

**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea Triennale in Fisica

Tesi di Laurea

**Verifica della distanza focale dello strumento NISP della
missione Euclid mediante analisi delle immagini**

Relatore

Dr. Chiara Sirignano

Correlatore

Dr. Stefano Dusini

Laureando

Lorenzo Rosset

Anno Accademico 2019/2020

Indice

1	Introduzione	2
2	Il telescopio spaziale Euclid	2
3	Lo strumento NISP	3
3.1	Acquisizione delle immagini	5
4	Test di messa a fuoco dello strumento NISP	7
5	Analisi delle immagini	8
5.1	Classificazione delle immagini	9
5.2	Individuazione della sorgente	9
5.3	Determinazione del fuoco tramite σ_{PSF}	9
5.4	Determinazione del fuoco dall'intensità della sorgente	13
5.5	Stima del numero di pixel costituenti l'immagine	13
6	Conclusioni	14

1 Introduzione

Euclid [1] è una missione dell' *European Space Agency* (ESA) il cui lancio è previsto nel 2022 e che avrà la durata di sei anni. L'obiettivo della missione è quello di investigare alcune delle grandi questioni aperte in cosmologia, come la comprensione dell'espansione accelerata dell'universo, e di come questa influenzi la distribuzione di materia su scala cosmologica.

I punti principali su cui la missione vuole fare luce sono: capire la natura dell'energia oscura, testare la validità della relatività generale su scala cosmologica e porre nuovi vincoli alle teorie di gravità modificata, ottenere preziose informazioni sulla materia oscura e sulla massa dei neutrini, stabilire nuovi vincoli sulle condizioni iniziali dell'universo e capire la natura dell'inflazione cosmica.

La missione Euclid si concentrerà sull'osservazione dell'universo a un redshift $z \sim 2$, corrispondente a dieci miliardi di anni fa, quando le prime strutture di materia cominciano a formarsi e ad aggregarsi. I due metodi che verranno utilizzati sono il *3D Galaxy Clustering*, ovvero lo studio della distribuzione degli ammassi di galassie tramite redshift spettroscopico delle righe $H\alpha$, e il *Weak Lensing*, cioè lo studio della distorsione delle galassie lontane dovuta alla presenza di materia oscura tra galassia e osservatore. Al termine dei sei anni previsti per la missione, il telescopio Euclid avrà osservato una porzione di cielo di circa 15000 deg^2 , corrispondenti a circa un terzo della volta celeste.

Il satellite è equipaggiato con un telescopio e due strumenti: il *Visual Imager* (VIS) e il *Near Infrared Spectrometer and Photometer* (NISP). I due strumenti sono stati integrati e hanno superato le ultime campagne di test nel 2020. I test effettuati hanno confermato il corretto funzionamento e la capacità di acquisire ed analizzare immagini secondo i requisiti fissati per la missione.

In questo lavoro di tesi mi sono occupato di analizzare alcuni dati relativi alla campagna di test dello strumento NISP; in particolare ho verificato la capacità di messa a fuoco di un'immagine sul piano focale dello strumento.

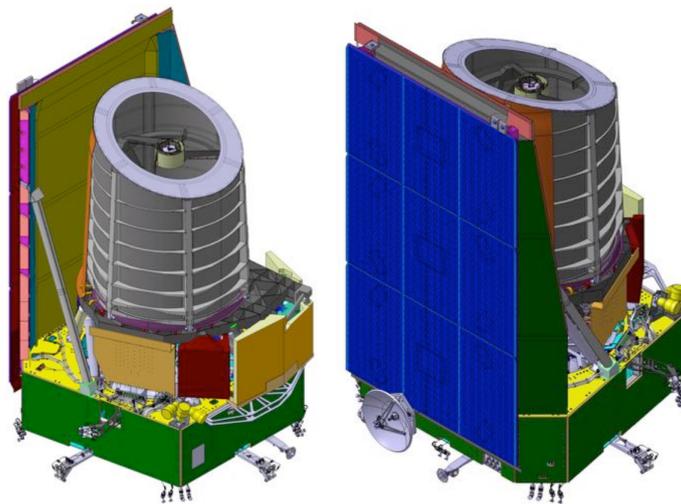


Figura 1: Rappresentazione del satellite Euclid

2 Il telescopio spaziale Euclid

Il satellite Euclid è composto da due moduli [1][2][3]: il *Service Module*, e il *Payload Module*. Il Service Module comprende l'elettronica di gestione e analisi dati degli strumenti scientifici e del satellite. Il Payload Module comprende invece il telescopio e gli strumenti VIS e NISP. L'elettronica del Service Module si trova a temperatura ambiente, mentre il Payload Module ha una temperatura più bassa per garantire il corretto funzionamento dei rivelatori e la stabilità termica del telescopio. In figura 2 è riportata una rappresentazione schematica del Payload Module.

Il telescopio di Euclid è dotato di tre specchi in carburo di silicio SiC (M1, M2 e M3) in configurazione Korsch. Il particolare tipo di configurazione consente di avere abbastanza gradi di libertà da raggiungere un buon livello di correzione delle aberrazioni sferiche, cromatiche e dell'astigmatismo.

Lo specchio primario M1 ha un diametro di 1.2 m e la lunghezza focale complessiva del telescopio è di 24.5 m. Dal momento che le performance del telescopio sono fortemente dipendenti dalla distanza tra M1 e M2, lo specchio secondario è dotato di un sistema per correggere eventuali disallineamenti, rilassamenti o distorsioni dovute ai cambiamenti termici che possono verificarsi dopo il momento del lancio. Tra gli specchi M2 e M3 sono presenti due *folding mirrors* (FoM1 e FoM2) che permettono di direzionare il percorso ottico in una configurazione ottimale. Un terzo folding mirror (FoM3) è posizionato subito prima di VIS, con lo scopo di ottimizzare l'area illuminata dello strumento.

Per separare la luce in lunghezza d'onda corretta per NISP e VIS, all'uscita del telescopio è posto un *beam splitter* (dicroico) in grado di trasmettere la luce entro un determinato intervallo di lunghezze d'onda e di riflettere il resto. Il fascio trasmesso viene proiettato sul piano focale di NISP, mentre il fascio riflesso entra nel percorso ottico che porta allo strumento VIS.

Al fine di ridurre al minimo il segnale di rumore dovuto alla *dark current*, tutta la strumentazione sensibile viene mantenuta a una temperatura massima di circa 240 K, mentre per i rivelatori la temperatura è mantenuta a 100 K.

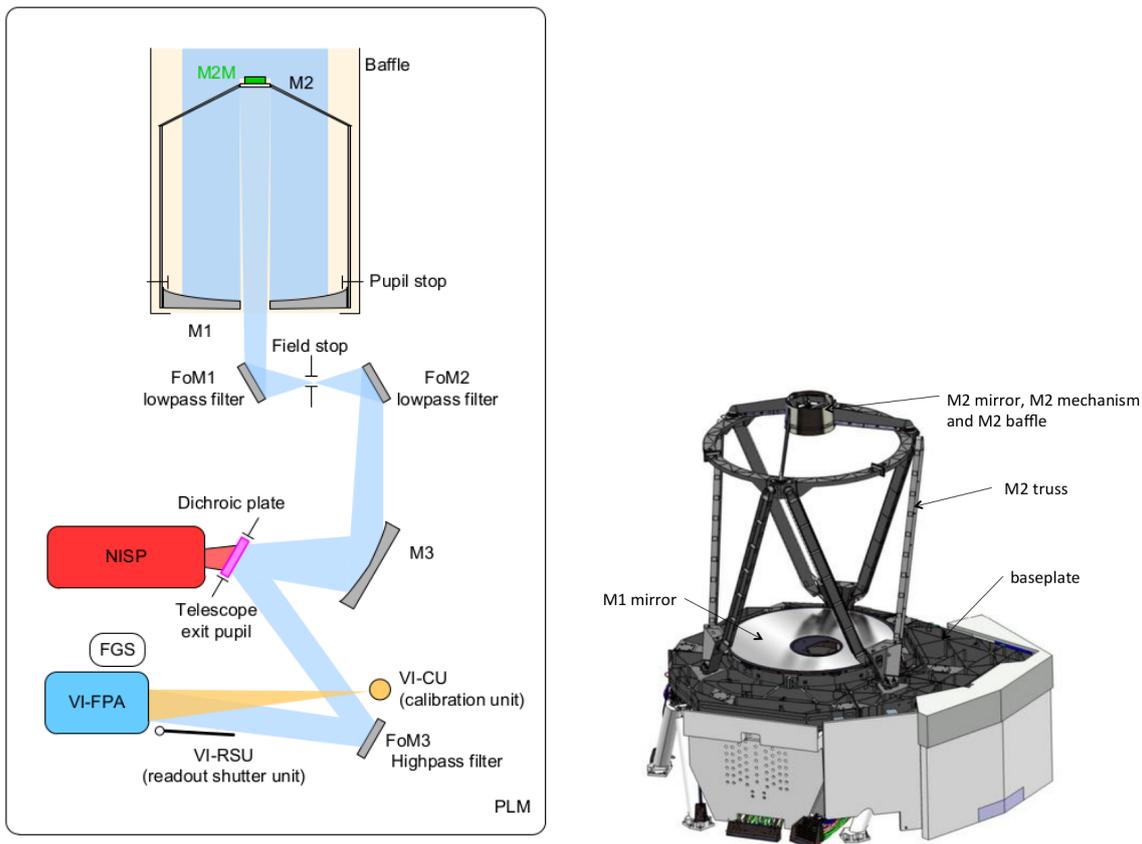


Figura 2: A sinistra lo schema ottico del telescopio, a destra una rappresentazione schematica del Payload Module

3 Lo strumento NISP

Lo strumento NISP [2][3][4] consente di osservare le galassie nel vicino infrarosso e di misurarne il redshift nell'intervallo $0.9 < z < 1.8$. È possibile eseguire le misure sia in modalità spettroscopica che in modalità fotometrica. Nel primo caso il redshift si ottiene misurando lo spostamento verso il rosso della riga di emissione $H\alpha$ dell'idrogeno, mentre in modalità fotometrica si misura l'intensità della

sorgente a tre diverse lunghezze d'onda, e si confronta l'andamento trovato con lo spettro di corpo nero atteso. Le osservazioni in modalità fotometrica sono di supporto alle misure di Weak Lensing mentre quelle in modalità spettroscopica vengono utilizzate per le misure di Galaxy Clustering.

La struttura dello strumento è riportata in figura 3. Complessivamente, le parti principali del rivelatore sono:

- **2 ruote porta-filtri**

- NI-FWA (*Filter Wheels Assembly*): Ospita i filtri ottici necessari per le osservazioni fotometriche
- NI-GWA (*Grisms Wheel Assembly*): Ospita i grisms utilizzati per le misure spettroscopiche. I grisms sono la combinazione di un prisma e di un reticolo di diffrazione, disposti in modo tale che la luce a una lunghezza d'onda prestabilita attraversi il grism senza venire deviata. Il dispositivo produrrà quindi uno spettro centrato nella riga della particolare lunghezza d'onda scelta [5]. La struttura di un grism è riportata in figura 5.

Le ruote porta-filtri sono mostrate in figura 4.

- **Piano focale** (NI-DS, *Detector System*): è composto da un array di 4×4 detectors (chiamati H2RG) che lavorano alla temperatura di 95 K. Ogni detector è una matrice di 2048×2048 pixel, di conseguenza nell'intero piano focale ci sono oltre 60 milioni di pixel in un'area di 16×16 cm². Ciascuna metà del piano focale (8 detectors) è collegata a una unità DPU (*Data Processing Unit*), responsabile del processo di acquisizione e del processamento delle immagini. Ogni pixel, di dimensioni 18×18 μm^2 , può essere letto in maniera non distruttiva, in modo che sia possibile eseguire diverse misure di seguito e mediarle per ridurre il rumore del segnale. Dato che ogni pixel misura 0.3 arcsec, il campo visivo complessivo è di 0.5 deg².
- **Elettronica calda** (NI-WE, *Warm Electronics*): si trova nel Service Module e permette l'acquisizione sincrona dei detectors e il pre-processamento dei dati a bordo. È costituita da NI-ICU (*Instrument Control Unit*) e NI-DPU (*Data processing Unit*). Oltre a permettere l'acquisizione (la DPU), la ICU svolge funzione di controllo sulle ruote e sul sistema di termistori che si occupa della stabilità termica di NISP.
- **Unità di calibrazione** (NI-CU, *Calibration Unit*): è posta vicino alle ruote porta-filtri. L'unità è dotata di 5 LED caratterizzati da lunghezze d'onda differenti, i quali vengono usati per la calibrazione e caratterizzazione degli strumenti in volo.

Lo strumento è inoltre dotato di due sistemi di lenti. Il NI-CoLA (*Corrector Lens Assembly*) è posto tra la pupilla del telescopio e le ruote porta-filtri, e serve per correggere eventuali aberrazioni residue. Il NI-CaLA (*Camera Lens Assembly*) è invece posto dopo le ruote porta-filtri, e ha lo scopo di focalizzare l'immagine sul piano focale dello strumento.

Le osservazioni in modalità fotometrica vengono eseguite mantenendo aperta la NI-GWA e utilizzando i filtri della NI-FWA. Questa è composta da cinque alloggiamenti, di cui uno è vuoto, uno serve per chiudere lo strumento e i tre rimanenti sono occupati dai filtri nelle tre bande: *Y* (950 nm - 1192 nm), *J* (1192 nm - 1544 nm) oppure *H* (1544 nm - 2000 nm). Per le misurazioni in modalità spettroscopica si tiene aperta la NI-FWA e si utilizza la NI-GWA. Dei cinque alloggiamenti, uno è vuoto e gli altri ospitano i quattro grisms di diversa banda passante. Chiudendo la NI-FWA si entra in *Dark Mode* per eseguire la misurazione del rumore di fondo.

La sequenza di acquisizione nominale per ogni punto del cielo può essere divisa in 4 cicli, ciascuno dei quali acquisisce l'immagine di una medesima porzione di cielo di 0.54 deg². Ogni ciclo consiste in una modalità spettroscopica e tre modalità fotometriche, al termine delle quali si esegue un leggero spostamento del campo visuale del telescopio (dithering) che ha lo scopo di permettere un migliore campionamento delle immagini ed eliminare gli eventi dovuti ai raggi cosmici. I due strumenti, VIS e NISP, sono attivi contemporaneamente durante la sequenza di osservazione, ma VIS acquisisce le immagini solo durante la modalità spettroscopica di NISP. Al termine della sequenza il telescopio

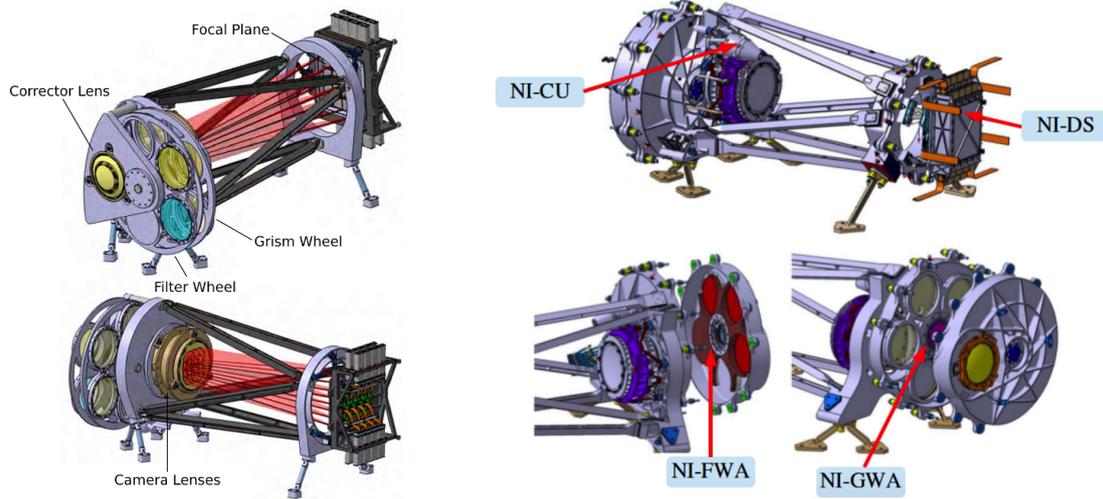


Figura 3: Rappresentazione delle parti principali dello strumento NISP

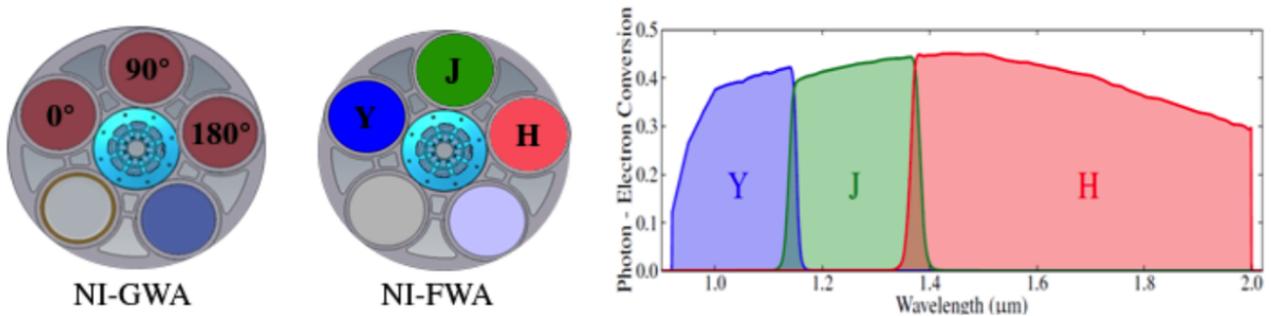


Figura 4: A sinistra le ruote porta-filtri, NI-GWA e NI-FWA, e a destra il grafico del profilo dei filtri per la modalità fotometrica

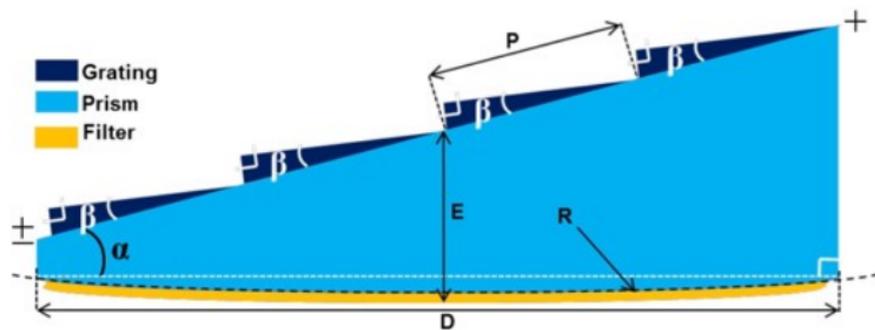


Figura 5: Rappresentazione di un grism

si sposta su un altro campo di immagine; nel frattempo la NI-FWA viene posizionata in modo da effettuare la misura del background. Prima di venire processati ad alto livello, i dati raccolti da Euclid vengono integrati con misure analoghe raccolte da altre missioni. La figura 6 mostra lo schema della sequenza di acquisizione, mentre la figura 7 mostra la porzione di cielo che verrà osservata da Euclid nel corso dei sei anni della missione.

3.1 Acquisizione delle immagini

L'insieme dei fotodiodi e transistor che compongono ciascuno dei 16 detector del piano focale prende il nome di SCA (*Sensor Chip Assembly*). Ad ogni SCA è associata una SCE (*Sensor Chip Electronics*),

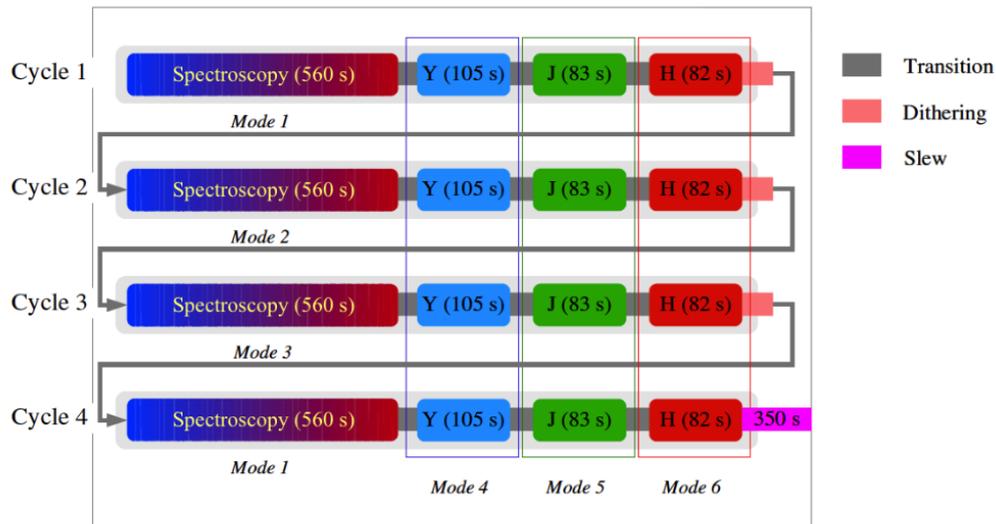


Figura 6: Schema del ciclo di acquisizione delle immagini

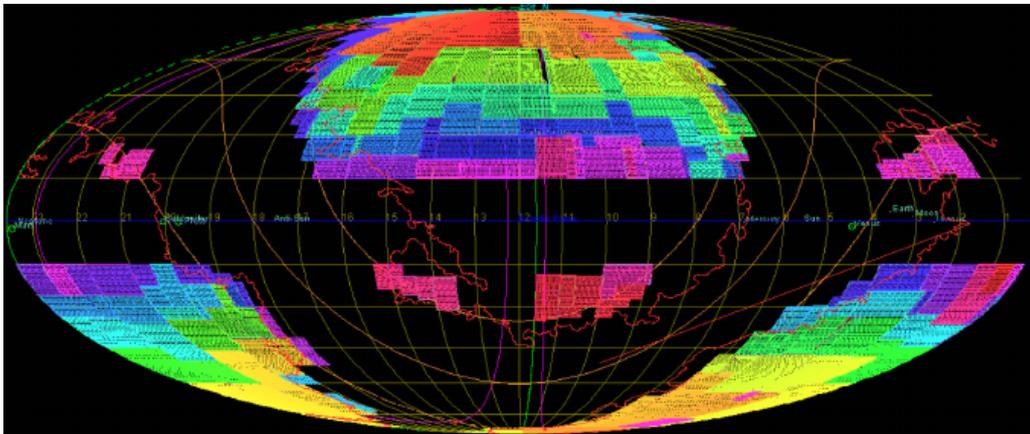


Figura 7: Porzione di cielo, in coordinate ellittiche, che verrà osservata da Euclid nel corso dei sei anni di missione. La zona in nero corrisponde al piano dell'eclittica e al piano galattico

che ha il compito di controllare l'acquisizione delle immagini e di digitalizzare il segnale, e una DCU (*Detector Control Unit*) che processa le immagini secondo la specifica modalità di acquisizione [4].

Il processo di acquisizione delle immagini deve rendere conto di diversi aspetti:

- è necessario che il rumore del detector sia ridotto al minimo possibile
- lo strumento NISP ha una telemetria limitata a 250 Gbits/giorno, il che richiede che solo una piccola parte di informazioni per pixel può essere trasmessa a terra
- nel caso si presentino degli eventi singoli, come ad esempio il passaggio di raggi cosmici, è necessario che questi vengano isolati e scartati

Per soddisfare tali richieste risulta conveniente utilizzare una modalità di acquisizione che, anziché basarsi su una singola esposizione, restituisca un'immagine ottenuta sfruttando diversi gruppi di acquisizioni. Lo strumento NISP utilizza una modalità chiamata *Multiaccumulated Mode* MACC[N, M, D] (si veda la figura 8) che consiste nell'acquistare N immagini, ciascuna ottenuta mediando gruppi di M acquisizioni (processo di coadding). I vari gruppi sono separati da D immagini che non vengono trasferite. Per ciascun pixel viene fatto poi un fit lineare sulle N immagini, ottenendo così il coefficiente angolare corrispondente al flusso di fotoni incidenti.

Il processo di acquisizione è il seguente. Ogni 1.41 secondi la SCE acquisisce dalla SCA un'immagine sottoforma di segnale analogico. Il segnale viene quindi amplificato e digitalizzato in un formato a 16 bit. Nel caso in cui l'immagine rientri in uno degli N gruppi di acquisizione, questa viene poi inviata e salvata nella DCU. Ogni M acquisizioni la DCU esegue il coadding, cioè calcola per ogni pixel la media degli M valori, ed invia l'immagine mediata alla DPU. Quest'ultima si occupa del processamento dei dati, eseguendo un fit lineare per ogni pixel a partire da un gruppo di N immagini e restituendo in uscita due matrici di dati: una contenete i coefficienti angolari dei fit e l'altra i corrispondenti valori del chi-quadro. Nel caso delle acquisizioni in modalità spettroscopica il chi-quadro viene salvato in un formato a 16 bit, mentre nella modalità fotometrica viene convertito in una variabile booleana: 0 se il fit è ben riuscito e 1 altrimenti.

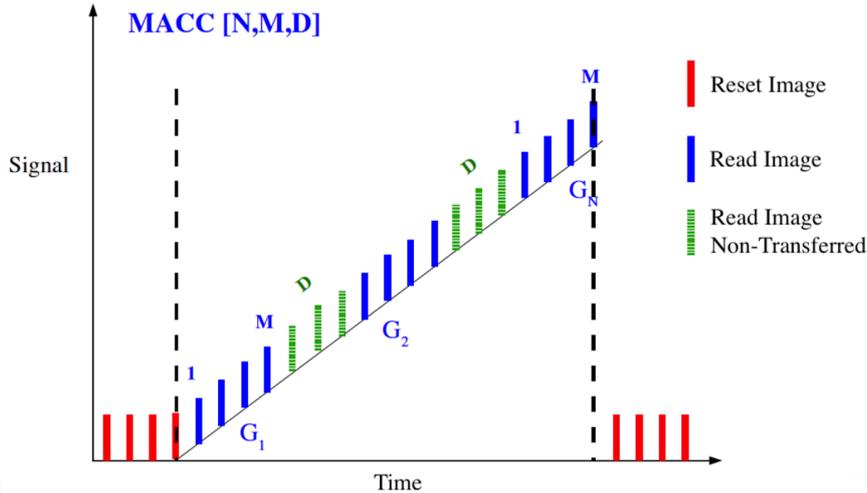


Figura 8: Rampa di acquisizione della modalità MACC[N, M, D]

4 Test di messa a fuoco dello strumento NISP

Il test di misurazione della posizione di messa a fuoco [6] si basa sull'analisi delle misure ottenute da una sorgente puntiforme monocromatica generata dallo strumento NI-TS (*NISP Telescope Simulator*). Il rivelatore lavora in modalità fotometrica e il tipo di acquisizione utilizzata è MACC[3,2,1]. Il diametro del fascio alla sorgente è di $2 \mu\text{m}$ e la lunghezza d'onda utilizzata è di 1000 nm , ossia nella banda Y dello strumento. Nel sistema di riferimento utilizzato, ciascun punto sul piano del rivelatore è identificato dalle coordinate y e z , mentre la posizione del rivelatore rispetto alla sorgente è data dalla coordinata x .

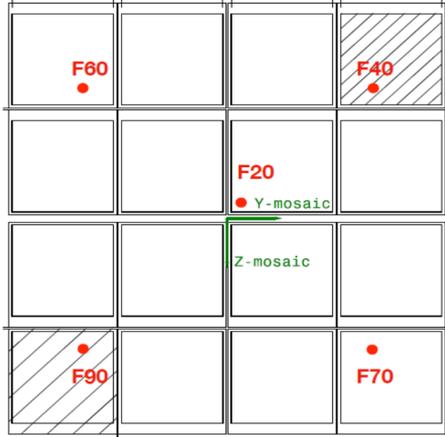
Per caratterizzare il piano di fuoco, la sorgente è stata proiettata in cinque diverse posizioni (y, z) sul piano del rivelatore, come riportato in figura 9. Per ciascuna posizione la sorgente è stata defocalizzata lungo la direzione x in 17 posizioni, da un minimo di -3 mm a un massimo di $+3 \text{ mm}$ intorno al punto di fuoco atteso. La distanza relativa tra il piano focale e NI-TS è misurata con precisione da un sistema di tracciatori laser, e la posizione di messa a fuoco attesa è stata ottenuta inizialmente tramite una simulazione *Zeemax*, ed è stata successivamente corretta con la prima campagna di test. La determinazione della posizione di messa a fuoco sarà quindi riferita alla posizione di fuoco fornita dalla simulazione, che verrà assunta essere lo zero dell'asse x , mentre il punto di fuoco atteso desunto da una precedente campagna di test corrisponde alla posizione $x = -1.3 \text{ mm}$.

Dato che le dimensioni della sorgente sono inferiori a quelle del singolo pixel, per ogni posizione fuori fuoco sono state fatte da 25 a 100 acquisizioni (dithering), in modo da ridurre l'incertezza associata alla larghezza del punto. Il numero di acquisizioni dipende dalla posizione del piano focale rispetto a NI-TS, ed è massimo in prossimità del punto di fuoco atteso. Tra un'acquisizione e l'altra viene ogni volta eseguito uno spostamento casuale della sorgente sul piano focale rispetto alla posizione precedente

($y_{i+1} = y_i + y_{rnd}$, $z_{i+1} = z_i + z_{rnd}$), con uno spostamento massimo paragonabile alle dimensioni di un pixel. Il numero di immagini acquisite per ogni posizione x è riportato nella tabella 1.

Le varie fasi del test possono essere riassunte come segue:

1. Posizionamento della sorgente luminosa in uno dei cinque punti di riferimento Fxx
2. Acquisizione di un'immagine senza illuminare il piano focale (*Reference dark*)
3. Acquisizione di un'immagine di riferimento con sorgente luminosa (*Light*)
4. Posizionamento della sorgente luminosa alla massima distanza dal punto di fuoco atteso $x = x_{th} - \Delta x_{max}$
5. Acquisizione di un'immagine di riferimento con la sorgente luminosa (*Light*)
6. Acquisizione di 25 - 100 immagini in posizioni (y, z) casuali intorno alla posizione di riferimento
7. Spostamento della sorgente verso il punto di fuoco con passo variabile da 0.3 a 0.6 mm
8. Ripetere i punti 6 e 7 fino al raggiungimento della massima distanza dal punto di fuoco atteso $x = x_{th} + \Delta x_{max}$
9. Ripetere la procedura per ognuno dei cinque punti sul piano focale



Posizione	y_{nisp} (mm)	z_{nisp} (mm)
F20	9.991	-12.941
F40	105.662	-105.164
F60	-104.701	-105.167
F70	104.857	105.454
F90	-104.497	104.860

Figura 9: Piano focale di NISP. A sinistra si vedono i 16 rivelatori e la posizione dei punti utilizzati per la misura del fuoco, a destra le coordinate dei punti nel sistema di riferimento di NISP

x (mm)	-0.175	-0.175	-3.175	-4.3	-3.7	-3.1	-2.8	-2.5	-2.2	-1.9
Numero immagini	1 (Dark)	1 (Light)	1 (Light)	25	25	50	50	50	100	100
x (mm)	-1.6	-1.3	-1.0	-0.7	-0.4	-0.1	0.2	0.8	1.1	1.7
Numero immagini	100	100	100	100	75	50	50	50	25	25

Tabella 1: Numero di acquisizioni in funzione della posizione

5 Analisi delle immagini

In questo lavoro di tesi mi sono occupato di analizzare i dati acquisiti con la sorgente in corrispondenza del punto F20, che rappresenta il centro del piano focale. Per determinare quale sia la posizione di messa a fuoco viene studiata la PSF (*Point Spread Function*), ovvero l'immagine risultate nel piano focale a seguito dell'illuminazione con una sorgente luminosa. Per fare questo è possibile procedere in due modi:

- Individuando la posizione per la quale la larghezza del punto luminoso-immagine è minima

- Localizzando la posizione per la quale l'intensità del punto luminoso-immagine è massima

In una prima parte di analisi, l'immagine prodotta dalla sorgente è stata interpolata con una distribuzione gaussiana 2-dimensionale simmetrica

$$f(x_i, y_j) = A \exp\left(-\frac{[x_i - x_0]^2 + [y_j - y_0]^2}{2\sigma^2}\right)$$

Per ciascuna posizione di defocalizzazione è stata determinata la larghezza della PSF attraverso il parametro σ della gaussiana. Il punto di fuoco si ottiene estrapolando dalla distribuzione delle σ in funzione della coordinata x il valore di minimo.

Nella seconda parte di analisi ci si è posti nella regione della sorgente ed è stato individuato il valore di intensità massimo espresso il ADU (Arbitrary Digital Units). Dopo aver determinato un valore di intensità rappresentativo per ciascuna posizione di defocalizzazione, il punto di fuoco è stato determinato come quello per il quale l'intensità della sorgente risulta essere massima.

Infine, nella terza parte di analisi è stato contato il numero di pixel nella regione della sorgente aventi intensità maggiore o uguale a metà del valore del picco. Moltiplicando per l'area di un singolo pixel si ottiene così la sezione a metà altezza (FWHM) del picco. La posizione corrispondente all'area minima sarà quella del fuoco.

5.1 Classificazione delle immagini

La prima operazione svolta è stata quella di assegnare ad ogni immagine la corrispondente posizione di defocalizzazione. Le esposizioni vengono inviate alla DPU a gruppi (dither) di 1 oppure 5 immagini. All'inizio di ogni dither viene generato un codice, chiamato Planning ID, che rimane accessibile all'interno di ogni immagine e permette di associarla al corrispondente gruppo di acquisizione. Ad eccezione delle prime tre immagini, corrispondenti al reference dark e alle immagini di riferimento, tutte le altre appartengono a dither da 5 acquisizioni. Confrontando la sequenza di Planning ID generati con le informazioni contenute nella tabella 1, è stato quindi possibile associare ciascuna immagine alla corrispondente coordinata x .

5.2 Individuazione della sorgente

Prima di procedere all'analisi è necessario individuare la posizione della sorgente all'interno di ogni singola immagine. Come operazione preliminare, ad ogni immagine è stato sottratto il *reference dark* in modo da eliminare il segnale di fondo. Anche a seguito di questa operazione, tuttavia, le ridotte dimensioni del punto luminoso renderebbero arduo distinguere la sorgente dai segnali spuri residui. Si può però sfruttare il fatto che nell'immagine illuminata rimane ben visibile una corona luminosa residua, dovuta alla presenza della fibra ottica (si veda la figura 11, a sinistra), al centro della quale ci si aspetta di trovare il segnale della sorgente. Per l'analisi ci si è quindi ristretti ad una zona di 12×12 pixel intorno al picco centrale.

A riprova del fatto che il picco individuato è quello corretto, sono state confrontate le posizioni alle quali è stato registrato il picco con gli spostamenti teorici applicati alla sorgente nel sistema di riferimento di NI-TS, opportunamente convertiti in unità di pixel. Dalla figura 10 è possibile vedere come l'andamento delle posizioni misurate riproduca bene quello teorico, sebbene le scale non siano identiche a causa del diverso sistema di riferimento utilizzato.

5.3 Determinazione del fuoco tramite σ_{PSF}

La figura 11, a destra, mostra il segnale prodotto dalla sorgente in una posizione lontana dal fuoco atteso. Il picco è stato interpolato con una distribuzione gaussiana 2-dimensionale simmetrica, mentre le proiezioni del segnale lungo gli assi y e z sono state interpolate con due gaussiane 1-dimensionali. Questa seconda operazione serve per individuare un'eventuale asimmetria nella forma della PSF. Dal primo fit è stato estrapolato, per ogni immagine, il parametro σ , mentre dalle proiezioni sono stati ricavati i parametri σ_y e σ_z .

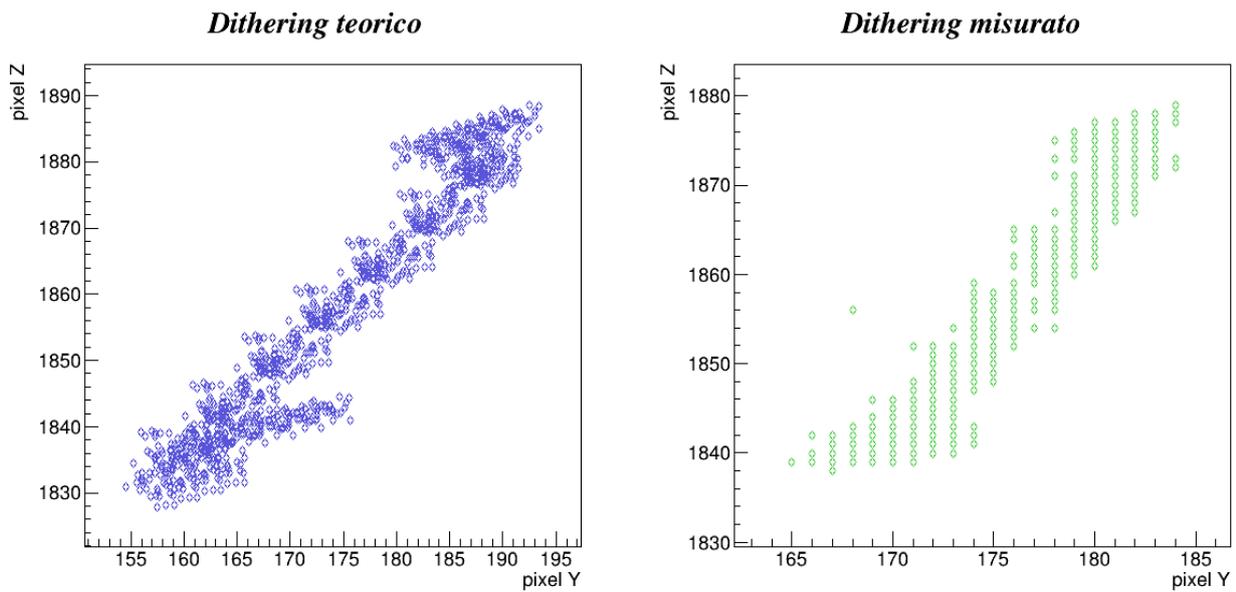


Figura 10: Confronto tra gli spostamenti casuali della sorgente misurati e quelli teorici

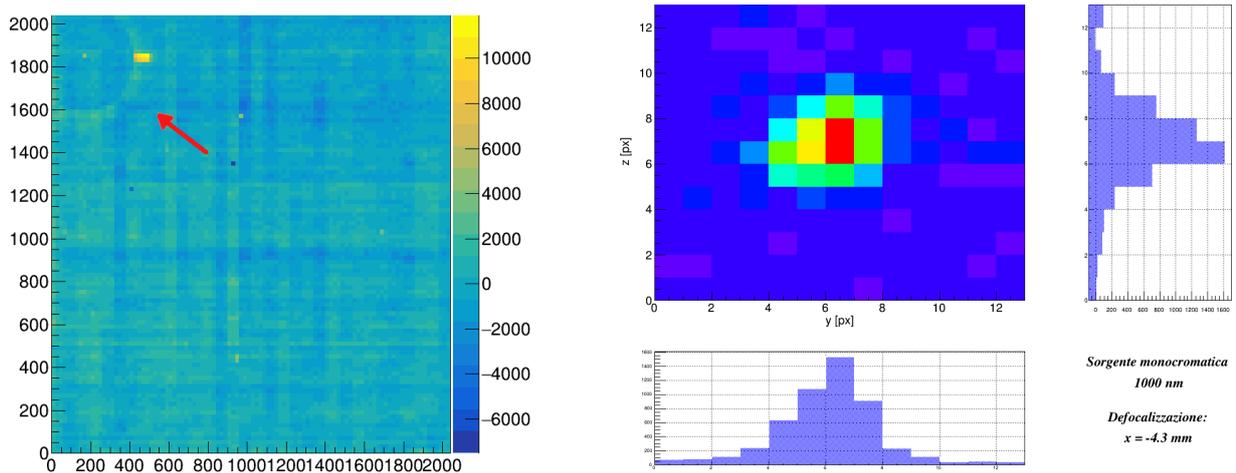


Figura 11: A sinistra è ben visibile l'alone prodotto dalla fibra ottica sul piano dell'immagine. A destra si vede il segnale prodotto dal picco e le proiezioni lungo gli assi y e z

Come descritto sopra, per ogni posizione di defocalizzazione sono state acquisite da 25 a 100 immagini. Ogni parametro di interesse avrà quindi una certa distribuzione per un dato valore della coordinata x . Nella figura 12 sono riportati due esempi di come si distribuiscono i valori di σ presi dalle immagini a una data posizione. Dato che la dispersione è molto ampia e i valori sono tra loro incompatibili, non è sensato ottenere un valore rappresentativo a partire dalla loro media pesata.

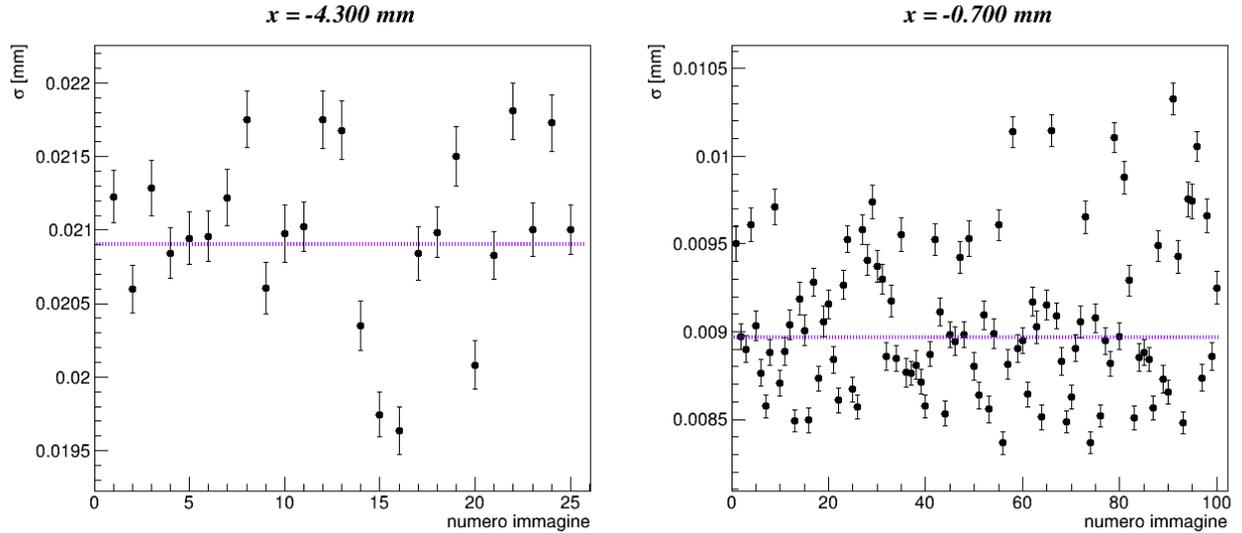


Figura 12: Distribuzione delle σ per due posizioni di defocalizzazione. La linea tratteggiata corrisponde alla media pesata delle distribuzioni

Per poter valutare correttamente le incertezze è quindi necessario andare a studiare le distribuzioni dei parametri, interpolando l'istogramma di frequenza con una funzione di distribuzione opportuna. È stato valutato il grado di asimmetria di ciascun istogramma calcolandone la *skewness*. Gli istogrammi con *skewness* < 0.6 sono stati classificati come "simmetrici", e quindi ben interpolabili con una distribuzione gaussiana. Gli istogrammi classificati come "asimmetrici", cioè con *skewness* > 0.6 , sono stati invece interpolati con una distribuzione di Landau. Come valore rappresentativo della distribuzione è stata presa la mediana, mentre l'intervallo di confidenza al 68% è stato preso tra i percentili corrispondenti alle probabilità 0.16 e 0.84. In figura 13 sono mostrati due esempi di distribuzioni, una simmetrica e l'altra asimmetrica.

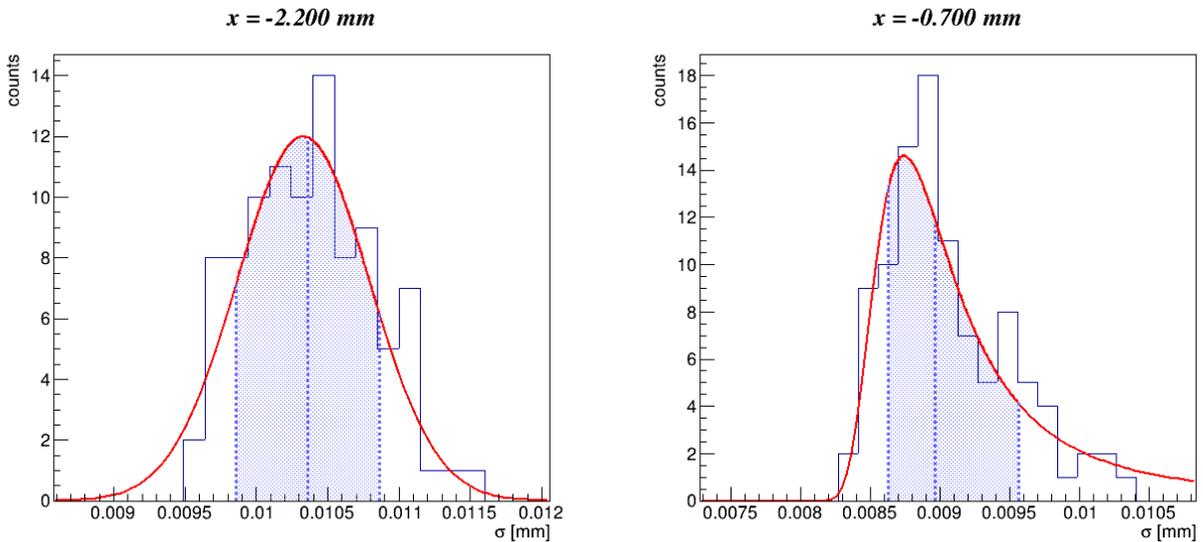


Figura 13: Due esempi di distribuzioni delle σ , una simmetrica e l'altra asimmetrica. Sono stati evidenziati i percentili a 0.16, 0.5 e 0.84

Le stime sui parametri così ottenute sono state disposte in un grafico in funzione della posizione di defocalizzazione. Dato che ci si aspetta che i valori σ si distribuiscano in modo simmetrico intorno alla posizione di fuoco attesa, i dati sono stati interpolati sia con una funzione gaussiana che con una parabola. La figura 14 mostra l'andamento delle dimensioni della PSF in funzione della posizione di defocalizzazione. La stima che si ottiene per la posizione di fuoco è $x_f = -1.00 \pm 0.02$ mm.

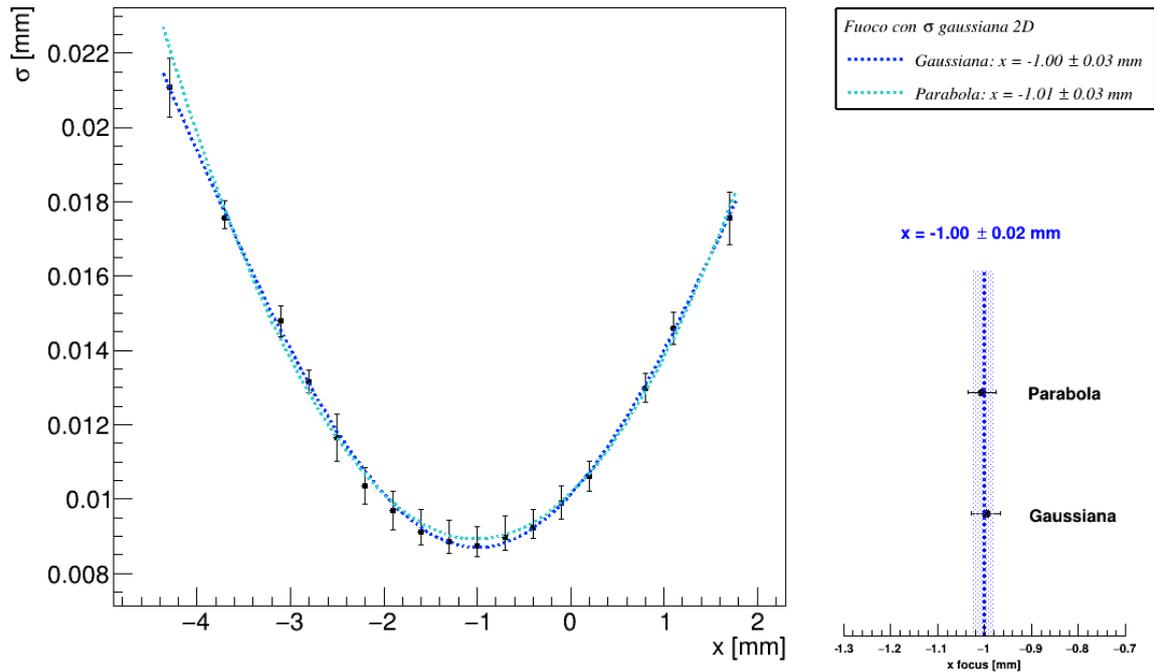


Figura 14: Grafico delle dimensioni della sorgente, rappresentate dal parametro σ , in funzione della posizione di defocalizzazione

Al fine di valutare il grado di asimmetria della PSF, lo stesso tipo di analisi precedentemente descritta è stata fatta per i parametri σ_y e σ_z ottenuti dai fit gaussiani delle proiezioni del picco. Nella figura 15 sono riportati i grafici ottenuti, dove è stata utilizzata come funzione interpolante una gaussiana. Le stime che si ottengono per la posizione di fuoco sono compatibili solo a 2.5 sigma, segno che la PSF non è propriamente simmetrica. Ciononostante, andando a prendere la media dei due valori che si ottengono si trova la posizione di fuoco per $x_f = -0.99 \pm 0.04$ mm, in ottimo accordo con la stima precedente.

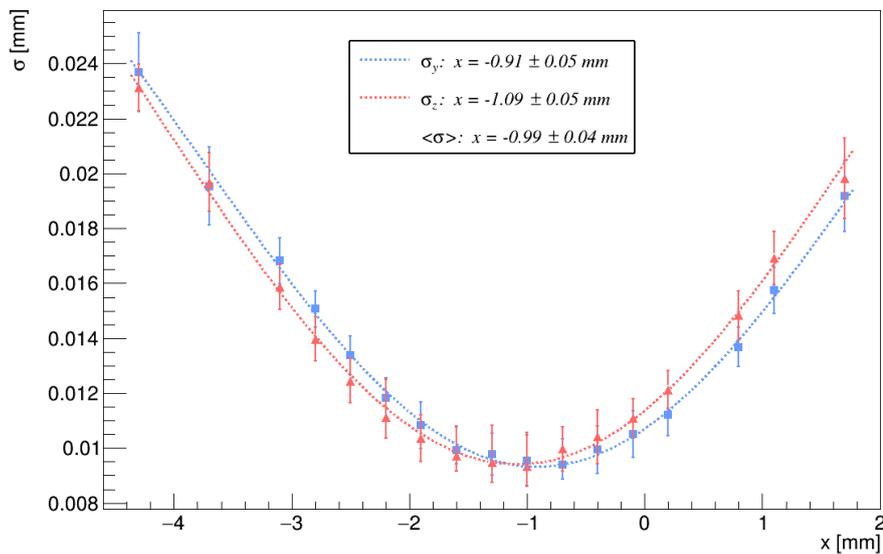


Figura 15: Andamento dei parametri σ delle proiezioni interpolati con delle funzioni gaussiane

5.4 Determinazione del fuoco dall'intensità della sorgente

Come anticipato, un secondo modo di determinare il punto di fuoco è quello di cercare la posizione per la quale l'immagine della sorgente presenta la massima intensità. Il vantaggio di questo metodo è che, dal momento che non richiede alcuna interpolazione, è indipendente dal particolare modello scelto per rappresentare la PSF. I limiti di questa soluzione stanno invece nel fatto che la massima intensità del picco è fortemente dipendente da qualsiasi variazione termica, sia della sorgente che del piano focale.

In modo analogo a quanto fatto nella fase precedente, per ogni posizione x è stato determinato il valore rappresentativo dell'intensità e l'incertezza ad esso associata a partire dalle distribuzioni dei valori. Per determinare la posizione di fuoco, i valori sono stati interpolati con una distribuzione gaussiana, come rappresentato in figura 16. Come si vede, a causa della sensibilità termica sopracitata, la dispersione dei valori è molto grande in corrispondenza del massimo. In questo caso, quindi, l'incertezza che si ricava dalla stima è maggiore che nell'analisi precedente. La posizione di fuoco così determinata è $x_f = -1.06 \pm 0.04$ mm.

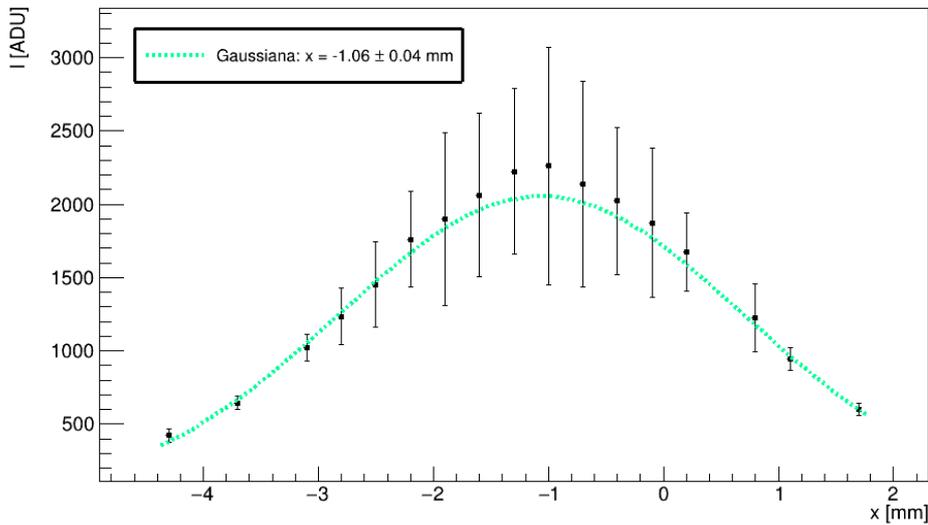


Figura 16: Andamento dell'intensità della sorgente in funzione della posizione con sovrapposto il fit gaussiano

5.5 Stima del numero di pixel costituenti l'immagine

Un'ultima strategia di analisi, anch'essa indipendente da modelli, consiste nel contare i pixel la cui intensità sia maggiore o uguale a metà altezza del picco massimo. Note le dimensioni di ciascun pixel ($18 \times 18 \mu m^2$), è possibile da questo conteggio ricavare l'area della sezione del picco a metà altezza.

Dal momento che stavolta le aree assumeranno dei valori discreti, le distribuzioni che si ottengono per ciascuna posizione di defocalizzazione non saranno adatte ad essere interpolate come fatto in precedenza, come si vede in figura 17. In questo caso il valore rappresentativo della distribuzione è stato calcolato dalla media, e l'intervallo di confidenza è stato ottenuto dai percentili a 0.16 e 0.84 direttamente dagli istogrammi.

In figura 18 è riportato il grafico con l'andamento dell'area in funzione della coordinata x . Come è possibile notare, gli svantaggi di questo metodo stanno nella scarsa sensibilità alle piccole variazioni della sezione intorno al minimo, e nell'incertezza sulla stima del punto di fuoco superiore alle determinazioni precedenti. Nella regione di interpolazione la funzione gaussiana e quella quadratica sono praticamente sovrapposte, salvo il fatto che la prima consente una stima più precisa. La stima che si ottiene è $x_f = -1.11 \pm 0.08$ mm.

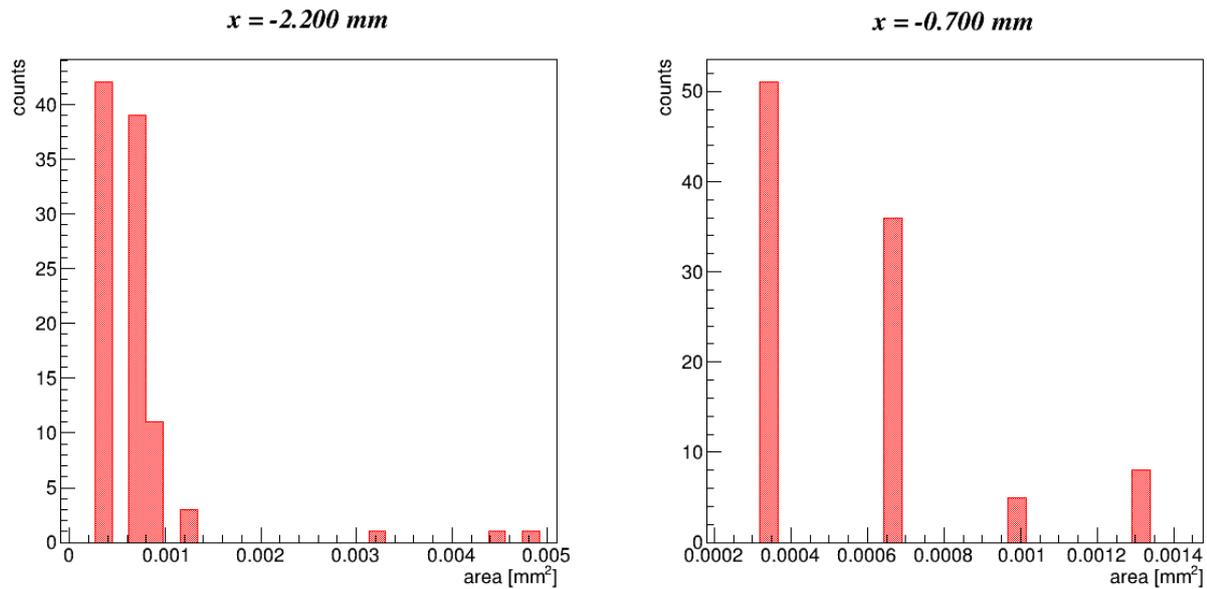


Figura 17: Distribuzione delle aree per due valori di defocalizzazione

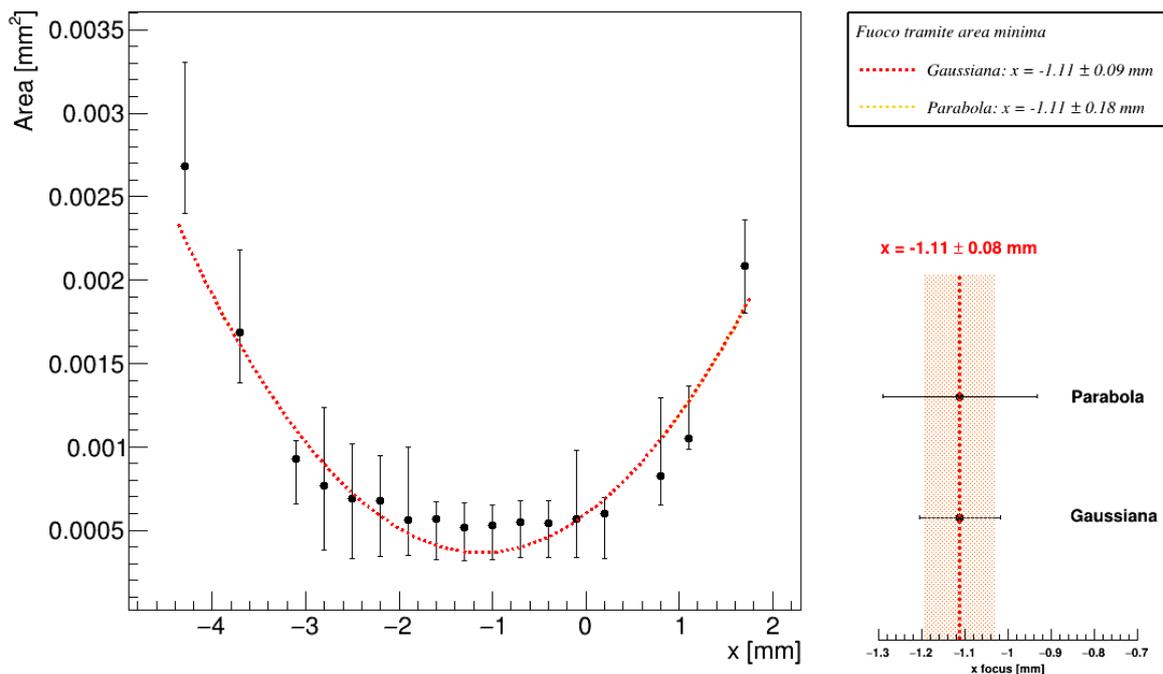


Figura 18: Andamento dell'area dei pixel a metà altezza del picco

6 Conclusioni

Dei tre metodi di indagine utilizzati, quello della minimizzazione della σ_{PSF} si è rivelato essere il più preciso e il meno soggetto all'influenza di fattori esterni, quali distorsioni e dilatazioni termiche del piano focale e dello strumento NI-TS. D'altro canto, le due stime indipendenti dal modello di fitting dell'immagine suggeriscono una posizione di fuoco leggermente inferiore rispetto a questo primo metodo. In ogni caso, le tre stime ottenute per la distanza focale rispetto alla posizione di fuoco attesa hanno tra loro una buona compatibilità, non distando mai più di 1.3 sigma. Usando come migliore

stima la media pesata tra i risultati dei tre diversi metodi di analisi si trova la posizione di fuoco per $x_f = -1.02 \pm 0.02$ mm, risultato compatibile con quello determinato dall'analisi ufficiale di NISP.

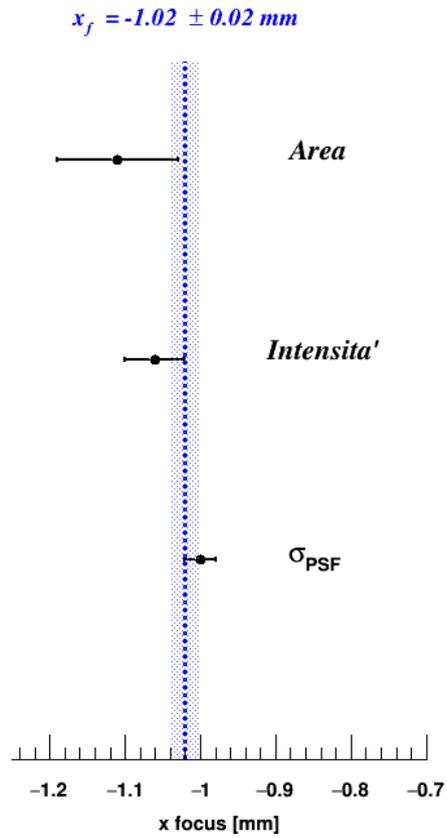


Figura 19: Comparazione dei risultati dei tre metodi di analisi

Riferimenti bibliografici

- [1] R. Laureijs et al. *Euclid Definition Study report*. 2011.
- [2] G. Racca et al. *The Euclid mission design*. Proc. SPIE 9904-19. 2016.
- [3] F. Laudisio. «Verification and integration of the management and control software for the Near Infrared Spectrometer Photometer of the Euclid space mission». Tesi di dott. 2018.
- [4] F. Fornari. «Software Development and Detector Characterization of the EUCLID Near-Infrared Spectro-Photometer». Tesi di dott. 2018.
- [5] Space Telescope Science Institute, cur. *Grism Spectroscopy*. 2009. URL: https://www.stsci.edu/itt/review/2009_HST_Docs/NICMOS_ihb/c05_coronograph.7.4.html.
- [6] W. Gillard et al. *NISP focus measurement test report*. Feb. 2020.