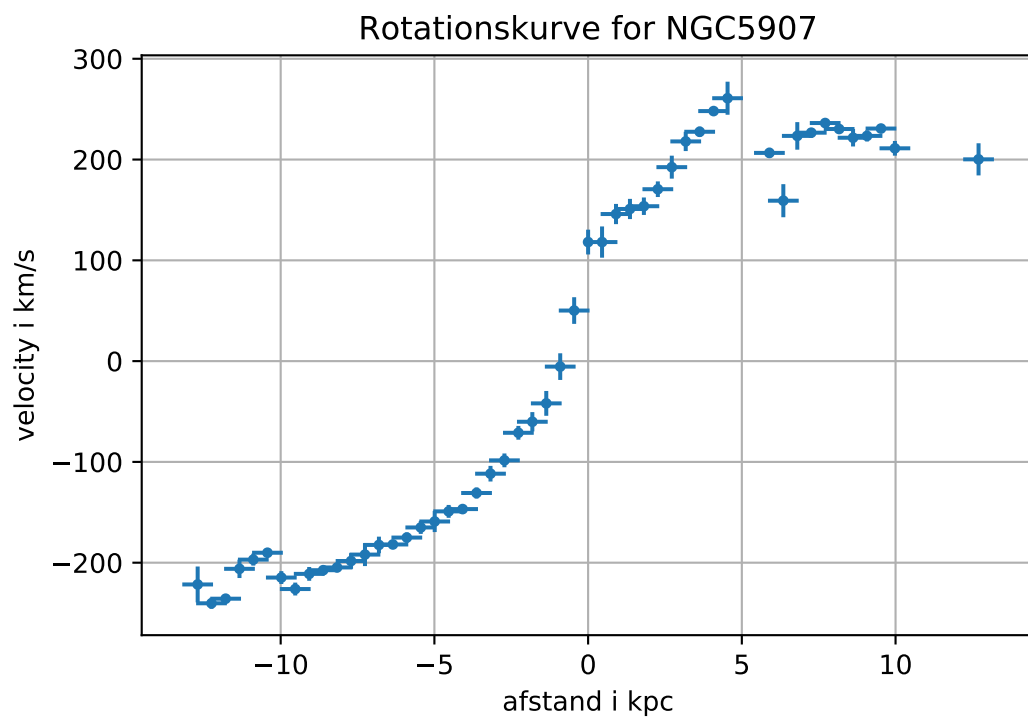
Figur 14: Her er en NaD absorptionslinje fra spektret af UGC12001.



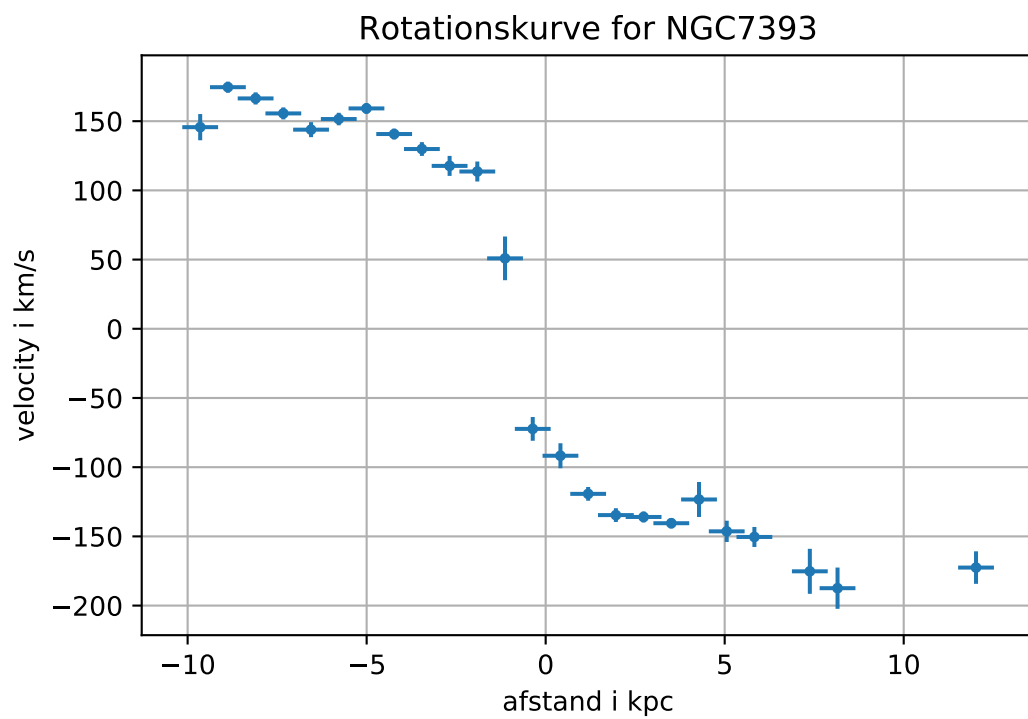
Figur 15: Rotationskurve for NGC2769 målt via en NaD absorptionslinje. Det er synligt at signalet fra denne galakse ikke har været så stærkt som de hos de andre spiralgalakser



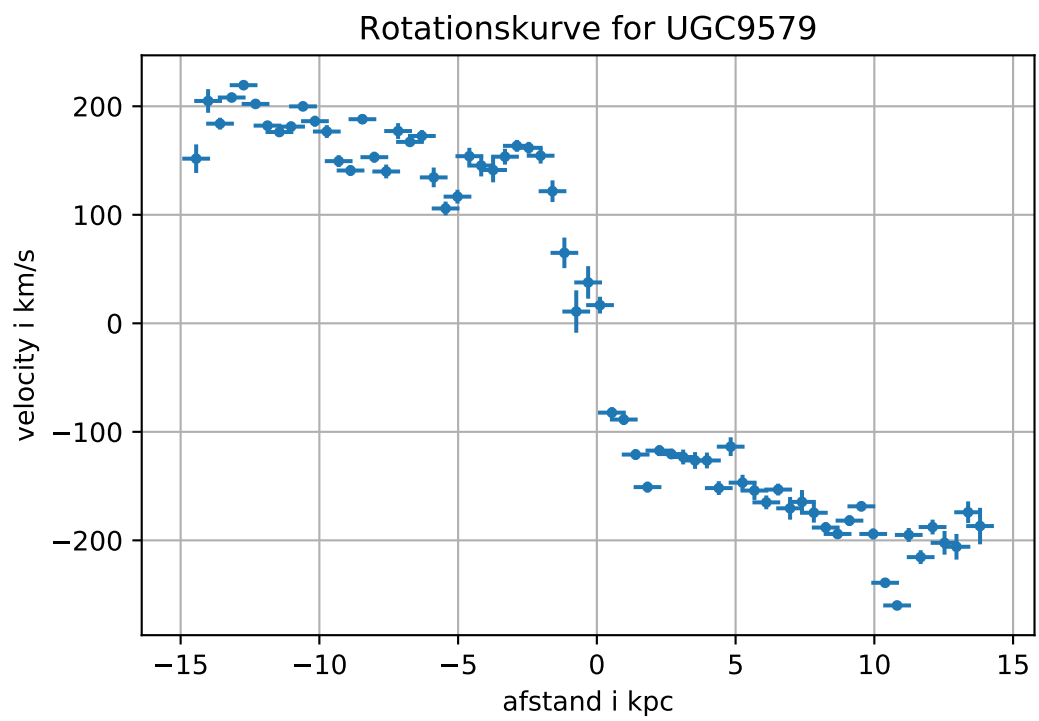
Figur 16: Rotationskurve for NGC5714 målt via en H- α emissionslinje.



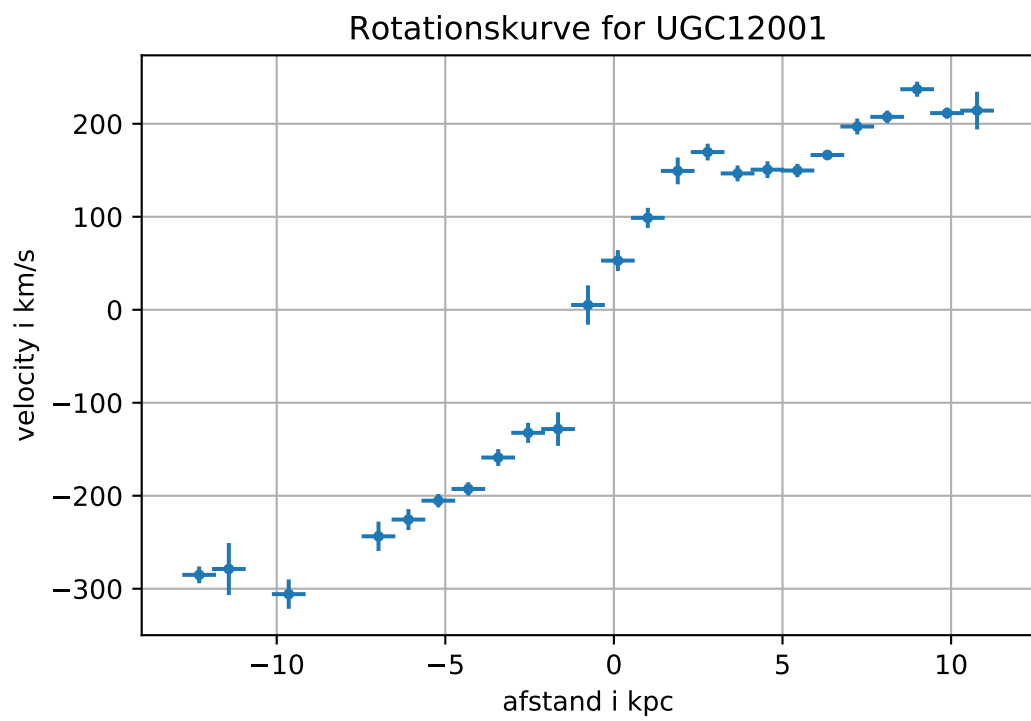
Figur 17: Rotationskurve for NGC5907 målt via en H- α emissionslinje.



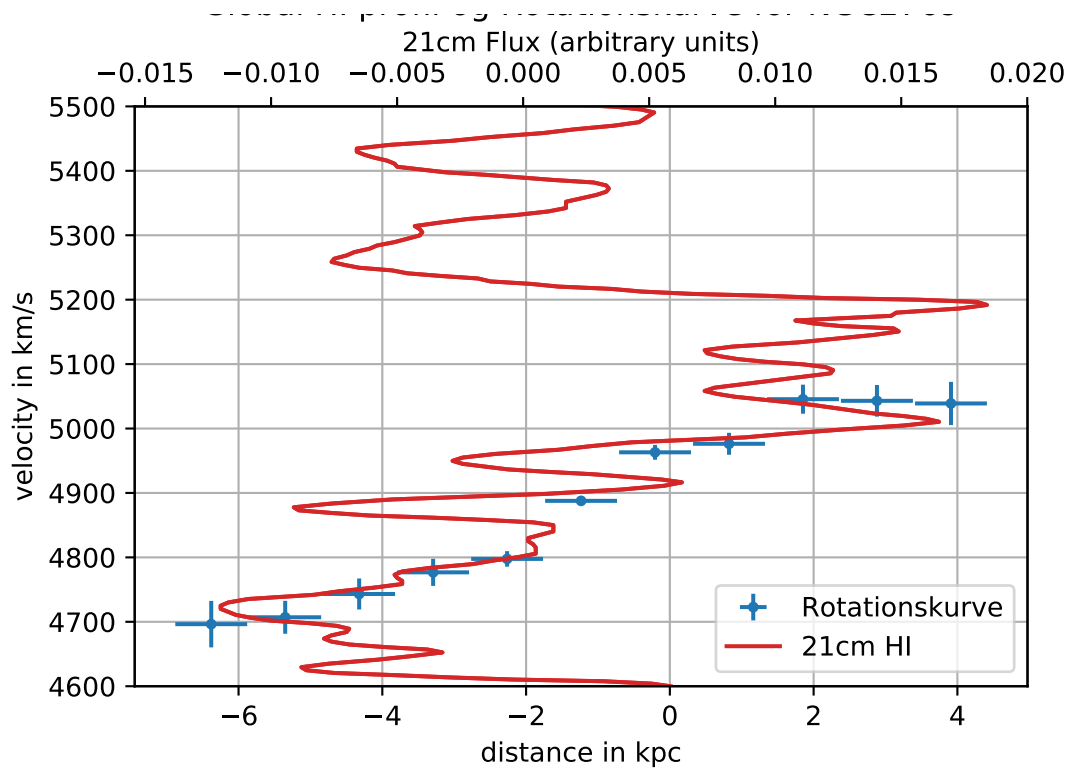
Figur 18: Rotationskurve for NGC7393 målt via en H- α emissionslinje.



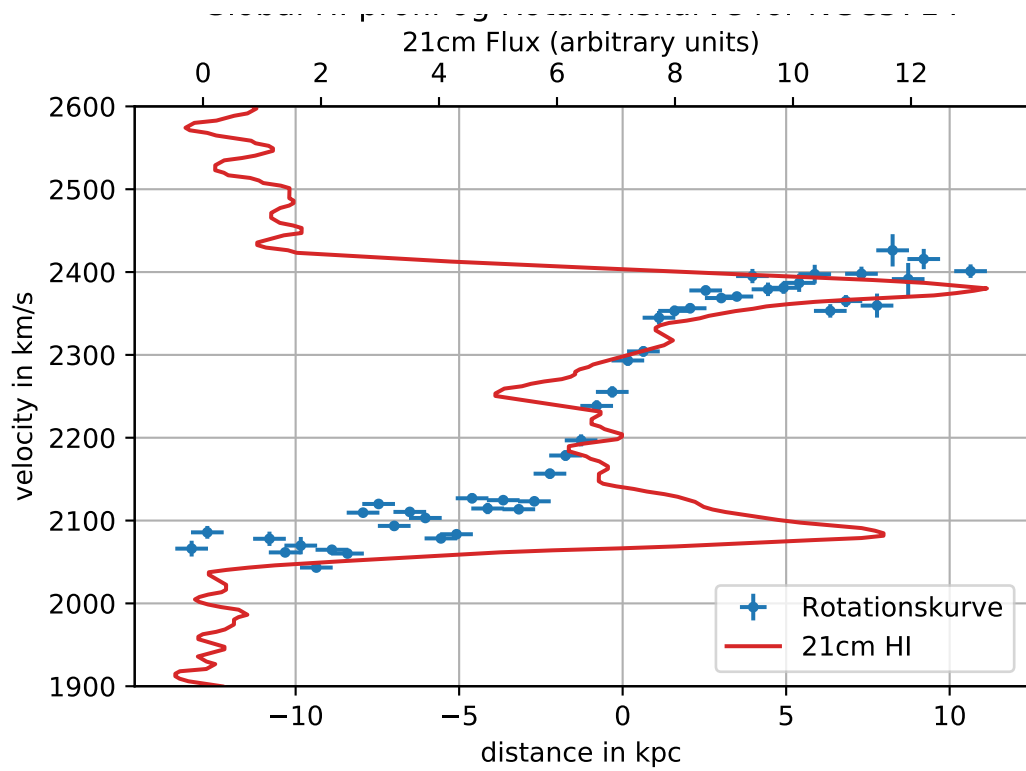
Figur 19: Rotationskurve for UGC9579 målt via en H- α emissionslinje.



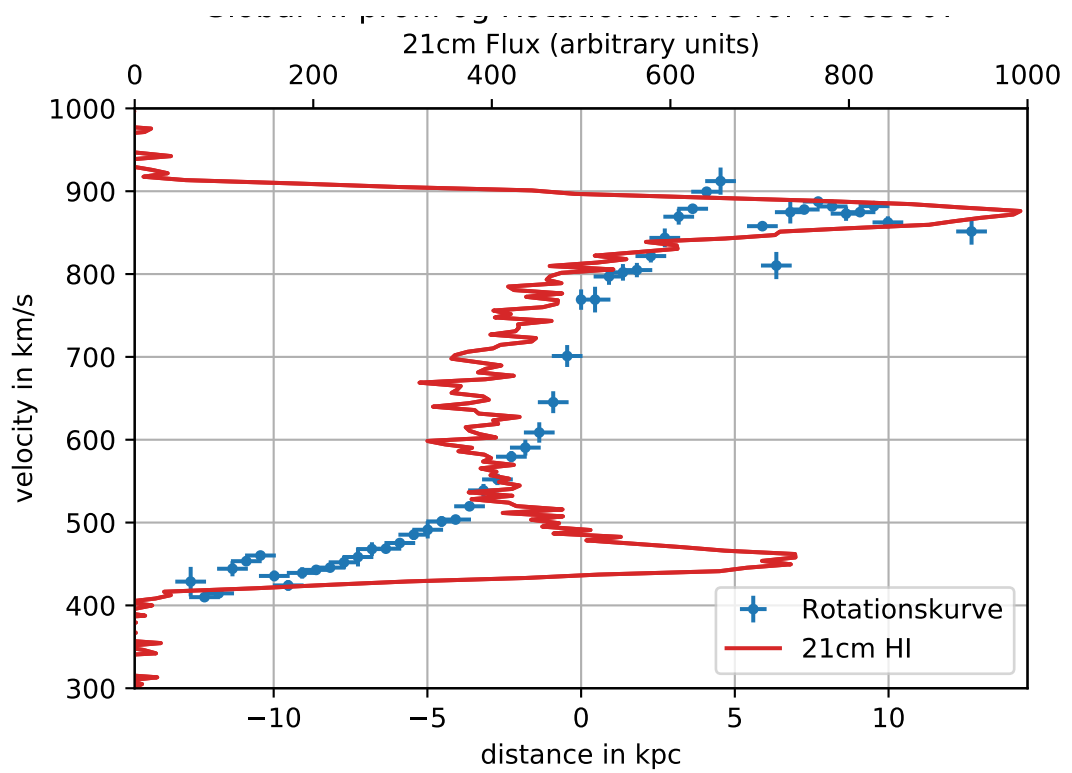
Figur 20: Rotationskurve for UGC12001 målt via en H- α emissionslinje.



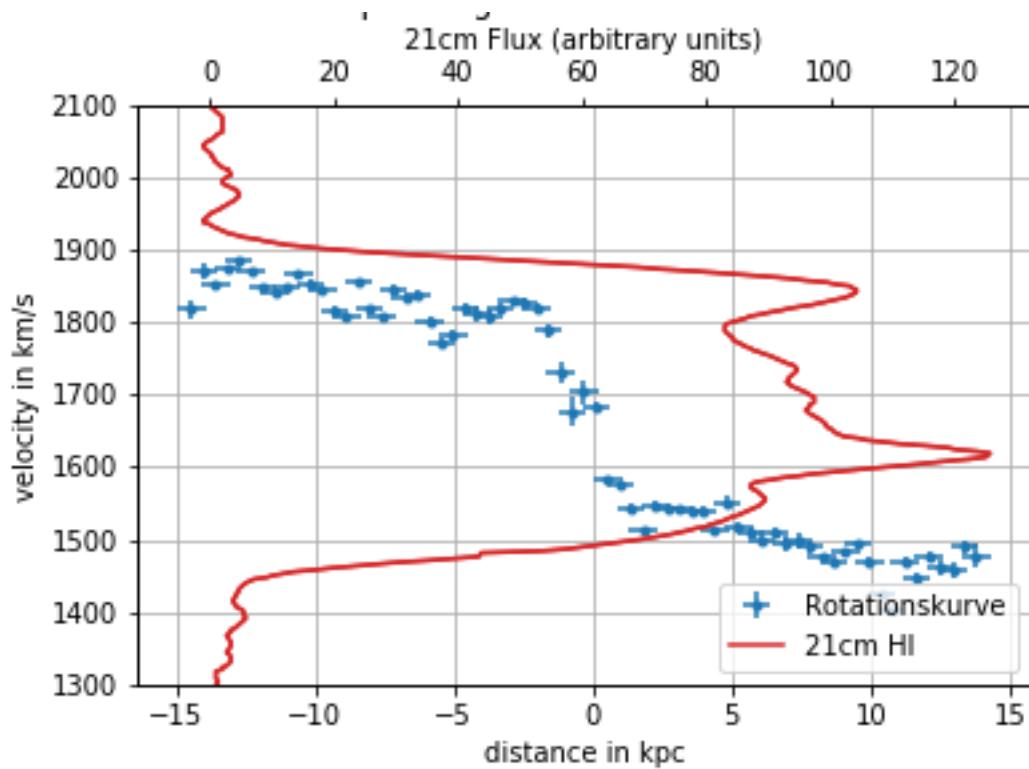
Figur 21: Den målte rotationskurve for NGC2769 sammenlignet med 21cm profilen for NGC2769.



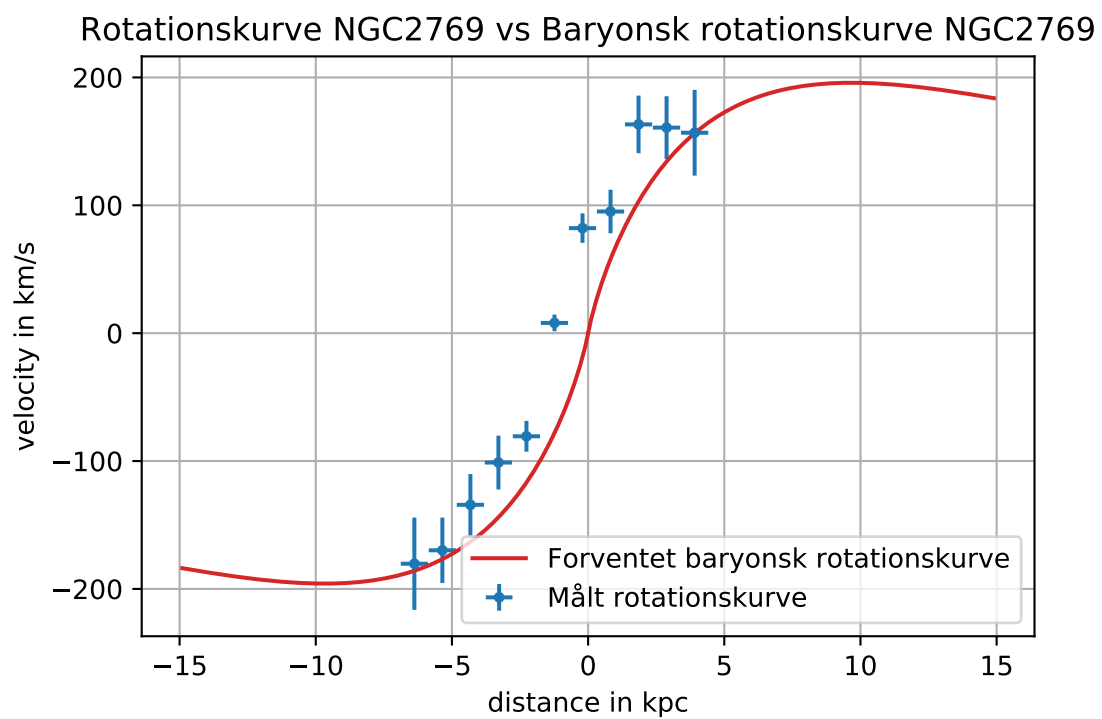
Figur 22: Den målte rotationskurve for NGC5714 sammenlignet med 21cm profilen for NGC5714.



Figur 23: Den målte rotationskurve for NGC5907 sammenlignet med 21cm profilen for NGC5907.

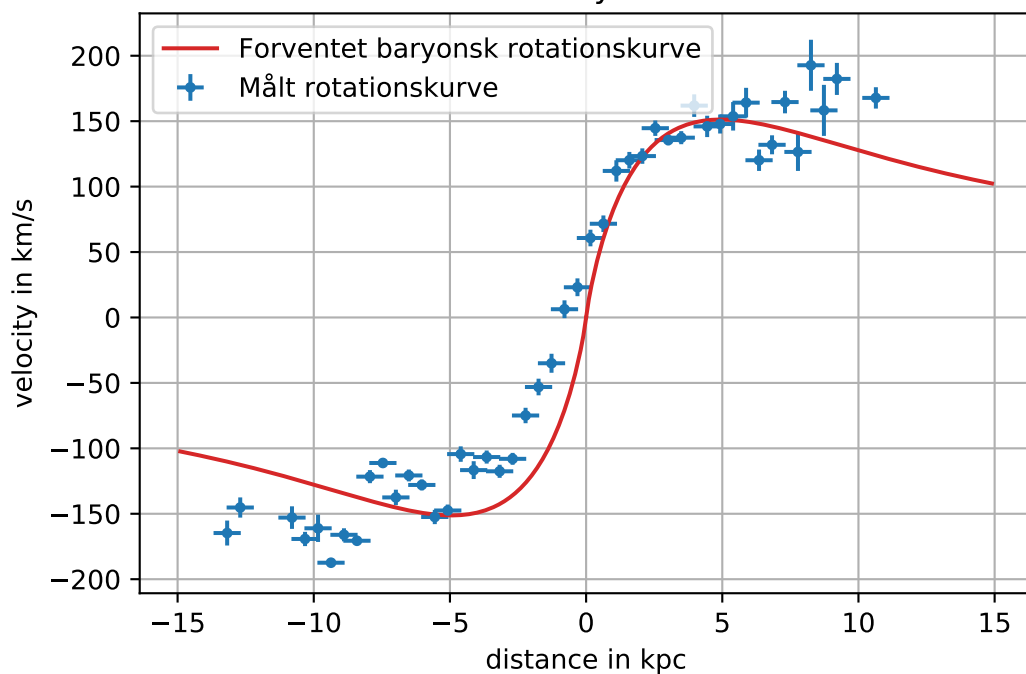


Figur 24: Den målte rotationskurve for UGC9579 sammenlignet med 21cm profilen for UGC9579.

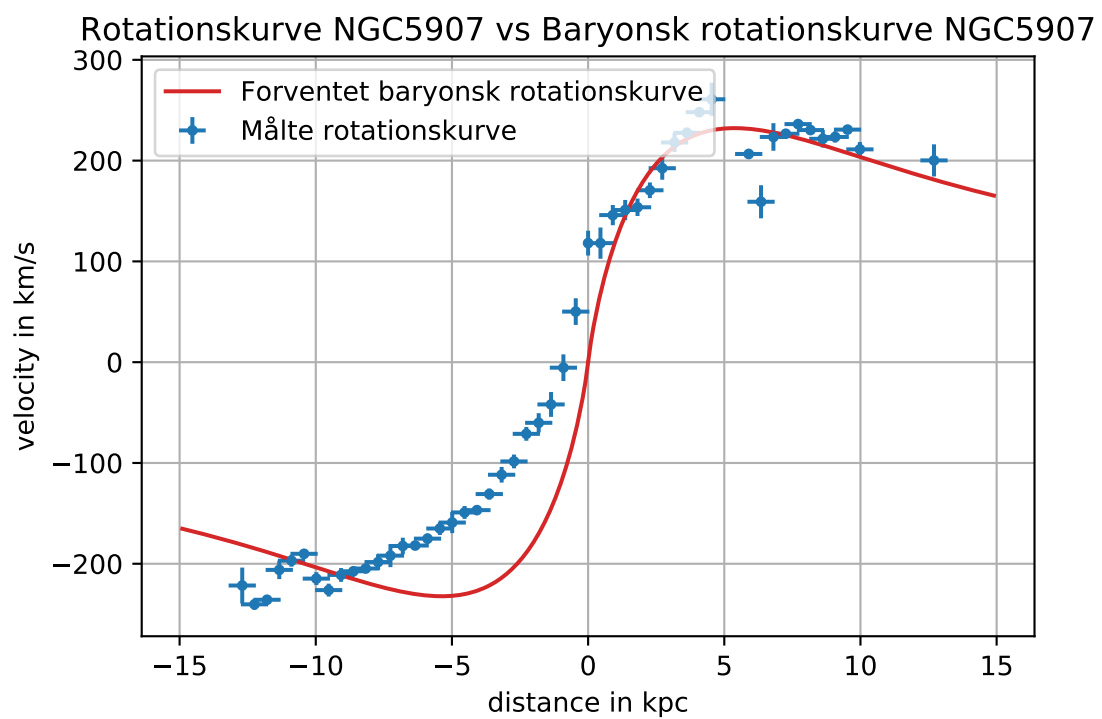


Figur 25: Den målte rotationskurve for NGC2769 vs den forventede baryonske rotationskurve for NGC2769.

Rotationskurve NGC5714 vs Baryonsk rotationskurve NGC5714

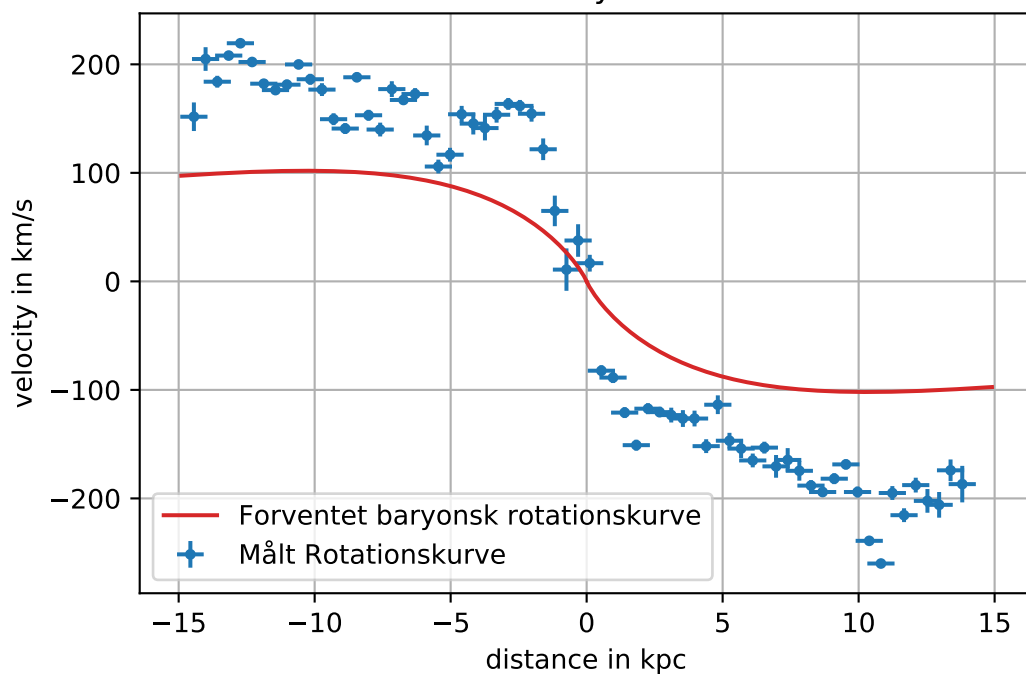


Figur 26: Den målte rotationskurve for NGC5714 vs den forventede baryonske rotationskurve for NGC5714.



Figur 27: Den målte rotationskurve for NGC5907 vs den forventede baryonske rotationskurve for NGC5907.

Rotationskurve UGC9579 vs Baryonsk rotationskurve UGC9579



Figur 28: Den målte rotationskurve for UGC9579 vs den forventede baryonske rotationskurve for UGC9579.

Name	Inclination angle (degrees)	log stellar mass (logM_sun)	log gasmass (log M_sun)	Disk scale length (Rd, kpc)	Baryocentric correction (km/s)
NGC493 / UGC914 (Sc)	70	9.967	9.96	4.0	24.7
NGC5714 / UGC9431 (Sc)	80	10.398	9.88	2.3	-2.7
UGC9579 (Sb/c?)	78	10.722	9.77	2.7	-27.1
NGC5907 (Sb)	87	10.871	9.84	2.7	-9.1
UGC11230 (Sc eller Sd)	70				
UGC10288 (Sc)	85	10.308		2.9	
UGC12001 (Sb)	80				11.7
NGC7393 (Sb peculiar)	40				8.5
NGC4649 (Elliptical)		ca. 12			2.9
NGC2769 (Sb)	76	11.066			-21.0

Figur 29: Informationstabel for galakser jeg har undersøgt. Denne information er givet af min vejleder Johan P. U. Fynbo. Galakserne UGC11230 og UGC10288 er ikke en del af projektet.

Name	Mass(M_{\odot})	Radius(kpc)	Rotationshastighed(km/s)
UGC914(SC)	6.72E+10	151.064	12.78
NGC5714(SC)	6.89E+10	167.78	10.64
UGC9579(SB/SC?)	1.11E+11	-186.83	13.81
NGC5907(SB)	1.17E+11	200.21	12.7
UGC12001(SB)	1.14E+11	214.19	10.77
NGC7393 (SB)	8.24E+10	-172.53	12.02
NGC2769 (SB)	2.213E+10	156.77	3.911

Tabel 1: Tabel over den nedre massegrænse for galakserne

Listing 1: Pythonkode nr.1 Bachelormeasure.ipynb

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.special
from astropy.io import fits #Bruges til at l se fits filerne, som ofte er brugt
from scipy.optimize import curve_fit
#cwd = os.getcwd() #Disse to bruges til at finde placering af filer
#files = os.listdir(cwd)

def Gauss(x,I,my,S): #Almindelig Gauss-fordeling, S=sigma
    return I/(np.sqrt(2.0*np.pi)*S)*np.exp(-0.5*((x-my)/S)**2)

file = open('info"galaksenavn".txt','r')
n = np.int(file.readline()) #Antal bins til fittet
filename = file.readline() #Filnavn
kpc_per_arc = np.float(file.readline()) #kpc/arcsekund ved galaksens r dforskydning
z = np.float(file.readline()) #Galaksens r dforskydning
ncenter = np.int(file.readline()) #R kketal for galaksens centrum
binsize = np.int(file.readline()) #R kker pr bin (binfaktor)
WLguess = np.float(file.readline()) #Start g t til linjens b lgel ngde
Sguess = np.float(file.readline()) #Start g t til linjens sigma

c = 3.0*10**5 #Lysets hastighed [km/s]
G = 6.674*10**(-11) #Gravitations konstant i Si enheder
lmbd_em = 6564.61 # NaD b lgel ngde i (5893), 6564.61 er for H-alpha, 5270
pixel_scale = 0.189 # arcsec per pixel

#Her indl ses dataen og der laver et b lgel ngde array
Galaxy = fits.open(filename.strip("\n"), ignore_missing_end=True)
header = Galaxy[0].header
data = Galaxy[0].data

```

```

ncol = len(data[0]) #Antal kolonner i dataen , nogle gange skal der -1 p .
bins = np.int(len(data)/binsize) #antal bins

#Denne del kan l se b lgel ngdens kalibrering fra headeren af fits-filen
cdelt1 = header['CDELT1'] #Increment som er /pixel
crval1 = header['CRVAL1'] #Start b lgel ngden i
Wl = np.arange(crval1, ncol*cdelt1+crval1, cdelt1) #B lgdel ngde array i
distance = (n*binsize-ncenter)*pixel_scale*kpc_per_arc # Afstand fra galaksens c

#Lav dataen til bins
flux = [] # Tom liste til flux
spec = [] # Tom liste til flux(Wl)
x = np.array_split(data, bins, axis=0) # Kan indele data og bins

for i in range(len(x)): # Summer flux
    flux.append(np.sum(x[i], axis=0))
for i in range(len(x)): # Samler flux og b lgel ngde
    spec.append(np.vstack((flux[i], Wl))) #vstack samler splittede arrays

Goodrange = np.where((Wl >= (1+z)*lmbd_em-100.) & (Wl <= (1+z)*lmbd_em+100.))[0]
BackrangeLeft = np.where((Wl >= (1+z)*lmbd_em-100.) & (Wl <= (1+z)*lmbd_em-30.))
BackrangeRight = np.where((Wl >= (1+z)*lmbd_em+30.) & (Wl <= (1+z)*lmbd_em+100.))
flux = flux[n]
meanBackleft = np.mean(flux[BackrangeLeft])
meanBackRight = np.mean(flux[BackrangeRight])
meanBack = (meanBackleft+meanBackRight)/2
flux = flux[Goodrange]-meanBack

parameter_g t = [np.max(flux), WLguess, SGuess]
val, cov = curve_fit(Gauss, Wl[Goodrange], flux, p0=parameter_g t)

print('Peak_Wl'+'_'+ '{:.6}'.format(val[1])+ ' ')
print('Sigma'+'_'+ '{:.6}'.format(val[2])+ ' ')
print('Error'+'_'+ '{:.2}'.format(np.sqrt(cov[1][1]))+ ' ')
print('Afstand_fra_centrum'+'_'+ '{:.4}'.format(distance)+'kpc')

plt.figure()
plt.plot(Wl[Goodrange], flux, '.', mec = 'k', label='Data')
plt.plot(np.linspace((1+z)*lmbd_em-100.,(1+z)*lmbd_em+100., 1000), Gauss(np.linspace(
(1+z)*lmbd_em+100., 1000), *val), '-', c = '#fc5a50', \
label='Gauss_fit')
plt.ylabel('Signal')
plt.xlabel('Wavelength_['+ ' ]')
plt.legend(loc='upper_left', fancybox=True, shadow=True, framealpha=1,\
facecolor='#d8dcd6', edgecolor='black', prop={'size':8}, markerscale=2)
plt.xlim((1+z)*lmbd_em-100.,(1+z)*lmbd_em+100.)

```



```

plt.title('Figurtitle') #H-\u03B1
#plt.savefig('filnavn.pdf') #Gemmer figuren som pdf
plt.show()
print(n) #Printer bin nr.

```

Listing 2: Pythonkode nr.2 Rotcurve.ipynb

```

##### """Rotation Curve of a Galaxy"""

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.special
from astropy.io import fits
from scipy.optimize import curve_fit

plt.close('all')

#Global constants
lmbd_em = 6564. # H-alpha wavelenght in AA
pixel_scale = 0.189 # arcsec per pixel
c = 3.0 * 10 ** 5 #speed of light [km/s]

#Load wavelength measurements
data = np.loadtxt('lambda_UGC914Chr.txt') #Navn p data filen
afstandc = np.array(data[:,0])
sigma_afs = afstandc/afstandc*0.5
lambdac = np.array(data[:,1])
sigma_lamb = np.array(data[:,2])

#beregner hastighed
z = lambdac/lmbd_em-1
zmean = np.mean(z)
vel = (z-zmean)/(1+zmean)*c
sigma_vel = (sigma_lamb/lambdac)*c
#First plot: lambda as a function of distance
plt.figure()
plt.grid()
plt.errorbar(afstandc, vel, xerr=sigma_afs, yerr=sigma_vel, fmt='.')
plt.ylabel('velocity_i_km/s')
plt.xlabel('afstand_i_kpc')
plt.title('Rotationskurve_for_UGC914')
#plt.savefig('Rot.kurveNGC5907.pdf')
plt.show()
#print(vel)

```

```

G = 6.67430*10**-11 #n^3 kg^-1 s^-2
V = vel[-1]*10**3 #Omregner km/s til m/s
R = afstandc[-1] * 3.0567758*10**19 # omregner kpc til m
M_sun = 1.989*10**30 #kg
Mass = ((V**2)*R)/G #Massen i kg
Mass_s = Mass/M_sun #Omregner massen til solmasser
print("%10.3E"% (Mass_s), 'M_sun')#Printer en nedre gr nse for galaksens masse [

```

Listing 3: Pythonkode nr.3 plotcurve21cm.ipynb

```

#!/usr/bin/env python3 # -*- coding: utf-8 -*-

"""
Rotation Curve of a Galaxy
"""

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.special
from astropy.io import fits
from scipy.optimize import curve_fit

plt.close('all')

#Global constants
lmbd_em = 6564.61 # H-alpha wavelenght in AA
pixel_scale = 0.189 # arcsec per pixel
c = 3.0 * 10 ** 5 #speed of light [km/s]

#Load wavelength measurements
data = np.loadtxt('lambda_"galaksenavn".txt') #Indl ser datafilen fra Bachelorm
afstandc = np.array(data[:,0])
sigma_afs = afstandc/afstandc*0.5
lambdac = np.array(data[:,1])
sigma_lamb = np.array(data[:,2])

#Loading 21 cm line data
data_21 = np.loadtxt('21cm_"galaksenavn".data') #Indl ser data for 21cm linjen
velocity_21 = data_21[:,0]
flux_21 = data_21[:,1]+2.1

#beregner hastighed
z = lambdac/lmbd_em-1
zmean = np.mean(z)
vel = z*c

```

```

sigma_vel = sigma_lamb/lambdac*c

#First plot: velocity as a function of distance
plt.figure()
plt.grid()
plt.errorbar(afstandc , vel , xerr=sigma_afs , yerr=sigma_vel , fmt='.')
plt.ylabel('velocity_in_km/s')
plt.xlabel('distance_in_kpc')
plt.show()

#Second plot: rotation curve together with 21 cm data
fig , ax1 = plt.subplots()
plt.grid()
ax1.set_xlabel('distance_in_kpc')
ax1.set_ylabel('velocity_in_km/s')
p1 = ax1.errorbar(afstandc , vel +24.7 , yerr=sigma_vel , xerr=sigma_afs , fmt='.', label=
ax1.set_ylim(2100, 2600)
plt.title('Global_HI_profil_log_Rotationskurve_for_UCG914')
ax2 = ax1.twinx()
ax2.set_xlabel('21cm_Flux_(arbitrary_units)')
ax2.set_ylabel('velocity_in_km/s')
p3 = ax2.plot(flux_21 , velocity_21 , color='tab:red' , label='21cm_HI')
#handels = [p1,p2,p3]
label = ['Rotationskurve' , '21cm_HI']
fig.legend(label , bbox_to_anchor=(0.90,0.20) , loc='center_right')
#plt.savefig('UCG914_21cmRot.curve.pdf')
plt.show()

#Overplot theoretical model for exponential disk

def CiruclarSpeedExponentialDisk(y):
    vcsq = 4*np.pi*G*sigma0*Rd*y**2*\
    (scipy.special.i0(y)*scipy.special.k0(y)-\
    scipy.special.i1(y)*scipy.special.k1(y))
    return vcsq

M_stellar = 10 ** 9.967 #[M_sun]
M_gas = 9.96*10**9 #HI region in [M_sun]
M_baryon = M_stellar + M_gas
M_sun = 1.989*10**30 #Mass of sun in [kg]
Rd = 4.00*3.086*10**19 # disk scale length
c = 3.0 * 10 ** 5 #speed of light [km/s]
G = 6.674 * 10**(-11) #NW gravitaional constant in SI units

sigma0 = M_baryon * M_sun/ (2*np.pi*Rd**2)
x = np.arange(0.001 ,15 ,0.1)

```

```

y = x*3.086*10**19/(2*Rd)
vcsq = CircularSpeedExponentialDisk(y)
vc = np.sqrt(vcsq)/1000 #km/s
vc_r = vc*np.sin(70/360*2*np.pi) # correct for inclination

z = lambdac/lmbd_em-1
zmean = np.mean(z)
vel = (z-zmean)/(1+zmean)*c
sigma_vel = sigma_lamb/lambdac*c

plt.figure()
plt.grid()
plt.errorbar(afstandc, vel, yerr=sigma_vel, xerr=sigma_afs, fmt='.', label='M lt_Rot')
plt.ylabel('velocity_in_km/s')
plt.xlabel('distance_in_kpc')
plt.plot(x, vc_r, color='tab:red')
plt.plot(-x, -vc_r, color='tab:red', label='Forventet_baryonsk_rotationskurve')
plt.title('Figur_title')
plt.legend(loc='upper_left')
#plt.savefig('galaksenavn'_21cm.pdf')
plt.plot()
plt.show()

```