

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Fisica

Lensing gravitazionale alle lunghezze d'onda radio

Relatore:

Prof. Gabriele Giovannini

Presentata da:

Leonardo Trobbiani

Correlatore:

Dott.ssa Cristiana Spingola

Anno Accademico 2019/2020

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Prove osservative della presenza di materia oscura nelle galassie: galassie a spirale	2
1.2	Ammassi di galassie	3
1.3	Lenti Gravitazionali	3
2	Concetti base del lensing gravitazionale	5
2.1	Formalismo del lensing	6
2.2	Lensing gravitazionale alle lunghezze d'onda radio	11
2.2.1	Sorgenti radio di background: AGN	12
2.2.2	Survey radio di lenti gravitazionali	14
3	Un'applicazione cosmologica del lensing gravitazionale	17
3.1	Il problema delle galassie nane	17
3.2	Utilizzo del lensing per cercare satelliti in galassie lontane . .	18
3.3	Soluzioni alle anomalie dei rapporti di flusso	24
4	Conclusioni	26

Abstract

Sin dalla scoperta della prima lente gravitazionale, il fenomeno del lensing si è dimostrato molto importante in diversi ambiti astrofisici. Questa tesi si concentra sull'analisi di lenti gravitazionali per studiare la distribuzione di materia oscura in galassie lontane. In particolare, il numero di galassie satelliti osservate associate alla Via Lattea è molto minore rispetto a quanto predetto dal modello cosmologico standard, in cui si assume materia oscura "fredda". Questo è noto come "problema delle galassie nane" ed ancora non è stato risolto. Il lensing gravitazionale è l'unico metodo per indagare queste scale in galassie molto distanti e, quindi, verificare la validità dell'attuale modello di formazione delle strutture a distanze cosmologiche.

L'elaborato di tesi include una parte di attività sperimentale, in cui abbiamo eseguito delle misure di flussi in tre lenti gravitazionali usando osservazioni interferometriche radio alla risoluzione angolare del milliarcosecondo. Queste misure hanno evidenziato una discrepanza significativa rispetto ai valori teorici. Questo contrasto può essere dovuto alla presenza di galassie nane, che localmente perturbano il potenziale gravitazionale della lente principale, cambiando l'amplificazione delle immagini lensate e, quindi, il flusso. Però queste anomalie in flusso possono essere anche causate da strutture estese di materia barionica, rivelabili da osservazioni nell'ottico e infrarosso. Perciò, è importante utilizzare osservazioni complementari a quelle radio per scoprire la vera origine di questa discrepanza.

Lo studio statistico del numero (attualmente limitato) di lenti con anomalie in flusso è consistente con le previsioni del modello cosmologico standard. La generazione futura di interferometri radio e telescopi ottici osserverà $\sim 10^5$ lenti gravitazionali, quindi sarà possibile avere un campione significativo di questi sistemi "anomali", che ci aiuterà a capire il problema della galassie nane.

Capitolo 1

Introduzione

Tra i problemi irrisolti dell'astrofisica nell'ambito della Cosmologia quello della **materia oscura** (*dark matter*, DM) è uno dei più dibattuti. Non è un problema rigorosamente definito, si tratta infatti di un concetto piuttosto ampio con il quale possiamo spiegare diversi fenomeni astrofisici che presentano analoghe contraddizioni con i modelli teorici. L'esigenza di una componente di materia oscura deriva dal disaccordo tra modelli e osservazioni di materia barionica, comunemente detta anche "luminosa", in quanto emittente radiazione elettromagnetica. Ancora oggi di questa componente oscura non conosciamo la vera natura, ma diversi tipi di osservazioni astrofisiche hanno dimostrato che interagisce solo gravitazionalmente. Queste osservazioni hanno, inoltre, dimostrato che la componente barionica rappresenta solo una piccola parte della massa totale delle galassie.

Tra le prove osservative della presenza di materia oscura nelle galassie, il lensing gravitazionale costituisce una delle più spettacolari e delle più studiate. In questa tesi presentiamo uno studio dell'utilizzo del lensing gravitazionale per investigare la distribuzione di materia oscura in galassie ad alto redshift (cioè a grandi distanze) usando osservazioni astronomiche alle lunghezze d'onda radio. Le osservazioni radio di questi oggetti forniscono delle informazioni che sono un test diretto al modello cosmologico standard (o " Λ CDM").

Nel capitolo 1.1 presentiamo le principali prove osservative della presenza di materia oscura nelle galassie e nel capitolo 2 introduciamo i concetti di base del lensing gravitazionale e delle osservazioni di lenti alle lunghezze d'onda radio. Nel capitolo 3 mostriamo come questi sistemi osservati nel radio possono essere utilizzati per studiare la distribuzione di dark matter in galassie molto distanti. Infine, il capitolo 4 consiste nel compendio e conclusioni di questo lavoro di tesi.

1.1 Prove osservative della presenza di materia oscura nelle galassie: galassie a spirale

Fin dai primi studi della materia barionica nelle galassie, cioè della cinematica della componente di stelle e gas freddo nelle galassie a spirali, è emerso un forte disaccordo tra le osservazioni e i modelli. Secondo i modelli teorici, stelle e gas dovrebbero ruotare attorno al centro della galassia ("bulge") seguendo la legge Kepleriana.

Tuttavia, le curve di rotazione (velocità rotazionale in funzione della distanza dal bulge) hanno rivelato che a distanze molto grandi dal centro la velocità rotazionale del gas freddo *non diminuisce*, come ci si aspetta dalla legge Kepleriana, ma rimane costante (Fig. 1.1). In particolare, le osservazioni del gas molecolare freddo tracciato dall'idrogeno neutro a 21 cm (HI) consentono di mappare il gas fino alle regioni più esterne di una galassia (Fig. 1.1). Perciò è necessario includere una componente che fornisca una massa "extra", necessaria per spiegare l'andamento delle curve di rotazione. Questa componente massiccia (chiamata "alone"), che non emette radiazione e può essere individuata solo grazie al suo effetto gravitazionale, è la *materia oscura* (Rubin 1983 [30], Sancisi 1985 [31] e van Albada & Sancisi 1986 [22]). Le curve di rotazione reali, come mostrato in Fig. 1.1, si adattano molto meglio al modello che prevede l'alone di materia oscura (*dark halo*) rispetto a quello che ammette le sole stelle e gas del disco galattico e, quindi, la sola materia luminosa.

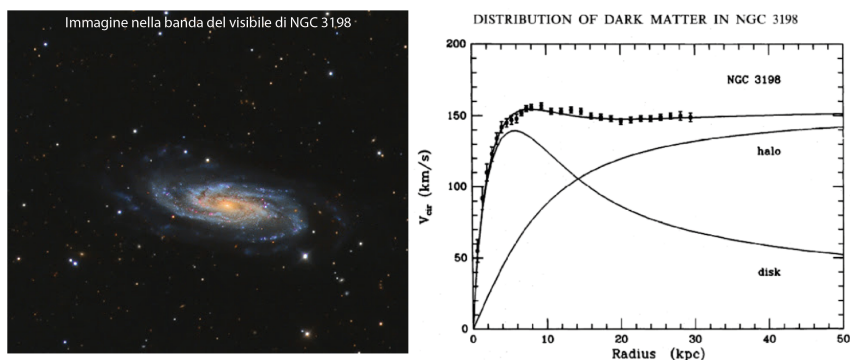


Figura 1.1: (Sinistra) Immagine nella banda del visibile della galassia a spirale NGC 3198 (Credits: Bernard Miller). (Destra) Esempio della curva di rotazione (velocità di rotazione in funzione della distanza radiale dal centro) della galassia NGC 3198 osservata da van Albada e Sancisi, 1986 [22]. I punti e le relative barre d'errore rappresentano le osservazioni, mentre le linee continue indicano le componenti di disco (componente di gas e stelle che segue la legge kepleriana) e alone (materia oscura). Le osservazioni mostrano che la velocità di rotazione rimane costante anche a distanze elevate ($\sim 20 - 30$ kpc) dal centro (0 kpc).

1.2 Ammassi di galassie

Un'altra evidenza osservativa molto forte dell'esistenza della materia oscura deriva dallo studio degli ammassi di galassie. Storicamente, gli ammassi di galassie hanno fornito la prima prova della presenza di materia oscura. Nel 1933 Zwicky trovò che la dispersione di velocità del Coma Cluster era inaspettatamente alta ($\sigma \approx 1000 \text{ km s}^{-1}$) considerando le osservazioni di 8 galassie appartenenti a questo ammasso (Zwicky 1933 [38]). Zwicky concluse, quindi, che era necessario che questo cluster fosse molto più massiccio (400 volte maggiore) di quanto stimato usando solo la radiazione emessa dalle stelle delle galassie dell'ammasso. Perciò, per capire se c'è una componente di materia oscura negli ammassi, è necessario stimarne la massa con un metodo indipendente dal teorema del viriale. Questa stima può essere ottenuta, per esempio, dalle osservazioni ai raggi X, che tracciano l'emissione del gas caldo degli ammassi (Babyk & Vavilova 2014 [36]). Le osservazioni di ammassi ai raggi X hanno rivelato che il gas caldo è molto più esteso dell'emissione ottica (quindi, della luce stellare delle galassie). L'emissione estesa osservata nell'X ha permesso di misurare la temperatura del gas anche nelle regioni più esterne degli ammassi, che è risultata essere molto più alta di quanto predetto dai modelli. Queste altissime temperature non possono essere spiegate dalla presenza della sola materia luminosa (gas e stelle), ma richiedono una sostanziale frazione di materia "invisibile" (materia oscura), dell'ordine del $\sim 85 - 90 \%$ della massa totale dell'ammasso.

1.3 Lenti Gravitazionali

Nel 1979 Walsh [37] osservò con un radio telescopio per la prima volta due sorgenti vicine in proiezione ($\sim 6 \text{ arcsec}$) che presentavano le stesse caratteristiche spettroscopiche. Questa strana coincidenza lo portò a realizzare di aver scoperto il primo sistema di *lensing gravitazionale*. Il lensing consiste nella deformazione dello spazio-tempo dovuta alla presenza di un oggetto massiccio (chiamato "lente") tra osservatore e sorgente. Il risultato di questo effetto è l'osservazione di immagini multiple della stessa sorgente di sfondo (per esempio una galassia o un ammasso di galassie).

Un esempio di questo fenomeno è stato osservato in ABELL 2218 un ammasso di galassie fotografato dal telescopio spaziale *Hubble Space Telescope* (Fig. 1.2) nelle lunghezze d'onda dell'ottico. Già ad una prima occhiata sono ben visibili le peculiari forme ad arco, che rappresentano le immagini delle sorgenti di fondo distorte dalla presenza di un campo gravitazionale in primo piano. La distanza tra le immagini multiple è legata alla massa entro le immagini, quindi è un metodo potente per la stima della massa anche a distanze cosmologiche. Confrontando la massa stimata dalla luce

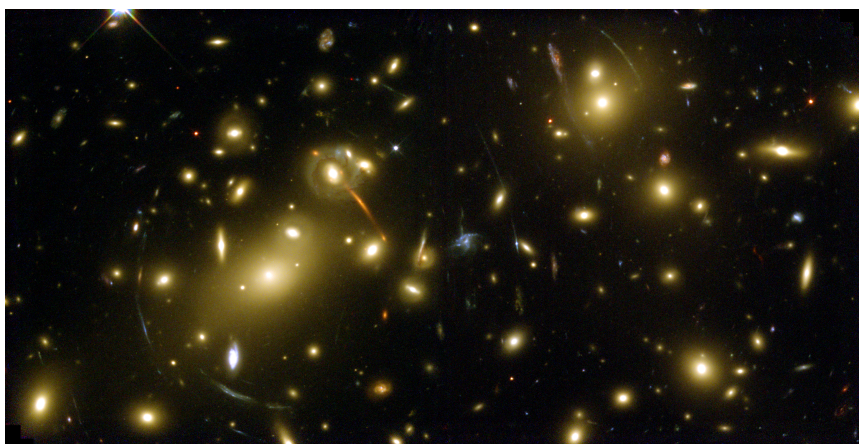


Figura 1.2: Immagine ottenuta con il telescopio spaziale *Hubble* di Abell 2218, un ammasso di galassie nella costellazione del Drago distante 2 miliardi di anni luce. La sua enorme massa provoca un effetto di lente gravitazionale estremamente intenso e gli "archi" ne sono la manifestazione. Crediti: NASA, Andrew Fruchter and the ERO Team [Sylvia Baggett (STScI), Richard Hook (ST-ECF), Zoltan Levay (STScI)] (STScI).

stellare e quella stimata dalla distanza tre le immagini multiple sorgono delle incongruenze. Questi valori contrastanti conducono alla conclusione che oltre alla materia barionica sia presente una componente di massa "invisibile", in quanto non emette radiazione (materia oscura).

Il lensing gravitazionale è, quindi, un metodo molto potente per stimare la frazione di materia oscura nelle galassie, ingrediente importante nelle simulazioni cosmologiche.

Capitolo 2

Concetti base del lensing gravitazionale

La prova osservativa su cui porremo l'attenzione in questa tesi è il **lensing gravitazionale** (*gravitational lensing*), di cui abbiamo brevemente parlato nel Capitolo 1.3. Il lensing gravitazionale è una conseguenza diretta della teoria della Relatività Generale (Einstein 1916 [26]), che prevede la curvatura dello spazio-tempo. Le lenti gravitazionali sono studiate approfonditamente in astrofisica sia per il loro utilizzo strumentale nella rilevazione di oggetti a grandi distanze, sia per l'interesse dei fenomeni in sé come evidenze della Relatività.

Il concetto chiave è la **deflessione della luce**. Sebbene sia stata studiata in ottica in modo estensivo, compare legata alla gravità solo nel 1783 quando John Mitchell propone a Henry Cavendish un modo per misurare la massa delle stelle attraverso la riduzione di velocità della luce per effetto della gravità mentre i corpuscoli di luce attraversano il campo gravitazionale della stella fino alla Terra. Probabilmente intorno al 1784 Cavendish calcolò la deflessione della luce per la prima volta, non pubblicò mai i suoi risultati ma furono trovati i suoi appunti successivamente. I calcoli di Cavendish e il documento ufficiale pubblicato da Johann Soldner (1801) sull'argomento rappresentano solo la metà della vera deflessione a cui va aggiunta la curvatura dello spazio-tempo intorno ai corpi massicci.

Utilizzando solo il principio di equivalenza, Einstein mostra che i corpi massicci possono deviare la luce. Una delle due formulazioni, quella più *forte* del principio di equivalenza (Einstein 1907 [25]) stabilisce che:

«in un campo gravitazionale qualsiasi, è sempre possibile scegliere un sistema di riferimento, nell'intorno di ogni punto, dove gli effetti dell'accelerazione dovuti al campo gravitazionale sono nulli.»

In altre parole possiamo dire che accelerazione e gravità non possono essere distinti, quindi un corpo in caduta libera non percepisce il campo

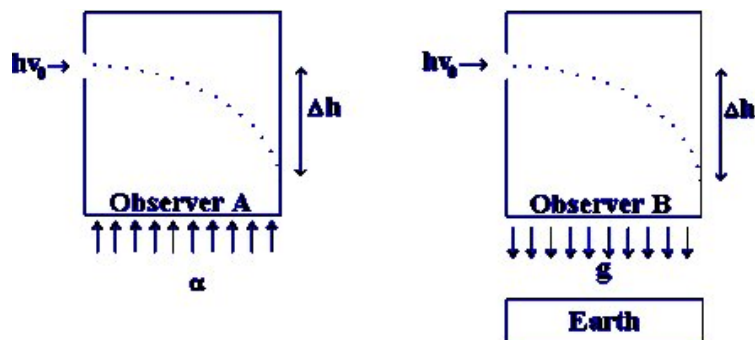


Figura 2.1: Apparato teorico dell'esperimento ideale proposto da A. Einstein, per spiegare senza le equazioni di stato della relatività, la deflessione della luce a causa del campo gravitazionale. Questo esperimento è spiegato in dettaglio nell'introduzione del Capitolo 2.

gravitazionale e un corpo in accelerazione può interpretare la forza inerziale percepita come dovuta ad un campo gravitazionale.

Supponiamo che l'osservatore sia situato in una scatola con un buco sul lato sinistro (sistema mostrato in Fig. 2.1): se la scatola è accelerata verso l'alto, l'osservatore interpreterà la forza inerziale su di sé come un campo gravitazionale agente verso il basso. Supponiamo che un raggio di luce entri nel foro a sinistra e si propaghi verso destra. Dato che la scatola si muove verso l'alto il raggio si scontrerà contro la parete opposta in un punto più in basso rispetto a quando è entrato, perciò se la scatola è accelerata la luce appare curva. Ora, basandoci sul principio di equivalenza, la luce deve essere deviata dalla gravità. Infatti, se immaginiamo l'esperimento inverso: sia la scatola ferma e sottoposta ad un campo gravitazionale verso il basso con intensità pari da provocare lo stesso effetto dell'accelerazione di prima. Se la luce non fosse deflessa dalla gravità, allora l'osservatore avrebbe la possibilità di distinguere tra gravità e accelerazione. Quindi si violerebbe il principio di equivalenza.

2.1 Formalismo del lensing

Secondo la teoria della Relatività Generale la deflessione della luce è descritta da *curve geodesiche* che seguono la curvatura dello spazio-tempo, determinata dalla presenza di massa. Una geodesica è la generalizzazione della linea retta in uno spazio non piatto. Quindi, con geodesica si intende la curva che rappresenta la distanza più breve tra due punti in uno spazio curvo. Dato che il raggio di luce percorre una geodesica, esso viene deviato conformemente alla distribuzione di massa che provoca la curvatura. Questo è il concetto alla base del fenomeno del *lensing gravitazionale*, che avviene se tra noi

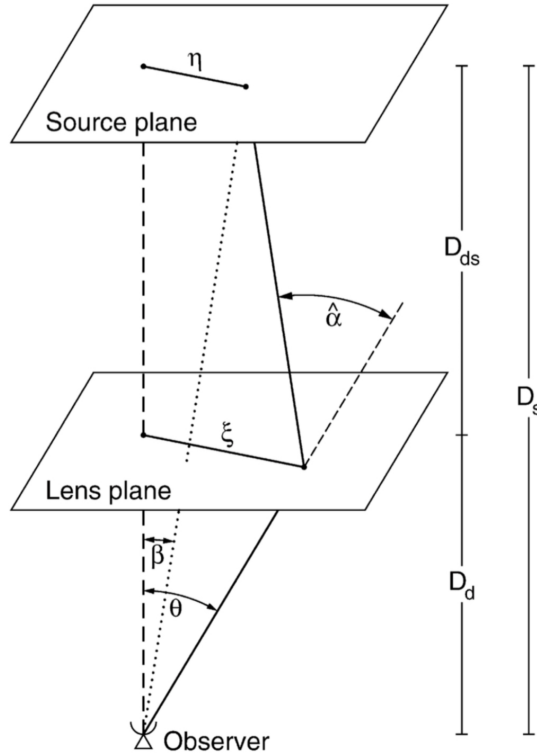


Figura 2.2: Schema di un tipico sistema di lente gravitazionale in cui c'è un osservatore (*observer*), un oggetto massiccio che funge da lente e si trova sul piano chiamato "lens plane" e un oggetto di sfondo che si trova sul "source plane". Immagine adattata da Bartelmann & Schneider, 2001 [33].

(osservatori) e una sorgente di sfondo si trova un oggetto massiccio, chiamato "lente".

Sono necessarie alcune approssimazioni per condurre uno studio analitico del fenomeno. La più importante è l'approssimazione dello *schermo sottile* le dimensioni della galassia lensante sono molto minori della distanza relative tra sorgente, lente e osservatore (in Fig. 2.2 sono D_{ds} , D_d e D_s). Anche la sorgente è da considerarsi giacente su di un piano, il piano-sorgente. L'angolo di deflessione della luce della sorgente in background $\vec{\alpha}$ si determina tramite la cosiddetta *equazione della lente*:

$$\vec{\beta} = \vec{\theta} - \vec{\alpha}(\vec{\theta}) \quad (2.1)$$

che indica che una sorgente nella posizione angolare $\vec{\beta}$ è osservata dall'osservatore in $\vec{\theta}$ (come mostrato in Fig. 2.2).

La deflessione della luce a causa della presenza di un oggetto massiccio è la causa dei seguenti effetti:

- la luce può percorrere più geodesiche curve, quindi "attorno" ad un oggetto massiccio. L'osservatore che vede l'immagine lungo la tangente di ogni raggio vedrà quindi **immagini multiple** di una singola sorgente di sfondo. La grandezza che regola la possibilità di immagini multiple è la densità superficiale di massa della galassia lensante (Σ), cioè il valore centrale della distribuzione di densità deve essere maggiore di un certo valore critico (Σ_{crit}). Una galassia lensante assialmente simmetrica può produrre immagini multiple, se vale la seguente condizione:

$$\Sigma \geq \Sigma_{crit}, \quad \Sigma_{crit} = \frac{c^2}{4\pi G} \frac{D_s}{D_{ls}D_l}. \quad (2.2)$$

Se la sorgente si trova esattamente dietro la galassia lensante con un potenziale gravitazionale a simmetria circolare l'immagine che ne risulta sarà di forma anulare. Questo tipo di immagine è chiamata *anello di Einstein* (e.g., si veda Fig. 2.3). Il raggio di Einstein, θ_E dipende dalle distanze tra gli elementi del sistema lente gravitazionale e dalla massa del deflettore:

$$\theta_E = \left(\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{ls}}{D_l D_s} \right)^{1/2} \quad (2.3)$$

dove G è la costante gravitazionale, c è la velocità della luce, e M è la massa della lente all'interno del raggio di Einstein. Il raggio di Einstein non è un parametro importante solo nei casi in cui si formi l'anello, ma può essere stimato anche per qualunque sistema multiplo di immagini dato che la separazione angolare tipica delle immagini lensante è dell'ordine di $2\theta_E$, il suo valore teorico si ottiene in maniera precisa durante il *lens modelling*¹.

Il raggio di Einstein è, quindi, una delle proprietà più importanti della lente gravitazionale in quanto fornisce una stima della massa racchiusa in θ_E che include sia la componente luminosa sia la materia oscura. Per fare una stima corretta è necessario inoltre conoscere con precisione il redshift della lente e della sorgente.

- La deflessione della luce avviene in maniera diversa in base alla distanza a cui il raggio sta passando intorno alla lente. Il raggio che passa più vicino al deflettore sarà più distorto rispetto a un raggio che passa ad una distanza maggiore. La conseguenza di questo effetto è che le immagini multiple sono distorte in maniera differente l'una dall'altra. I parametri che regolano la distorsione delle immagini sono chiamati *convergenza* (κ) e *shear* (γ). Il primo stabilisce la dimensione dell'immagine, il secondo l'allungamento dell'immagine in una certa

¹Processo di modello di massa della lente

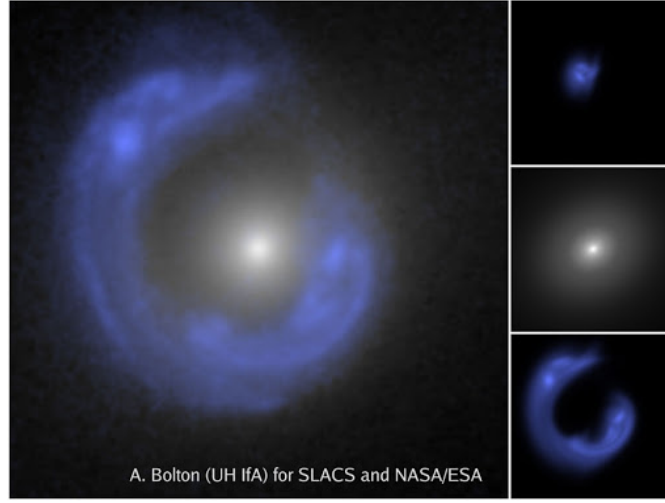


Figura 2.3: L'immagine di sinistra in grande mostra un esempio di anello (incompleto) di Einstein formato dalla galassia sorgente in background, in blu, causato dalla presenza di una galassia ellittica, che si trova al centro dell'anello. Le immagini di destra a partire dall'alto sono: la ricostruzione della sorgente di sfondo, la galassia-lente e l'anello di Einstein (a cui è stato sottratto il profilo di luce della lente). Credits: A. Bolton (UH/IfA) for SLACS and NASA/ESA.

direzione. In Fig. 2.4 è mostrata una rappresentazione schematica di κ e γ . La convergenza dipende dalla densità superficiale della lente (Σ), come

$$\kappa = \frac{\Sigma}{\Sigma_{crit}}. \quad (2.4)$$

Inoltre, la convergenza può essere espressa in funzione del potenziale gravitazionale di lente, Φ :

$$\kappa = \nabla^2 \Phi \quad (2.5)$$

- **La brillantezza superficiale si conserva**, quello che cambia è l'angolo solido sotto cui la sorgente è osservata. Perciò, le immagini più estese sono anche le più brillanti e quelle più compatte sono le più deboli. Questa proprietà del lensing è sintetizzata nel *magnification factor* (μ), parametro associato ad ogni immagine, che consiste nel rapporto tra l'area dell'immagine (sul piano della lente) e l'area intrinseca della sorgente, e dipende da convergenza e shear come segue:

$$\mu = \frac{1}{[(1 - \kappa)^2 - \gamma^2]}. \quad (2.6)$$

Il magnification factor è definito come il determinante di un tensore chiamato *tensore di ingrandimento*. Gli autovalori di questo tensore

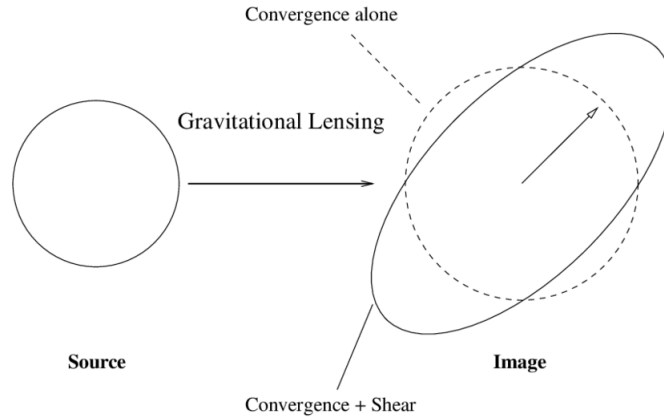


Figura 2.4: Rappresentazione schematica dell'effetto di distorsione di convergenza e taglio sulla forma e dimensione di una ipotetica sorgente circolare. Immagine da Keiichi Umetsu, 2010 [35].

misurano l'amplificazione nella direzione tangenziale e radiale e sono dati da

$$\mu_t = \frac{1}{\lambda_t} = \frac{1}{1 - \kappa - \gamma} . \quad (2.7)$$

$$\mu_r = \frac{1}{\lambda_r} = \frac{1}{1 - \kappa - \gamma} . \quad (2.8)$$

L'ingrandimento è idealmente infinito dove $\lambda_t = 0$ e $\lambda_r = 0$. Queste due condizioni definiscono due curve nel piano della lente, chiamate *curve critiche* rispettivamente *tangenziale* e *radiale*. Un'immagine che si sviluppa lungo la curva tangenziale sarà distorta e ingrandita fortemente lungo questa linea, mentre un'immagine che si forma vicino la curva critica radiale sarà stirata nella direzione perpendicolare alla curva stessa.

Le curve critiche presentano delle corrispondenti nel piano della sorgente che si chiamano *caustiche*, che possono intersecarsi.

- Dal momento che i raggi percorrono geodesiche di lunghezze diverse in base all'immagine, sarà differente anche il tempo di percorrenza per diverse immagini. Quindi, per esempio, una variazione di flusso di una delle immagini verrà osservata con un certo ritardo nelle altre immagini della stessa sorgente. Questo **ritardo gravitazionale** dipende dalla distribuzione di massa della lente e dalle diverse distanze tra lente, sorgente e osservatore. Per questo motivo la misura di un ritardo gravitazionale è legata al parametro di Hubble e, quindi, rappresenta un importante test cosmologico (Refsdal 1964 [29]).
- Le geodesiche che descrivono la deflessione della luce a causa di un corpo massiccio sono associate ad una metrica il cui elemento di linea ds^2 è

nullo (*light-type*, tipo luce). Questo ha come conseguenza l'indipendenza della deflessione della luce dalla lunghezza d'onda e quindi il fatto che il lensing sia **acromatico**.

È consuetudine distinguere tre regimi di *lensing*: forte (strong), debole (weak) e micro. Si osserva lo strong lensing quando all'osservatore appaiono più immagini della sorgente; ciò richiede una lente che crei un campo gravitazionale molto forte e un allineamento molto ravvicinato tra lente e sorgente. Quando il campo gravitazionale del deflettore non è abbastanza forte da creare immagini multiple, allora l'effetto osservabile è solo una distorsione generica delle immagini rilevabile solo in senso statistico. Questo fenomeno è chiamato weak lensing.

Per ragioni storiche e pratiche, quando la separazione angolare tra le immagini è estremamente piccola parliamo di *microlensing*. Questo nome deriva dalla tipica separazione angolare creata dal campo gravitazionale di una stella, che è dell'ordine dei microarcosecondi.

In questa tesi ci concentreremo sul fenomeno dello strong lensing nel contesto dello studio della distribuzione di dark matter nelle galassie.

2.2 Lensing gravitazionale alle lunghezze d'onda radio

I sistemi di lenti gravitazionali in cui la sorgente di sfondo emette alle lunghezze d'onda radio hanno diversi vantaggi. In primis l'emissione radio non viene né oscurata né arrossata dalla polvere o dall'emissione ottica luminosa della galassia, perciò le immagini lensate sono identificabili facilmente e la densità di flusso può essere misurata con precisione.

Un altro vantaggio specifico delle sorgenti radio è che data la loro struttura estesa, solitamente talvolta di archi gravitazionali.

Le galassie ellittiche tipicamente agiscono da lenti gravitazionali hanno una massa di circa $10^{11-12}M_{\odot}$, perciò la separazione tipica delle immagini multiple si aggira intorno all'arcosecondo. Per poter risolvere spazialmente le immagini multiple serve, quindi, una risoluzione ben inferiore all'arcosecondo. È inoltre necessario aumentare ulteriormente la risoluzione, fino al miliardesimo (mas), per poter ottenere un'astrometria precisa delle immagini della lente, necessaria per stimare con precisione la distribuzione di massa della lente.

La risoluzione angolare, ϑ , di uno strumento si calcola utilizzando la relazione dell'ottica classica chiamata *criterio di Rayleigh*, $\vartheta \sim \lambda/D$ dove λ è la lunghezza d'onda di osservazione e D il diametro dell'apertura che raccoglie la luce, lo specchio nei telescopi che osservano nella banda visibile. Nella banda radio (lunghezze d'onda del cm e mm) gli specchi sono antenne paraboliche di dimensioni molto grandi, necessarie per ottenere una risolu-

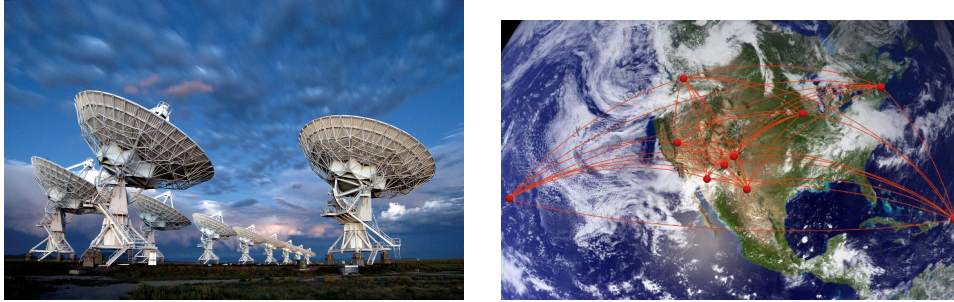


Figura 2.5: (Sinistra) Foto dell'interferometro Very Large Array (VLA), che si trova a Socorro (New Mexico). (Destra) Posizione delle antenne facenti parte del Very Long Baseline Array (VLBA), distribuite su tutta l'estensione del suolo statunitense. La distanza massima tra due delle antenne (baseline) del VLBA è di ~ 10000 km. Questo tipo di baselines consente di raggiungere una risoluzione angolare del mas a lunghezze d'onda centimetriche. Immagini da National Radio Astronomical Observatory (NRAO).

zione angolare elevata. Per avere una risoluzione angolare di 0.5 arcsec, per esempio, con una lunghezza d'onda di 21 cm servirebbe un'antenna di ~ 100 km di diametro. Si presentano quindi evidenti problemi pratici di logistica e di costi.

È grazie alla natura peculiare delle rilevazioni in onde radio che si può risolvere questo problema e ottenere risoluzioni dell'ordine dei milliarcsec (mas) utilizzando un processo definito *interferometria*. L'interferometria consiste nel collegare in maniera coerente numerose antenne distanti tra di loro. Le antenne agiscono come se fossero un unico radio telescopio di diametro pari alla massima distanza tra due antenne, chiamata "baseline". Quando le antenne sono separate da centinaia (o migliaia) di km si parla di Very Long Baseline Interferometry (VLBI) in cui le antenne possono essere sparse anche in diversi continenti. Questa tecnica consente, quindi, di studiare le lenti gravitazionali alle più alte risoluzioni angolari.

L'interferometria presenta però un ristretto campo di vista, di circa qualche decina di arcsec. Questo, tuttavia non costituisce un problema nello studio degli *strong lensing systems*, in quanto la separazione delle immagini è tipicamente di qualche arcsec.

2.2.1 Sorgenti radio di background: AGN

Tra i molteplici oggetti che possono svolgere la funzione di sorgenti di sfondo i nuclei galattici attivi (AGN) rappresentano di gran lunga gli oggetti più luminosi e, quindi, più facili da osservare. Gli AGN sono dei buchi neri supermassicci "attivi": rappresentano circa il 10% della popolazione totale di buchi neri galattici, ma emettono una quantità di radiazione molto superiore a quella dell'intera galassia. Questa energia deriva dall'accrescimento della materia da parte di questi buchi neri, la cui massa può andare dalle 10^6 fino a

$10^{10} M_{\odot}$. Gli AGN che emettono nel radio sono particolari perché presentano dei getti collimati di plasma ionizzato e accelerato dalla presenza di campi magnetici. Questi getti possono essere anche ben più estesi della galassia ospite. Il processo di radiazione non-termico principale che avviene nei getti è quello di *sincrotrone*, che è osservabile alle lunghezze d'onda radio. In base alle diverse caratteristiche osservative, spesso gli AGN vengono classificati in due classi chiamate *radio-quiet* (senza getti) e *radio-loud* (con i getti), alle quali appartengono diverse categorie di oggetti. Gli oggetti radio-loud sono dominati in luminosità dai getti e dai lobi. Tra i radio-loud si trovano:

- Radio-loud quasar
- BL Lac (Blazar)
- OVV(Optically Violet Variables)
- Radiogalassie

Tra i radio-quiet:

- LINERs (Low-ionization nuclear emission-line region)
- Galassie di Seyfert
- Radio-quiet quasar

Il cosiddetto "modello unificato" spiega le diverse classi di AGN semplicemente tramite orientazione (Urry & Padovani 1996 [28]). Questo modello è illustrato in Figura 2.6. Le componenti che costituiscono un AGN sono: il buco nero super massiccio circondato dal "disco di accrescimento" che produce lo spettro continuo ottico/UV/X; la *broad line region* con dense nubi in movimento a grande velocità dove avviene la fotoionizzazione del gas interstellare da parte dello spettro continuo e quindi l'allargamento delle righe spettrali, questa regione è circondata da un toro di materiale otticamente opaco. Fuori dal toro si ha la *narrow line region* in cui la densità è minore e le nubi più lente.

Nei radio-loud AGN dal nucleo può emergere un getto relativistico, molto brillante nella banda radio. Questo tipo di AGN (con getti) costituisce solo il 10% degli AGN. Perciò sono degli oggetti molto rari e la probabilità di osservarne uno soggetto al lensing gravitazionale è molto bassa ($P \sim 10^{-3}$). Un esempio studiato approfonditamente è il nucleo della galassia ellittica M87 (Fig. 2.7), che è stato osservato con diversi strumenti di risoluzione angolare sempre maggiore a partire dal VLA per risolvere i lobi, il Very Long Baseline Array (VLBA) per osservare i getti di plasma accelerati dai campi magnetici fino al Event Horizon Telescope (EHT), che ne ha fotografato l'orizzonte degli eventi (EHT collaboration 2019 [23]).

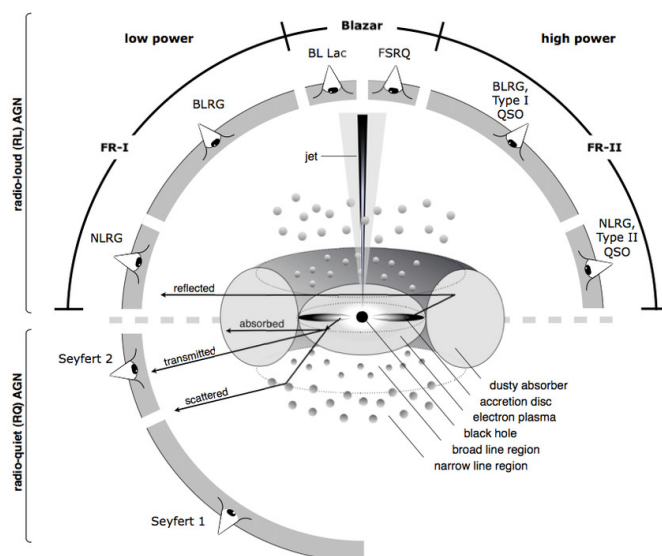


Figura 2.6: Rappresentazione grafica del modello unificato degli AGN (descritto in Sec. 2.1.1), dove sono indicate le componenti; a partire dal centro si ha: il buco nero da cui può emergere il getto relativistico, il disco di accrescimento intorno al SMBH, la broad line region, il toro di polvere e la narrow line region. Inoltre sono evidenziati gli oggetti astronomici che appaiono dall'osservazione dell'AGN a seconda dell'angolo di osservazione. Immagine da Beckmann & Shrader (2012) [34].

2.2.2 Survey radio di lenti gravitazionali

Sistemi di lenti gravitazionale nella banda radio sono stati trovati utilizzando MIT Green Bank Survey (Hewitt et al. 1988 [5]), la survey JVAS/CLASS (Browne et al. 2003 [2], Myers et al. 2003 [17]) e la survey VLBI mJIVE-20 (Spingola et al. 2019 [18]). In totale si conoscono circa 200 lenti gravitazionali, di cui solo una trentina radio-loud.

Tuttavia, la maggior parte delle lenti gravitazionali scoperte in questo modo ha una struttura compatta e le immagini multiple irrisolte pongono solo pochi vincoli al modello di massa della lente. Questo perché molti di questi oggetti sono stati scoperti attraverso una ricerca sistematica di sorgenti radio a spettro *piatto*, che sono tipicamente compatte se osservate, per esempio, con il Very Large Array. Un esempio di questi oggetti è mostrato in Figura 2.8. In alcuni casi, la struttura radio della sorgente di sfondo è stata risolta in anelli di Einstein e archi gravitazionali estesi tramite VLBI, come per MG J0414+0534, B1933+503 e B1555+375 (Fig. 2.8). In questi casi, i vincoli extra forniti dagli archi estesi hanno rivelato che il modello di massa della lente non poteva essere spiegato da un semplice alone isothermico di materia oscura, ma sono necessarie strutture di massa aggiuntive (per esempio, galassie nane o dischi esponenziali come quelli delle galassie a spirale) per riprodurre le posizioni relative e i flussi delle immagini osservate

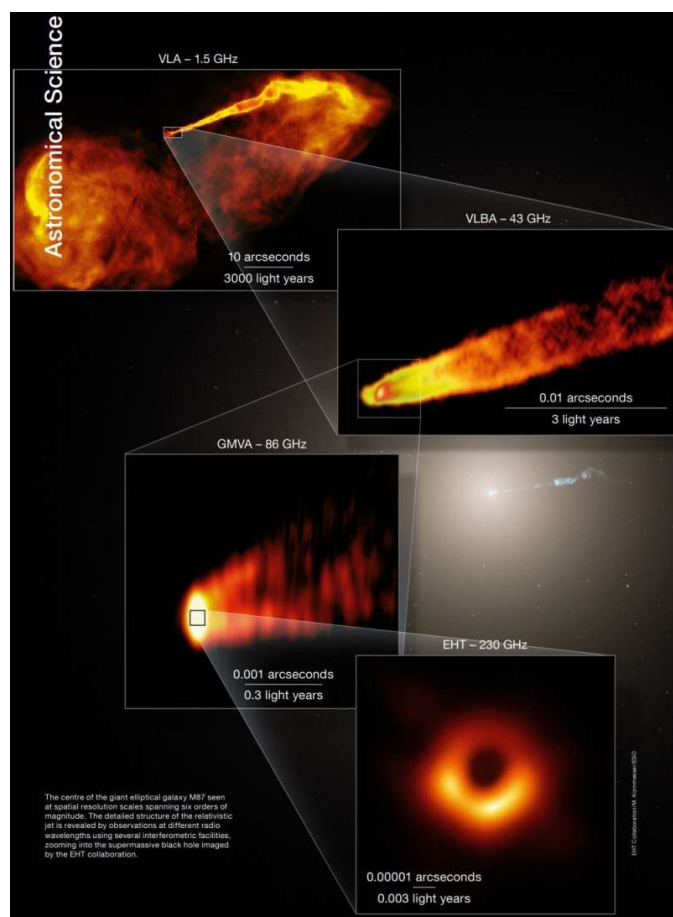


Figura 2.7: Composizione di osservazioni a risoluzione angolare crescente del nucleo della galassia ellittica M87, un AGN radio-loud vicino a noi, mostra la potenza delle osservazioni VLBI. La struttura dettagliata dei jet relativistici è rilevata dalle osservazioni in diverse lunghezze d'onda radio utilizzando diversi sistemi interferometrici a partire da VLA in alto dove si notano i due lobi generati dall'incontro con il mezzo interstellare dei jet. La risoluzione angolare maggiore si è ottenuta tramite l'interferometro EHT, che ha permesso la prima osservazione dell'ombra di un SMBH.

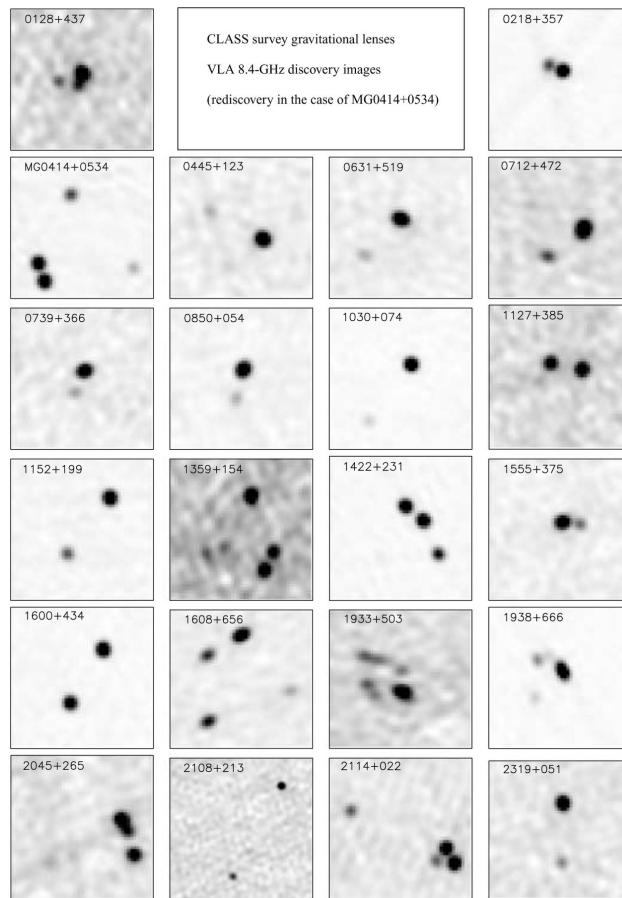


Figura 2.8: Lenti gravitazionali scoperte nella survey radio "JVAS/CLASS" (Browne et al. 2003 [2], Myers et al. 2003 [17]). Queste immagini sono state ottenute con il Very Large Array mostrato in Fig. 2.5.

(MacLeod et al. 2013 [13]). Questo aspetto verrà investigato in altri tre sistemi gravitazionali e discusso nel prossimo capitolo.

Capitolo 3

Un'applicazione cosmologica del lensing gravitazionale

3.1 Il problema delle galassie nane

Il modello cosmologico che è attualmente considerato standard è il modello Λ CDM dove Λ è la costante cosmologica e indica la componente di energia oscura mentre CDM è l'acronimo per *cold dark matter*. Questo modello prevede che la materia oscura sia caratterizzata da particelle massicce, lente e quindi fredde. Questo modello riesce a riprodurre molto bene la struttura su larga scala dell'Universo (come mostrato in Fig. 3.1), ma sulle piccole scale (cioè quelle galattiche e sub-galattiche) presenta alcuni problemi tutt'ora irrisolti. Uno di questi problemi su piccola scala è il *missing satellite problem* (MSP, Moore et al. 1999 [16], Klypin et al. 1999 [10]), o "problema delle galassie nane". Questo problema si riferisce alla sovrabbondanza di piccoli aloni (sub-halos) di materia oscura, cioè le galassie nane, che il modello Λ CDM prevede comparata con il numero di galassie nane, o satellite, che sono presenti nel Gruppo Locale (Fig. 3.2). Non è chiaro se queste galassie, essendo dominate dalla materia oscura, sono troppo deboli per essere osservate con i telescopi attuali, oppure se effettivamente non ci sono. In quest'ultimo caso, un modo che può spiegare l'assenza delle galassie nane intorno a galassie simili alla Via Lattea è "cambiare" la massa della particella di materia oscura. Assumendo una massa della particella di materia oscura più leggera (*warm*) i modelli cosmologici prevedono un numero di satelliti molto inferiore rispetto ai modelli CDM e confrontabile con il numero di galassie nane associate gravitazionalmente alla Via Lattea (Fig. 3.3).

Per verificare se questo problema è presente al di fuori del Gruppo Locale, è necessario osservare questi satelliti (dominati dalla dark matter) in galassie lontane. L'unico metodo per osservarli è il lensing gravitazionale.

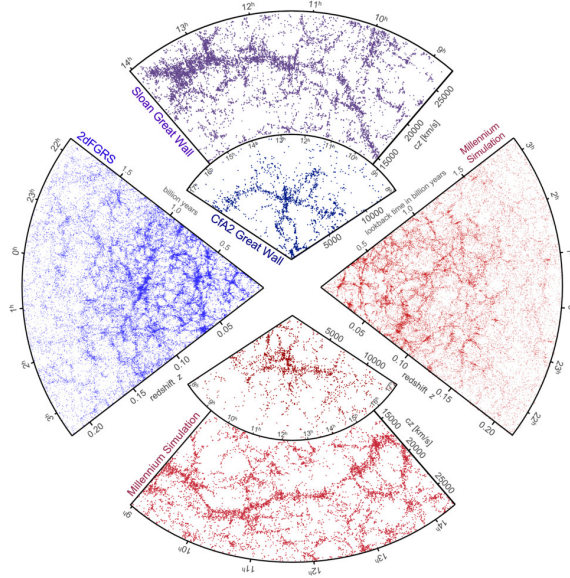


Figura 3.1: Struttura a "ragnatela cosmica" dell'Universo su larga scala dalle osservazioni (2dF Galaxy Redshift Survey) in blu e viola e dalle simulazioni in rosso (Millennium simulation). Credits: Lemson and the Virgo consortium.

3.2 Utilizzo del lensing per cercare satelliti in galassie lontane

Quello che osserviamo delle immagini di lensing sono il flusso e la posizione delle immagini. Con gli strumenti più avanzati di interferometria, come VLBI, si ottiene una risoluzione estremamente elevata per la misurazione delle posizioni, ma anche una stima molto precisa del flusso.

Un metodo efficace che si utilizza per trovare sub-halos (in proiezione) associati con la galassia lente è quello di misurare il flusso delle immagini lensate in sistemi che presentano 4 immagini multiple. Per questi sistemi il rapporto dei flussi delle immagini più brillanti deve rispettare precise relazioni. Stiamo parlando di sistemi di lensing che presentano 4 immagini disposte in due particolari configurazioni: *cusp configuration* e *fold configuration* (mostrate in Fig. 3.4). Per questi sistemi valgono le seguenti relazioni:

$$R_{cusp} \equiv \frac{F_A - F_B + F_C}{F_A + F_B + F_C} = 0 \quad \text{Cusp configuration} \quad (3.1)$$

$$R_{fold} \equiv \frac{F_A - F_B}{F_A + F_B} = 0 \quad \text{Fold configuration} \quad (3.2)$$

dove F è la densità di flusso dell'immagine, per le lettere associate alle immagini prendiamo come esempio la figura 3.4. Se le osservazioni non corrispondono alle previsioni teoriche delle relazioni 3.1 e 3.2, cioè R_{fold} e

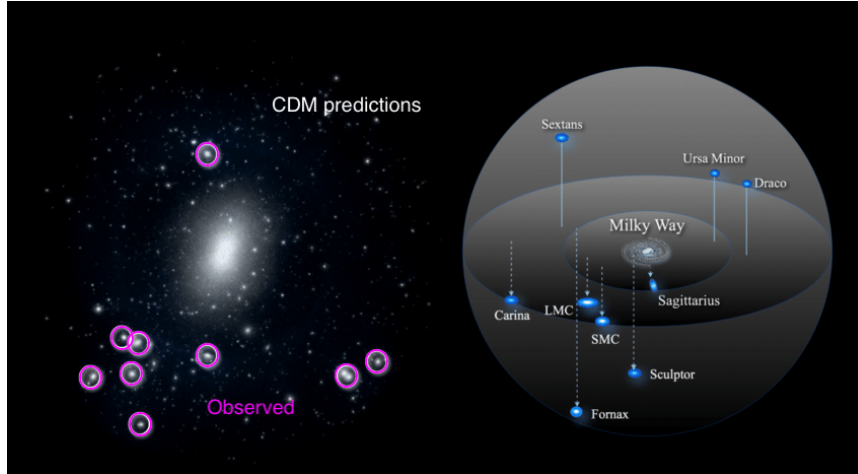


Figura 3.2: Illustrazione del "missing satellite problem" (o problema delle galassie nane) per la Via Lattea. A sinistra c'è una simulazione della sola componente di materia oscura in cui sono indicati in magenta i sub-halos più massicci, che corrispondono a quelli attualmente associati gravitazionalmente alla Via Lattea (indicati con il proprio nome nella figura a destra). Credits: Weinberg et al. 2013, NAS Sackler symposium on Dark Matter [20].

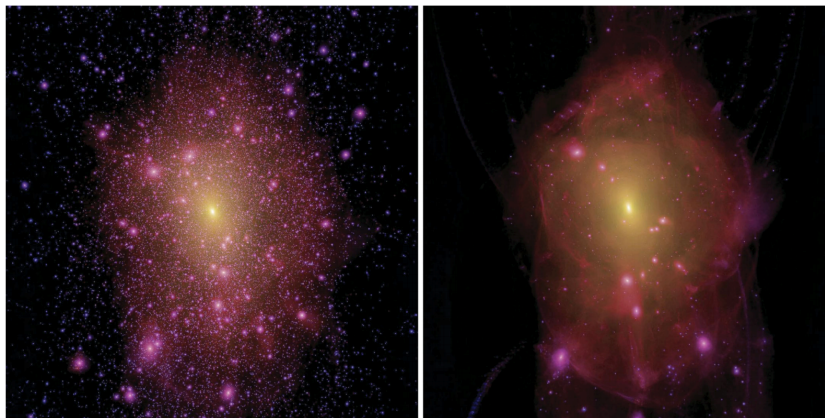


Figura 3.3: Simulazioni di una galassia di massa pari a quella della Via Lattea del caso di *cold dark matter* (sinistra) e *warm dark matter* (destra). Nello scenario CDM il numero di sub-halos (satelliti) associati all'alone principale (al centro) è molto più alto rispetto al modello con la WDM. Da Lovell 2012 [12].

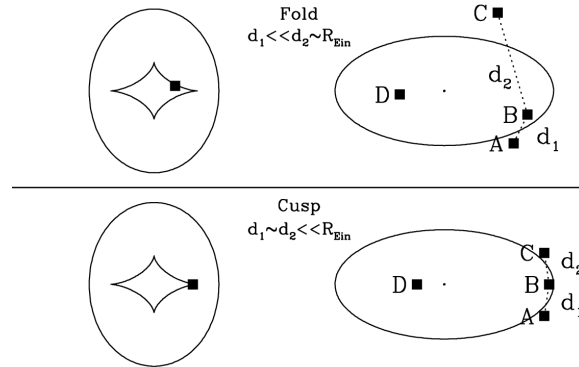


Figura 3.4: Rappresentazione grafica dei modelli di configurazione Fold (in alto) e Cusp (in basso) con la posizione della sorgente rispetto alle caustiche nel piano sorgente (a sinistra) e le posizioni delle 4 immagini di lensing rispetto alle curve critiche nel piano della lente (a destra). Credits: Keeton et al. 2003 [9].

R_{cusp} sono diversi da 0 (Schneider, 1992 [32]), allora ci deve essere qualcosa che perturba localmente il potenziale gravitazionale della lente (quindi il fattore di magnificazione μ). Questa perturbazione locale può essere data dai sub-halos (galassie satelliti) associati alla galassia-lente.

Come introdotto nel Capitolo 2.2, i sistemi lensati osservati alle lunghezze d'onda radio hanno diversi vantaggi e, in particolare, il flusso osservato delle immagini è robusto, in quanto non disturbato da effetti dovuti alla polvere interstellare né dal microlensing. Quindi la verifica delle fold e cusp relations tramite le osservazioni radio è particolarmente affidabile.

I sistemi analizzati in questo lavoro di tesi sono B0128+437 (fold), B0712+472 (fold) e B1422+432 (cusp), rispettivamente nelle figure 3.5, 3.6 e 3.7. Le osservazioni interferometriche sono state ottenute con il Very Long Baseline Array (VLBA) a 1.7 GHz (risoluzione angolare di ~ 10 mas, Principal Investigator: Spingola, ID:BS257, BS251). Ciascun sistema è stato osservato per 12 ore, per ottenere delle immagini molto sensibili che consentissero di studiare con alta precisione la morfologia e la densità di flusso delle immagini lensate.

Prima di verificare le anomalie del flusso delle immagini abbiamo stufo la morfologia di queste immagini. Nel caso del sistema B0128+437 (Fig. 3.5) le immagini A e B dovrebbero assumere una simmetria speculare e avere una forma uguale tra di loro (che non si osserva), anche per le controimmagini C e D, anche se meno visibilmente, ci sono delle contraddizioni con il modello di massa in quanto il flusso misurato non è quello che ci aspettiamo. Per B0712+472 abbiamo una delle immagini (image D) che è praticamente invisibile rispetto ad A e B, che presentano inoltre delle anomalie alla morfologia prevista. Infine il sistema B1422+432 non presenta anomalie

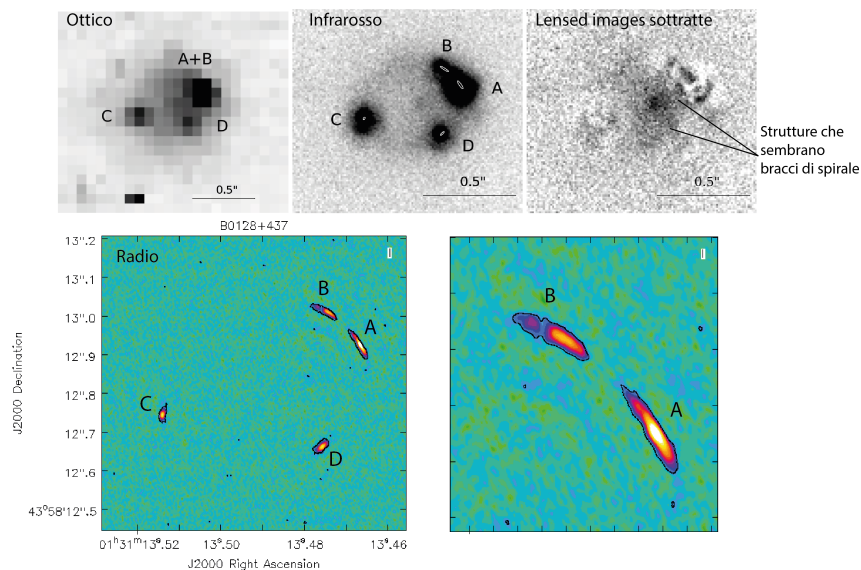


Figura 3.5: Immagini a diverse lunghezze d'onda del lensing system B0128+437. Nell'ottico e infrarosso (prima riga) si può notare che la galassia lensante è molto debole. Una volta sottratto il profilo di luce delle immagini lensate (figura in alto a destra), l'immagine residua mostra delle strutture che sembrano essere dei bracci di spirale (come suggerito da Lagattuta et al.2010 [11], dai cui sono prese queste immagini). Nella banda radio alla risoluzione di 10 mas (seconda riga), le immagini lensate sono estese, in particolare A e B. In questo lavoro di tesi abbiamo misurato la densità di flusso di A e B per verificare che questo sistema rispettasse la fold relation 3.2.

nella morfologia, A e B conservano la simmetria speculare che ci aspettiamo presentando una parità geometrica opposta.

Illustriamo ora come abbiamo svolto le misure e verificato la presenza delle anomalie. Attraverso l'utilizzo del software CASA (McMullin et al. 2007 [15]) abbiamo misurato le densità di flusso delle immagini di lensing dei tre sistemi entro il 3-sigma contour. I dati sono presentati nella tabella 3.1, dove l'incertezza applicata a ogni misura è pari al 10% corrispondente alla somma in quadratura del rumore di fondo e dell'errore di calibrazione.

Abbiamo quindi inserito i dati raccolti nelle relazioni 3.1 e 3.2 e abbiamo ottenuto i seguenti valori per R:

$$R_{fold}(B0128 + 437) = 0.41 \pm 0.06$$

$$R_{fold}(B0712 + 472) = 0.17 \pm 0.12$$

$$R_{cusp}(B1422 + 231) = 0.20 \pm 0.06$$

Poiché $R \neq 0$ per i tre i sistemi di lensing in tutti e tre è presente un'anomalia nel rapporto dei flussi. Le nostre misure mostrano che questa anomalia

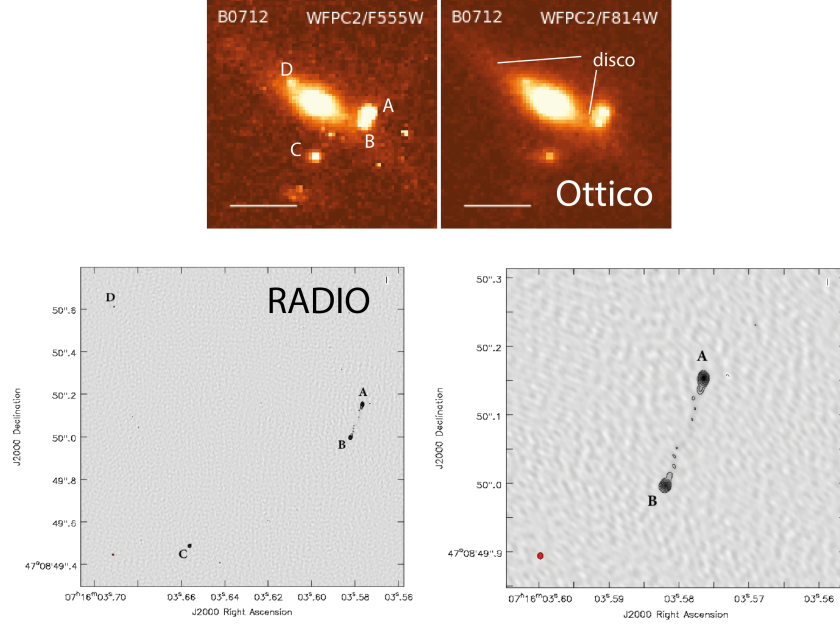


Figura 3.6: Immagini a diverse lunghezze d'onda del lensing system B0712+472. Nell'ottico e infrarosso (prima riga) si può notare una struttura estesa (ma debole) ben oltre la separazione delle immagini, che indica la presenza di un disco edge-on appartenente alla galassia lensante, che quindi è una galassia a spirale (Hsueh et al. 2017 [7]). Nella banda radio alla risoluzione di 10 mas (seconda riga), le immagini lensate A e B sono leggermente estese, indicando la presenza di un getto compatto nella sorgente (zoom in basso a destra). In questo lavoro di tesi abbiamo misurato la densità di flusso di A e B per verificare che questo sistema rispettasse la fold relation 3.2.

Sistema	Immagine	F (mJy)
B0128+437	A	38 ± 4
	B	16 ± 2
B0712+472	A	7 ± 1
	B	5 ± 1
B1422+231	A	19 ± 2
	B	21 ± 2
	C	12 ± 1

Tabella 3.1: Dati di densità di flusso delle immagini dei sistemi di lensing gravitazionale a 4 immagini B0128+437, B0712+472 e B1422+231. Le densità di flusso sono misurate in sottomultipli del Jy ($1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$). L'incertezza è fissa e pari a $\Delta F = 10\%F$.

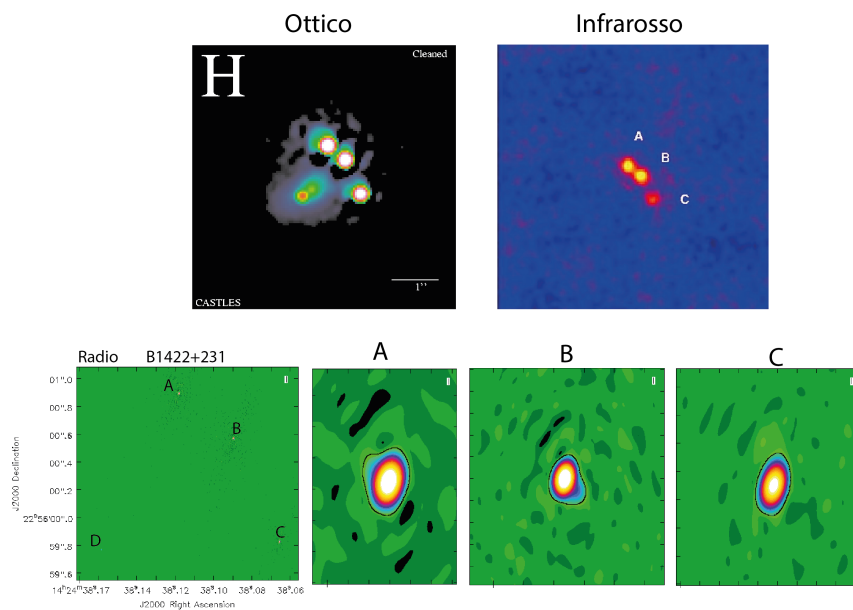


Figura 3.7: Immagini a diverse lunghezze d'onda del lensing system B1422+231. Nell'ottico (in alto a sinistra) la galassia lente è visibile, ma debole e compatta, mentre nell'infrarosso (in alto a destra) la lente e l'immagine D non sono detettate (Immagini da Chiba et al. 2005 [3]). Nella banda radio alla risoluzione di 10 mas (seconda riga), le immagini lensate sono piuttosto compatte, anche se A e B mostrano una leggera estensione, che può essere associata ad un getto compatto nella sorgente (zoom in basso a destra). In questo lavoro di tesi abbiamo misurato la densità di flusso di A, B e C per verificare che questo sistema rispettasse la cusp relation 3.1.

nel flusso è particolarmente forte nei sistemi B0128+437 e B1422+231, mentre è marginale (ma presente) nel sistema B0712+472. Le anomalie di flusso a differenza di quelle morfologiche sono presenti in tutti e tre i sistemi citati e determinano una perdita di brillantezza di alcune delle immagini rispetto alle altre del sistema. Nel sottocapitolo seguente andremo a illustrare le possibili soluzioni alle anomalie.

3.3 Soluzioni alle anomalie dei rapporti di flusso

La prima ipotesi prende in considerazione i sub-halos di materia oscura previsti dal modello Λ CDM. La presenza di un sub-halo di materia oscura fredda provoca una modifica locale della brillantezza e quindi della densità di flusso dell'immagine. Questa spiegazione si applica molto bene nel caso di B1422+231, perché le immagini lensate sono puntiformi e nell'ottico il sistema non presenta indicazioni di altre possibili perturbazioni (Fig. 3.7).

Anche nel caso di B0712+472 potrebbe esserci un sub-halo vicino (in proiezione) alle immagini A e B, causante l'anomalia in flusso. Tuttavia, in questo sistema anche l'immagine D è "anomala" in quanto praticamente non detettata (Fig. 3.6) nonostante le osservazioni siano estremamente profonde. Perciò, servirebbe (almeno) un'altra galassia satellite vicina (in proiezione) all'immagine D, cosa molto improbabile dati i redshift di lente e sorgente in questo sistema (Despali et al. 2018 [4]). Oppure la perturbazione di massa deve essere sufficientemente estesa da "coprire" le immagini A, B e D simultaneamente. Infatti, osservando questo sistema nell'infrarosso (Fig. 3.6 in alto) è evidente la presenza di una struttura allungata che copre l'intero sistema. Questa struttura è il disco della galassia lente, che in realtà è una galassia a spirale (Hsueh et al. 2017 [7]). Quindi, la perturbazione in questo caso è data da materia barionica e non da materia oscura.

Nel caso di B0128+437 l'anomalia (molto forte, $R \cong 0.4$) è aggravata dalla morfologia inusuale dell'immagine B. L'immagine B è come "spezzata" e di forma molto diversa rispetto all'immagine A (a cui dovrebbe essere essenzialmente identica, Fig. 3.5). Questo indica che la perturbazione deve essere sufficientemente estesa da modificare l'immagine B nella sua interezza. Anche in questo caso l'immagine infrarossa suggerisce la presenza di una galassia a spirale come galassia-lente (Fig. 3.5 in alto) e, quindi, questa ulteriore anomalia morfologica può essere spiegata come effetto di "scatter broadening" dovuto alla presenza del mezzo interstellare della lente (Biggs et al. 2004 [1])

Questi sistemi mostrano che le perturbazioni sono in parte consistenti con puri dark matter sub-halos e in parte con materia barionica. Questo risultato indica che prima di poter concludere che le anomalie in flusso sono dovute *unicamente* alla distribuzione di dark matter nelle galassie-lente bisogna investigare approfonditamente questi sistemi anomali. Perciò è importante

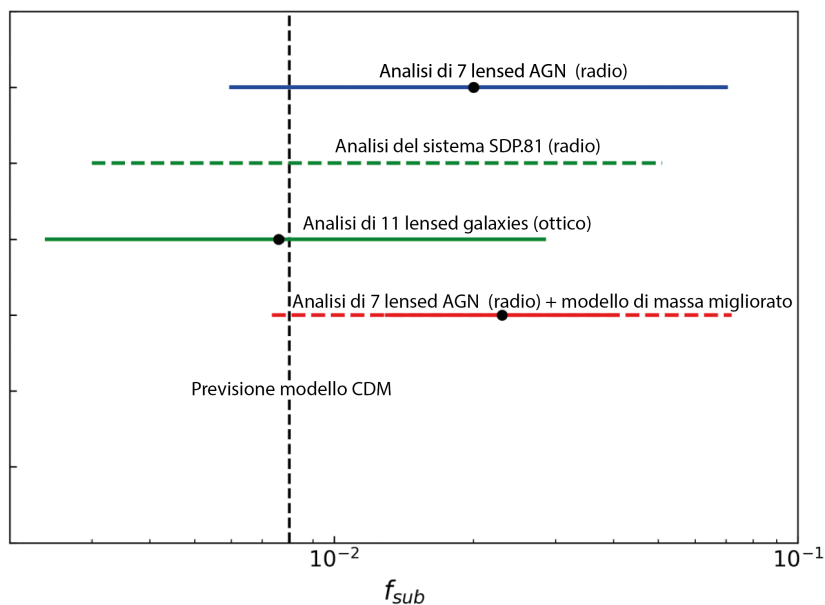


Figura 3.8: Attuali constraints dati dal lensing gravitazionale sulla frazione di massa (di materia oscura) in sub-halos nelle galassie-lente (adattato da Hsueh et al. 2020 [8]). La linea verticale tratteggiata indica la predizione teorica del modello Lambda CDM (Xu et al. 2015 [21]), mentre le altre linee indicano gli attuali constraints dati da diversi metodi di analisi di flux ratio anomalies (Dalal Kochanek 2002 [27], Vegetti et al. 2014 [19], Hezaveh et al. 2016 [6], Hsueh et al. 2020 [8]). Lo studio dettagliato nel radio e nell'infrarosso, come quello presentato in questo capitolo, è importante per migliorare la conoscenza del potenziale gravitazionale della galassia-lente. Quando si hanno modelli più realistici del modello di massa, i constraints sono più stringenti (linea rossa, Hsueh et al. 2020 [8]). Attualmente, i risultati sono consistenti con le predizioni del modello Lambda CDM e gli errori sono dominati dal basso numero di sistemi utilizzabili per questo studio.

ottenere osservazioni radio per quantificare in maniera solida il flusso delle immagini, ma è altrettanto importante osservare questi sistemi ad altre lunghezze d'onda. Dal confronto delle proprietà alle diverse lunghezze d'onda è possibile, quindi, capire l'origine (barionica o oscura) delle anomalie.

Nel radio si conoscono solo ~ 35 sistemi gravitazionali, di cui ~ 10 hanno quattro immagini e 7 hanno anomalie nel flusso (tra cui questi tre sistemi, Dalal & Kochanek 2002 [27]). Statisticamente la frazione di sub-halos che genera queste anomalie è ampiamente consistente con le predizioni del modello Lambda CDM (Hsueh et al. 2020 [8]), anche includendo l'origine barionica (come per B0128+437 e B0712+472) dell'anomalia in flusso (Fig. 3.8).

Capitolo 4

Conclusioni

Lo studio del lensing gravitazionale di sistemi che presentano anomalie del rapporto di flusso è uno strumento potentissimo per fare verifiche dei modelli cosmologici. Per studiare questi sistemi è importante avere una stima affidabile dei flussi delle immagini lensate. Questo può essere ottenuto alle lunghezze d'onde radio. A queste lunghezze d'onda non solo si può ottenere un'ottima misura dei flussi, ma anche un'eccellente risoluzione angolare, usando la tecnica dell'interferometria. In questo modo è possibile risolvere le immagini lensate e studiarne anche la morfologia. Tuttavia è fondamentale confrontare le osservazioni radio con quelle infrarosse per determinare l'origine delle anomalie. Infatti nei sistemi B0128+437, B0172+472 e B1422+231 la combinazione di osservazioni radio e infrarosse ha rivelato che in due sistemi la lente è una galassia a spirale (B0128+437 e B0172+472), il cui disco è responsabile dell'anomalia osservata. Invece nel caso del sistema B1422+231 è molto probabile che l'anomalia sia dovuta ad un sub-halo di materia oscura.

Quello che finora limita questo tipo di ricerca e non permette di poter affermare con certezza che i risultati sono completamente consistenti con il modello Λ CDM è la mancanza di un numero abbastanza grande di sistemi che presentano le caratteristiche richieste. Dal momento che la probabilità di rilevare un sistema di lensing con una sorgente radio-loud è molto bassa e di queste una percentuale ancora minore presenta 4 immagini di lensing, i sistemi disponibili per questo tipo di studio sono meno di una decina.

Questo tipo di studio, che in definitiva può determinare la massa della particella di materia oscura, necessita di un campione di sistemi gravitazionali radio-loud molto più grande. In futuro strumenti come l'interferometro Square Kilometer Array (SKA) e il telescopio ottico Large Synoptic Survey Telescope (LSST "Vera Rubin Observatory") osserveranno 10^5 sistemi gravitazionali (McKean et al. 2015 [14], Collett 2015 [24]) e, quindi, sarà possibile studiare in maniera statisticamente significativa sistemi lensati con anomalie nel flusso.

Bibliografia

- [1] Biggs et al. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 350 (2004), p. 949.
- [2] Browne et al. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 341 (2003), p. 13.
- [3] Chiba et al. In: *The Astrophysical Journal* 627 (2005), p. 53.
- [4] Despali et al. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 475.4 (2018), pp. 5424–5442.
- [5] Hewitt et al. In: (1988).
- [6] Hezaveh et al. In: *The Astrophysical Journal* 823 (2016), p. 37.
- [7] Hsueh et al. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 462 (2017), p. 3713.
- [8] Hsueh et al. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 492 (2020), p. 3047.
- [9] Keeton et al. In: *The Astrophysical Journal* 627 (2003), p. 53.
- [10] Klypin et al. In: *The Astrophysical Journal* 522 (1999), p. 82.
- [11] Lagattuta et al. In: *The Astrophysical Journal* 716L (2010), p. 185.
- [12] Lovell et al. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 420 (2012), p. 2318.
- [13] MacLeod et al. In: *The Astrophysical Journal* 773 (2013), p. 35.
- [14] McKean et al. In: *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14)* (2015), p. 84.
- [15] McMullin et al. “CASA Architecture and Applications”. In: *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVI ASP Conference Series* 376 (2007), p. 127.
- [16] Moore et al. In: *The Astrophysical Journal* 524L (), p. 19.
- [17] Myers et al. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 341 (2003), p. 1.
- [18] Spingola et al. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 483.2 (2019), pp. 2125–2153.

- [19] Vegetti et al. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 447 (2014), p. 3189.
- [20] Weinberg et al. “Cold dark matter: controversies on small scales”. In: *NAS Sackler symposium on Dark Matter* (2013).
- [21] Xu et al. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 442 (2015), p. 2017.
- [22] van Albada Sancisi. In: *Philosophical Transactions for the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 320.1556 (1986), 447–464**.
- [23] EHT collaboration. In: *The Astrophysical Journal* 875 (2019), p. 1.
- [24] Collet. In: *The Astrophysical Journal* 811 (2019), p. 20.
- [25] Einstein. In: *Annalen der Physik* 328.7 (1907), pp. 371–384.
- [26] Einstein. In: *Annalen der Physik* 354.7 (1916), pp. 769–822.
- [27] Dalal Kochanek. In: *The Astrophysical Journal* 572 (2002), p. 25.
- [28] Urry & Padovani. In: *PASP* 107 (1995), 803 U.
- [29] Refsdal. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 128 (1964), p. 295.
- [30] Rubin. In: *Science* 220.4604 (1983), pp. 1339–1344.
- [31] Sancisi. In: *Memorie della Società Astronomia Italiana* 56 (1985), p. 709.
- [32] Schneider. In: *Astronomy Astrophysics* 260 (1992), p. 1.
- [33] Bartelmann & Schneider. In: *Physics Reports* 340.4-5 (2001), pp. 291–472.
- [34] Beckmann Shrader. *Active Galactic Nuclei*. Wiley-VCH Verlag GmbH, 2012. ISBN: 978-3527410781.
- [35] Keiichi Umetsu. “Cluster Weak Gravitational Lensing”. In: (2010), p. 9.
- [36] Babyk Vavilova. In: *Astrophysics and Space Science* Volume 349.Issue 1 (2014), pp. 415–421.
- [37] Walsh. In: *Nature* 279 (1979), pp. 381–384.
- [38] Zwicky. In: *Helvetica Physica Acta* 6 (1933), pp. 110–127.