



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE DII
DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

**VERIFICA SPERIMENTALE DELLE PRESTAZIONI DI
UNA SPIRAL PHASE PLATE**

Laureando

Luca Consolaro

Relatore

Prof. Giampiero Naletto

Matricola

1106803

ANNO ACCADEMICO 2017/2018

Sommario

Il lavoro compiuto durante questa tesi ha riguardato la realizzazione di un impianto sperimentale per indagare le prestazioni di attenuazione della luce date dalla creazione di un vortice ottico da parte di una *Spiral Phase Plate* (SPP).

I vortici ottici (*optical vortex OV*) sono delle singolarità di fase nella propagazione di un fronte d'onda che assume una forma elicoidale lungo l'asse di propagazione in un modo che ricorda una vite di Archimede.

Vi sono vari modi per produrre queste dislocazioni, nel lavoro di questa tesi si è usato un dispositivo che grazie una forma simile ad una scala a chiocciola riesce ad impartire il giusto ritardo di fase per la generazione di un OV.

Lungo l'asse ottico del vortice la singolarità di fase crea interferenza distruttiva, al centro vi è una zona di ombra con un anello di luce attorno. Questa caratteristica può essere sfruttata per realizzare uno strumento che permette l'osservazione diretta dei pianeti extrasolari.

Dopo un primo capitolo di introduzione verrà esposta la realizzazione del setup sperimentale quindi verranno esposti i dati raccolti ed elaborati.

Abstract

The work done in this thesis concerned the designing and building of an experimental set up to test the fainting abilities of a beam of light by the generation of an Optical Vortex by a Spiral Phase Plate (SPP).

Optical vortex (OV) are singularity of phase of a wavefront that takes a helical shape in the axis of propagation in a way that resemble the Archimedes' screw.

There are various ways to produce these dislocations, in the work of this thesis we used a device that, thanks to a shape similar to a spiral staircase, can give the right phase delay for the generation of an OV.

Along the optical axis of the vortex the phase singularity creates destructive interference: at the center there is a zone of shadow with a ring of light around it. This feature can be exploited to create an instrument that allows the direct observation of extrasolar planets.

After a first chapter of introduction the experimental setup will be exposed, then the collected and elaborated data will be exposed.

Indice

Sommario	iii
Abstract	v
1 Introduzione	1
2 Vortici Ottici	5
3 Realizzazione Impianto Sperimentale	11
3.1 Progettazione	11
3.2 Montaggio	16
3.3 Raccolta dati	19
3.4 Elaborazione dei dati	20
3.4.1 Codice Matlab	22
3.5 Raccolta immagini	28
4 Risultati	43
4.1 Confronto con altri risultati sperimentali	47
5 Conclusioni	49
5.1 Prossimi sviluppi	50
Bibliografia	51

Capitolo 1

Introduzione

In questi ultimi anni una parte della ricerca astronomica si è concentrata sulla ricerca di pianeti extrasolari e sulla loro caratterizzazione. Partendo dalla prima scoperta agli inizi degli anni '90 il numero di pianeti scoperti è aumentato esponenzialmente negli ultimi anni grazie alle Kepler e Gaia. La maggior parte dei pianeti scoperti appartiene alla categoria dei "Giove caldi" ossia pianeti gassosi molto vicini alla stella attorno alla quale orbitano. Le tecniche di individuazione di questi corpi celesti son infatti "indirette" e tengono conto di variazioni di luminosità effetto doppler o di *microlensing* gravitazionale. L'osservazione diretta è molto difficile data la difficoltà di rilevare la debole luce di un pianeta che viene offuscato dalla luminosità della stella madre.

L'attenuazione della luce di una stella viene chiamata "Coronografia Stellare" per differenziarli dalla coronografia solare che riguarda lo studio della corona della nostra stella. Il sistema classico utilizzato è quello del coronografo di Lyot che pone nel piano focale di un telescopio un'ostruzione che blocca la luce di una sorgente luminosa e da una serie di stop (filtri opachi di forma opportuna) che permettono di bloccare la luce diffratta che si viene a formare a causa dell'occultazione. Questa tecnica fornisce immagini di elevata qualità tuttavia la dimensione dell'ostruzione, dell'ordine di $3 - 6\lambda/D$ con λ lunghezza d'onda e D diametro del telescopio, con la sua ombra limita la regione vicino alla stella nella quale è possibile compiere osservazioni.

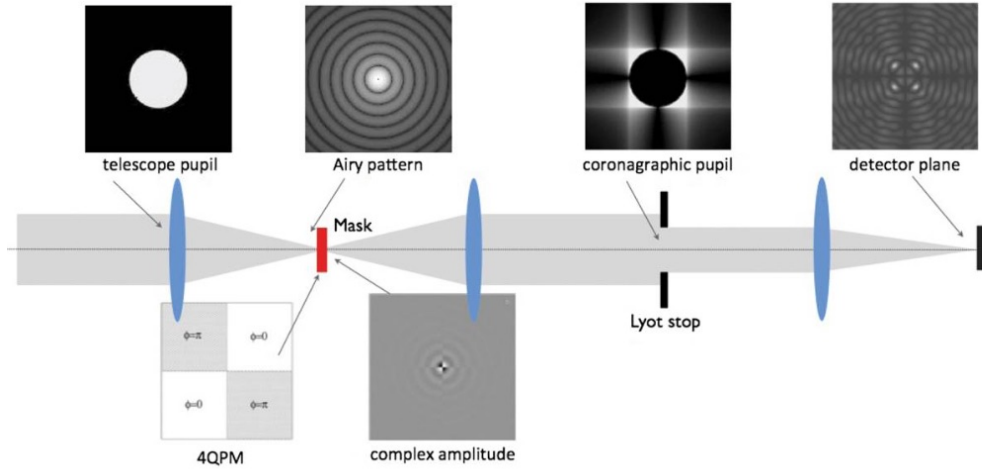


Figura 1.1: Schema concettuale del coronografo 4QPM di MIRI
Credit: Boccaletti et al. 2015

Per ovviare tale problema si sono sviluppati dei filtri che modificano la fase della luce e non la sua ampiezza. Un esempio di tale sistema è la maschera a quattro quadranti di fase o 4QPM (*4 Quadrant Phase Mask*) dello strumento MIRI del James Webb Space Telescope [1]. Questo filtro imparte uno sfasamento diverso a seconda del quadrante come è possibile vedere nella figura 1.1. In questo caso lo stop di Lyot serve per bloccare la luce diffratta dalla struttura del telescopio. La zona nella quale non è possibile effettuare misurazioni viene ridotta a circa $1\lambda/D$ ma come si può vedere il sistema soffre di luce diffusa che peggiora le misure fotometriche ed è progettato per lavorare ad una precisa lunghezza d'onda. La sfida nello sviluppare un coronografo stellare risiede nella necessità di attenuare la luce di una sorgente limitando al massimo la luce diffusa e di ridurre la zona, attorno ad essa, nella quale non è possibile effettuare misurazioni.

Per attenuare la luce delle stelle e permettere il rilevamento dei pianeti è possibile sfruttare una particolare morfologia di fronte d'onda elicoidale il quale attorno alla singolarità centrale produce un'interferenza distruttiva che attenua l'intensità luminosa. Con questa tecnica un gruppo del NASA JPL ha dimostrato come anche telescopi con un'apertura relativamente piccola possono osservare direttamente degli esopianeti [7]. Inoltre rispetto alla

4QPM non influenza la luce proveniente da altre stelle presenti nel campo di vista del telescopio che possono esser utilizzate come riferimento per permettere una caratterizzazione della trasparenza dell'atmosfera che essendo variabile non permetterebbe misure fotometriche molto precise.

Partendo dal lavoro di tesi di dottorato *Optical Vortex Diffractive Optics For Terrestrial And Space Applications*(2012) di Mari Elettra [2] si è voluto verificare il miglioramento delle prestazioni di attenuazione di una nuova versione di *Spiral Phase Plate*. Nel secondo capitolo verrà descritta la geometria di una SPP mentre il capitolo successivo descrive la progettazione del set up sperimentale utilizzato e la metodologia usata per la raccolta dei dati. Nel capitolo finale invece verranno mostrati i risultati e si effettuerà un confronto con sistemi simili.

Vortici Ottici

Un vortice ottico è una particolare morfologia di fronte d'onda che presenta una singolarità a vite. Una singolarità è il luogo dove una grandezza matematica diventa nulla, infinita o cambia in maniera improvvisa. Per le onde le grandezze che possono presentare singolarità son l'intensità, la fase o la polarizzazione. Altri tipi di dislocazione son la dislocazione di bordo o dislocazioni miste vite-bordo. Per poter visualizzare meglio la forma assunta dal fronte d'onda può esser utile considerare le dislocazioni analoghe presenti nella struttura reticolare dei cristalli (fig. 2.1).

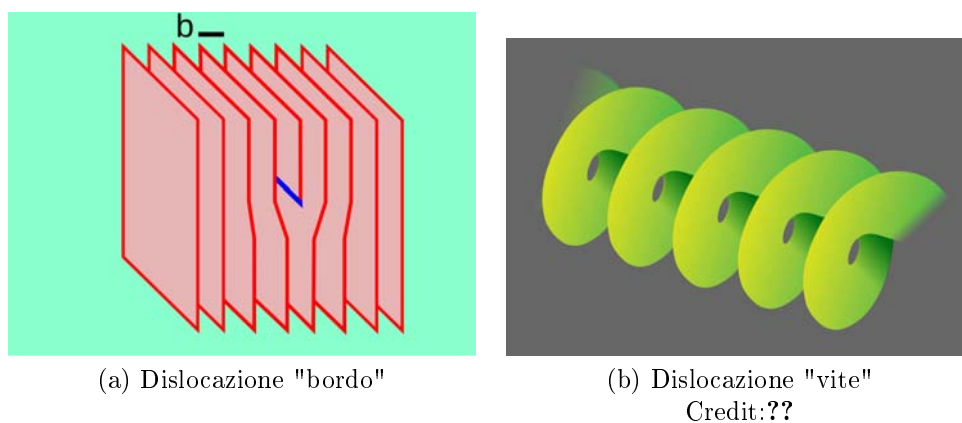


Figura 2.1: Dislocazioni o difetti topologici

L'onda con una dislocazione a vite deve esser descritta dall'equazione differenziale delle onde[4]

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (2.1)$$

E è il campo elettrico. La cui soluzione complessa espressa in coordinate cilindriche è:

$$E = (r, \phi, z, t) \propto \begin{cases} r^{|l|} e^{i(kz - \omega t + l\phi)} \\ r^{-|l|} e^{i(kz - \omega t + l\phi)} \end{cases} \quad (2.2)$$

Le variabili r, ϕ, z, t son le coordinate raggio angolo profondità e tempo secondo un sistema di riferimento cilindrico. Nella prima equazione l'ampiezza del campo elettrico tende all'infinito per $r \rightarrow \infty$ per risolvere il problema è sufficiente aggiungere un termine d'ampiezza $\propto 1/r$.

La grandezza l è la carica topologica ed è definita dall'integrale circolare attorno al vortice del gradiente di fase $\nabla\Phi$:

$$l = \frac{1}{2\pi} \oint \nabla\Phi \cdot d\vec{r} \quad (2.3)$$

Se $l = 0$ l'equazione descrive un fronte d'onda piano, mentre se $|l| = 1$ la forma assunta è di un elica, se $|l| = 2$ la struttura è una doppia elica (come quella del DNA) e così via.

La generazione dei vortici ottici può avvenire in diversi modi, un modo è utilizzare la *Computer Generated Holography* per creare un pattern che riprodotto su un supporto permette di produrre il fronte d'onda desiderato, un esempio di tale pattern è illustrato in figura 2.2.

In alternativa è possibile utilizzare uno schermo a cristalli liquidi controllato elettronicamente per produrre lo stesso effetto.

Le SPP come suggerisce il nome son filtri ottici che con la loro forma a spirale impartiscono un ritardo di fase diverso a seconda della posizione angolare attorno alla dislocazione generando la singolarità. La carica topologica l dipende dall'altezza totale del percorso (d nell'immagine 2.3) secondo

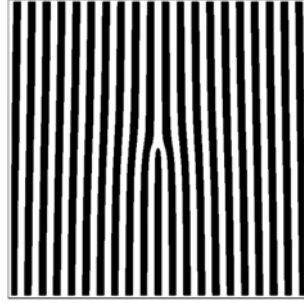


Figura 2.2: Ologramma per un vortice ottico con $l=2$

la formula

$$l = \frac{d\Delta n}{\lambda} \quad (2.4)$$

dove Δn è la differenza di indice di rifrazione del materiale con cui è costruita la SPP e del mezzo in cui è immersa. Come si può notare dall'equazione 2.4 la carica topologica impartita dipende strettamente dalla lunghezza d'onda. Questi filtri son progettati e realizzati per lavorare ad una determinata λ e devono operare in condizioni di monocromaticità. La differenza di fase impartita al variare di ϕ corrisponde a $2\pi l$. Idealmente la variazione d'altezza procede in maniera continua lungo la coordinata angolare, ma è possibile suddividere la variazione di altezza in una serie di gradini. Il numero di gradini influenza le prestazioni teoriche e la lunghezza d'onda a cui avviene la maggior attenuazione [2].

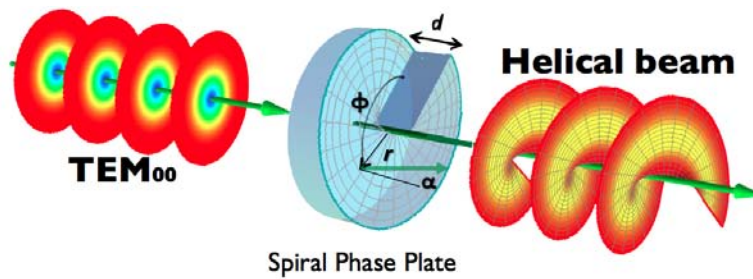
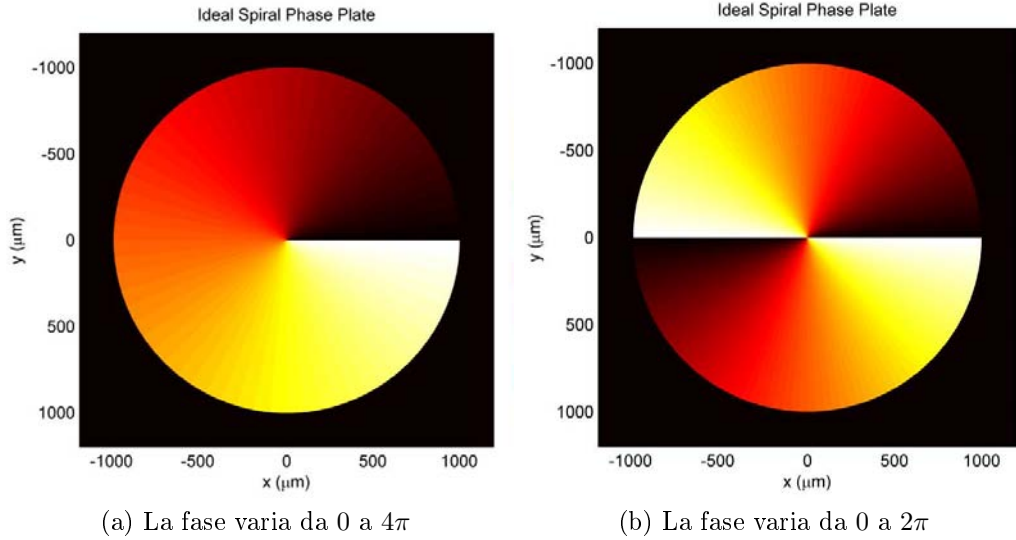


Figura 2.3: Spirale di fase che trasforma un fronte piano in uno dotato di carica topologica $l=1$

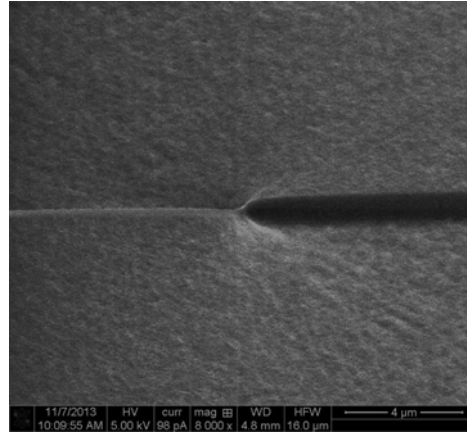
Una spirale di fase può impartire la carica topologica utilizzando una singola variazione di altezza che produca una variazione di fase $0 - 2\pi l$ (fig.2.4a) o ripartire la variazione in l settori dove la variazione è $0 - 2\pi$ (fig.2.4b).



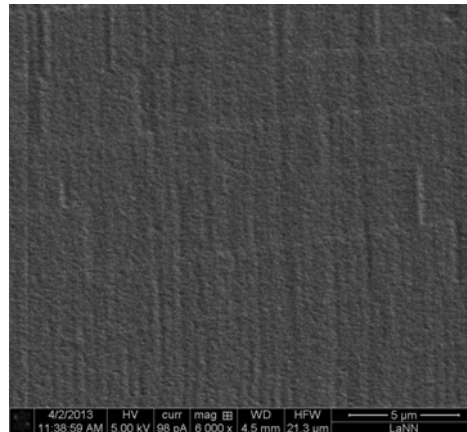
La spirale di fase analizzata in questo esperimento è stata prodotta da *Veneto Nanotech*, ha il diametro di 2mm e impartisce una carica topologica $l = 2$. È stata prodotta attraverso un processo di litografia a fascio di elettroni (EBL) su una piastrina di polimetilmetacrilato (PMMA, conosciuto anche con il nome commerciale di plexiglas) sulla quale diversi livelli di irraggiamento elettronico producono velocità di dissoluzione differenti che dopo il bagno nella soluzione di sviluppo producono la forma desiderata. Sono state incise due variazioni di altezza di $1,295\mu\text{m}$ ed un totale di 512 gradini. Nella figura 2.4 è possibile osservare un'immagine al microscopio a scansione elettronica della dislocazione centrale e un particolare che mostra la rugosità superficiale della spirale.

Le prestazioni teoriche di attenuazione per una spirale di fase a 512 gradini sono dell'ordine di 10^{-8} mentre una spirale continua presenta attenuazioni di 10^{-10} [2], valori corrispondenti al rapporto tra la luminosità di una stella e quella degli esopianeti che orbitano attorno ad essa. Focalizzando la luce

della stella sulla dislocazione centrale di una SPP con prestazioni simili a quelle teoriche permetterebbe quindi l'osservazione diretta dei pianeti.



(c) Dettaglio dislocazione centrale



(d) Rugosità superficiale

Figura 2.4: Dettagli al microscopio SEM

Capitolo 3

Realizzazione Impianto Sperimentale

In questo capitolo vengono descritte la progettazione del set-up sperimentale e la procedura utilizzata per la raccolta dei dati.

3.1 Progettazione

Nell'uso come coronografo la luce proveniente dalla stella che si vuole occultare viene focalizzata al centro della dislocazione della SPP.

Il sistema deve mimare il funzionamento di un telescopio focalizzando la luce di una "stella" sulla SPP e successivamente rifocalizzandola su un sensore per la visione dell'immagine prodotta. Lo spot sul piano della SPP deve avere un diametro di circa $10 - 15 \mu m$. La nostra stella è prodotta focalizzando il fascio di un laser HeNe $\lambda = 633 nm$ su di un pinhole. Utilizzando un software di Raytracing si è simulato il comportamento del sistema per verificare che rispetti i requisiti richiesti. Son state scelte quindi lenti del diametro di 1 pollice per poter usare i montaggi presenti nel laboratorio. Essendo la fonte luminosa monocromatica il sistema è intrinsecamente esente da aberrazioni cromatiche, tuttavia l'uso di doppietti invece che lenti semplici si è reso necessario in quanto i doppietti son in grado di limitare altre aberrazioni oltre a quella cromatica avendo quindi migliori prestazioni di dimensione dello spot.

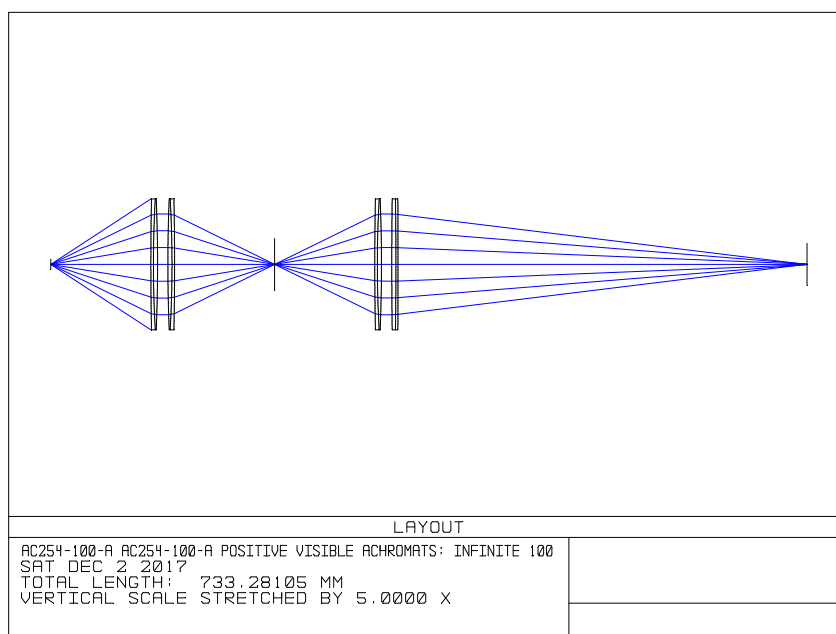


Figura 3.1: Disegno sistema dopo pinhole, le dimensioni lungo y son 5 volte le reali

Nella figura 3.1 è illustrato il disegno ottico. La luce emerge dal pinhole a sinistra (pinhole non mostrato) viene collimata dalla prima lente e successivamente focalizzata nel piano della SPP (linea verticale intermedia). La terza e la quarta lente hanno il compito di collimare e focalizzare i raggi sulla superficie del sensore (IMA) rappresentata dalla linea verticale a destra.

Per eseguire la simulazione si è usato il programma *Zemax* e dopo l'ottimizzazione della posizione delle lenti le dimensioni dell'immagine di una sorgente puntiforme sono elencate nella tabella 3.1:

SPP	raggio RMS	6,442
	raggio GEO	9,984
	diametro Airy	5,947
IMA	raggio RMS	38,119
	raggio GEO	52,790
	diametro Airy	23.64

Tabella 3.1: Risultati del Raytracing, valori numerici in μm

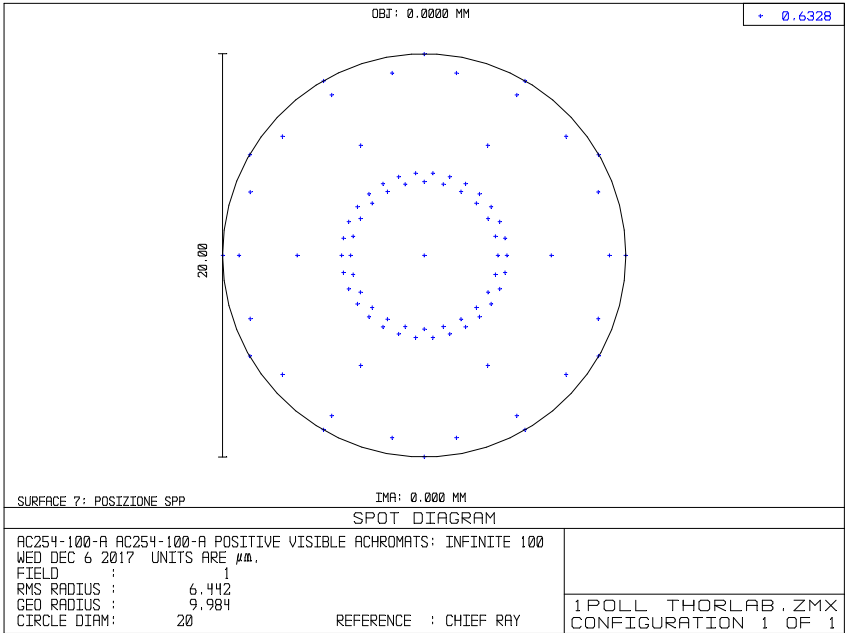
Il raggio RMS è definito dalla media pesata delle varie distanze a cui cadono i raggi di luce sulla superficie considerata, da una stima della distribuzione dell'energia nell'immagine. Il raggio GEO invece è la distanza del raggio di luce più distante dal raggio di riferimento. Il diametro di Airy è il diametro del primo minimo della figura di Airy ossia della figura di diffrazione creata dall'interazione della luce con apertura delle lenti, indica la massima prestazione ottenibile per un sistema ottico formato da lenti ideali. Le superfici sulle quali son stati calcolati sono mostrate nella figura 3.1.

Le lenti usate son lenti Thorlabs: le prime tre lenti sono AC254-100-A con lunghezza focale di 100 mm mentre l'ultima, AC254-400-A, ha una focale 400 mm che permette di avere un ingrandimento di circa 4x nel piano immagine. La sorgente luminosa per il sistema è costituita da un laser HeNe $\lambda = 633 \text{ nm}$ a 5 mW di potenza. Il fascio appena uscito dal laser incontra una serie di filtri che vengono usati per abbassare l'intensità della luce sia per motivi di sicurezza sia per evitare di saturare il sensore.

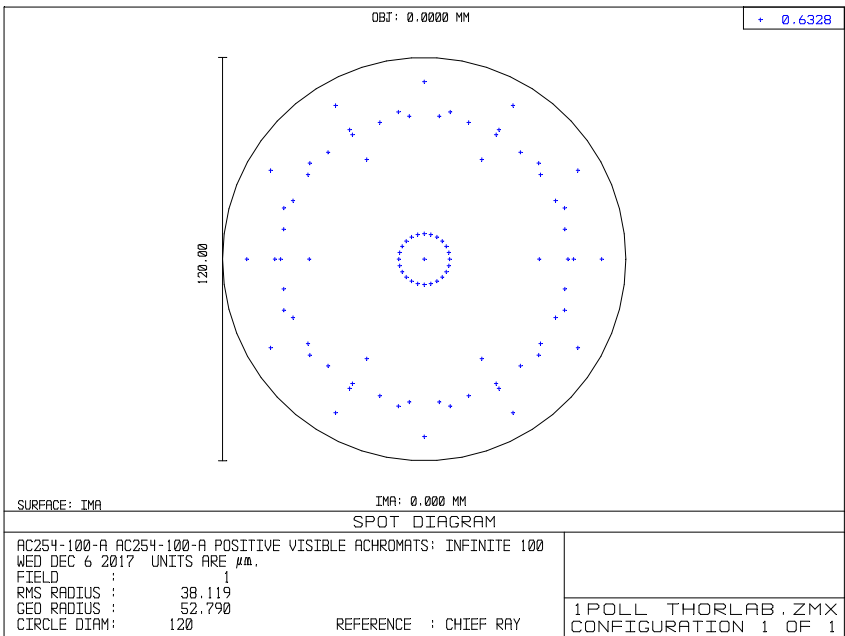
	Tipologia	OD	trasmissione [%]
ND100	Riflessione	2	1
ND1000	Assorbimento	3	0,1

Tabella 3.2: Filtri a densità neutra

Successivamente ai filtri ND si trova uno specchio piano montato su un sistema tip tilt che devia il fascio di 90° creando un cammino ottico ad "L" e ne permette l'installazione nei limiti di spazio del banco ottico. Un oculare per microscopio, montato su un montaggio che permette la traslazione negli assi x e y, focalizza sul pinhole del diametro $20\ \mu m$. Una lente f100 è usata per collimare il fascio luminoso che emerge dal foro, l'uso delle simulazioni ha indicato che le prestazioni migliori per la collimazione del fascio si ottengono invertendo le lenti rispetto a come sarebbero usate per focalizzare la luce proveniente da una sorgente infinitamente distante. Una lente analoga alla prima (non girata) viene usata per focalizzare sulla SPP la luce. Il filtro di fase è montato su un sistema di traslatori micrometrici in modo da poterne regolare la posizione nelle tre dimensioni con una precisione di $10\ \mu m$. Le lenti 3 e 4 hanno il compito ricollimare la luce e focalizzarla sulla superficie del sensore. I risultati ideali del sistema sono riassunti nella tabella 3.1 mentre nella figura 3.2 è possibile osservare il risultato della simulazione degli spot sulla superficie della SPP e sulla superficie del sensore.



(a) Dimensione spot sulla superficie della SPP, unità in μm



(b) Dimensione spot sulla superficie IMA, unità in μm

Figura 3.2: Risultati della simulazione dopo l'ottimizzazione

3.2 Montaggio

Nella prima fase del montaggio il laser viene livellato in modo che il fascio si mantenga ad un'altezza di 15 cm, regolando prima il supporto del tubo laser e poi della regolazione tip tilt dello specchietto. I filtri ND son stati posizionati fin dal principio in modo da evitare rischi dovuti all'esposizione ad un fascio laser ad alta intensità. L'elemento successivo ad esser stato montato è stato l'oculare nel suo sistema di traslazione e quindi le lenti inserite in un sistema a gabbia son state regolate in modo che il fascio passasse al centro delle ottiche. Il pinhole è stato allineato successivamente, in questo modo è stato possibile regolare la posizione delle lenti senza dover spegnere le luci. Data la cortissima focale dell'oculare e la quasi invisibilità del forellino del pinhole il posizionamento dello stesso è risultato particolarmente laborioso. Per rendere visibile il foro si è usato una torcia elettrica che opportunamente angolata produceva un piccolo riflesso che ne rendeva visibile la posizione, quindi agendo sulle viti del traslatore e dello specchio si è sovrapposto il riflesso con il puntino rosso del laser. Usando la camera si è quindi verificato che nella posizione SPP dello schema ottico lo spot avesse una dimensione congrua a quella di progetto. Prima di focalizzare il laser sulla superficie del sensore è stato verificato che la potenza radiante emessa non danneggiasse il sensore. Focalizzare in una piccola area un raggio laser può danneggiare il sensore in quanto a parità di potenza irradiata diminuendo l'area aumenta la densità di potenza e quindi si corre il rischio di superare la soglia di danno. La fotocamera usata è la *3370CP-NIR-GL Rev.2* prodotta dalla IDS, si tratta di una fotocamera monocromatica senza filtro IR. Il suo sensore è di tipo CMOS il *CMV4000-3E12M* prodotto dalla CMOSIS, ha un rapporto d'aspetto 1:1 ed una risoluzione di 2048×2048 pixel per un totale di 4.19 Mpix che hanno una dimensione di $5,5\mu m$. La profondità di colore è di 12 bit e range dinamico di 60 dB. Nel datasheet della fotocamera o del sensore non erano presenti indicazioni sulla soglia di danno. Per un sensore di tipo CMOS e un laser continuo alla lunghezza d'onda d'interesse la soglia di danno corrisponde a $48 kW/cm^2$ per un esposizione di 10 secondi secondo uno studio condotto da B. Schwarz [5]. Se l'intera potenza del laser (5 mW) fosse concentrata su di

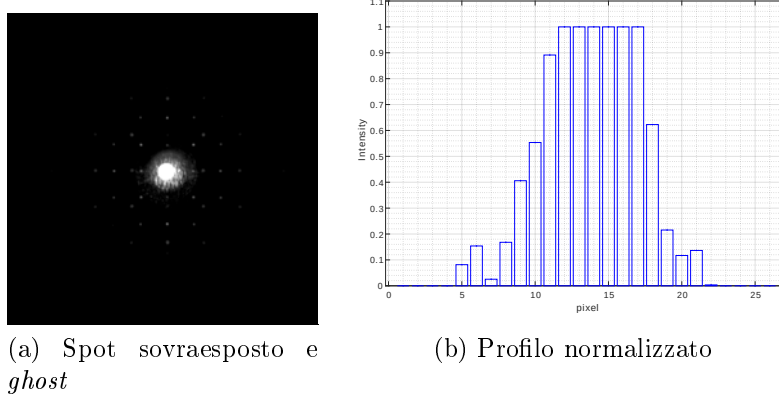


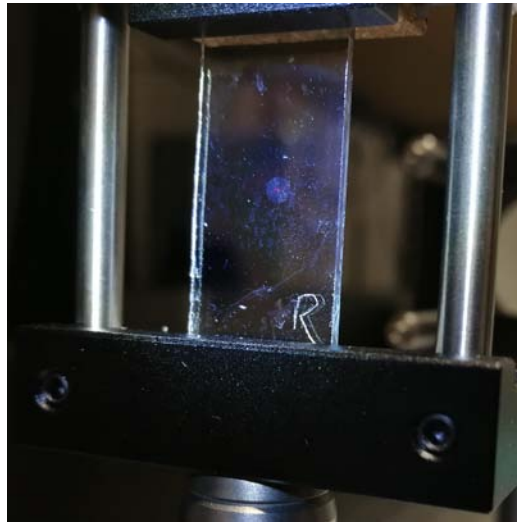
Figura 3.3: Immagini sulla superficie della SPP

un singolo pixel l'intensità sarebbe 25 kW/cm^2 . Considerando l'attenuazione da parte dei filtri ND (circa 10^{-5}) e del pinhole si è sotto il valore di soglia di diversi ordini di grandezza.

Come è possibile osservare nella figura 3.3a l'immagine catturata nella posizione della SPP mostra come, alcune riflessioni interne alla fotocamera create da un vetro di protezione al sensore creano una griglia di puntini con distribuzione regolare, tali artefatti essendo riflessi hanno intensità minore e appaiono soltanto se si sovraesponde di molto. Per avere una stima della dimensione dello spot è stato usato il diametro FWZH (Full Width Zero Height) in quanto il range dinamico del sensore non è sufficientemente ampio per coprire la variazione di luminosità dell'immagine. Si aumenta l'esposizione fino a saturare la parte centrale del segnale e far comparire i primi anelli della figura di diffrazione. La presenza dell'anello di diffrazione mostra che il sistema è ben focalizzato ed al limite di diffrazione. La forma circolare simmetrica indica inoltre un buon allineamento del sistema. Nella figura 3.3b è possibile osservare un profilo dello spot con le intensità normalizzate sul valore unitario (saturazione).

Una volta trovato uno spot congruo con i risultati delle simulazioni si è posizionata la SPP nel suo supporto e sempre con l'ausilio della torcia elettrica è stato effettuato un primo allineamento grossolano. L'allineamento finale è stato effettuato osservando un *live stream* regolando la posizione del

filtro con i micrometri al fine di ottenere un buon centraggio mentre la messa a fuoco è stata regolata con la terza lente del sistema. La messa a fuoco, sulla superficie immagine tuttavia non era un parametro fondamentale in quanto lo scopo della misura è relativo alla variazione di intensità luminosa e non alla risoluzione del sistema.



(a) SPP montata nel suo supporto

[[[Vista d'insieme del sistema, la fotocamera non è ripresa]

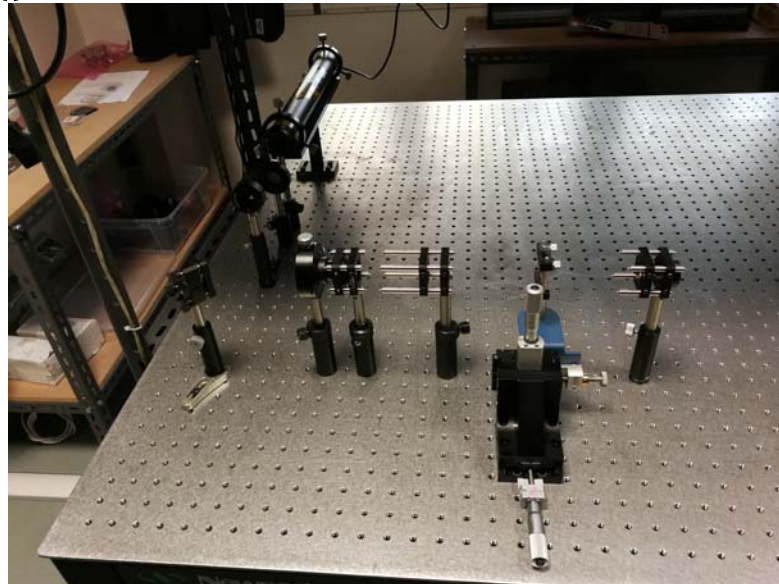


Figura 3.4: Foto del sistema montato

3.3 Raccolta dati

La procedura utilizzata per la raccolta dei dati è consistita nel salvare 5 immagini del segnale ed un frame senza segnale (*dark*). Le impostazioni della fotocamera sono state impostate il gain a $0\times$ e campionare il segnale a 12 bit. Ogni esposizione viene salvata come file *.png* monocromatico a 16 bit.

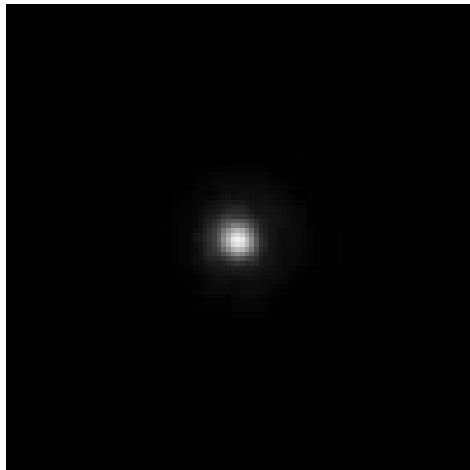
Come baseline sulla quale calcolare l'attenuazione si è effettuata una misura dell'intensità del fascio senza SPP, regolando il tempo di esposizione in modo da produrre un'immagine non saturata. La SPP è stata quindi ricollocata e centrata ed un'ulteriore misurazione, con gli stessi parametri è stata raccolta. La zona buia al centro dell'anello luminoso presenta livelli di segnale nullo quindi per riuscire a calcolare con precisione l'attenuazione si è dovuto aumentare l'intensità del segnale. Per far ciò è possibile utilizzare due modalità, aumentare il segnale o modificare la combinazione di filtri ND. La prima procedura ha il pregio di essere veloce da realizzare a scapito di aumentare il rumore presente nell'immagine, la seconda mantenendo il tempo di esposizione costante permette di mantenere lo stesso livello di rumore ma richiede di realizzare una caratterizzazione dei filtri in modo da poter avere un valore preciso di attenuazione. Si è optato per la prima metodologia in quanto si è osservato come, una diversa angolazione dello specchio produca un'intensità diversa della luce raccolta: il fascio laser collimato attraversando un filtro a diverse angolazioni percorre una lunghezza diversa all'interno del vetro e quindi viene attenuato in maniera diversa, inoltre il filtro angolato produce una leggera traslazione del fascio che va a modificare la sua posizione nel pinhole modificando la quantità di luce che ne emerge.

3.4 Elaborazione dei dati

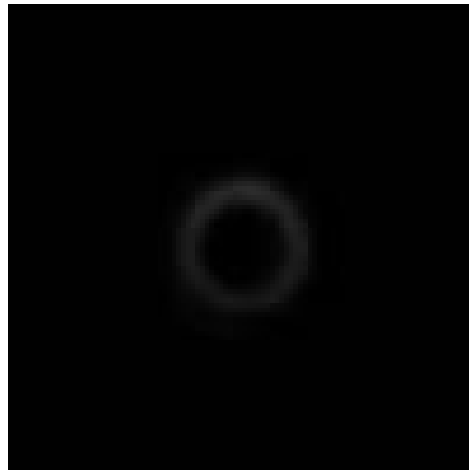
Una volta raccolte le immagini son state caricate in MatlabTM come matrici convertendo i dati da interi a 16 bit alla classe *double* (float integer a 64 bit) con i valori che spaziano da 0 a 1, con il primo corrispondente a segnale nullo ed il secondo al segnale massimo. Le cinque immagini raccolte per ogni posizione vengono sommate e quindi mediate, l'uso della classe *double* permette di evitare errori di overflow. Utilizzando un comando specifico per l'elaborazione delle immagini il frame di dark è stato sottratto, se tale sottrazione produce valori negativi di intensità per qualche pixel questi vengono scartati ed al loro posto viene inserito uno zero codice 3.1. In questo modo sia il rumore casuale che eventuali *hotpixel* vengono ridotti.

Il centroide dello spot viene calcolato e le immagini vengono quindi ritagliate portando la loro dimensione da 2048×2048 pixel a 100×100 pixel centrando la figura, codice 3.2. Per calcolare l'attenuazione da parte della SPP è stato creato un codice che analizzando l'immagine sovrapposta (figura 3.8a) entro un determinato raggio dal centroide calcola l'integrale del segnale, quindi l'integrale del segnale sotto una determinata soglia per tener in considerazione delle eventuali deformazioni dovute a difetti di costruzione o allineamento, e quindi cerca il pixel con il segnale minimo. Nell'immagine di riferimento figura 3.6a gli integrali son calcolati sugli stessi pixel mentre viene cercato il segnale massimo al posto di quello minimo. Il rapporto d'attenuazione viene calcolato considerando anche il rapporto tra i diversi tempi di esposizione, codice 3.3. Per maggiori dettagli sul funzionamento dei codici si rimanda al paragrafo 3.4.1.

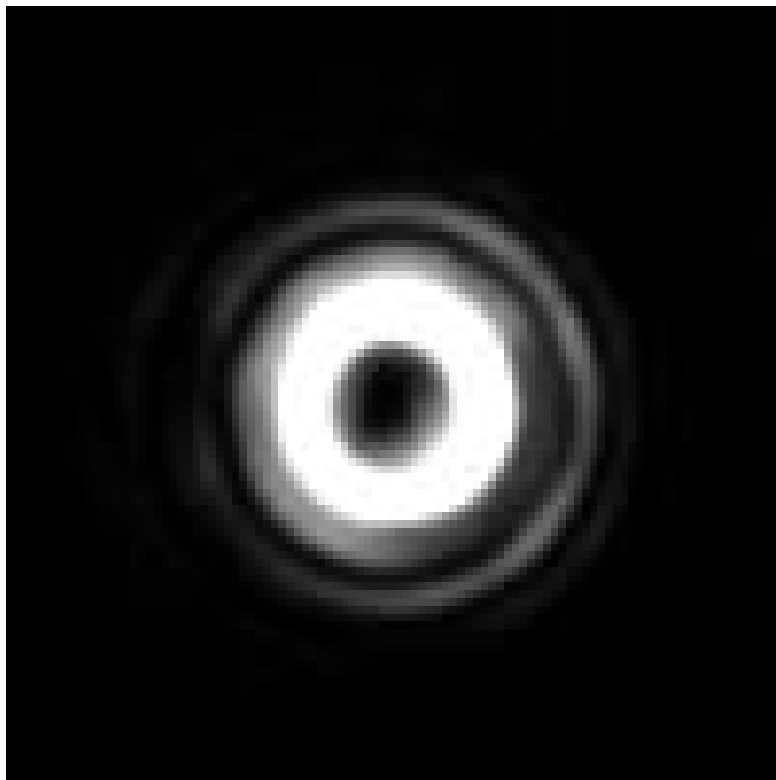
Il rapporto tra integrali fornisce un'indicazione dell'attenuazione media mentre con il rapporto tra minimo e massimo si ottiene l'attenuazione massima.



(a) Immagine di riferimento



(b) Con SPP in posizione



(c) Sovraespongo per avere segnale al centro dell'oscurazione

Figura 3.5: Immagini raccolte nella posizione centrale

3.4.1 Codice Matlab

Vengono illustrati alcune parti del codice sviluppato in modo da rendere più chiara l'elaborazione dei dati svolta

Codice 3.1: Parte di codice utilizzato per l'acquisizione.

```

1 I_1 = imread ( '01.png' );
  I1 = im2double(I_1);

```

Le immagini vengono lette dal programma e memorizzate come matrice 2048×2048 di numeri interi a 16 bit, le immagini son già salvate come monocromatiche quindi non è il bisogno di convertire lo spazio di colore. Con il comando *im2double* tali valori numerici vengono convertiti nel formato double ed i loro valori son convertiti secondo la logica $[0 : 2^{16}] \rightarrow [0 : 1]$. Tale procedura viene ripetuta per le altre quattro immagini. Ora le matrici possono esser elaborate come normali matrici e sommandole si può superare il valore unitario che corrisponde al massimo.

```

4 I_m = ( I1+I2+I3+I4+I5 ) / 5;
  save ( 'media.mat' , 'I_m' );

```

Il frame di dark viene quindi acquisito, convertito e sottratto alla media delle immagini utilizzando un comando specifico, *imsubtract*, per l'elaborazione delle immagini.

```

6 D = imread ( 'dark.png' );
  d = im2double(D);

8 I_md = imsubtract(I_m,d);

10 save ( 'Imd.mat' , 'I_md' );

```

Le matrici, salvate in formato .mat vengono rinominate e salvate in un unico file .mat per poter esser lette dal codice che esegue il ritaglio alla dimensione ridotta.

Codice 3.2: Parte di codice utilizzato per il ritaglio.

```

load('data.mat')
2
[cpy, cpx] = FindCentroidLaserSpotUsingFourier(I1);
4 x = nearest(cpx-50);
y = nearest(cpy-50);
6 I1C = imcrop(I1,[x y 99 99]);
imwrite([uint16([I1C*2^16])], '1.png');
8 ...
save('data.mat')

```

Per calcolare il centroide dello spot è stata utilizzata la funzione *FindCentroidLaserSpotUsingFourier* sviluppata da Rainer F.[9]. Le coordinate del centroide non son numeri interi e quindi vengono arrotondate per poter essere utilizzate come indici. Le immagini vengono salvate sia nel file `data.mat` per successive elaborazioni sia come immagini.

Per calcolare il rapporto di attenuazione carico le variabili contenute in `data.mat` per poter lavorare direttamente con le matrici ridotte senza dover ricaricare le immagini e correre rischio di incorrere in perdite di dati dovute alla conversione da intero e double e viceversa.

Codice 3.3: Elaborazione dei frame.

```

1 load('data.mat')
3 rt = 2.988/0.153
s = 0.05;
5 r=5;

```

In questa prima parte del codice si caricano le variabili, rt è il rapporto tra il tempo di esposizione per i frame sovraesposti e il tempo di esposizione per il frame di riferimento, s rappresenta il valore di soglia utilizzato per escludere i pixel con un valore superiore ad esso dal calcolo dell'integrale del segnale e considerare quindi le imperfezioni del sistema. Tale valore, pari al 5%, viene

calcolato sul massimo del segnale presente nel frame sovraesposto. L'area considerata è un cerchio di raggio r dal centroide.

```

6  alphadata = zeros(100,100);
   red = cat(3, ones(100), zeros(100), zeros(100));

```

Per poter visualizzare quali sono i pixel considerati dal codice vengono create due variabili, la prima è una matrice per il canale Alpha ossia il canale che regola la trasparenza di una figura, ha la stessa dimensione delle immagini e per ora ha valori nulli. La seconda è un *array* ossia tre matrici concatenate che anch'esse hanno la dimensioni delle immagini e che formano un sistema tridimensionale RGB per creare un immagine rossa.

```

8  [cpy2, cpx2] = FindCentroidLaserSpotUsingFourier(I3C);
   C = [nearest(cpx2) nearest(cpy2)];

```

Per il centro dell'area utilizzo il centroide dell'immagine sovraesposta *I3C*.

```

10 S_spot = 0;
   S_spp = 0;
12 Max = 0;
   min = 1;
14 cont = 0;

```

Sono dichiarate le variabili utilizzate per fare la sommatoria (integrale) del segnale, si riferiscono rispettivamente all'immagine di riferimento e a quella con la SPP. Le variabili successive sono usate per la ricerca di massimo, minimo ed il conteggio dei pixel considerati.

```

16   for i = 1 : 100
       for j = 1 : 100
           P = [i j];
18           if (norm([P - C])<=r)
               if (I3C(i,j)<=s)
20                   S_spp = S_spp + I3C(i,j);
                   S_spot = S_spot + I1C(i,j);
22                   cont = cont + 1;

```



```

24         alphadata(i,j) = 0.25;
        end
        if I1C(i,j) >= Max
26             Max = I1C(i,j);
        end
28         if I3C(i,j) <= min
            min = I3C(i,j);
30         end
        end
32     end
end

```

In questa sezione del codice il programma scorre tutti i pixel delle matrici, definendo il punto P e calcolando la distanza di questi dal centro viene stabilito se P si trova all'interno dell'area di interesse o meno. Al di fuori dell'area di interesse il pixel viene scartato ed il programma passa al successivo. Nel primo caso, invece, si guarda se il valore di tale pixel è inferiore alla soglia prefissata ed in caso positivo tale valore viene considerato per l'integrazione e sommato al totale, il pixel analogo nell'immagine di riferimento viene anch'esso considerato. All'elemento corrispondente della matrice di trasparenza viene assegnato un valore 0,25 che corrisponde ad una trasparenza del 25%. Il valore viene inoltre confrontato con il valore massimo (per l'immagine di riferimento) e il valore minimo che vengono aggiornati in caso esso sia maggiore o inferiore, a seconda dei casi.

```

34 R_int = (S_spp/rt)/(S_spot)
    Rprc1 = 100*(1-R_int)
36 cont
    Max
38 min
    Rmaxmin = (min/rt)/Max
40 Rprc2 = 100*(1-Rmaxmin)

```

Ottenuti gli integrali dei segnali si esegue il rapporto tra i due considerando

che il segnale ottenuto dall'immagine con la SPP è rt volte più intenso del riferimento. L'area sulla quale si è integrato, il valore massimo e minimo son mostrati. Vengono calcolati inoltre i valori di attenuazione percentuali sia per il rapporto tra integrali che per il rapporto tra massimo e minimo, rispettivamente R_{prc1} e R_{prc2} .

Vengono stampate a schermo le due immagini sovrapponendo loro la maschera che mette in evidenza in rosso i pixel considerati, un esempio di tale immagini son la fig. 3.15a e 3.15b.

```

figure(1)
42 subplot(1,2,1),imshow(I1C);
   hold on
44 h = imshow(red);
   set(h, 'AlphaData', alphadata);
46 subplot(1,2,2),imshow(I3C);
   hold on
48 h = imshow(red);
   set(h, 'AlphaData', alphadata);

```

I profili delle immagini son stati realizzati con il comando *improfile* il quale crea un vettore con i valori letti lungo una linea di un immagine. Successivamente si è eseguita un interpolazione utilizzando il toolbox dell'app di "Curve Fitting" è stato creato un codice che realizzi un interpolazione cubica con funzione di mantenimento di forma (*Shape-Preserving Piecewise Cubic Interpolation*).

Codice 3.4: Codice per l'interpolazione.

```

1 function [fitresult, gof] = createFit(c)
   %CREATEFIT(C)
3 % Create a fit.
   %
5 % Data for 'Profilo intensità' fit:
   %      Y Output: c
7 % Output:
   %      fitresult : a fit object representing the fit.

```

```

9 %      gof : structure with goodness-of fit info .
%
11 % See also FIT, CFIT, SFIT.

13 % Auto-generated by MATLAB on 03-Dec-2017 10:59:30

15
%% Fit: 'Profilo intensità '.
17 [xData, yData] = prepareCurveData( [], c );

19 % Set up fittype and options.
ft = 'pchipinterp';

21
% Fit model to data.
23 [fitresult, gof] = fit(xData, yData, ft, 'Normalize', 'on');

25 % Plot fit with data.
figure('Name', 'Profilo intensità ');
27 h = plot( fitresult, xData, yData, 's' );
grid on
29 legend(h, 'Valore', 'Profilo intensità', 'Location', '
    ↗ NorthEast');
% Label axes
31 xlabel('Pixel', 'FontSize', 14, 'FontName', 'Arial')
ylabel('Intensità', 'FontSize', 14, 'FontName', 'Arial')

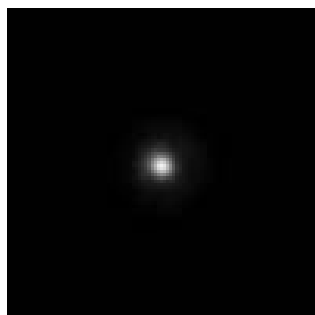
```

3.5 Raccolta immagini

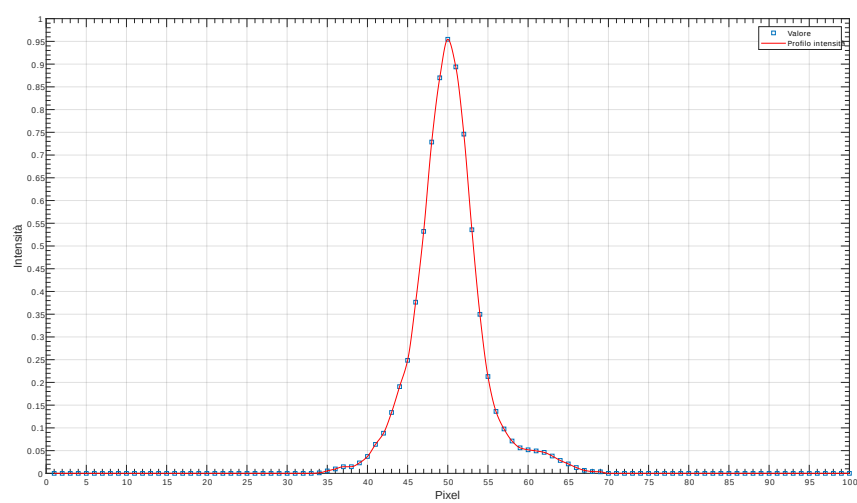
A seguire vengono mostrate e commentate alcune immagini rappresentative del lavoro svolto.

Nella figura 3.6 viene mostrata l'immagine dello spot ottenuto nel piano focale con la SPP non inserita, verrà utilizzata come riferimento per calcolare l'attenuazione. Segue nella fig. 3.7 l'immagine dell'effetto della SPP a parità di esposizione, si consideri che per l'asse y il valore massimo mostrato è pari al 15% del valore massimo registrabile dal sensore in condizioni di saturazione. Sovraesponendo l'immagine si possono notare gli anelli di Airy indice di una buona messa a fuoco fig. 3.8.

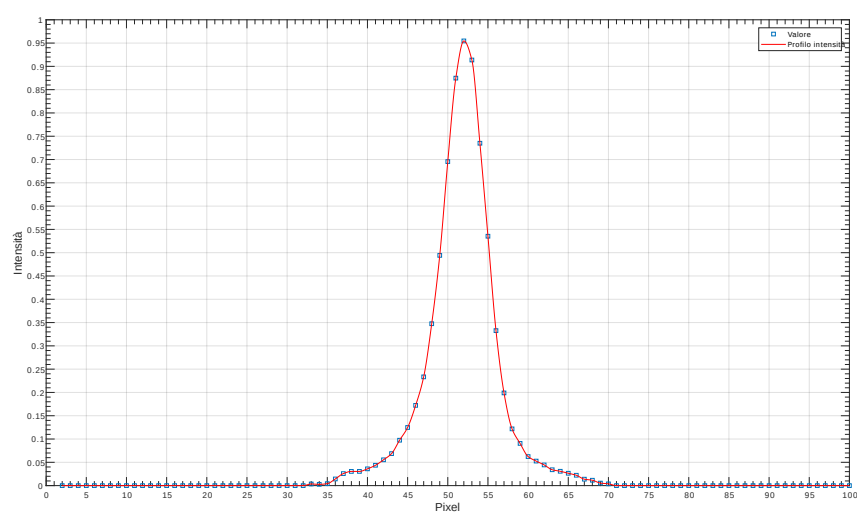
Per valutare la sensibilità al posizionamento attraverso i traslatori la SPP è stata spostata dalla sua posizione nominale. Si è scelto di spostare solamente lungo l'asse x per quanto riguarda gli spostamenti perpendicolari al cammino ottico in quanto la regolazione del traslatore per l'asse x , fissato direttamente al banco ottico, non era soggetta ad eventuali errori nella costruzione del traslatore 3D. Tali immagini, mostrate in fig. 3.11, danno un'idea del comportamento del sistema per l'attenuazione di fonti luminose fuori asse. Si può notare che a distanza di $80\ \mu m$ (3.11g) l'immagine sia molto simile a quella di riferimento (3.11a). Fino a $20\ \mu m$ i cambiamenti sono minimi dato che l'immagine del pin hole prodotta dal sistema ha la stessa dimensione dello stesso in quanto il rapporto di magnificazione prodotto dalle prime due lenti è $M_T = 1$ quindi il centro della dislocazione ricade ancora nell'immagine prodotta sul piano della SPP e quindi acquista sufficiente momento angolare. Per gli spostamenti lungo l'asse ottico, fig. 3.13, il traslatore era composto da una ghiera senza indice che permettesse la lettura dello spostamento effettuato. A partire dalla posizione ottimale, ci si è mossi nel verso positivo (verso la camera) e nel verso negativo di intere rotazioni della ghiera le quali corrispondono ad uno spostamento di $\sim 0,5\ mm$. Si nota come avanzando verso la camera le immagini siano simili e con una variabilità molto ridotta, man mano che ci si allontana si ha una perdita di contrasto nella zona centrale pur avendo una attenuazione simile nel pixel centrale. Muovendosi nella direzione opposta invece la zona centrale si rimpicciolisce molto velocemente.



(a)

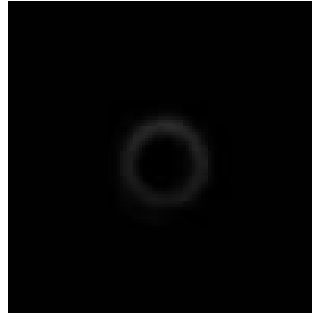


(b) Profilo intensità lungo x

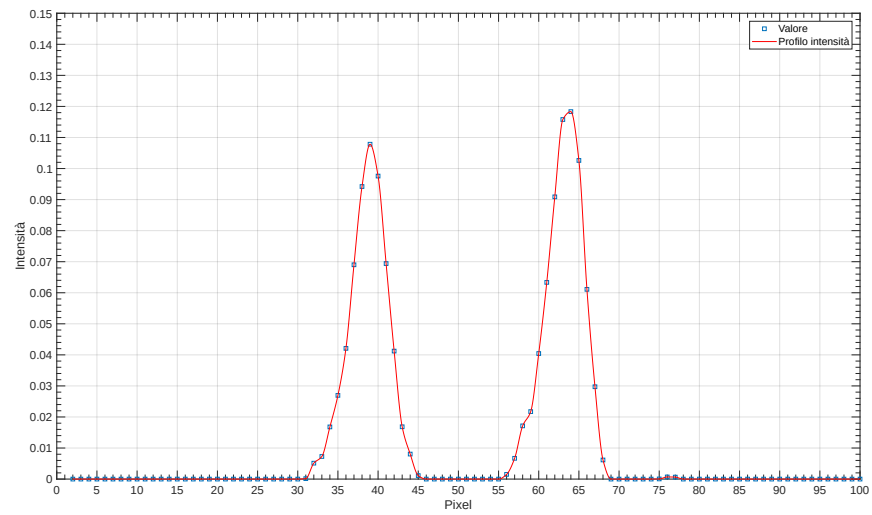


(c) Profilo intensità lungo y

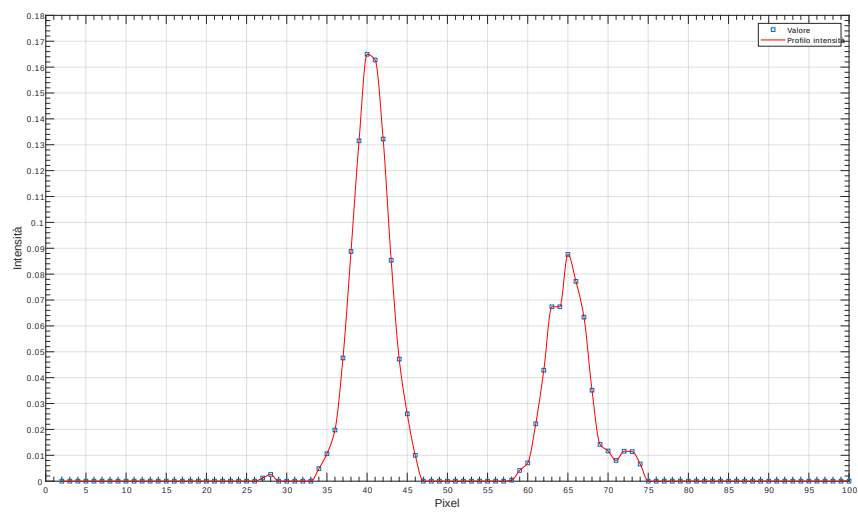
Figura 3.6: Immagine di riferimento



(a)

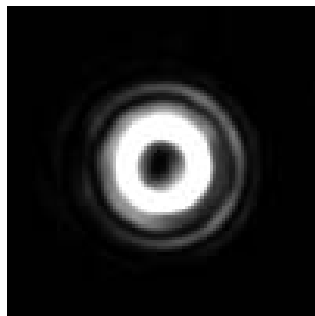


(b) Profilo intensità lungo x

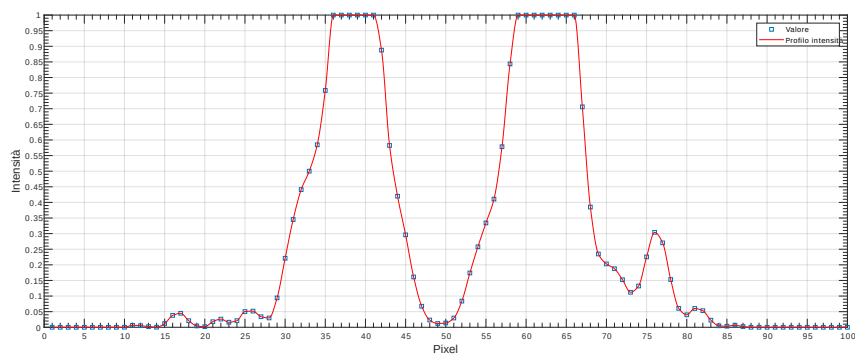


(c) Profilo intensità lungo y

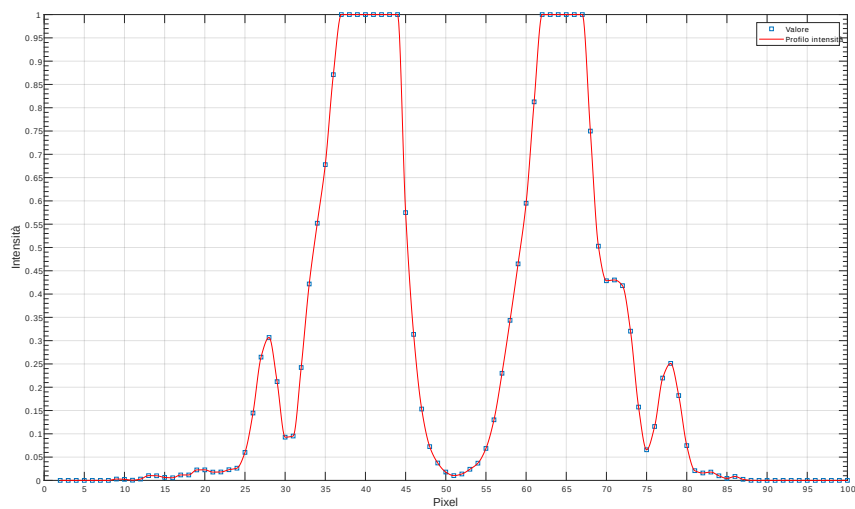
Figura 3.7: SPP in posizione



(a)

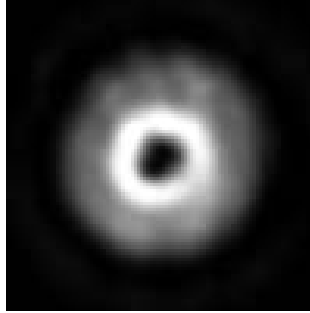


(b) Profilo intensità lungo x

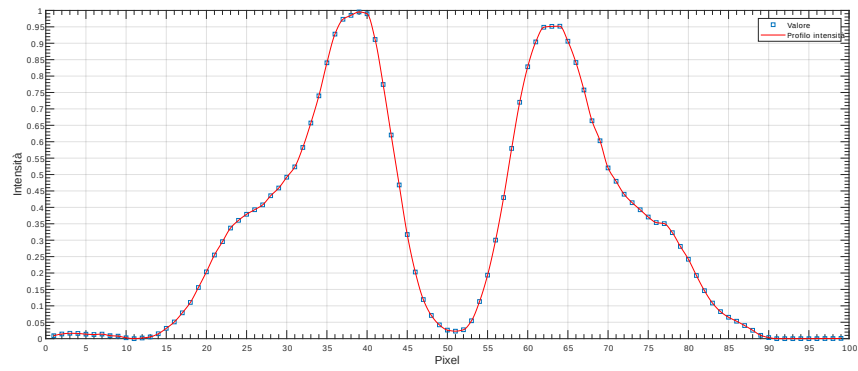


(c) Profilo intensità lungo y

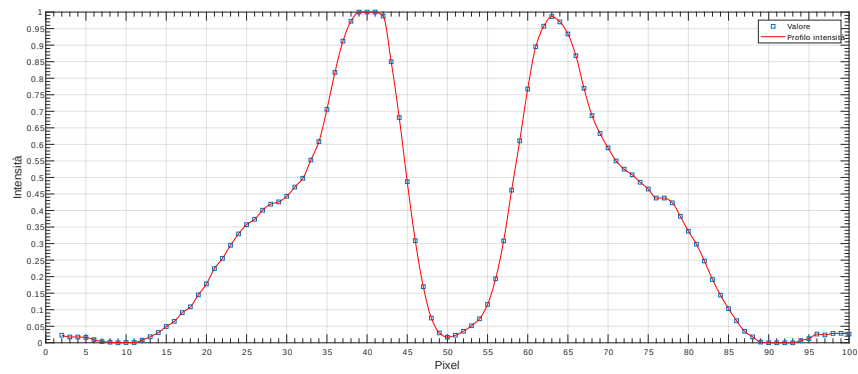
Figura 3.8: Sovraespongo per aver segnale al centro



(a)

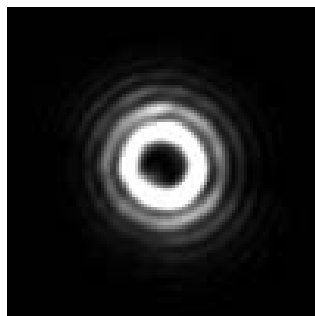


(b) Profilo intensità lungo x

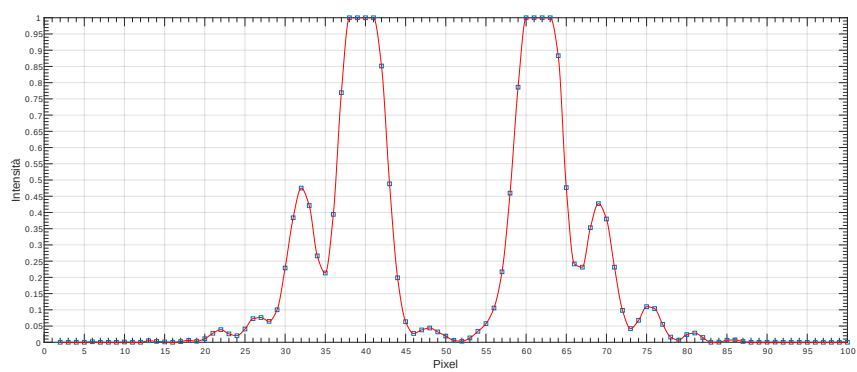


(c) Profilo intensità lungo y

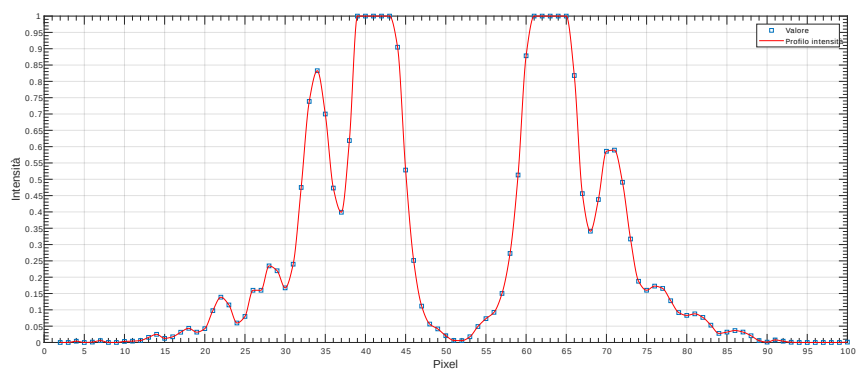
Figura 3.9: Esposizione con sistema leggermente fuori fuoco



(a)



(b) Profilo intensità lungo x



(c) Profilo intensità lungo y

Figura 3.10: Altro caso di esposizione sovraesposta

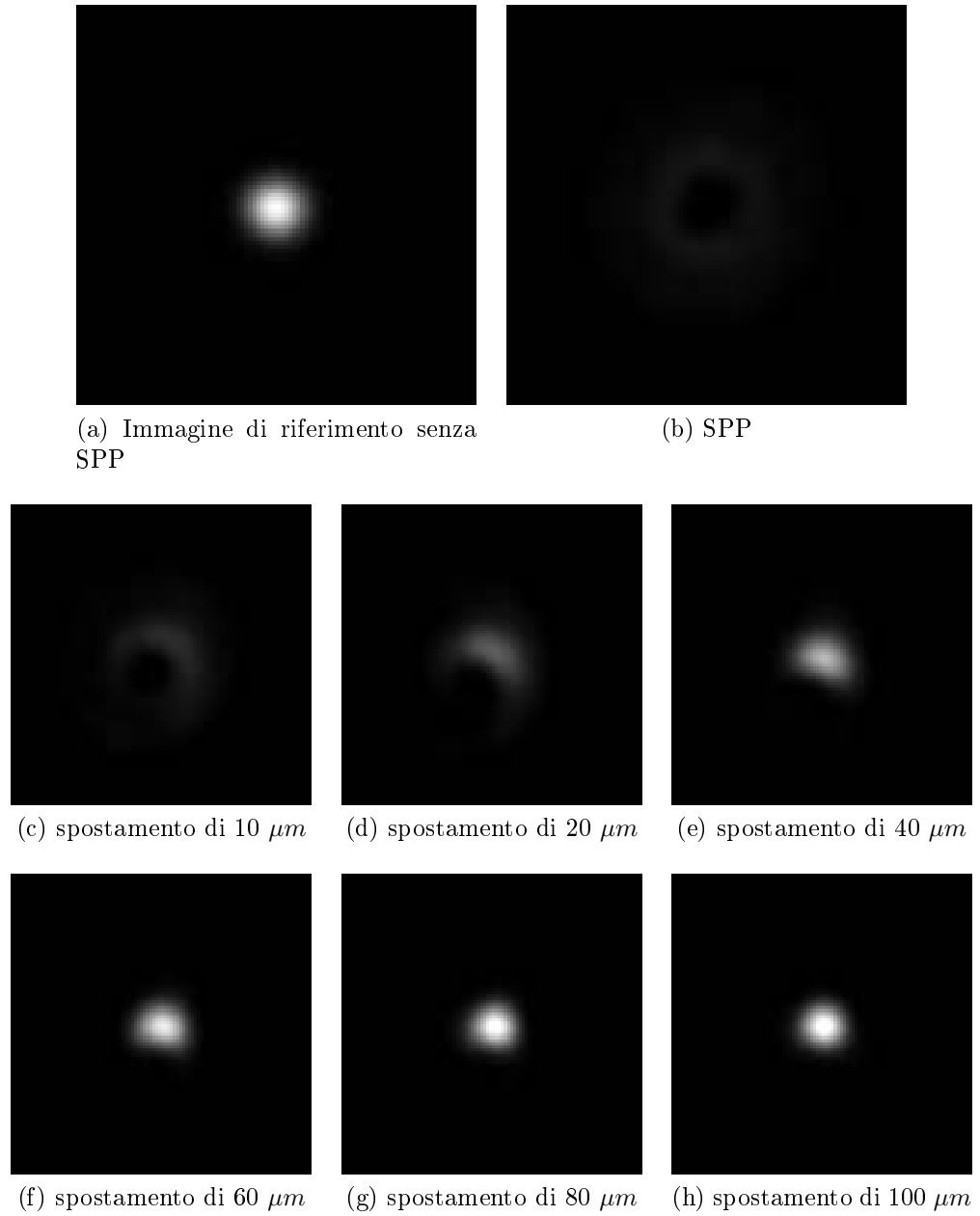


Figura 3.11: Traslazione lungo l'asse x

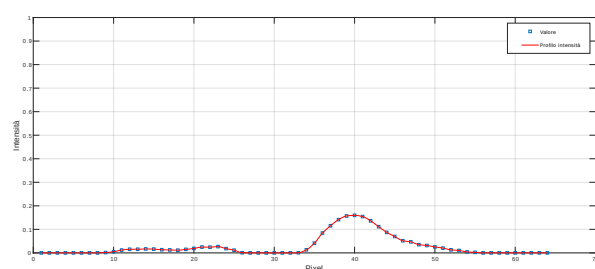
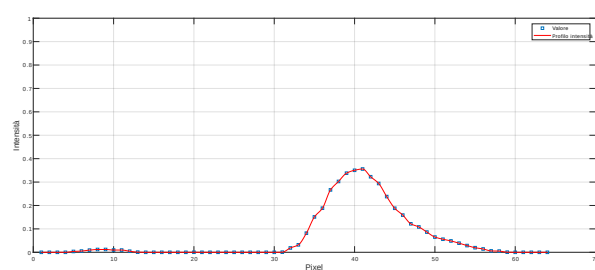
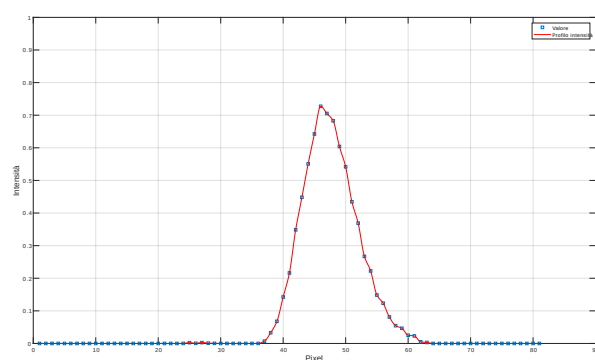
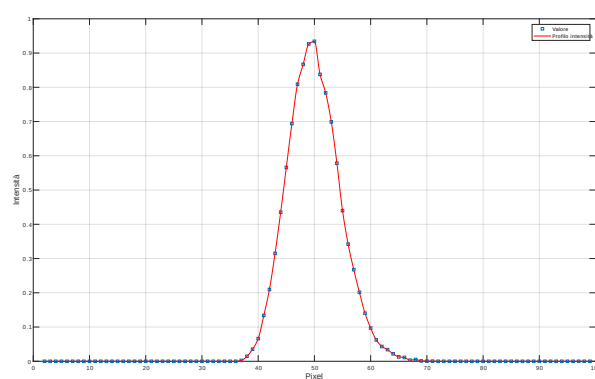
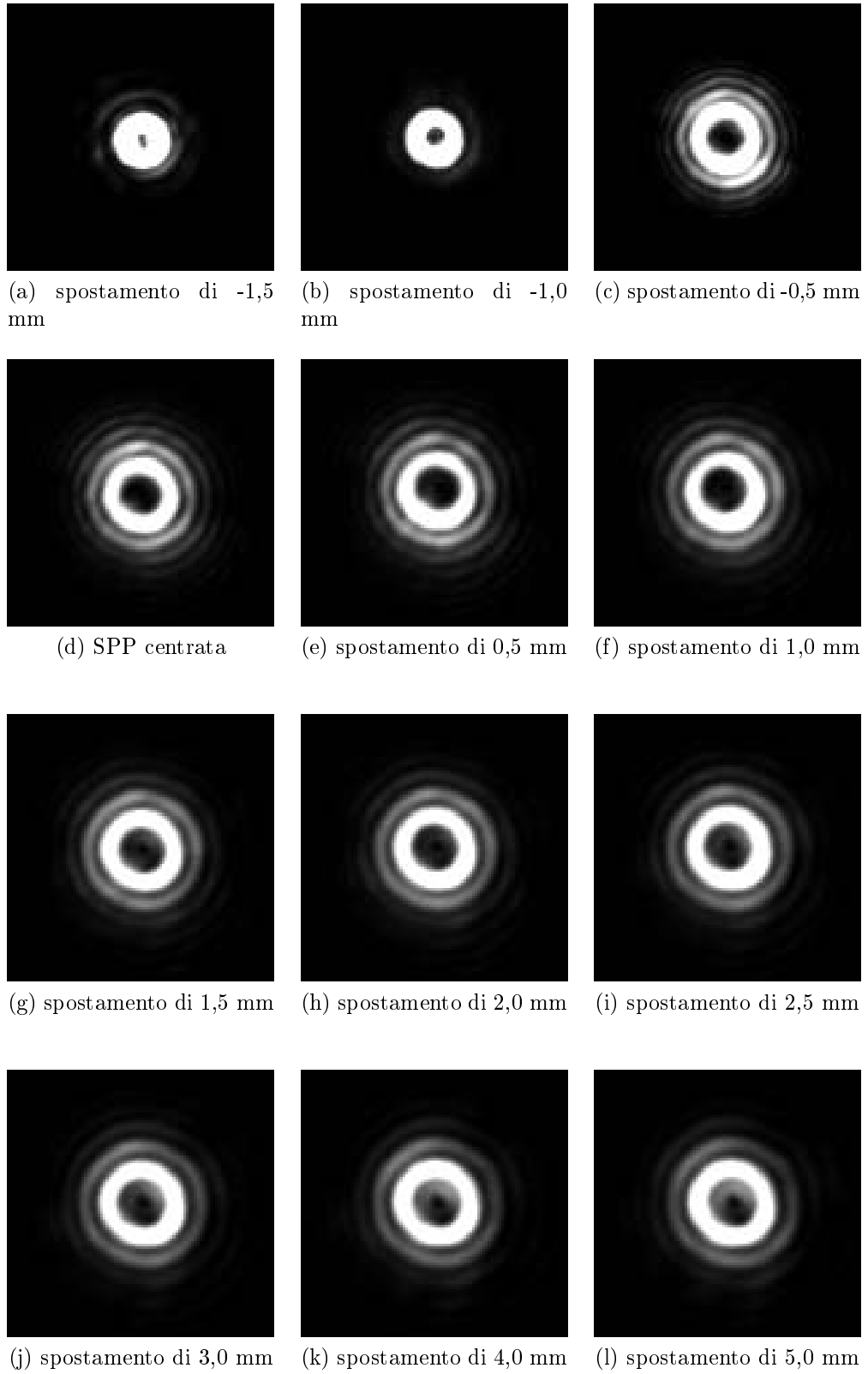
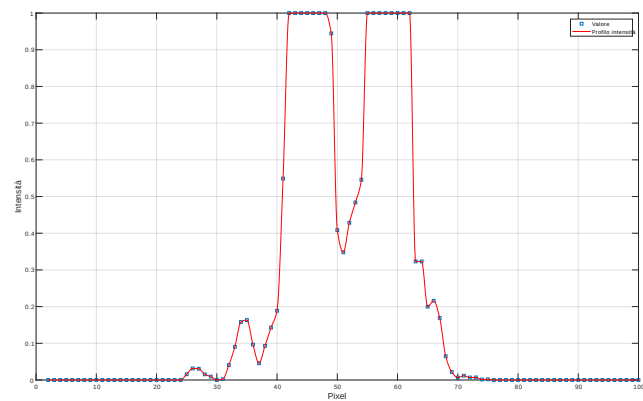
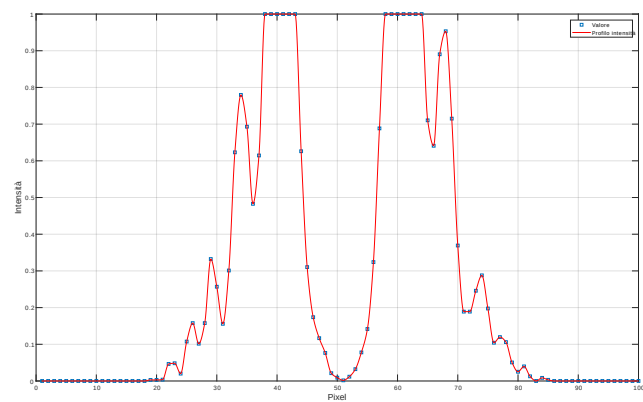
(a) spostamento di $10 \mu m$, fig. 3.11c(b) spostamento di $20 \mu m$ fig. 3.11d(c) spostamento di $40 \mu m$, fig. 3.11e(d) spostamento di $60 \mu m$, fig. 3.11f

Figura 3.12: Profili delle immagini della traslazione lungo x

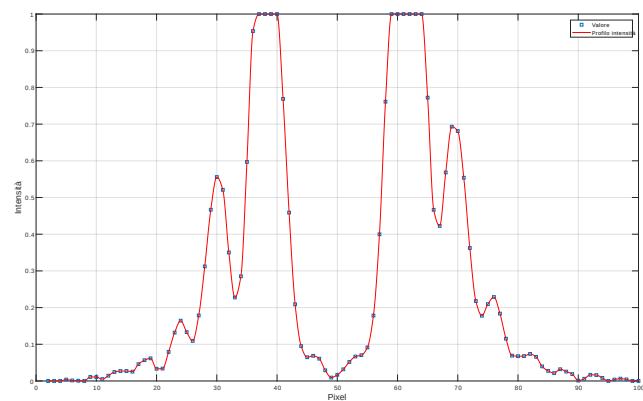
Figura 3.13: Traslazione lungo l'asse z



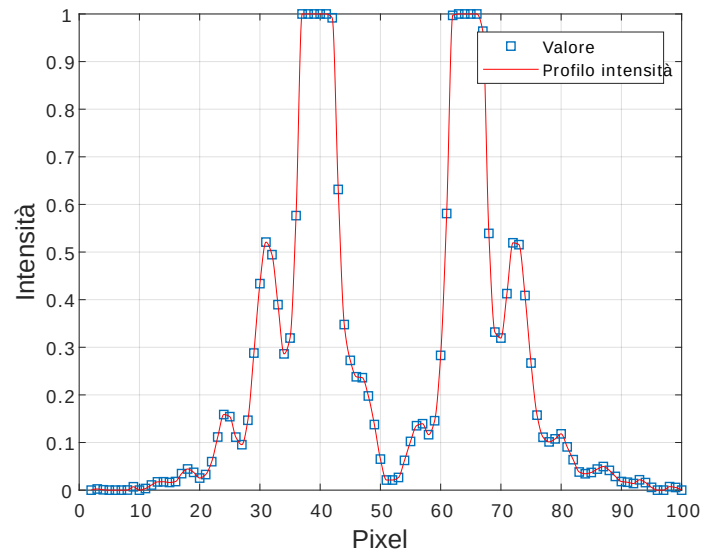
(a) spostamento di -1,5 mm, fig. 3.13a



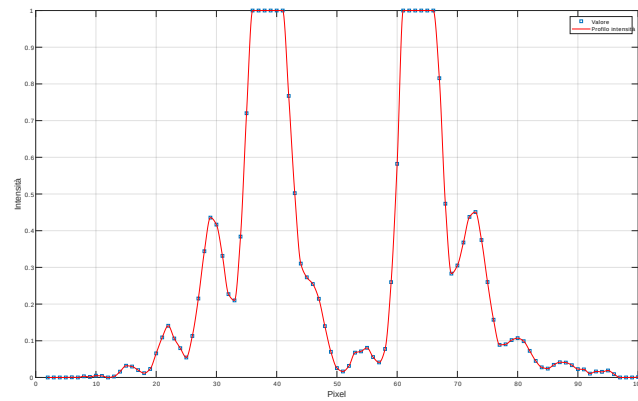
(b) spostamento di -0,5 mm, fig. 3.13c



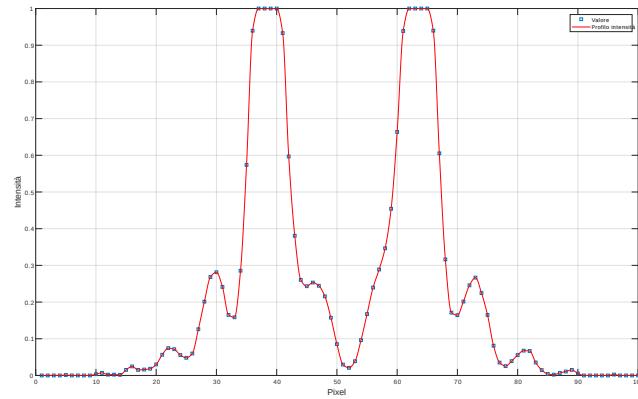
(c) spostamento di 0,5 mm, fig. 3.13e



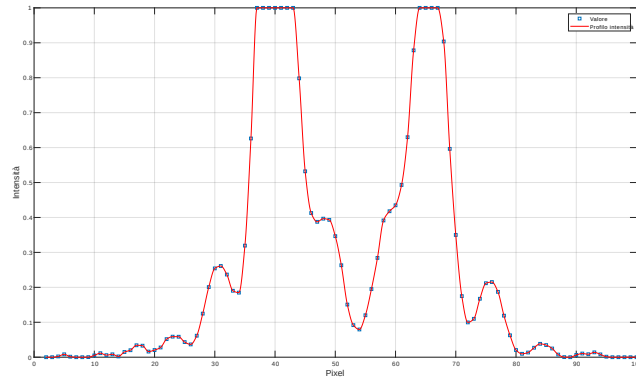
(d) spostamento di 1,5 mm, fig. 3.13g



(e) spostamento di 2,5 mm, fig. 3.13i



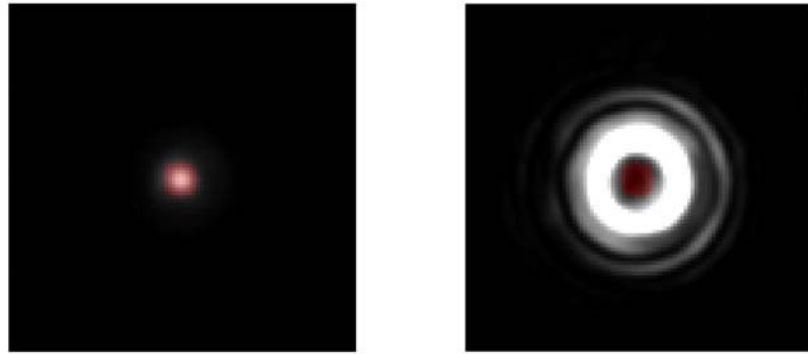
(f) spostamento di 3,5 mm, fig. ??



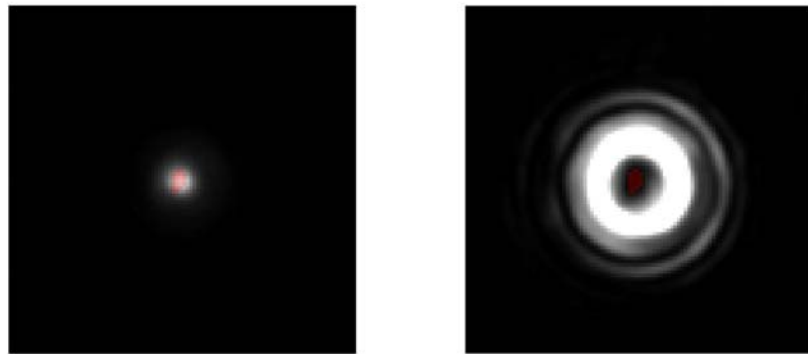
(g) spostamento di 5,0 mm, fig. 3.13l

Figura 3.12: Profili delle immagini della traslazione lungo z

Son stati aggiunti i profili per poter avere una visione migliore dell'andamento dell'intensità delle immagini. Tali risultati saranno commentati nel capitolo successivo.

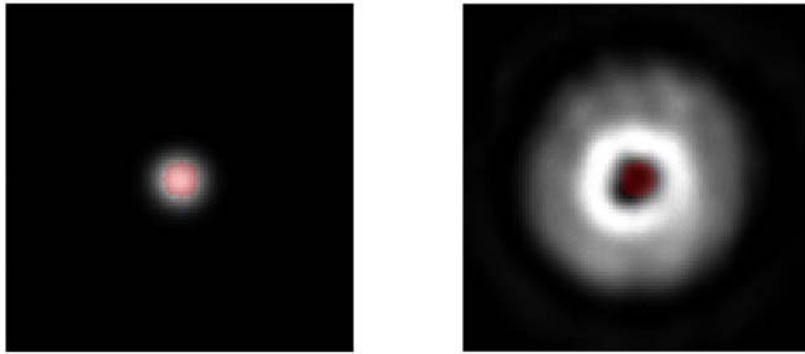


(a) I pixel evidenziati in rosso indicano l'area circolare in cui è stato calcolato il segnale

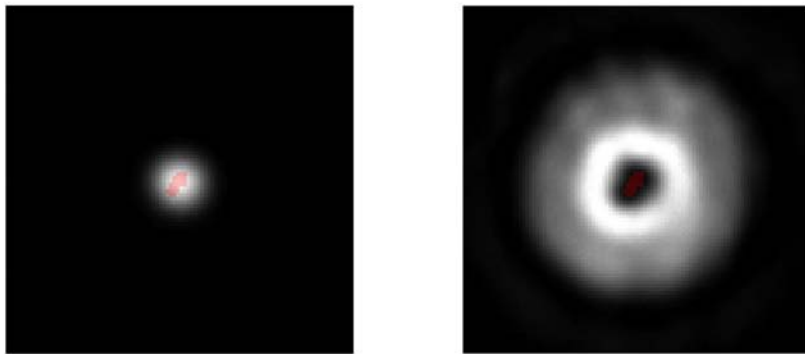


(b) I pixel evidenziati in rosso indicano l'area circolare in cui è stato calcolato il segnale considerando il valore di soglia del 5%

Figura 3.13: Quest'immagine fa riferimento alle misure di figura 3.8

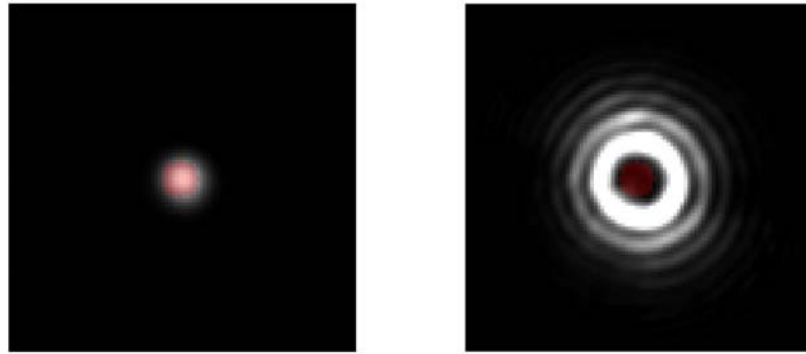


(a) I pixel evidenziati in rosso indicano l'area circolare in cui è stato calcolato il segnale

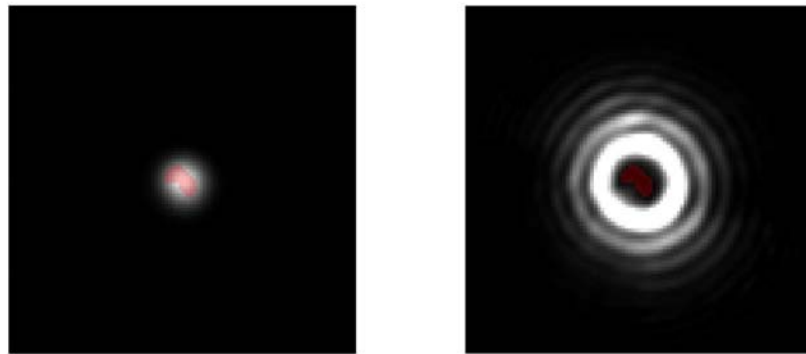


(b) I pixel evidenziati in rosso indicano l'area circolare in cui è stato calcolato il segnale considerando il valore di soglia del 5%

Figura 3.14: Quest'immagine fa riferimento alle misure di figura 3.9



(a) I pixel evidenziati in rosso indicano l'area circolare in cui è stato calcolato il segnale



(b) I pixel evidenziati in rosso indicano l'area circolare in cui è stato calcolato il segnale considerando il valore di soglia del 5%

Figura 3.15: Quest'immagine fa riferimento alle misure di figura 3.10

Capitolo 4

Risultati

I risultati delle diverse misurazioni son racchiusi nelle tabelle seguenti. La prima misurazione, come mostrato nella figura 3.9, presentava un immagine leggermente sfocata. Il sistema è stato quindi corretto, fig. 3.8, fino ad ottenere una figura dove si possa distinguere il pattern di Airy, indice di buona messa a fuoco. La spirale di fase è stata girata per osservare verificare un'eventuale differenza tra il caso in cui il fascio di luce investe la spirale incisa o il retro della piastrina.

Con R_r si intende il rapporto tra gli integrali dei segnali calcolati su un area dal raggio pari a 5 pixel, $R_{5\%}$ è il rapporto tra integrali dei segnali considerando la soglia del 5% mentre R indica il rapporto tra il massimo ed il minimo. Il rapporto tra i tempi di esposizione dei fotogrammi di riferimento e quelli sovraesposti per la misura del segnale attenuato son indicati con R_t .

Metodo di calcolo	Rapporto atte- nuazione	Attenuazione percentuale	Pixel considera- ti
R_r	$1,39 \times 10^{-2}$	98,60%	81
$R_{5\%}$	$3,30 \times 10^{-2}$	99,67%	25
R	$1,50 \times 10^{-3}$	99,85%	/
R_t	11,3743		

Tabella 4.1: Misurazione 1, fig. 3.9.

Metodo di calcolo	Rapporto atte- nuazione	Attenuazione percentuale	Pixel considera- ti
R_r	$1,31 \times 10^{-2}$	98,69%	81
$R_{5\%}$	$1,90 \times 10^{-3}$	99,81%	23
R	$4,1120 \times 10^{-4}$	99,95%	/
R_t	19,5294		

Tabella 4.2: Misurazione 2, fig. 3.8.

Metodo di calcolo	Rapporto atte- nuazione	Attenuazione percentuale	Pixel considera- ti
R_r	$6,50 \times 10^{-3}$	99,35%	81
$R_{5\%}$	$2,50 \times 10^{-3}$	99,74%	48
R	$2,45 \times 10^{-4}$	99,97%	/
R_t	13,1446		

Tabella 4.3: Misurazione 3, fig. 3.10.

	Misura 1	Misura 2	Misura 3	Media	Scarto massimo
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
R_r	98,61	98,69	99,35	98,88	0,74
$R_{5\%}$	99,67	99,81	99,75	99,74	0,14
R	99,85	99,96	99,98	99,93	0,13

Tabella 4.4: Come varia l'attenuazione nelle varie misure.

Possiamo osservare come i valori dei risultati siano simili tra loro, tabella 4.4. Il leggero miglioramento delle prestazioni tra la prima e l'ultima misura è probabilmente legato all'acquisizione di una maggior manualità che ha permesso un centraggio più preciso. Il maggior miglioramento è legato alla zona di pixel dove il segnale risulta attenuato, si ricorda che il valore di soglia è calcolato nell'immagine sovraesposta quindi non rappresenta il 5% del segnale massimo di riferimento. Confrontando la variazione dei rapporti di intensità con le immagini dello spostamento lungo l'asse ottico, fig. 3.13, viene confermato che un posizionamento non accurato lungo l'asse z non modificano di molto l'attenuazione massima ma l'attenuazione media e l'area dove si ha un rapporto di attenuazione elevato.

Per avere buone prestazioni di attenuazione il centraggio della sorgente da attenuare sul piano della SPP deve essere molto accurato. Per ottenere tali prestazioni di centraggio con un telescopio terrestre è necessario ricorrere ad un ottica adattiva (OA). I telescopi terrestri son limitati nella loro risoluzione in quanto il segnale luminoso proveniente dai corpi celesti deve attraversare l'atmosfera la quale costituisce un mezzo non omogeneo e non stabile che deforma il fronte d'onda distorcendo la forma delle stelle, fig. 4.1. La variabilità della turbolenza fa muovere lungo il piano focale la posizione del punto dove vengono focalizzati i raggi luminosi. Un telescopio con OA è dotato di specchi flessibili i quali vengono deformati in modo tale per cui la loro forma corregga il fronte d'onda in arrivo, fig.4.2. Il sistema è con-

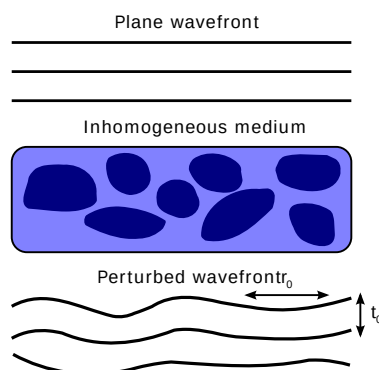


Figura 4.1: Rappresentazione artistica della distorsione causata dall'atmosfera.

Credit: [10]

trollato in ciclo chiuso deviando una parte della luce raccolta dal telescopio e dopo lo specchio flessibile verso un analizzatore di fronte d'onda che controlla la deformazione dello specchio. Come mostrato in diversi lavori, un ottica adattiva costituita da uno specchio tip tilt retroazionato permette di mantenere un buon allineamento [6] [7]. Nel caso non fosse presente tale sistema è possibile selezionare i frame dove, a causa del moto erratico dovuto all'atmosfera terrestre, l'immagine cade correttamente nella dislocazione [2]. La posizione lungo l'asse ottica risulta meno critica, è meno sensibile agli spostamenti ed agli errori di montaggio e durante l'esposizione non varia a causa della turbolenza atmosferica.

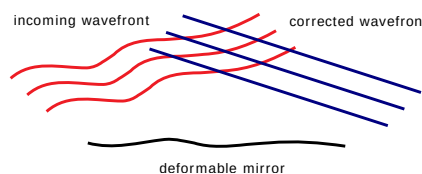


Figura 4.2: Rappresentazione artistica della correzione.

Credit: [10]

4.1 Confronto con altri risultati sperimentali

Per meglio giudicare la qualità del filtro di fase, è stata effettuata una ricerca bibliografica di lavori simili per poter confrontare i loro risultati con quelli ottenuti durante questo lavoro di tesi.

Come già evidenziato in precedenza le prestazioni teoriche di attenuazione per una SPP son dell'ordine di 10^{-8} se prodotte con 512 gradini, ben superiori a quanto ottenuto durante gli esperimenti. Rispetto alla precedente versione costruita per l'Università di Padova, possiamo vedere che i risultati di attenuazione ottenuti nell'osservazione della stella Epsilon² Lyrae D presentano un'attenuazione del picco del 82,9% [2] mentre nel filtro analizzato si è rivelato superiore al 99% per l'area centrale. Tali risultati son stati ottenuti dall'osservazione di una stella attraverso un telescopio non dotato di ottica adattiva dunque in una situazione più svantaggiosa, rispetto a quella del laboratorio.

Son analizzati quindi i risultati ottenuti da Swartzlander in una dimostrazione di coronografia a vortice ottico [6]. In tale lavoro un telescopio dotato di un sistema adattivo che permettesse di mantenere centrato nella dislocazione centrale lo spot di una stella del sistema Cor Caroli (alf 2 CVn). La SPP utilizzata ha un disegno simile a quella usata nel lavoro di questa tesi ma la lunghezza d'onda di lavoro è di $800\text{ }\mu\text{m}$. Son stati descritti sia i risultati ottenuti nell'osservazione al telescopio, pari ad un'attenuazione massima del 97%, sia quelli ottenuti dai test in laboratorio che sebbene siano stati condotti ad una lunghezza d'onda diversa hanno valori di attenuazione del 99.8% comparabili con quanto da noi ottenuto.

È possibile affermare quindi che la SPP analizzata rappresenta lo stato dell'arte per quanto riguarda le sue tecniche di realizzazione e i risultati ottenuti. Le prestazioni aspettate erano però di un sistema con attenuazioni comparabili con quelle sperimentali. Sono necessarie ulteriori analisi di tipo sperimentale e numerico volte a capire per quale motivo le prestazioni ottenute son così distanti dai valori teorici. Un'ipotesi, vista la buona finitura della superficie evidenziata attraverso l'uso del SEM, fig. 2.4, è legata alla dimensione troppo elevata del pin hole. Un'altra potrebbe esser slegata dalla

SPP e legata al set up, le riflessioni interne descritte nel paragrafo 3.2 potrebbero causare della luce diffusa che cadendo nella porzione centrale va a sommarsi al segnale abbassando così le prestazioni del sistema.

Capitolo 5

Conclusioni

Il sistema realizzato presenta prestazioni limitate dalla diffrazione e l'attenuazione massima ottenuta è pari a $2,45 \times 10^{-4}$ comparabili con lo stato dell'arte all'epoca della realizzazione (2013). Si è visto che il sistema deve avere una precisione di allineamento molto elevata nel piano perpendicolare al cammino ottico. L'uso di ottiche con correzione del centraggio è quindi auspicabile per poter essere utilizzato efficacemente in ambito astronomico.

Lo scopo d'elezione della coronografia a vortice ottico, come già descritto è l'osservazione diretta degli esopianeti. L'attenuazione offerta tuttavia non raggiunge ancora livelli sufficienti e tecniche di sottrazione di stelle di riferimento devono essere implementate per riuscire a rivelare il segnale proveniente dai pianeti [7]. Ulteriori indagini dovranno essere condotte per capire la discrepanza tra le prestazioni ottenute sperimentalmente e quelle teoriche. La quantità di sistemi extrasolari e esopianeti osservabili rimane comunque ridotta a stelle delle quali sia presente una stella simile da utilizzare come riferimento e pianeti di grandi dimensioni o sufficientemente caldi da avere un segnale che rispetto a quello della stella madre non sia troppo piccolo.

Un ulteriore problema è legato alla stretta banda spettrale di funzionamento: è possibile creare maschere di fase per ogni lunghezza d'onda necessaria per gli scopi scientifici, ma questo rende necessari lunghi tempi di integrazione per ovviare alla minor quantità di luce disponibile. Una possibile soluzione è l'uso di maschere di fase acromatiche con una banda di

funzionamento più estesa [8].

5.1 Prossimi sviluppi

Per migliorare l'analisi della SPP è possibile effettuare altri test di laboratorio che utilizzando un pin hole più piccolo riesca a realizzare un sistema puramente limitato dalla diffrazione: il sistema utilizzato infatti aveva un foro del diametro di $20\ \mu m$ maggiore ai $\sim 6\ \mu m$ di diametro che costituiscono il limite massimo del sistema. La distribuzione di energia di un vortice ottico prodotto da un immagine puramente diffrattiva secondo le simulazioni numeriche dovrebbe avere una maggior attenuazione a livello di integrale del segnale sull'area centrale [2].

Un ulteriore verifica può essere effettuata utilizzando un sistema che usi due sorgenti di luce diverse che permettano di capire quali sono i limiti angolari dell'attenuazione offerta. La luce deve provenire da due laser diversi in quanto se provenisse da un laser singolo i due fasci sarebbero coerenti tra loro e si avrebbero effetti di interferenza che renderebbero non rappresentative le immagini che si otterrebbero.

Questi ulteriori test potrebbero spiegare come mai le prestazioni ottenute sono così diverse da quelle teoriche.

Le prestazioni di attenuazione sono strettamente legate alla precisione ottenuta durante il processo produttivo è possibile che, grazie alle future innovazioni nel campo della nanolitografia tra qualche anno siano disponibili sistemi con efficienza vicino a quella teorica.

Bibliografia

- [1] A. Boccaletti and P.-O. Lagage and P. Baudoz (2015) *The Mid-Infrared Instrument for the James Webb Space Telescope , V: Predicted Performance of the MIRI Coronagraphs*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, vol **127** 953 pag. 633. Disponibile presso <http://stacks.iop.org/1538-3873/127/i=953/a=633>
- [2] Mari E. (2012), *Optical Vortex Diffractive Optics For Terrestrial And Space Applications*. Tesi di dottorato, Università di Padova
- [3] Rebernik Ribič, Primož and Rösner, Benedikt and Gauthier, David and Allaria (2017) *Extreme-Ultraviolet Vortices from a Free-Electron Laser*. Phys. Rev. X **7**, 3 031036
- [4] M. S. Soskin, V. N. Gorshkov, M. V. Vasnetsov, J. T. Malos, N. R. Heckenberg, (1997) *Topological charge and angular momentum of light beams carrying optical vortices*. Physical Review A, vol. **56**, pp. 4064-4075.
- [5] Bastian Schwarz, Gunnar Ritt, Michael Koerber, Bernd Eberle (2017) *Laser-induced damage threshold of camera sensors and microoptoelectromechanical systems*. Optical Engineering **56** (3) 56 - 56 - 11,

- [6] Grover A. Swartzlander, Erin L. Ford, Rukiah S. Abdul-Malik, Laird M. Close, Mary Anne Peters, David M. Palacios, and Daniel W. Wilson, (2008), *Astronomical demonstration of an optical vortex coronagraph*. Opt. Express **16**, 10200-10207
- [7] Serabyn, Mawet, Burruss (2010), *An image of an exoplanet separated by two diffraction beamwidths from a star*. Nature **464**
- [8] Grover A., Swartzlander Jr., (2006), *Achromatic optical vortex lens*, Opt. Lett. **31**, 2042-2044
- [9] Rainer F. (2004) Disponibile presso
<https://it.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6490-find-centroid-of-a-monochrome-laserspot-within-a-dark-background>
- [10] By 2pem - Own work, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15279464>
- [11] By 2pem - Own work, CC BY-SA 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15278966>