# Røntgenmasse af en massiv galaksehob

## Masse- og gasprofiler af A1689

Bachelorprojekt

Julius Pallisgaard Olsen
Januar 2017

Vejleder:
Desiree Della Monica Ferreira

DTU Space
Institut for Rumforskning og -teknologi

# Indhold

Abstract ..... 2
1 Introduktion ..... 3
2 Teori ..... 4
2.1 Introduktion ..... 4
2.2 Galaksehober ..... 4
Overflade lysstyrke ..... 5
Hydrostatisk ligevægt ..... 5
2.3 Abell 1689 ..... 6
2.4 XMM.Newton ..... 6
EPIC ..... 6
3 Forberedelse af data ..... 7
3.1 Introduktion ..... 7
3.2 Udpakning ..... 7
3.3 Kontrol af CCD ..... 8
3.4 Punktkilder ..... 9
3.5 Spektre ..... 10
3.6 Baggrund ..... 10
3.7 Spektre ..... 11
Xspec ..... 11
3.8 Overflade lysstyrke ..... 13
4 Masseprofiler ..... 14
4.1 Introduktion ..... 14
4.2 Isoterm med beta model ..... 14
Introduktion ..... 14
Gasmasse profil ..... 14
Den totale masse profil ..... 15
4.3 Ringopdeling med beta model ..... 16
Gasmasse profil ..... 17
Den totale masse profil ..... 17
4.4 Ringopdeling uden beta model ..... 19
Introduktion ..... 19
Den totale masse profil ..... 19

# *Indhold*

5 Programbeskrivelse ..... 21
Introduktion ..... 21
Program 1 ..... 21
Program 2 og 3 ..... 21
Program 4 ..... 21
Program 5 ..... 22
Program 6 ..... 22
6 Sammenligning af resultater samt diskussion ..... 23
6.1 Introduktion ..... 23
6.2 Sammenligning ..... 23
Temperatur ..... 23
Gas ..... 23
Den totale masse ..... 25
6.3 Gas fraktion ..... 26
6.4 Gravitationel lensing ..... 28
7 Konklusion ..... 30
Opsummering og resultater ..... 30
Fremtidigt arbejde ..... 31
8 Litteraturliste ..... 32

# Abstract

X-ray observations gives a method to find the total- and gas mass of galaxy clusters.
In this project the massive galaxy cluster Abell 1689 have been chosen, to study with data from XMM-Newton. There will be used tree different methods to determine the total mass profile of the cluster. And two methods to determine the gas mass profile. It is assumed that the cluster has spherical symmetry and hydrostatic equilibrium.
The two method to determine the gas mass are with and without the assumption that the cluster is isotherm.
The tree methods to determine the total mass are:
The first method is assuming the cluster is isotherm, and that it uses a beta model. The second and third method assumes the cluster is not isotherm, the second method uses the beta model and the third do not.
This analyses concludes that Abell 1689 is not isotherm and furthermore based on the gas fractions, that the third method is the best approximation for the mass profiles.
The third method gives the total mass of the cluster to be $3{,}6\ 10^{14}$ $M_\odot$. and the gas mass of the cluster to be $2{,}2\ 10^{13}$ $M_\odot$, which gives a gas fraction about on 6%.

# 1

# Introduktion

Galaksehober er de største strukturer i universet, der indeholder titusinder af galakser. Massive galaksehober har en masse fra $10^{13}$ $M_\odot$ til over $10^{15}$ $M_\odot$, langt størstedelen af denne masse er i form af mørkt stof. Den næststørste del af en hobes totale masse er i from af varm gas. Den varme gas er flere millioner grader varm og temperaturen er proportionel med hobens gravitationelle potentiale. Den varme gas, er en stærk kilde af røntgenstråling, der er mulig, at observere med satellitbaserede røntgenteleskoper. Denne observations data kan benyttes til, at ud regne gasmassen og den totale masse af galaksehober. [1]

Dette projekt har til formål, at udregne gas- og den totale masse af galaksehoben Abell 1689 ved hjælp af røntgenobservationer. Abell 1689 er en massiv galaksehobe der er regulær og, derfor kan der antages sfærisk symmetri og hydrostatisk ligevægt.

Dataene der blive brugt, er observationer fra røntgenteleskoperne på XMM Newton. Disse observations data vil blive behandlet i ESAS. De vil blive delt op i to metoder, en der antager hoben er isoterm, og en der ikke gør og i stedet ringopdeler hoben. Disse vil derefter blive behandlet i Xspec, der giver temperaturen og gasdensiteten for den isoterm metode, og temperatur- og gasdensitets profiler for den ringopdelte.

Totalmasse profiler af Abell 1689 vil blive udregnet med tre forskellige metoder. Den første metode, der antager at hoben er isoterm og benytter en beta model. Den anden og tredje antager, at hoben ikke er isoterm og at denne er blevet ringopdelt. Den anden benytter beta modellen og den tredje gør ikke.

Alle disse forskellige metoder, vil til slut i projektet blive sammenlignet med hinanden, samt med to artiklers totalmasse profiler af Abell 1689.

# 2

# Teori

## 2.1 Introduktion

I dette afsnit vil der blive gennemgået galaksehobers opbygning, evolution og fysiske egenskaber. Der vil opstilles de antagelser og ligninger, der vil blive benyttet til, at kunne udregne totalmasse profilerne med de forskellige metoder. Abell 1689 vil også kort blive beskrevet. Der vil derudover blive præsenteres XMM Newtons egenskaber og kort dens opbygning.

## 2.2 Galaksehober

Galaksehober er de største strukturer i Universet, de indeholder fra få galakser til titusinder af galakser. De dannes over en lang tidsperiode, af gravitationelle kræfter. Det gravitationel potentiale der binder galakserne, i hoben binder også en sky af varm gas der fylder rummet mellem og rundt om galakserne, kaldet Intracluster medium (ICM).[1]

Galaksehober udvikler sig fra, at være irregulære hober hvor ICM, er relativ kold og er ulige fordelt i hoben. Som tiden går vil galakserne i hoben, kredse omkring eller igennem galaksehobens centrum. Dette fører til, at den gas der var inde i galakserne bliver flyttet til ICM. Gassen og galakserne vil, bosætte sig nær hobens centrum. Resulterende i, at gassen varmes op og den gravitationel potentiale bliver dybere. Når dette stadie er nået, er hoben relaxed og bliver regulær.[1]

Hastigheden for galaksehobers evolution afhænger, af den individuelle hobes masse. Massive galaksehober udvikler sig hurtigere, end hober med mindre masse. Dette vil sige, at galaksehober der i dag er regulære, blev født med en højere densitet og derved er længere i deres udvikling end andre hober. Galaksehober der har opnået et relaxed system, er de mest massive, og har en total masse i intervallet fra $10^{13}$ $M_\odot$ til over $10^{15}$ $M_\odot$. Når en hobe når dette stadie, er den stationær og fordelingen ændres tilsyneladende, ikke over tid. Det kan derfor med rimelighed antages, at der er hydrostatisk ligevægt og, at hoben er sfærisk symmetrisk. [1]

Størstedelen af en galaksehobes masse, ca. 80-90%, er i form af mørkt stof. Mørkt stof udsender ikke nogen form for stråling og er derfor ikke er mulig, at observere direkte. Resten af hobens masse er i form af varm gas (ICM), stjerner, støv og kold gas. Den varme gas har en lav densitet og befinder sig mellem galakserne. Denne varme gas, er flere millioner grader varm, den er en stærk kilde til røntgenstråling. [1]

Temperaturen af galaksehober, er afhængig af massen og afstanden fra kernen. ICM har højere densitet desto tætter på hobens kerne den er. Dette vil sige, at gravitationel potentiale og temperatur er relateret, mere massiv hober er varmere en de mindre massive hober. Derfor er det muligt, ved hjælp af røntgenobservationer, at udlede den totale masse, inklusivt mørkt stof, stjerner og den varme gas.[1]

Når gassen omkring en regulær galaksehobes kerne har en lav temperatur og høj densitet, kan energitabet fra røntgenstrålingen være stor nok til, at havde indflydelse på hvordan gassen

agere. Energien fra gassen forsvinder i from af stråling, gassen køles og trykket falder. Gassen komprimeres yderligere, og bevæger sig længere ned i det gravitationelle potentiale. Gasdensitet stiger og da strålingen skalerer med densiteten kvadreret, bliver strålingen mere intens.[1]

### Overflade lysstyrke

Overflade lysstyrken kan bruges til, at approksimere værdier for hobekerne radiussen og for beta. Disse værdier bliver brugt til, at approksimere hobens masse for nogle af metoderne. Overflade lysstyrken kan beskrives på formen:

$$S = S_0 \left[1 + \left(\frac{r}{R_c}\right)^2\right]^{-3\beta+\frac{1}{2}} + C \tag{2.1}$$

Hvor S er den observeret overflade lysstyrke og $S_0$ er den centrale overflade lysstyrke. $R_c$ er radiussen af kernen, β er relationen for energi pr. masseenhed i galakser og energi pr. masseenhed i gassen. I de fleste hober ligger β i intervallet 0,5-1.[1] C er en konstant der udtrykker baggrundsstrålingen.

Man finder $R_c$ og beta ved at fitte de bearbejde observationsbilledet til ligning 2.1. Emissionen røntgenstrålingen er, proportional med gasdensiteten. Dette kan brugs til, at lave en beta model, der kan bruget som gasdensiteten se afsnit 4.2.

### Hydrostatisk ligevægt

Den gravitationelle kraft påvirker massen i galaksehoben og tækker den mod centrum. Dette skaber et tryk fra det sammen materiale, der trykkes sammen, en trykgradientkraft. Når kraften fra tyngdekraften og trykgradientkraften afbalancerer hinanden, kaldes dette hydrostatisk ligevægt. Den hydrostatiske ligevægt kan benyttes til, at udregne den totale masse af en galaksehobe. Det antages at galaksehoben er sfærisk symmetrisk hvilket er en, god approksimation for en hobe der er gravitationelt relaxed.[1][2] Derefter benyttes ligningerne for tryk ligevægt og for den perfekte gas:

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{GM(r)\rho_{gas}}{r^2} \tag{2.2}$$

$$p = \frac{k_b T \rho}{\mu m_p} \tag{2.3}$$

M(< r) er den totale masse inde for radiussen r, p er trykket, $\rho_{gas}$ er gasdensiteten og T er temperaturen alle disse er varierende med radiussen. Den gennemsnitlige molekylære vægt i atommasseenhed, $\mu = 0{,}6$, og $m_p$ er proton masse.[1]

Ud fra ligning 2.2 og 2.3 kan der udledes en formel for den totale masse af galaksehoben, der er givet ved:

$$M(< r_i) = -\frac{k_b T_i r_i}{G\,\mu\, m_p}\left(-\frac{d\,\ln(\rho_{gas,i})}{d\,\ln(r_i)} + \frac{d\,\ln(T_i)}{d\,\ln(r_i)}\right) \tag{2.4}$$

## 2.3 Abell 1689

Den galaksehobe der vil blive analyseret gennem dette projekt er Abell 1689, som ligger i konstellationen Virgo. Abell 1689 er en af de største galaksehober der er observeret. Det er en rig hobe der indeholder omkring 160.000 galakser. Abell 1689 er en massiv regulær galaksehobe der er approksimativ sfærisk symmetrisk.[13]

Den har en rødforskydning på z = 0,0183, der kan benyttes til, at finde vinkeldiameter afstanden, der for fjerne objekter antages som afstanden. En udregner[3] bruges til at finde vinkeldiameter afstanden ved hjælp rødforskydningen, vinkeldiameter afstanden til Abell 1689 er 634,9 Mpc. Udregneren giver også længden pr. buesekund, buesekund = 3,078 kpc.[8]

## 2.4 XMM.Newton

XMM newton blev opsendt den 10. december 1999 på en tiltænkt 10 års mission, af European Space Agency (ESA). XMM Newtons hovedopgave er, at observere den bløde røntgenstrålings del, af det elektromagnetiske spektrum dette vil sige, 150 eV til 12 keV. Med dens store opsamlingsareal og dens elliptiske bane, der giver den muligheden for, at foretage lange observationer med høj følsomhed.[4]

XMM Newton har to typer teleskoper ombord. Tre røntgenstrålingsteleskoper og et 30 cm optisk/UV teleskop. Dette gør det muligt, at observerer objekter i to dele, af det elektromagnetisk spektrum.[5]

De tre røntgenstråleteleskoper er typen Wolter type-1, med to forskellige røntgendetektorer i fokuspunkterne. De fokuserer den indkommende strålingen der rammer opsamlingsarealet ind på fokuspunkterne.[5]

### EPIC

XMM Newton har to forskellige European photon Imaging camera (EPIC), i de tre fokuspunkter. Disse har et synsfelt på 30 bueminutter og kan observere i energi intervallet 0,15 keV til 12 keV.[5]

To af detektorerne er af typen MOS (metal oxide semi-conductor), som er dem der hovedsageligt vil blive benyttet gennem dette projekt. MOS detektoren, registrerer fotoner i den bløde sektor af røntgen spektret, med en god energi reselotion, de er mindre følsomme over for hårde røntgenstråler. De laver en ’event’ liste over de indkommende fotoner, der registre deres placering, tid og energi. MOS detektoren er bygget så der er en central CCD (charge-coupled devices), med 6 CCDs omkring, der er 7 i alt. Disse udgøre en matrice på 600x600 pixel, der som ses senere i projektet giver og billederne.[5]

Den anden detekter der er på XMM Newton, er af typen pn. Den er bygget op af 12 CCDs, to rækker af 6. Den dækker den ca. det samme areal som MOS detektorerne. Pn detektoren bliver ikke benyttet direkte i dette projekt.[5]

# 3

# Forberedelse af data

## 3.1 Introduktion

Dataene der vil blive bearbejdet i dette og de følgende afsnit er af galaksehoben Abell 1689. Datasættet er fra heasarc offentlige arkiver[15], observationen er blevet foretaget den 24.12-2001. Observationstiden er 39.763s og har en offset på 1,882 bueminutter. Observations id 0093030101, fortaget af J. P. Hughes.

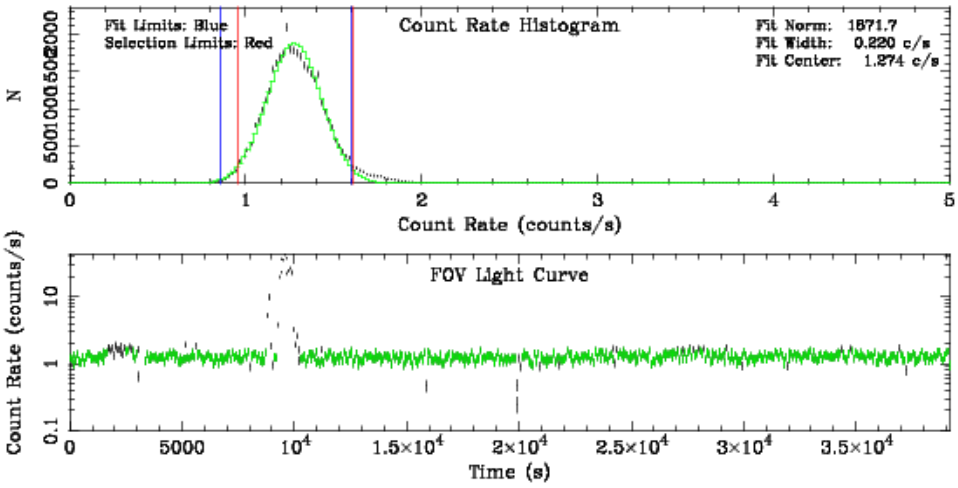
Der bliver brugt XMM ESAS cookbook gennem dette afsnit, der er en guide til gennemgangen af ESAS.[6] ESAS stå for Extended Source Analysis Software, det er en software der tillader brugeren at modellere dataene fra XMM-Newton. Det giver mulighed for flere forskellige modeller, og muligheden for at bestemme hvilke områder der skal modelleres over.

Der vil også blive benyttet Xspec til, at udnytte de raffineret datafiler der kommer fra benyttelsen af ESAS. Xspec er et spektral-fitting software der benyttes til, at finde temperatur og andre brugbare informationer om de udvalgte områder.[7]

IDL benyttes også til at fitte billeddataene til overflade lysstyrke. Det vil give kerne radius og konstanten beta. Dette vil blive benyttet til, udregningen af den totale galaksehobe masse. Programbeskrivelsen kan findes i afsnittet af samme navn.

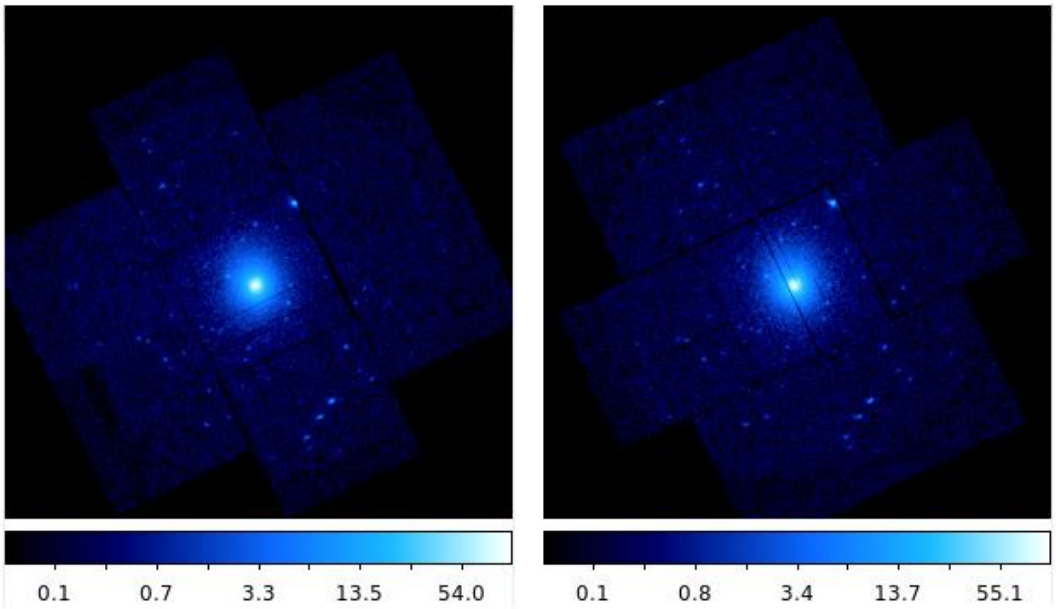
## 3.2 Udpakning

Første skridt er at køre emchain og mos-filter over de hentede datasæt. Emchain vil producere soft proton event filer for både MOS1 og MOS 2. Mos-filter køres og den sorteres i tidsintervaller med forhøjet countrate. Øverste plot i figur 3.1. viser en gauss fittet kurve over countrate over hele tidsintervallet. Det nederste plot viser countrate over hele tidsintervaller. De grønne dele er dem der ligger, inde for det normale og vil blive brugt videre, de sorte dele er uden for det normale og bliver derved sorteret fra.[6]




*Figur 3.1 mos 1 count rate histogram (øverst) og FOV light curve (nederst)*

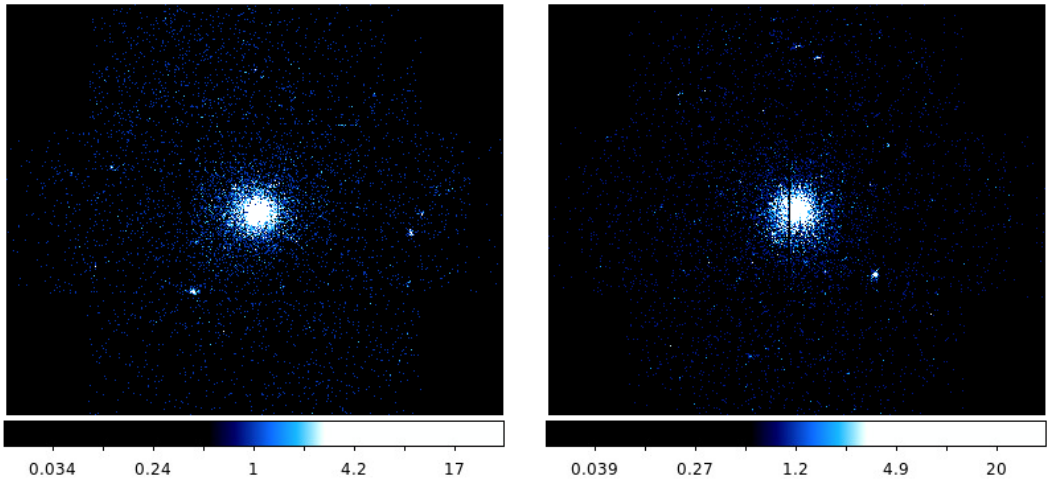
På figur 3.2 ses billederne af MOS 1 og MOS 2 der bliver produceret af mos-filter. Billedet bestå af registreret fotoner pr. pixel, over hele observationen. Hvor Abell 1689 ses i midten af billederne.




*Figur 3.2 røntgenbilleder af Abell 1689. mos1 venstre, mos2 højre*

## 3.3 Kontrol af CCD

Herefter tjekkes om alle 7 CCD er funktionelle. Dette gøres ved, at benytte billederne af de bløde røntgenstråling, mellem 0,2-0,9 keV. Disse billeder bliver produceret, af mos-filter. Hvis der er en CCD der er defekt i observations tidsintervallet, vil billederne af den lave energi vise det. Hvis der er en af CCD'erne der er defekte, skal den ikke medtages i den videre proces.[6]



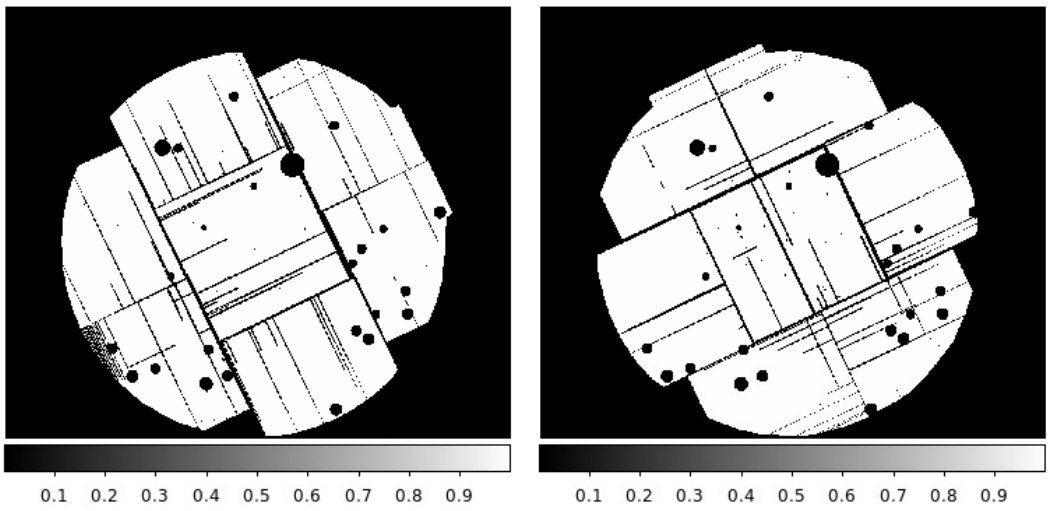

*Figur 3.3 Røntgenbilleder af Abell 1689 i energien 0,2-0,9keV. mos1 venstre, mos2 højre*

Det ses på figur 3.3 at alle 7 CCD'er er funktionelle på begge MOS detektorerne. Hvis der havde været en defekt CCD, ville man kunne se den ved at countraten, i det pågældende område, ville havde været mærkbart anderledes end de omkringliggende.

CCD 5 på MOS 1 er blevet ekskluderet da den kun var valid over ~1 keV og derfor ikke skal medtages hvis energi under 1 keV skal benyttes.

## 3.4 Punktkilder

Punktkilder omkring galaksehoben skal fjernes fra datasættene før analysen kan gennemføres. Cheese er en kommando det finder punktkilderne. Cheese generer et billede for, hver at de to MOS detektorer. Billederne der komme af cheese er filtre der ekskluderer de uønskede punktkilder.[6]




*Figur 3.4 punkt kilde filteret, cheese. mos1 venstre, mos2 højre*

På figur 3.4 ses billederne der bliver dannet af cheese. Hvis man sammenligner dem med billederne fra figur 3.2, ses at hver sorte cirkel vil overlappe en punktkilde.

## 3.5 Spektre

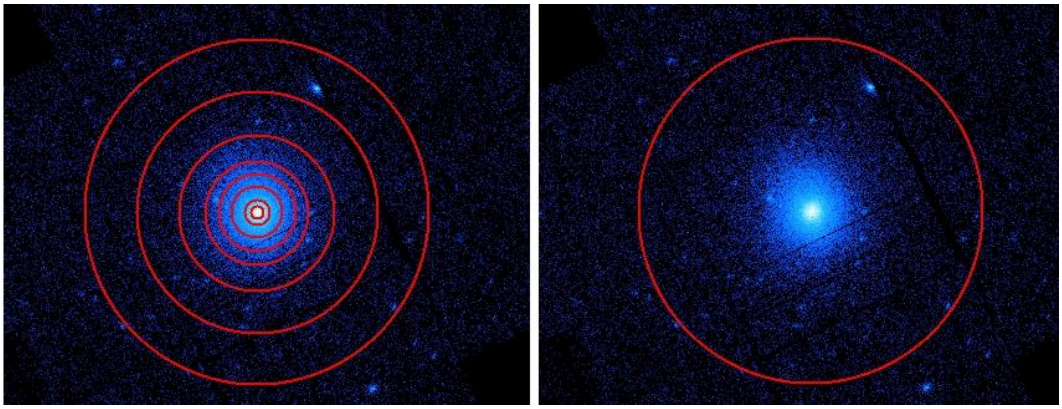
Det næste skridt er, at benytte mos-spectra der vil danne filer der kan benyttes til, at lave modelleret baggrundsspektre og spektre billeder. Mos-spectra giver muligheden for, at udvælge specifikke områder. I dette projekt dannes to forskellige fil sæt, der benytter denne mulighed til at lave forskellige profiler.

Det første sæt er til, at regne på galaksehoben som var den isoterm. Derfor bliver mos-spectra kørt med et begrænset område. Området der benyttes har en radius 200 Pixels svarende til 1539 kpc.

Det andet fil sæt er mere omfattende affære. Denne er ringopdel og benyttes til de to metoder der ikke antager hoben er isoterm. Dette sæt af filer bestå af 8 ringe, med forskellige radius, med centrum i galaksehobens midte. Programmet køres for hver enkelt ring, og de ny genereret filer rykkes så intet bliver over skrevet. De forskellige ringes radius er vist i tabel 3.1.

| Ring | nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Radius | kpc | 0-58 | 58-115 | 115-231 | 231-346 | 346-462 | 462-693 | 693-1077 | 1077-1539 |

*Tabel 3.1 Liste over ringopdelingen*

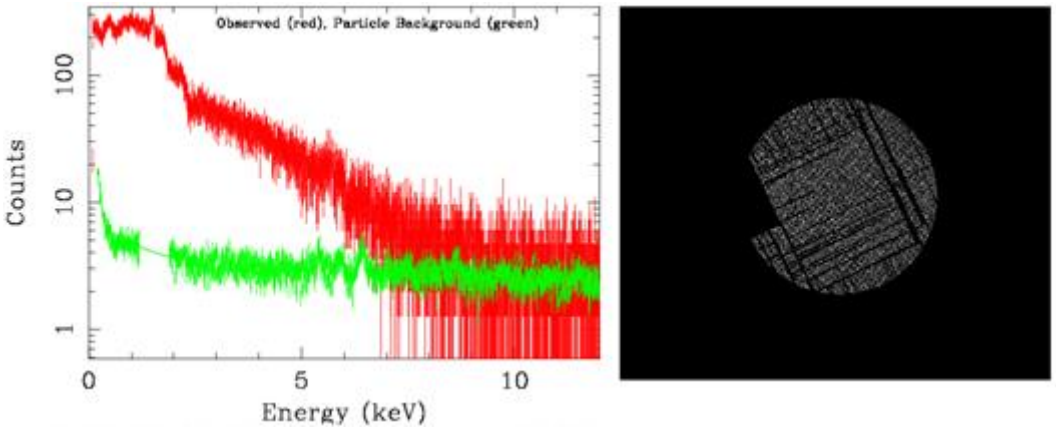


*Figur 3.5 Røntgenbilleder med de to opdelinger. Isoterm højre, ringopdeling venstre*

Figur 3.5 viser en visualisering af opdelingen, af de to forskellige datasæt der bliver benyttet videre. Ringene i den ringopdelte metode bliver bredere desto længere ud gennem hoben, det gøres for at have counts nok i de pågældende områder.

## 3.6 Baggrund

Høj energipartikler fra andre kilder interagere med detektoren, det udgøre en uønsket baggrund der ikke kommer fra selve hoben. Disse partiklers indvirkning skal fjernes så de ikke giver den uønsket effekt. Mos_back finder støjen og fjerner den fra spektret og fra billederne.[6]




*Figur 3.6 Partikel baggrund. Spektre venstre billede højre.*

På figur 3.6 ses Baggrundsstøjen. Til venstre ses spektral partikel baggrunden i grøn og observeret data i rød. Det ses, at partikel baggrund mangler data fra omkring 1,2-1,9 keV, dette område ignoreres derfor i spektral analysen. Alt under 0,7 og alt over 7,0 ignoreres ligeledes. På højere side af figuren ses billede at partikelbaggrunden.

## 3.7 Spektre

For at kunne bruge de ny genereret filer køres grppha. Grppha tager dataene med et minimum på 25 counts pr. kanal og placer dem i en ny fil. Den benytter spektral baggrundsfilen og andre nødvendige filer til, at forbedre det resulterende spektrum.

### Xspec

Nu benyttes de filer der kommer fra processen gennem SAS. Der benyttes to modeller samt en konstant til, at producer de bedst mulige resultater.

Der bruges to forskellige modelopsætninger. En for dataene tiltænkt, den isoterm metode og en for den data der vil blive benyttet til de to ringopdelte metoder.

De to Xspec modeller der er benyttet er wabs og apec. Wabs er der for at tage højde for Kolonne densiteten. Apec benytter Astrophysical Plasma Emission Database til, at udregne emissionen fra optisk tynd termisk plasma. Denne model giver temperatur, abudanc og norm. Normen er proportionel med partikel nummer densiteten.[7]

For den isoterm setup benyttes der modelsammensætningen; Constant•wabs(apec+apec). Denne vil give to temperaturer for galaksehoben. Dette gøres for, ikke at lade eventuelle områder med temperaturer langt fra normalen trække gennemsnits temperaturen ned. Konstanten er indsat for, at udligne den forskel på counts der evt. er fra de to MOS detektorer.

Der indsættes nogle startværdier i Xspec hvorfra, nogle af faste, nogle er frie og mange er linkede til hinanden. På tabel 3.2 ses opsætningen af Xspec, for den isoterm metode er det hele tabellen der bruges.

For de to ringopdelte metoder bruges der; Constant•wabs(apec) der vil give én temperatur. Det er kun nødvendigt med en temperatur i denne model, da temperaturen antages, at være uniform

inden for de individuelle ringe. Opsætningen af Xspec for dette tilfælde er også vist på tabel 3.2 dog er det kun det grå område.

| | | | mos 1 | | | | | | mos 2 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Constant | factor | | 1 | frozen | 11 | Constant | factor | | - | free |
| 2 | Wabs | nH | 10^22 | 0,0182 | frozen | 12 | Wabs | nH | 10^22 | - | = 2 |
| 3 | Apec | kT | keV | - | free | 13 | Apec | kT | keV | - | = 3 |
| 4 | Apec | abudanc | | 0,3 | free | 14 | Apec | abudanc | | - | = 4 |
| 5 | Apec | Redshift | | 0,1832 | frozen | 15 | Apec | Redshift | | - | = 5 |
| 6 | Apec | Norm | | - | free | 16 | Apec | Norm | | - | = 6 |
| 7 | Apec | kT | keV | - | free | 17 | Apec | kT | keV | - | = 7 |
| 8 | Apec | abudanc | | - | = 4 | 18 | Apec | abudanc | | - | = 8 |
| 9 | Apec | Redshift | | - | = 5 | 19 | Apec | Redshift | | - | = 9 |
| 10 | Apec | Norm | | - | = 6 | 20 | Apec | Norm | | - | = 10 |

*Tabel 3.2 Input i Xspec. Isoterm hele tabellen, ringopdelt grå område.*

Resultaterne til den isoterm metode er i tabel 3.3

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temp | 9,14 | Norm | 5,205 | abudanc | 0,32 | $\chi^2$ | 1,053 |
| Temp + | 0,31 | Norm + | 0.052 | abudanc + | 0,03 | | |
| Temp - | 0,28 | Norm - | 0.052 | abudanc - | 0,03 | | |

*Tabel 3.3 resultater til den isoterm metode*

Resultaterne til den ringopdelte metode er i tabel 3.4

| Ring | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temp | 8,56 | 8,89 | 9,50 | 8,83 | 8,25 | 7,90 | 7,41 | 6,45 |
| Temp + | 0,82 | 0,57 | 0,48 | 0,63 | 0,63 | 0,56 | 0,74 | 0,86 |
| Temp - | 0,43 | 0,51 | 0,48 | 0,51 | 0,54 | 0,55 | 0,72 | 0,64 |
| Norm | 0,0008 | 0,0036 | 0,0214 | 0,0208 | 0,0183 | 0,0560 | 0,1052 | 0,1463 |
| Norm + | 0,000022 | 0,000080 | 0,000384 | 0,000490 | 0,000559 | 0,001703 | 0,004518 | 0,009351 |
| Norm - | 0,000022 | 0,000080 | 0,000382 | 0,000487 | 0,000554 | 0,001689 | 0,004474 | 0,009168 |
| abudanc | 0,392 | 0,390 | 0,265 | 0,257 | 0,226 | 0,181 | 0,304 | 0,661 |
| abudanc + | 0,083 | 0,074 | 0,060 | 0,073 | 0,091 | 0,084 | 0,148 | 0,299 |
| abudanc - | 0,086 | 0,077 | 0,061 | 0,074 | 0,093 | 0,086 | 0,157 | 0,360 |
| $\chi^2$ | 0.956 | 0,992 | 0,979 | 1,097 | 1,018 | 1,076 | 1,225 | 1,088 |

*Tabel 3.4 resultater fra ringopdel data.*

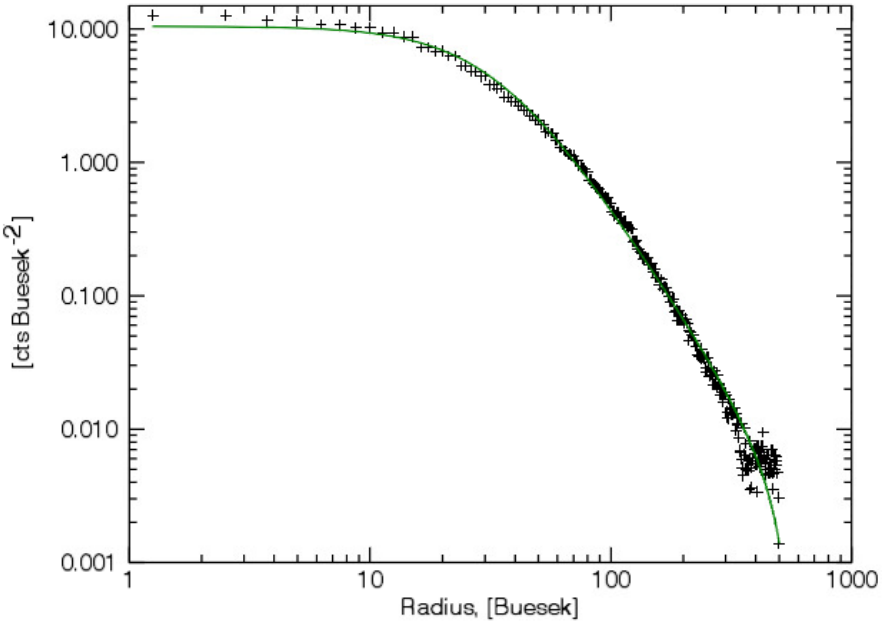
Normen der kommer fra Xspec er pr. areal i enheden $buemin^{-2}$ . For de overstående tabeller er Xspec normen blevet ganget med de respektive arealer.

## 3.8 Overflade lysstyrke

Det sidste skridt før masseprofilerne kan udregnes, er at bestemme beta og kerne radius for galaksehoben. Disse værdier findes ved, at benytte billederne og fitte dem til overflade lysstyrke ligningen 2.1.

Dette gøres i program 1 til 4 der er beskrevet i programbeskrivelsen. Kort beskrevet finder disse programmer gennemsnit count som funktion af radius og fitter derefter, til overflade lysstyrke ligningen 2.1. Ligningen for overflade lysstyrken, gælder for hober, hvor der er antaget, at den er i hydrostatisk ligevægt og er isoterm.[1]

Der bruges en gennemsnit over de to MOS detektorer. Resultaterne af denne fitting giver at β= 0,63 og en kerne radius $R_c$=13,66 Pix =105,12 kpc.




*Figur 3.7 Overflade lysstyrke*

På figur 3.7 ses overflade lysstyrken, punkterne der er markedet som, krydser er de fundene gennemsnits count, og kurven er den fittede kurve.

# 4

# Masseprofiler

## 4.1 Introduktion

I dette afsnit vil masse profilerne for Abell 1689 blive udregnet. Til gasmasse profilen vil der blive benyttet to metoder, en hvor det antages, at hoben er isoterm og en hvor den ikke gør, her er hoben er blevet ringopdelt. For den totale masse er der brugt tre metoder, den isoterm metode, en ringopdelt metode, med beta model og ringopdelt uden beta model.

Fejlberegningerne gennem dette afsnit benytter propagation af usikkerhed.[8]

## 4.2 Isoterm med beta model

### Introduktion

Det antages, at temperaturen i den Isotermen model er uniform ud gennem galaksehoben. For at analysere dataene for en uniform hobe, bruges et cirkulært område, der dækker hele hoben til analysen. Området der benyttes, har en radius 200 Pixels svarende til 1539 kpc.

### Gasmasse profil

Gasmassen findes ved, at bruge normen der kommer fra brugen af Xspec. Normen er givet ved en kombination af vinkeldiameter afstanden, rødforskydningen og nummer densiteten, af det brugte område.[7][9] Definitionen af normen fra Apec er givet ved:

$$N = \frac{10^{-14}}{4\pi[D_a(1+z)]^2}\int n_e n_H dV \tag{4.1}$$

Hvor N er normen, $D_a$ er vinkeldiameter afstanden, z er rødforskydningen og $n_e n_H$ er elektron og hydrogen nummer densiteten.

Da gassen i en galaksehobe har en lav densitet, er varm samt er fuld ioniseret er der en, forbindelse mellem elektron og hydrogen nummer densiteten. Derfor for at finde densiteten af gassen bruges at $n_e \approx 1{,}2 n_H$.[9]

Ved at indsætte dette findes en gennemsnitlig værdi for elektron nummer densiteten:

$$n_e = \left(\frac{1{,}2\ N\, 4\,\pi[D_a(1+z)]^2}{10^{-14}\ V_{tot}}\right)^{\frac{1}{2}} = 2\ D_a(1+z)10^7\left(\frac{1{,}2\ N\,\pi}{V_{tot}}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{4.2}$$

Elektron nummer densiteten, kan nu bruges til, at finde gassens densitet. Det antages stadig, at gassen er fuld ioniseret og, at densiteten derfor er givet ved:

$$\rho_{gas} = \mu\, m_H\, n \approx 1{,}92\,\mu\, m_H\, n_e \tag{4.3}$$

$\rho_{gas}$ er gas densiteten, $m_H$ er massen af hydrogen og n er partikel densiteten givet ved n=$1{,}92\ n_e$.[10]

Gasmasse profilen laves ved, at udregne massen med radius fra 0 til 1539 kpc. Profilen kan ses på figur 4.1. På figuren ses gasmassen vist i solid blå linje og fejlen på gasmassen vist i en stiplet blå linje.

$$M_{gas}(< r) = \rho_{gas}\, V_r \tag{4.4}$$

| Radius | kpc | 58 | 115 | 231 | 346 | 462 | 693 | 1.077 | 1.539 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Masse | $10^{13}$ M⊙ | 0,002 | 0,020 | 0,088 | 0,250 | 0,494 | 1,013 | 2,393 | 5,245 |
| Fejl + | $10^{11}$ M⊙ | 0,001 | 0,010 | 0,045 | 0,126 | 0,249 | 0,511 | 1,206 | 2,644 |
| Fejl - | $10^{11}$ M⊙ | 0,001 | 0,010 | 0,044 | 0,126 | 0,248 | 0,509 | 1,203 | 2,637 |

*Tabel 4.1 gasmasse for den isoterm metode*

Tabel 4.1 viser gassemasse prokationen ud gennem galaksehoben, vist for de samme radier som ringene brugt i de næste metoder.

Fejl;

$$n_{e,fejl} = \frac{1}{2} n_e \frac{N_{fejl}}{N} \tag{4.5}$$

$$\rho_{gas,fejl} = 1{,}92\, \mu\, m_H\, n_{e,fejl} \tag{4.6}$$

$$M_{gas,fejl}(< r) = \rho_{gas,fejl} V_r \tag{4.7}$$

[8]

## Den totale masse profil

Ligning 2.4 bruges til, at udregne den totale masse for den isoterm metode. Der antages, at der er hydrostatisk ligevægt og sfærisk symmetri. som beskrevet i afsnit 2.1

Temperaturen i dette tilfælde er uniform, derfor er temperatur gradienten lig nul. Emissionen af røntgenstrålingen skalerer som funktion af gasdensitetens: [10]

$$\rho_{gas} \propto \left(1 + \left(\frac{r_j}{R_c}\right)^2\right)^{-\frac{3}{2}\beta} \tag{4.8}$$

Udtrykket 4.8 indsættes i ligning 2.4 og udledes og temperatur gradienten sættes til 0 fås:

$$M(< r) = -\frac{k_b T r_j}{G\, \mu\, m_H}\left(-\frac{3\, \beta\, r_j^2}{R_c^2 + r_j^2}\right) \tag{4.9}$$

Tabel 4.2 viser de udregnet totalmasser for de samme radier som for den ringopdelte metode:

| Radius | kpc | 58 | 115 | 231 | 346 | 462 | 693 | 1.077 | 1.539 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Masse | $10^{14}$ M⊙ | 0,011 | 0,215 | 0,817 | 1,645 | 2,443 | 3,607 | 5,635 | 8,393 |
| Fejl + | $10^{14}$ M⊙ | 0,003 | 0,056 | 0,211 | 0,424 | 0,630 | 0,930 | 1,453 | 2,164 |
| Fejl - | $10^{14}$ M⊙ | 0,003 | 0,056 | 0,210 | 0,423 | 0,629 | 0,928 | 1,450 | 2,160 |

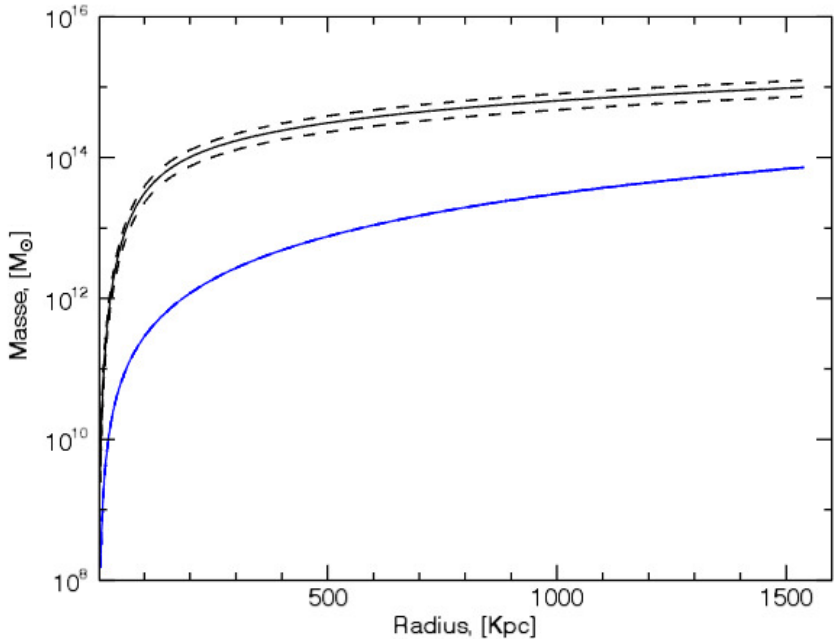
*Tabel 4.2 Totalmasse for den isoterm metode*

Figur 4.1 viser gas- og totalmasse profilerne for den isoterm metode.

Fejl:

$$M_{fejl}(<r) = \frac{k_b T_{fejl} r_j}{G\,\mu\, m_H}\left(\frac{3\,\beta r_j^2}{R_c^2 + r_j^2}\sqrt{\left(\frac{\beta_{fejl}}{\beta}\right)^2 + \left(\frac{2\,R_c\,R_{c,fejl}}{R_c^2 + r_j^2}\right)}\right) \tag{4.10}$$

[8]




*Figur 4.1 Plot af gas- og total masse profiler for den isoterme metode. Gasmasse blåt, totalmasse sort. Stiplede linjer er fejl.*

## 4.3 Ringopdeling med beta model

Introduktion

Det antages i denne model, at temperaturen ud gennem galaksehoben ikke er konstant. Hoben er blevet delt op i 8 ringe, som vokser i bredden desto længere ud, i hoben man kommer. Disse ringe er beskrevet i afsnit 3. For hver af disse ringe er Xspec brugt til, at finde en temperatur og

en norm. Værdierne i dette afsnit er derfor diskrete, en for hver ring. Beta modellen vil blive benyttet i den totale masse udregning.

### Gasmasse profil

Gasmassen med denne metode vil blive bestemt for hver ring. Den samme fremgangsmåde som benyttes i afsnit 4.2 gasmasse profil vil blive brugt, men for hver ring i stedet for hele hoben:

$$N_i = \frac{10^{-14}}{4\pi[D_a(1+z)]^2}\int_{r_{i,start}}^{r_{i,slut}} n_e n_H dV \tag{4.11}$$

$$n_{e,i} = \left(\frac{1.2\, N_i\, 4\,\pi[D_a(1+z)]^2}{10^{-14}\, V_i}\right)^{\frac{1}{2}} = 2\, D_a(1+z)10^7\left(\frac{1.2\, N_i\,\pi}{V_i}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{4.12}$$

$$\rho_{gas,i} = \mu\, m_H\, n \approx 1{,}92\,\mu\, m_H\, n_{e,i} \tag{4.13}$$

$$M_{gas,i} = \rho_{gas,i} V_i \tag{4.14}$$

' i ' er en indikator for de individuelle ringe.

| Ring | nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Radius | kpc | 58 | 115 | 231 | 346 | 462 | 693 | 1.077 | 1.539 |
| Masse | $10^{13}$ M⊙ | 0,018 | 0,061 | 0,206 | 0,351 | 0,488 | 0,824 | 1,419 | 2,182 |
| Fejl + | $10^{11}$ M⊙ | 0,024 | 0,052 | 0,141 | 0,221 | 0,304 | 0,595 | 1,409 | 2,816 |
| Fejl - | $10^{11}$ M⊙ | 0,024 | 0,052 | 0,140 | 0,220 | 0,302 | 0,590 | 1,396 | 2,768 |

*Tabel 4.3 Gasmasse profil for den ringopdelte metode*

Fejl:

$$n_{e,fejl,i} = \frac{1}{2} n_{e,i} \frac{N_{fejl,i}}{N_i} \tag{4.15}$$

$$\rho_{gas,fejl,i} = 1{,}92\,\mu\, m_H\, n_{e,fejl,i} \tag{4.16}$$

$$M_{gas,fejl,i} = \rho_{gas,fejl,i} V_i \tag{4.17}$$

[8]

### Den totale masse profil

Den totale masse for galaksehoben udregnet med denne metode, bruges med samme udgangspunkt som for den isoterm metode. Denne metode har et bidrag fra temperatur gradienten, da den ikke antager, at hoben er isoterm.

Ligningen 2.4 bliver delt op, i tre dele:

$$Del1 = -\frac{k_b T_i r_i}{G\,\mu\, m_H} \tag{4.18}$$

$$Del2 = -\frac{3\,\beta\, r_i^2}{R_c^2 + r_i^2} \tag{4.19}$$

Temperatur gradienten bliver udregnet ved hjælp af ringens to nabo ringe, i de to ydre tilfælde benyttes selve ringen med dens nabo ring.

Fra temperatur profilen; Xspec ses det, at ved den tredje ring knækker kurven, temperatur gradienten sættes derfor til 0 for den tredje ring.

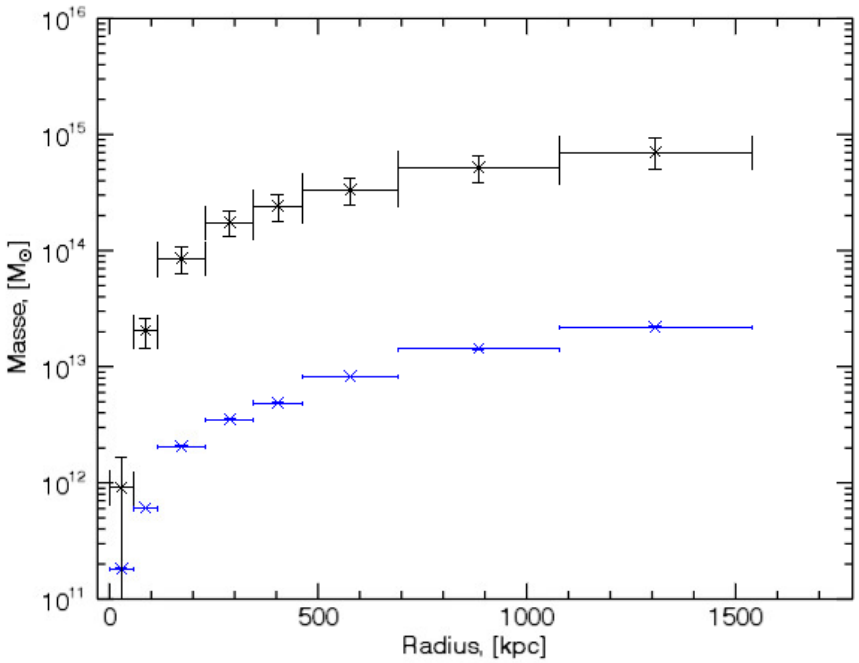
$$Del3 = \frac{d\ \ln(T_i)}{d\ \ln(r_i)} = \frac{\ln(T_{i+1})\ \text{-}\ln(T_{i\text{-}1})}{\ln(r_{i+1})\text{-}\ln(r_{i\text{-}1})} \tag{4.20}$$

De tre dele samles til en:

$$M(<r_i) = Del1(Del2 + Del3) = -\frac{k_b T_i r_i}{G\,\mu\,m_H}\left(-\frac{3\,\beta\,r_i^2}{R_c^2 + r_i^2} + \frac{\ln(T_{i+1})\text{-}\ln(T_{i\text{-}1})}{\ln(r_{i+1})\text{-}\ln(r_{i\text{-}1})}\right) \tag{4.21}$$

| Ring | nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Radius | kpc | 58 | 115 | 231 | 346 | 462 | 693 | 1.077 | 1.539 |
| Masse | $10^{14}$ M⊙ | 0,009 | 0,203 | 0,849 | 1,747 | 2,406 | 3,349 | 5,172 | 7,034 |
| Fejl + | $10^{14}$ M⊙ | 0,008 | 0,059 | 0,221 | 0,437 | 0,615 | 0,870 | 1,353 | 2,258 |
| Fejl - | $10^{14}$ M⊙ | 0,008 | 0,060 | 0,221 | 0,429 | 0,612 | 0,872 | 1,323 | 2,014 |

*Tabel 4.4 Totalmasse for ringopdelte metode med beta model.*




*Figur 4.2 Plot af Gas- og totalmasse profil for den ringopdelte metode med beta model. Sort Totalmasse, blå gasmasse.*

Fejl:

$$Del1_{fejl} = \frac{k_b T_{fejl,i} r_i}{G\,\mu\,m_H} \tag{4.22}$$

$$Del2_{fejl} = \frac{3\,\beta\, r_i^2}{R_c^2 + r_i^2}\sqrt{\left(\frac{\beta_{fejl}}{\beta}\right)^2 + \left(\frac{2\,R_c\,R_{c,fejl}}{R_c^2 + r_i^2}\right)} \tag{4.23}$$

$$Del3_{fejl} = \frac{1}{\ln(r_{i+1}) - \ln(r_{i-1})}\sqrt{\frac{(T_{fejl,i+1})^2}{(T_{i+1})^2} + \frac{(T_{fejl,i-1})^2}{(T_{i-1})^2}} \tag{4.24}$$

$$M_{fejl}(< r_i) = M_i\sqrt{\left(\frac{Del1_{fejl}}{Del1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{Del2_{fejl}{}^2 + Del3_{fejl}{}^2}}{Del2 + Del3}\right)^2} \tag{4.25}$$

[8]

## 4.4 Ringopdeling uden beta model

### Introduktion

Med denne metode antages det igen, at hoben ikke er uniform i temperatur, men i modsætning til den foregående metode vil beta modellen ikke blive brugt i denne masseprofil. Det antages stadig at galaksehoben er sfærisk og der er hydrostatisk ligevægt. Det er med de samme 8 ringe som brugt tidligere og derved de samme resultater for gas densiteten. Det er den der bliver benyttet i gas densitet gradienten.

### Den totale masse profil

Den totale masseprofil for denne metode tager udgangspunkt som de to foregående, i hydrostatisk ligevægt. Den er opdelt i tre dele som den foregående, del 1 og del 3 er identiske med den foregående metode.

Gasdensitet gradienten bliver udregnet ligesom temperatur gradienten i foregående metode:

$$Del2 = -\frac{d\,\ln(\rho_{gas,i})}{d\,\ln(r_i)} = -\frac{\ln(\rho_{gas,i+1}) - \ln(\rho_{gas,i-1})}{\ln(r_{i+1}) - \ln(r_{i-1})} \tag{4.26}$$

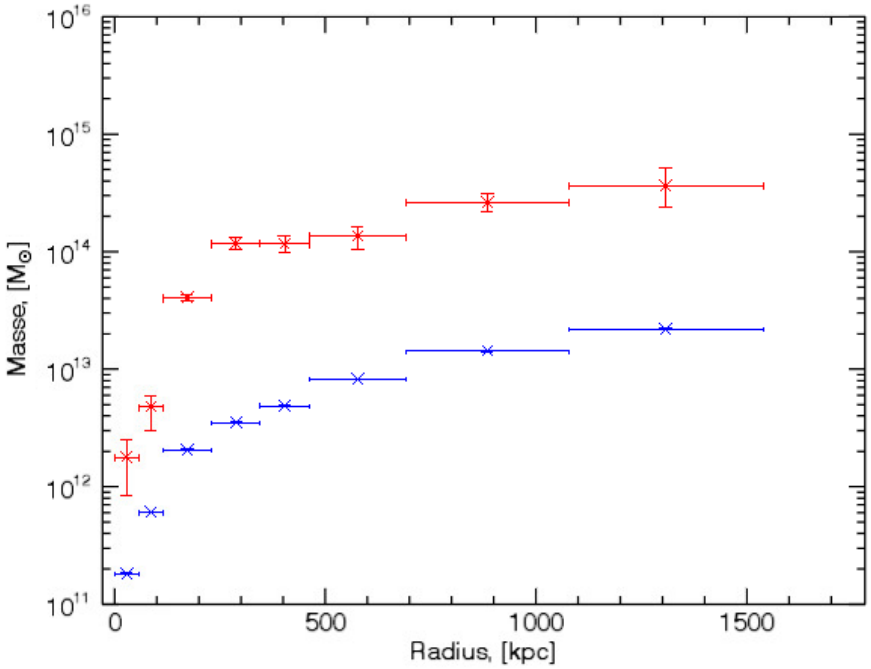
Ligning 4.18, 4.26 og 4.20 bruges som de tre dele og sammensættes til den komplette ligning:

$$M(< r_i) = Del1(Del2 + Del3) =$$

$$-\frac{k_b T_i r_i}{G\,\mu\, m_H}\left(-\frac{\ln(\rho_{gas,i+1}) - \ln(\rho_{gas,i-1})}{\ln(r_{i+1}) - \ln(r_{i-1})} + \frac{\ln(T_{i+1}) - \ln(T_{i-1})}{\ln(r_{i+1}) - \ln(r_{i-1})}\right) \tag{4.27}$$

| Ring | nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Radius | kpc | 58 | 115 | 231 | 346 | 462 | 693 | 1.077 | 1.539 |
| Masse | $10^{14}$ M⊙ | 0,018 | 0,048 | 0,406 | 1,173 | 1,171 | 1,346 | 2,636 | 3,631 |
| Fejl + | $10^{14}$ M⊙ | 0,007 | 0,012 | 0,023 | 0,133 | 0,190 | 0,280 | 0,529 | 1,513 |
| Fejl - | $10^{14}$ M⊙ | 0,009 | 0,018 | 0,023 | 0,116 | 0,196 | 0,289 | 0,457 | 1,224 |

*Tabel 4.5 Totalmasse for ringopdelte metode uden beta model.*




*Figur 4.2 Plot af Gas- og totalmasse profil for den ringopdelte metode uden beta model. red Totalmasse, blå gasmasse.*

Fejl:

Fejlen for del 1 og 3 er fra ligning 4.22 og 4.24:

$$Del2_{fejl} = \frac{1}{\ln(r_{i+1}) - \ln(r_{i-1})} \sqrt{\frac{(\rho_{fejl,i+1})^2}{(\rho_{i+1})^2} + \frac{(\rho_{fejl,i-1})^2}{(\rho_{i-1})^2}} \tag{4.28}$$

$$M_{fejl}(< r_i) = M_i \sqrt{\left(\frac{Del1_{fejl}}{Del1}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{Del2_{fejl}{}^2 + Del3_{fejl}{}^2}}{Del2 + Del3}\right)^2} \tag{4.29}$$

[8]

# 5

# Programbeskrivelse

## Introduktion

Databehandlingen og udregningen er fortaget i IDL. For at gøre processen overskuelig er det delt op i 6 mindre programmer; navngivet program 1-6. De tre første programmer forbereder dataene. Således, at program nummer 4 kan fitte dem til overflade lysstyrken. De to sidste programmer udregner masseprofilerne for de tre forskellige metoder:

## Program 1

Det første program er lavet til, at aflæse de forskellige datafiler og klargøre dem til de næste programmers processer. Det første der gøres er, at indlæs filerne fra Mos 1 og Mos 2: sky; der er det komplette datasæt. Exposure map der benyttes til, at korrigere dataene. Back er billedet af baggrunden. Cheese er filen der er til, at fjerne punktkilderne fra dataene.

Først normaliseres exposure mapet og ganges derefter på sky billedet for, at korrigere det. Derefter fratrækkes baggrundsbilledet fra det nylavede billede, herefter er billedet, klar til den videre proces.

Derefter findes midten af galaksehoben, dette gøres ved, at ligge countsne sammen i henholdsvis rækkerne og kolonerne. Galaksehoben antages, at være symmetrisk og derfor antages det, at maksimum af disse summer angiver hobens midte.

Det sidste dette program gør er, at indsnævre data sættene til et kvadratisk billede på 400x400 pixel omkring den fundene midte, dette gøres for, at få de næste programmer til at køre hurtigere.

## Program 2 og 3

Program 2 og 3 tager billedet på 400x400 pixel fra program et og konvertere det til en vektor med gennemsnitlig count fra galaksehobens midte til dens kant.

Program 2 tage hvert punkt og udregner afstanden til midten dvs. radiussen. Herefter bliver punktets radius og counts gemt i arrays der svarer til punkts radius. Opdelingen har et interval på 1 pixel dette vil sige, at der er 200 arrays fra radius 1 til 200 pixel.

Program 3 tager derefter hvert array og finder gennemsnittet dét intervals counts. Disse oplysninger bliver gemt i en vektor.

Programmerne er skrevet så de områder der er blevet fjernet, da punktkilderne blev fjernet, ikke medtages i gennemsnittet.

## Program 4

Program 4 bruger denne vektor der er blevet lavet i tidligere programmer til, at fitte overflade lysstyrke.

Programmet bruger fitting programmet mpfitfun [14] til, at fitte overflade lysstyrken. Mpfitfun skal bruge vektoren med gennemsnit count og en vektor med de tilhørende radius. Den skal desuden bruge overflade lysstyrke ligningen samt startværdier for de ukendte værdier.

### Program 5

Program 5 er lavede til at udregne masse profilerne og fejlberegninger for den isoterm metode. Den er bygget op skridt for skridt og slutter med, at plotte masse profilen for både den totale masse og gas massen i samme plot.

Den første del af programmet består i, at indhente alle de oplysninger der skal benyttes til udregningen af masse profilerne. Det vil sige forskellige konstanter, værdier fra Xspec og værdier fundet i tidligere programmer.

Den beregner derefter elektron nummer densitet og gas densiteten for hele sfæren som beskrevet i afsnit 4.1. Derefter laver den en vektor med sfærens volumen for hver halve pixel, det kan derefter benyttes til, at udregne gas masse ud gennem galaksehoben. Alle de nødvendige fejlberegninger, bliver samtidig udregnet for de forskellige skridt.

Det næstsidste skridt er udregningen af den totale masse profil. Denne proces er opdelt i tre dele for, at gøre processen overskuelige, ligeledes er fejlberegningerne for den totale masse profil delt op.

8 diskrete værdier fravælges til brug, når resultaterne skal sammenlignes med de to andre masse profil metoder. Dette er værdier for gas- og den totale masse samt deres respektive fejlværdier.

Til sidst plottes masse profilerne samt deres fejlberegninger.

### Program 6

Program 6 udregner masse profilerne og fejlberegninger for de to metoder hvor galaksehoben er blevet opdelt i ringe.

Det første skridt, som i foregående program er, at indhente værdier der skal benyttes i de forskellige udregninger. Dette indbefatter at indskrive de forskellige vektor fra Xspec, der kommer af ringopdelingen og hvorfor der, derfor er 8 temperaturer og normer.

Næste del består af, at udregne nummer densiteten og gas densiteten og de dertilhørende fejlberegninger for de 8 diskrete værdier. Disse værdier er ens for de to forskellige metoder da beta modellen ikke indgår.

Herefter laves de to forskellige gradienter der benyttes i de to metoder. Der er taget hensyn til den inderste og yderste ring. Disse værdier samt deres fejl bliver indskrevet i hver deres vektorer. Gasmasse profilen bliver udregnet ved, at regne den pågældende rings masse og derefter ligge den sammen med den foregående rings masse.

De to forskellige totalmasse profiler bliver til sidst udregnet ved, at bruge de formler givet i afsnit 4.2 og 4.3. Dog er disse delt op i 4 dele for overskuelighedens skyld.

Afslutningsvis i programmet plottes elektron nummer densiteten, gasdensiteten, temperatur, norm, gas og total masse profilerne.

# 6

# Sammenligning af resultater samt diskussion

## 6.1 Introduktion

I de foregående afsnit er forskellige masse profiler for total og gas massen blevet udregnet. Ligeledes er profiler for temperaturen, gas densitet og tæthed blevet udregnet.

I dette afsnit vil de forskellige profiler blive sammenlignet. Gas fraktionerne fra de forskellige metoder vil blive udregnet, og sammenlignet med hinanden. Derudover vil resultaterne fra dette projekt blive holdt op mod resultater fra to eksterne projekter, der har benyttet gravitational lensing til, at finde den totale masse af Abell 1689.

## 6.2 Sammenligning

### Temperatur

På figur 6.1 ses temperatur profilen plottet med den konstante temperatur fra den isoterm metode. Temperaturen for den isoterm metode er forholdsvis høj i forhold til, den ringopdelt. Dette skyldes, at da denne værdier blev genereret blev dette gjort med to temperaturer i samme model for, at tage højde for den store differens der antages i temperaturen.

Ud fra temperatur profilen der kommer af den ringopdelte data ses det, at temperaturen ikke er uniform, ud gennem hoben. Det ses fra resultaterne, at Abell 1689 har en kold kerne, da temperaturen stiger ud fra kernen hvorefter den falder igen længere ud gennem hoben.

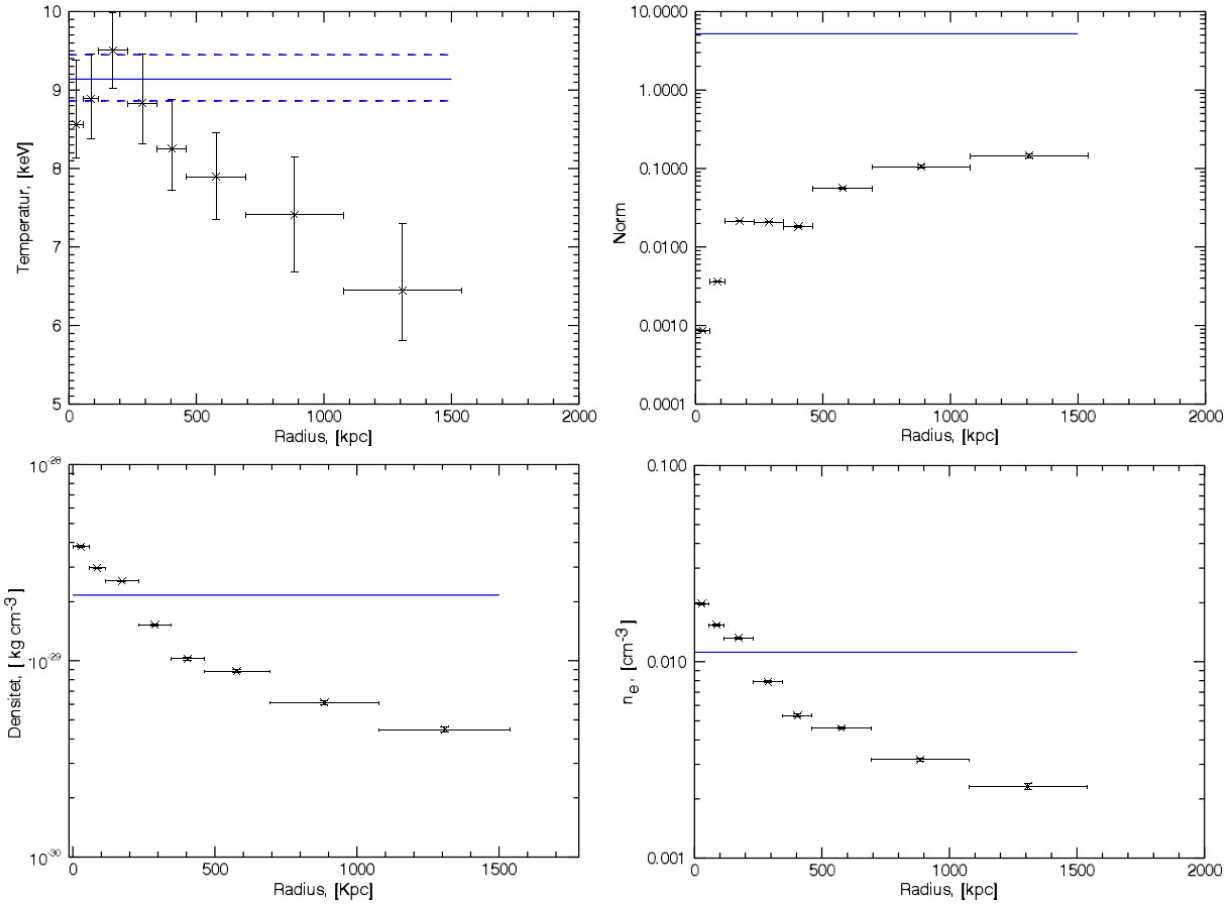
### Gas

Der er blevet udregnet to gasmasse profiler med to forskellige metoder, den isoterm og den ringopdelte metode. I den isoterm metode antages det, som beskrevet tidligere, at hoben er uniform med hensyn til, norm, gas densitet og elektron nummer densitet disse parametre er derfor konstante i denne metode. For den ringopdelte metode er der 8 varierende diskrete værdier for disse parametre.

På figur 6.1 ses de norm, elektron nummer densiteten, gasdensitet og temperaturen. Disse er plottet for de to forskellige metoder med og uden ringopdeling. Den isoterm metode er markeret med blåt og den ringopdelte metode er markeret med sort.

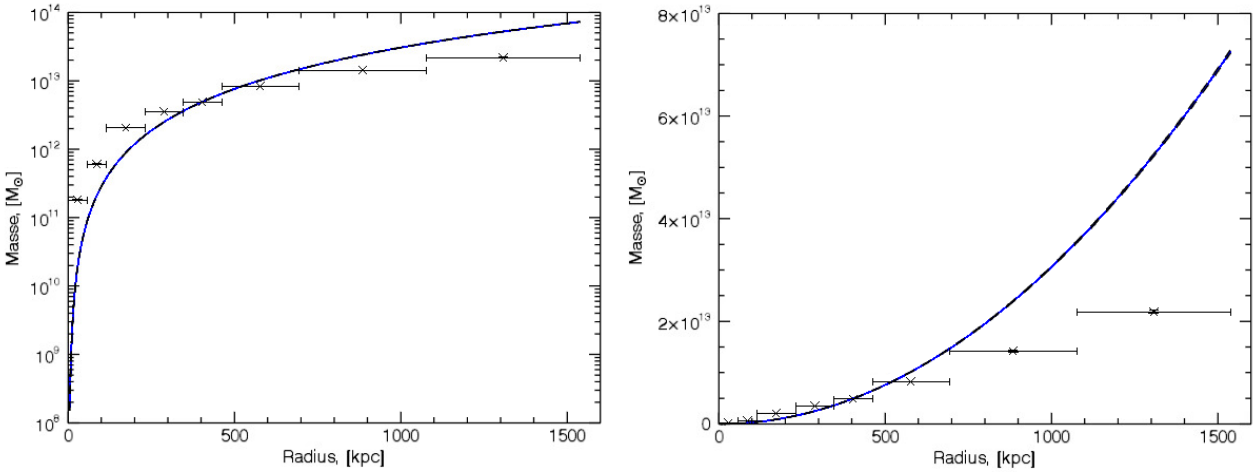
Normen for den isoterm metode er markant højere end den ringopdelte, den er afhængig af det areal den er fundet over. Da den isoterm metode er over hele hobens areal, er den højere end for de individuelle ringe.

Gasdensiteten er en skalering af elektron nummer densiteten, de har derfor samme form. De er faldene inde for de første 400 kpc, hvor efter de begyndere at flader ud. Tæt på kernen er en høj gasdensitet, det er resultatet af hobens kernes køling.




*Figur 6.1 Sammenlignings plot fra den isoterme- og ringopdelte metoder. Øverst venstre temperatur, øverst højre Norm, nederst venstre gasdensitet, nederst højre elektron nummer densitet. Isoterme blå, ringopdelt sort.*

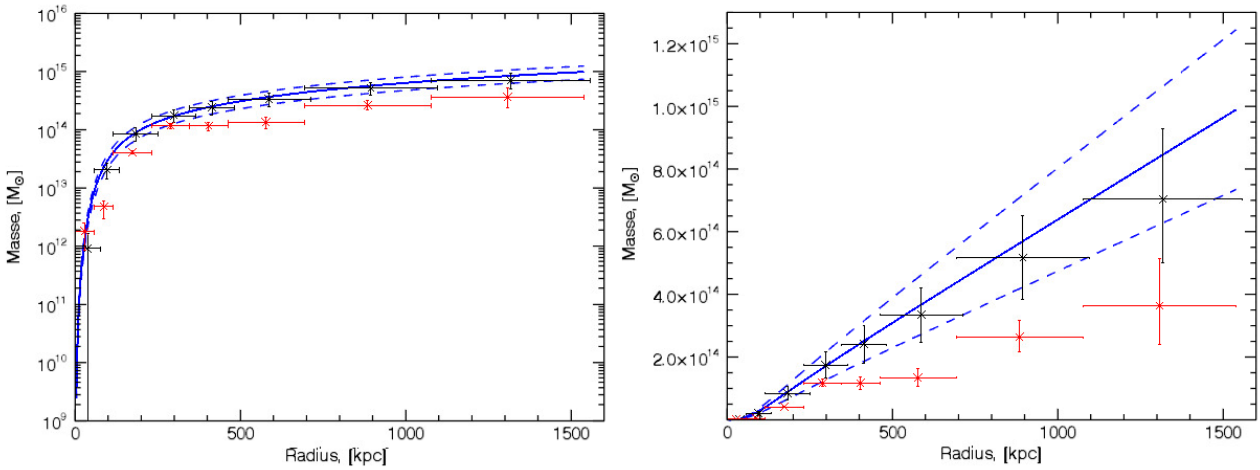
Metoder giver som beskrevet i tideliger afsnit to gasmasse profiler.




*Figur 6.2 Sammenlignings plot af Gasmasse profiler. Venstre log y akse, højre uden log y akse. Isoterm blå, ringopdelt sort.*

Figur 6.2 ses de to gasmasse profiler plottet sammen, på venstre side ses det med en logaritmisk y akse og på højre side uden. Den ringopdelte metode stiger støt ud gennem hoben med en lav hældning. Den isoterm metode er proportional med $r^3$, gasdensiteten i metoden er en konstant og resulterer, at gasmassen vokser som funktion af $r^3$. Gasmassen for den isoterm metode starter med, at ligge lavere end for den ringopdelte, men vokser hurtigere end den ringopdelte metode ud gennem hoben.

Den totale masse



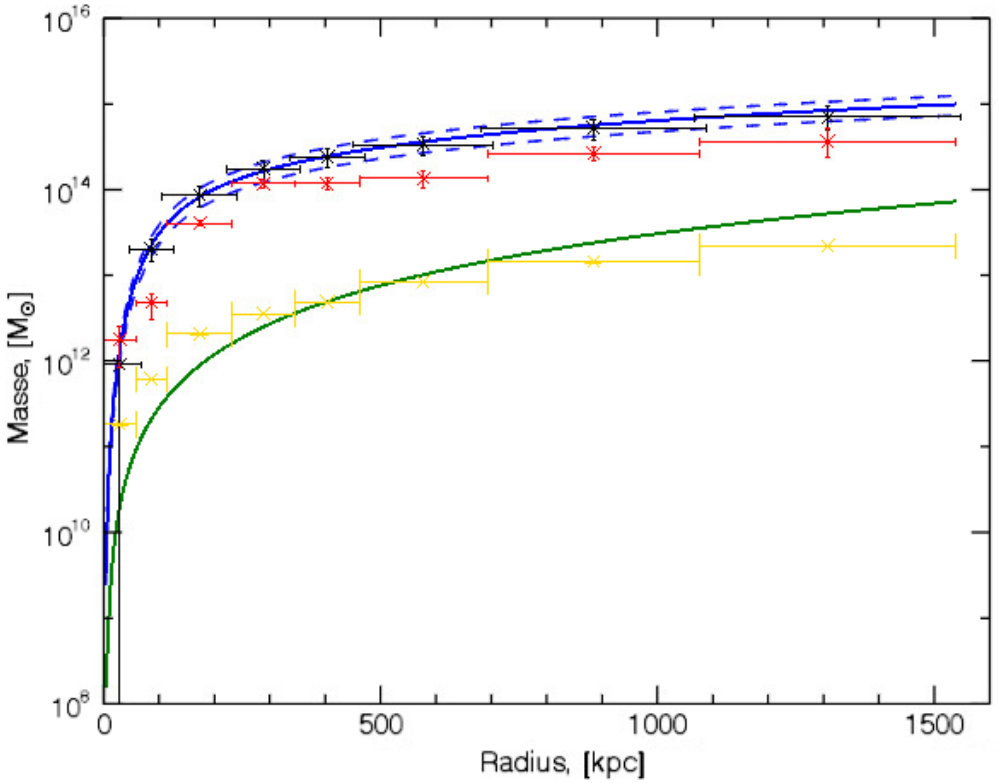

*Figur 6.3 Sammenlignings plot af totalmasse profiler. Venstre log y akse, højre uden log y akse. Isoteme blå, ringopdelt med beta model sort, ringopdelt uden beta model rød.*

På figur 6.3 ses de tre metoders totalmasse profiler i samme plot, som før er på højre side med en logaritmisk y akse og på venstre side uden.

De to metoder der benytter beta modellen giver en totalmasse profil der ikke, med sikkerhed kan differensers fra hinanden, de to ligger forholdsvis tæt ud gennem hoben, Dvs. temperaturen har en lille indvirkning her.

Den tredje metode der ikke benytter beta modellen resulterer i, en markant lavere masse end de to foregående metoder. Kombinationen af ikke at antage at hoben er isoterm og af ikke at benytte beta modellen, giver en laver masse.

På figur 6.4 ses det samlede plot, at alle gasmasse og totalmasse profilerne.




*Figur 6.4 Sammenlignings plot af alle profilerne. Isoterm totalmasse blå, isoterm gasmasse grøn, ringopdelt totalmasse med beta model sort, ringopdelt totalmasse uden beta model rød, ringopdelt gasmasse gul*

## 6.3 Gas fraktion

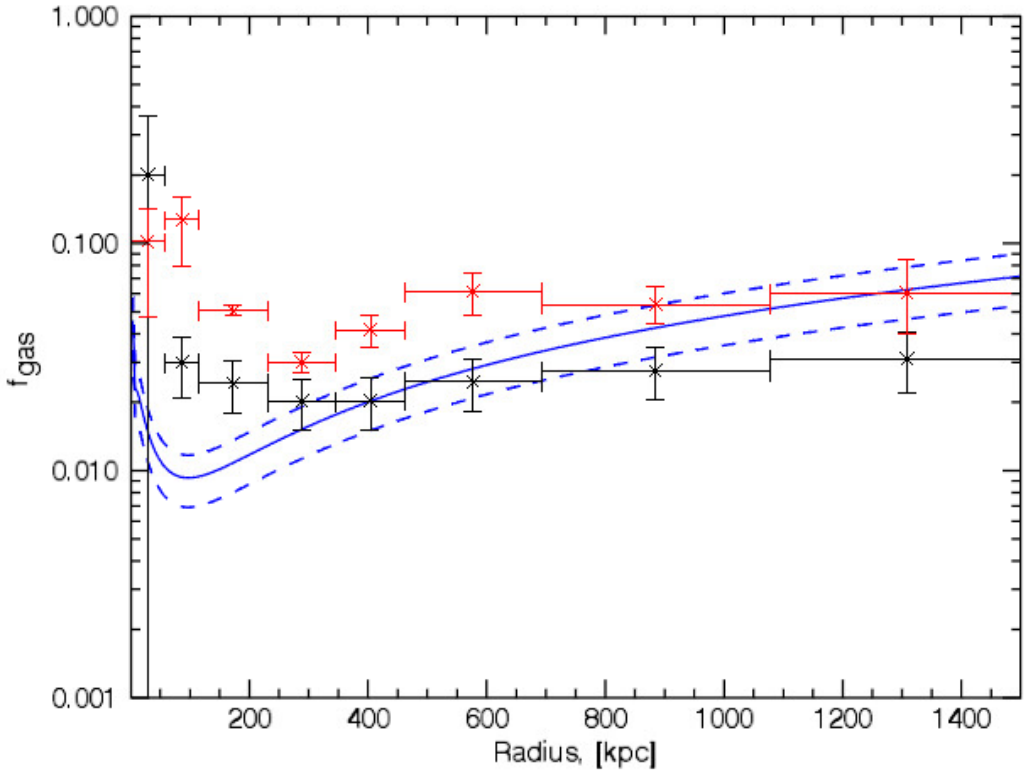
Gas fraktionen er forholdet mellem den varme gas ICM og den totale masse af galaksehoben. Gas fraktionen er givet ved:

$$f_{gas} = \frac{M_{gas}(< R)}{M_{tot}(< R)} \tag{6.1}$$

I dette projekt er der udregnet gasmasse profiler på to forskellige metoder, den isoterm- og ringopdelte metode. Der er også udregnet totalmasse profiler med tre forskellige metoder, den isoterm metode, den ringopdelte metode, med og uden beta model. Der vil derfor ses tre gasfraktion profiler; en for den isoterm og to for de ringopdelte med og uden beta model.

| Ring | nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Radius | kpc | 58 | 115 | 231 | 346 | 462 | 693 | 1.077 | 1.539 |
| Isoterm | - | 0,015 | 0,009 | 0,011 | 0,015 | 0,020 | 0,028 | 0,042 | 0,062 |
| Ring m. β | - | 0,200 | 0,030 | 0,024 | 0,020 | 0,020 | 0,025 | 0,027 | 0,031 |
| Ring u. β | - | 0,102 | 0,127 | 0,051 | 0,030 | 0,042 | 0,061 | 0,054 | 0,060 |

*Tabel 6.1 Gasfraktioner for alle tre metoder.*




*Figur 6.5 Gasfraktions plot for alle tre metoder. Isoterm blå, ringopdelt med beta model sort, ringopdelt uden beta model rød.*

I tabel 6.1 er de udregnede værdier for de forskellige gasfraktioner, og disse er plottet i figur 6.5.

For alle tre metoder fås en gas fraktion der falder ud gennem kernen, de ligge alle sammen forholds vis lavt.

For den Isoterm metode starter gasfraktionen med, at være lav, den vender omkring de 100 kpc, hvor efter den vokser ud gennem resten af hoben.

Den ringopdelte metode med beta modellen begynder med en rimelig høj gasfraktion dog med stor usikkerhed. Derefter falder den til, at havde en gasfraktion på 0,01-0,02 hvilke er lavere end forventet.

Den ringopdelte metode uden beta model starter ud med en gasfraktion på 0.1-0.12, hvorefter den falder til, at ligge på 0,03-0,06 gennem resten af hoben.

## 6.4 Gravitationel lensing

Gravitationel lensing er en anden metode for, at finde den totale masse af galaksehober. Det benytter af, at fotoner bøjes af det gravitationelle kraft fra en hobe. Dette kan observeres, og med forskellige metoder og modeller kan den totale masse findes.

Resultaterne fra dette projekt vil i dette afsnit blive sammen lignet med resultater, fra to andre projekter. De to projekter der er valgt, er begge projekter hvor gravitationel lensing er hovedkraften bag udregningen af den totale masse.

Den første artikel er 'Cluster mass profiles from a baysian analysis of weak-lensing distortion and magnification measurements: applications to Subaru data'[11]. Der benytter en kombination af weak lensing og magnification measurements til, at udlede en tredimensionel masseprofil for hele Abell 1689, profilen er vist i tabel 6.2:

| Radius | kpc | 185 | 250 | 350 | 547 | 1087 | 1.618 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Masse | $10^{14}$ $M_\odot$ | 1,0 | 2,4 | 3,7 | 5,69 | 8,83 | 12,0 |
| Fejl ± | $10^{14}$ $M_\odot$ | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 0,73 | 1,17 | 1,7 |

*Tabet 6.2 Totalmasse fra ' Cluster mass profiles from a baysian analysis of weak-lensing distortion and magnification measurements: applications to Subaru data'[11]*

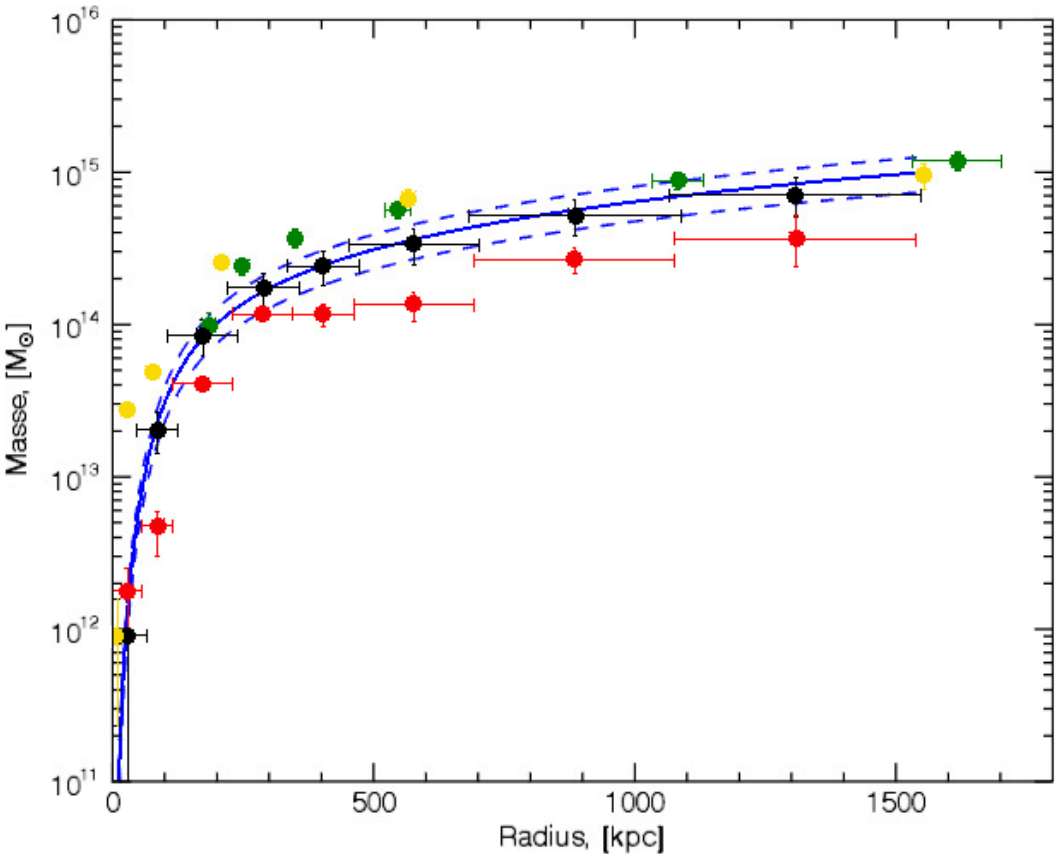
Den anden artikel er 'Mass and gas profiles in A1689: Joint X-ray and lensing analysis' [12]. Artiklen benytter en kombination af røntgenstråling og strong-lensing til, at udlede en tredimensionel masseprofil over Abell 1689, profilen er vist i tabel 6.3:

| Radius | kpc | 10,1 | 27,7 | 75,9 | 208 | 568 | 1554 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Masse | $10^{14}$ $M_\odot$ | 0,0091 | 0,073 | 0,483 | 2,52 | 6,8 | 9,56 |
| Fejl ± | $10^{14}$ $M_\odot$ | 0,0068 | 0,025 | 0,039 | 0,15 | 0,8 | 1,8 |

*Tabet 6.3 Totalmasse fra 'Mass and gas profiles in A1689: Joint X-ray and lensing analysis'[12]*

Disse to masseprofiler plottes sammen med de tre masseprofiler der er blevet udregnet gennem dette projekt, på figur 6.6.

Det ses, at de to metoder der benytter lensing har en højere total masse, gennem midten af hoben, men begge har en masse der ligger tæt på den isoterm masse i udkanten af hoben. De to metoder fra dette projekt der ikke antager en uniform temperatur ud gennem hoben, ligger genneralt med en langt mindre masse end for de to lensing profiler.




*Figur 6.6 Totalmasse profil af de forskellige metoder. Isoteme blå, ringopdelt med beta model sort, ringopdelt uden beta model rød,'Mass and gas profiles in A1689: Joint X-ray and lensing analysis[12]' gul, ' Cluster mass profiles from a baysian analysis of weak-lensing distortion and magnification measurements: applications to Subaru data[11]' grøn*

Forskellen på røntgenmassen og lensingmassen kan skyldes forskellige årsager. For masse beregningerne fortaget gennem dette projekt er der blevet antaget hydrostatisk ligevægt og sfærisk symmetri, disse kan være helt eller blot delvist fejlantaget. Lensing resultaterne kan også være fejlagtige, hvis der er andet masse der påvirker det observerede lys bane mellem Abell 1689 og teleskopet.

# 7

# Konklusion

## Opsummering og resultater

Igennem dette projekt, er galaksehoben Abell 1689 blevet analyseret, via røntgenobservationer fra satellit teleskopet XMM-newton. I projektet er ESAS og Xspec blevet benyttet til, at analysere hoben på to forskellige metoder. Der er blevet antaget, at hoben er sfærisk symmetrisk og er i hydrostatisk ligevægt.

Den første metode hvor det antages, at hoben er uniform med hensyn til, gasdensitet og temperatur. I den anden metode antages der, at hoben varierer i disse værdier. Den opdeles derfor i 8 ringe der alle blev analyseret via Xspec. Et af de direkte resultater af denne analyse, er en temperatur profil for hoben ud til 1539 kpc. Disse to metoder blev brugt til, at udregne to gasmasse profiler. En der var isoterm, hvor gasmassen af hoben blev fundet til $5{,}2\ 10^{13}$ $M_{\odot}$. Den anden hvor hoben blev ringopdelt, hvor gasmassen blev fundet til $2{,}2\ 10^{13}$ $M_{\odot}$. Begge ud til 1539 kpc.
Billede dataene blev, i IDL brugt til, at fitte overflade lysstyrken. Dette gav en approksimation for kerne radiussen fundet til, at være 105 kpc, og for beta fundet til 0,63. Beta bruges, i beta modellen i to af de tre totalmasse profiler.

Tre forskellige totalmasse profiler er blevet udregnet for hoben. Den første metode til, at udregne hobens totalmasse hvor det antages, at hoben var isoterm og beta modellen blev brugt. Her blev totalmassen fundet til $8{,}4\ 10^{14}$ $M_{\odot}$. Den anden metode hvor hoben antages ikke, at være isoterm og hoben blev delt op i ringe, her blev der benyttet beta modellen. Her blev totalmassen af hoben fundet til $7\ 10^{14}$ $M_{\odot}$. Ved den tredje metode blev der ligeledes antaget, at hoben ikke er isoterm og ringopdelingen blev derfor benyttet. Med denne metode blev der ikke benyttet beta modellen, den totale masse af hoben blev fundet til at være $3{,}6\ 10^{14}$ $M_{\odot}$.
Den sidste udregning i dette projekt er for gasfraktion for de forskellige metoder. Der findes for den isoterm metode, at gasfraktionen er på ca. 1% i hobens kerne, og den stiger til ca. 6% i kanten af hoben. For den ringopdelte metode med beta modellen, falder gasfraktionen kraftigt i kernen fra ca. 20% til 3%, dog med stor usikkerhed. I kanten af hoben ligger den fortsat på de 3%. for den ringopdelte metode uden beta modellen, ligger gasfraktionen på ca. 10% i kernen og falder til ca. 6 % i kanten.

Ud fra temperatur profilen samt gasdensitets profilen, der bliver fundet, ved hjælp af Xspec på den ringopdelte metode, kan der konkluderes, ud fra disse resultater, at Abell 1689 ikke er isoterm og, at den har en kold kerne. Temperatur profilen viser, at temperaturen er lavere i kernen, end længere ude i hoben. Gasdensitet profilen viser, at gasdensiteten er meget højere i kernen end uden for den. Dette er hvad der forventes af en kølet kerne.

Gasfraktionerne for de to metoder der ikke antage, at hoben er isoterm, er meget forskellige. I den metode hvor beta modellen bruges ligger gasfraktionen meget lavt, hvilke vil sige den peger på, at der er langt mindre gas i universet. I den metode hvor beta modellen ikke benyttes findes gasfraktionen til, at være højere, men stadig i den lave ende. Den ligger som tidligere beskrevet

på omkring 10% i kernen og 6% udenfor. Dette peger på, at gassen i hoben, primært ligger i kernen, og vokser proportionelt med det mørke stofs masse, ud gennem hoben, uden for kernen.

Den model der er ringopdelt og ikke antager, at hoben er isoterm er projektets bedste approksimation til en gas- og totalmasse profil for Abell 1689.

I projektet sammenlignes de fundne totalmasse profiler med profiler fra to andre projekter, der også studerer Abell 1689. De to projekter benytter begge lensing som den primære metode til udregningen af deres masse profiler. De to metoder der benytter lensing har en højere totalmasse ud gennem hoben. De har en total masse der er ca. 2,5-3,5 gang højere end for den ringopdelte metode, der ikke benytter beta modellen.

## Fremtidigt arbejde

Et resultat fra en galaksehobe er ikke nok til, at bygge en general konklusion på. Det ville derfor være interessant, at bruge de tre metoder fra dette projekt på flere forskellige massive galaksehober. De forskellige resultater fra de brugte galaksehober, kunne efterfølgende holdes op mod hinanden, samt resultaterne fra lensing analyser, for at se om kerner generelt har en højere gasfraktion, og om den generelle gasfraktion er lav. Men for, at se om den totale masse er fundet med røntgenobservationer generelt, ligger lavere end en der er fundene med lensing.

# 8

# Litteraturliste

[1] F. D. Seward og P. A. Charles, Exploring the x-ray universe, Cambridge university press, The Edinburgh building Cambridge CB2 8RU UK, 2. udgave, 2010, 306-323.

[2] B. Ryden, Introduction to Cosmology, Department of Astronomy
The Ohio State University, 2006, 169.

[3] E. L. Wright, CosmoCalc, www.astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html, 2016, 28-10-16.

[4] A. Wilson, ESA Achievements, ESA Publications Division, ESTEC Noordwijk The Netherlands, 3. udgave, 2005, 206-209.

[5] XMM-Newton Community Support Team, XMM-Newton Users Handbook, 2.14. udgave, 2016, 6-11 22-26.

[6] S. L. SNOWDEN og K. D. KUNTZ, COOKBOOK FOR ANALYSIS PROCEDURES FOR XMM-NEWTON EPIC OBSERVATIONS OF EXTENDED OBJECTS AND THE DIFFUSE BACKGROUND, Version 5.9, kap. 6.

[7] K. Arnaud, B. Dorman og C. Gordon, Xspec An X-Ray Spectral Fitting Package User's Guide for version 12.8.0, HEASARC Astrophysics Science Division NASA/GSFC, 2012, 250 168-169.

[8] J. R. Taylor, An introduction to error analysis the study of uncertainties in physical measurements, university science books, USA, 2. udgave, 1997, 77-79.

[9] Atomdb, Frequently Asked Questions, www.atomdb.org/faq.php, 23-01-17.

[10] D. D. M. Ferreira, GAS MASS FRACTIONS FROM XMM-NEWTON, Niels Bohr Institute, 2010, 68 70.

[11] Keiichi, U., Tom, B., Adi, Z., Elinor M., and Li-Yen H., 'CLUSTER MASS PROFILES FROM A BAYESIAN ANALYSIS OF WEAK-LENSING DISTORTION AND MAGNIFICATION MEASUREMENTS: APPLICATIONS TO SUBARU DATA', The Astrophysical Journal, 2011, 10-12

[12] Doron L., Rennan B., Tom J. B. og Yoel R.,' Mass and Gas Profiles in A1689: Joint X-ray and Lensing Analysis', Mon. Not. R. Astron. Soc, 2007, 8-9.

[13] N. Guttridge, New Hubble image of galaxy cluster Abell 1689, www.spacetelescope.org/news/heic1317/, 2013, 30-01-17.

[14] Craig B. Markwardt, mpfitfun,
http://hesperia.gsfc.nasa.gov/ssw/gen/idl/fitting/mpfit/mpfitfun.pro, 03-10-2016.

[15] NASA, Archive, https://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/W3Browse/w3browse.pl, 06-09-16

**DTU Space**
Institut for Rumforskning og -teknologi
Danmarks Tekniske Universitet

Elektrovej, bygning 327
2800 Kgs. Lyngby
Tlf 4525 9500
Fax 4525 9575

www.space.dtu.dk