



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Astronomia

Tesi di Laurea

Identificazione di galassie star-forming ad alto redshift
con la missione spaziale Euclid

Laureanda

Lucrezia Rossi

Relatore

Prof.ssa Giulia Rodighiero

Co-Relatore

Dr. Laura Bisigello

Anno Accademico 2022/2023

Abstract

La missione spaziale Euclid, che vedrà il lancio in orbita del suo telescopio spaziale a luglio 2023, porterà un enorme quantità di nuovi dati come mai si è visto prima. L'utilizzo di dati fotometrici con filtri a banda larga ci consentirà di osservare galassie ad alti *redshift* ($z > 4$) e andare a indagare l'Universo passato.

Lo studio che abbiamo condotto ha come obiettivo di proporre un metodo per identificare le galassie *star-forming* da quelle senza formazione stellare (passive) in base all'osservazione della riga dell' $H\alpha$. Per attuare la nostra indagine è stato utilizzato il simulatore Spritz creato dalla dottoressa Laura Bisigello. Grazie ad esso è stato possibile fare una predizione sulla distribuzione spaziale di varie tipologie di galassie sul campo che osserverà Euclid e in particolare simulare i flussi.

Da questi cataloghi simulati è stato creato un grafico *redshift*-colore (vedi Figura 3.3) che ci ha permesso di osservare un aumento del colore tra $4.42 < z < 5.86$, dovuto alla presenza della riga dell'idrogeno $H\alpha$, e questo *boost* è stato analizzato studiando la differenza di flusso alla lunghezza d'onda di $3.6 \mu\text{m}$ rispetto al continuo. I grafici che abbiamo ottenuto sono un'ipotesi teorica di quello che poi effettivamente si andrà ad osservare. L'obiettivo è quindi di creare un metodo per fare predizioni teoriche su quello che si osserverà in futuro e sarà possibile convalidare o scartare questo metodo una volta confrontati i nostri dati con quelli sperimentali di Euclid.

Indice

ABSTRACT	1
1 MISSIONE EUCLID	2
1.1 Overview	2
1.2 Caratteristiche della missione	3
1.2.1 Introduzione storico-scientifica	3
1.2.2 Sonde cosmologiche	6
1.2.3 Indagine del cielo	9
1.3 Navicella spaziale	10
1.3.1 Payload	10
1.3.2 Modulo di servizio	13
2 TECNICHE PER IDENTIFICARE GALASSIE DISTANTI	14
2.1 Osservazioni nell'ottico	14
2.1.1 Proprietà principali delle galassie Lyman-break	15
2.2 Osservazioni nel vicino infrarosso	15
2.2.1 Proprietà principali delle galassie nel vicino IR	16
2.2.2 Immagini a banda larga e a banda stretta	17
2.2.3 Spettroscopia integral-field e senza fenditura	18
3 SIMULAZIONI A BANDA LARGA	20
3.1 Indagini a $z \sim 4-5$ del campione SMUVS	20
3.2 Simulazione del cielo infrarosso con Spritz	22
3.3 Identificazione di galassie star-forming	24
4 CONCLUSIONI	27
5 BIBLIOGRAFIA	28

1

Missione Euclid

Il capitolo 1 ci introduce alla missione spaziale Euclid, fornendoci una conoscenza generale delle sue caratteristiche. In particolare la sezione 1.1 ci offre una panoramica generale sul come e perché nasce Euclid e quali sono i suoi obiettivi. Nella sezione 1.2, invece, andremo ad analizzare più in profondità la fisica su cui si basa e le varie operazioni che andrà a compiere. Infine la sezione 1.3 ci dà una visione tecnica di quelle che sono le sue componenti principali.

1.1 OVERVIEW

La missione spaziale Euclid nasce nel 2007 da due proposte inviate all'ESA *Cosmic Vision* 2015-2025 entrambe con l'obiettivo di studiare la materia e l'energia oscura: da un lato DUNE (*Dark UNiverse Explorer*) attraverso gli effetti del *lensing* gravitazionale, dall'altro SPACE (*SPectroscopic All sky Cosmic Explorer*) con l'analisi delle oscillazioni acustiche barioniche.

Il suo nome è stato scelto in onore del matematico e filosofo greco Euclide che fondò il soggetto della geometria, a cui è collegata proprio la densità della materia e dell'energia. Euclid avrà infatti come scopo la creazione di una mappa 3D dell'Universo osservando miliardi di galassie fino a 10 miliardi di anni luce, su un'area del cielo che copre più del 35% della sfera celeste ($14\,500\text{ deg}^2$). In questo modo verrà rivelato come si è espanso il cosmo e come si è formata la sua struttura nel corso della storia cosmica, cercando di dare risposta a due domande fondamentali:

- Quali sono le leggi fisiche fondamentali dell'Universo?
- Come ha avuto origine l'Universo e di cosa è fatto?

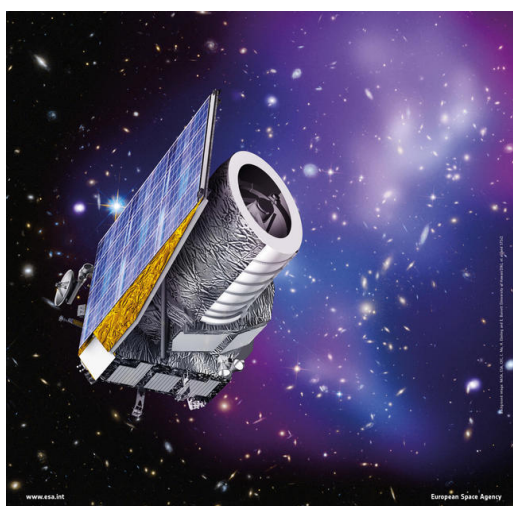


Figura 1.1: Riproduzione artistica del telescopio spaziale Euclid
(Fonte: <https://www.euclid-ec.org/>)

Euclid acquisirà immagini in luce ottica e nel vicino infrarosso e indagherà la relazione distanza-*redshift* e l'evoluzione delle strutture cosmiche misurando le forme e gli spostamenti verso il rosso di galassie e ammassi di galassie fino a *redshift* ≈ 2 .

Creerà un ampio archivio di dati unici con immagini quattro volte più nitide rispetto a quelle prese da terra. Gli scienziati potranno studiare le proprietà chimiche e cinematiche di molti oggetti, avvicinarsi

a scoprire la natura della materia e energia oscura e capire se la nostra comprensione della gravità è completa.

La costruzione della sonda è stata gestita dall'ESA che ha selezionato Thales Alenia Space per la costruzione del satellite e del modulo di servizio mentre Airbus Defence and Space per sviluppare il modulo *Payload* in cui è compreso il telescopio con uno specchio in carburo di silicio (SiC) di 1,2 m di diametro che alimenterà 2 strumenti, VIS (*Visible instrument*) e NISP (*Near Infrared Spectrometer and Photometer*), costruiti dall'Euclid Consortium (composto da oltre 2000 scienziati provenienti da 300 istituti in 13 paesi europei, Stati Uniti, Canada e Giappone). La NASA ha fornito i rilevatori nel vicino infrarosso dello strumento NISP.

Dopo diverse posticipazioni, il lancio della sonda avverrà a luglio del 2023 da un razzo Falcon 9 di SpaceX da Cape Canaveral, Florida, USA. La massa in orbita di Euclid sarà di 2 tonnellate (800 kg del *Payload*, un modulo di servizio da 850 kg, 40 kg di massa di bilanciamento e 210 kg di propellente) La durata nominale della missione è di sei anni, con possibilità di estensione (limitata dalla quantità di gas freddo utilizzato per la propulsione).

La missione spaziale Euclid pone l'Europa in una posizione di leadership per affrontare queste affascinanti questioni cosmologiche e poiché l'identità dell'energia oscura responsabile dell'accelerazione è del tutto misteriosa, le risposte di Euclid potrebbero rivoluzionare la fisica.

1.2 CARATTERISTICHE DELLA MISSIONE

1.2.1 INTRODUZIONE STORICO-SCIENTIFICA

La cosmologia è la scienza che studia la formazione, la struttura e l'evoluzione dell'Universo. Un contributo enorme al suo studio fu dato da Albert Einstein con la pubblicazione nel 1916 della teoria della relatività generale che ha fornito un quadro matematico della sua struttura.

Ad oggi è ampiamente accettato che l'Universo è costituito solo dal 4.9% di materia barionica mentre il restante 95.1% è costituito da una parte a noi ignota. Gli astronomi hanno chiamato il 26.8% di questa parte materia oscura, che aggiunge gravità al cosmo su grandi scale, e il 68.3% energia oscura, che provoca la sua espansione accelerata (vedi Figure 1.2).

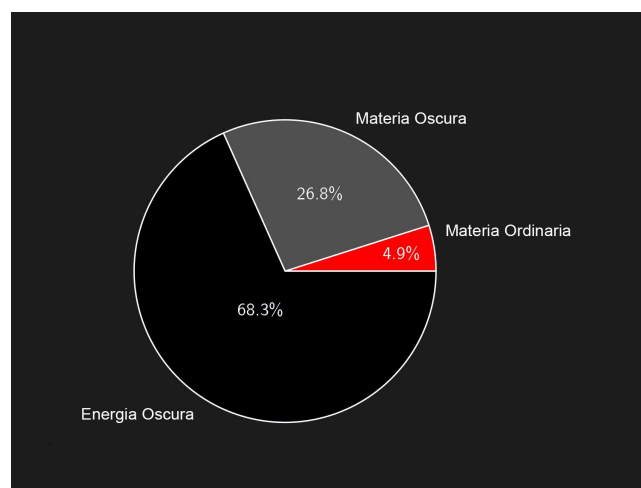


Figura 1.2: Distribuzione della materia e energia nell'Universo
(Fonte: <https://w3.infn.it/problema-della-materia-oscure/>)

Combinando il noto con l'ignoto, i cosmologi hanno creato un modello che descrive accuratamente la struttura dell'Universo: il modello Λ -CDM o Λ -CDM, dove la Λ è la costante cosmologica introdotta da Einstein e CDM sta per *Cold Dark Matter*, cioè materia oscura fredda (una parte di

materia oscura formata da particelle non relativistiche).

Per capire come nasce questo modello dobbiamo partire dal 1927 con l'analisi della relatività generale dell'astrofisico belga Georges Lemaître, il quale capì che lo spostamento verso il rosso della luce delle galassie era la prova dell'espansione dell'Universo e propose una relazione di proporzionalità tra il *redshift* e la velocità di recessione. Due anni dopo, l'astronomo americano Edwin Hubble confermò le sue teorie e creò la famosa espressione che oggi è nota come legge di Hubble-Lemaître: $z = H_0 D/c$. In particolare notiamo che lo spostamento verso il rosso o redshift è collegato alla distanza della galassia D attraverso la costante di Hubble H_0 e la velocità della luce c , come ci si aspetterebbe in un Universo in espansione.

In seguito, nel 1931, Lemaître utilizzò ulteriori analisi per proporre che l'Universo una volta esistesse in uno stato estremamente compatto; questa fu la genesi dell'idea che oggi chiamiamo teoria del Big Bang. La sua ipotesi fu poi confermata nel 1966 con la scoperta della radiazione cosmica di fondo a microonde (CMB), cioè un mare di radiazione a bassa energia che permea l'Universo. Più precisamente, fu il cosmologo sovietico-americano George Gamow a predire la sua esistenza e ha dimostrato che il Big Bang potrebbe spiegare la quantità di idrogeno, elio e litio presente nel nostro cosmo.

Tra il 2009 e il 2013, la missione Planck dell'ESA ha mappato la CMB con una precisione senza precedenti e le simulazioni basate sul modello Λ -CDM si sono adattate benissimo alle osservazioni. Grazie a questa missione abbiamo scoperto le percentuali (esposte in precedenza) delle componenti del nostro Universo e ora non resta che rispondere alla domanda: cos'è la materia oscura e l'energia oscura? La sonda Euclid andrà proprio a cercare la vera natura di queste due componenti e successivamente verrà lanciato in orbita dalla NASA il telescopio Nancy Grace Roman, nato come missione complementare, che andrà ad approfondire ulteriormente questa questione.

MATERIA OSCURA

La materia oscura la possiamo definire come una raccolta sconosciuta di particelle che non emette radiazione elettromagnetica ma è identificabile solo attraverso i suoi effetti gravitazionali.

Tutto ebbe inizio nel 1933, quando l'astronomo svizzero-americano Fritz Zwicky intraprese lo studio dell'ammasso della Chioma. Secondo le sue misure, le singole galassie si muovevano a velocità talmente elevate che l'ammasso sarebbe dovuto "evaporare" ma ciò non stava succedendo effettivamente. Per risolvere questa situazione paradossale, ipotizzò l'esistenza di una massa invisibile che esercitava solo attrazione gravitazionale ma non emetteva luce che chiamò "materia oscura". Nei quarant'anni successivi l'osservazione di Zwicky, gli astronomi non compirono alcun progresso sostanziale nello studio di questa anomalia.

Negli anni '70, l'astronoma americana Vera Rubin decise di studiare le curve di rotazione delle galassie a spirale. L'analisi teorica ipotizzava che, con l'allontanarsi dal centro della galassia, la velocità di rotazione della stessa diminuisse secondo l'andamento predetto dalle leggi di Newton. I dati osservativi, invece, dimostrarono che la velocità di rotazione nelle regioni esterne rimaneva pressoché costante come se la galassia fosse immersa in una più estesa componente oscura la cui densità di materia cresceva con il quadrato della distanza dal centro galattico (vedi Figura 1.3).

Nel 1974 l'astronomo canadese James Peebles condusse uno studio sulla massa delle galassie, stimandola in due modi: attraverso la materia visibile come le stelle e attraverso i loro movimenti. Si accorse che la prima misurazione era più piccola di un fattore dieci rispetto alla seconda, come se per ogni chilogrammo di materia visibile ce ne fossero dieci di materia invisibile.

Inizialmente si pensò che questa "materia oscura" fosse costituita da atomi di idrogeno ma ricerche più approfondite scartarono subito queste ipotesi affacciando gli astronomi a una "nuova fisica". Infatti già dalla fine degli anni '60 i fisici delle particelle discutevano sulla possibile esistenza di particelle sconosciute che non interagiscono con la luce, e quindi non osservabili dai telescopi, ma che producono gravità al fine di risolvere problemi che si erano presentati nei modelli teorici sulle particelle. Gli astronomi proposero che queste particelle potessero essere la materia oscura.

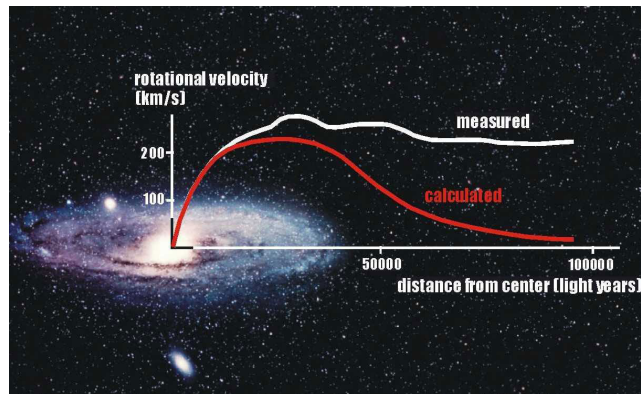


Figura 1.3: Grafico della velocità di rotazione delle galasse: la riga rossa mostra l'andamento teorico ipotizzato, quella bianca l'andamento effettivamente misurato

(Fonte: <https://w3.inf.infn.it/problema-della-materia-oscuro/>)

Il lancio nel 1989 del satellite COBE (*Cosmic Background Explorer*) della NASA ha portato prove più convincenti che la materia oscura fosse una caratteristica dell'Universo. Il suo scopo è stato di misurare lo spettro della radiazione cosmica di fondo nelle microonde (CMB) e di cercare eventuali disuniformità in questa radiazione. I dati riportarono variazioni di temperatura della CMB generate da differenze nella distribuzione degli atomi nell'Universo (Mather et al. 1994); tali fluttuazioni non sarebbero state abbastanza forti da condensare gli atomi nelle numerose galassie che ora vediamo intorno a noi a meno che non ci fu qualcosa che accelerò il processo iniziale fornendo più massa e gravità.

L'introduzione della materia oscura nei modelli cosmologici rese molto più semplice la spiegazione dei moti delle galassie e della loro formazione nella storia cosmica, la stessa cosa per gli ammassi di galassie. Inoltre una classe di materia oscura nota come materia oscura fredda (CDM) è ora una parte essenziale del modello cosmologico Λ -CDM che ad oggi è il modello che spiega meglio l'Universo. I fisici hanno costruito rilevatori per rivelare le interazioni tra materia oscura e materia ordinaria ma sembrano essere talmente piccole che non sono state registrate nemmeno dalla strumentazione migliore che oggi possediamo e quindi, nonostante decenni di sforzi, non ci sono state osservazioni definitive. La missione Euclid è progettata per aiutare a sbloccare questa situazione di stallo indagando sulla distribuzione di materia oscura, che ci fornirà preziosi indizi sulla sua identità.

ENERGIA OSCURA

L'energia oscura è l'elemento più preponderante nel nostro Universo e allo stesso tempo quello più misterioso. Essa provoca l'espansione accelerata a cui siamo soggetti e sembra essere collegata al vuoto nello spazio. Si può pensare come a una sua proprietà intrinseca, quindi maggiore è il volume del vuoto nello spazio maggiori saranno gli effetti dell'energia oscura.

Le prove della sua esistenza sono molto recenti e risalgono alla fine degli anni '90 per mezzo dello studio delle supernove Ia usate come candele per misurare le distanze cosmologiche. Nel 1988, l'astronomo americano Saul Perlmutter lanciò un gruppo di ricerca con l'obiettivo di dimostrare che l'espansione stava rallentando perché era contrastata dalla gravità di tutti gli oggetti celesti dell'Universo, chiamato *The Supernova Cosmology Project*. Successivamente nel 1994 si è unito un gruppo indipendente guidato dall'astronomo australiano americano Brian Schmidt chiamato *The High- z Supernova Search Team*, in cui l'astronomo americano Adam Riess ha svolto un ruolo cruciale.

I due gruppi di astrofisici scoprirono che le supernove Ia, esplose tra 4 e 7 miliardi di anni fa, hanno in media una luminosità il 25% più piccola di quanto aspettato. L'unica spiegazione plausibile a questa scoperta è che in passato l'Universo si espandeva più lentamente rispetto alla velocità di espansione attuale, cioè l'Universo si trova in una fase di espansione accelerata. Il risultato, completamente opposto alle teorie iniziali, lasciò interdetti gli astronomi che chiamarono la componente che stava causando l'accelerazione proprio energia oscura (vedi Figura 1.4).

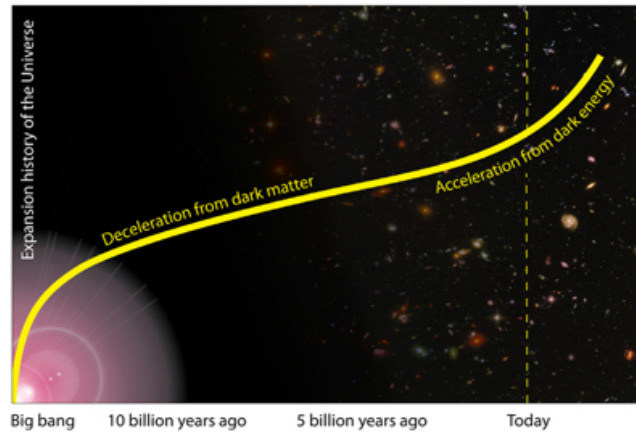


Figura 1.4: Grafico che mostra com'è variata l'accelerazione dell'Universo nel tempo e le forze che l'hanno causata

(Copyright: Euclid Assessment Study Report)

Ancora oggi la comprensione dell'accelerazione rimane una delle sfide più avvincenti della cosmologia e della fisica fondamentale. La migliore ipotesi di lavoro fu suggerita da Albert Einstein nel 1917 con l'introduzione della costante cosmologica, un campo energetico presente in tutto l'Universo. In realtà era nata per bilanciare le forze nell'Universo affinché risultasse immobile e statico e una volta che si scoprì che esso era in accelerazione, il fisico stesso la definì come il suo più grande errore. Tuttavia oggi è stata reintrodotta poichè potrebbe essere il modo più semplice per spiegare le osservazioni.

Ci sono anche altre teorie, cioè che l'accelerazione potrebbe essere prodotta da una nuova forza della natura o che ci sia stato un fraintendimento del modo in cui funziona la Relatività Generale, ma in ogni caso non abbiamo misurazioni abbastanza dettagliate per discernere tra le varie possibili soluzioni.

La missione Euclid avrà come compito proprio di misurare la variazione dell'accelerazione cosmica – il cosiddetto "*jerk*" – con una precisione migliore del 10%. Questo mostrerà se la costante cosmologica è effettivamente costante e, in caso contrario, il modello lambda-CDM non può funzionare e dovrà essere sostituito. Inoltre misurerà "*gamma*", l'indice di crescita della struttura, con una precisione del 2%. Se questo test dovesse fallire, dimostrerà che la relatività generale non può reggere su scale cosmologiche e dovrà essere sostituita con una teoria più profonda, i fisici dovranno andare alla ricerca di una "nuova fisica".

1.2.2 SONDE COSMOLOGICHE

In precedenza abbiamo visto come la missione Euclid sia nata da due proposte, DUNE e SPACE, che proponevano due modelli di indagine differenti. Proprio per questo motivo il satellite è ottimizzato per due sonde cosmologiche primarie: il *lensing* gravitazionale (in particolare il "*lensing* debole") e le oscillazioni acustiche barioniche (BAO). Il primo è un metodo che permette di mappare la distribuzione di materia oscura misurando le distorsioni delle immagini delle galassie di fondo, il secondo permette di misurare l'espansione dell'Universo e l'accelerazione causata dall'energia oscura.

LESING GRAVITAZIONALE

Nella realtà che ci circonda siamo abituati a pensare che la minima distanza tra due punti sia una linea retta, ma questo vale solo in un piano piatto come il campo gravitazionale quasi costante vicino alla superficie terrestre. Nell'Universo invece la minima distanza tra due punti è data da una geodetica, cioè un linea curva poichè lo spazio stesso è curvo.

A spiegarci questa deformazione del continuum spaziotemporale ci viene in soccorso sempre Einstein con la teoria della Relatività Generale: la gravità piega lo spazio creando così uno spazio-tempo curvo. Questa deflessione si traduce nel fenomeno del *lensing* gravitazionale, cioè la luce non si propaga in linea retta ma su traiettorie curve.

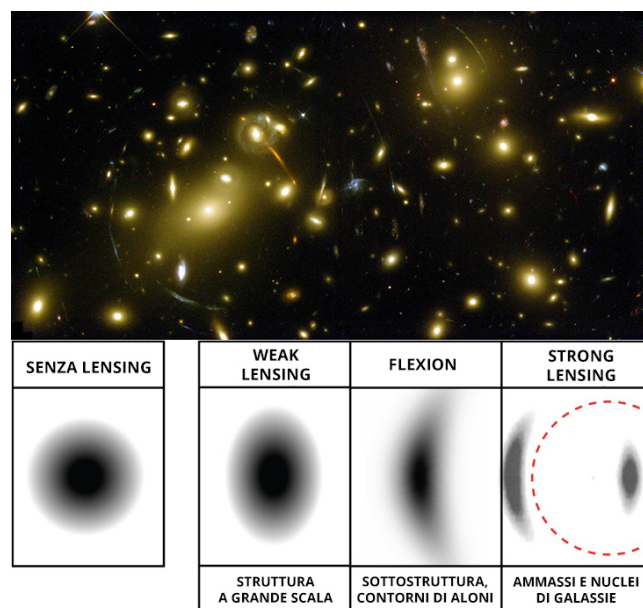


Figura 1.5: Immagine degli effetti del *lensing* gravitazionale: possiamo vedere come il "*lensing* debole" crea solo una piccola deformazione in confronto al "*lensing* forte"

(Fonte: <https://www.media.inaf.it/2017/07/18/lente-gravitazionale/>)

Questo effetto è possibile osservarlo da una serie di effetti visibili nelle sorgenti da cui la luce è emessa: distorsione della loro forma, immagini multiple, amplificazione o de-amplificazione del loro flusso luminoso, ritardo con cui l'informazione luminosa si propaga (vedi Figura 1.5). L'intensità di questi effetti dipende da vari fattori, più massiccia e compatta è la lente gravitazionale maggiore è la deflessione. Inoltre ci deve essere un buon allineamento tra osservatore, lente e sorgente poiché la curvatura è maggiore vicino al centro della lente. Se le condizioni sono rispettate si osservano grandi deformazioni e si parla di "*lensing* forte" come avvenne nel 1919 al verificarsi di un'eclissi solare totale in un ricco campo stellare. Gli astronomi, guidati dall'astrofisico britannico Arthur Eddington, hanno osservato deviazioni delle sorgenti stellari causate dal campo gravitazionale del Sole in accordo con le previsioni fatte da Einstein. Questo risultato ha giocato un ruolo chiave nella prova sperimentale della sua teoria.

Nel caso in cui le condizioni prima descritte non vengano rispettate, la luce subisce una deflessione minore e le distorsioni sono meno marcate: si tratta del "*lensing* debole". In questo caso la deflessione prodotta da ciascun ammasso di galassie non è rilevabile da sola, ma si crea un effetto cumulativo che crea una sottile distorsione nelle immagini di galassie lontane. Gli astronomi si riferiscono a questo effetto come *cosmic shear*.

Il suo primo rilevamento avvenne nel 2000 e da quel momento si è evoluto in una sonda cosmologica affidabile e robusta. Grazie ad esso, sono stati forniti vincoli sulla densità di materia nell'Universo, sulla quantità di galassie e sul comportamento dell'energia oscura. Tutto in accordo con le aspettative teoriche date dalle misurazioni della radiazione cosmica di fondo a microonde e questo ha aumentato la fiducia nella sua tecnica. Nel *lensing* debole si può vedere la lente stessa come una distribuzione estesa di materia oscura davanti a uno sfondo denso di galassie, le distorsioni delle galassie sullo sfondo non sono casuali ma dipendono dalla distribuzione della densità della materia oscura e analizzandole si potrà avere un'immagine nitida della sua struttura.

Operativamente, Euclid misurerà le distorsioni di 1,5 miliardi di galassie di fondo che si estendono su 10 miliardi di anni luce dell'Universo e, conoscendone il *redshift*, si potrà creare una tomografia delle strutture della materia oscura. I cosmologi saranno in grado di dedurre la velocità con cui crescono le strutture galattiche e di conseguenza fornirà forti vincoli sulle quantità che influenzano questo tasso di crescita, ovvero la materia oscura e l'energia oscura.

OSCILLAZIONI ACUSTICHE BARIONICHE

Le oscillazioni acustiche barioniche (BAO) sono modelli di oscillazione, impressi negli ammassi di galassie sparsi nell'Universo. Sono un effetto sottile ma importante perchè forniscono un modo indipendente per misurare il tasso di espansione dell'Universo e come tale tasso è cambiato nel corso della storia cosmica.

Le BAO sono impresse nella storia della materia dell'Universo primordiale. Agli inizi la materia era sparsa in un mare di particelle quasi uniforme e la gravità mutò questo stato addensandola per formare le galassie, tuttavia durante il processo si generò calore e di conseguenza una forza di pressione opposta alla forza di gravità. Questa interazione tra gravità e pressione ha creato delle oscillazioni simili alle onde sonore che si sono espanse verso l'esterno in bolle, portando con sé un po' di materia. Dopo 380'000 anni dalla creazione dell'Universo, iniziarono a formarsi gli atomi: ciò ha permesso alla materia di raffreddarsi più velocemente e alla gravità di dominare. Così iniziarono a formarsi le galassie e gli ammassi di galassie in cui erano presenti le bolle di materia create dalle onde acustiche, le quali oggi sono ancora visibili e sono note come oscillazioni acustiche barioniche.

Quando si crearono i primi atomi, fu rilasciata anche la radiazione della CMB e la missione Planck dell'ESA ha misurato che le variazioni di temperatura di tale radiazione sono prodotte dalle diverse densità di materia nell'Universo primordiale e su determinate scale dimensionali possono essere direttamente correlate alle oscillazioni acustiche barioniche. Rivelare le oscillazioni è molto importante perché la loro dimensione è determinata dalle proprietà dell'Universo primordiale e in questo modo i cosmologi possono capire le proprietà della materia ordinaria (barionica), della materia oscura e dell'energia oscura. Inoltre capire come esse cambiano nel tempo può essere utilizzato per misurare l'espansione dell'Universo e il modo in cui si evolve. Le oscillazioni acustiche barioniche furono rilevate per la prima volta nel 2005 tramite due telescopi usati da due gruppi di astronomi che lavoravano in modo indipendente: lo *Sloan Digital Sky Survey* nel New Mexico, e il *2dF Galaxy Redshift Survey*, in Australia. Queste ricerche hanno mostrato che la dimensione del loro segnale è di circa 150 milioni di parsec che rappresenta l'orizzonte sonoro nell'Universo primordiale ed è in buon accordo con la cifra prevista dalle analisi della CMB.

Il compito di Euclid è rivelare le BAO in un ampio volume dello spazio.

Il *lesing* gravitazionale e le oscillazioni acustiche barioniche sono due metodi diversi per misurare cose simili e ciò ci permetterà di fare controlli incrociati essenziali che aiuteranno a eliminare gli errori sistematici di entrambi gli approcci. Inoltre si potranno fare rigorosi test sui diversi modelli di energia oscura e persino sulla Relatività Generale di Einstein.

LEGACY SCIENCE

Oltre alla scienza primaria di Euclid, l'ampia indagine fornirà dati di diversi miliardi di galassie e quindi ulteriori sonde cosmologiche, integrando lenti deboli e raggruppamento di galassie. Allo stesso modo, i campi profondi forniranno diversi milioni di sorgenti che saranno campioni unici per l'astronomia extragalattica e stellare. Sia i sondaggi ampi che quelli profondi saranno miniere d'oro di obiettivi per ALMA, JWST, E-ELT e TMT e innescheranno sinergie scientifiche con LSST, GAIA, e-Rosita o SKA.

L'Euclid Consortium ha istituito diversi gruppi di lavoro scientifici che effettueranno le loro indagini su progetti aggiuntivi, chiamati "*legacy*", e proprio su questi noi abbiamo fatto le nostre considerazioni. Questi progetti si occuperanno di: ammassi di galassie, indagini incrociate sulla CMB, statistiche sul *lesing* "forte", *lesing* tra galassia e galassia, nane brune fredde, grandi flussi e storia della fusione delle galassie, studio delle popolazioni stellari risolte nella nostra galassia e nell'universo vicino, evoluzione delle galassie (galassie, AGN, galassie ad alto *redshift* altamente ingrandite, studio dell'universo primordiale), galassie Lyman-break ad alti *redshift*, supernove e transitori, eso-pianeti.

Le previsioni che sono state fatte mostrano che il numero previsto di bersagli che Euclid potrebbe

trovare è di gran lunga superiore rispetto a quelli dei telescopi precedenti. Sarà possibile osservare $\sim 2 \times 10^8$ galassie tra $1 < z < 3$ di cui si potrà avere una conoscenza precisa della massa e nello stesso intervallo di *redshift* poche centinaia di galassie massive. Inoltre di emettitori in $H\alpha$ con misure sull'abbondanza di metallo a $z \sim 2-3$ se ne potranno osservare probabilmente $\sim 4 \times 10^7/10^4$ e $\sim 2 \times 10^4$ galassie in ammassi di galassie a $z > 1$. Per quanto riguarda gli AGN se ne osserveranno $\sim 10^4$, di galassie nane $\sim 10^5$ e di nane brune $\sim 10^2$. Si presuppone di poter osservare anche circa 300'000 *lesing* di galassie con archi ed anelli e infine circa 30 quasar a $z > 8$ mentre prima non ne è mai stato osservato nessuno.

1.2.3 INDAGINE DEL CIELO

La sonda Euclid sarà lanciata dallo SpaceX Falcon 9 da Cape Canaveral in Florida che lo posizionerà su un'orbita di trasferimento diretta verso la sua orbita operativa. Come orbita operativa è stato selezionato un alone di grande ampiezza ($\sim 1 \times 10^6$ km) attorno al secondo punto di Lagrange del sistema Sole-Terra (L2) (vedi Figura 1.6).

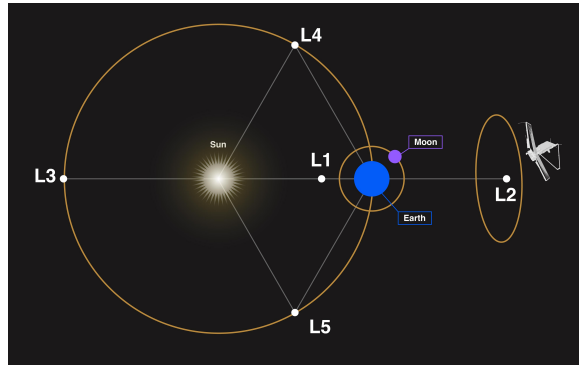


Figura 1.6: Posizione del secondo punto di Lagrange (L2) rispetto al Sole e alla Terra
(Fonte: <https://webbtelescope.org/contents/media/images/>)

La scelta si è basata sul fatto che offre condizioni ottimali: un ambiente di radiazione benigno, necessario per i rilevatori sensibili, e condizioni di osservazione molto stabili, lontane abbastanza dal perturbante sistema Terra-Luna. Inoltre rispetto alle altre orbite è necessaria una minor quantità di propellente.

Le comunicazioni per immagazzinare il gran numero di dati senza precedenti avverranno in banda K (25.5-27 GHz) che offrono una velocità di trasferimento di 55 Mbit/s. Il meccanismo per mantenere il collegamento telemetrico scientifico con la Terra avrà due gradi di libertà per rispondere con efficienza alle grandi variazioni dell'angolo Sole-navicella spaziale-Terra. L'orbita selezionata è priva di eclissi. Le manovre di mantenimento della stazione saranno eseguite ogni 30 giorni durante tutta la fase operativa della missione.

L'indagine del cielo da parte di Euclid avverrà in modalità "*step-and-stare*", cioè una volta che il telescopio avrà puntato una porzione di cielo le misurazioni verranno eseguite su un'area di $\sim 0.5 \text{ deg}^2$ attorno ad essa. La copertura del cielo è guidata da una strategia che si pone di coprire 15.000 deg^2 di cielo extragalattico (più del 35% della sfera celeste) durante tutta la durata della missione. Inoltre le indagini saranno divise tra ampie e profonde (vedi Figura 1.7). Le parti coperte dal rilievo ampio evitano il centro galattico (a causa del gran numero di stelle e polveri che limitano le osservazioni extragalattiche) e quindi comprendono due grandi porzioni in alto a sinistra e in basso a destra di esso e due porzioni più piccole in alto a destra e in basso a sinistra (per capire meglio vedi Figura 1.8). Questa indagine sarà completata da una profonda (40 deg^2) che raggiungerà due magnitudini più profonde in tre parti del cielo, una nell'emisfero boreale e due in quello australe. Il rilievo profondo occuperà circa il 10% del tempo totale di osservazione e sarà ottenuto mediante visite periodiche alle stesse aree del cielo a intervalli regolari durante la missione.

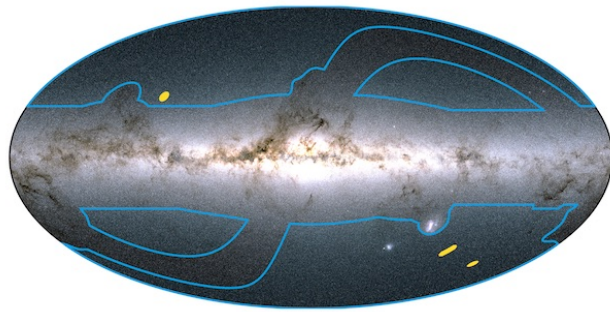


Figura 1.7: La zona compresa all'esterno della linea azzurra rappresenta il luogo dove verranno effettuate le indagini ampie; i punti gialli sono le zone interessate dalle osservazioni profonde
(Copyright: ESA/Gaia/DPAC)

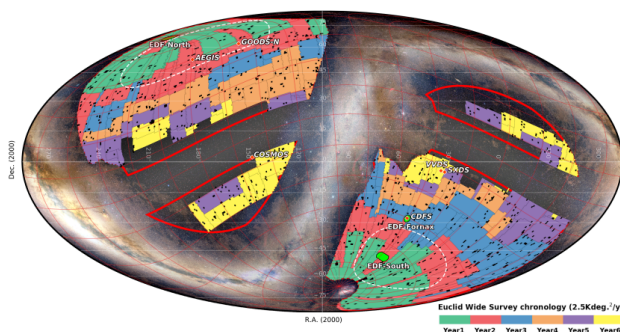


Figura 1.8: Le zone colorate rappresentano le aree di indagine del satellite Euclid
(Fonte: articolo *Euclid preparation: I. The Euclid Wide Survey*, 4 agosto 2021)

Le decisioni prese in base a questa strategia sono di spostare la linea Sole-veicolo spaziale di 1 grado al giorno nel piano dell'eclittica e di tenere la direzione di puntamento il più possibile perpendicolare all'asse Sole-veicolo spaziale con il parasole rivolto verso il Sole per mantenere la stabilità termica. Euclid osserverà strisce su base giornaliera, si tratta di osservazioni di campi celesti adiacenti lungo un grande cerchio di longitudine eclittica all'incirca costante. Sarà possibile coprire 15-20 gradi ogni giorno a differenza della scelta che si effettuerà per il tempo di integrazione per campo e per la geometria del campo visivo degli strumenti. Per ora si è ipotizzato di osservare un campo di ampiezza di 0,5 gradi con un tempo di esposizione di 4000 s (quindi una copertura giornaliera di circa 18 gradi). L'allineamento del piano galattico rispetto al piano dell'eclittica fa sì che il cielo extragalattico sia poco accessibile durante gli equinozi (cioè intorno al 21 marzo e al 21 settembre).

1.3 NAVICELLA SPAZIALE

La navicella Euclid (vedi Figura 1.9) ha una massa di 2100 kg, un'altezza di 4.5 m e un diametro di 3.1 m (con le appendici riposte). Le due componenti principali che la compongono sono:

- il *Payload* che ospita il telescopio, i componenti del piano focale degli strumenti e parte dell'elettronica di elaborazione dei dati;
- il Modulo di Servizio che contiene i sistemi satellitari necessari per distribuire l'energia, controllare l'assetto, regolare la propulsione, occuparsi della telemetria e della gestione dei dati.

1.3.1 PAYLOAD

Il *Payload Module* (PLM) comprende il telescopio, il sistema di controllo termico del PLM, il *Fine Guidance Sensor* (FGS, che fornisce informazioni per un puntamento ad alta precisione), gli strumenti VIS (*Visible instrument*) e NISP (*Near Infrared Spectrometer and Photometer*) e i rivelatori.



Figura 1.9: Euclid presso il Thales Alenia Space Italia di Torino
(Fonte: Thales Alenia Space)

TELESCOPIO

Il telescopio di Euclid è stato costruito secondo due principali obiettivi: poter ottenere un'eccellente qualità di immagini nel visibile e osservare un campo simultaneo per la spettroscopia e la fotometria nel vicino infrarosso.

L'Airbus Defence and Space ha utilizzato una configurazione Korsch (vedi Figure 1.9), cioè ha costruito un telescopio di tipo Cassegrain composto da tre specchi con un campo fuori asse di 0.45 gradi e un diaframma di apertura sullo specchio primario. Il diametro della pupilla d'ingresso è di 1.2 m, il campo di vista corretto otticamente è di $0.79 \times 1.16 \text{ deg}^2$ e la lunghezza focale è di 24.5 m.

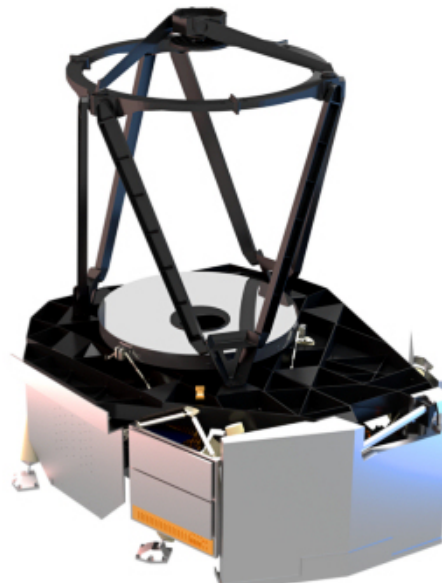


Figura 1.10: Immagine del telescopio Korsch del Airbus Defence & Space
(Fonte: Airbus Defence & Space)

Questo tipo di telescopio ha il vantaggio di limitare la quantità di luce diffusa e di formare un'immagine piatta sul rivelatore, inoltre è stato costruito per funzionare a temperature molto basse (può tollerare al massimo circa 240 K) per soddisfare i requisiti delle prestazioni scientifiche, come avere uno sfondo interno al di sotto dello sfondo del cielo zodiacale.

VISIBLE INSTRUMENT

Il VIS serve per fornire immagini di alta qualità nel visibile affinché sia possibile eseguire misurazioni di taglio di galassie con *lesing* debole. Lo strumento è composto da una matrice di CCD (*Charge Coupled Devices*) 6×6 4096×4132 pixel da 12 micron forniti da e2V, appositamente ottimizzati per la missione Euclid, ed è equipaggiato con un unico filtro a banda molto ampia (copre le lunghezze d'onda da 550 nm a 900 nm) con una risoluzione di circa 0.23 secondi d'arco. Il piano focale del VIS copre un campo visivo di 0.57 deg^2 (quasi 3 volte l'angolo solido della Luna piena e circa 180 volte il campo visivo della fotocamera ACS del telescopio spaziale Hubble) con pixel di 0.1 secondi d'arco. Il suo rapporto segnale rumore è di almeno 10 per 1.5 miliardi di galassie fino alla magnitudine 24.5 in 4000 secondi.

Il rendimento complessivo dello strumento VIS consentirà agli scienziati di misurare le forme delle galassie con sufficiente accuratezza, in conformità con i requisiti.

NEAR INFRARED SPECTROMETER AND PHOTOMETER

Il NISP (vedi Figura 1.10) serve per attuare osservazioni spettro-fotometriche, da cui si potranno ottenere *redshift* spettroscopici e fotometrici. Lo strumento è composto da una matrice di rivelatori TIS 4×4 2040×2040 pixel da 18 micron forniti da Teledyne, che coprono un campo visivo di 0.53 deg^2 , condiviso con VIS, con una risoluzione spettrale dei pixel di 0.3 secondi d'arco. La parte fotometrica è dotata di 3 filtri a banda larga (Y, J e H) che coprono rispettivamente gli intervalli di lunghezza d'onda 900–1192 nm, 1192–1544 nm e 1544–2000 nm. La parte spettroscopica, invece, è dotata di 4 *grisms* senza fenditura (spettroscopia "*slitless*") nel vicino IR a bassa risoluzione (pari a 380 per una sorgente di 0.5 secondi d'arco di diametro); i tre *grisms* "rossi" (1250–1850 nm) copriranno lo stesso intervallo di lunghezze d'onda ma forniranno spettri con tre orientamenti diversi (0° , 90° e 180°) al fine di decontaminare ogni spettro senza fenditura da possibili spettri sovrapposti di altre sorgenti nel campo e il quarto è un *grism* "blu" (920–1250 nm).

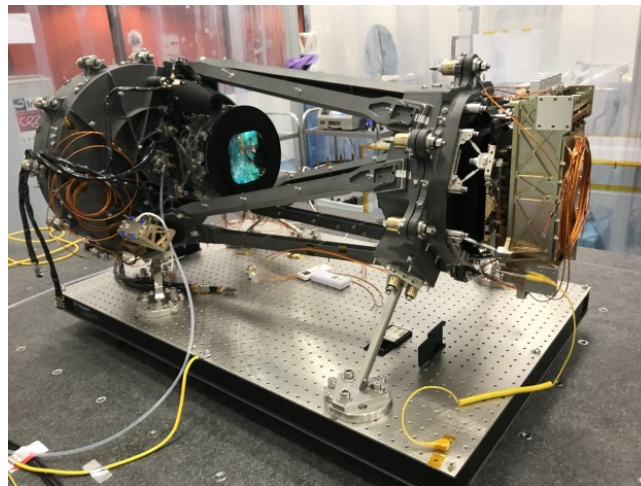


Figura 1.11: Il modello di volo completamente assemblato dello strumento NISP della missione Euclid dell'ESA nella camera bianca del Laboratoire d'Astrophysique de Marseille (LAM) prima di essere avvolto nell'isolamento multistrato (MLI)

(Copyright: Euclid Consortium & NISP instrument team)

Il fotometro ha un rapporto segnale-rumore di almeno 5 fino alla magnitudine 24.0 con tempi di posa di circa 100 secondi per filtro. Lo spettrografo fornirà il *redshift* di circa 30 milioni di galassie nell'intervallo di *redshift* da 0.7 a 2.0 con pose di circa 4000 secondi.

1.3.2 MODULO DI SERVIZIO

Nel Modulo di Servizio troviamo la maggior parte dei sottosistemi del satellite necessari per far funzionare il *Payload*. Ad esempio troviamo sistemi per regolare la potenza, per verificare la temperatura e per controllare l'assetto e l'orbita (AOCS).

La parte telemetrica fornisce comunicazioni in banda X e K, con velocità dati di quest'ultima di ~ 55 Mbit/s e trasmetterà informazioni a terra ogni 4 ore. Euclid immagazzinerà un'enorme quantità di dati durante tutto il periodo della missione e per riuscire a memorizzarli è stata inserita una memoria di massa 2.6 Tbit. Inoltre le immagini ad alta precisione che verranno scattate avranno bisogno di un'alta precisione di puntamento e ciò è reso possibile dal sistema AOCS, che fornisce stabilità con una dispersione inferiore a 35 millisecondi d'arco per esposizione visiva. La stabilità termica invece è richiesta per proteggere il telescopio da disallineamenti ottici.

Tecniche per identificare galassie distanti

Il capitolo 2 ci spiega alcune tecniche spettro-fotometriche che oggi utilizziamo per identificare galassie a vari *redshift* mentre, per questa tesi, ci focalizzeremo successivamente su oggetti $z > 4$ osservabili in banda larga con la sonda Euclid. Tuttavia, più ci si sposta a distanze elevate più è difficile la loro identificazione e per questo sono stati creati dei metodi per selezionarle in base al colore. Questo approccio si basa su due criteri principali: la forma della distribuzione spettrale di energia (SED) e l'intervallo di *redshift* in cui le caratteristiche del SED influenzano i colori osservati.

Nella sezione 2.1 andremo a vedere le tecniche a lunghezze d'onda nell'ottico, mentre nel 2.2 ci occuperemo di quelle nel vicino infrarosso.

2.1 OSSERVAZIONI NELL'OTTICO

L'utilizzo di filtri ottici per indagini ad alti *redshift* favorisce l'osservazione di giovani galassie *star-forming* (SFGs) con bassa estinzione delle polveri, ma sono difficili da rilevare a causa degli altri corpi presenti nello spazio che arrossano rapidamente il loro continuo nel UV.

Una tecnica efficace per selezionare le SFGs si chiama "Lyman-break" o anche nota come "*dropout technique*". Si basa sul fatto che galassie che emettono fotoni UV a lunghezze d'onda inferiori a $912 \text{ \AA}$ mostrano una discontinuità nello spettro osservato, chiamata proprio rottura di Lyman (vedi Figura 2.1). Questo accade perché lungo la linea di vista dell'osservatore i fotoni vengono assorbiti sia dall'idrogeno neutro nel mezzo intergalattico sia dal mezzo interstellare (in generale già da $1216 \text{ \AA}$ iniziamo a vedere una forte depressione nel continuo).

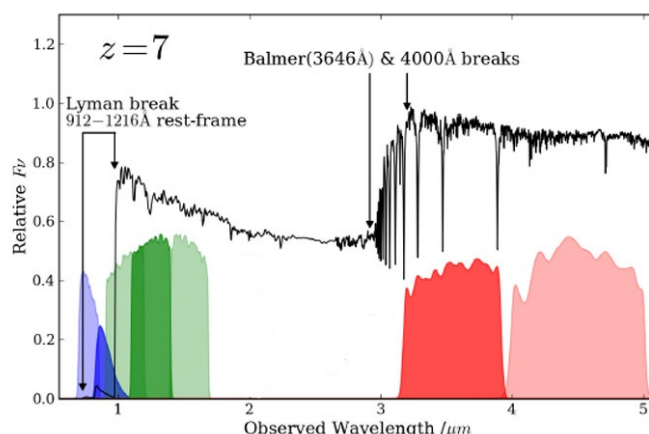


Figura 2.1: Un'illustrazione dello spostamento verso il rosso della distribuzione di energia spettrale ultravioletta nel frame di riposo di una galassia giovane a $z \simeq 7$. Lo spettro mostra il brusco calo a $\lambda=1216 \text{ \AA}$ dovuto al forte assorbimento da parte dell'idrogeno neutro (Lyman-break)

(Fonte: <https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sept14/Dunlop/Dunlop3.html>)

Identificare le SFGs può essere fatto, quindi, comparando lo spettro preso con filtri U-B con quello di filtri B-V e una volta creato il diagramma colore-colore notare come il flusso "scompare" nel blu (U-B), cioè le galassie appaiono rosse nel blu. Questo vale se stiamo osservando galassie a *redshift* ~ 3 , a valori maggiori bisognerà usare filtri più rossi (ad esempio V-I); se andiamo a *redshift* minori di 3

la discontinuità si crea in banda U dove l'atmosfera terrestre è opaca e si necessita quindi di telescopi spaziali. Le galassie a $z \simeq 3$ vengono chiamate "Lyman-break galaxies" (LBG) poiché si utilizza proprio questa tecnica per identificarle e in esse osserviamo la Lyman-break a $3600 \text{ \AA}$ e quindi sono visibili nell'ottico ma non nell'ultravioletto.

2.1.1 PROPRIETÀ PRINCIPALI DELLE GALASSIE LYMAN-BREAK

Le galassie LBG finora osservate hanno tipicamente una bassa estinzione $E(B-V) < 0.2$, infatti se l'estinzione fosse maggiore lo spettro *rest-frame* UV sarebbe più rosso e quindi il *break* sarebbe meno evidente. Inoltre alcune LBG mostrano la riga di emissione della $\text{Ly}\alpha$, che viene creata dall'assorbimento di fotoni da grani di polvere e dallo *scattering* risonante con l'idrogeno neutro presente nel mezzo interstellare; quest'ultimo ha la densità di colonna proporzionale a $E(B-V)$ e quindi la riga di emissione è inversamente proporzionale all'estinzione. Le linee di emissione di queste galassie ci mostrano che la formazione di stelle è la fonte principale di ionizzazione e la metallicità del gas ionizzato è subsolare tra $1/10 < Z/Z_{\odot} < 1$ (difficile da calcolare a causa della debolezza delle linee di assorbimento del UV fotosferico).

Le osservazione nell'ottico delle galassie Lyman-break a *redshift* 2-4 ci hanno mostrato un tasso di formazione stellare (SFR) tra 10 e $100 \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ e tipicamente le masse stellari sono tra $1-5 \times 10^{10} \text{ M}_{\odot}$. Il sistema a riposo nel continuo IR ci mostra invece luminosità molto inferiori a $10^{12} \text{ L}_{\odot}$ che indica un SFR minore di $100 \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1}$, in accordo con le stime della luminosità nel UV e $\text{H}\alpha$. Inoltre la distribuzione spettrale di energia mostra un'emissione di corpo grigio da queste galassie con temperature tra i 30 e i 50 K.

Le immagini provenienti dal telescopio spaziale Hubble ci dicono che la morfologia delle LBG è per lo più irregolare, con molti componenti e con parecchie nubi che contribuiscono al 20-50% della luminosità UV totale. Le nubi si pensa siano state create da piccole fusioni o da instabilità nella componente gassosa. Indizi importanti sulla natura di queste galassie ci sono arrivati dalla cinematica delle righe di emissione, portandoci all'interpretazione che i dischi delle galassie ad alto *redshift* siano più turbolenti rispetto a quelli delle galassie odierne.

Le masse dedotte dei loro aloni di materia oscura sono di circa $10^{11.5-12} \text{ M}_{\odot}$, cioè simili o leggermente inferiori agli aloni che ospitano galassie simili alla Via Lattea.

2.2 OSSERVAZIONI NEL VICINO INFRAROSSO

Lo studio attraverso rivelatori nel vicino infrarosso, che permette di osservare galassie che emettono fotoni nel loro sistema di riposo nell'ottico (vedi Figura 2.2), iniziò negli anni '90 e permise di osservare nelle bande J (tra $1 \mu\text{m}$ e $1.4 \mu\text{m}$), H (tra $1.45 \mu\text{m}$ e $1.8 \mu\text{m}$) e K (tra $2 \mu\text{m}$ e $2.5 \mu\text{m}$). La possibilità di poter operare in queste bande è importante per tre motivi chiave:

- La correzione K è più piccola rispetto all'ottico poiché la distribuzione spettrale di energia è simile per i diversi tipi di galassie nell'infrarosso. Ciò ci permette di osservare una più ampia selezione di galassie come galassie *star-forming* arrossate dalle polveri o galassie passive (senza formazione stellare);
- La luminosità nel sistema a riposo del rosso/vicino infrarosso è un ottimo tracciante della massa stellare delle galassie perché è correlata con la luce integrata di stelle evolute piuttosto che con la radiazione ultravioletta emessa da giovani stelle massive di breve durata. Questo ci permette di osservare galassie a *redshift* superiori ($z > 7$) usando la tecnica Lyman-break menzionata precedentemente (queste galassie sono totalmente invisibili nelle bande ottiche). Inoltre in questo modo possiamo selezionare campioni di galassie in base alla massa stellare invece che in base all'attività di formazione stellare;
- I campioni nel vicino infrarosso sono meno influenzati dall'attenuazione della polvere poiché a lunghezze d'onda maggiori c'è meno estinzione. Quindi è possibile osservare galassie arrossate che altrimenti verrebbero perse con filtri ottici (vedi Figure 2.2).

L'utilizzo di tecniche nel vicino infrarosso ha anche permesso di usare criteri di selezione del colore estesi a galassie con popolazione stellare più vecchia rispetto a quelle selezionate nell'ottico. Le popolazioni stellari più vecchie di ≈ 0.5 Gyr mostrano un Balmer-break a $3646 \text{ \AA}$ cioè una discontinuità D4000. Questi salti nel continuo sono spostati verso in rosso nel vicino infrarosso per $z > 1$ e causano cambiamenti significativi nei colori osservati; ciò può essere sfruttato per elaborare criteri di selezione specifici.

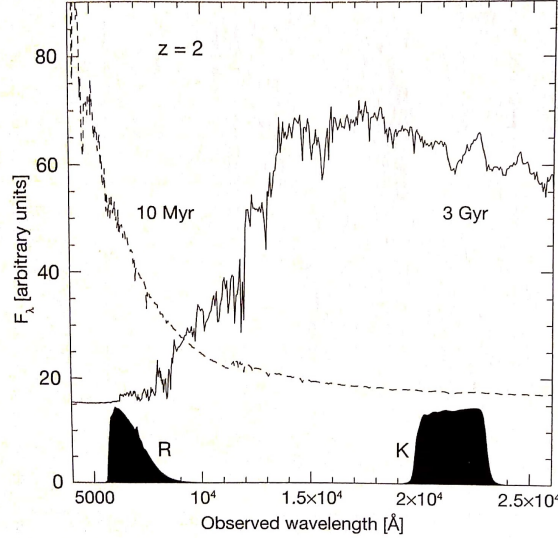


Figura 2.2: Spettro di una singola popolazione stellare giovane (10 Myr). Nel grafico notiamo come l'emissione è spostata verso il rosso (banda K nell'esempio), mentre è più debole nell'ottica osserva (banda R)

(Fonte: Cimatti A., *Introduction to galaxy formation and evolution: from primordial gas to present-day galaxies*)

2.2.1 PROPRIETÀ PRINCIPALI DELLE GALASSIE NEL VICINO IR

L'avvento della spettroscopia nel vicino infrarosso ha portato negli anni 2000 alla scoperta che le galassie distanti erano più diverse rispetto a come si pensava in precedenza. In particolare, si è notato come le galassie con formazione stellare avevano massa maggiore rispetto a quella calcolata con filtri ottici poiché tramite l'ottico non veniva mostrata l'esistenza di stelle più vecchie che emettono nel IR. Inoltre si è notato che a *redshift* maggiori di 1-2 erano presenti anche galassie quiescenti, quindi con quasi nulla o senza formazione stellare e ciò rappresentò una grande sfida perché non si immaginava che ci fossero galassie così massicce nel giovane Universo. Le principali proprietà delle galassie nel vicino infrarosso possono essere riassunte facendo una divisione tra galassie *star-forming* e galassie quiescenti.

Le galassie *star-forming* osservate a magnitudini $K \leq 22-23$, si trovano per la maggior parte a *redshift* $1 < z < 3$. Hanno luminosità UV, $H\alpha$ e IR maggiore rispetto ai campioni ottici e ciò implica un tasso di formazione stellare medio di circa $100-200 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$. Hanno una metallicità che può raggiungere quella solare e una estinzione media maggiore rispetto alle galassie *star-forming* in ottico. La loro morfologia è irregolare e con la presenza di grumi, ma in alcuni casi comparando con l'indagine in ottico si nota la presenza di una popolazione stellare più antica con una distribuzione sferoidale. Le galassie *star-forming* sono per la maggior parte dischi e hanno una velocità di rotazione molto elevata. Le masse dell'alone di materia oscura dedotte sono maggiori rispetto a quelle otticamente selezionate e possono raggiungere valori più grandi di $10^{13.5} M_{\odot}$ nelle galassie con massa stellare maggiore di $10^{11} M_{\odot}$.

Le galassie quiescenti hanno morfologia di tipo sferoidale e per lo più dei profili di luminosità superficiale con indice di Sérsic $n > 2$ (sono l'equivalente ad alti *redshift* delle ETG, *early-type galaxy*). Mostrano, per lo più, strutture simili a dischi e velocità di rotazione elevate.

A *redshift* compresi tra 1.5 e 2 le galassie quiescenti hanno densità numerica simile alle galassie *star-forming*, ma all'aumentare della distanza diventano rapidamente sempre più rare. I colori di questi due tipi di galassie sono diversi allo stesso *redshift* e questo permette di utilizzare tecniche basate sui colori osservati per discernere tra di esse. L'applicazione di queste tecniche richiede tuttavia la disponibilità di SED fotometrici multibanda di alta qualità e la conoscenza del *redshift*. Gli spettri e i SED mostrano che le popolazioni stellari delle galassie quiescenti sono vecchie con pochi Gyr, inoltre hanno elevate masse stellari e un bassissimo tasso di formazione stellare. Questo significa che la maggior parte della massa stellare si è formata a $z > 2-4$. Le metallicità totali sono solari o supersolari e più importante è l'abbondanza degli α -elementi che implica che la formazione stellare è avvenuta con esplosioni di breve durata.

2.2.2 IMMAGINI A BANDA LARGA E A BANDA STRETTA

La selezione di galassie in base al colore, accennata nella sezione precedente, è possibile attuarla attraverso dei filtri a banda larga (che sono quelli che utilizzerà Euclid come vedremo successivamente). Alcuni dei sistemi di filtri più conosciuti sono i filtri UBV di Johnson/Bessel e il sistema IR di Cousins (vedi Figura 2.3). Per crearli si sovrappongono vetri colorati ognuno con la sua curva di trasmissione e la loro sovrapposizione crea un filtro con una forma a campana.

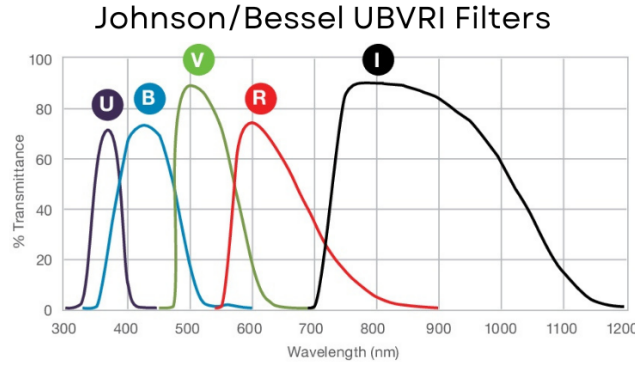


Figura 2.3: Nel grafico possiamo notare le lunghezze d'onda dove operano i filtri Johnson e Bessel nelle varie bande UBVRI

(Fonte: <https://www.andovercorp.com/products/astronomy-filters/johnsonbessel-ubvri-filters/>)

Utilizzando due filtri a banda larga è possibile misurare l'indice di colore che è legato poi alla temperatura dell'oggetto e dalla definizione di magnitudine sappiamo che esso vale:

$$c_{1,2} = m(\lambda_1) - m(\lambda_2) = -2.5 \log_{10} \left(\frac{f_1}{f_2} \right) + k \quad (2.1)$$

dove $\lambda_1 < \lambda_2$, $m(\lambda_1)$ e $m(\lambda_2)$ sono le magnitudini, f_1 e f_2 sono i flussi nelle due bande mentre k è una costante additiva. Fare fotometria, cioè misurare il flusso luminoso di una sorgente, con l'uso di più filtri equivale a fare spettroscopia a bassissima risoluzione. Dalle osservazioni in varie bande si può quindi ricostruire la distribuzione spettrale d'energia della sorgente osservata. La SED non è propriamente uno spettro ma si utilizza per avere un'idea della sua forma e più valori fotometrici si hanno, migliore sarà la sua definizione. Quindi è possibile confrontare i dati fotometrici con SED (teoriche o empiriche) di vario tipo, identificando così la natura di ciascun oggetto, o a vari *redshift*, per avere una stima della distanza.

Invece se vogliamo cercare galassie attraverso le righe di emissione possiamo utilizzare i filtri a banda stretta con bande passanti tra $\approx 50-100 \text{ \AA}$. Il contributo di una riga d'emissione in una banda stretta è maggiore che in una banda larga, in quanto il flusso della riga viene diluito dall'emissione del continuo stellare. Utilizzando questo metodo si riescono a trovare facilmente oggetti con forti righe di emissione come le SFG e gli AGN (*active galactic nuclei*) ed è già stato utilizzato con successo sia nell'ottico

che nel vicino infrarosso per la ricerca dell'emissione da parte delle righe $\text{Ly}\alpha$, OII , OIII e $\text{H}\alpha$ (vedi Figura 2.4).

Il limite principale di questi filtri è lo stretto intervallo di *redshift* che può essere coperto con un filtro e la necessità di un maggiore tempo di osservazione rispetto alle bande larghe a simili lunghezze d'onda; comunque le immagini a banda stretta sono essenziali per complementare quelle a banda larga che non riescono a rilevare tutte le sorgenti soprattutto nel caso di galassie con un continuo particolarmente debole.

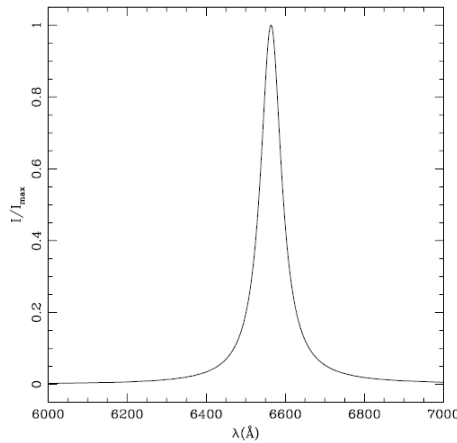


Figura 2.4: Curva di trasmissione di un filtro interferenziale centrato alla lunghezza d'onda della riga $\text{H}\alpha=6563$ Å e di larghezza circa 60 Å

(Fonte: Dispense di laboratorio di astronomia del prof. Stefano Ciroi)

2.2.3 SPETTROSCOPIA INTEGRAL-FIELD E SENZA FENDITURA

Un altro metodo per cercare galassie lontane è utilizzare la spettroscopia, che permette l'osservazione diretta di righe d'emissione. Questa può essere ottenuta su oggetti singoli tramite l'uso di una fenditura o per multipli oggetti tramite la spettroscopia senza fenditura (*slitless*) o la spettroscopia *integral-field* (IFS). Data la loro efficienza nell'osservare campioni numerosi di galassie, tratterò qui solo degli ultimi due metodi.

Nel caso della spettroscopia *integral-field* il limite principale è il piccolo campo visivo di questi strumenti, tipicamente dell'ordine di 2 arcmin² nell'ottico e vicino infrarosso, e nella necessità di tempi di osservazione maggiori. Questo perché bisogna mediare tra la necessità di risoluzione spaziale e il conseguente aumento del numero di spettri che si ottengono con una singola osservazione (un campionamento spaziale di 1"×1" su di un'area di 1 arcmin² implica l'acquisizione di 3600 spettri). Il vantaggio principale è il campionamento spettroscopico completo dell'intero campo senza preselezione delle galassie.

Ci sono tre modi diversi per realizzare la spettroscopia a *integral-field* (vedi Figura 2.5):

- Una matrice di microlenti è posta sul piano focale del telescopio e ogni microlente osserva una porzione di cielo e invia luce verso il collimatore, poi verso il reticolo che produce uno spettro;
- Una matrice di microlenti è posta sul piano focale del telescopio e su ognuna c'è una fibra ottica che trasporta la luce verso il reticolo. Gli spettri sono tutti paralleli e allineati sul rivelatore;
- Degli specchietti metallici sono posti sul piano focale del telescopio e sezionano l'immagine. Le varie sezioni sono riallineate a formare la "*pseudolist*" che diventa la finestra di entrata dello spettrografo.

In tutti e tre i casi l'apparato strumentale che invia luce al collimatore è chiamato *integral-field units* o abbreviato IFU. I dati prodotti sono chiamati dati cubici perché contengono l'informazione spettrale per ogni posizione sull'immagine della sorgente osservata. Tali dati possono essere ottenuti anche con osservazioni nel submillimetrico, millimetrico e radio per effettuare ricerche alla cieca sulle righe di

emissione atomiche e molecolari del mezzo interstellare di galassie distanti.

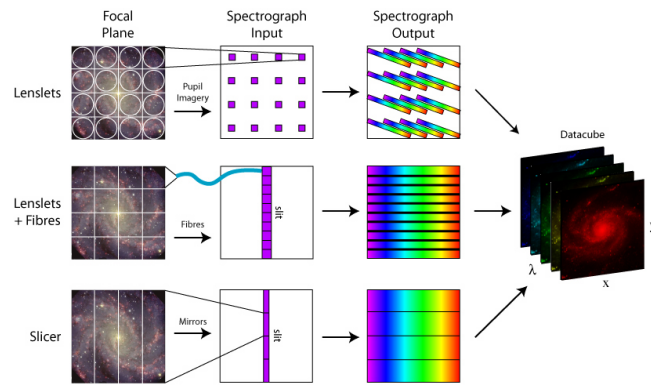


Figura 2.5: I tre modi diversi per ottenere la spettroscopia a campo integrale
(Fonte: https://www.researchgate.net/figure/The-main-techniques-for-achieving-integral-field-spectroscopy-Adapted-from_fig1_45852231)

Un altro metodo per cercare galassie lontane è offerto dalla spettroscopia senza fenditura (*slitless*). Il termine si riferisce proprio al fatto che mancano le *slit*, cioè delle piccole aperture che servono per selezionare e isolare la luce degli oggetti puntati. Il vantaggio di tale tecnica è che si ottiene un'immagine dell'intero campo visivo e quindi lo spettro di un numero elevato di oggetti in un colpo solo (vedi Figura 2.6). Il problema principale di tale metodo è la possibile sovrapposizione degli spettri di oggetti diversi (per limitare il problema di solito si usano *grism* a bassa dispersione). Inoltre il fondo del cielo è molto più alto rispetto alla spettroscopia con le *slit* e quindi di solito si utilizzano telescopi spaziali poiché non risentono del bagliore atmosferico. La missione Euclid è stata progettata per eseguire massicci rilievi utilizzando la spettroscopia senza fenditura nel vicino infrarosso per ottenere spettri di decine di milioni di galassie.

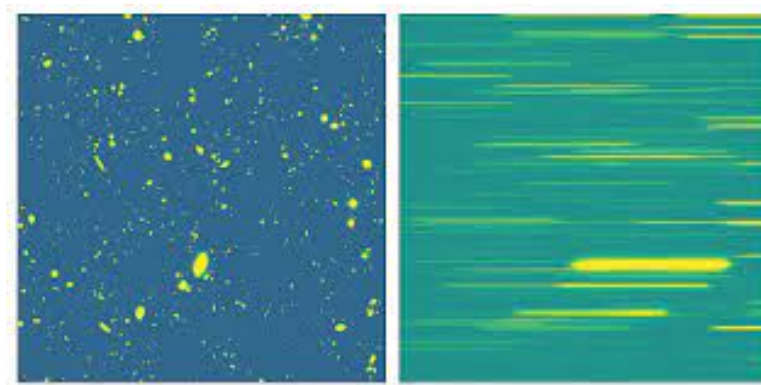


Figura 2.6: Un esempio di spettro ottenuto con spettroscopia slitless (a destra). Per confronto (a sinistra) è riportata l'immagine della stessa area di cielo, utile per associare ogni sorgente al suo spettro
(Fonte: <https://jwst-docs.stsci.edu/jwst-near-infrared-camera/nircam-observing-modes/nircam-wide-field-slitless-spectroscopy>)

Simulazioni a banda larga

Il capitolo 3 mostra metodi per lo studio di galassie utilizzando i dati raccolti da telescopi che operano con filtri a banda larga. In particolare vedremo nella sezione 3.1 il lavoro svolto dalla professoressa Karina Caputi che lavora presso Kapteyn Astronomical Institute, Università di Groningen nei Paesi Bassi. Nella sezione 3.2 invece vedremo la simulazione effettuata dalla ricercatrice post dottorato Laura Bisigello, i cui dati sono stati utilizzati per effettuare una mia successiva analisi che illustro nella sezione 3.3. Il mio lavoro è stato svolto con il supporto di Laura Bisigello e della professoressa Giulia Rodighiero.

3.1 INDAGINI A $z \sim 4-5$ DEL CAMPIONE SMUVS

Lo studio della professoressa Caputi prende in considerazione un grande campione di galassie dallo Spitzer Matching Survey of the UltraVISTA ultra-deep Stripes (SMUVS) per cercare sorgenti con flussi di $3.6 \mu\text{m}$, indicatori di una forte emissione $H\alpha$ a $z = 3.9 - 4.9$.

In generale le righe di Balmer, in particolare la riga dell' $H\alpha$ a $6563 \text{ \AA}$, sono un ottimo tracciante per il tasso di formazione stellare ma all'aumentare del *redshift* si sposta nell'infrarosso rendendo difficile la rilevazione per gli spettrografi da terra. Tuttavia se le righe di emissione hanno larghezze equivalenti (EW) sufficientemente grandi, la loro presenza può essere dedotta dalla fotometria a banda larga. L'Infrared Array Camera (IRAC) a bordo del telescopio spaziale Spitzer ha eseguito varie osservazioni ed è stata sfruttata anche per raccogliere l'emissione dell' $H\alpha$ a *redshift* $3.9 < z < 4.9$. Il telescopio Spitzer ha raccolto immagini ultra-profonde IRAC sia a $3.6 \mu\text{m}$ che a $4.5 \mu\text{m}$ su una parte significativa dello spazio per analizzare l'Universo ad alti *redshift*.

I dati ottenuti consentono uno studio dettagliato delle proprietà e dell'evoluzione delle galassie ad alto z e in particolare l'indagine è stata effettuata su un grande campione contenente quasi 6000 sorgenti utilizzando una cosmologia con $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_M = 0.3$ e $\Omega_\Lambda = 0.7$.

Ora vedremo quali sono stati i passaggi principali per l'analisi di questi dati. In primo luogo, sono state estratte le sorgenti sui mosaici Ultra VISTA combinando le osservazioni in banda H e K (media) e utilizzando il software SExtractor con una soglia di rilevamento 1.5σ su 5 pixel contigui. Successivamente è stato utilizzato IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*) per creare funzioni *point-spread* (PSF) sui mosaici Spitzer a 3.6 e $4.5 \mu\text{m}$ e si è notato che l'algoritmo di adattamento PSF convergeva per il 70% delle fonti. Per le rimanenti, si sono misurati direttamente i flussi di apertura IRAC in aperture circolari di 2.4 arcsec di diametro correggendoli in flussi totali moltiplicati per un fattore di 2.13 (determinato dalle curve di crescita delle stelle nel campo). Grazie a ciò è stato scoperto che circa il 95-96% delle sorgenti ultra-profonde UltraVISTA viene rilevato in almeno una banda IRAC e che il catalogo SMUVS creato con questo metodo è completo all'80% a 3.6 e $4.5 \mu\text{m}$.

Per tutte queste sorgenti, è stata misurata la fotometria circolare del diametro di 2 arcsec su 26 bande larghe, intermedie e strette dalle bande U attraverso le bande K_s . Dopo aver ripulito le stelle galattiche sulla base di un diagramma colore-colore (J-[3.6]) rispetto a (B-J) e mascherato le regioni di luce contaminata intorno alle regioni più luminose, è stato creato un catalogo finale contenente $\sim 291, 300$ sorgenti UltraVISTA con almeno un rilevamento in banda IRAC su un'area netta di 0.66 deg^2 . La tecnica di adattamento PSF presuppone che tutte le sorgenti siano puntiformi e questo è un presupposto ragionevole sulle immagini IRAC per praticamente tutte le sorgenti con $[3.6] > 21 \text{ mag}$. Inoltre la fotometria IRAC basata sull'adattamento PSF è coerente con l'adattamento SED (eseguito utilizzando il codice di minimizzazione χ^2 LePhare) su aperture circolari. Grazie all'utilizzo

di LePhare (*PHotometric Analysis for Redshift Estimations*) sono stati ottenuti i *redshift* e delle stime di massa stellare.

L'analisi di questi dati ha mostrato come a *redshift* $3.9 < z < 4.9$ le righe di emissione dell' $H\alpha$, del NII e del SII sono racchiuse all'interno del filtro IRAC $3.6 \mu\text{m}$, mentre allo stesso z nel filtro IRAC da $4.5 \mu\text{m}$ non è presente alcuna linea di emissione prominente. Solo linee di emissione con EW sufficientemente grande possono produrre un significativo eccesso di flusso in una banda larga, in particolare in questo lavoro è stato determinato che è necessario un $\text{EW} \geq 150 \text{ \AA}$ per una produzione di luminosità di magnitudo a $3.6 \mu\text{m}$ di almeno 0.1 mag. Tenendo presente tutte queste considerazioni, al fine di determinare quali delle galassie a $3.9 < z < 4.9$ presentano un significativo eccesso fotometrico di $3.6 \mu\text{m}$ rispetto al continuo, è stato rimodellato il loro SED eseguendo nuovamente LePhare senza righe di emissione ed escludendo la banda di $3.6 \mu\text{m}$. Le sorgenti con eccesso di $H\alpha$ sono state selezionate imponendo che:

- $[3.6]^{obs} - [3.6]^{mod} < -0.1$, dove "obs" sta per osservata e "mod" è la magnitudine del modello ottenuta dal nuovo *fitting* LePhare SED;
- $[4.5]^{obs} - [4.5]^{mod} > -0.1$, per non avere eccesso di luce a $4.5 \mu\text{m}$;
- $K_s^{obs} - K_s^{mod} > -0.1$, per non avere eccesso di luce nella banda K_s ;
- se la sorgente ha una magnitudine IRAC > 22 , allora non dovrebbe avere alcun vicino con una magnitudine IRAC < 23 entro un raggio di 3 arcsec.

Queste condizioni rendono complessivamente un approccio conservativo che garantisce che il continuo sia ben modellato e non viene sopravvalutato l'eccesso di flusso della banda di $3.6 \mu\text{m}$.

L'utilizzo di queste tecniche ha permesso di raggiungere degli ottimi risultati. Innanzitutto è stato paragonato l'eccesso di flusso a $3.6 \mu\text{m}$ di ciascuna galassia a un eccesso di $H\alpha$ ed è stata costruita una griglia di eccessi fotometrici sempre a $3.6 \mu\text{m}$ corrispondenti a diversi EW per ogni modello SED a diversi *redshift*. Inoltre è stata calcolata la magnitudine IRAC risultante a $3.6 \mu\text{m}$ e la differenza di magnitudine rispetto al modello SED originale senza linee di emissione. Dall' $H\alpha$ è stato possibile derivare il tasso di formazione stellare per queste galassie ed è stato notato che l'incidenza dell'eccesso di $H\alpha$ nelle galassie del nostro campione diminuisce rispetto alla massa stellare da $\log_{10}(M^*) \sim 9.2$ a $\log_{10}(M^*) \sim 10.8$. Ciò indica che l'intensa formazione stellare è relativamente più importante tra le masse intermedie rispetto alle galassie massicce a *redshift* $3.9 < z < 4.9$. Dalla Figura 3.1 notiamo inoltre sorprendentemente un'inversione di tendenza, l'incidenza dell'eccesso di $H\alpha$ aumenta di nuovo a $M^* > 6 \times 10^{10} M_\odot$ difficile da spiegare considerando semplicemente una formazione stellare potenziata per i sistemi più massicci. Poiché una grande frazione delle galassie più massicce con un eccesso di flusso a $3.6 \mu\text{m}$ è stata rilevata a $24 \mu\text{m}$, si pensa che probabilmente è l'attività degli AGN ad essere responsabile, almeno in parte, di questo eccesso di flusso.

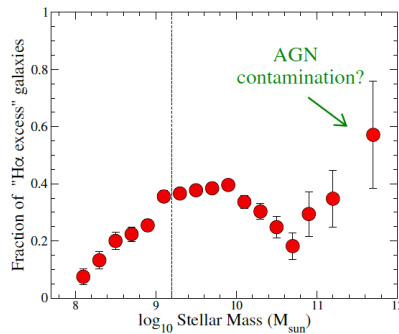


Figura 3.1: Frazione di galassie SMUVS $3.9 < z < 4.9$ con eccesso di $H\alpha$ rispetto alla massa stellare (Fonte: Caputi e al., *Star formation in galaxies at $z \sim 4-5$ from the smuvs survey: a clear starburst/main-sequence bimodality for $H\alpha$ emitters on the SFR- M^* plane*)

Le analisi della professoressa Caputi comunque hanno portato alla scoperta importante che le galassie con un eccesso in $H\alpha$ formano due sequenze distinte sul piano SFR- M^* , che sono state riconosciute come la sequenza principale di formazione stellare e la sequenza di starburst.

3.2 SIMULAZIONE DEL CIELO INFRAROSSO CON SPRITZ

La creazione di un nuovo strumento per effettuare simulazioni si è reso necessario poiché le attuali simulazioni idrodinamiche e semi-empiriche della formazione e dell'evoluzione delle galassie hanno difficoltà a riprodurre le densità numeriche delle galassie più luminose rilevate tramite IR. Per effettuare i calcoli è stata utilizzata la cosmologia Λ -CDM con $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_M = 0.27$ e $\Omega_\Lambda = 0.73$, come funzione di massa è stata utilizzata la funzione di massa iniziale di Chabrier e tutte le magnitudini sono nel sistema AB (Oke & Gunn 1983). La simulazione Spritz (*Spectro-Photometric Realisations of IR-Selected Targets at all-z*, Bisigello et al. 2021) si basa sui precedenti lavori di Gruppioni e al. (2011, 2013) e può essere ampiamente utilizzata per simulare rilievi spettrofotometrici per diverse strutture attuali e future. Cerchiamo di capire meglio il meccanismo di Spritz: esso è costruito in modo tale che crei un catalogo principale in base a sette funzioni di luminosità (LF), un modello SED assegnato, le proprietà fisiche delle galassie, le caratteristiche di emissione e i flussi attesi senza rumore. Questo catalogo non ha limiti di flusso e a partire da esso si possono creare i cataloghi simulati per riprodurre diversi rilievi spettrofotometrici.

Le galassie simulate sono state estratte dall'Herschel IR LF che deriva sempre dal lavoro di Gruppioni e sono state scelte varie tipologie: galassie a spirale, *starburst* (SB), AGN di tipo 1 "non oscurato", AGN di tipo 2 "oscurato" e due classi di sistemi compositi (SB-AGN e SF-AGN). Il modello SED è stato scelto modellando l'Herschel IR LF in base alle osservazioni in ottico-IR disponibili con i modelli semiempirici caratteristici di ogni popolazione di galassie. Per la funzione di luminosità invece si è ipotizzato che sia ben rappresentata dalla funzione proposta da Saunders et al. (1990):

$$\Phi(L)d\log_{10}L = \Phi^* \left(\frac{L}{L^*} \right)^{(1-\alpha)} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma^2} \log_{10}^2 \left(1 + \frac{L}{L^*} \right) \right] d\log_{10}L$$

dove L^* e Φ^* sono la luminosità e la densità numerica al ginocchio della funzione di luminosità, dove la funzione cambia e invece di comportarsi secondo una legge di potenza a bassa luminosità segue un andamento gaussiano ad alte luminosità. Il parametro α rappresenta la pendenza della LF a basse luminosità mentre σ regola la pendenza ad alte luminosità.

Per le proprietà fisiche, come la massa stellare e l'eccesso di colore, è stato applicato per tutte le galassie simulate il pacchetto MAGPHIS (*Multi-wavelength Analysis of Galaxy Physical Properties*, Da Cunha et al. 2008), o il software SED3FIT (Berta et al., 2013). Questa procedura di adattamento SED serve per dedurre le proprietà fisiche associate a ciascun modello SED, poiché questa informazione non è disponibile a priori a causa della natura empirica dei modelli e quindi per eseguire l'adattamento è stato creato un ampio set di osservazioni simulate di filtri personalizzati che vanno dal FUV alle lunghezze d'onda del lontano IR e assegnando S/N (rapporto segnale-rumore) di 10 a ciascuno di essi. Quando si assegna una proprietà fisica a una galassia simulata, viene randomizzato ogni valore di parametro seguendo il corrispondente distribuzione di probabilità per tener conto delle incertezze sulla procedura di adattamento SED. Quando una distribuzione di probabilità non è disponibile, è stata ipotizzata una distribuzione gaussiana centrata sul miglior valore e un arbitrario $\sigma = 0.3 \text{ dex}$.

Per quanto riguarda le caratteristiche di emissione, nella simulazione Spritz è stato incluso un insieme di linee di ricombinazione dell'idrogeno atomico, dalla serie di Balmer a quella di Humphreys. La riga di emissione di $H\alpha$ è stata derivata assumendo la relazione con il SFR da Kennicutt (1998); tutte le altre righe sono state poi derivate considerando il rapporto di intensità di riga di Hummer & Storey (1987) e Osterbrock & Ferland (2006) per il caso B ricombinazione con temperatura elettronica $T_e = 10^4 \text{ K}$ nel limite di bassa densità.

Dal catalogo principale è possibile derivare cataloghi simulati corrispondenti ai rilievi spettrofotometrici attuali e futuri, una volta nota la loro area e profondità. In particolare, dall'area dell'indagine

sono stati ricavati il volume dell'Universo corrispondente a ciascun *bin* di *redshift* considerato nel catalogo principale e quindi il numero atteso di galassie $N_0(z, L_{IR})$ per ciascuna popolazione di galassie ai vari *redshift*. Per includere la varianza nei cataloghi simulati, sono stati considerati gli errori di Poisson associati a $N_0(z, L_{IR})$ ed è stato generato un numero di galassie simulate pari a $N(z, L_{IR}) = N_0(z, L_{IR}) \pm \sqrt{N_0(z, L_{IR})}$. Ad ogni galassia simulata sono stati assegnati valori casuali di luminosità IR e *redshift*, considerando una distribuzione di probabilità piatta all'interno del corrispondente L_{IR} - z *bin*. In poche parole, questi cataloghi creano una serie di galassie simulate corrispondenti a diverse popolazioni e il loro numero è derivato dalla corrispondente funzione di luminosità (o dalla funzione di massa stellare per le galassie irregolari) e dipende dall'area dell'indagine simulata. A questo punto si può creare un set di flussi e spettri simulati per confrontarli con la profondità spettrofotometrica del rilievo di interesse a specifiche lunghezze d'onda.

Per recuperare il flusso previsto in diverse bande per ciascuna galassia simulata, sono stati convoluti i modelli SED associati a ciascuna popolazione di galassie con diversi filtri. In particolare, è stato incluso un insieme di magnitudini assolute nei filtri standard: NUV, u, r, B, V, J e K_s . Per simulare un'indagine specifica quindi è stato considerato il flusso nel filtro di interesse (nel nostro caso specifico quelli Euclid) ed è stato derivato l'errore di flusso. A questo punto è stata applicata una dispersione casuale per ciascuno uguale alla profondità di osservazione desiderata; in questo modo è stato possibile stimare il flusso atteso anche per la missione Euclid.

Nella simulazione Spritz, inoltre, sono stati inclusi spettri sintetici derivati considerando la copertura della lunghezza d'onda, la risoluzione e la sensibilità previste per gli spettri a bassa risoluzione per lo strumento JWST (*James Webb Space Telescope*, vedi Figura 3.2) nel medio infrarosso e l'Origins Survey Spectrometer a bassa risoluzione previsto per OST (*Origin Space Telescope*).

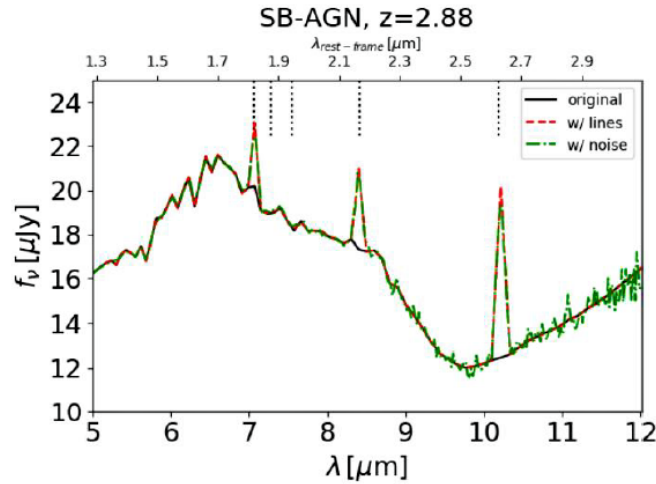


Figura 3.2: Un esempio di spettri JWST/MIRI a bassa risoluzione di una galassia SB-AGN a $z=2.88$
(Fonte: Bisigello et al., *Simulating the infrared sky with a Spritz*)

Per simulare le galassie realisticamente distribuite nel cielo, è stato utilizzato l'algoritmo di Soneira & Peebles (1978) per creare un cono luce simulato assegnando una posizione nel cielo a ciascuna galassia simulata seguendo una funzione di correlazione angolare a due punti, la cui normalizzazione varia con la massa stellare.

Grazie a questo lavoro è stato dimostrato che la simulazione Spritz riproduce bene un gran numero di osservabili, tra cui il numero di galassie dalla banda U al lontano IR, la funzione di massa stellare, il piano di massa stellare, la funzione di luminosità nell'IR a $z > 3$, le funzioni di luminosità in banda K, FUV e X-ray così come il diagramma BPT (Baldwin, Phillips & Terlevich).

3.3 IDENTIFICAZIONE DI GALASSIE STAR-FORMING

Tramite l'utilizzo di Spritz è stato possibile creare dei cataloghi simulati per la missione spaziale Euclid. In particolare sono stati utilizzati due cataloghi, uno contenente i flussi simulati di Euclid e i parametri fisici, l'altro contenente i flussi IRAC. In quest'ultimo catalogo in particolare sono presenti i flussi alle lunghezze d'onda di $3.6 \mu\text{m}$, $4.5 \mu\text{m}$, $5.8 \mu\text{m}$ e $8.0 \mu\text{m}$. Tutti i procedimenti sono stati effettuati tramite il linguaggio di programmazione Python.

Il primo obiettivo è stato quello di creare dei grafici *redshift*-colore per vedere quando la riga di emissione dell' $\text{H}\alpha$ si può stimare dalla fotometria a banda larga. Per ottenere ciò, i flussi sono stati convertiti in magnitudini tramite la formula 2.1 (la costante k è stata considerata uguale a zero) e quindi per la creazione dei grafici sono stati presi i vari canali IRAC a coppie di due ([3.6]-[4.5], [4.5]-[5.8], [5.8]-[8.0]). Nei grafici abbiamo selezionato un *redshift* range tra un $z_{\min}$ e un $z_{\max}$ in cui ci aspettiamo il *boost* nel colore dovuto all' $\text{H}\alpha$. I valori di questi due *redshift* sono stati ottenuti inserendo nella formula $1 + z = (\lambda_{\text{observed}} - \lambda_0) / \lambda_0$ la lunghezza a riposo dell' $\text{H}\alpha$ $\lambda_0 = 6563 \text{ \AA}$ e come lunghezza d'onda osservata i valori centrali dei vari filtri IRAC presi dal SVO (*Spatial Virtual Observatory*). In questo modo abbiamo ottenuto $z_{\min} = 4.42$ e $z_{\max} = 5.86$.

Nel grafico in cui ho considerato le lunghezze d'onda 3.6 e $4.5 \mu\text{m}$ abbiamo subito notato che nel *range* considerato ci fosse un salto nella distribuzione di colore (vedi Figura 3.3). Per vedere anche in quale categoria di galassie avveniva questa discrepanza, ho utilizzato i filtri disponibili nel catalogo per distinguere con colori diversi le galassie passive, quelle a spirale, *starburst*, AGN e nane.

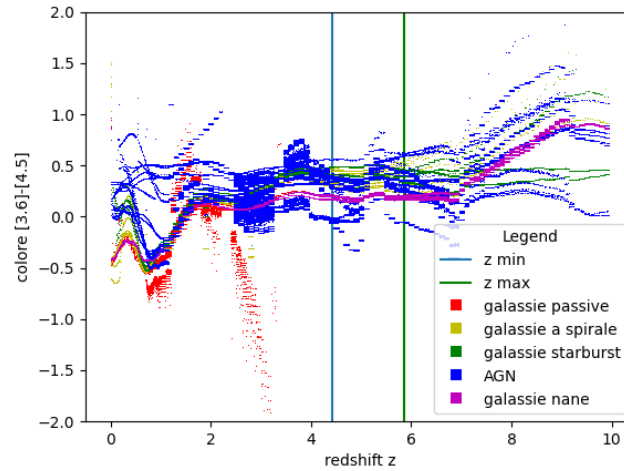


Figura 3.3: Grafico redshift-colore [3.6]-[4.5] che mostra la distribuzione dei vari tipi di galassie da redshift 0 fino a 10

A questo punto ho considerato solo una galassia per volta nell'intervallo di *redshift* selezionato, in particolare ho svolto le prove con le galassie di tipo a spirale e AGN poiché era più evidente il salto. Per vedere quanto fosse la differenza di flusso rispetto al continuo ho introdotto anche il flusso simulato di Euclid a $1.6 \mu\text{m}$ e per ogni galassia selezionata ho plottato in un grafico lunghezza d'onda-flusso i valori di esso a $1.6 \mu\text{m}$, a $3.6 \mu\text{m}$ e a $4.5 \mu\text{m}$ (vedi Figura 3.4). Inoltre è stata plottata anche la retta passante per i flussi a $1.6 \mu\text{m}$ e $4.5 \mu\text{m}$ ed è stata calcolata la differenza di flusso a $3.6 \mu\text{m}$ rispetto alla sua proiezione lungo la retta. Questa differenza di flusso presupponiamo che sia proprio l'emissione dell' $\text{H}\alpha$ che stavamo cercando.

Una volta calcolate le differenze di flusso di tutte le galassie tra $4.42 < z < 5.86$ siamo andati a cercare quanti oggetti hanno una differenza superiore a $0.38 \mu\text{Jy}$. Questo valore corrisponde a tre volte il rumore fotometrico che ci aspettiamo per la missione Euclid in banda H e lo utilizziamo per avere una probabilità inferiore allo 0.3% che il flusso sia spurio, cioè dovuto a semplice fluttuazione

del rumore, assumendo che il rumore abbia una distribuzione gaussiana. Quindi abbiamo bisogno di considerare solo galassie molto luminose e per ogni tipologia abbiamo trovato il loro numero per comprendere meglio la loro distribuzione: 6 a spirale, 8 *starburst*, 80 galassie *star-forming* con un AGN intrinsecamente debole, 2406 AGN altamente oscurati con una forte componente di formazione stellare, 297 AGN non oscurati (tipi 1) e 78 AGN oscurati (tipi 2), 5772 nane e 0 passive. Il fatto che non ce ne siano di passive non ci sorprende perché si vede subito dalla Figura 3.3 che esse non sono previste nell'intervallo di *redshift* che consideriamo.

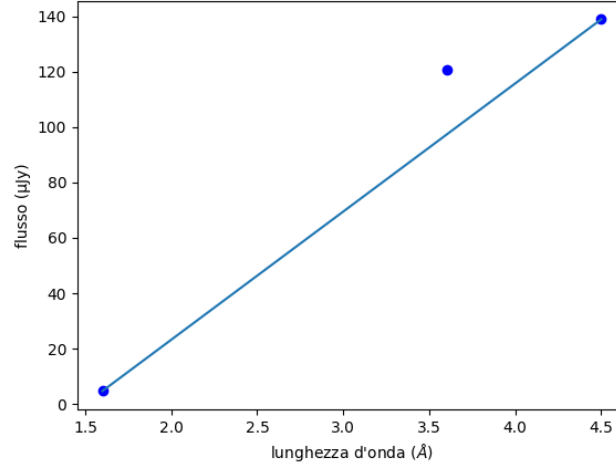


Figura 3.4: Esempio grafico lunghezza d'onda-flusso di un AGN non oscurato (tipo 1) che mostra una differenza di flusso pari a $23,25\mu\text{Jy}$ situata a redshift 4.70

Come passaggio finale ho creato degli istogrammi con le differenze di flusso ΔF calcolate a $4.42 < z < 5.86$ (ad eccezione delle passive che non ci sono nel nostro *range*) e grazie ad essi possiamo vedere la distribuzione del flusso di quella che noi presupponiamo sia l' $\text{H}\alpha$.

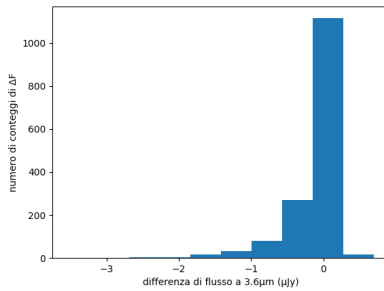


Figura 3.5: Istogramma del flusso delle galassie a spirale

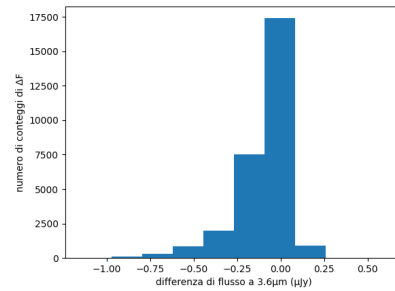


Figura 3.6: Istogramma del flusso delle galassie starburst

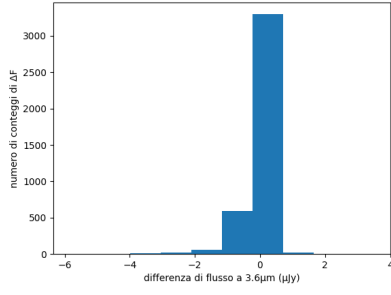


Figura 3.7: Istogramma del flusso delle galassie SF con AGN intrinsecamente debole

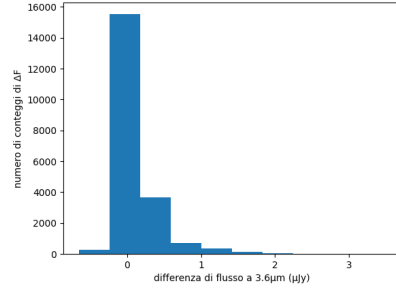


Figura 3.8: Istogramma del flusso delle galassie altamente SF con AGN oscurato

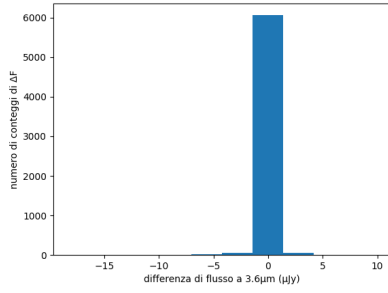


Figura 3.9: Istogramma del flusso delle galassie AGN non oscurato (tipo 1)

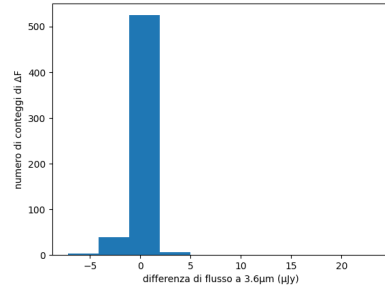


Figura 3.10: Istogramma del flusso delle galassie AGN oscurato (tipo 2)

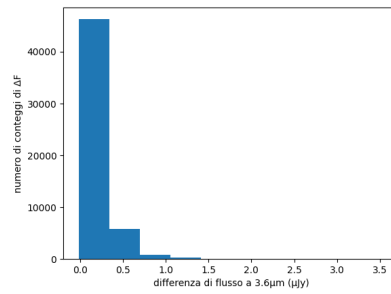


Figura 3.11: Istogramma del flusso delle galassie nane

4

Conclusioni

L'utilizzo della spettroscopia senza fenditura con filtri a banda larga ci consentirà con il lancio del telescopio spaziale Euclid di osservare la riga di emissione dell' $H\alpha$ fino a $z=2$ e dell' $H\beta$ fino a $z=3$, ma per analizzare galassie a *redshift* più elevati occorrerà fare affidamento sui dati fotometrici. Per mezzo del simulatore Spritz è stato possibile creare dei cataloghi simulati di quello che verrà analizzato durante questa missione e in particolare è stata creata una simulazione dei flussi di varie tipologie di galassie. In base alla loro distribuzione è stato possibile fare delle supposizioni sul *redshift* a cui si troverà la riga di emissione di nostro interesse.

Il programma creato quindi consente di identificare le galassie passive da quelle *star-forming* e soprattutto queste ultime si differiscono dalle prime per uno spostamento del flusso a $3.6 \mu\text{m}$ dalla linea del continuo (vedi Figura 3.4). Questo *boost* molto probabilmente è causato dall'emissione dell' $H\alpha$ e quindi sono stati creati degli istogrammi (vedi Figure 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11) per osservare la distribuzione della differenza di flusso che coincide con l'altezza della riga per ogni tipologia di galassie. In questo modo abbiamo utilizzato gli strumenti a nostra disposizione per fare ipotesi su quello che si andrà effettivamente ad osservare in futuro; si potrà confrontare questi risultati teorici con quelli sperimentali e vedere se coincidono o meno. Lo studio di metodi per identificare la riga dell' $H\alpha$ e quindi di galassie *star-forming* non si fermerà qui ma continuerà con il lancio a luglio 2023 di Euclid.

- **Berta S. et al.**, *Panchromatic spectral energy distributions of Herschel sources*, in "Astronomy & Astrophysics", volume 551, marzo 2013;
- **Bisigello L. et al.**, *Simulating the infrared sky with a Spritz*, in "Astronomy & Astrophysics", volume 651, luglio 2021;
- **Caputi K.I. et al.**, *Star formation in galaxies at $z \sim 4-5$ from the *smuvs* survey: a clear starburst/main-sequence bimodality for $H\alpha$ emitters on the $SFR-M^*$ plane*, in "The Astrophysical Journal", volume 849, novembre 2017;
- **Cimatti A.**, *Introduction to galaxy formation and evolution: from primordial gas to present-day galaxies*, in Cimatti A., Fraternali F., Nipoti C., Cambridge University Press, 2020, p. 446-459;
- **Ciroi S. e Cracco V.**, *Dispense di laboratorio di astronomia*, Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Padova;
- **Da Cunha E. et al.**, *A simple model to interpret the ultraviolet, optical and infrared emission from galaxies*, in "Monthly Notices of the Royal Astronomical Society", volume 388, agosto 2008;
- **Gruppioni C. et al.**, *Modelling galaxy and AGN evolution in the infrared: black hole accretion versus star formation activity*, in "Monthly Notices of the Royal Astronomical Society", volume 416, settembre 2011;
- **Gruppioni C. et al.**, *Erratum: The Herschel PEP/HerMES Luminosity Function - I. Probing the Evolution of PACS selected Galaxies to $z \geq 4$* , in "Monthly Notices of the Royal Astronomical Society", volume 436, dicembre 2013;
- **Hummer D. G. & Storey P. J.**, *Recombination-line intensities for hydrogenic ions – I. Case B calculations for H I and He II*, in "Monthly Notices of the Royal Astronomical Society", volume 224, febbraio 1987;
- **Kennicutt R. C.**, *The Global Schmidt Law in Star-forming Galaxies*, in "The Astrophysical Journal", volume 498, maggio 1998;
- **Mather J. C. et al.**, *Measurement of the Cosmic Microwave Background Spectrum by the COBE FIRAS Instrument*, in "Astrophysical Journal", volume 420, gennaio 1994;
- **Osterbrock D. E.**, *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*, in Osterbrock D. E., Ferland G. J., University Science Books, 2006;
- **Saunders W. et al.**, *The 60- μ and far-infrared luminosity functions of IRAS galaxies*, in "Monthly Notices of the Royal Astronomical Society", volume 242, giugno 1990;
- **Soneira R. M. & Peebles P. J. E.**, *A computer model universe: simulation of the nature of the galaxy distribution in the Lick catalog*, in "Astrophysical Journal", volume 83, luglio 1978;
- <https://sci.esa.int/web/euclid>, sito ESA (ultimo accesso: 11 marzo 2023);
- <https://www.euclid-ec.org>, sito Euclid Consortium (ultimo accesso: 12 marzo 2023).