

Cover page

Exam information

NFYB05035E - Bachelorprojekt i de fysiske fag, Niels Bohr Institutet - ID:szf402 (Jesper Larsen)

Handed in by

Jesper Larsen
szf402@alumni.ku.dk

Exam administrators

Studentservice 35 33 35 33
studentservice@science.ku.dk

Assessors

Lise Bech Christensen
Examiner
lichrist@nbi.ku.dk
 +4535320604

Jerome Marie Joseph Chenevez
Co-examiner
jerome@space.dtu.dk

Hand-in information

Tro og love-erklæring: Yes



FYSISKE EGENSKABER FOR GALAKSER MED SMALBÅNDS EXCESS

BACHELORPROJEKT

Skrevet af *Jesper Larsen*
January 20, 2021

Under vejledning af
Lise Bech Christensen

KØBENHAVNS UNIVERSITET



UNIVERSITY OF
COPENHAGEN

NAME OF INSTITUTE: Niels Bohr Institutet

AUTHOR(S): Jesper Larsen

EMAIL: szf402@alumni.ku.dk

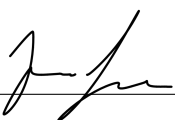
TITLE Fysiske egenskaber for galakser med smalbands excess

SUPERVISOR(S): Lise Bech Christensen

HANDED IN: 20.01.2021

DEFENDED: 05.02.2021

NAME Jesper Larsen

SIGNATURE 

DATE 20.01.2021

Abstract

Based on photometric data from the COSMOS2015 catalogue and UltraVISTA dr4, 4109 objects were found to have narrowband-excess in NB118. Using LePhare, photometric redshifts as well as $M_\star$ and SFR was calculated using SED-fitting, for objects with narrowband-excess. For objects showing sign of H(α $z \sim 0.8$) and [OII] ($z \sim 2.2$) emission lines, another estimate of SFR is made based on emission line-flux. The SFR found by the the methods are compared to eachother and to SFR calculated for objects without significant emission lines within NB118.

Compared to existing litterature on the matter, the SED-fitting method is found to overestimate SFR for almost all masses ($\log(M_\star) < 11$). by up to 0.4 dex. The lineflux method gives a closer match within 0.2 dex of the compared data. While mostly agreeing with the compared data, most of the estimated SFR in this project was found to be near the upper limits of the compared estimations. An increase in sSFR at higher redshift is found, although it was not possible to determine a satisfying relationship for comparison.

Contents

1	Note til læseren	3
2	Indledning	4
3	Teori	5
3.1	Datakataloget	5
3.2	Spektrallinjer	5
3.2.1	H α og [OII] emissionslinjer	5
3.3	Smalbånd NB118	6
3.3.1	NB118 excess	6
3.4	Initial mass function	7
3.5	Stellar Population Synthesis	7
3.6	Stjernedannelsesrate	8
3.7	Fotometrisk Rødforskydning	9
3.8	LePhare	10
3.8.1	Filtre	10
3.8.2	SED-skabeloner	10
3.8.3	LePhare output	11
4	Databehandling og resultater	11
4.1	Katalogsammensætning	11
4.2	Udvælgelse af objekter med NB118 excess	12
4.3	Bestemmelse af rødforskydning	13
4.4	SFR baseret på SED-fitting	14
4.5	SFR baseret på linjeflux	17
4.6	Sammenligning af resultater	19
5	Konklusion	22
A	Metode til bestemmelse af linjeflux	24
B	Liste over bilag	25

1 Note til læseren

Al databehandling i projektet er foretaget i LePhare og Python. LePhare er benyttet til udregning af fotometrisk rødforskydning, SFR og masse af galakser. Figurer, tabeller mm., der forekommer i teksten er altsammen udarbejdet i Python af forfatteren selv, med mindre andet specifikt er angivet. Al relevant kode og dertilhørende kommentarer findes som Jupyter Notebooks (.ipynb filer) i bilag.

Eftersom opgaven er skrevet på dansk, er de fleste fagtermer forsøgt oversat fra engelsk. Dog var det ikke muligt at finde gode oversættelser i alle tilfælde, så nogle enkelte ord vil stadig være på engelsk, fx excess, stellar population synthesis, osv.

2 Indledning

I dette projekt studeres nogle de fysiske egenskaber ved en række udvalgte galakser.

På baggrund af observationel data fra smalbånd NB118 og bredbåndene Y og J, kan objekter med kraftig emission i smalbåndet, relativt til bredbåndene, udvælges. Den kraftige emission hos de udvalgte objekter skyldes i de fleste tilfælde en rødforskydning emissionslinje. For at undersøge hvilke linjer, der falder indenfor smalbåndet, bestemmes objekternes fotometriske rødforskydning vha. SED-fitting. Selve SED-fittingen foretages i LePhare, der foruden rødforskydning også benyttes til at bestemme stjernemasse og stjernedannelsesrate for objekterne.

Af særlig stor interesse i projektet er de objekter, der har emissionslinjer fra $H\alpha$ ($z \sim 0.8$) og $[OII]$ ($z \sim 2.2$), som falder indenfor smalbåndet, da disse er gode indikatorer for stjernedannelse. Det forventes derfor at udvalgte galakser ved rødforskydning ($z \sim 0.8$) og ($z \sim 2.2$) har høj stjernedannelsesrate.

På baggrund af overstående foretages en sammenligning af stjernedannelsesrater for udvalgte galakser med $H\alpha$ - og $[OII]$ -linjer, med galakser uden smalbånds excess.

Foruden SED-fitting udregnes stjernedannelsesraten vha. en alternativ metode, der benytter linjeflux fra emissionslinjerne. Linjefluxen bestemmes på baggrund af den fotometriske data og de benyttede filtre. Forskelle i de to metoder diskuteres efterfølgende, og resultater sammenlignes med resultater fra (Whitaker *et al.* 2014).

Al fotometrisk data benyttes i projektet er opgivet i AB magnituder og stammer fra COSMOS2015-kataloget og UltraVISTA dr4.

3 Teori

3.1 Datakataloget

Det katalog, der i projektet arbejdes ud fra, er sammensat af data fra COSMOS2015 og UltraVISTA dr4. Sammensætningen skyldes, at Cosmos2015 indeholder data fra UltraVISTA d2, der her erstattes af data fra dr4. UltraVISTA dr4 indeholder mere detaljeret data for Y, J, H, K_s og NB118 båndene, der er af særlig stor interesse for dette projekt. Nærmere beskrivelse findes i sektionen om databehandling, hvor det blandt andet beskrives, hvordan sammensætningen blev udført.

Cosmos2015 er et datakatalog, der indeholder målinger af bl.a. flux og magnituder ved forskellige bølgelængder, for knap 1.1M objekter. Målingerne er taget i et område af himlen på omkring 2 deg² ved hjælp af en række forskellige teleskoper. I projektet arbejdes der kun med et udsnit af kataloget, hvis data kommer fra CFHT, Spitzer, Subaru og VISTA-teleskopet (Laigle *et al.* 2016).

3.2 Spektrallinjer

Spektrallinjer kan inddeles i absorptions- og emissionslinjer, der kan ses som hhv. kraftige dyk eller stigninger i et ellers kontinuert spektrum af elektromagnetisk stråling. De repræsenterer således en mangel eller overflod af lys ved specifikke, diskrete bølgelængder. Linjerne skyldes ofte elektronovergange, der sker fordi atomer eller molekyler absorberer eller emitterer energi i form af stråling. Spektrallinjernes placering i et spektrum kan bruges til at udregne fotonenergien vha. (3.2.1).

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.2.1)$$

Når fotonenergien kendes, kan denne sammenlignes med påkrævede energier for kendte elektronovergange for at finde frem til hvilket stof, der udsendte lyset (Carroll and Ostlie 2007).

Når man kigger på stjerner og galakser, kommer observerede linjer således fra atomer og molekyler, der findes i og omkring stjernerne, det interstellar medium (ISM) og det intergalaktiske medium. Overordnet set findes der i disse regioner meget hydrogen og helium, men i det interstellar medium og omkring stjerner findes også større molekyler, støvkorn og metaller op til og med jern.

I dette projekt er emissionslinjerne H α og [OII] af særlig interesse, da disse er nogle af de bedste indikatorer for stjernedannelse i galakser.

3.2.1 H α og [OII] emissionslinjer

H α er en spektrallinje med en hvilebølgelængde på 6563Å, der kommer fra elektronovergangen mellem n=3 og n=2 i et hydrogenatom. Overgangen sker naturligt, når elektroner

og protoner rekombinerer. Man ser derfor masser $H\alpha$ stråling i regioner med neutral hydrogen. Eftersom molykyleskyer indeholder store mængder hydrogen, der kan ioniseres af nydannede stjerner, er en stor mængde $H\alpha$ -stråling en god indikator på stjernedannelse. Ydermere er $H\alpha$ -linjen ofte meget kraftig, hvilket gør den nem at detektere, selv i lyssvage galakser.

Andre kraftige linjer, der benyttes til at se efter stjernedannelse er de to [OII]-linjer, der har en hvilebølgelængde på 3726Å og 3729Å. Linjerne kommer begge fra en såkaldt forbudt overgang. I bund og grund sker de forbudte overgange, når atomet bevæger sig fra en exciteret tilstand mod grundtilstanden, ved brug af nogle mindre sandsynlige elektronovergange. Den lave sandsynlighed for overgangen gør, at de ofte ikke ses i laboratorier på jorden, hvor stofmængden er relativ lav sammenlignet med rummet. Spektrallinjer fra forbudte overgange angives i firkantede parenteser, som f.eks. [OII]. Fluxen fra [OII]-linjerne er omkring halvt så stor som den fra $H\alpha$. En fordel ved at observere [OII]-linjeparret er, at deres bølgelængder er så tæt på hinanden, fordi der ikke er stor forskel i den afgivne energi ved overgangene. Dette gør dem nemmere at identificere end enkeltstående linjer, når rødforskydningen ikke kendes præcist (Sparke and Gallagher 2007).

3.3 Smalbånd NB118

NB118 er et smalbåndsfiltre centreret omkring en bølgelængde på $1.19\mu m$. Som det ses på figur 2, ligger NB118 helt indenfor J-båndet, i den blå ende. Helt generalt er smalbåndsfiltre gode til at finde emissionslinjer på, da man kan sammenligne fluxen i smalbåndsfiltret med fluxen i de omkringliggende bredbåndsfiltre (Milvang-Jensen *et al.* 2013).

3.3.1 NB118 excess

Objekter, der er særligt lysstærke inden for NB118, har muligvis stærke emissionslinjer, og er derfor interessante for projektet her. For at udvælge objekter med emissionslinjer i NB118, opstilles der en række kriterier for at udvælge objekter, som har høj flux i smalbåndsfiltret. Kriterierne går ud på at sammenligne målinger i NB118 med Y- og J-båndet, og er følgende:

- Detekteret ved 5σ signifikans i NB118 og 2σ signifikans i Y- og J-båndet.
- $(J - NB118)_{corr} > 0.2$
- $(J - NB118)_{corr} > 2.5\sigma_{(J-NB118)_{corr}}$

$(J - NB118)_{corr}$ er en korrektion for, at NB118 ikke ligger midt i J-båndet. Korrektionen er vigtig, da objekter, hvis kontinuum har hældning henover bredbåndsfiltret, ville resultere i en værdi af $J - NB118 \neq 0$. Den nævnte korrektion udregnes som:

$$(J - NB118)_{corr} = \begin{cases} (J - NB118) + 0.34(Y - J) & \text{for } (Y - J) \leq 0.45 \\ (J - NB118) + 0.153 & \text{for } (Y - J) < 0.45 \\ (J - NB118) + 0.07 & \text{for } Y \text{ ikke detekteret} \end{cases} \quad (3.3.1)$$

Overstående korrektion og kriterier er de sammen som fremstillet i (Milvang-Jensen *et al.* 2013). Konstanterne i korrektionen er udregnet på baggrund af blandt andet usikkerhederne på benyttet data, og kunne derfor med fordel være opdateret i projektet her, da der her benyttes nyere data.

3.4 Initial mass function

En *initial mass function* (IMF) er en funktion, der beskriver massefordelingen blandt stjerner, i en population af stjerner. Massen af en stjerne er taget som den aktuelle masse, når stjernen rammer hovedserien. Funktioner af denne type er empirisk udledt, og er oftest givet som en *sandsynligheds-tæthed* (PDF). Der findes flere forskellige typer af IMF, og de fleste af dem forudsiger ca. samme mængde stjerner med masser større end solens ($M \geq M_{\odot}$). Den store forskel ligger ofte i mængden af små stjerner ($M \leq M_{\odot}$).

Det interessante ved en IMF er, at massefordelingen af stjerner ser ud til at være tæt på den sammen for vidt forskellige populationer af stjerner. Der er små variationer, når det kommer til hvilket miljø, der er omkring en given population, men i det store hele giver en IMF et godt estimat for massefordelingen (Chabrier 2003).

En IMF anvendes blandt andet inde for *stellar population synthesis* (SPS) til at modellere spektraet for en galakse.

I projektet her antages der en Chabrier IMF, der følger en log-normalfordeling for lave masser ($M \leq M_{\odot}$) og en power law for høje ($M \geq M_{\odot}$). En Chabrier IMF skelner også mellem enkelte stjerner og systemer af flere stjerner, og tildeler disse forskellig vægtning. Sammenlignet med mange andre IMF, så ligger den i den lave ende, når det kommer til at estimere dannelsen af lav-masse stjerner (Chabrier 2003).

3.5 Stellar Population Synthesis

Stellar population synthesis (SPS) er en model til at forudsige den spektrale udvikling i en population af stjerner. Idéen bag SPS er at benytte eksisterende samlinger af stjernespektre og en model for den tidsafhængige spektrale udvikling af stjernepopulationer til at repræsentere den samlede udvikling af et galaksespektrum. De eksisterende samlinger af stjernespektre dækker over alle spektralklasser i forskellige aldre og ved forskellige metalliciteter.

Til stjernepopulationers spektrale udvikling benyttes der såkaldte *simple stellar populations* (SSP), hvor alle stjernerne antages at blive dannet øjeblikkeligt og med samme metallicitet. Den tidsafhængige udvikling af en SSPs SED kan derfor fastlægges ved at

antage en tidsafhængig SFR og metalberigelsesrate samt en IMF, der antages uafhængig af tiden (Bruzual and Charlot 2003). Ved at lave forskellige antagelser af de nævnte størrelser, får man således en lang række SED-skabeloner, som man kan fitte efter. På figuren nedenfor ses eksempler på en række SSP.

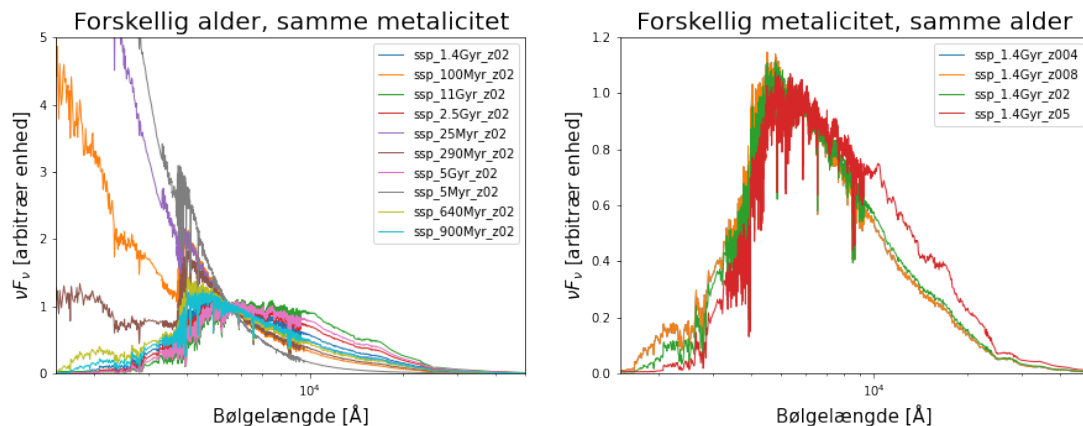


Figure 1: SED for forskellige SSP. Til venstre ses variationen med alderen, mens metaliciteten holdes konstant. Til højre ses variationen med ændring i metaliciteten for en konstant alder.

3.6 Stjernedannelsesrate

Stjernedannelses raten (SFR) i en galakse er et udtryk for, hvor mange nye stjerner der, på et givent tidspunkt, dannes i en population af stjerner (Carroll and Ostlie 2007). SFR angives som $[M_{\odot}/yr]$, og kan udregnes på flere forskellige måder. Ved SED-fitting kan SFR aflæses direkte, når LePhare har fundet et 'best fit', da det er indeholdt i de SED-skabeloner, som LePhare benytter.

I en anden metode benyttes linjefluxen fra smalbåndet, hvor SFR kan bestemmes ud fra styrken af emissionslinjerne på følgende måde:

$$SFR(M_{\odot}yr^{-1}) = 7.9 \times 10^{-42} L(H\alpha) (ergss^{-1}Hz^{-1}) \quad (3.6.1)$$

For $H\alpha$ og

$$SFR(M_{\odot}yr^{-1}) = (1.4 \pm 0.4) \times 10^{-41} L[OII] (ergss^{-1}Hz^{-1}) \quad (3.6.2)$$

for [OII] linjerne (Kennicutt 1998). For at udregne luminositeterne, $L(H\alpha)$ og $L[OII]$, skal linjefluxen for emissionslinjerne bestemmes. Linjefluxen kan, for objekter observeret i NB118, bestemmes ved

$$\bar{F}_{line} = \frac{(\bar{F}_J - \bar{F}_Y) - \left(\frac{\alpha_J - \alpha_Y}{\alpha_{NB118} - \alpha_Y} \right) (\bar{F}_{NB118} - \bar{F}_Y)}{\beta_{NB118} \left(\frac{\alpha_Y - \alpha_J}{\alpha_{NB118} - \alpha_Y} \right) + \beta_J}, \quad (3.6.3)$$

hvor $\bar{F}$ er den gennemsnitlige, observerede flux og α og β er defineret som

$$\alpha_{filt} \equiv \frac{\int \lambda^2 T_{filt}(\lambda) d\lambda}{\int \lambda T_{filt}(\lambda) d\lambda} \quad , \quad \beta_{filt} \equiv \frac{\lambda_{line} T_{filt}(\lambda = \lambda_{line}) d\lambda}{\int \lambda T_{filt}(\lambda) d\lambda} ,$$

hvor λ_{line} er bølglængden for den emissionslinje, der ses en smalbandet (Vilella-Rojo *et al.* 2015). En udledning af (3.6.3) kan findes i Appendiks A.

Datakataloget som der arbejdes med i projektet, angiver observationer i AB magnituder. Det er derfor nødvendigt at omregne til flux, før (3.6.2) kan benyttes. Forholdet mellem AB magnitide og flux er

$$m_{AB} = -2.5 \log_{10} f_\nu - 48.60. \quad (3.6.4)$$

Eftersom at de observerede objekter er kraftigt rødforskudte, er forholdet mellem observeret flux og luminositet givet ved:

$$f = \frac{L}{4\pi d_L^2} \quad (3.6.5)$$

hvor $d_L = d_p(t_0)(1+z)$ er luminositets-afstanden. Størrelsen $d_p(t_0)$ kaldes for *proper distance*, og den er bestemt ved:

$$d_p(t_0) \approx \frac{c}{H_0} \left[1 - \frac{1+q_0}{2} z \right], \quad (3.6.6)$$

hvor $q_0 = \Omega_{r,0} + \frac{1}{2}\Omega_{m,0} - \Omega_{\Lambda,0}$ (Ryden 2003). Den antagede kosmologi i projektet her er $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_{m,0} = 0.3$ og $\Omega_{\Lambda,0} = 0.7$, da det er den samme som benyttes i (Laigle *et al.* 2016) til udarbejdning af COSMOS2015-kataloget.

3.7 Fotometrisk Rødforskydning

Fotometrisk rødforskydning er brugen af fotometri til bestemmelse af rødforskydning for diverse astronomiske objekter. Følgende forklaring er foretaget ud fra, hvordan LePhare udregner fotometriske rødforskydninger. Beskrivelsen er lavet på baggrund af LePhares dokumentation.

Til at starte med måles fluxen fra et objekt i forskellige filtre sådan, at der for hvert objekt er et antal datapunkter svarende til antallet af benyttede filtre. Efterfølgende sammenlignes målingerne med en række SED-skabeloner, der er opnået enten empirisk eller vha. SPS. Sammenligningen sker ved en standard χ^2 -fitting.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_f} \left[\frac{F_{obs,i} - sF_{temp,i}}{\sigma_{obs,i}} \right]^2 \quad (3.7.1)$$

Hvor $F_{obs,i}$ er den observerede flux i filter i , $\sigma_{obs,i}$ er den tilhørende usikkerhed og $F_{temp,i}$

er fluxen fra skabelonen i samme filter. N_f er antallet af filtre, der er benyttet, mens s er en normaliseringskonstant, der forsøger at normalisere $F_{temp,i}$ til $F_{obs,i}$. Normaliseringskonstanten, s , er som de andre variable størrelse bestemt ved at optimere χ^2 -værdien ($\delta\chi^2/\delta s = 0$).

$$s = \sum_{i=1} \left[\frac{F_{obs,i} F_{temp,i}}{\sigma_{obs,i}^2} \right] / \sum_{j=1} \left[\frac{F_{temp,j}^2}{\sigma_{obs,j}^2} \right] \quad (3.7.2)$$

Hvor j er antallet af filtre benyttet til skaleringen, som kan være forskellig fra i ($j \leq i$). Til slut kan den fotometriske rødforskydning bestemmes ud fra den model, der gav den laveste χ^2 -værdi.

Brug af fotometri til bestemmelse af rødforskydning er ikke så nøjagtig som f.eks. spektroskopi. Styrken ved fotometri ligger i, at metoden kan benyttes på svagt lyssende objekter, for hvilke spektroskopi ikke er en mulighed. Således har fotometrisk rødforskydning stor anvendelsesmulighed ved højere rødforskydninger ($z > 1$), hvor der findes mange lyssvage objekter.

3.8 LePhare

LePhare er en samling af kode skrevet i Fortran, der kan benyttes til at udregne fotometrisk rødforskydning, SFR, m.m. Hele afsnittet omhandlende *LePhare* er beskrevet på baggrund af *LePhares* egen dokumentation. Programmet i *LePhare*, der udregner de fotometriske rødforskydninger, hedder *zphota*. Før *zphota* kan køres, skal brugeren specificere hvilket inputkatalog der arbejdes ud fra, hvilke filtre der benyttes og meget mere. Alt dette gøres i konfigurationsfilen, 'zphot.para'. En kopi af den konfigurationsfil, der er benyttet her i projektet, kan findes i bilag. Måden programmet udregner fotometrisk rødforskydning, er beskrevet i sektionen om fotometrisk rødforskydning. Hvilke SED-skabeloner programmet benytter er specificeret i konfigurationsfilen.

3.8.1 Filtre

Filterne, der bruges, kommer i form af tekstfiler med to kolonner, der indeholder bølgelængder og tilhørende transmission, angivet som et tal mellem 0 og 1. En oversigt over de benyttede filtre kan ses i figur 2.

3.8.2 SED-skabeloner

Skabelonerne i sig selv er nogle SED, der er baseret på en IMF, en SFR, en tidsskala, en alder, en metalitet, en interstellar rødfarvningsfaktor (E_{B-V}), en udslukningslov og nogle antagelser om kosmologien. Metoden til at udforme skabelonerne (SPS) er beskrevet mere detaljeret i tidligere afsnit.

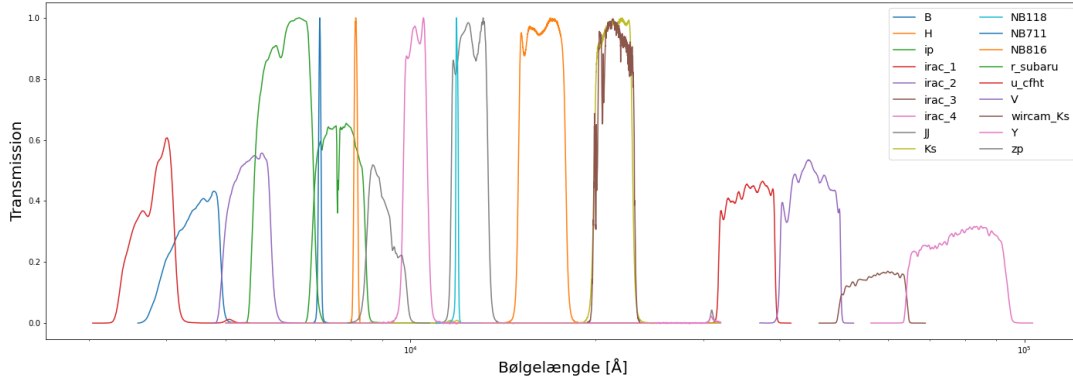


Figure 2: Transmissionskurver for de 20 fotometrisk filtre benyttet af LePhare.

3.8.3 LePhare output

LePhare har en lang liste af mulige ting, den kan udregne for dig. I dette projekt er LePhare benyttet til at bestemme rødforskydning, masse, SFR og deres tilhørende konfidensintervaller. Nærmere beskrivelse af output-filen og hvilke størrelser den indeholde, kan findes i sektionen om databehandling.

4 Databehandling og resultater

4.1 Katalogsammensætning

Første skridt i projektet var at samle et datakatalog, som efterfølgende arbejde kunne bygges på. Fra Cosmos2015-kataloget blev der udvalgt data fra i alt 20 forskellige bånd. Inklusiv de tilhørende usikkerheder, og med en enkelt kolonne af indeks, indeholder det færdige katalog således 41 kolonner. Dataet fra Y, J, H, K_s og NB118 båndene, herunder deres tilhørende usikkerheder, blev erstattet af data fra UltraVISTA dr4. Opgaven lå derfor i at finde objekter, der eksisterede i begge datasæt.

For både Cosmos2015 og UltraVISTA dr4 var objekternes koordinater givet i (RA,DEC), men værdierne var ikke nødvendigvis de eksakt samme i begge sæt. Dette resulterede i, at listerne med koordinater ikke kunne sammenlignes direkte. For at komme dette problem til livs, blev det antaget, at to objekter fra hvert sit datasæt, hvis afstand er mindre end 1", er det samme objekt. Disse afstande blev udregnes vha. et simpelt script, der udregner afstande fra hvert enkelt objekt i det ene datasæt, til alle andre objekter i det andet datasæt. Med denne metode blev der fundet 426886 objekter, der var indeholdt i begge datasæt. Al data fra disse objekter blev udvalgt, for at danne det endelige katalog, der benyttes fremadrettet i projektet. Når der fremadrettet refereres til 'Kataloget', er der således tale om dette sammensatte datakatalog.

4.2 Udvalgelse af objekter med NB118 excess

Med kataloget i hånden kunne den egentlige forarbejdning af dataet sættes i gang. Første skridt var at udvælge de objekter, der havde en særlig stor flux i NB118, hvilket blev gjort ud fra kriterierne fremstillet i teoriafsnittet. Foruden de nævnte kriterier, blev alle objekter detekteret ved $mag \leq 18$ i Y, J og NB118 frasorteret. Dette blev gjort for at undgå at medregne klare objekter, der umuligt kunne være galakser ved rødforskydning ($z \sim 1$) eller højere. Der blev i alt fundet 4109 objekter, der opfyldte de nævnte kriterier, ud af de 111952 objekter, der blev detekteret ved $mag \leq 18$.

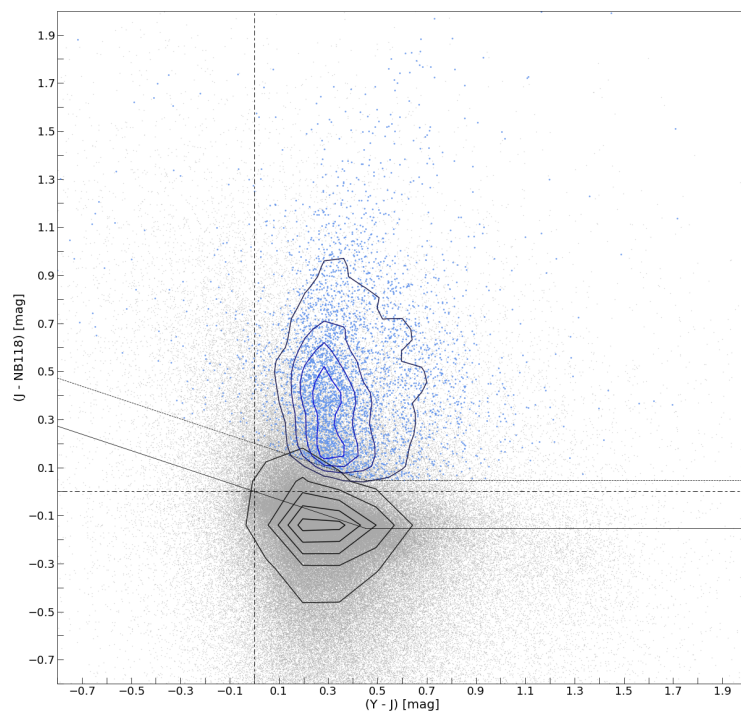


Figure 3: $(J-NB118)$ vs. $(Y-J)$. Blå prikker er objekter med smalbånds excess, mens de grå prikker er dem uden. Niveaukurverne indikerer tætheden af objekter med hhv. smalbånds excess (blå) og uden smalbånds excess (sort). Den stiplede sorte linje, der laver et knæk $(Y-J)=0.45$ er et af udvælgelseskriterierne, hvorfor der ikke findes nogle blå prikker under den.

Teorien var, at de fleste af de udvalgte objekter nu var galakser med kraftige emissionslinjer. Særligt $H\alpha$ og $[OII]$ linjerne ville være at forvente at se, men også $H\beta$ og

O[III], der normalt ses i stjernedannende områder.

For at finde frem til hvilke galakser, der har de ovenfor nævnte emissionslinjer, må deres rødforskydninger først bestemmes.

4.3 Bestemmelse af rødforskydning

For at finde rødforskydningerne af objekterne, blev LePhare kørt med kataloget som input. Som tidligere nævnt indeholder kataloget data fra 20 forskellige bånd, hvilket kommer os til gode her. Selv om der næsten udelukkende benyttes data fra Y, J og NB118 på viste plot i rapporten, så hjælper et stort antal datapunkter til en mere præcis bestemmelse af den fotometriske rødforskydning.

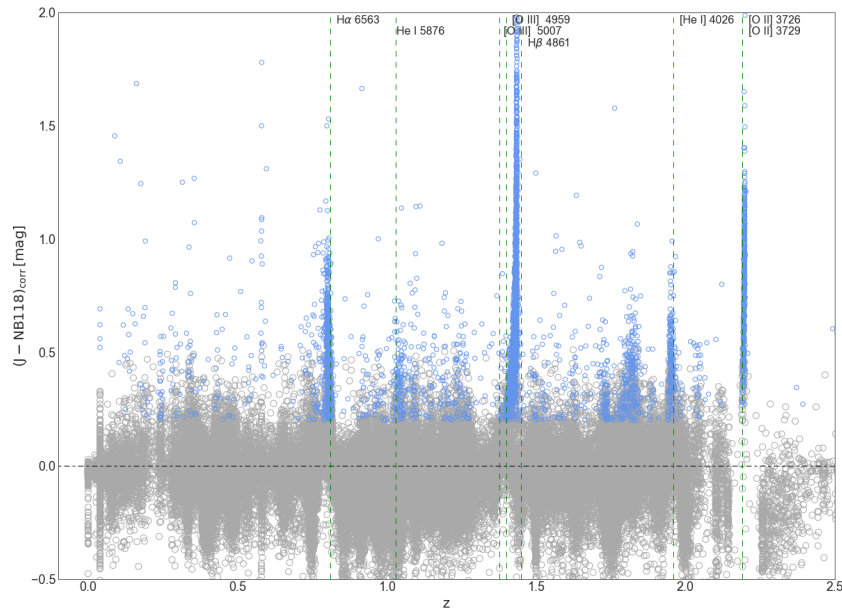


Figure 4: $(J - NB118)_{corr}$ vs. z . Blå cirkler er objekter med smalbands excess, mens de grå er dem uden. De vertikale, grønne og stiplede linjer indikerer en række kendte emissionslinjer, der er blevet rødforskydet. Teksten ved hver linje angiver navn samt hvilebølgelængde.

På figur 4 ses det klart, at en stor del af objekterne ligger ved rødforskydninger svarende til $H\alpha$ ($z \approx 0.8$), $H\beta/O[III]$ ($z \approx 1.4$) og $O[III]$ ($z \approx 2.2$). Eftersom objekterne allerede er udvalgt på baggrund af en høj $(J - NB118)_{corr}$ -værdi, er der altså stærk evidens for emissionslinjer. Det kan derfor forventes, at udvalgte galakser ved disse

rødforskydninger har aktiv stjernedannelse.

For at køre LePhare blev der som input, foruden kataloget, givet 20 fotometriske filtre som set i figur 2 og 27 SED-skabeloner. SED-skabelonerne dækker over tre forskellige metaliciteter, hver til 9 forskellige aldre. I princippet kunne der benyttes et vilkårligt højt antal skabeloner, gerne baseret på forskellige IMF, for at øge præcisionen, men desværre bliver computerkraft en begrænsende faktor.

Med de netop beskrevne indstillinger tog det omkring 30 timer at køre LePhare, og der må forventes en lineær udvikling i tid med et øget antal modeller. Flere specifikationer omkring input i LePhare kan findes i konfigurationsfilen, som findes i bilag.

De output, der har interesse for projektet, er rødforskydning, masse (stjernemasse) og SFR. I output-filen er masse givet i enhede $\log(M_\odot)$, mens SFR er givet i $\log(M_\odot y^{-1})$.

Med data fra LePhare i hånden, kunne der nu dannes et overblik over de bestemte rødforskydninger.

4.4 SFR baseret på SED-fitting

Fokus rettes nu på objekter, der forventes at have stærke $H\alpha$ og [OII] emissionslinjer. Mere konkret på de objekter, der allerede opfylder kriterierne for NB118 excess, og på samme tid har en fotometrisk rødforskydning på $z \in [0.793, 0.834]$ ($H\alpha$) og $z \in [2.165, 2.224]$ ([OII]). Intervalbredden er lavere på baggrund af (Milvang-Jensen *et al.* 2013).

Det fremgår af figur 5, at SFR i galakser med smalbånds excess er proportionalt stigende med massen, mens det omvendte er tilfældet i de resterende galakser. Den første del stemmer godt overens med forventningerne, men det virker mystisk, at det omvendte skulle være tilfældet i de resterende galakser, såfremt de har aktiv stjernedannelse.

Det er muligt, at en del af objekterne uden smalbånds excess ikke længere har stjernedannelse. Dette gør sammenligning med objekter, der har smalbånds excess, upassende, da alle disse objekter forventes at have stjernedannelse. I et forsøg på at komme dette problem til livs, ses det, om der kan observeres grupperinger af objekter uden smalbånds excess i et SFR vs. masse plot.

Galakser uden stjernedannelse ønskes altså ikke medregnet i sammenligningen af $SFR(M)$, mellem galakser med og uden smalbånds excess. Som det fremgår af figur 6 kan der for objekter uden smalbånds excess ses klare opdelinger, når det kommer til deres placering i et SFR vs. masse diagram. Det antages derfor, at galakser placeret under den sorte linje ikke længere har stjernedannelse, og de undlades herefter i sammenligningen.

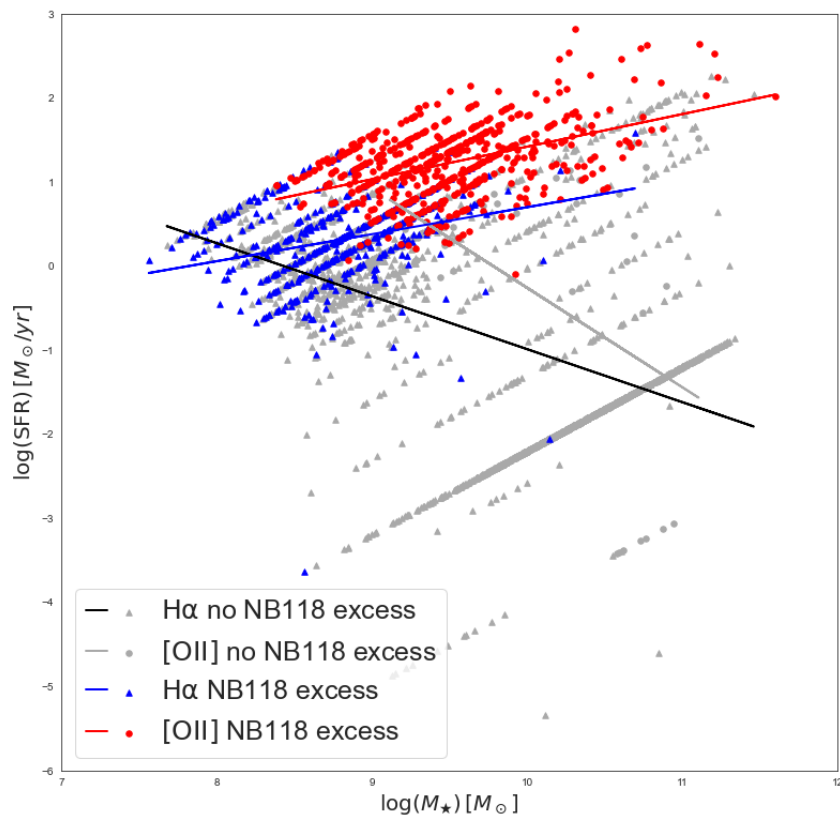


Figure 5: SFR vs. Mass. Trekkanter og cirkler er objekter ved en rødforskydning svarende til hhv. H α og [OII]. De farvede (rød og blå) er objekter med smalbånds excess, mens de grå er de resterende objekter. Linjerne i blå, rød, sort og grå er et lineært fit for SFR som funktion af massen for hhv. H α (excess), [OII] (excess), H α (ingen excess) og [OII] (ingen excess).

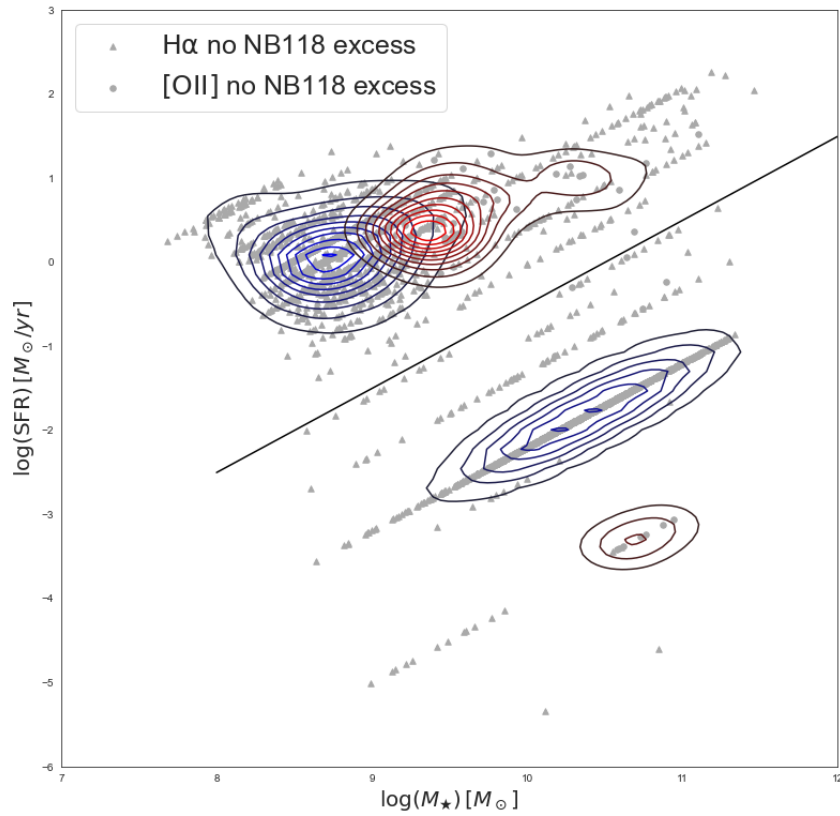


Figure 6: SFR vs. Mass. Trekkanter og cirkler er objekter ved en rødforskydning svarende til hhv. H α og [OII], alle uden smalbands excess. Niveaukurver indikerer tæthede af objekter med rødforskydninger svarende til H α (blå) og [OII] (rød). Den sorte linje er placeret mellem grupperingerne, i et område med lav objektæthed.

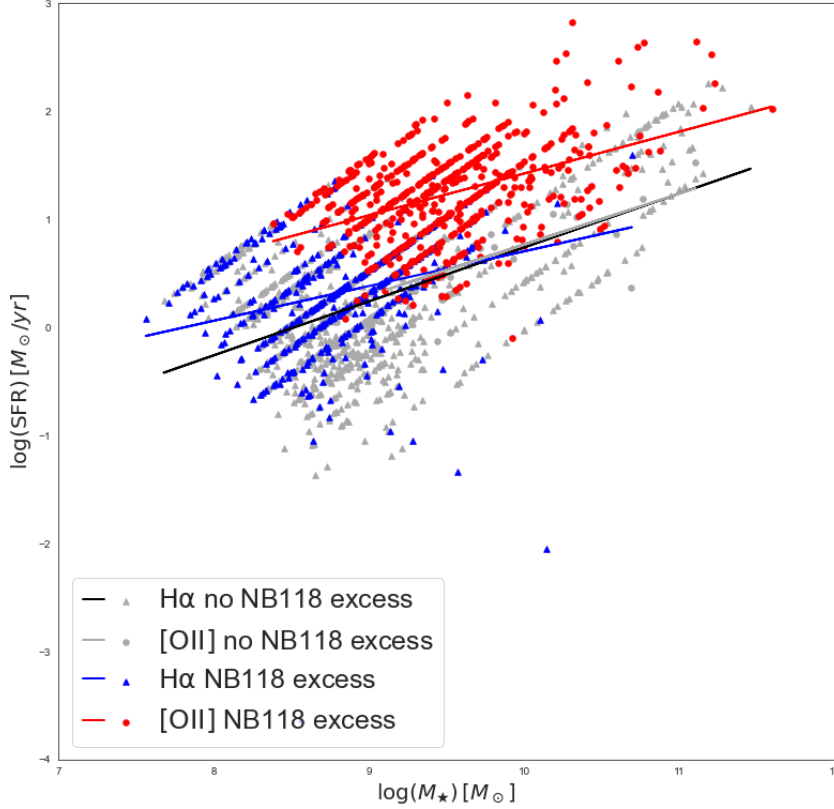


Figure 7: SFR vs. Mass. Trekkanter og cirkler er objekter ved en rødforskydning svarende til hhv. $H\alpha$ og $[OII]$. De farvede (rød og blå) er objekter med smalbånds excess, mens de grå er de resterende objekter. Linjerne i blå, rød, sort og grå er et lineært fit for SFR som funktion af massen for hhv. $H\alpha$ (excess), $[OII]$ (excess), $H\alpha$ (ingen excess) og $[OII]$ (ingen excess).

Figur 7 viser os nu, at når de galsker, der antages ikke at have stjernedannelse, er ekskluderet, finder vi en lignende sammenhæng mellem SFR og masse for alle objekter.

4.5 SFR baseret på linjeflux

En anden model benyttes nu til at udregne SFR for de udvalgte galakser. For galakser med $H\alpha$ og $[OII]$ emissionslinjer kan SFR udregnes ved hhv. (3.6.1) og (3.6.2). Før dette er muligt, skal luminositeten for objektet, ved den tilsvarende bølgelængde, bestemmes. Dette gøres ved først at omregne vores fotometrisk data i Y-, J- og NB118-båndene fra

de givne AB magnitude til en observerede flux vha. (3.6.4).

Når den observerede flux for de fotometrisk bånd er beregnet, kan linjeffluxen findes. Dette blev gjort ved 3.6.3, hvor den observerede flux i de tre bånd blev benyttet sammen med de tilhørende transmissionskurver.

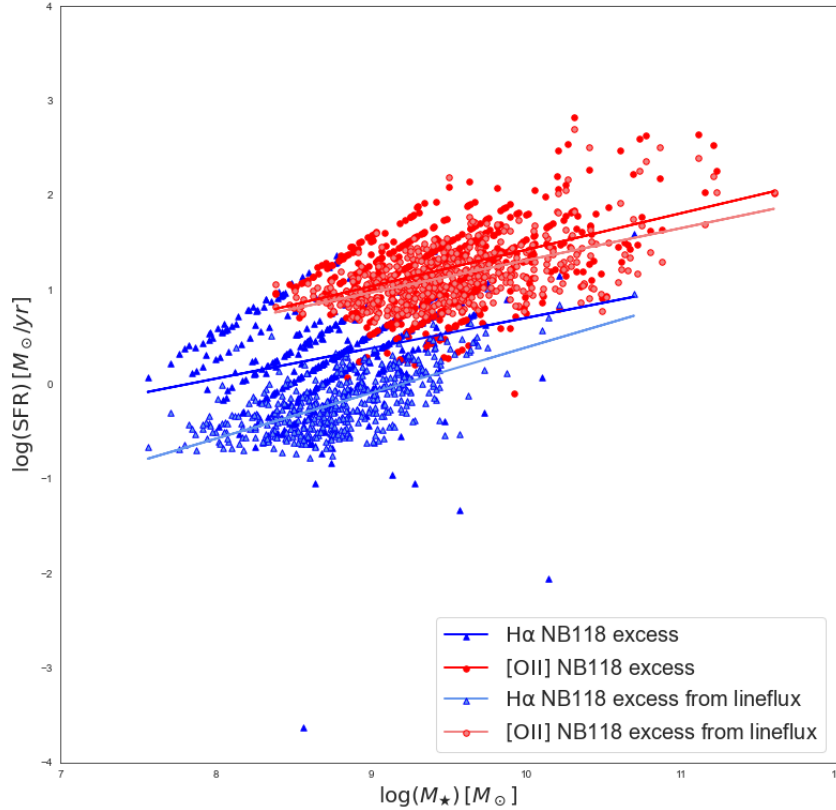


Figure 8: SFR vs. Mass. Trekanten og cirkler er objekter ved en rødforskydning svarende til hhv. $H\alpha$ og $[OII]$. Blå og røde objekter er fundet ved SED-fitting, mens lyseblå og lyserøde er bestemt ud fra linjefflux. De rette linjer er lineære fits i samme farve som de tilhørende punkter

For at linjeffluxen kan omregnes til en luminositet, skal luminositetsafstanden bestemmes. Dette gøres ved først at udregne proper distance givet ved (3.6.6), og bagefter benytte forholdet mellem proper distance og rødforskydning, $d_L = d_p(t_0)(1 + z)$. Udregningen kræver således, at man kender rødforskydning og kosmologien. Den anvendte kosmologi til udregningen er følgende: $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_{m,0} = 0.3$ og $\Omega_{\Lambda,0}$. Som

SFR og SSFR for objekter med H α -emission					
Stjernemasse		Model: SED-fitting		Model: Lineflux	
Masse-interval	Interval-centrum	$\log(SFR)$ [$M_{\odot}y^{-1}$]	$\log(sSFR)$ [yr^{-1}]	$\log(SFR)$ [$M_{\odot}y^{-1}$]	$\log(sSFR)$ [yr^{-1}]
$\log(M_{\star})[M_{\odot}]$	$\log(M_{\star})[M_{\odot}]$				
[7.5;8[	7.75	0.31	-7.54	-0.5	-8.37
[8;8.5[	8.25	0.19	-7.89	-0.37	-8.61
[8.5;9[	8.75	0.22	-8.33	-0.27	-8.96
[9;9.5[	9.25	0.52	-8.59	0.00	-9.14
[9.5;10[	9.75	0.71	-8.78	0.36	-9.22
[10;10.5[	10.25	-0.28*	-9.45*	0.71	-9.43
[10.5;11[	10.75	1.59	-9.10	0.96	-9.74
[11;11.5[	11.25	-	-	-	-
[11.5;12[	11.75	-	-	-	-

Table 1: SFR og SSFR over masse-interval for objekter med H α -emission. For begge størrelser er der angivet en værdi fundet ved hhv. SED-fitting og ved linjeflux. SFR er udregnet som et gns. for alle objekter i passende masse-interval, mens SSFR er taget den gennemsnitlige SFR over den gennemsnitlige masse for intervallet

rødforskydning benyttes de udregnede rødforskydninger fundet i LePhare.

Når alt dette er gjort, kan luminositeten endelig bestemmes fra forholdet mellem flux, luminositetsafstand og luminositet beskrevet i (3.6.5).

Figure 8 viser SFR bestemt ved linjeflux, overplottet på dem bestemt ved SED-fitting. For begge rødforskydninger er de en smule lavere.

4.6 Sammenligning af resultater

(Whitaker *et al.* 2014) finder $\log(SFR)$ på mellem -0.60 ± 0.5 og 1.27 ± 0.10 for $(8.7 \leq \log(M_{\star}) \leq 11.1)$ ved rødforskydning ($0.5 < z < 1$) og $\log(SFR)$ på mellem 0.82 ± 0.06 og 2.39 ± 0.17 for $(9.3 \leq \log(M_{\star}) \leq 11.5)$ ved rødforskydning ($2 < z < 2.5$). I denne undersøgelse benyttes samme kosmologi og IMF, som i projektet her. Ydermere er der gjort brug af SED-fitting til bestemmelse af $M_{\star}$, mens SFR findes på baggrund af UV og NIR luminositeter udregnet fra den fotometriske data - en metode meget lig den for linjeflux benyttet heri.

Den mest passende sammenligning med projektet her vil derfor være med SFR bestemt ved linjeflux. I tabel 1 og 2 findes resultater for projektet her. SFR fundet ved linjeflux afviger maksimalt 0.2 dex, mens SFR fundet ved SED-fitting afviger med op til 0.4 i forhold til (Whitaker *et al.* 2014). Der kan forventes visse afvigelser, eftersom værdierne fra (Whitaker *et al.* 2014) er udregnet over rødforskydnings-intervaller af 0.5, mens der i projektet her benyttes data fra mere specifikke rødforskydninger. Ved lave masser overskyder modellen med SED-fitting op imod 0.4 dex ved ($z \sim 0.8$) og omkring

SFR og sSFR for objekter med [OII]-emission					
Stjernemasse		Model: SED-fitting		Model: Lineflux	
Masse-interval	Interval-centrum	$\log(SFR)$ [$M_{\odot}y^{-1}$]	$\log(sSFR)$ [yr^{-1}]	$\log(SFR)$ [$M_{\odot}y^{-1}$]	$\log(sSFR)$ [yr^{-1}]
$\log(M_{\star})[M_{\odot}]$	$\log(M_{\star})[M_{\odot}]$				
[7.5;8[	7.75	-	-	-	-
[8;8.5[	8.25	1.00	-7.42	0.91	-7.49
[8.5;9[	8.75	1.06	-7.70	0.94	-7.88
[9;9.5[	9.25	1.10	-8.04	1.05	-8.19
[9.5;10[	9.75	1.29	-8.30	1.21	-8.44
[10;10.5[	10.25	1.54	-8.45	1.37	-8.63
[10.5;11[	10.75	1.79	-8.64	1.56	-8.86
[11;11.5[	11.25	2.37	-8.75	2.08	-9.02
[11.5;12[	11.75	2.02	-9.57	2.03	-9.56

Table 2: SFR og SSFR over masse-interval for objekter med [OII]-emission. For begge størrelser er der angivet en værdi fundet ved hhv. SED-fitting og ved linjeflux. SFR er udregnet som et gns. for alle objekter i passende masse-interval, mens SSFR er taget den gennemsnitlige SFR over den gennemsnitlige masse for intervallet.

0.2 dex ved ($z \sim 2.2$). I intervallet $9.5 < \log(M_{\star}) < 11$ afviger SFR fundet ved linjeflux maksimalt med 0.2 dex, mens den for lave masser slet ikke afviger.

Helt generelt, så er findes der i projektet en højere SFR, når den bestemmes ved SED-fitting frem for linjeflux. En af grundene kan bl.a. være, at der i metoden med linjeflux ikke tager højde for bidraget fra støv, der kan udslukke eller rødfarve dele af emissionen. Ved SED-fitting er forskellige udslukninglove inkluderet, så der korrigeres for dette problem. Overordnet set giver SFR udrenget ved linjeflux den bedste overensstemmelse med (Whitaker *et al.* 2014). Det skal dog nævnes at alle udregnede SFR ligger i den høje ende i sammenligning.

En anden grund til afvigelserne kan ligge i, at (3.6.1) og (3.6.2) fra (Kennicutt 1998) er baseret på en Salpeter IMF. I forhold til en Chabrier, som er benyttet her i projektet, vil en Salpeter give et højere estimat for massen af en stjernepopulation. Korrektion for dette ville finde en lavere SFR, som givet vis ville passe bedre ind i sammenligningen, da vores værdier generelt er højere end dem der sammenlignes med.

En række undersøgelser, bl.a. (Whitaker *et al.* 2014) og (Ilbert *et al.* 2015) finder en masse-afhængig sammenhæng mellem rødforskydning og sSFR på følgende vis: $sSFR \propto (1+z)^b$, hvor b -værdierne strækker sig fra ned til 1.9 for ved lave masser og op til 3.5 for de tungeste objekter. En lignende sammenhæng har ikke været mulig at eftervise, hvilket skyldes de svingende sSFR-værdier. I projektet her arbejdes der også kun ud fra to forskellige rødforskydninger, hvilket også gør det umuligt at lave et egentlig fit på en model. Kastes der er blik på figur 9, så ses det dog klart, at sSFR er højere ved ($z \sim 2.2$)

end ved ($z \sim 0.8$)

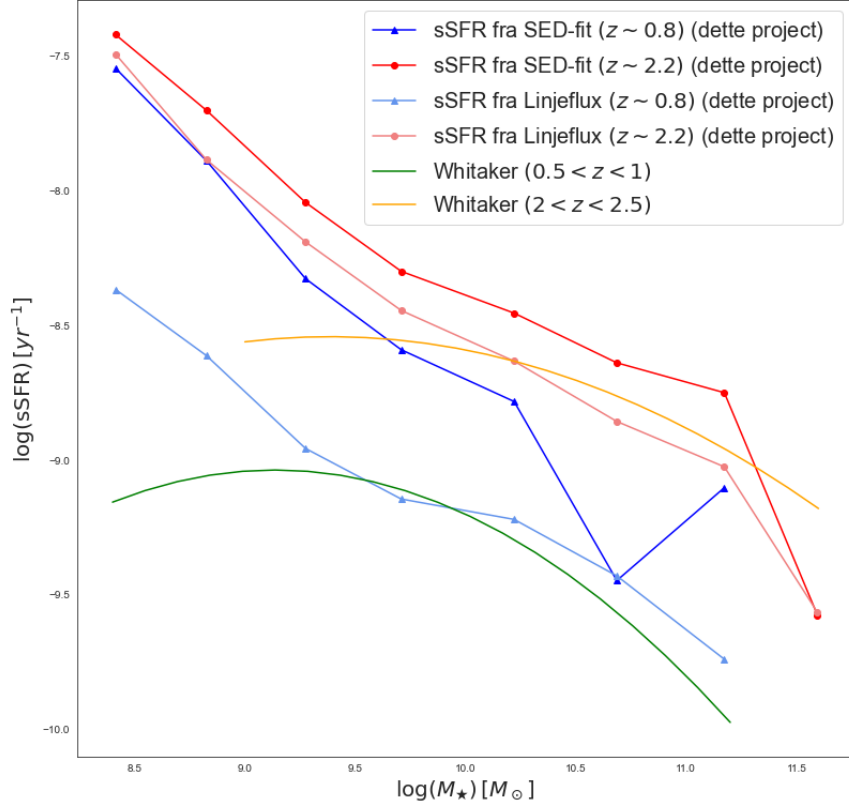


Figure 9: sSFR vs. Mass. sSFR udregnet ved SED-ftting og linjeflux for rødforskydnin ($z \sim 0.8$) (blå er lyseblå) og ($z \sim 2.2$) (rød og lyserød). De udregnede sSFR er plottet sammen med polynomiums-fit fra (Whitaker *et al.* 2014) for sSFR fra passende rødforskydnings-intervaller ($0.5 < z < 1$) (Grøn) og ($2 < z < 2.5$) (Orange)

5 Konklusion

Fra COSMOS2015-kataloget er der udvalgt 426886 objekter, for hvilke data i Y, J, H, K_s og NB118 båndene er blevet erstattet med lignede data fra det nyere UltraVISTA dr4. Ud af disse 426886 objekter blev der udvalgt 111952, på baggrund af en detektion ved $med \leq 18$ i Y, J og NB118 båndene. Blandt de udvalgte objekter blev der fundet 4109, som opfyldte udvælgelseskriterierne for at have smalbånds excess.

For objekter med smalbånds excess blev fotometrisk rødforskydninger, M_* og SFR bestemt ved SED-fitting. På baggrund af rødforskydningerne blev der set på objekter ved $z \sim 0.8$ og $z \sim 2.2$, svarende til hhv. H α - og [OII]-emission. Ved hjælp af de fundne rødforskydninger og M_* bestemmes en linjeflux for objekter omkring de nævnte rødforskydninger med smalbånds excess. Denne linjeflux blev benyttet til at udregne en alternativ SFR for objekterne.

Ved begge rødforskydninger giver SED-fitting et højere estimat for SFR end beregninger ved linjeflux. Generelt for begge metoder og rødforskydninger findes der en stigende SFR for stigende M_* . Ved SED-fitting findes der $\log(SFR) = 0.31 - 1.59$ ved ($z \sim 0.8$) og $\log(SFR) = 1.00 - 2.37$ ved ($z \sim 2.2$). For SFR bestemt ved linjeflux har vi $\log(SFR) = -0.5 - 0.96$ ved $z \sim 0.8$ og $\log(SFR) = 0.91 - 2.08$ ved $z \sim 2.2$.

Sammenlignet med (Whitaker *et al.* 2014) så overestimeres SFR bestemt ved SED-fitting en smule over næsten hele masse-intervallet og for begge rødforskydninger. For SFR bestemt ved linjeflux opnås et resultat, der for lave masser stemmer overens med (Whitaker *et al.* 2014), og ved de højere masser har afvigelse på maksimalt 0.2. Dette er gældende ved begge rødforskydninger, SFR bestemt ved SED-fitting overestimerer SFR med op imod 0.4 dex ved rødforskydning $z \sim 0.8$ ved lave masser. Dette er et signifikant overestimat, når usikkerheden på 0.5 dex fra (Whitaker *et al.* 2014 ved denne masse tages i betragtning.

En sammenhæng $sSFR \propto (1+z)^{1.9-3.5}$, som er fundet i (Whitaker *et al.* 2014) og (Ilbert *et al.* 2015) kunne ikke eftervises. Det kunne konkluderes at sSFR er stigende med rødforskydningen, men nærmere forhold kunne ikke bestemmes.

References

1. G. Bruzual, S. Charlot, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **344**, 1000–1028, ISSN: 1365-2966, (<http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06897.x>) (Oct. 2003).
2. B. W. Carroll, D. A. Ostlie, *An Introduction to Modern Astrophysics*, ed. by S. F. P. Addison-Wesley (2nd (International), 2007).
3. G. Chabrier, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **115**, 763–795, ISSN: 1538-3873, (<http://dx.doi.org/10.1086/376392>) (July 2003).
4. O. Ilbert *et al.*, *Evolution of the specific Star Formation Rate Function at $z \sim 1.4$ - Dissecting the mass-SFR plane in COSMOS and GOODS*, 2015, arXiv: 1410.4875 [astro-ph.GA].
5. R. C. Kennicutt, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **36**, 189–231, ISSN: 1545-4282, (<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.astro.36.1.189>) (Sept. 1998).
6. C. Laigle *et al.*, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **224**, 24, ISSN: 1538-4365, (<http://dx.doi.org/10.3847/0067-0049/224/2/24>) (June 2016).
7. B. Milvang-Jensen *et al.*, *Astronomy Astrophysics* **560**, A94, ISSN: 1432-0746, (<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201321814>) (Dec. 2013).
8. B. Ryden, *Introduction to cosmology*.
9. L. S. Sparke, I. Gallagher John S., *Galaxies in the Universe: An Introduction*.
10. G. Vilella-Rojo *et al.*, *Astronomy Astrophysics* **580**, A47, ISSN: 1432-0746, (<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201526374>) (July 2015).
11. K. E. Whitaker *et al.*, *The Astrophysical Journal* **795**, 104, ISSN: 1538-4357, (<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/795/2/104>) (Oct. 2014).

A Metode til bestemmelse af linjeflux

Dette appendiks rummer udledningen af 3.6.3. Den gennemsnitlige, integrerede flux over et filter, x , kan udregnes som

$$\bar{F}_x = \frac{\int F_\lambda T_x(\lambda) d\lambda}{\int T_x(\lambda) d\lambda} \quad (\text{A.0.1})$$

hvor T_x er transmissionskurven for filter x .

I J-filteret er der bidrag fra linjefluxen, F_{line} , og fra kontinuumet, $F_{J,kont}$. Det samme gør sig gældende for NB118, hvor vi har F_{line} , og $F_{NB118,kont}$. I Y-båndet er der ingen emissionslinje, så har er bidraget kun $F_{Y,kont}$. Kontinuumet approksimeres med en lineær funktion

$$F_{kont} = M\lambda + N \quad (\text{A.0.2})$$

Ud fra overstående kan den gennemsnitlige, integreret flux nu skrives som

$$\bar{F}_J = \frac{\int (M\lambda + N) T_J(\lambda) d\lambda}{\int T_J(\lambda) d\lambda} + \beta_J F_{line} = M\alpha_J + \beta_J F_{line} + N \quad (\text{A.0.3})$$

hvor

$$\alpha_x \equiv \frac{\int \lambda^2 T_x(\lambda) d\lambda}{\int \lambda T_x(\lambda) d\lambda} \quad , \quad \beta_x \equiv \frac{\lambda_{line} T_x(\lambda = \lambda_{line}) d\lambda}{\int \lambda T_x(\lambda) d\lambda} \quad (\text{A.0.4})$$

På samme måde for Y og NB118 finder vi

$$F_{NB118} = M\alpha_{NB118} + \beta_{NB118} F_{line} + N \quad (\text{A.0.5})$$

$$F_Y = M\alpha_Y + N \quad (\text{A.0.6})$$

Ud fra ligning (A.0.3), (A.0.5), og (A.0.6) kan et endeligt udtryk for F_{line} bestemmes til

$$\bar{F}_{line} = \frac{(\bar{F}_J - \bar{F}_Y) - \left(\frac{\alpha_J - \alpha_Y}{\alpha_{NB118} - \alpha_Y} \right) (\bar{F}_{NB118} - \bar{F}_Y)}{\beta_{NB118} \left(\frac{\alpha_Y - \alpha_J}{\alpha_{NB118} - \alpha_Y} \right) + \beta_J} \quad (\text{A.0.7})$$

B Liste over bilag

FilterPlot.ipynb - Python script, der indlæser transmissionskurver for benyttede filtre og plotter dem. Brugt til figur 2.

Katalogsammensætning.ipynb - Python script, der udvælger passenede objekter fra COSMOS2015 og UltraVISTA dr4, og sætter dem sammen til et katalog.

BAplots.ipynb - Længere pythn script, der indlæser sammensat datakatalog, LePhare output, mm. og laver alle figurer og plots foruden figur 2 i rapporten. Der er også nogle enkelte udregning til bl.a sSFR osv.

Datasammenligning.ipynb - Python script, der finder objekter indeholdt i både COSMOS2015 og UltraVISTA dr4. Derefter gemmer det de tilhørerne index i nogle filer til brug i 'Katalogsammensætning.ipynb'.

zphot.para - konfigurationsfil til at køre LePhare .

zphotoutput.para - konfigurationsfil af LePhare output.