



POLITECNICO DI MILANO

FACOLTÀ DI INGEGNERIA DEI SISTEMI

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA FISICA

REALIZZAZIONE ED OTTIMIZZAZIONE DI UN
SISTEMA OTTICO DI MICRO-FOCALIZZAZIONE DI
IMPULSI XUV AD ATTOSECONDI

Relatore:

PROF. MAURO NISOLI

Correlatore:

DOTT.SSA FRANCESCA CALEGARI

Tesi di Laurea di:
Grosso Alessandro
matr. 771246

Anno Accademico 2012-2013

INDICE

Abstract **10**

Introduzione **12**

1. GENERAZIONE DI IMPULSI AD ATTOSECONDI	14
1.1 HHG: GENERAZIONE DI ARMONICHE DI ORDINE ELEVATO	16
1.2 MODELLO A TRE PASSI	17
1.2.1 SPETTRO XUV	20
1.3 GENERAZIONE DI IMPULSI AD ATTOSECONDI ISOLATI AD ELEVATA INTENSITA'	21
1.3.1 GDOG: GENERALIZED DOUBLE OPTICAL GATING	24
1.3.2 APPLICAZIONI DEGLI IMPULSI AD ATTOSECONDI AD ELEVATA ENERGIA	27

2. FOCALIZZAZIONE DI IMPULSI AD ATTOSECONDI ISOLATI AD ELEVATA ENERGIA	28
2.1 LINEA XUV-XUV	28
2.1.1 SORGENTE LASER	29
2.1.2 CAMERA DI GENERAZIONE	30
2.2 PROGETTO DEL SISTEMA OTTICO PER LA MICRO-FOCALIZZAZIONE	32
2.2.1 CONFRONTO TRA LA CONFIGURAZIONE A Z E LA CONFIGURAZIONE A C	52
2.2.2 SETUP SPERIMENTALE PER LA MICRO-FOCALIZZAZIONE	56
2.2.3 DIVISORE DI FASCIO	57
3. OTTIMIZZAZIONE CON ALGORITMI GENETICI	59
3.1 ALGORITMI GENETICI	59
3.1.1 METODO EURISTICO	63
3.2 SOFTWARE PER L'OTTIMIZZAZIONE	68
3.2.1 PROGETTAZIONE DELLA FUNZIONE DI FITNESS	76
4. RISULTATI SPERIMENTALI	80
4.1 STUDIO DEL SISTEMA DI MICRO-FOCALIZZAZIONE MEDIANTE UN LASER AD HE-NE	80
4.1.1 CONFRONTO TRA LE CONFIGURAZIONI A Z E A C	83
4.2 OTTIMIZZAZIONE	88
4.2.1 OTTIMIZZAZIONE 1	91

4.2.2	OTTIMIZZAZIONE 2	95
4.2.3	OTTIMIZZAZIONE 3	98
4.2.4	OTTIMIZZAZIONE 4	102
4.2.5	OTTIMIZZAZIONE 5	105
4.2.6	OTTIMIZZAZIONE 6	107
4.2.7	OTTIMIZZAZIONE 7	109
4.2.8	ESITO DELLE OTTIMIZZAZIONI	113

Conclusioni **116**

Bibliografia **118**

ELENCO DELLE FIGURE

1.1 Il campo IR ionizza per effetto tunnel l'atomo. L'elettrone liberato viene accelerato dal campo elettrico del laser e, sotto opportune condizioni iniziali, può ricollidere con lo ione di provenienza, emettendo così un fotone XUV. Questo fenomeno si ripete ogni mezzo ciclo del campo IR (linee rossa e viola). A causa della periodicità, lo spettro XUV è composto dalle armoniche dispari della frequenza fondamentale del laser (fig. presa da [1]).....	18
1.2 Treno di impulsi XUV in frequenza (a) e nel dominio temporale (b) (fig. presa da [2])...	20
1.3 Rappresentazione del campo elettrico e dell'involuppo con pochi cicli nel caso di sfasamento uguale a $\varphi=-90^\circ$ (fig. presa da [2]).....	22
1.4 Schema del Polarization gating (fig. presa da [3]).....	23
1.5 Schema del Double Optical Gating (fig. presa da [3]).....	24
1.6 Schema del Generalized Double Optical Gating (fig. presa da [3]).....	25.
1.7 Probabilità di ionizzazione in funzione della durata dell'impulso laser per Polarization Gating (PG, linea continua), Double Optical Gating (DOG, linea tratteggiata), Generalized Double Optical Gating (GDOG,). L'intensità di picco al centro del gate è tenuta costante e pari a $1.9 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ in tutti e tre i casi. (fig. presa da [14]).....	26
2.1 Schema della linea XUV-XUV.....	28
2.2 Schema della sorgente laser ad alta potenza con sistema di stabilizzazione della CEP (fig. presa da [2]).....	30
2.3 Schema del sistema in cui viene fatto un gating temporale dell'impulso IR e della camera di generazione della radiazione XUV. WPs: Waveplates; FM: Focal Mirror.....	31
2.4 Sistema ottico per la focalizzazione di impulsi agli attosecondi, costituito da tre specchi toroidali usati in una geometria ad incidenza radente. È costituito da due sezioni: la prima sezione è fatta dagli specchi MIR 1 e MIR 2, mentre la seconda è fatta dallo specchio MIR 3. Il fascio è parallelo tra MIR 1 e MIR 2; il fuoco intermedio si trova tra MIR 2 e MIR 3 (fig. tratta da [13]).....	33
2.5 Sistema ottico per la focalizzazione di impulsi agli attosecondi, costituito da due specchi toroidali posizionati in una geometria a Z. È costituito da due sezioni: la prima consta dello specchio MIR 1, la seconda dello specchio MIR 2 (fig. tratta da [13]).....	34

2.6 Configurazione con due specchi toroidali identici M e M ₁ . a) Vista del piano tangenziale del sistema ottico. b) Vista del piano sagittale. Sono possibili due orientazioni nel piano tangenziale, ad U e a Z.(fig. tratta da [10]).	35
2.7 Layout ottico di uno specchio toroidale (fig. tratta da [13]).	37
2.8 Layout ottico di una beamline per esperimenti di XUV-pump/XUV-probe. È messo in evidenza lo split mirror che produce due repliche ritardate dell'impulso incidente (fig. tratta da [13]).	40
2.9 Sistema ottico per il microfocusing con configurazione geometrica a Z visualizzato in scala logaritmica.	44
2.10 Immagine della sorgente ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una distribuzione spaziale gaussiana con FWHM uguale a 120 micron e una divergenza angolare pari a 0.8 mrad.	44
2.11 Immagine in corrispondenza del fuoco intermedio della linea XUV-XUV.	45
2.12 a) Profilo tangenziale dello spot nel fuoco intermedio. b) Profilo sagittale dello spot nel fuoco intermedio. L'aberrazione del terzo ordine è molto accentuata nella direzione tangenziale.	45
2.13 Immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita della linea XUV-XUV.	46
2.14 a) Profilo tangenziale dello spot nel fuoco d'uscita. b) Profilo sagittale dello spot nel fuoco d'uscita. L'aberrazione del terzo ordine è stata completamente rimossa in entrambe le direzioni.	46
2.15 Immagine della sorgente del sistema ottico ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micron e una divergenza angolare pari a 1 mrad.	47
2.16 Immagine in corrispondenza del fuoco intermedio ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micron e una divergenza angolare pari a 1 mrad.	48
2.17 Immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micron e una divergenza angolare pari a 1 mrad.	48
2.18 Immagine in corrispondenza del fuoco intermedio ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micron e una divergenza angolare pari a 2 mrad.	49
2.19 Immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micron e una divergenza angolare pari a 2 mrad.	50
2.20 Immagine in corrispondenza del fuoco intermedio ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micron e una divergenza angolare pari a 3 mrad.	50
2.21 Immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micron e una divergenza angolare pari a 3 mrad.	51
2.22 Immagine in corrispondenza del fuoco intermedio ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micron e una divergenza angolare pari a 4 mrad.	51
2.23 Immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micron e una divergenza angolare pari a 4 mrad.	52
2.24 Sistema ottico per il microfocusing con configurazione geometrica a C visualizzato in scala logaritmica.	53
2.25 Immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 120 micron e una divergenza angolare pari a 0.8 mrad.	53
2.26 Immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micron e una divergenza angolare pari a 2 mrad.	54
2.27 Immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micron e una divergenza angolare pari a 3 mrad.	55
2.28 Immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micron e una divergenza angolare pari a 4 mrad.	55
2.29 Schema della camera di generazione, della camera di divisione e della camera di focalizzazione. Sono mostrate le dimensioni dei bracci d'uscita e d'ingresso dei vari elementi del sistema ottico per la micro-focalizzazione.	56
2.30 Sezione della linea XUV-XUV comprendente lo split mirror che divide il fascio incidente in due repliche ritardate temporalmente, evidenziate in rosso e in blu (fig. tratta da [13]).	58

3.1 Schema di un algoritmo genetico.....	62
3.2 Schema di un ciclo genetico.....	63
3.3 Ciclo di generazione di una nuova popolazione.....	65
3.4 Crossover ad un punto.....	66
3.5 Crossover a due punti.....	67
3.6 Mutazione di un singolo gene di un individuo.....	68
3.7 Schema riassuntivo delle operazioni della funzione di fitness.....	79
4.1 Immagine della sorgente nel punto di fuoco intermedio. La divergenza angolare della sorgente è uguale a 2 mrad.....	81
4.2 Immagine della sorgente nel punto di fuoco intermedio. La divergenza angolare della sorgente è uguale a 3 mrad.	82
4.3 Immagine della sorgente nel punto di fuoco intermedio. La divergenza angolare della sorgente è uguale a 4 mrad.....	82
4.4 Immagine della sorgente nel fuoco d'uscita per la configurazione a Z. La divergenza angolare della sorgente è uguale a 2 mrad.....	83
4.5 Immagine della sorgente nel fuoco d'uscita per la configurazione a C. La divergenza angolare della sorgente è uguale a 2 mrad.....	84
4.6 Immagine della sorgente nel fuoco d'uscita per la configurazione a Z. La divergenza angolare della sorgente è uguale a 3 mrad.....	84
4.7 Immagine della sorgente nel fuoco d'uscita per la configurazione a C. La divergenza angolare della sorgente è uguale a 3 mrad.....	85
4.8 Immagine della sorgente nel fuoco d'uscita per la configurazione a Z. La divergenza angolare della sorgente è uguale a 4 mrad.....	85
4.9 Immagine della sorgente nel fuoco d'uscita per la configurazione a C. La divergenza angolare della sorgente è uguale a 4 mrad.....	86
4.10 Profilo dell'intensità normalizzata lungo la direzione x per lo spot nel fuoco d'uscita nel caso di configurazione a Z e sorgente con divergenza angolare uguale a 2 mrad.....	86
4.11 Profilo dell'intensità normalizzata lungo la direzione x per lo spot nel fuoco d'uscita nel caso di configurazione a Z e sorgente con divergenza angolare uguale a 3 mrad.....	87
4.12 Profilo dell'intensità normalizzata lungo la direzione x per lo spot nel fuoco d'uscita nel caso di configurazione a Z e sorgente con divergenza angolare uguale a 4 mrad.....	87
4.13 Andamento della fitness della migliore soluzione nel corso delle generazioni.....	93
4.14 : a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della prima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della prima generazione.....	93
4.15 a) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della quinta generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della quindicesima generazione. c) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della cinquantesima generazione.....	94
4.16 Andamento della fitness della migliore soluzione nel corso delle generazioni.....	96
4.17 : a) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della quarta generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della diciottesima generazione. c) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della ventiseiesima generazione.....	97
4.18 : a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della prima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della trentesima generazione.....	98
4.19 a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della prima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della prima generazione.....	99
4.20 a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della decima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della decima generazione.....	100
4.21 a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della ventesima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della ventesima generazione.....	100

4.22	a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della trentesima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della trentesima generazione.....	101
4.23	a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della quarantesima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della quarantesima generazione.....	101
4.24	a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della cinquantesima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della cinquantesima generazione.....	102
4.25	Andamento della fitness della migliore soluzione nel corso delle generazioni.....	103
4.26	a) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della prima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della terza generazione. c) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della tredicesima generazione. d) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della diciottesima generazione.....	104
4.27	Andamento della fitness della migliore soluzione nel corso delle generazioni.....	105
4.28	a) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della prima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore dell'ottava generazione. c) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della quarantesima generazione.....	106
4.29	Andamento della fitness della migliore soluzione nel corso delle generazioni.....	108
4.30	a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della prima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della prima generazione.....	108
4.31	Immagine prodotta dalla soluzione migliore della quarantesima generazione.....	109
4.32	Andamento della fitness della migliore soluzione nel corso delle generazioni.....	110
4.33	a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della prima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della prima generazione.....	110
4.34	a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della quinta generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della quinta generazione.....	111
4.35	a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della quindicesima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della quindicesima generazione.....	111
4.36	a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della venticinquesima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della venticinquesima generazione.....	112
4.37	a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della quarantesima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della quarantesima generazione.....	112
4.38	Ingrandimento dell'immagine prodotta dalla miglior soluzione in assoluto, ottenuta nella seconda ottimizzazione. Sono evidenziati i singoli pixel di dimensioni uguali a $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$	114

ELENCO DELLE TABELLE

2.1	Parametri della sorgente agli attosecondi usata nelle simulazioni	40
2.2	Parametri della linea XUV-XUV per esperimenti di pump-probe	41
2.3	Parametri geometrici della linea XUV-XUV	41
1.4	Parametri geometrici degli elementi ottici usati nelle simulazioni di ray-tracing	43
3.1	Parametri genetici	75
3.2	Dominio di variazione delle 12 variabili del problema	77
4.1	Parametri genetici della prima ottimizzazione	91
4.2	Parametri genetici della seconda ottimizzazione	95
4.3	Parametri genetici della terza ottimizzazione	98
4.4	Parametri genetici della quarta ottimizzazione	102
4.5	Parametri genetici della quinta ottimizzazione	105
4.6	Parametri genetici della sesta ottimizzazione	107
4.7	Parametri genetici della settima ottimizzazione	109

ABSTRACT

L'investigazione dei fenomeni elettronici negli atomi e nelle molecole richiede una risoluzione temporale nella scala temporale degli attosecondi (10^{-18} s); da ciò nasce la necessità di sviluppare sorgenti di impulsi laser XUV ad attosecondi. Inoltre, per realizzare esperimenti di pump-probe, sono necessari impulsi isolati ad elevata intensità. Questa tesi descrive un sistema ottico per la micro-focalizzazione di impulsi XUV ad attosecondi costituito da tre specchi toroidali utilizzati in incidenza radente. Tale sistema ottico è stato ideato per la generazione di impulsi XUV ad attosecondi ad elevata intensità; inoltre la combinazione dei tre specchi toroidali è tale da eliminare completamente le aberrazioni, fino al terzo ordine, nel fuoco d'uscita. Il design ottico è tale da permettere di inserire un divisore di fascio piano tra i primi due specchi toroidali, in modo tale da produrre due repliche ritardate temporalmente del singolo impulso incidente. In questo modo vengono prodotti impulsi di eccitazione e di sonda che in seguito vengono focalizzati nello stesso punto, indipendentemente dal loro ritardo relativo. Con tale sistema ottico sarà quindi possibile fare esperimenti di XUV-pump/XUV-probe con una risoluzione temporale nella scala degli attosecondi. Il sistema ottico per la micro-focalizzazione viene studiato sia analiticamente che numericamente

con numerose simulazioni eseguite con il software di ray-tracing XOP. Nella prima parte della tesi viene descritto il processo di generazione di armoniche di ordine elevato alla base della produzione di treni di impulsi XUV ad attosecondi; poi vengono descritte alcune tecniche di gating temporale che permettono di generare impulsi isolati. Viene anche descritta la linea XUV-XUV in cui si intende utilizzare questo sistema ottico per focalizzare e quindi intensificare gli impulsi ad attosecondi isolati, per fare esperimenti di pump-probe.

Nella seconda parte della tesi sono presentati i risultati sperimentali. Utilizzando una sorgente nel visibile (laser ad He-Ne), si è verificata l'efficacia del sistema ottico nel focalizzare la radiazione incidente, eliminando le aberrazioni residue fino al terzo ordine. Inoltre è stata dimostrata la possibilità di allineare il sistema ottico, in maniera automatica, con un programma di ottimizzazione scritto nel linguaggio di programmazione grafica di Labview. È stato realizzato un software che implementa un algoritmo genetico che ha come obiettivo la ricerca della posizione migliore dei tre specchi toroidali affinché l'immagine nel fuoco d'uscita del sistema ottico sia il più possibile focalizzata ed intensa. Per trovare la miglior posizione dei tre specchi, questi sono stati montati su tre stage con assi motorizzati, con gradi di libertà traslazionali e rotazionali. Quindi, l'algoritmo genetico esegue questa ricerca in modo iterativo, inviando dei comandi agli assi motorizzati delle stage (quindi variando la posizione degli specchi) e valutando la bontà dell'immagine prodotta nel fuoco d'uscita del sistema ottico. Queste operazioni si ripetono finché non viene trovata la soluzione ottimale del problema di focalizzazione oppure fino al completamento delle iterazioni di ottimizzazione. La miglior soluzione (vale a dire la miglior posizione dei tre specchi e quindi il miglior set di comandi traslazionali e rotazionali da inviare alle stage su cui gli specchi sono montati) è quella che produce nel fuoco d'uscita l'immagine con lo spot più intenso e focalizzato. L'ottimizzazione, eseguita mediante un algoritmo genetico, si è quindi rivelata efficace per il controllo della strumentazione su cui sono montati gli specchi toroidali. Un approccio di questo tipo è inevitabile per realizzare un allineamento fine degli elementi ottici se l'obiettivo è, come in questo caso, fare una focalizzazione su scala micrometrica della radiazione incidente.

Vengono presentati i risultati di varie ottimizzazioni in cui, di volta in volta, vengono assegnati valori differenti ai diversi parametri genetici dell'algoritmo.

INTRODUZIONE

Impulsi di luce coerente nella regione dell'estremo ultravioletto (XUV) con una durata di poche decine di attosecondi rappresentano lo strumento ideale di investigazione della dinamica elettronica negli atomi e nelle molecole. Questi impulsi possono essere prodotti usando la generazione di armoniche di ordine elevato (HHG), focalizzando impulsi IR a femtosecondi ad elevata intensità in un mezzo gassoso. In questo modo, si possono produrre impulsi isolati oppure treni di impulsi ad attosecondi separati da mezzo ciclo ottico della radiazione fondamentale. Per questo processo si è raggiunta un'efficienza di conversione con valori compresi tra 10^{-8} e 10^{-4} . Nonostante sia stata dimostrata l'utilità degli impulsi ad attosecondi in molte applicazioni, l'utilizzo di sorgenti di impulsi laser ad attosecondi non è ancora molto diffuso. Ciò deriva, da una parte, dalla complessità della strumentazione necessaria per produrre simili impulsi, dall'altra, dal basso flusso di fotoni tipico di una sorgente ad attosecondi, in particolare per generare impulsi isolati. Oggigiorno nel campo dell'ottica ultraveloce sono ormai standard le tecniche di misura con una risoluzione nella scala dei femtosecondi. Si stanno compiendo notevoli sforzi per estendere queste tecniche alla scala degli attosecondi. In particolare, si stanno studiando nuove tecniche per eccitare e sondare la

dinamica degli elettroni negli atomi sulla scala temporale degli attosecondi. Esperimenti di pump-probe in cui entrambi gli impulsi di eccitazione e di sonda sono impulsi ad attosecondi sufficientemente intensi, permetterebbero di approfondire lo studio dell'ottica non lineare scoprendo effetti non ancora noti. In questi esperimenti basterebbe creare una replica ritardata temporalmente per ogni impulso di eccitazione. Questo tipo di esperimenti è stato dimostrato in modo parziale solo in pochi laboratori, date le difficoltà tecnologiche per ottenere impulsi isolati sufficientemente intensi. Quindi lo sviluppo di sorgenti ad attosecondi è un obiettivo cruciale per il futuro sviluppo della fisica degli attosecondi.

Molti gruppi di ricerca hanno ormai raggiunto ottimi risultati nella generazione di treni di impulsi ad attosecondi con energie nella scala dei microjoule, mentre per la generazione di impulsi isolati è ancora in atto una ricerca molto attiva. Le applicazioni future riguarderanno lo sviluppo di tecniche di metrologia non lineare agli attosecondi, lo studio dei fenomeni di correlazione elettronica e la misura della dinamica ultraveloce degli elettroni negli atomi e nelle molecole.

Per produrre impulsi ad attosecondi ad alta energia si possono usare campioni gassosi oppure solidi. In quest'ultimo caso la generazione di armoniche deriva dal plasma prodotto dalla sorgente a femtosecondi stessa.

Nel caso di generazione di armoniche di ordine elevato da un campione gassoso, si utilizzano varie tecniche di gating temporale dell'impulso a femtosecondi per produrre singoli impulsi ad attosecondi ad elevata energia. Tra queste tecniche ci sono il Polarization Gating (PG), il Double Optical Gating (DOG) ed il Generalized Double Optical Gating (GDOG). Il GDOG è la tecnica di gating che dà meno restrizioni sulle caratteristiche temporali dell'impulso a femtosecondi.

Per aumentare l'intensità degli impulsi ad attosecondi isolati è opportuno sviluppare sistemi ottici che possano focalizzare gli impulsi XUV fino a dimensioni di macchia dell'ordine di pochi micron. In tal modo, utilizzando impulsi ad attosecondi con un'energia di pochi nano joule è possibile ottenere intensità di picco dell'ordine di $10^{12} - 10^{13} \text{ W/cm}^2$. A questo scopo si possono usare ottiche cartesiane (ad esempio specchi ellissoidali) costose e difficilmente allineabili, oppure sistemi ottici

composti da più specchi toroidali disposti in una geometria con incidenza radente. Quest'ultima soluzione, studiata nel presente lavoro di tesi, è meno costosa della prima; inoltre gli specchi toroidali si possono allineare più facilmente e questo viene dimostrato dai risultati ottenuti con un programma di ottimizzazione scritto in Labview. Un algoritmo genetico ottimizza la posizione degli specchi toroidali in modo completamente automatico, permettendo un allineamento fine del sistema ottico. Tre specchi toroidali sono stati montati su tre sistemi di movimentazione con gradi di libertà traslazionali e rotazionali. L'algoritmo genetico realizza un'ottimizzazione del sistema ottico, inviando i comandi ottimali agli stadi di movimentazione motorizzati e quindi trovando la posizione migliore per gli specchi toroidali, in modo tale che questi realizzino un'effettiva focalizzazione della sorgente. Il sistema ottico fatto da tre specchi toroidali usati in incidenza radente è stato progettato per la micro-focalizzazione di una sorgente di radiazione XUV. Vengono presentati i risultati di numerose simulazioni di ray-tracing eseguite con il software XOP (X-ray Oriented Programs). Queste simulazioni sono utili per uno studio preliminare delle proprietà di focalizzazione del sistema ottico, mettendone in evidenza la capacità di compensare le aberrazioni fino al terzo ordine. Gli esperimenti, fatti utilizzando una sorgente nel visibile (un laser ad He-Ne), confermano quanto anticipato dalle simulazioni di ray-tracing. Il sistema ottico sviluppato verrà quindi implementato in una beamline ad attosecondi in corso di allestimento.

Il sistema ottico studiato è stato progettato per creare una replica ritardata temporalmente dell'impulso sorgente attraverso un divisore di fascio costituito da due specchi piani affiancati e traslati l'uno rispetto all'altro. Quindi questo sistema ottico si adatta perfettamente ad esperimenti di XUV-pump/XUV-probe in cui gli impulsi di eccitazione e di sonda sono entrambi ad attosecondi.

Le future applicazioni delle sorgenti di impulsi ad attosecondi isolati ad elevata intensità sono, oltre agli esperimenti di pump-probe, anche l'indagine dell'ottica non lineare nella regione delle lunghezze d'onda corte. In sostanza, migliorando le proprietà e le caratteristiche delle sorgenti di luce ad attosecondi ad alta energia, sarà possibile indagare nuovi e ancora sconosciuti aspetti

dell'interazione radiazione-materia, permettendo di approfondire le conoscenze attuali sui processi fondamentali della materia.

L'obiettivo di questa tesi è lo studio del sistema ottico per la micro-focalizzazione, costituito da tre specchi toroidali usati in incidenza radente. È stato fatto uno studio basato su numerose simulazioni numeriche di ray-tracing. In seguito il sistema ottico è stato realizzato. Sono stati fatti esperimenti con un laser ad He-Ne per testarne le caratteristiche e le proprietà ottiche. Inoltre viene dimostrata la possibilità di focalizzare il fascio laser in modo automatico tramite un software che implementa un algoritmo genetico. I risultati delle ottimizzazioni tramite l'algoritmo genetico mostrano la possibilità di ottenere immagini focalizzate della sorgente con una dimensione di macchia di 10-15 μm .

La tesi è strutturata in quattro capitoli:

- Il **primo capitolo** espone la teoria alla base della generazione di armoniche di ordine elevato. Vengono esposte le diverse tecniche di gating temporale che permettono la generazione di impulsi ad attosecondi isolati con intensità sempre crescenti.
- Il **secondo capitolo** descrive la linea XUV-XUV che si intende realizzare per gli esperimenti di pump-probe. Viene mostrato il sistema ottico costituito da tre specchi toroidali usati in una geometria con incidenza radente; questo sistema viene usato per focalizzare e per produrre una replica ritardata temporalmente dell'impulso XUV. Sono inoltre esposti i risultati di varie simulazioni di ray-tracing che evidenziano le proprietà di focalizzazione e demagnificazione del sistema ottico, ponendo l'accento sulla capacità di quest'ultimo di correggere completamente le aberrazioni fino al terzo ordine.
- Il **terzo capitolo** espone la teoria degli algoritmi genetici usati per problemi di ottimizzazione. Viene spiegato come è possibile estendere questo metodo euristico ad un problema di controllo ed ottimizzazione della strumentazione usata nel sistema ottico per la micro-focalizzazione. Viene esposto il principio di funzionamento del software realizzato in

Labview che permette di controllare ed allineare in maniera ottimizzata le singole componenti del sistema ottico.

- Il **quarto capitolo** mostra i risultati sperimentali ottenuti. In particolare sono mostrate le proprietà di focalizzazione del sistema ottico in due diverse configurazioni geometriche, a Z e a C che vengono descritte nel capitolo. Infine vengono presentati i risultati delle ottimizzazioni eseguite con il software che implementa l'algoritmo genetico.

1. GENERAZIONE DI IMPULSI AD ATTOSECONDI

In questo primo capitolo viene illustrato in maniera sintetica il modello semiclassico che spiega la generazione di treni di impulsi XUV ad attosecondi. Dopodiché viene illustrata la tecnica che permette la generazione di impulsi isolati ad elevata intensità. Infine viene fatto un accenno allo stato dell'arte nella generazione di impulsi ad attosecondi isolati ad elevata energia.

1.1 HHG: GENERAZIONE DI ARMONICHE DI ORDINE ELEVATO

Il processo della generazione di armoniche di ordine elevato (HHG) è alla base della generazione di impulsi XUV ad attosecondi. È un meccanismo fortemente non lineare, indotto in un mezzo, tipicamente un gas nobile, da un impulso laser nell'infrarosso di intensità elevata e di durata di pochi femtosecondi.

Le frequenze generate sono le armoniche della frequenza fondamentale del laser. L'impulso IR incidente ionizza gli atomi del mezzo e gli elettroni emessi vengono accelerati dal campo elettrico oscillante del laser. Una frazione di questi elettroni ricollide e si ricombina con gli ioni da cui provengono, portando all'emissione di fotoni XUV. La ionizzazione iniziale ha una dipendenza fortemente non lineare dal campo elettrico del laser IR, quindi l'emissione di elettroni è confinata in un piccolo intervallo temporale vicino al massimo del ciclo ottico. Durante l'accelerazione da parte del laser a femtosecondi, gli elettroni seguono traiettorie ben definite; ciò determina l'emissione di fotoni XUV in impulsi brevi con una durata che è solo una piccola frazione del ciclo ottico del laser a femtosecondi, quindi la formazione di un impulso ad attosecondi avviene ogni mezzo ciclo ottico, quando la probabilità di emissione degli elettroni è sufficientemente alta e il laser a femtosecondi è polarizzato linearmente. In generale vengono prodotti treni di impulsi ad attosecondi, dato che ogni mezzo ciclo del laser IR vengono prodotti due impulsi. L'interferenza tra questi produce uno spettro che contiene dei picchi in corrispondenza delle armoniche dispari della frequenza fondamentale del laser IR nel caso in cui il mezzo sia costituito da atomi di gas nobili. Per questa ragione questa tecnica è stata definita generazione di armoniche di ordine elevato (HHG).

L'interazione non lineare tra il mezzo e l'impulso laser può descriversi con due modelli: un modello semiclassico, denominato “modello a tre passi”, l'altro quantistico, sviluppato da Lewenstein. Di seguito viene esposto il solo modello semiclassico.

1.2 MODELLO A TRE PASSI

Il modello semiclassico per un singolo atomo si basa su due importanti approssimazioni:

- di singolo elettrone attivo: il campo elettrico del laser IR interagisce con un solo elettrone;
- di campo forte: il campo elettrico del laser IR ha un'intensità così elevata da poter trascurare, dopo la ionizzazione, l'interazione coulombiana tra l'elettrone ed il campo creato dallo ione stesso.

In questo modello l'emissione di armoniche si sviluppa in tre passi:

1. Ionizzazione: L'atomo viene ionizzato per effetto dell'elevata intensità del laser IR in quanto la forza esercitata dal campo elettrico sull'elettrone è dell'ordine dell'energia di legame delle shell esterne dell'atomo.
2. Moto dell'elettrone dopo la ionizzazione dell'atomo: la SFA permette di trascurare l'interazione coulombiana tra lo ione e l'elettrone quindi il moto di quest'ultimo può descriversi con equazioni classiche.
3. Ricollisione: Dal momento che il campo elettrico cambia segno ogni mezzo ciclo, per opportune condizioni iniziali, l'elettrone può ricollidere con lo ione di provenienza provocando l'emissione di un fotone XUV con energia pari alla somma dell'energia di ionizzazione dell'atomo e l'energia cinetica acquisita dall'elettrone nel continuo.

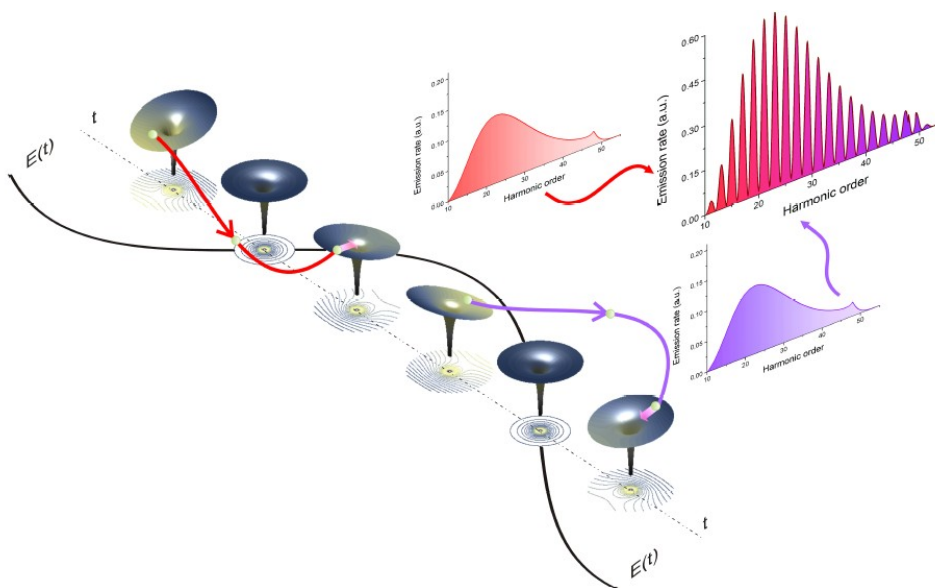


Figura 1.1 : Il campo IR ionizza per effetto tunnel l'atomo. L'elettrone liberato viene accelerato dal campo elettrico del laser e, sotto opportune condizioni iniziali, può ricollidere con lo ione di provenienza, emettendo così un fotone XUV. Questo fenomeno si ripete ogni mezzo ciclo del campo IR (linee rossa e viola). A causa della periodicità, lo spettro XUV è composto dalle armoniche dispari della frequenza fondamentale del laser (fig. tratta da [1]).

Questo modello è stato definito semiclassico in quanto il primo passo, ovvero quello della ionizzazione, richiede una spiegazione quantistica.

La ionizzazione può essere attribuita a due fenomeni differenti: assorbimento multi fotone e ionizzazione per effetto tunnel. Il contributo relativo dell'uno o dell'altro fenomeno dipende dal potenziale di ionizzazione dell'atomo I_p e dall'energia ponderomotiva U_p . Quest'ultima si esprime come

$$U_p = \frac{e^2 E_0^2}{4m_e \omega_0^2} \quad (1.1)$$

dove e ed m_e sono rispettivamente la carica e la massa dell'elettrone, mentre E_0 ed ω_0 rappresentano l'ampiezza e la frequenza del campo elettrico IR.

Si usa il coefficiente di Keldysh per valutare l'entità dei due fenomeni nel processo di ionizzazione:

$$\gamma = \sqrt{\frac{I_p}{2U_p}} \quad (1.2)$$

Se $\gamma \gg 1$ prevale l'assorbimento multi fotone; se $\gamma \ll 1$ prevale la ionizzazione per effetto tunnel.

Il moto del pacchetto d'onde elettronico, dopo la ionizzazione, è descritto da equazioni puramente classiche. Trascurando l'influenza del campo elettrico dello ione di provenienza ed il campo magnetico del laser IR, indicando con t_0 l'istante iniziale del moto ed assumendo che la posizione iniziale e la velocità iniziale dell'elettrone sono uguali a zero, il moto dopo la ionizzazione è descritto dalle seguenti equazioni:

$$x = x_0 [-\cos(\alpha t)] + v_{0x} t + x_{0x} \quad (1.3)$$

$$y = \alpha x_0 [-\sin(\alpha t)] + \alpha v_{0y} t + y_{0y} \quad (1.4)$$

$$v_x = v_0 \sin(\alpha t) + v_{0x} \quad (1.5)$$

$$v_y = -\alpha v_0 \cos(\alpha t) + v_{0y} \quad (1.6)$$

dove α è uguale a zero se il campo elettrico è polarizzato linearmente, mentre è pari a ± 1 se la polarizzazione è circolare; $v_0 = qE_0 / m_e \omega$, $x_0 = qE_0 / m_e \omega^2$ mentre v_{0x} , v_{0y} , x_{0x} , y_{0y} dipendono dalle condizioni iniziali scelte.

Se il campo elettrico è polarizzato circolarmente, l'elettrone non potrà mai ricollidere con lo ione di provenienza. Al contrario, se la polarizzazione è lineare, metà degli elettroni liberati ricollide con lo ione di provenienza durante il primo ciclo ottico dopo la ionizzazione. L'energia massima dei fotoni emessi dopo la ricombinazione degli elettroni è uguale a $I_p + 3.17U_p$ a cui corrisponde la frequenza di cut-off nello spettro di emissione XUV:

$$\omega_{cutoff} = \frac{I_p + 3.17U_p}{\hbar} \quad (1.7)$$

Durante il moto di ricombinazione gli elettroni possono seguire due tipi di traiettorie classiche: traiettorie corte e lunghe caratterizzate da intervalli di tempo diversi che l'elettrone passa nel continuo.

1.2.1 SPETTRO XUV

Il processo dell'HHG genera uno spettro nella regione dell'estremo ultravioletto (XUV) costituito da tre regioni distinte:

1. una regione perturbativa in cui l'energia dei fotoni XUV è minore del potenziale di ionizzazione degli atomi del mezzo gassoso;
2. un regione di plateau in cui l'intensità delle armoniche è approssimativamente costante;
3. una regione di cut-off ad elevata energia in cui l'intensità delle singole armoniche decresce rapidamente.

Un tipico spettro XUV è mostrato nell'immagine seguente:

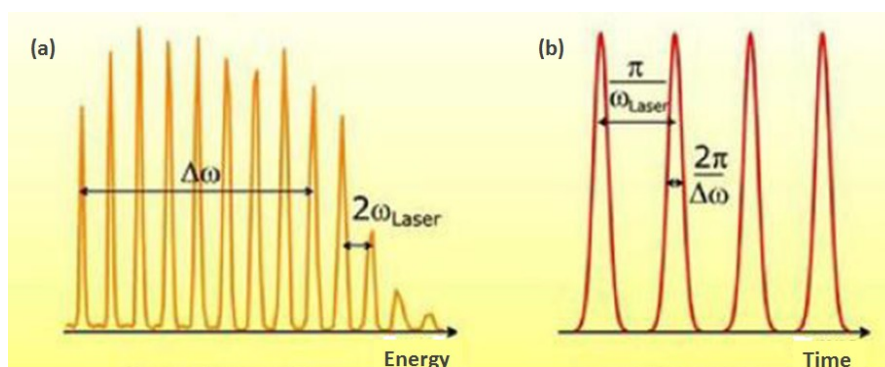


Figura 1.2 : Treno di impulsi XUV in frequenza (a) e nel dominio temporale (b) (fig. tratta da [2]).

L'energia di cut-off dipende dal potenziale di ionizzazione del gas e dall'intensità del laser IR ed ha la seguente espressione:

$$E_{cutoff} = IP_{t \text{ arg } \alpha} + 3.17 U_p \quad (1.8)$$

dove $IP_{t \text{ arg } \alpha}$ è il potenziale di ionizzazione e $U_p = I / 4\omega^2$ è l'energia ponderomotiva data dall'intensità I e dalla frequenza ω del laser.

1.3 GENERAZIONE DI IMPULSI AD ATTOSECONDI ISOLATI AD ELEVATA INTENSITA'

Il limite principale delle sorgenti laser ad attosecondi è la bassa intensità degli impulsi prodotti. Per risolvere questo problema sono state proposte e realizzate diverse tecniche sperimentali per aumentare l'efficienza di conversione nel processo di generazione di armoniche. Per la generazione di treni di impulsi ad elevata intensità queste tecniche sono basate sull'utilizzo di impulsi a femtosecondi ad elevata energia focalizzati in fibre cave oppure in celle. Un metodo molto efficace per produrre treni di impulsi XUV con energia dell'ordine dei microjoule si basa sull'utilizzo di una geometria in cui il campo IR viene focalizzato in una cella di gas lunga pochi centimetri usando elementi ottici con una lunghezza focale sufficientemente elevata (1-5 m).

Treni di impulsi ad attosecondi si utilizzano per varie applicazioni, ma non sono ideali per gli esperimenti di pump-probe; da ciò nasce la necessità di generare impulsi ad attosecondi isolati ad elevata intensità. Ci sono due tecniche distinte che permettono di ottenere ciò:

- filtraggio spettrale
- gating temporale

Il filtraggio spettrale si basa sull'utilizzo di impulsi IR ultrabrevi con pochi cicli ottici del campo elettrico: in simili impulsi l'ampiezza del campo elettrico varia fortemente tra due mezzi cicli

consecutivi. I fotoni XUV a più alta energia sono prodotti solo in corrispondenza del mezzo ciclo più intenso del laser IR. Questi impulsi corrispondono alle armoniche della regione di cut-off: facendo quindi un filtraggio spettrale si ottengono impulsi ad attosecondi isolati. L'efficacia di questa tecnica dipende dalla stabilità e dalla riproducibilità della forma d'onda del campo elettrico del laser IR. Il campo elettrico dell'impulso laser si può esprimere come

$$E_L(t) = E_0(t) \cos(\omega_L t + \varphi) \quad (1.9)$$

dove $E_0(t)$ è la funzione involuppo lentamente variabile, ω_L è la frequenza portante del laser e φ è la cosiddetta CEP (carrier-envelope phase), cioè l'offset tra il massimo del campo elettrico ed il massimo della funzione involuppo.

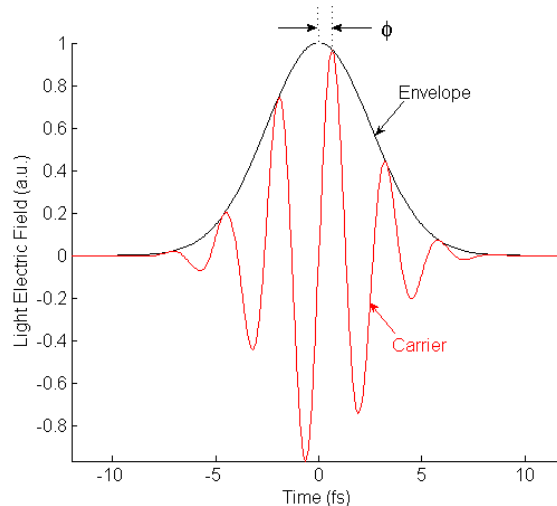


Figura 1.3 : Rappresentazione del campo elettrico e dell'involuppo con pochi cicli nel caso di sfasamento uguale a $\varphi=-90^\circ$ (fig. tratta da [2]).

La stabilizzazione della CEP si ha quando le velocità di fase e di gruppo dell'impulso laser che si propaga, coincidono.

Il gating temporale è una tecnica alternativa e più vantaggiosa rispetto alla prima. Infatti, il filtraggio spettrale presenta due svantaggi, quali la necessità di utilizzare impulsi IR con pochi cicli e la selezione della sola regione di cut-off nell'intero spettro delle armoniche. Entrambi questi fattori limitano l'efficienza di generazione di impulsi isolati. Il gating temporale consiste nel confinamento della generazione di armoniche in un intervallo temporale dell'impulso IR in cui la

polarizzazione del campo elettrico è resa lineare. La ricollisione degli elettroni con lo ione di provenienza avviene se il campo elettrico dell'impulso IR è polarizzato linearmente, quindi modulando la polarizzazione dell'impulso IR in modo tale che sia lineare in un singolo ciclo ed ellittica/circolare in tutti gli altri cicli, si può limitare il processo di generazione di armoniche ad un singolo ciclo ottico. L'efficacia delle tecniche basate sul gating temporale deriva dal fatto che il processo fisico dell'HHG dipende fortemente dall'ellitticità della polarizzazione del campo elettrico dell'impulso IR. Infatti l'efficienza di emissione di armoniche diminuisce all'aumentare dell'ellitticità della polarizzazione, quindi la forma e le caratteristiche dell'impulso IR possono essere ingegnerizzate in modo tale che la polarizzazione sia lineare solo in corrispondenza di gate temporali dell'impulso IR.

La tecnica che permette di fare tutto ciò, è denominata Polarization Gating (PG). Consiste nell'uso di una lamina birifrangente che divide l'impulso IR incidente in due impulsi con polarizzazioni ortogonali e ritardati temporalmente (il ritardo temporale dipende dallo spessore della lamina). Questa prima lamina è seguita da una lamina $\lambda/4$ che converte la polarizzazione circolare nella regione di sovrapposizione dei due impulsi in una polarizzazione lineare, mentre converte la polarizzazione lineare del fronte di salita e di discesa dell'impulso in una polarizzazione ellittica/circolare. La fig. 1.4 mostra le componenti ottiche di un sistema che realizza il PG:

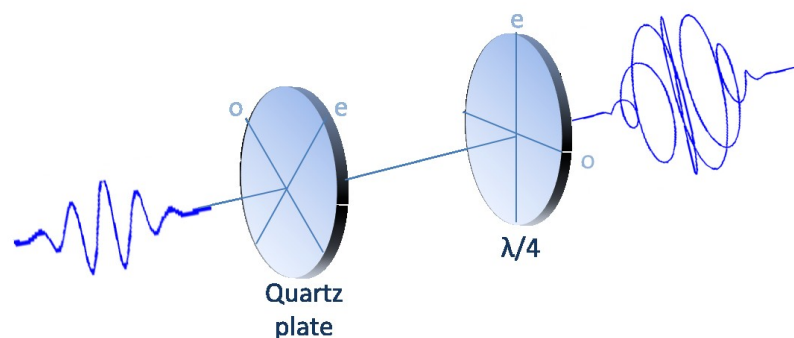


Figura 1.4 : Schema del Polarization gating (fig. tratta da [3]).

Con questa tecnica la generazione di impulsi ad attosecondi avviene anche nella regione di plateau dello spettro delle armoniche, dove l'efficienza di conversione è alta. Lo svantaggio del PG è che il

mezzo ciclo ottico più intenso del campo laser IR non viene sfruttato perché la produzione di impulsi ad attosecondi avviene sui fronti di discesa e di salita dei due impulsi ritardati nel tempo che si sovrappongono. Quindi l'intensità degli impulsi isolati prodotti con questa tecnica è bassa.

Sono stati quindi implementati metodi alternativi per la generazione di impulsi isolati più intensi, basati sull'utilizzo di gate di polarizzazione che non richiedono impulsi laser con pochi cicli ottici.

Il Double Optical Gating (DOG) è una tecnica che permette di rilassare la restrizione sulla durata dell'impulso IR. Essa consiste nell'aggiungere la seconda armonica a quella fondamentale dell'impulso del laser IR. Il DOG si implementa allo stesso modo del PG con l'aggiunta di una lamina di β -borato di Bario (BBO) dopo la seconda lamina $\lambda/4$. Lo schema ottico del DOG è mostrato in fig. 1.5:

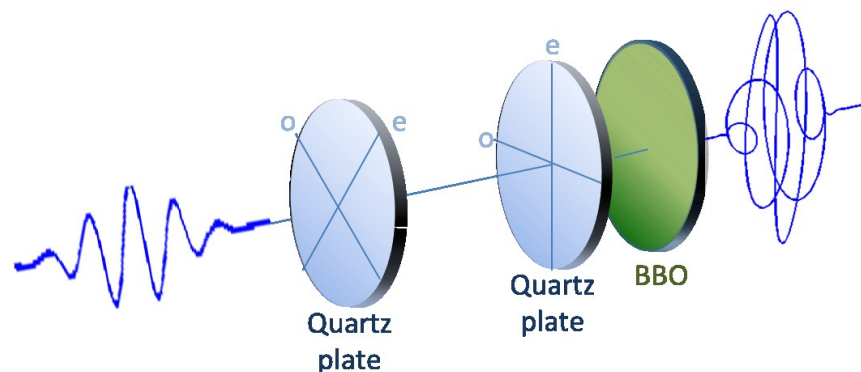


Figura 1.5 : Schema del Double Optical Gating (fig. tratta da [3]).

Per particolari valori dello sfasamento relativo tra le due componenti del campo laser e per ampiezze sufficientemente elevate del campo di seconda armonica, il campo elettrico dell'impulso IR non è più simmetrico e la generazione degli impulsi ad attosecondi avviene ogni mezzo ciclo ottico della radiazione fondamentale. In questo modo l'ampiezza del gate temporale in cui la polarizzazione è lineare può essere anche uguale ad un ciclo ottico della radiazione fondamentale. Ne derivano due vantaggi: la possibilità di utilizzare impulsi IR con una durata fino a ~ 12 fs, e la riduzione dello svuotamento dello stato fondamentale che avviene in corrispondenza del leading edge dell'impulso IR.

Esiste un'ulteriore tecnica, nota come Generalized Double Optical Gating (GDOG) che permette di estendere il metodo del gating temporale ad impulsi IR con una durata di alcune decine di femtosecondi e con potenza di picco fino al livello dei petawatt.

1.3.1 GDOG: GENERALIZED DOUBLE OPTICAL GATING

Come si è anticipato precedentemente, è necessario modulare opportunamente l'ellitticità dell'impulso IR per confinare l'emissione di armoniche in una finestra temporale in cui la polarizzazione è lineare. La tecnica del GDOG è stata implementata con l'obiettivo di ridurre le restrizioni sulla durata dell'impulso IR del laser. Lo schema del GDOG è mostrato in fig. 1.6:

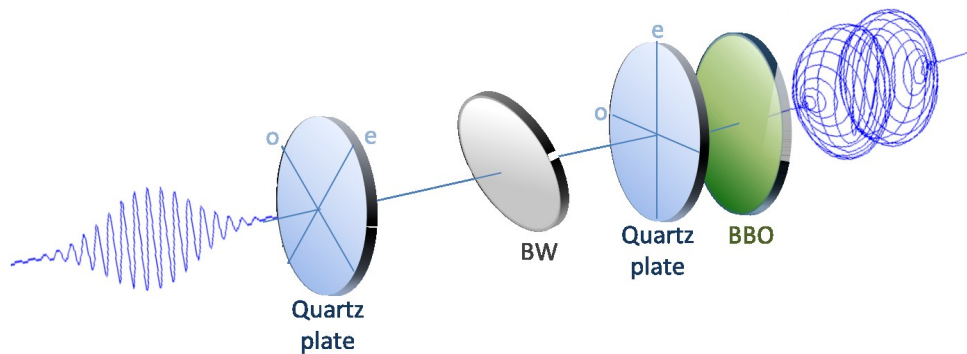


Figura 1.6 : Schema del Generalized Double Optical Gating (fig. tratta da [3]).

La configurazione è collineare e consiste in due lamine di quarzo tra le quali viene posizionata una finestra di Brewster, mentre un cristallo di β -borato di Bario (BBO) è posto dopo la seconda lamina di quarzo. Le due lamine di quarzo, opportunamente scelte, permettono di dare all'impulso in ingresso al sistema ottico una polarizzazione ellittica che varia nel tempo. Il primo elemento è una lamina birifrangente che divide l'impulso IR incidente in due componenti con polarizzazioni ortogonali propagantisi lungo gli assi ordinario e straordinario. Lo spessore δ della lamina determina il ritardo tra le due componenti. La direzione di polarizzazione dell'impulso IR incidente forma un angolo di 45 gradi con l'asse ottico della prima lamina. Dopo la prima lamina l'impulso ha polarizzazione lineare sui fronti di salita e di discesa, mentre ha polarizzazione ellittica nella parte

centrale. Dopodiché la finestra di Brewster serve a riflettere parte dell'impulso IR. In seguito si trova una lamina di quarzo usata in combinazione con il BBO per modificare la polarizzazione dell'impulso incidente da circolare a lineare e viceversa. In uscita quindi l'impulso ha elevata ellitticità sui fronti di salita e di discesa, mentre ha polarizzazione lineare al centro. Si può dimostrare che la larghezza del gate di polarizzazione è:

$$\Delta \approx \varepsilon \frac{\xi_{th}}{\ln 2} \frac{\tau^2}{\delta} \quad (1.10)$$

dove ξ_{th} è l'ellitticità di soglia, τ è la durata dell'impulso IR e δ è il ritardo indotto dalla prima lamina di quarzo. Ciò consente di rilassare la restrizione sulla durata dell'impulso IR.

Il maggior limite per l'ulteriore sviluppo di questa tecnica è lo svuotamento della popolazione di atomi che si trovano nello stato fondamentale in corrispondenza del fronte di salita dell'impulso IR. Per ridurre tale svuotamento viene ridotta l'ellitticità del campo IR aggiungendo proprio una finestra di Brewster allo schema del DOG.

La figura seguente mostra i risultati ottenuti dalla teoria di Ammosov, Delone e Krainov (ADK) sulla ionizzazione degli atomi di Argon da parte di un campo laser oscillante. Con la tecnica del GDOG, la probabilità di ionizzazione del mezzo diventa unitaria a partire da impulsi IR di 25 fs.

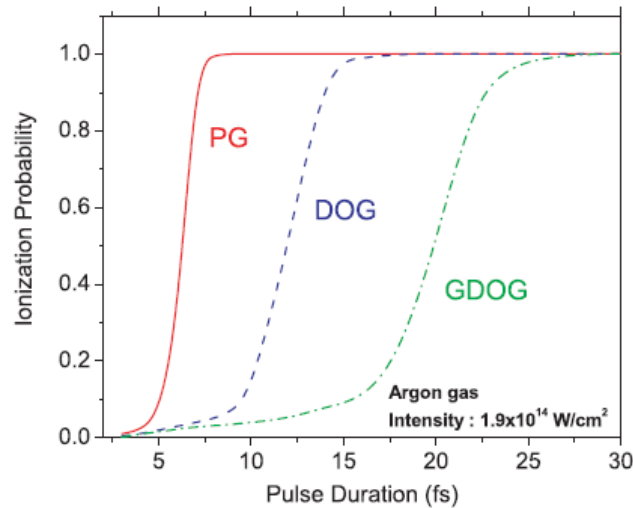


Figura 1.7 : Probabilità di ionizzazione in funzione della durata dell'impulso laser per Polarization Gating (PG, linea continua), Double Optical Gating (DOG, linea tratteggiata), Generalized Double Optical Gating (GDOG,). L'intensità di picco al centro del gate è tenuta costante e pari a $1.9 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ in tutti e tre i casi. (fig. tratta da [14]).

La tecnica del GDOG permette una semplificazione del setup sperimentale complessivo necessario per produrre armoniche di ordine elevato della radiazione del laser IR, poiché è possibile utilizzare gli impulsi emessi direttamente dalla sorgente laser, senza che questi vengano ulteriormente compressi usando la tecnica della fibre cava.

1. APPLICAZIONI DEGLI IMPULSI AD ATTOSECONDI AD ELEVATA ENERGIA

Impulsi ad attosecondi isolati ad alta intensità possono essere utilizzati per lo studio dei processi non lineari nella regione spettrale dell'estremo ultravioletto con applicazioni nel campo della metrologia ad attosecondi.

Un ulteriore e fondamentale utilizzo di tali impulsi è negli esperimenti di pump-probe, in cui, essendo gli impulsi ad attosecondi, la risoluzione temporale viene fortemente migliorata. Questo

tipo di esperimenti permetterà di investigare la dinamica dei pacchetti d'onda elettronici in atomi e molecole.

Per produrre impulsi isolati ad alta energia si possono seguire due approcci distinti. Un primo approccio consiste nel produrre direttamente impulsi isolati ad alta energia utilizzando opportune tecniche di gating temporale. Un secondo approccio consiste invece nel produrre impulsi isolati a bassa energia che verranno in seguito micro-focalizzati da opportuni sistemi costituiti da ottiche cartesiane oppure da specchi toroidali usati in incidenza radente. Questo secondo approccio è trattato in questo lavoro di tesi.

2. FOCALIZZAZIONE DI IMPULSI AD ATTOSECONDI ISOLATI

Questo capitolo descrive il sistema ottico realizzato per focalizzare la radiazione XUV. Sono presentate diverse simulazioni di ray-tracing per comprenderne le proprietà ottiche. Viene inoltre presentata e descritta la linea XUV-XUV in cui si intende utilizzare questo sistema.

2.1 LINEA XUV-XUV

Lo sviluppo di sorgenti agli attosecondi ad elevata intensità sta diventando sempre più importante negli ultimi anni. Lo sviluppo di questa nuova tecnologia permetterà di approfondire lo studio dell'interazione radiazione-materia in un regime di forte non linearità; inoltre si potranno effettuare esperimenti di XUV-pump/XUV-probe per i quali sono indispensabili impulsi ad attosecondi sufficientemente intensi. In fig. 2.1 viene mostrato lo schema della linea per la realizzazione di esperimenti di pump/probe in cui sia l'impulso di eccitazione che quello di sonda sono impulsi XUV ad attosecondi:

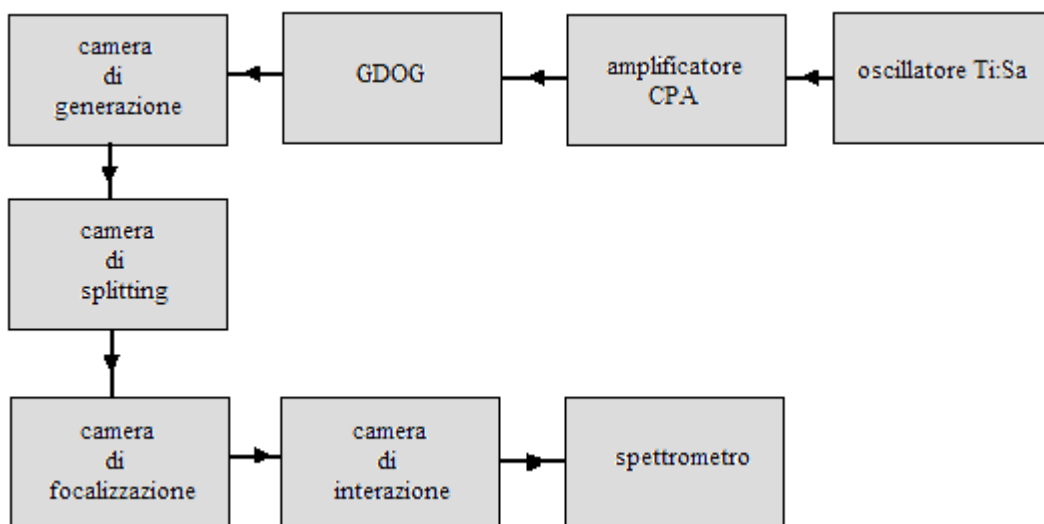


Figura 2.1 : Schema della linea XUV-XUV.

La sorgente, costituita dall'oscillatore di Ti:Sapphire e dal blocco di amplificazione, emette impulsi con determinate caratteristiche di intensità e durata temporale. In seguito l'impulso può essere inviato direttamente nella camera di generazione, oppure può essere processato da un sistema ottico

che, tramite un gating temporale, modula la polarizzazione del campo elettrico (PG, DOG, GDOG). Nella camera di generazione avviene il processo di HHG. Gli impulsi ad attosecondi isolati vengono divisi in modo tale da avere un impulso di eccitazione ed uno di sonda; poi sono focalizzati. Il punto di fuoco all'uscita della camera di focalizzazione è posizionato all'interno della camera di interazione dove si possono montare uno spettrometro TOF (time-of-flight) oppure un detector VMI (velocity map imaging), in base alle necessità sperimentali. Infine, è posizionato uno spettrometro per fare un'analisi spettrale della radiazione raccolta. Dato che la radiazione nella regione spettrale dell'estremo ultravioletto viene fortemente assorbita dall'aria, i sistemi ottici usati per focalizzare la radiazione XUV sono posti in camere da vuoto.

La generazione di impulsi ad attosecondi comporta determinate restrizioni nel design dell'intera linea ottica. In primo luogo il fascio laser IR ad alta energia deve essere rimosso dopo la generazione degli impulsi XUV per evitare danni alle componenti ottiche ed al campione che si intende studiare. Un altro importante accorgimento riguarda il design dei sistemi ottici usati per focalizzare la radiazione XUV: tali sistemi devono essere progettati in modo tale che il fascio XUV raggiunga un'elevata intensità sul campione all'interno della camera di interazione.

2.1.1 SORGENTE LASER

L'oscillatore di Ti:Sapphire con sistema di stabilizzazione della fase assoluta emette impulsi che vengono successivamente amplificati con la tecnica denominata chirped pulse amplification (CPA).

La figura seguente illustra uno schema delle varie componenti della sorgente:

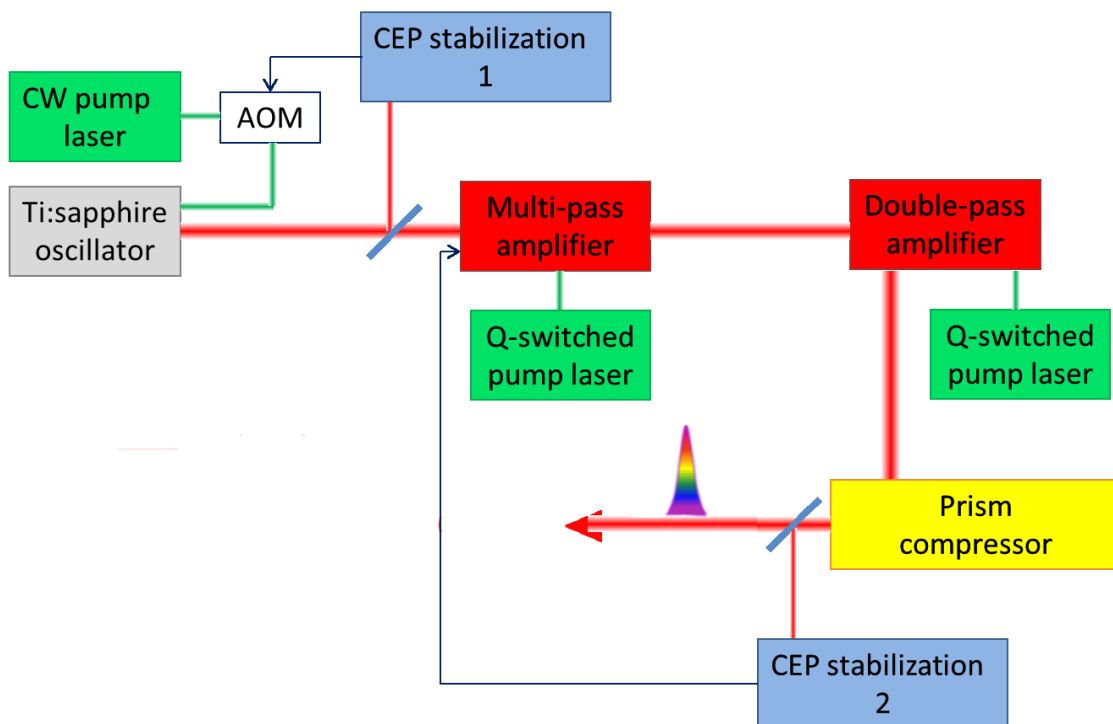


Figura 2.2 : Schema della sorgente laser ad alta potenza con sistema di stabilizzazione della CEP (fig. tratta da [2]).

La frequenza di emissione degli impulsi è di 80 Mhz; lo spettro di emissione contiene lunghezze d'onda tra circa 650 nm e 1000 nm e la lunghezza d'onda centrale è di 800 nm. Dopo l'oscillatore, si trova il sistema di stabilizzazione della CEP che va a compensare lo shift di fase tra onda portante e inviluppo dell'impulso dovuto alla differenza tra velocità di fase e di gruppo nel mezzo ottico dell'oscillatore. Dopodiché c'è il sistema che implementa la CPA. Gli impulsi in uscita hanno energia di 6 mJ e durata di 25 fs.

2.1.2 CAMERA DI GENERAZIONE

Come si è già detto, gli impulsi IR possono essere inviati direttamente nella camera di generazione oppure possono essere inviati in un sistema ottico che ne fa un gating temporale modulando la polarizzazione del campo elettrico, necessaria per la generazione di impulsi XUV isolati. Nella camera di generazione avviene l'interazione fortemente non lineare tra il campo elettrico dell'impulso IR ad alta energia ed il mezzo gassoso. Si verifica il processo di generazione di armoniche della frequenza fondamentale del laser.

La fig. 2.3 mostra uno schema del sistema ottico per il gating temporale dell'impulso IR e della camera di generazione:

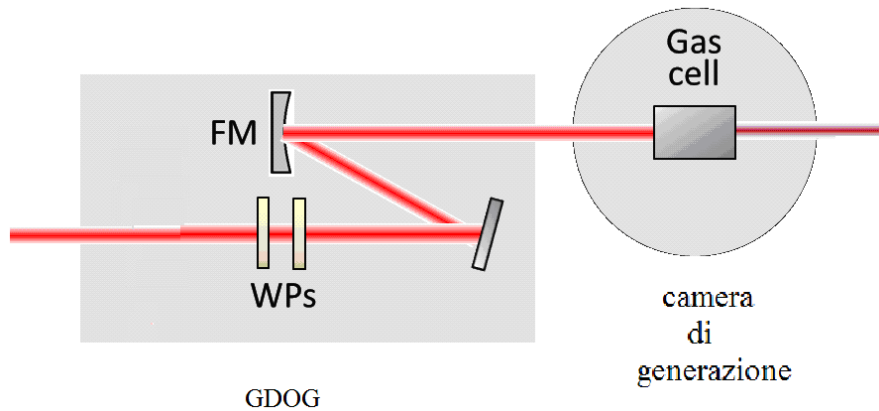


Figura 2.3 : Schema del sistema in cui viene fatto un gating temporale dell'impulso IR e della camera di generazione della radiazione XUV. WPs: Waveplates; FM: Focal Mirror.

Nella camera di generazione si trova una cella contenente un gas nobile. La cella ha una valvola che emette getti di gas in modo impulsato; la valvola viene aperta e poi chiusa periodicamente da un disco piezoelettrico comandato da una differenza di potenziale sincronizzata con gli impulsi IR. Quindi dalla camera di generazione emergono impulsi ad attosecondi isolati. Questa sorgente XUV presenterà una distribuzione spaziale gaussiana con una FWHM di qualche centinaio di micron, e una divergenza angolare di qualche milliradiante.

Infine gli impulsi XUV isolati vengono processati dal sistema ottico che realizza la divisione e la micro-focalizzazione del fascio. Nel paragrafo seguente viene descritto tale sistema ottico. Dopo la camera di generazione, sarà posto un opportuno filtro per la rimozione della radiazione IR, in modo tale da evitare il danneggiamento delle ottiche per la radiazione XUV e del campione che si intende studiare.

2.2 PROGETTO DEL SISTEMA OTTICO PER LA MICRO-FOCALIZZAZIONE

Per focalizzare la radiazione XUV è possibile utilizzare elementi ottici come specchi parabolici, specchi ellissoidali oppure specchi toroidali in incidenza radente. Le ottiche cartesiane sono molto costose e difficilmente allineabili, quindi in generale singoli specchi toroidali oppure combinazioni di più specchi toroidali, utilizzati in incidenza radente, costituiscono un'ottima soluzione per il progetto di sistemi ottici atti a focalizzare la radiazione XUV.

Nella linea XUV-XUV, dopo la camera in cui avviene la generazione di armoniche di ordine elevato, si trova il sistema ottico adibito alla focalizzazione ed alla demagnificazione degli impulsi XUV. Tale sistema ottico, costituito da tre specchi toroidali usati in incidenza radente, è stato progettato per raggiungere alcuni particolari obiettivi quali:

- La generazione di impulsi XUV con una dimensione dello spot in un range compreso tra 5 e 15 μm , con aberrazioni trascurabili;
- Un braccio d'uscita sufficientemente lungo, in modo tale da poter posizionare nel piano d'uscita, il setup sperimentale per le applicazioni degli impulsi agli attosecondi (TOF, spettrometro, VMI);
- La possibilità di avere una regione intermedia dove il fascio XUV sia collimato, in modo tale da potervi inserire un divisore di fascio piano per la generazione di due repliche dell'impulso XUV da usare in un esperimento di XUV-pump/XUV-probe.

Il sistema ottico è mostrato nella fig. 2.4 :

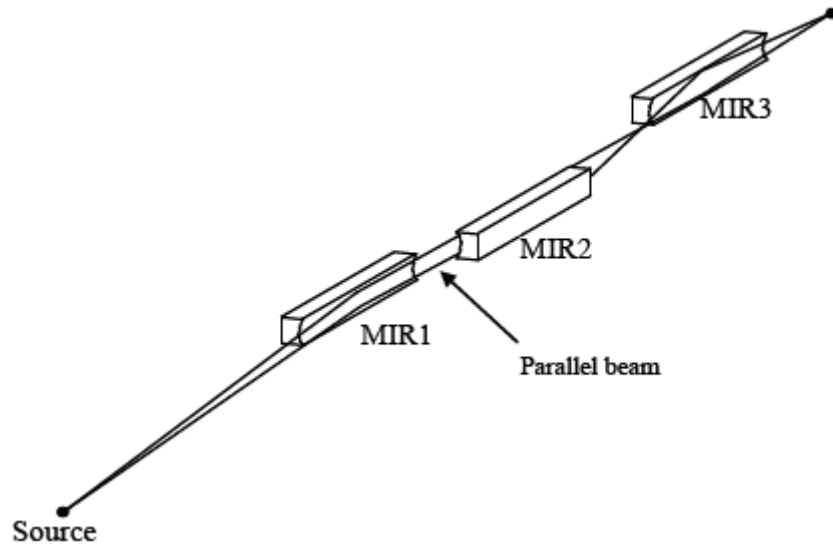


Figura 2.4 : Sistema ottico per la focalizzazione di impulsi agli attosecondi, costituito da tre specchi toroidali usati in una geometria ad incidenza radente. È costituito da due sezioni: la prima sezione è fatta dagli specchi MIR 1 e MIR 2, mentre la seconda è fatta dallo specchio MIR 3. Il fascio è parallelo tra MIR 1 e MIR 2; il fuoco intermedio si trova tra MIR 2 e MIR 3 (fig. tratta da [13]).

Esso consta di due sezioni: la prima sezione è fatta da due specchi toroidali MIR 1 e MIR 2 tra i quali si può posizionare il divisore di fascio piano in quanto tra essi il fascio è parallelo, mentre la seconda sezione è fatta dallo specchio toroidale MIR 3 posizionato in una geometria a Z rispetto al secondo specchio della prima sezione. La prima sezione produce un'immagine demagnificata della sorgente in un focus intermedio privo di astigmatismo ma con un coma elevato; la seconda sezione produce un'immagine stigmatica con un coma opposto rispetto a quello della prima sezione. Il focus intermedio in cui si trova l'immagine demagnificata della sorgente, priva di astigmatismo ma con un elevato coma, è posizionato tra il secondo ed il terzo specchio toroidale.

Un'altra configurazione di interesse, utilizzabile per la focalizzazione di impulsi XUV, è quella mostrata nella fig. 2.5 :

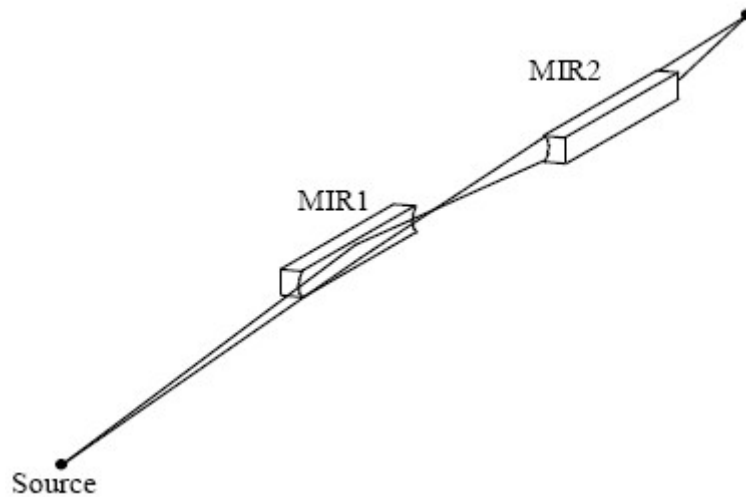


Figura 2.5 : Sistema ottico per la focalizzazione di impulsi agli attosecondi, costituito da due specchi toroidali posizionati in una geometria a Z. È costituito da due sezioni: la prima consta dello specchio MIR 1, la seconda dello specchio MIR 2 (fig. tratta da [13]).

Essa consta di due specchi toroidali posizionati in una geometria a Z, in quanto essi riflettono il fascio in direzioni opposte nel piano tangenziale; gli specchi sono progettati in modo tale che il fuoco tangenziale e quello sagittale siano posti tra gli specchi stessi. La figura seguente mostra due possibili configurazioni geometriche: quella a Z, appena descritta, e quella a U, in cui gli specchi riflettono nella stessa direzione il fascio incidente:

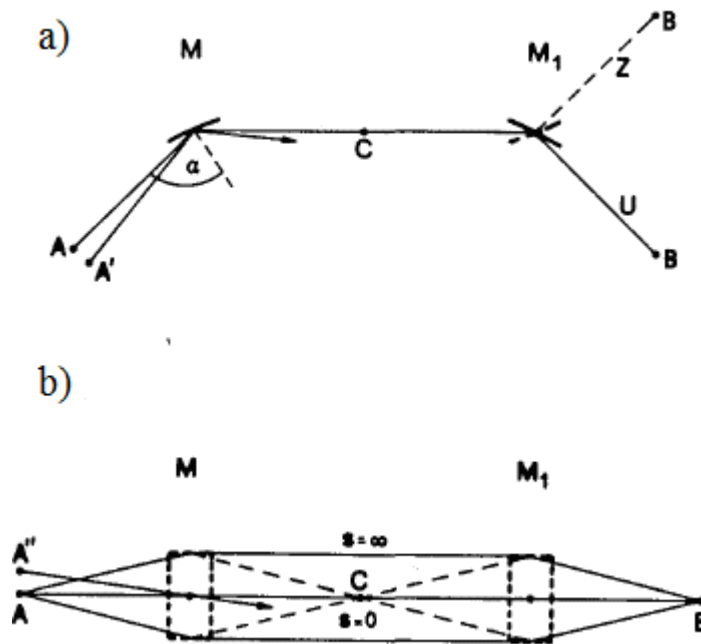


Figura 2.6 : Configurazione con due specchi toroidali identici M e M₁. a) Vista del piano tangenziale del sistema ottico. b) Vista del piano sagittale. Sono possibili due orientazioni nel piano tangenziale, ad U e a Z.(fig. tratta da [10]).

Sia analiticamente che numericamente (da numerose simulazioni di ray-tracing), è emerso che la configurazione a Z, è migliore della configurazione ad U nel creare un'immagine priva di aberrazioni. Inoltre la combinazione di due specchi toroidali offre grande libertà nella progettazione del sistema ottico in quanto il raggio tangenziale e quello sagittale di ogni toroidale sono indipendenti, quindi si può fare in modo che i fuochi si trovino in qualsiasi punto, tra gli specchi oppure lontano da essi.

La prima configurazione, costituita da tre specchi toroidali, presenta alcuni vantaggi rispetto all'utilizzo di una configurazione con solo due specchi toroidali per la focalizzazione degli impulsi XUV; questi vantaggi sono la possibilità di una forte demagnificazione della sorgente e la possibilità di posizionare un divisore di fascio tra il primo ed il secondo toroidale (dove il fascio è parallelo), per esperimenti di XUV-pump/XUV-probe.

Gli specchi toroidali hanno due caratteristiche principali: hanno uno strato di copertura metallica e sono usati in una configurazione in cui l'incidenza è radente. Questo garantisce da una parte

un'elevata flessibilità nella selezione della regione spettrale in cui si vuole operare, dall'altra una riflettività quasi costante nell'intera banda.

È stato realizzato quindi il sistema ottico costituito da tre specchi toroidali in incidenza radente: il primo specchio fa una collimazione del fascio, il secondo focalizza e demagnifica il fascio (eliminando le aberrazioni del secondo ordine), mentre il terzo demagnifica ulteriormente (eliminando le aberrazioni residue del terzo ordine) e allunga il braccio d'uscita dell'intero sistema ottico. Nella prima sezione del sistema ottico, tra il primo ed il secondo toroidale, il fascio è parallelo, quindi è possibile posizionarvi un divisore di fascio piano che crea due repliche ritardate nel tempo dell'impulso incidente. In questo modo, le due repliche possono essere focalizzate nello stesso punto indipendentemente dal loro ritardo temporale relativo.

La caratteristica saliente di questo sistema ottico è proprio la combinazione dei tre specchi toroidali in una geometria ad incidenza radente per compensare le aberrazioni del secondo e del terzo ordine, oltre che per focalizzare e demagnificare il fascio. Dallo studio del pattern delle aberrazioni, ottenuto con varie simulazioni di ray-tracing, emerge che dopo il secondo specchio toroidale lo spot del fascio presenta un elevato coma, mentre l'astigmatismo introdotto dal primo toroidale è stato completamente compensato; infine il terzo specchio toroidale va a compensare il coma.

Per comprendere il funzionamento dell'intero sistema ottico è necessario prima calcolare le aberrazioni introdotte da un singolo specchio toroidale. Il layout ottico è mostrato in fig. 2.7 :

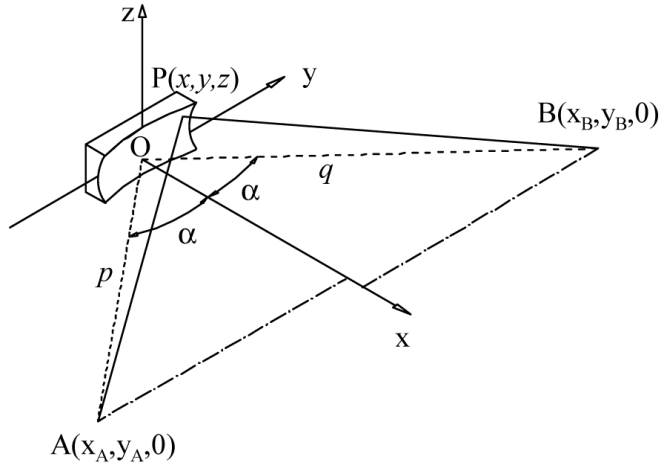


Figura 2.7 : Layout ottico di uno specchio toroidale (fig. tratta da [13]).

Si definisce una funzione di cammino F , di un raggio emesso da un punto sorgente A che passa attraverso il punto focale B dopo una riflessione nel punto $P(x,y,z)$ sulla superficie dello specchio,

$F = A \langle B \rangle + \langle P \rangle B$. Tali distanze possono esprimersi come funzioni delle variabili α , p , q , y , z dove α è l'angolo d'incidenza, p e q sono le lunghezze dei bracci d'ingresso e d'uscita rispettivamente, mentre y e z sono le coordinate di un punto sulla superficie dello specchio. F è espressa come serie di potenze di y e z :

$$F = p + q + F_{20}y^2 + F_{02}z^2 + F_{30}y^3 + F_{12}yz^2 + O(y^4, z^4) \quad (2.1)$$

dove la serie è troncata al terzo ordine. Per una superficie toroidale con raggio tangenziale R e raggio sagittale ρ , i termini F_{ij} sono:

$$F_{20} = \frac{1}{2} \cos^2 \alpha \left(\frac{1}{p} + \frac{1}{q} - \frac{2}{R \cos \alpha} \right) \quad (2.2)$$

$$F_{02} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{p} + \frac{1}{q} - \frac{2 \cos \alpha}{\rho} \right) \quad (2.3)$$

$$F_{30} = \frac{1}{2} \sin \alpha \cos \alpha \left[\frac{1}{p} \left(\frac{\cos \alpha}{p} - \frac{1}{R} \right) - \frac{1}{q} \left(\frac{\cos \alpha}{q} - \frac{1}{R} \right) \right] \quad (2.4)$$

$$F_{12} = \frac{1}{2} \sin \alpha \left[\frac{1}{p} \left(\frac{1}{p} - \frac{\cos \alpha}{\rho} \right) - \frac{1}{q} \left(\frac{1}{q} - \frac{\cos \alpha}{\rho} \right) \right] \quad (2.5)$$

I punti A e B sono fissati, mentre P può essere un qualsiasi punto sulla superficie dello specchio, quindi una focalizzazione senza aberrazioni si ottiene dalle condizioni $\delta F / \delta y = \delta F / \delta z = 0$ che devono essere soddisfatte simultaneamente da ogni coppia di valori y e z. Ciò avviene solo se i termini F_{ij} sono nulli. F_{20} è responsabile del defocusing tangenziale, F_{02} di quello sagittale. Quindi per avere un'immagine stigmatica, devono essere soddisfatte le condizioni $F_{20} = 0$ e $F_{02} = 0$, che danno:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R \cos \alpha} = \frac{2 \cos \alpha}{\rho} \quad (2.6)$$

da cui si calcolano i raggi dello specchio toroidale. α avrà valori molto elevati, compresi tra 80 e 85 gradi, dato che gli specchi saranno utilizzati in incidenza radente.

Dopo aver eliminato l'astigmatismo, l'aberrazione residua è data dai termini del terzo ordine, F_{30} che rappresenta il coma tangenziale e F_{12} che rappresenta il coma sagittale. Introducendo $M = \frac{p}{q}$

, rapporto tra braccio d'ingresso e braccio d'uscita, $L_{\tan} = \frac{D\rho}{\cos \alpha}$, $L_{sag} = D\rho$ le dimensioni della porzione di specchio illuminata, D la mezza divergenza della sorgente, si ottengono il coma tangenziale ΔC_{\tan} e quello sagittale ΔC_{sag} dati da uno specchio toroidale in configurazione stigmatica.

$$\Delta C_{\tan} = 3 \frac{q}{\cos \alpha} F_{30} L_{\tan}^2 = \frac{3}{4} p D^2 \frac{M^2 - 1}{M} \tan \alpha \quad (2.7)$$

$$\Delta C_{sag} = 2q F_{12} L_{\tan} L_{sag} = \frac{1}{2} p D^2 \frac{M^2 - 1}{M} \tan \alpha = \frac{2}{3} \Delta C_{\tan} \quad (2.8)$$

da queste formule è evidente come il coma aumenta all'aumentare della demagnificazione richiesta.

Nel caso M=1 non ci sono aberrazioni del terzo ordine.

La prima sezione del sistema ottico (fatta dai primi due toroidali) ha un coma pari a

$$\Delta C_{\tan,1} = \frac{3}{4} p_1 D^2 \frac{M_1^2 - 1}{M_1} \tan \alpha \quad (2.9)$$

$$\Delta C_{sag,1} = \frac{2}{3} \Delta C_{\tan,1} \quad (2.10)$$

dove p_1 è il braccio d'ingresso di MIR 1 e M_1 è il rapporto tra il braccio d'ingresso di MIR 1 e il braccio d'uscita di MIR 2. Il coma all'uscita della seconda sezione è dato da

$$\Delta C_{\tan,2} = \frac{3}{4} q_2 D^2 M_1^2 (M_2^2 - 1) \tan \alpha \quad (2.11)$$

$$\Delta C_{sag,2} = \frac{2}{3} \Delta C_{\tan,2} \quad (2.12)$$

con q_2 e M_2 rispettivamente braccio d'uscita e demagnificazione della seconda sezione stessa. Quindi la compensazione del coma è possibile solo se MIR 2 e MIR 3 sono montati in una configurazione a Z. $\Delta C_{\tan,1} = \Delta C_{\tan,2}$ è la condizione da soddisfare per cancellare il coma globale; ne risulta

$$M_2 = \sqrt{1 + \frac{p_1}{q_2} \frac{M_1^2 - 1}{M_1^3}} \cong \sqrt{1 + \frac{p_1}{q_2 M_1}} \quad (2.13)$$

L'approssimazione vale per $M_1 \gg 1$, cioè per un'elevata demagnificazione.

I parametri liberi che definiscono la configurazione sono 4:

1. la lunghezza del braccio d'ingresso p_1 , distanza tra la sorgente ad attosecondi ed il centro del primo specchio,
2. la lunghezza del braccio d'uscita q_2 , distanza tra il centro dell'ultimo specchio e il punto di fuoco,
3. la demagnificazione della prima sezione M_1 ,
4. la demagnificazione della seconda sezione M_2 .

p_1 , q_2 ed M_1 sono fissati da esigenze sperimentali, mentre M_2 si calcola dall'equazione 2.13.

Il layout della linea ottica è mostrato nella figura 2.8:

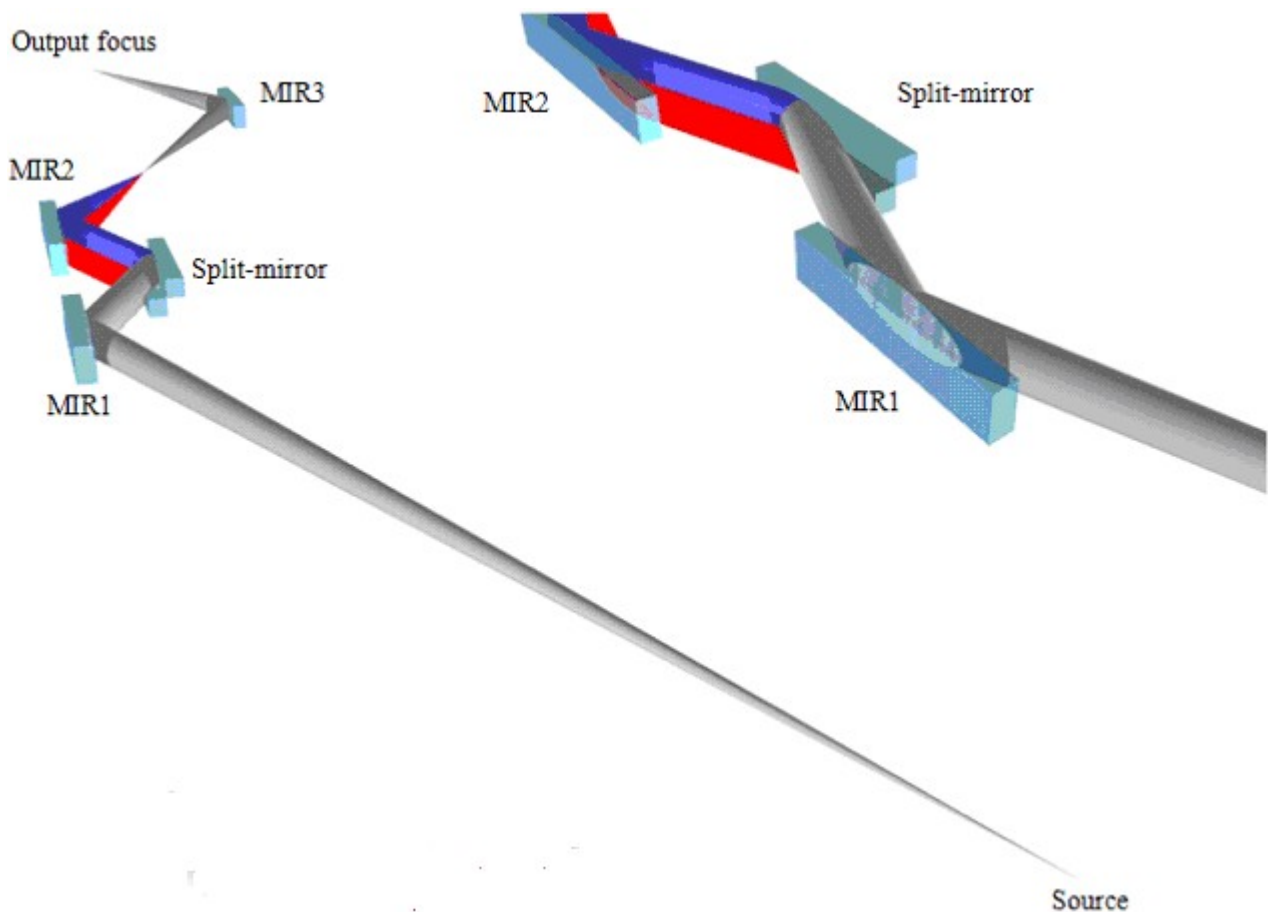


Figura 2.8 : Layout ottico di una beamline per esperimenti di XUV-pump/XUV-probe. È messo in evidenza lo split mirror che produce due repliche ritardate dell'impulso incidente (fig. tratta da [13]).

I parametri della sorgente e della linea sono riassunti nelle tabelle 2.1 e 2.2. L'angolo di incidenza sugli specchi è pari a 80 gradi per avere un'elevata riflettività nella regione 20-80 nm.

Tabella 2.1 : Parametri della sorgente agli atto secondi usata nelle simulazioni.

Parametri della sorgente agli attosecondi	
Dimensione della sorgente	120 μm FWHM
Divergenza della sorgente	0.8 mrad FWHM

Tabella 2.2 : Parametri della linea XUV-XUV per esperimenti di pump-probe.

Parametri della linea XUV-XUV	
p_1	1500 mm
q_2	600 mm
M	>10
α	80 deg

Per la demagnificazione della prima sezione si è scelto il valore $M_1=10$, per avere una demagnificazione totale $M>10$. p_1 e α sono già stati scelti, quindi i raggi sagittale e tangenziale degli specchi della prima sezione sono univocamente determinati. M_2 si calcola dall'equazione 2.13, mentre i parametri dello specchio d'uscita sono già determinati perché q_2 è stato fissato. La tabella 2.3 contiene un elenco dei parametri della beamline.

Tabella 2.3 : Parametri geometrici della linea XUV-XUV.

Mirror 1	
Entrance arm	1500 mm
Exit beam	Collimated beam
Incidence angle	80 deg
Radii (tangential × sagittal)	17.3 m × 521 mm
Size (tangential × sagittal)	15 mm × 3 mm
<i>Mirror 2</i>	
Entrance beam	Parallel beam
Exit arm	150 mm
Incidence angle	80 deg
Radii (tangential × sagittal)	1.73 m × 52.1 mm
Size (tangential × sagittal)	15 mm × 3 mm
<i>Mirror 3</i>	
Entrance arm	660 mm
Exit arm	600 mm
Incidence angle	80 deg
Radii (tangential × sagittal)	3620 mm × 109.2 mm
Size (tangential × sagittal)	60 mm × 12 mm
<i>Demagnification</i>	

Total demagnification	11.1
Demagnification of section 1	10
Demagnification of section 2	1.11

Tramite il software XOP, è stato possibile fare varie simulazioni di ray tracing che hanno permesso di visualizzare e comprendere la risposta ottica del sistema fatto dai tre specchi toroidali. XOP permette di progettare il sistema ottico e di selezionare la tipologia e le caratteristiche della sorgente, dopodiché è possibile visualizzare l'immagine di quest'ultima in vari punti del sistema ottico stesso. In questo modo è possibile visualizzare in maniera diretta ed immediata le proprietà di focalizzazione, così come l'effetto delle aberrazioni del sistema ottico sull'immagine.

Il sistema ottico progettato con XOP è costituito dalla successione di quattro elementi ottici, anche se ci sono solo tre specchi toroidali nella linea. Infatti il primo elemento ottico è rappresentato dal primo specchio toroidale. Il terzo ed il quarto sono ancora rappresentati dagli altri due specchi toroidali. Invece, il secondo elemento ottico, corrispondente alla regione tra il primo ed il secondo toroidale, cioè dove il fascio è collimato, è utile per descrivere un'ulteriore componente ottica, come il divisore di fascio, che dovrà essere aggiunta nel setup sperimentale. Nella tabella 2.4 sono elencati i parametri dei quattro elementi ottici, usati nel software XOP:

Tabella 2.4 : Parametri geometrici degli elementi ottici usati nelle simulazioni di ray-tracing con il software XOP.

Primo elemento ottico	
Braccio d'ingresso	150 cm
Braccio d'uscita	10 cm
Angolo d'incidenza	80 deg
Angolo di riflessione	80 deg
Secondo elemento ottico	
Braccio d'ingresso	5 cm
Braccio d'uscita	7.6 cm
Angolo d'incidenza	80 deg

Angolo di riflessione	80 deg
Terzo elemento ottico	
Braccio d'ingresso	10 cm
Braccio d'uscita	15 cm
Angolo d'incidenza	80 deg
Angolo di riflessione	80 deg
Quarto elemento ottico	
Braccio d'ingresso	66 cm
Braccio d'uscita	60 cm
Angolo d'incidenza	80 deg
Angolo di riflessione	80 deg

I punti del sistema ottico che sono di maggior interesse per comprenderne le proprietà, sono il punto di fuoco intermedio, situato tra il secondo ed il terzo specchio toroidale, ed il fuoco in uscita.

Questi punti sono mostrati in fig. 2.9:

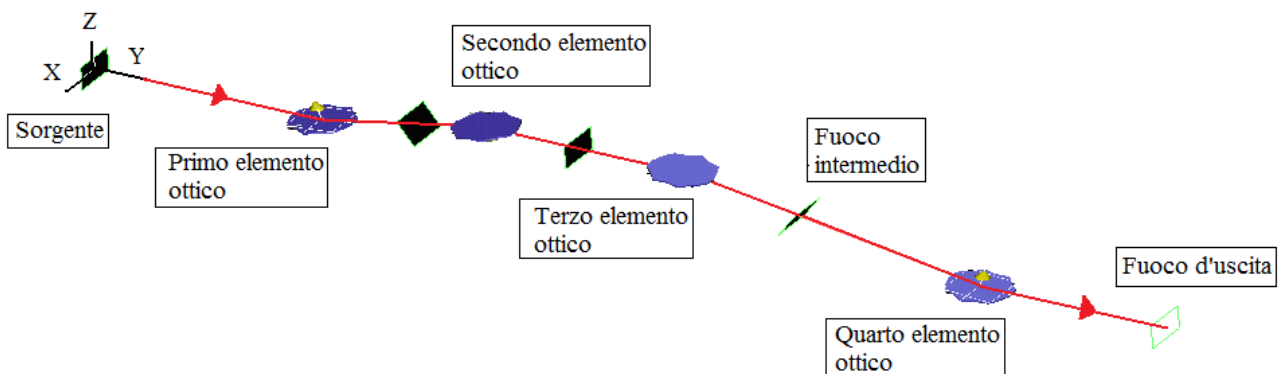


Figura 2.9 : Sistema ottico per il microfocusing con configurazione geometrica a Z visualizzato in scala logaritmica.

Le simulazioni sono state fatte scegliendo una sorgente con distribuzione spaziale gaussiana con FWHM pari a $120 \mu m$ e con distribuzione angolare conica con FWHM uguale a 0.8 mrad. La fig. 2.10 mostra la sorgente:

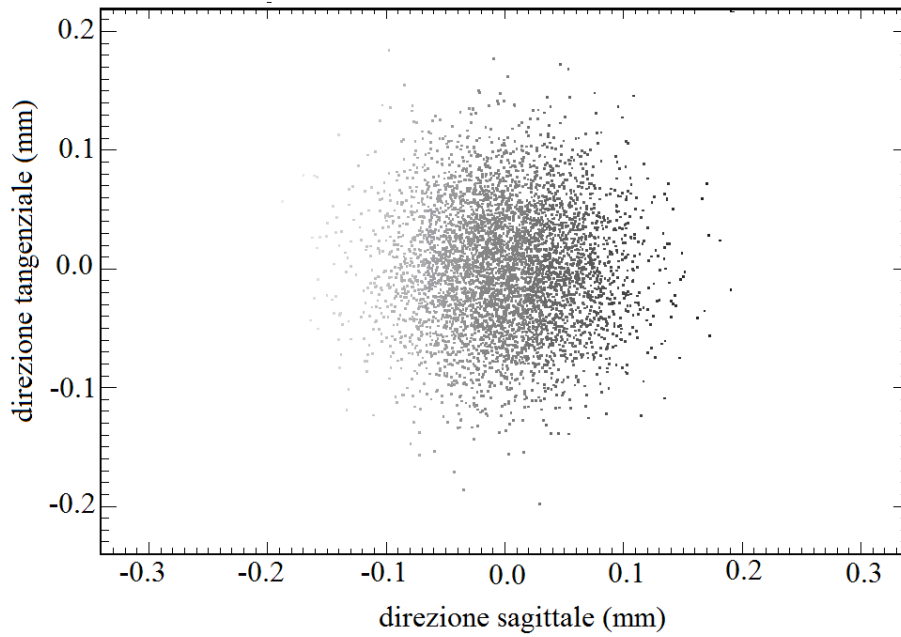


Figura 2.10 : Immagine della sorgente ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una distribuzione spaziale gaussiana con FWHM uguale a 120 micron e una divergenza angolare pari a 0.8 mrad.

L'immagine in corrispondenza del fuoco intermedio è di interesse in quanto mostra che la combinazione dei primi due specchi toroidali produce un'immagine stigmatica con un fattore di demagnificazione pari a 10, ma con coma residuo. Questo è chiaramente visibile nelle seguenti figure:

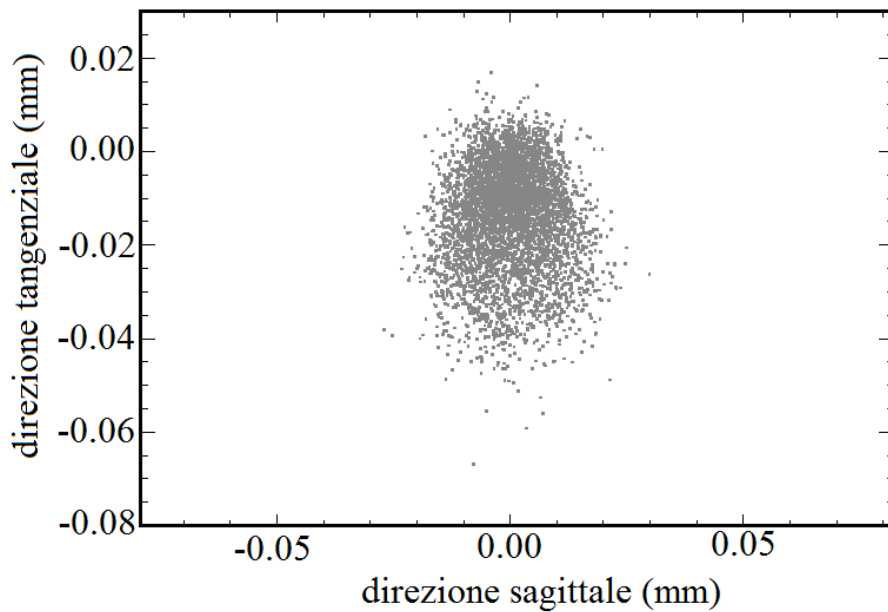


Figura 2.11 : Immagine in corrispondenza del fuoco intermedio della linea XUV-XUV.

Lo spot ha una FWHM uguale a $18\ \mu\text{m}$ in direzione sagittale e una FWHM uguale a $23\ \mu\text{m}$ in direzione tangenziale.

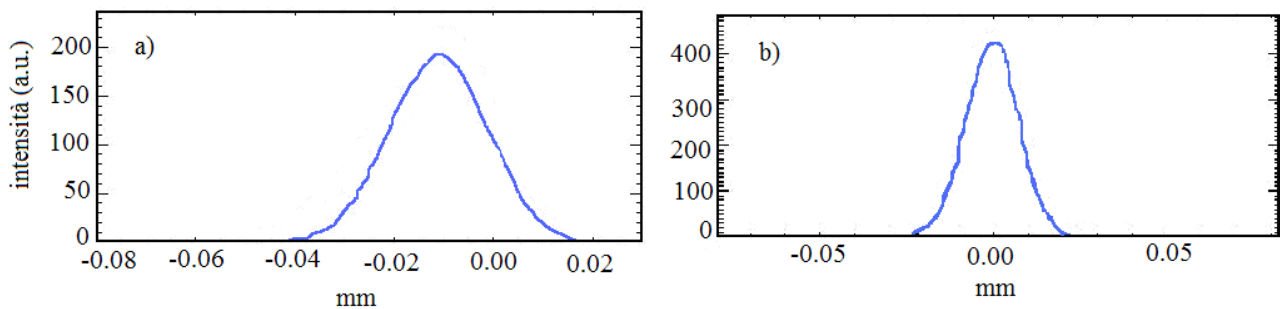


Figura 2.12 : a) Profilo tangenziale dello spot nel fuoco intermedio. b) Profilo sagittale dello spot nel fuoco intermedio. L'aberrazione del terzo ordine è molto accentuata nella direzione tangenziale.

Le fig. 2.12 a) e b) mostrano come la distribuzione dei raggi incidenti sul piano intermedio non è uniforme lungo la direzione tangenziale, mentre la distribuzione dei raggi in direzione sagittale è uniforme.

La fig. 2.13 mostra invece lo spot nel piano d'uscita del sistema ottico:

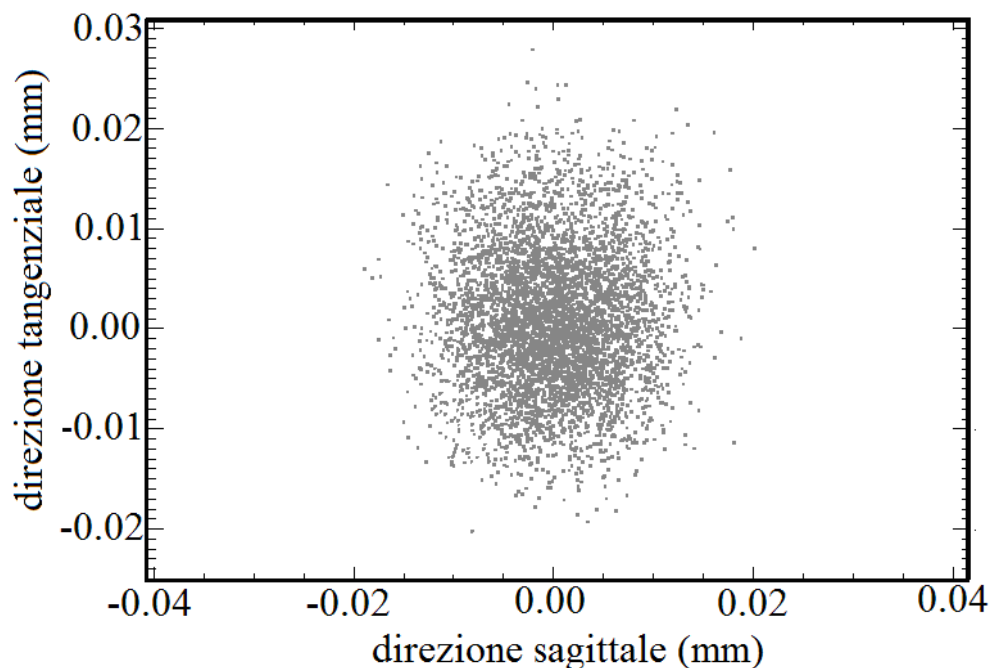


Figura 2.13 : Immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita della linea XUV-XUV.

Si è verificata una completa compensazione del coma, grazie al terzo specchio toroidale posizionato in configurazione a Z con il secondo toroidale. Lo spot ha una FWHM uguale a $13\ \mu\text{m}$ in direzione sagittale e una FWHM uguale a $14\ \mu\text{m}$ in direzione tangenziale.

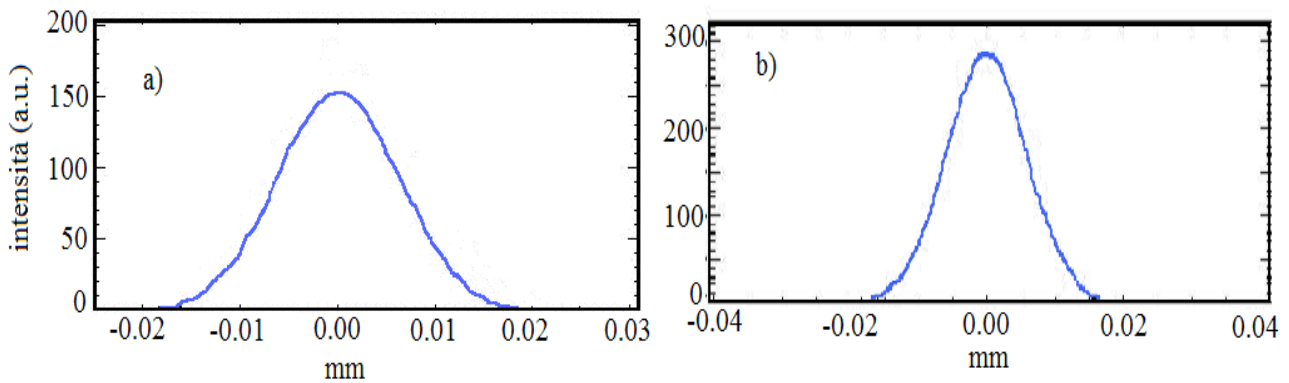


Figura 2.14 : a) Profilo tangenziale dello spot nel fuoco d'uscita. b) Profilo sagittale dello spot nel fuoco d'uscita. L'aberrazione del terzo ordine è stata completamente rimossa in entrambe le direzioni.

Si è verificata, quindi, una demagnificazione di circa un fattore 10: la sorgente ha una FWHM di $120\ \mu\text{m}$, il fuoco d'uscita ha una FWHM minore di $15\ \mu\text{m}$.

In seguito sono state fatte altre simulazioni di ray tracing in cui sono stati variati i parametri della sorgente. L'obiettivo di queste ulteriori simulazioni è quello di comprendere più a fondo le proprietà del sistema ottico. Di seguito si può osservare l'evoluzione delle immagini nel fuoco intermedio e nel fuoco d'uscita al variare dei parametri della sorgente. L'esito di queste simulazioni verrà poi confrontato nell'ultimo capitolo con i risultati sperimentali.

Selezionando una sorgente con una FWHM uguale a $50\ \mu\text{m}$ e una divergenza angolare conica pari a $1\ \text{mrad}$ si ottengono le seguenti immagini: la fig. 2.15 è relativa alla sorgente, mentre le fig. 2.16 e 2.17 sono relative al fuoco intermedio e a quello d'uscita:

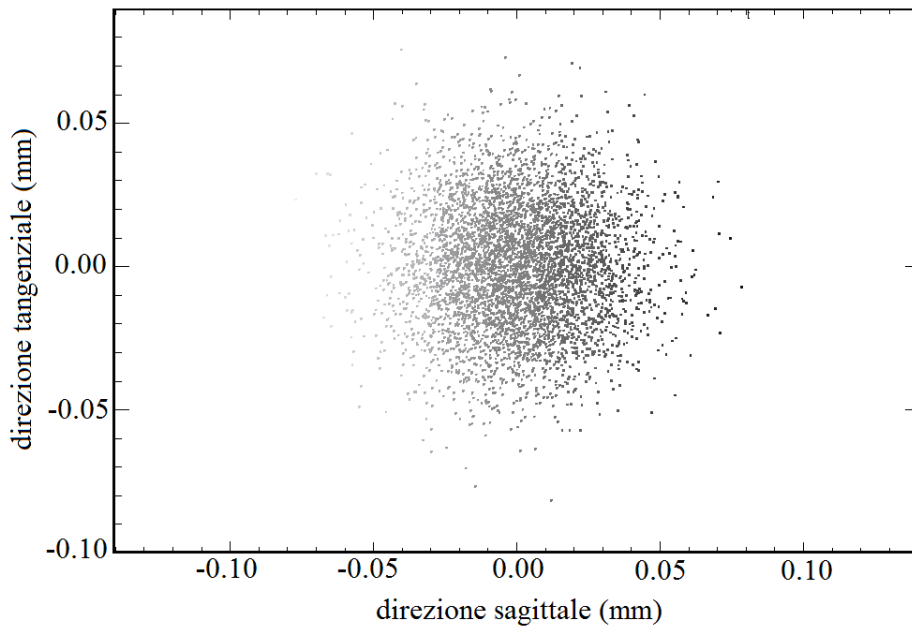


Figura 2.15 : Immagine della sorgente del sistema ottico ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micron e una divergenza angolare pari a 1 mrad.

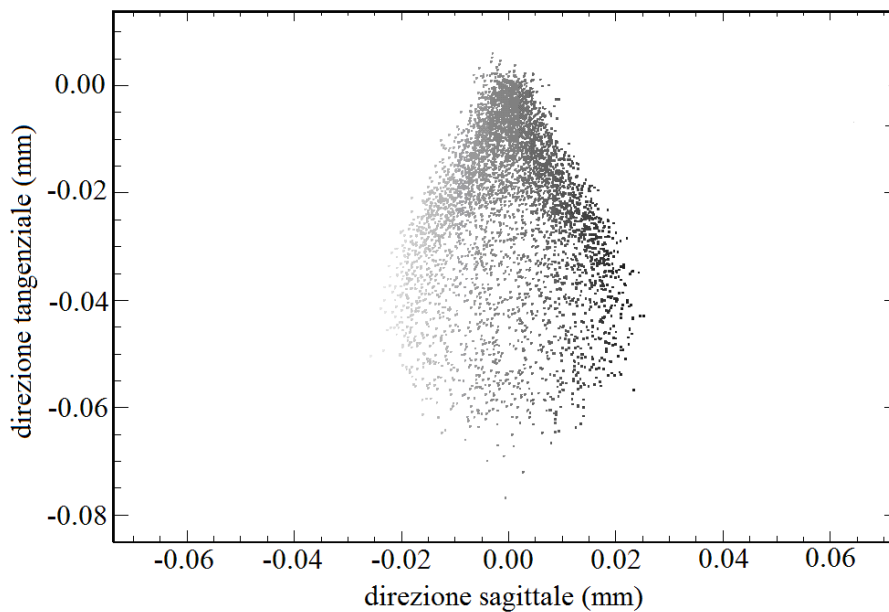


Figura 2.16 : Immagine in corrispondenza del fuoco intermedio ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micron e una divergenza angolare pari a 1 mrad.

Lo spot ha una FWHM uguale a 19 μm in direzione sagittale e una FWHM uguale a 20 μm in direzione tangenziale.

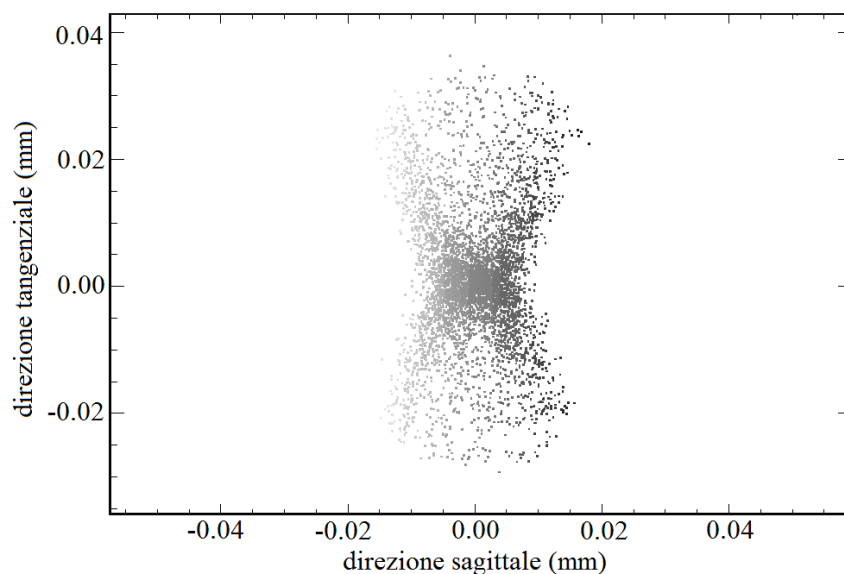


Figura 2.17 : Immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micrometri e una divergenza angolare pari a 1 mrad.

Lo spot ha una FWHM uguale a 15 μm in direzione sagittale e una FWHM uguale a 8 μm in direzione tangenziale.

È evidente, in questo caso, come il coma in corrispondenza del fuoco intermedio sia più accentuato, dal momento che la sorgente ha una divergenza angolare maggiore. Inoltre, l'immagine nel fuoco d'uscita mostra delle aberrazioni residue. Quindi, perché il sistema ottico dei tre specchi toroidali preservi le sue proprietà di focalizzazione compensando allo stesso tempo le aberrazioni, occorre utilizzarlo con sorgenti che abbiano una divergenza angolare minore di 1 mrad e una FWHM spaziale non inferiore a 100 μm .

Selezionando una sorgente con un'estensione spaziale ancora pari a 50 μm e una divergenza uguale a 2 mrad si ottengono le seguenti immagini: le fig. 2.18 e 2.19 sono relative al fuoco intermedio e a quello d'uscita.

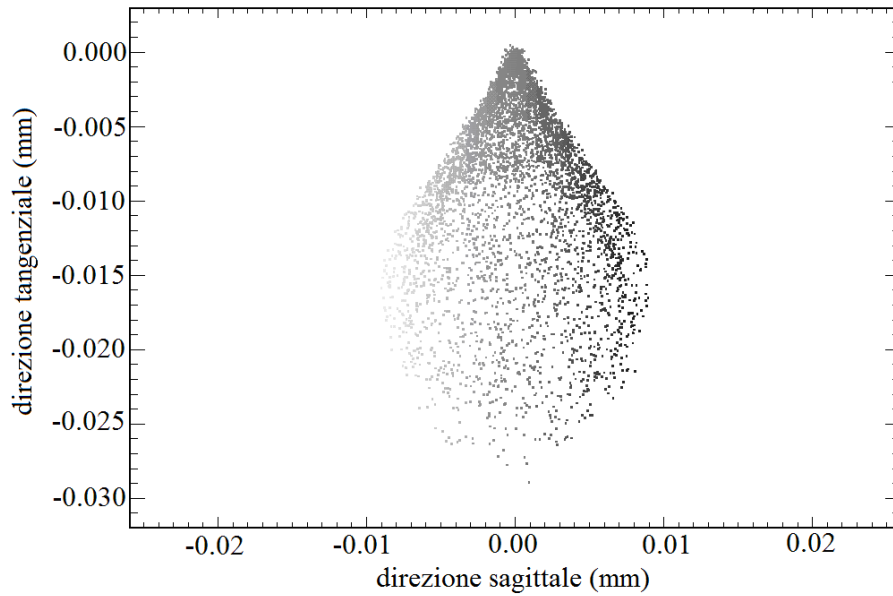


Figura 2.18 : Immagine in corrispondenza del fuoco intermedio ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micron e una divergenza angolare pari a 2 mrad.

Lo spot ha una FWHM uguale a 28 μm in direzione sagittale. In questo caso l'immagine nel fuoco intermedio mostra un coma più accentuato.

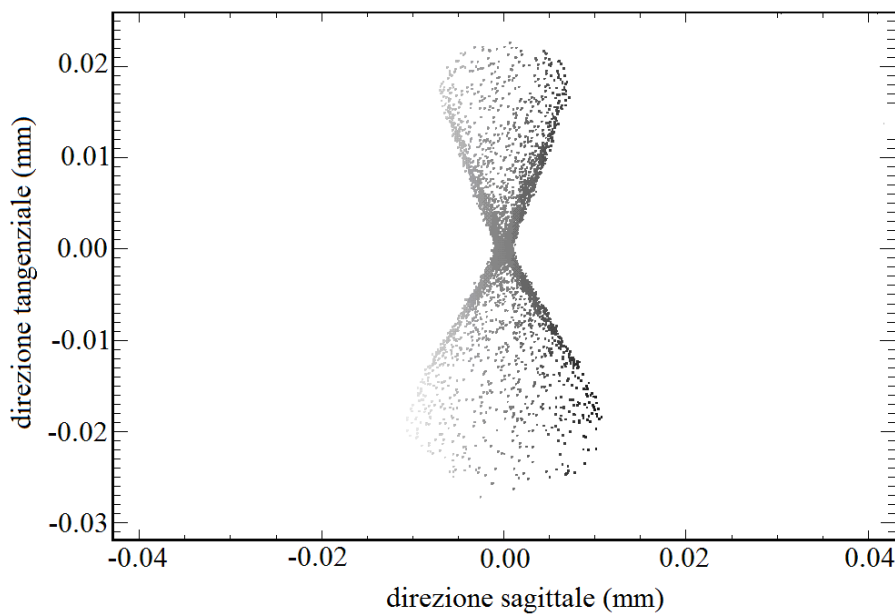


Figura 2.19 : Immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micron e una divergenza angolare pari a 2 mrad.

Lo spot ha una FWHM uguale a 31 μm in direzione sagittale e una FWHM uguale a 27 μm in direzione tangenziale. Nel fuoco d'uscita il coma presente nell'immagine del fuoco intermedio, è stato ampiamente compensato.

Selezionando una sorgente con la stessa estensione spaziale e una divergenza pari a 3 mrad si ottengono le seguenti immagini: le fig. 2.20 e 2.21 sono ancora relative al fuoco intermedio ed al fuoco d'uscita.

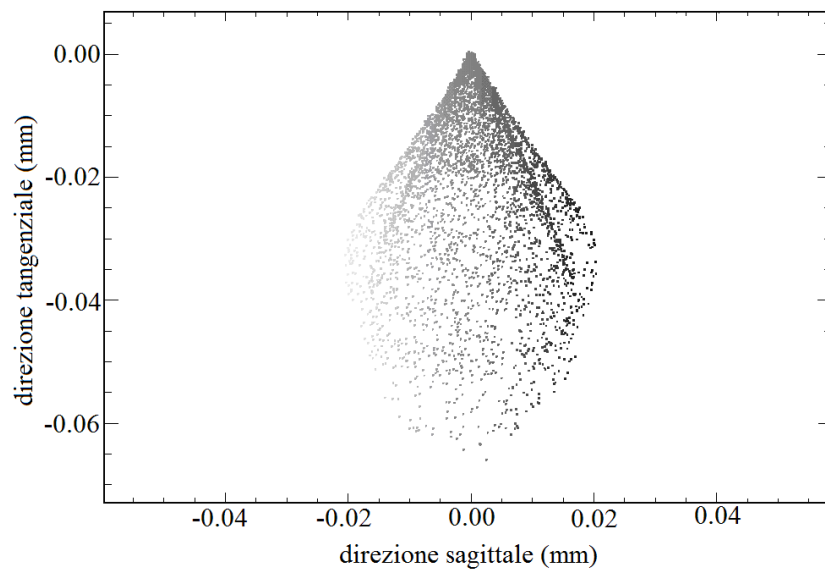


Figura 2.20 : Immagine in corrispondenza del fuoco intermedio ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micron e una divergenza angolare pari a 3 mrad.

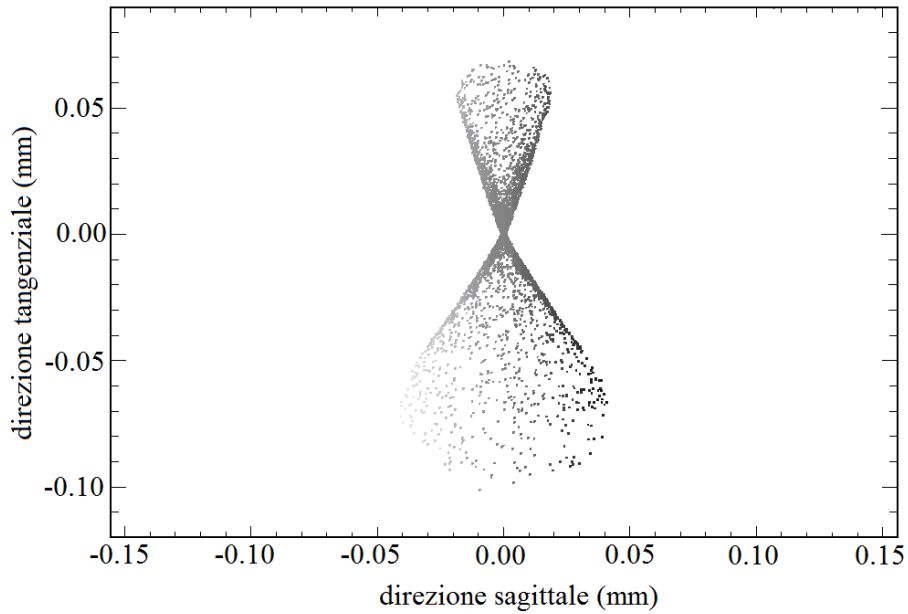


Figura 2.21 : Immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micron e una divergenza angolare pari a 3 mrad.

Lo spot ha una FWHM uguale a 43 μm in direzione sagittale.

Infine selezionando una sorgente con la stessa estensione spaziale e una divergenza pari a 4 mrad si ottengono le seguenti immagini: le fig. 2.22 e 2.23 sono ancora relative al fuoco intermedio e al fuoco d'uscita:

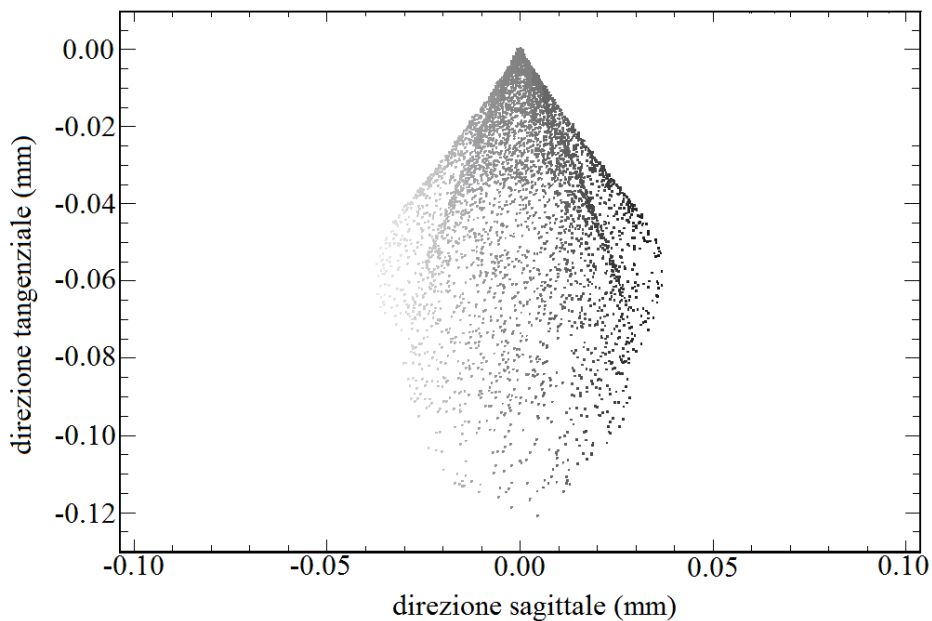


Figura 2.22 : Immagine in corrispondenza del fuoco intermedio ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micron e una divergenza angolare pari a 4 mrad.

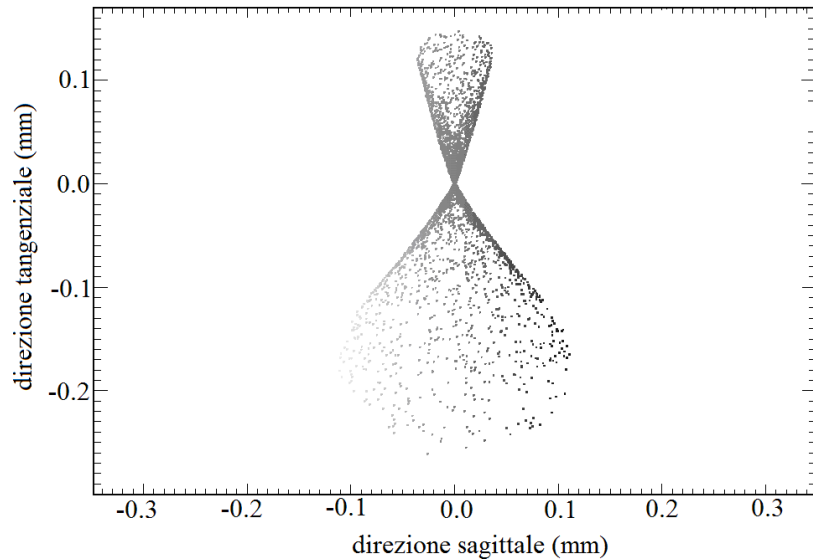


Figura 2.23 : Immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micron e una divergenza angolare pari a 4 mrad.

Le immagini mostrano chiaramente come all'aumentare della divergenza angolare della sorgente, a parità di estensione spaziale, le proprietà di focalizzazione del sistema ottico vengano meno, in quanto aumenta l'effetto delle aberrazioni.

In queste simulazioni di ray-tracing è completamente trascurato l'effetto della diffrazione. Le immagini presentate considerano il solo effetto delle aberrazioni del sistema ottico.

2.2.1 CONFRONTO TRA LA CONFIGURAZIONE A Z E LA CONFIGURAZIONE A C

Sono state fatte ulteriori simulazioni con il software XOP in cui il sistema ottico è stato progettato con una configurazione geometrica a C. In questa configurazione il secondo ed il terzo specchio toroidale deflettono i raggi incidenti nella stessa direzione nel piano tangenziale. Nella fig. 2.24 si può vedere la geometria della configurazione a C in scala logaritmica:

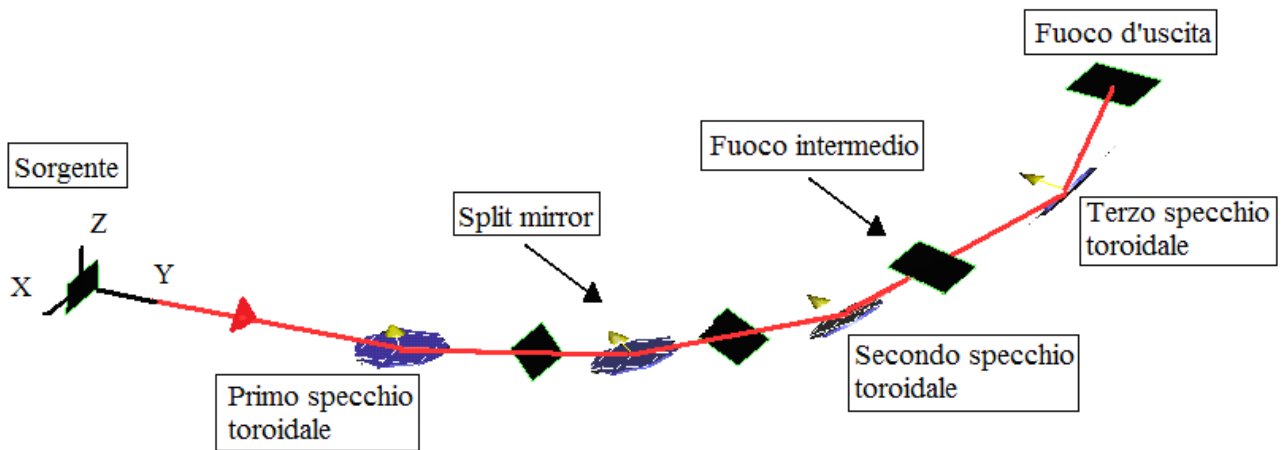


Figura 2.24 : Sistema ottico per il microfocusing con configurazione geometrica a C visualizzato in scala logaritmica.

Impostando per la sorgente gli stessi parametri ($120 \mu\text{m}$ di FWHM, 0.8 mrad di divergenza), si ottiene la seguente simulazione per il fuoco d'uscita:

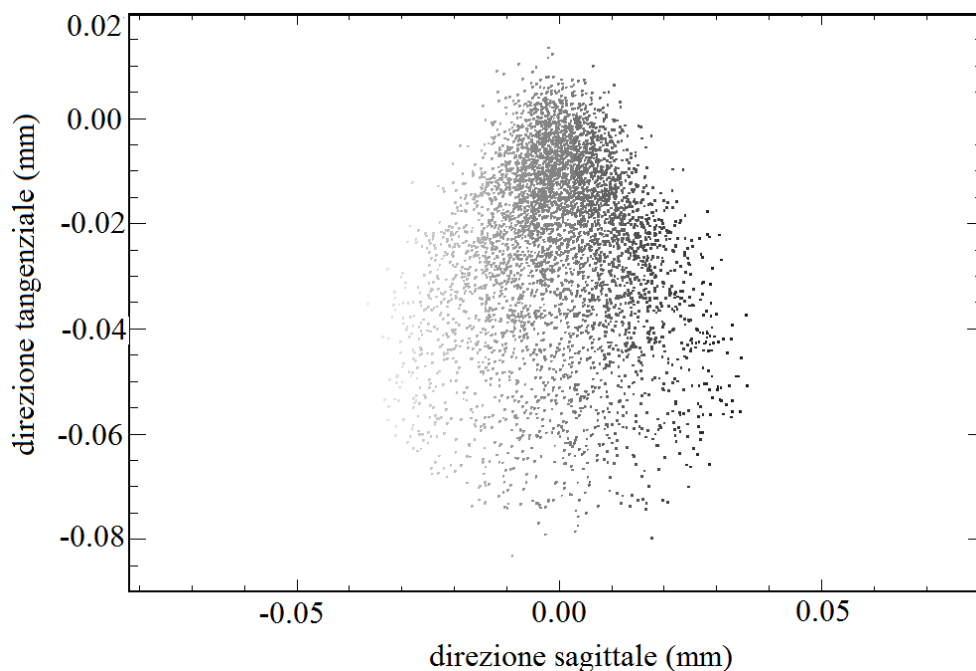


Figura 2.25 : Immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a $120 \mu\text{m}$ e una divergenza angolare pari a 0.8 mrad .

Lo spot ha una FWHM uguale a $23 \mu\text{m}$ in direzione sagittale e una FWHM uguale a $28 \mu\text{m}$ in direzione tangenziale.

Come si vede, nella configurazione a C del sistema ottico per la micro-focalizzazione, in cui il secondo ed il terzo specchio toroidale sono posizionati in una geometria a U, non c'è una

compensazione del coma all'uscita del sistema. Quindi il secondo ed il terzo specchio devono essere usati necessariamente in una geometria a Z.

Scegliendo una sorgente con distribuzione spaziale gaussiana con FWHM uguale a $50 \mu m$ e divergenza angolare uguale a 2 mrad, si ottiene nel fuoco d'uscita:

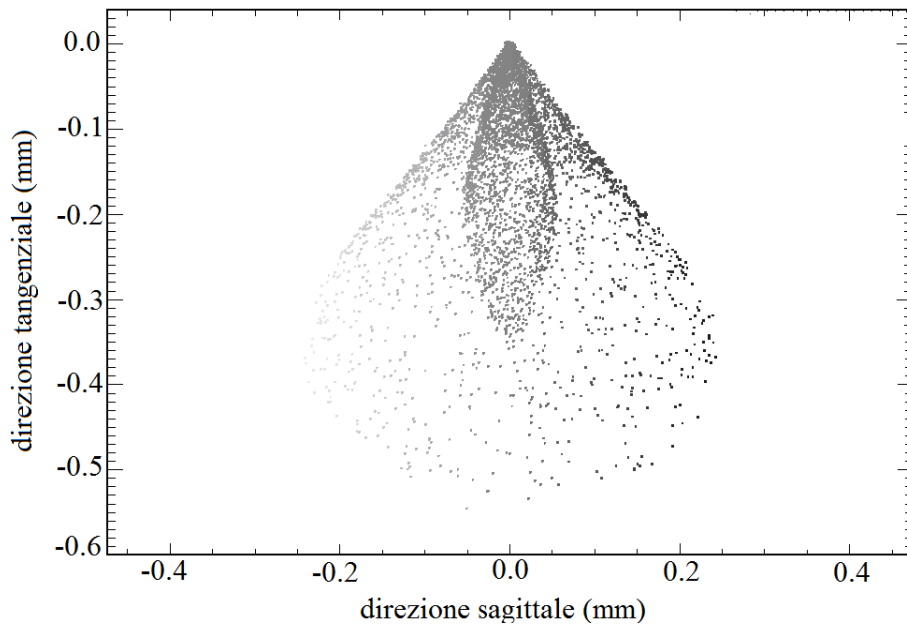


Figura 2.26 : Immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micron e una divergenza angolare pari a 2 mrad.

Selezionando una sorgente con la stessa distribuzione spaziale, ma con divergenza angolare pari a 3 mrad e a 4 mrad, si ottengono le due seguenti simulazioni:

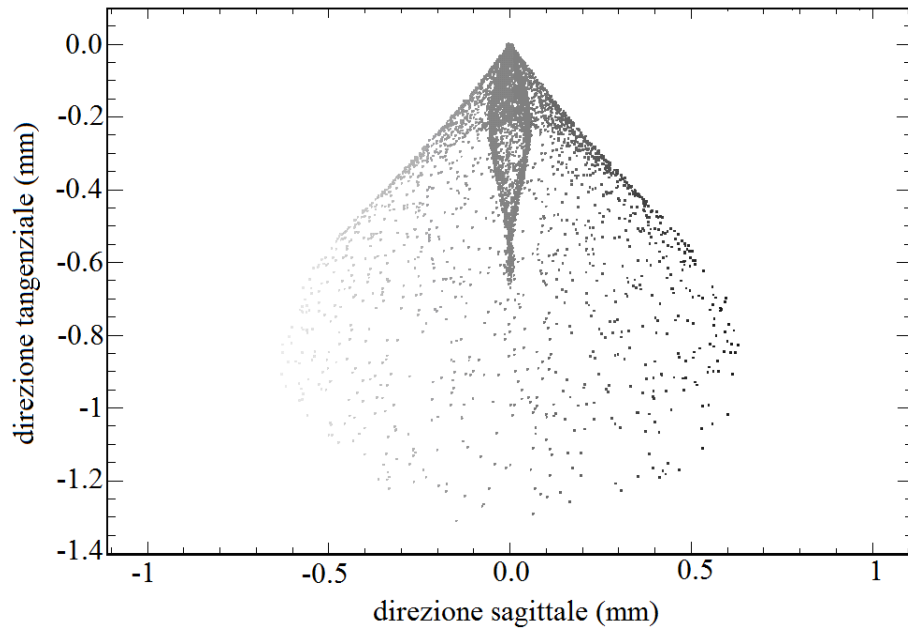


Figura 2.27 : Immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micron e una divergenza angolare pari a 3 mrad.

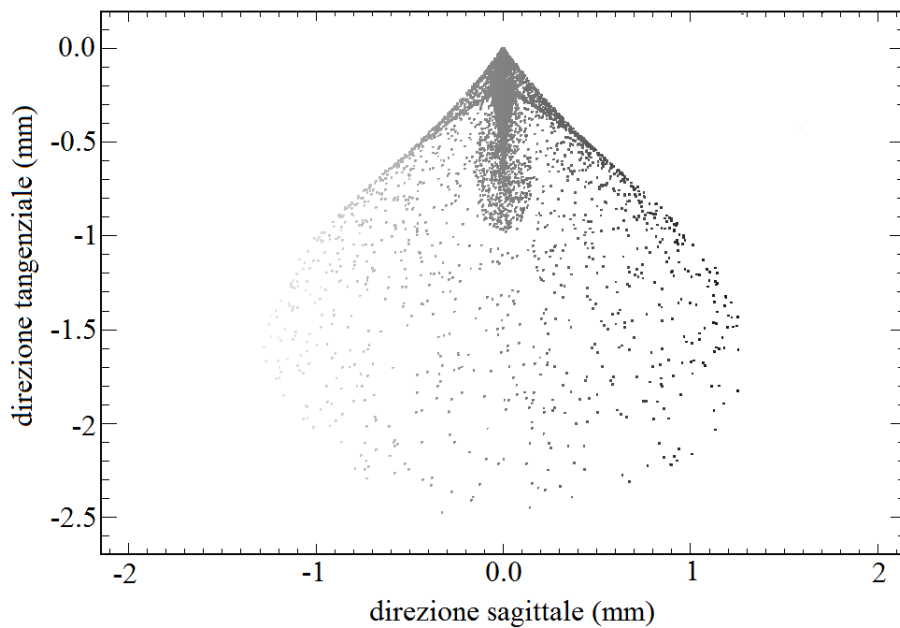


Figura 2.28 : Immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita ottenuta con il software di ray-tracing XOP. La sorgente ha una FWHM uguale a 50 micron e una divergenza angolare pari a 4 mrad.

In tutti e quattro i casi, come si è già detto, non c'è una compensazione del coma.

Dalle immagini si nota il progressivo accentuarsi delle aberrazioni, dovuto al fatto che la divergenza angolare della sorgente aumenta da 1 mrad fino a 4 mrad.

2.2.2 SETUP SPERIMENTALE PER IL LA MICRO-FOCALIZZAZIONE

In fig. 2.29 si può vedere la disposizione delle camere di generazione, di divisione e di focalizzazione della linea XUV-XUV:

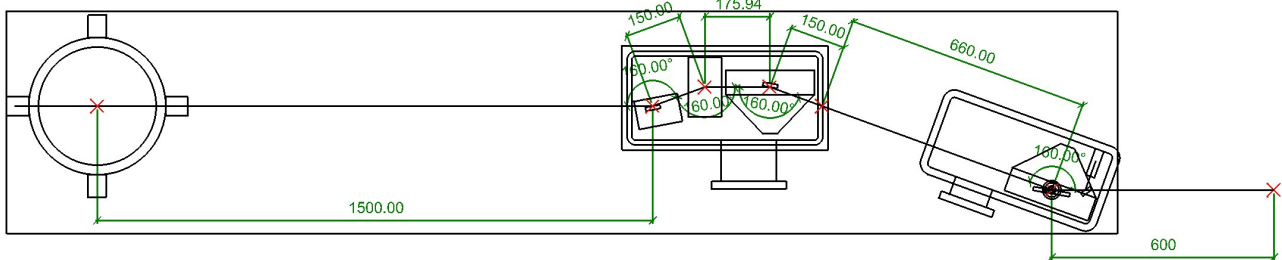


Figura 2.29 : Schema della camera di generazione, della camera di divisione e della camera di focalizzazione. Sono mostrate le dimensioni dei bracci d'uscita e d'ingresso dei vari elementi del sistema ottico per la micro-focalizzazione.

Nella camera di divisione saranno posti i primi due specchi toroidali, tra i quali sarà sistemato il separatore di fascio. Nella camera di focalizzazione verrà posizionato il terzo specchio toroidale.

I tre specchi toroidali sono montati su tre stage con assi motorizzati che permettono movimenti di traslazione e di rotazione. Le tre stage sono state progettate per esperimenti in UHV, ma in questo caso la sperimentazione è stata fatta in aria.

La prima stage ha cinque assi motorizzati, tre traslazionali e due rotazionali. Questa stage ha un range di variazione massimo di 5mm per l'asse X e di 3mm per gli assi Y e Z; il range di variazione massimo per gli assi rotazionali è di 8 gradi per R_x e di 10 gradi per R_y . La risoluzione degli assi traslazionali X, Y e Z è inferiore a 30 nm, mentre quella degli assi rotazionali è inferiore a 0.7 μrad .

La seconda e la terza stage hanno entrambe sei assi motorizzati, tre traslazionali e tre rotazionali. Il range di variazione massimo degli assi traslazionali è uguale a 5 mm per gli assi X, Y e 3.5 mm per l'asse Z, mentre il range di variazione massimo per tutti e tre gli assi rotazionali è pari a 5 gradi. La risoluzione degli assi traslazionali è uguale a 2.5 μm , mentre quella degli assi rotazionali è pari a 0.03 gradi. Per quanto riguarda i range di variazione massimi degli assi motorizzati, bisogna

precisare che questi valori valgono per il singolo asse nel caso in cui tutti gli altri assi si trovino esattamente nella posizione zero, cioè nella posizione centrale del range di variazione.

In totale ci sono 17 assi motorizzati, sia traslazionali che rotazionali, corrispondenti a ben 17 gradi di libertà per il sistema ottico dei tre specchi toroidali.

Infine, una telecamera viene utilizzata come detector in output al sistema ottico. Il singolo pixel della telecamera ha dimensioni pari a $10\ \mu\text{m} * 10\ \mu\text{m}$. La telecamera è stata progettata per avere un'elevata sensibilità nell'estremo ultravioletto, ma in questo caso è stata usata per rilevare radiazione nel visibile. La CCD ha dimensioni $2\text{cm} * 0.8\text{cm}$, anche se nelle ottimizzazioni sarà usata solo una porzione di quest'area. La telecamera è stata utilizzata con tempi di integrazione di 500 ms: in questo modo è stato possibile ottenere immagini dello spot del laser più intense del rumore termico della telecamera stessa.

Il fascio laser viene riflesso dai tre specchi toroidali, dopodiché viene catturato dalla telecamera. I 17 assi motorizzati hanno un range di variazione molto limitato (centinaia di micron e centinaia di microradianti), in quanto il fascio laser deve, in ogni caso, incidere sui tre specchi per poi essere rilevato dalla telecamera; infatti, anche ampliando di poco il dominio di variazione degli assi motorizzati, il fascio laser potrebbe facilmente uscire fuori dall'area della CCD. Come si è detto, l'area totale della CCD è pari a $2\text{cm} * 0.8\text{cm}$, ma negli esperimenti, per ragioni varie, si può decidere di ridurre quest'area, riducendo di conseguenza la superficie del piano immagine in cui è possibile trovare lo spot del fascio laser. Inoltre, occorre aggiungere che la riduzione dell'area attiva della CCD si ripercuote sul range di variazione degli assi motorizzati, di fatto riducendolo.

2. DIVISORE DI FASCIO

Come già anticipato, nel progetto del sistema ottico con XOP è stato inserito un ulteriore componente tra il primo ed il secondo toroidale per tenere conto del separatore di fascio che sarà

usato nella linea XUV-XUV. Questo dispositivo è un separatore di fascio costituito da due specchi piani affiancati, traslati l'uno rispetto all'altro. La fig. 2.31 mostra il funzionamento del dispositivo:

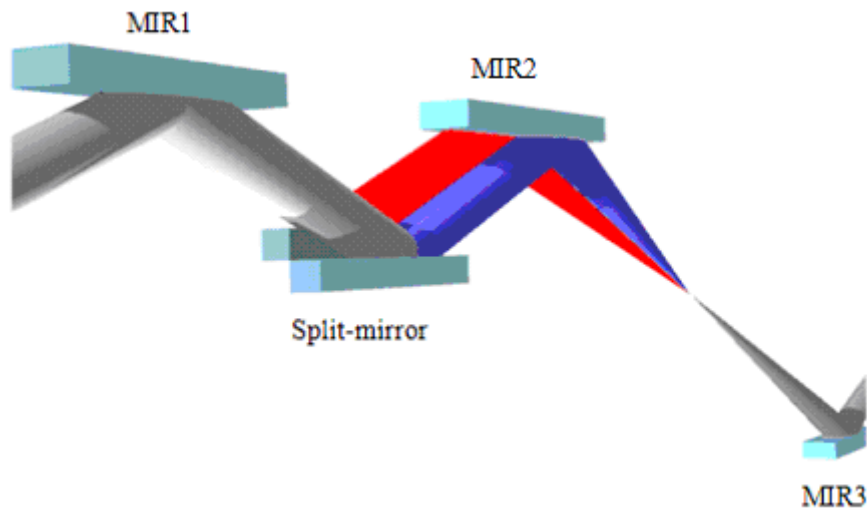


Figura 2.30 : Sezione della linea XUV-XUV comprendente lo split mirror che divide il fascio incidente in due repliche ritardate temporalmente, evidenziate in rosso e in blu (fig. tratta da [13]).

La separazione spaziale del fascio avviene facendo incidere quest'ultimo in corrispondenza dell'area di contatto tra i due specchi piani; in questo modo vengono riflesse due repliche del campo incidente, ritardate temporalmente. Uno dei due specchi piani viene montato su una stage traslazionale mossa da un attuttore piezoelettrico, stabilizzato in anello chiuso da un sensore di posizione. Quindi, applicando una differenza di potenziale all'attuttore, è possibile modificare la posizione relativa dei due specchi piani e quindi il ritardo tra le due repliche del fascio incidente.

3. OTTIMIZZAZIONE CON ALGORITMI GENETICI

In questo capitolo viene illustrato un algoritmo genetico per l'ottimizzazione e per il controllo della strumentazione, sviluppato usando Labview. Il software permette di allineare i tre specchi toroidali in modo fine e di ottenere un'immagine della sorgente focalizzata. Viene mostrata l'utilità e l'efficacia dell'approccio genetico per la risoluzione di problemi di ottimizzazione. Vengono esposti i principi generali dell'ottimizzazione basata sull'uso di algoritmi genetici.

3.1 ALGORITMI GENETICI

Un algoritmo genetico è un metodo di ricerca globale e stocastico basato sul principio darwiniano dell'evoluzione biologica. In biologia, con il termine evoluzione, s'intende il progressivo ed ininterrotto accumularsi di modificazioni successive, fino a manifestare in un arco di tempo sufficientemente ampio significativi cambiamenti negli organismi viventi.

Gli algoritmi genetici operano su una popolazione di potenziali soluzioni applicando il principio della sopravvivenza del più adatto, così come avviene in natura, evolvendo verso una soluzione che si avvicina il più possibile alla reale soluzione del problema. Gli algoritmi genetici sono applicabili alla risoluzione di un'ampia varietà di problemi di ottimizzazione non indicati per gli algoritmi classici, compresi quelli in cui la funzione obiettivo è fortemente non lineare.

L'algoritmo genetico è un algoritmo di analisi dei dati ed è molto usato nel campo dell'intelligenza artificiale. Un tipico algoritmo genetico seleziona un certo numero di possibili individui che formano una popolazione. Ogni individuo della popolazione ha delle caratteristiche (di solito una stringa, definita gene) che lo contraddistinguono dagli altri. L'insieme di queste caratteristiche combinate, assegna ad ogni individuo un valore di bontà, che viene detto funzione di fitness. Lo scopo dell'algoritmo genetico è generare popolazioni sempre migliori, fino ad individuare le caratteristiche che formano l'individuo con la miglior funzione di fitness. In un certo senso, la

funzione di fitness, indica l'adattabilità all'ambiente: gli individui che meglio si adattano hanno più probabilità di riprodursi o di sopravvivere in modo da trasmettere i propri geni alle generazioni future. Quindi un algoritmo genetico è una procedura di ricerca iterativa il cui scopo è l'ottimizzazione della funzione di fitness. Partendo da una popolazione iniziale, un algoritmo genetico produce nuove generazioni che contengono (di solito) individui migliori delle precedenti: l'algoritmo evolve verso l'ottimo globale della funzione di fitness. In realtà non è garantito che un algoritmo genetico trovi una soluzione ottima globale; esso è in grado di trovare soluzioni buone in tempi ragionevoli. La successione di iterazioni evolverà verso una soluzione ottimale (locale o globale) del problema. Finita la fase di evoluzione, sono tenute solo le soluzioni che meglio risolvono il problema. Non vi è modo di decidere a priori se l'algoritmo genetico sarà effettivamente in grado di trovare una soluzione accettabile. Gli algoritmi genetici si usano per problemi di ottimizzazione per i quali non si conoscono algoritmi di complessità lineare o polinomiale.

Gli algoritmi genetici si sono rivelati molto efficaci nella soluzione dei problemi di ottimizzazione e di controllo della strumentazione. Le soluzioni migliori sono quelle che danno un risultato che sia il più possibile vicino all'obiettivo dell'ottimizzazione. Ciò significa che le soluzioni sono valutate esclusivamente dal risultato che hanno prodotto in quanto non si ha nessuna informazione a priori su di esse. In altre parole le soluzioni migliori sono quelle che danno un errore minimo, dove l'errore è lo scostamento del risultato dall'obiettivo dell'ottimizzazione.

Questo tipo di approccio alla soluzione di un problema si utilizza nel caso in cui ci sia un legame non lineare tra le variabili e i dati del problema. In questo caso è necessario fare una ricerca diretta nello spazio delle variabili e scegliere il set migliore che descrive in modo ragionevole i dati del problema. Spesso campionare tutti i possibili set di variabili è impossibile anche nel caso in cui il dominio di variazione delle variabili sia limitato oppure discretizzato. Per questa ragione si usano metodi approssimati che vanno a campionare lo spazio delle variabili in cerca della migliore soluzione globale. Lo spazio delle variabili è legato allo spazio degli errori, il quale è molto utile

per capire quanto determinate regioni nello spazio delle variabili , sono utili per la ricerca della soluzione migliore. Di conseguenza, un algoritmo genetico è fondamentalmente un metodo euristico che valuta l'errore associato ad un set di variabili nello spazio di ricerca in modo da indirizzare la ricerca stessa verso un minimo globale, cioè verso la soluzione con l'errore minimo. Inoltre la ricerca viene effettuata cercando di evitare i minimi locali, cioè soluzioni che non sono minimi globali, ma che sono circondate da soluzioni peggiori nello spazio delle variabili circostante. Per evitare i minimi locali è necessario fare un adeguato campionamento dello spazio delle variabili; allo stesso tempo, se una soluzione resta intrappolata in un minimo locale, è necessario uscirne in cerca di soluzioni migliori.

Gli algoritmi genetici seguono diverse strategie per fare una ricerca efficace nello spazio delle variabili, conservando la capacità di saltare fuori da un minimo locale e di campionare aree diverse nello spazio di ricerca. Seguendo l'analogia con la biologia, le soluzioni rappresentano gli individui che possono cambiare, evolvendosi, in modo tale da adattarsi il più possibile all'ambiente, cioè all'obiettivo fissato.

Un algoritmo genetico segue questo schema per la ricerca di una soluzione:

1. genera una popolazione iniziale di possibili soluzioni;
2. ripete il punto precedente per un certo numero di generazioni, oppure finché non viene trovata una soluzione;
3. seleziona quegli individui (soluzioni) destinati alla riproduzione;
4. dagli individui precedentemente selezionati, crea una nuova generazione di possibili soluzioni, usando gli operatori genetici di 'ricombinazione' e di 'mutazione'.

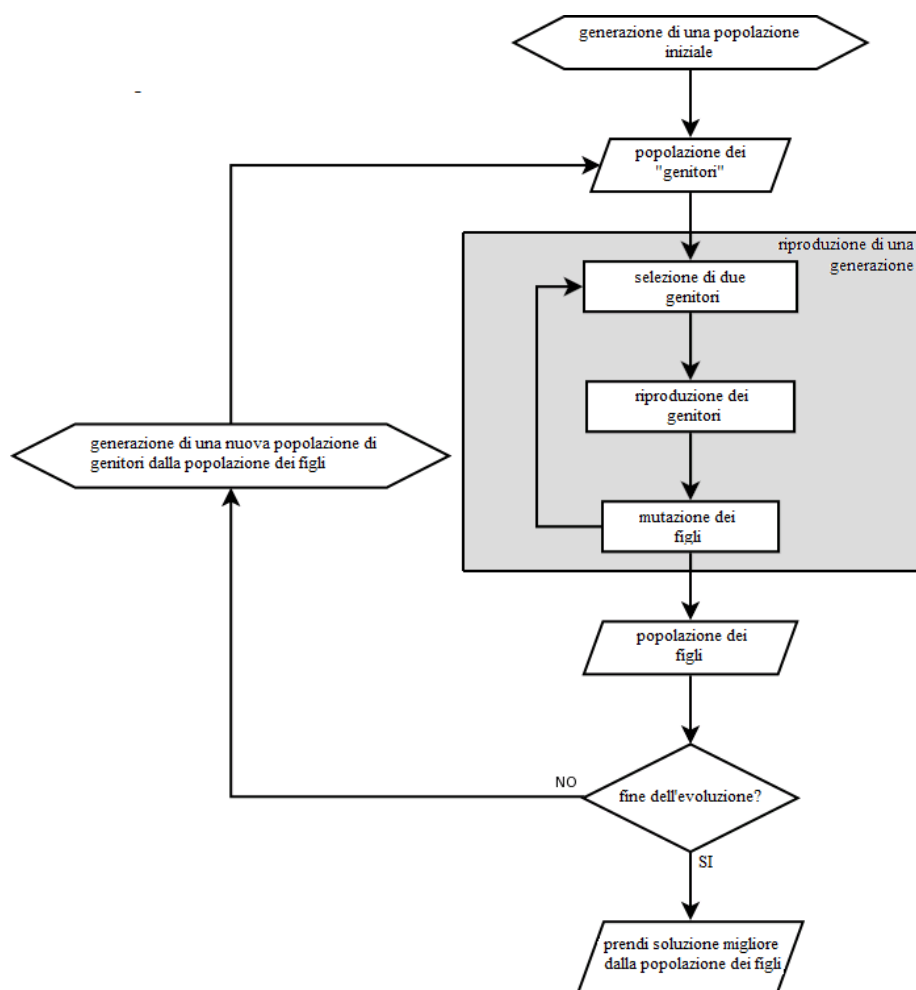


Figura 3.1 : Schema di un algoritmo genetico.

Entrando più nel dettaglio di questo metodo di ricerca, è necessario introdurre e definire alcuni termini fondamentali:

- un individuo è semplicemente una soluzione proposta. Ogni individuo ha un genotipo e un fenotipo. Il genotipo di un individuo è il set di valori da ottimizzare. Il fenotipo di un individuo è la soluzione stessa così come è usata nel modello.
- Il cromosoma è la struttura dei dati del genotipo che può essere codificata in diversi modi (codifica binaria oppure a valori reali). I cromosomi sono quindi stringhe di numeri di lunghezza fissa. Per esempio, in un algoritmo a valori reali il cromosoma è rappresentato da un vettore di numeri reali in virgola mobile. Ogni cromosoma inoltre rappresenta solo un punto nello spazio di ricerca.

3.1.1 METODO EURISTICO

Il metodo euristico intrinseco di un algoritmo genetico è la selezione naturale. Un algoritmo genetico lavora per selezionare progressivamente le soluzioni migliori combinando e modificando queste stesse soluzioni che sono migliori rispetto a quelle selezionate precedentemente. In altre parole, dalla popolazione di potenziali soluzioni in una generazione, l'algoritmo genetico seleziona gli individui che si sono adattati meglio di altri e allo stesso tempo va a campionare aree disparate nello spazio di ricerca. Combina diversi aspetti degli individui selezionati oppure li modifica in modo tale che le soluzioni della generazione successiva potrebbero essere più vicine alla soluzione ottima. Per facilitare la ricerca, l'algoritmo genetico mantiene una storia del processo di evoluzione.

La fig. 3.2 mostra lo schema iterativo seguito dall'ottimizzazione genetica:

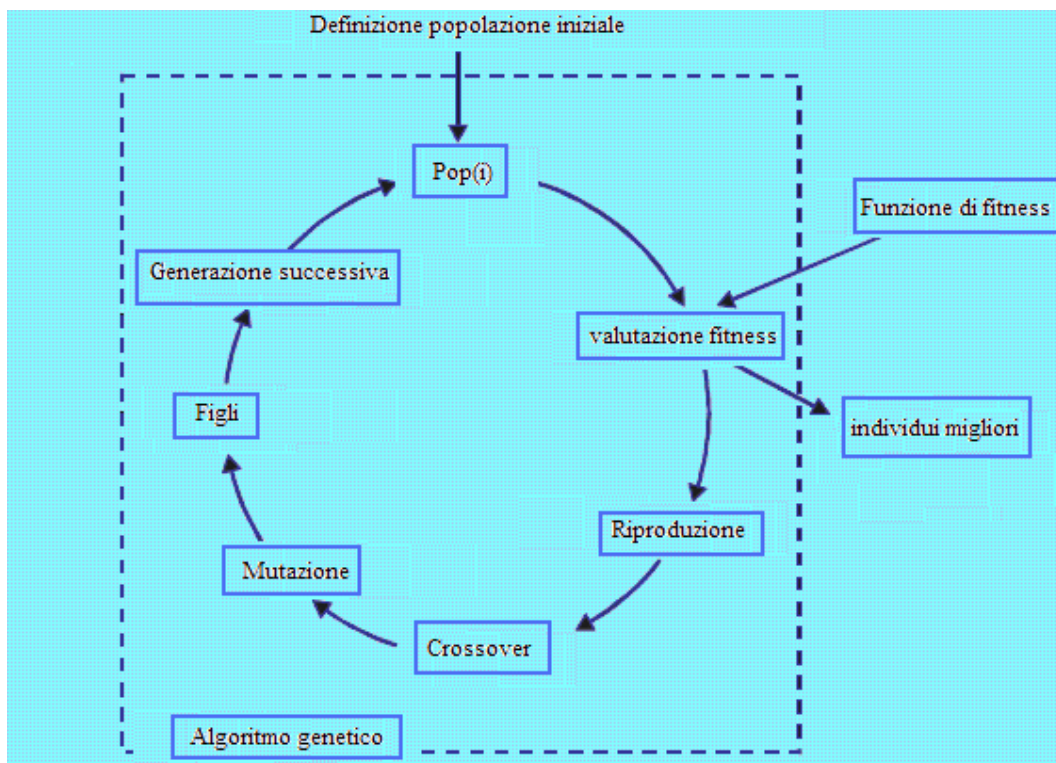


Figura 3.2 : Schema di un ciclo genetico.

Analizzando dettagliatamente lo schema precedente, la ricerca inizia con una popolazione casuale di individui, ognuno dei quali ha un unico genotipo. Vale a dire che ogni elemento del genotipo viene assegnato casualmente. Quindi la ricerca inizia con un campione delle soluzioni nello spazio delle variabili. Un algoritmo genetico inizia con un numero predefinito di individui all'interno della

popolazione, che resta costante per tutta la ricerca. Maggiore è il numero degli individui, maggiore è la probabilità di trovare il minimo globale. La seconda fase della ricerca consiste nel valutare l'errore delle soluzioni della generazione corrente, cosa che si traduce nella valutazione del valore di fitness delle singole soluzioni. Ciò porta ad individuare l'individuo, oppure gli individui migliori della generazione presente. La terza fase consiste nel selezionare gli individui che sono più adattati, in quanto hanno un vantaggio riproduttivo sui loro contemporanei. Un algoritmo genetico massimizza la fitness delle soluzioni, cioè ne minimizza l'errore. La fitness di un individuo viene quantificata dalla funzione di fitness che è una misura di quanto un fenotipo è vicino alla soluzione ottima. La funzione di fitness è nota anche come funzione obiettivo. Nel caso più semplice essa associa ad una potenziale soluzione un valore scalare che va a quantificare la vicinanza tra le variabili correnti e le variabili obiettivo. Per costruire una funzione di fitness robusta è necessaria una comprensione dei dati e delle variabili del modello. Quindi, il ruolo della funzione di fitness è quello di fornire una misura dell'adattamento di ogni individuo, cioè una misura di quanto un individuo si è adattato all'ambiente, ossia una misura di quanto una soluzione si avvicina all'obiettivo globale nella generazione corrente rispetto agli altri individui.

L'obiettivo dell'algoritmo è trovare un minimo globale (che implicitamente significa evitare i minimi locali). Le soluzioni migliori sono quelle che minimizzano l'errore e che si ottengono campionando aree diverse ed estese nello spazio delle variabili.

La quarta fase consiste nella creazione di una nuova generazione di soluzioni dalle soluzioni migliori della generazione attuale attraverso gli operatori genetici. Questo processo di riproduzione può consistere nel semplice clonare una soluzione, nel ricombinare due soluzioni oppure nel modificare direttamente una soluzione. La strategia di creazione della nuova generazione consta di diversi metodi per scegliere quali soluzioni clonare, quali soluzioni far emergere rispetto alle altre e quali modificare. Questi metodi sono l'elitismo, la mutazione e la ricombinazione.

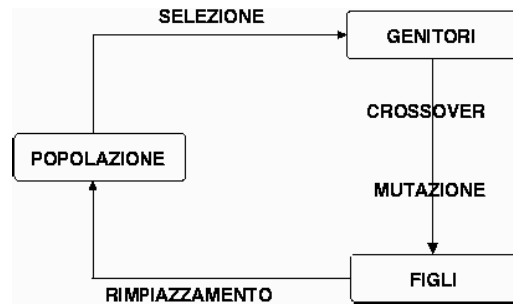


Figura 3.3 : Ciclo di generazione di una nuova popolazione.

L'elitismo è un metodo usato per scegliere gli individui con la maggior fitness, cioè quelli che saranno clonati direttamente nella generazione successiva. Cioè queste 'soluzioni d'elite' passano da una generazione alla successiva senza essere modificate e in aggiunta la loro fitness non deve essere ricalcolata, cosa che si traduce in un risparmio di risorse computazionali. Il vantaggio intrinseco di avere un'elite di individui in ogni generazione è quello di garantire che la progenie nella nuova generazione avrà un errore piccolo al massimo quanto quello della generazione precedente. In altre parole, l'elitismo garantisce che nel corso delle generazioni non ci sarà mai un peggioramento delle soluzioni rispetto a quelle delle generazioni anteriori. Tuttavia non c'è alcuna garanzia che le operazioni genetiche sulle soluzioni correnti, che vanno a creare nuove soluzioni, diano una riduzione dell'errore. Infatti, come avviene per la stessa selezione naturale in biologia, sono rare le modifiche che risultano in un errore minore, quindi senza la costituzione di un'elite, è possibile creare una nuova generazione che ha individui meno adattati rispetto ai padri. Di conseguenza, costituendo un'elite di soluzioni migliori in ogni generazione, si garantisce che questi individui privilegiati, perché più adattati, rimarranno nella popolazione delle potenziali soluzioni.

La ricombinazione consiste nel fondere due soluzioni della generazione precedente in modo da generare nuove soluzioni che costituiscono la discendenza nella nuova generazione. Nel caso più semplice, la selezione delle coppie di genitori, può essere totalmente casuale e può includere anche l'elite. Oppure si possono introdurre delle regole nella selezione, per esempio si può prevenire "l'incesto" evitando l'unione di individui simili nello spazio di ricerca in modo da preservare la

diversità. Allo stesso tempo, se gli individui sono troppo diversi l'uno dall'altro, i loro figli potrebbero essere soluzioni inadeguate. Quindi è spesso opportuno usare diverse strategie di riproduzione. Il metodo di ricombinazione più usato è il crossover genetico in cui i discendenti ricevono una parte dei geni da un genitore, la parte rimanente dall'altro genitore. Da ogni unione risultano due figli, l'uno il complementare dell'altro dal punto di vista genetico. Ciò mantiene costante il numero di individui di generazione in generazione.

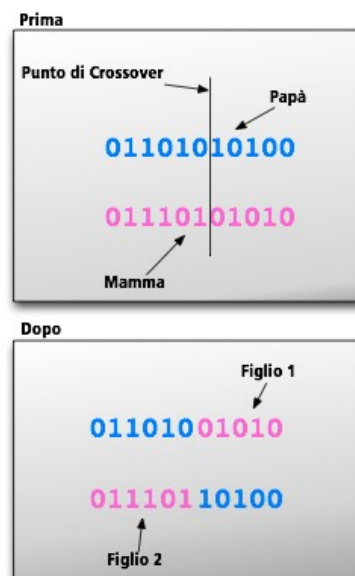


Figura 3.4 : Crossover ad un punto.

Comunemente negli algoritmi genetici si usa il “one-point crossover” dove ogni figlio è costituito dalla porzione di sinistra dei geni di uno dei genitori e dalla porzione di destra dei geni dell'altro genitore. Il punto di crossover, che è scelto casualmente, va a sezionare il genotipo di un individuo. Allo stesso modo, si può usare il “two-point crossover”, in cui il genotipo di un individuo viene tagliato in due punti.

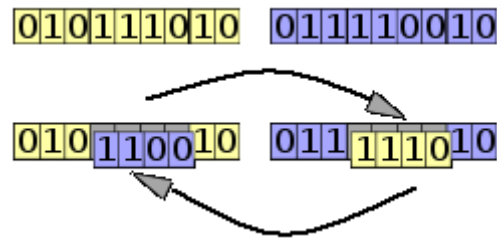


Figura 3.5 : Crossover a due punti.

Il crossover è un operatore genetico molto importante in quanto serve a trovare i geni migliori che contribuiscono alla fitness di ognuno dei genitori e a introdurli nel genotipo dei figli. Questo meccanismo si basa sull'assunzione che i due genitori contribuiscono diversamente all'errore, cioè che alcuni geni riducono l'errore in un genitore, mentre gli altri sono probabilmente i maggiori responsabili della riduzione dell'errore nell'altro genitore. Tipicamente il crossover non viene applicato a tutte le coppie di genitori, vale a dire che esso viene applicato con una probabilità definita in base alle esigenze di ottimizzazione. Questo deriva dal fatto che, in ogni caso, da una generazione all'altra, i genitori possono essere clonati e possono essere sottoposti a mutazione per introdurre variabilità nei figli.

La mutazione consiste nella modifica di un gene. È usata per introdurre una variazione nei figli rispetto ai padri in modo che l'algoritmo possa campionare aree diverse e possa fuoriuscire da eventuali minimi locali. L'operatore di mutazione più semplice è quello uniforme in cui ogni gene ha la stessa probabilità, molto bassa (in genere intorno all'1 %) di variare ad ogni generazione. Oppure è possibile variare nel corso delle generazioni il tasso di mutazione in un certo range, in generale non molto ampio. La strategia di mutazione viene spesso usata in combinazione con una strategia di sostituzione in cui si sceglie di rimuovere del tutto un individuo dalla popolazione; questo avviene quando una mutazione dà luogo ad una discendenza con una fitness minore di quella dei genitori, quindi, in questo caso i genitori vengono sostituiti dai figli solo quando essi producono una prole più adattata.

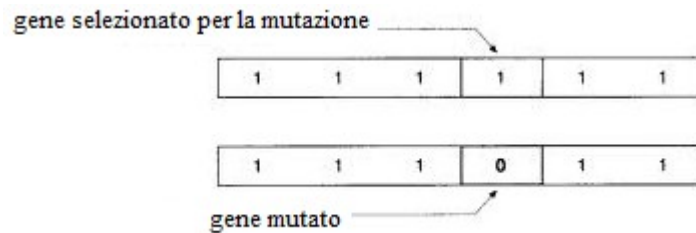


Figura 3.6 : Mutazione di un singolo gene di un individuo.

3.2 SOFTWARE PER L'OTTIMIZZAZIONE

Il software che realizza l'ottimizzazione è stato realizzato nel linguaggio di programmazione grafica di Labview. Esso esegue un algoritmo genetico. Schematicamente sono eseguite nell'ordine diverse operazioni:

- Viene creata una popolazione di soluzioni casuali e successivamente ogni soluzione della popolazione viene classificata;
- Inizia la fase iterativa dell'algoritmo in cui viene creata la prima generazione di potenziali soluzioni, applicando gli operatori genetici alla popolazione generata casualmente;
- La nuova popolazione viene classificata, ovvero viene valutata la fitness di ogni soluzione; la fitness migliore viene confrontata con la fitness obiettivo: se l'obiettivo è stato raggiunto o superato, il ciclo di iterazioni si interrompe, altrimenti inizia un'altra iterazione, corrispondente ad un'altra generazione;
- Nella nuova iterazione vengono ancora applicati gli operatori genetici alla generazione corrente per creare la generazione futura di soluzioni.

L'algoritmo presenta diversi parametri fondamentali da fissare prima dell'ottimizzazione.

Questi sono:

1. la dimensione della popolazione: La dimensione della popolazione è il numero di soluzioni, ovvero di individui che costituiscono la popolazione; questo valore resta costante per tutte le generazioni.

2. il numero di generazioni. Il numero di generazioni è il numero massimo di iterazioni che l'algoritmo eseguirà. Se una soluzione soddisfacente viene trovata prima del completamento di tutte le iterazioni, allora l'ottimizzazione si ferma comunque.
3. la probabilità di crossover: La probabilità di crossover è la probabilità con cui l'operatore genetico di 'crossover' può essere applicato alla coppia di individui che viene selezionata nel processo di riproduzione.
4. la scelta del piano di riproduzione della popolazione. Ci sono tre possibili scelte per il piano di riproduzione. La prima possibilità è un piano di riproduzione che prevede la completa sostituzione dell'intera popolazione di soluzioni ad ogni generazione. La seconda possibilità è un piano di riproduzione stazionario il quale prevede che ogni nuova soluzione vada a sostituire una vecchia soluzione in maniera del tutto casuale. Infine la terza possibilità è costituita da un piano di riproduzione, ancora stazionario, che però, a differenza del precedente, prevede che ogni nuovo individuo vada a sostituire l'individuo peggiore della generazione precedente.
5. la definizione della modalità di mutazione. Si può scegliere fra tre modalità di mutazione: mutazione con tasso costante, mutazione con tasso variante con la fitness delle soluzioni, mutazione con tasso variante con i fenotipi delle soluzioni. La prima modalità prevede che il tasso di mutazione resti costante nell'arco di tutte le generazioni. La seconda modalità prevede che nel corso dell'ottimizzazione il tasso di mutazione vari in funzione della fitness delle soluzioni; ciò si traduce in un aumento del tasso di mutazione nel caso in cui la differenza tra le fitness delle soluzioni sia piccola all'interno di una popolazione. Infine la terza ed ultima modalità di mutazione consiste in una variazione del tasso di mutazione determinata dai fenotipi delle soluzioni. Questo significa che il tasso di mutazione aumenta se all'interno di una popolazione i fenotipi delle soluzioni sono poco diversificati, mentre si riduce nel caso contrario. Nel caso di tasso di mutazione variabile, il range

di variazione è definito da appositi parametri che contengono il valore massimo e quello minimo del range di variazione.

6. il parametro “creep mutation”: questo parametro può essere attivato o meno. Attivandolo, il cambiamento degli individui riconducibile alla mutazione avverrà in modo più lento. Al contrario, se viene disattivato, il cambiamento delle soluzioni dovuto alla mutazione sarà più rapido.
7. l’applicazione dell’elitismo
8. la dimensione del fenotipo: rappresenta il numero di variabili che costituiscono una singola soluzione, cioè un singolo individuo. È il numero di gradi di libertà del sistema, poiché la soluzione finale sarà fatta da un numero di variabili uguale alla dimensione del fenotipo.
9. la fitness obiettivo: è il valore minimo di fitness che si vuole ottenere; l’ottimizzazione può considerarsi completata quando una soluzione ha una fitness uguale o maggiore di quella obiettivo.

Nel nostro caso ogni possibile soluzione corrisponde ad un array di dodici valori che rappresentano i comandi da inviare agli assi motorizzati della seconda e della terza stage su cui sono montati il secondo ed il terzo specchio toroidale. Ognuna delle due stage ha 6 assi. Quindi i 12 assi rappresentano i gradi di libertà del sistema, 6 traslazionali e 6 rotazionali. Il fenotipo di ogni soluzione corrisponde al valore numerico stesso dei comandi dei dodici assi motorizzati. L’obiettivo dell’algoritmo è trovare i dodici migliori comandi da inviare agli assi della seconda e della terza stage: questi comandi modificheranno la posizione del secondo e del terzo specchio toroidale in modo tale da produrre la migliore immagine della sorgente nel fuoco d’uscita del sistema ottico.

La prima fase dell’ottimizzazione prevede la generazione di N set di M numeri casuali, dove M è definito dalla dimensione del fenotipo mentre N è definito dalla dimensione della popolazione, ovvero dal numero di individui che costituiscono la popolazione corrente, numero che resterà costante nel corso delle generazioni. La dimensione della popolazione può essere fissata per

rispondere ad esigenze differenti di ottimizzazione: la probabilità di trovare un minimo globale cresce all'aumentare del numero di individui che costituiscono la popolazione, perché in questo modo viene sondato uno spazio di ricerca più ampio. In questo caso la dimensione del fenotipo è pari a 12 in quanto sono 12 i gradi di libertà del sistema che vengono utilizzati. I 5 gradi di libertà corrispondenti ai movimenti assoluti della prima stage su cui si trova il primo specchio toroidale, non vengono utilizzati, quindi durante l'ottimizzazione il primo specchio toroidale ha una posizione fissa. Se si decidesse di usare solo l'ultimo toroidale per l'ottimizzazione, basterebbe assegnare alla dimensione del fenotipo un valore pari a 6 poiché, in questo caso, sarebbero solo 6 i gradi di libertà usati. I numeri casuali generati sono a virgola mobile compresi sempre tra 0 e 1 con 6 cifre significative.

Ogni set di 12 comandi è preso in ingresso dalla funzione di fitness; viene quindi modificata la posizione delle stage e quindi degli specchi toroidali. Dopodiché il fascio laser viene riflesso dai tre specchi e infine incide sulla CCD della telecamera, producendo un'immagine a cui viene attribuito un valore di fitness. In seguito viene fatta una classificazione delle diverse soluzioni, cioè dei diversi array di dodici comandi degli assi delle stage. Questa classificazione consiste nell'ordinare le varie soluzioni sulla base delle fitness associate, quindi sulla base delle immagini da esse prodotte. Gli individui migliori hanno una fitness più elevata. Questa prima popolazione di individui rappresenta l'insieme dei 'padri fondatori' delle generazioni future. A questo punto inizia il vero e proprio ciclo genetico che si ripeterà per un numero di volte uguale al massimo al numero di generazioni impostato tra i parametri iniziali. Ad ogni iterazione (ovvero ad ogni generazione) viene creata una nuova popolazione di soluzioni applicando opportunamente gli operatori genetici alle soluzioni della generazione precedente. Le modalità di generazione della nuova popolazione sono fissate scegliendo un determinato piano di riproduzione tra quelli possibili. Ogni piano di riproduzione ha le sue specificità e risponde ad esigenze diverse di ottimizzazione. Ad esempio, i due piani di riproduzione stazionari garantiscono che l'algoritmo troverà una soluzione al problema, ma con elevata probabilità questa non sarà la soluzione ottima a livello globale, perché la ricerca

tenderà a concentrarsi nel primo minimo locale che viene trovato. Al contrario, il piano di riproduzione che prevede la completa sostituzione di tutta la popolazione ad ogni generazione, assicura una più elevata probabilità che verrà trovata la soluzione ottima a livello globale, perché questo piano di riproduzione estende la ricerca genetica a tutto lo spazio di ricerca ed evita di concentrarla solo in prossimità dei minimi locali.

La creazione della generazione corrente avviene applicando tre diversi operatori genetici alla popolazione della generazione precedente. La creazione della popolazione avviene generando due individui per volta da due genitori diversi, quindi l'intera popolazione viene creata in un numero di iterazioni pari alla metà della numerosità della popolazione. Gli operatori genetici sono :

- l'operatore di selezione
- l'operatore di crossover
- l'operatore di mutazione.

La selezione consiste nel selezionare due individui diversi all'interno della popolazione. La selezione di due individui uguali, vale a dire la selezione dello stesso individuo per due volte di seguito non è permessa: questo fenomeno è definito "incesto" in quanto è come se i genitori, selezionati per la riproduzione, avessero lo stesso patrimonio genetico. Le nuove soluzioni nate dall'incrocio delle soluzioni selezionate vengono in seguito opportunamente codificate. La codifica consiste nell'associare al fenotipo di ogni individuo il corrispondente genotipo. Il fenotipo di una soluzione è un vettore monodimensionale di 12 numeri reali con valore compreso tra 0 e 1. Il genotipo associato invece è un vettore ancora monodimensionale, ma con un numero di elementi uguale al prodotto tra la dimensione del fenotipo e il numero di cifre significative dei numeri reali delle soluzioni, uguale a 6. Ad esempio il numero casuale 0.471685 (che potrebbe essere un comando inviato ad uno degli assi delle stage), ha un genotipo uguale ad un vettore di 6 elementi, ognuno dei quali contiene una delle 6 cifre significative del numero casuale. Quindi, nel nostro caso, se il fenotipo è un vettore di 12 numeri casuali ognuno dei quali con 6 cifre significative, il genotipo associato è un vettore di $12 \cdot 6 = 72$ elementi, ognuno dei quali corrispondente ad una cifra

decimale dei diversi numeri casuali. Questa modalità di codifica delle soluzioni si rivelerà utile in seguito, in quanto gli operatori di crossover e di mutazione agiscono sul genotipo delle soluzioni. Il crossover tra due genotipi diversi può essere applicato con una probabilità che viene impostata tra i parametri iniziali dell'ottimizzazione. Il crossover inoltre può essere ad un punto oppure a due punti. La tipologia di crossover da applicare a due genotipi, viene selezionata casualmente di volta in volta dall'algoritmo stesso.

Infine, ad ogni genotipo viene applicato l'operatore di mutazione ancora con una probabilità fissata tra i parametri iniziali dell'ottimizzazione. Inoltre con il parametro "creep mutation" è possibile scegliere in base alle esigenze, la modalità di ottimizzazione. Se "creep mutation" viene disattivato, la mutazione sarà uniforme. Vale a dire che ogni nucleotide del genotipo, che è un numero compreso tra 0 e 9, può essere sostituito con un altro numero compreso tra 0 e 9 e la probabilità che ha un numero di essere selezionato è uniforme. Se invece viene attivato "creep mutation", semplicemente, la mutazione delle soluzioni avviene più lentamente, in quanto ogni numero compreso tra 0 e 9 (o nucleotide), che costituisce il genotipo può essere sostituito dal valore successivo o da quello precedente. Ad esempio 1 può essere sostituito con 2 oppure con 0, mentre 9 viene sostituito con 8 oppure con 0.

Una volta che alla coppia di genotipi sono stati applicati crossover e mutazione, essi vengono decodificati, cioè ad essi si associano i rispettivi fenotipi, in altre parole vengono trasformati ancora in vettori monodimensionali i cui elementi sono numeri reali con valori compresi tra 0 e 1. Le nuove soluzioni, appena generate, vengono quindi inserite nella popolazione della generazione corrente. Quest'operazione viene iterata per un numero di volte pari alla metà della dimensione della popolazione, in modo tale da rigenerare l'intera popolazione delle soluzioni. A questo punto è necessario precisare che la nuova popolazione può avere individui diversi a seconda del piano di riproduzione scelto. Se è stato scelto un piano di riproduzione stazionario, se le nuove soluzioni sono peggiori di ogni individuo della popolazione precedente, allora esse vengono scartate. Al contrario se ognuna delle nuove soluzioni è migliore di almeno una delle vecchie soluzioni, allora

essa può andare a sostituire la peggiore delle precedenti soluzioni, oppure una delle precedenti soluzioni selezionata casualmente. Queste due differenti modalità di creazione della nuova popolazione dipendono dal tipo di piano di riproduzione: stazionario con sostituzione dell'individuo peggiore oppure stazionario con sostituzione di un individuo selezionato casualmente. Invece se si seleziona la terza tipologia di piano di riproduzione, quella che prevede la completa sostituzione della vecchia popolazione con una nuova, allora i nuovi individui vanno a sostituire i padri anche nel caso in cui essi siano meno adattati di questi ultimi. Ciò significa che la nuova popolazione che viene generata in modo casuale, può essere peggiore di quella precedente. Ad ogni modo, per evitare un peggioramento della fitness nella generazione corrente, è possibile attivare l'elitismo. Infatti, questo parametro, se attivato, garantisce la conservazione di un'élite fatta dagli individui migliori di generazione in generazione. In altre parole, se ogni individuo della popolazione corrente è peggiore di ogni individuo della popolazione precedente, attivando l'elitismo si garantisce che gli individui migliori tra i padri vengano clonati nella popolazione dei figli, garantendo così che il valore più elevato della fitness non peggiori mai con l'avanzare delle generazioni. Compilate queste operazioni, viene selezionato l'individuo migliore della popolazione della generazione corrente e la sua fitness viene confrontata con la fitness minima desiderata. Se la soluzione migliore soddisfa le aspettative, allora l'algoritmo termina, altrimenti esso continua fino al completamento di tutte le generazioni.

Tabella 3.1 : Parametri genetici.

Parametri genetici	
Dimensione del fenotipo	12
Numero delle popolazioni	100
Numero delle generazioni	500
Probabilità di crossover	0.85
Modalità di mutazione	Tasso fisso
	Tasso variante con la fitness
	Tasso variante con i fenotipi
Creep mutation	ON/OFF
Tasso di mutazione	0.005
Tasso di mutazione minimo	0.0005
Tasso di mutazione massimo	0.25
Piano di riproduzione	Sostituzione dell'intera popolazione
	Stazionario con sostituzione casuale di un individuo
	Stazionario con sostituzione dell'individuo peggiore
Elitismo	ON/OFF

3. PROGETTAZIONE DELLA FUNZIONE DI FITNESS

L'obiettivo dell'ottimizzazione è trovare un set di 12 numeri per i quali il valore della funzione obiettivo è il più possibile elevato. Come si è detto in precedenza, i 12 numeri sono i comandi da inviare agli assi motorizzati: in particolare ognuno di essi corrisponde allo spostamento di un singolo asse motorizzato in una data posizione assoluta. Prima dell'ottimizzazione, la posizione iniziale degli assi motorizzati, viene sempre impostata come zero assoluto. Lo spostamento assoluto dell'asse può essere positivo o negativo rispetto alla posizione che viene fissata come zero assoluto.

L'algoritmo genetico genera sempre numeri reali compresi tra 0 e 1 che, dopo opportune elaborazioni, sono convertiti nei comandi da inviare agli assi. La conversione dei numeri casuali in comandi prevede anche che i primi vengano moltiplicati per un opportuno fattore di scala per definire il dominio di variazione degli assi stessi. In altre parole, ammettiamo che per un asse traslazionale venga generato il numero 0.8, a questo valore viene sottratto il valore 0.5, così da avere 0.3 che corrisponde ad uno spostamento dell'asse nella posizione assoluta + 0.3 mm, definita rispetto allo zero di riferimento. Il dominio di variazione degli assi ha un valore di default di 1 mm per le traslazioni e di 1 grado per le rotazioni, quindi le posizioni assolute ai limiti del dominio di variazione sono ± 0.5 mm per le traslazioni e ± 0.5 gradi per le rotazioni. Questi intervalli di variazione possono essere moltiplicati per un opportuno fattore di scala qualora s'intenda ridurre oppure accrescere il dominio di variazione degli assi. La seguente tabella mostra gli intervalli di variazione dei dodici assi usati nelle ottimizzazioni:

Tabella 3.2 : Dominio di variazione delle 12 variabili del problema.

Assi della seconda stage	
X	100 μm
Y	100 μm
Z	100 μm
Rx	100 mdeg
Ry	100 mdeg
Rz	600 mdeg
Assi della terza stage	

X	100 μm
Y	100 μm
Z	100 μm
Rx	100 mdeg
Ry	100 mdeg
Rz	600 mdeg

I 12 comandi quindi rappresentano traslazioni e rotazioni degli specchi toroidali montati sulle stage. Ovviamente, la variazione della posizione degli specchi rispetto alla posizione di riferimento implica una variazione dell'immagine della sorgente in corrispondenza del fuoco d'uscita del sistema ottico. Come si è detto il braccio d'uscita è di 60 cm e la CCD della telecamera è posizionata approssimativamente in corrispondenza del piano d'uscita del sistema ottico. Il compito dell'algoritmo genetico è proprio quello di trovare la migliore immagine della sorgente modificando di volta in volta la posizione assoluta degli assi motorizzati. L'immagine migliore, prodotta da un particolare set di posizioni assolute, deve essere valutata coerentemente con quello che è l'obiettivo del sistema ottico. Come si è detto, il sistema ottico in esame ha l'obiettivo di focalizzare l'impulso laser in ingresso su scala micrometrica. Ne seguono semplici criteri con cui valutare la fitness di un'immagine. Dato che l'algoritmo genetico è a singolo obiettivo, è possibile calcolare la fitness di un'immagine valutandone solo una caratteristica per volta. A questo punto è necessario precisare cosa s'intende per 'immagine' in questo contesto. Il fascio laser in uscita dal sistema ottico viene catturato dalla telecamera i cui pixel hanno dimensione $10\mu m * 10\mu m$, quindi la sorgente laser produce sul piano d'uscita un'immagine data da tutti i pixel della telecamera che vengono illuminati. Di conseguenza, l'immagine non è nient'altro che una matrice bidimensionale di valori corrispondenti ai conteggi rilevati per ogni pixel illuminato. La fitness di un'immagine può quindi definirsi in vario modo una volta individuato l'obiettivo che in questo caso è la micro-focalizzazione. Ad esempio, dal momento che un'immagine sempre più focalizzata presenta valori

sempre maggiori di intensità massima, è possibile usare l'intensità massima stessa per valutare la fitness dell'immagine. In questo caso l'obiettivo dell'ottimizzazione sarà ottenere un'immagine con un valore sempre più elevato di intensità massima. Allo stesso modo, di una certa immagine si può valutare l'area, espressa come numero di pixel che sono investiti dalla radiazione luminosa. In questo caso un'immagine ha una fitness tanto maggiore quanto minore è l'area dello spot. Inoltre, è possibile elaborare ulteriormente l'immagine ottenuta per tenere conto anche della forma dello spot che deve essere circolare. Si possono ideare con facilità semplici stratagemmi nell'elaborazione dell'immagine per attribuire un 'punteggio' all'immagine stessa, cioè per valutarne la fitness. Ad ogni modo, nel nostro caso la fitness delle soluzioni viene valutata calcolando il valore dell'intensità massima delle immagini prodotte. Questa scelta si è mostrata tanto semplice (a livello di programmazione) quanto efficace nella valutazione della bontà delle immagini.

In sintesi, la funzione di fitness progettata fa le seguenti operazioni:

1. elabora e trasforma i numeri casuali in opportuni comandi da inviare alle stage;
2. invia i comandi alle stage ed acquisisce l'immagine;
3. calcola il valore della fitness dell'immagine, che viene restituito in uscita.

Quindi, in breve, un set di 12 numeri produce un'immagine a cui corrisponde un valore numerico che è una valutazione di quanto l'immagine stessa si avvicina all'immagine ideale, obiettivo dell'ottimizzazione. Nell'arco di una generazione, queste operazioni vengono ripetute per ogni individuo appartenente alla popolazione, cioè per ogni set di 12 comandi. In seguito, l'algoritmo genetico stesso fa una classifica degli individui migliori, cioè di quelli più adattati a partire dai semplici valori numerici delle fitness. Ricordando che l'obiettivo finale è massimizzare il valore della fitness, gli individui di ogni popolazione vengono classificati in ordine ascendente sulla base del valore numerico della fitness. In altre parole, ad ogni individuo viene assegnato un punteggio che va da 0 fino al numero totale di individui che costituiscono la popolazione. Quindi lo 0 viene assegnato all'individuo con la fitness minore, cioè al meno adattato, mentre il punteggio massimo viene assegnato all'individuo migliore. La fitness di quest'ultimo viene in seguito confrontata con il

valore che si vorrebbe ottenere; se essa è maggiore o uguale a questo valore, l'obiettivo può considerarsi raggiunto, quindi l'ottimizzazione termina.

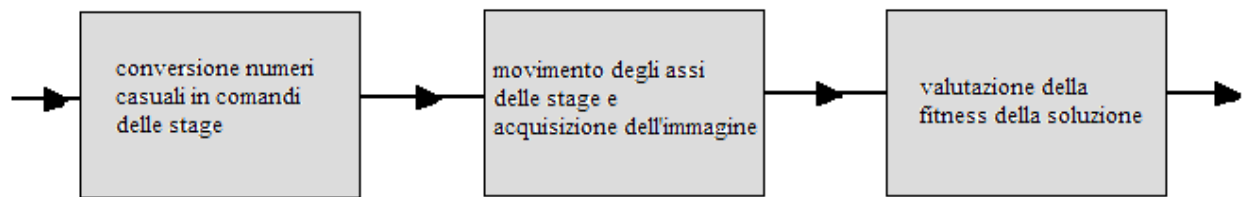


Figura 3.7 : Schema riassuntivo delle operazioni della funzione di fitness.

4. RISULTATI SPERIMENTALI

Questo capitolo si concentra sui risultati sperimentali ottenuti utilizzando un laser ad He-Ne come sorgente del sistema ottico per la micro-focalizzazione della radiazione XUV. Viene quindi fatto un confronto tra le configurazioni a Z e a C del sistema ottico stesso. Infine vengono presentati i risultati delle ottimizzazioni eseguite utilizzando il software che realizza l'algoritmo genetico.

4.1 STUDIO DEL SISTEMA DI MICRO-FOCALIZZAZIONE MEDIANTE UN LASER AD HE-NE

I primi esperimenti con un laser ad He-Ne sono stati fatti con lo scopo di dimostrare l'efficacia del sistema ottico proposto, nel creare un'immagine focalizzata della sorgente. Ovviamente il sistema ottico è stato ideato per la micro-focalizzazione della radiazione XUV, quindi i risultati presentati di seguito, ottenuti usando una sorgente nel visibile, rappresentano uno studio preliminare necessario della linea ottica. Quindi quelli presentati di seguito sono degli esperimenti atti a preparare il terreno ad una futura sperimentazione con una sorgente di radiazione XUV.

Viene fatto un confronto tra la configurazione a C e quella a Z, e si dimostra quindi, anche sperimentalmente, che quest'ultima è la geometria da utilizzare per avere un'immagine focalizzata priva di aberrazioni.

Il braccio d'ingresso del sistema ottico è uguale a 1.5 m, quindi a tale distanza rispetto al primo specchio toroidale viene posta un'apertura circolare con un diametro di 50 μm . Il fascio del laser ad He-Ne incide su tale apertura che quindi costituisce la sorgente del sistema ottico, che può vedersi come una sorgente con distribuzione spaziale gaussiana con una FWHM pari a 50 μm . La divergenza angolare della sorgente invece può essere cambiata variando l'apertura di un'iride posta poco prima del primo specchio toroidale. Il braccio d'uscita del sistema ottico è uguale a 66 cm; quindi a tale distanza dal terzo specchio toroidale, cioè nel fuoco d'uscita, viene posta una telecamera che cattura il fascio riflesso dai tre specchi.

Utilizzando un beam-profiler è stata rilevata la forma del fascio laser in due punti significativi del sistema ottico: il fuoco intermedio, cioè quello tra il secondo ed il terzo specchio toroidale, ed il fuoco all'uscita del sistema ottico.

In fig. 4.1 è mostrato il fuoco intermedio nel caso di sorgente con un'apertura di 2 mrad:

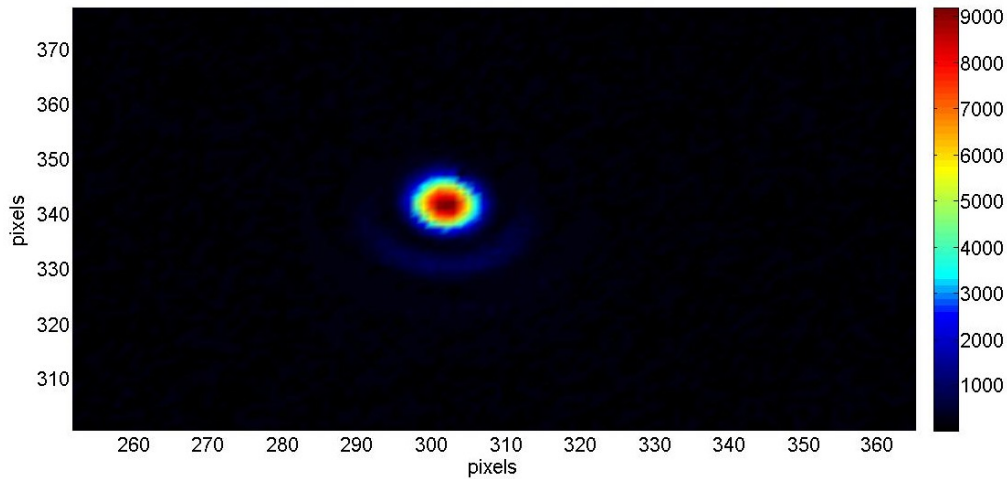


Figura 4.1 : Immagine della sorgente nel punto di fuoco intermedio. La divergenza angolare della sorgente è uguale a 2 mrad.

L'immagine ha una FWHM uguale a $27.7 \mu\text{m}$ nella direzione sagittale (orizzontale). Il coma dell'immagine è invece appena accennato lungo la direzione tangenziale (verticale). La simulazione di ray-tracing, fatta per una sorgente con FWHM di $50 \mu\text{m}$ e divergenza angolare di 2 mrad, aveva prodotto un'immagine nel fuoco intermedio con una FWHM sagittale di $28 \mu\text{m}$.

In fig. 4.2 è mostrato il fuoco intermedio nel caso di sorgente con un'apertura di 3 mrad:

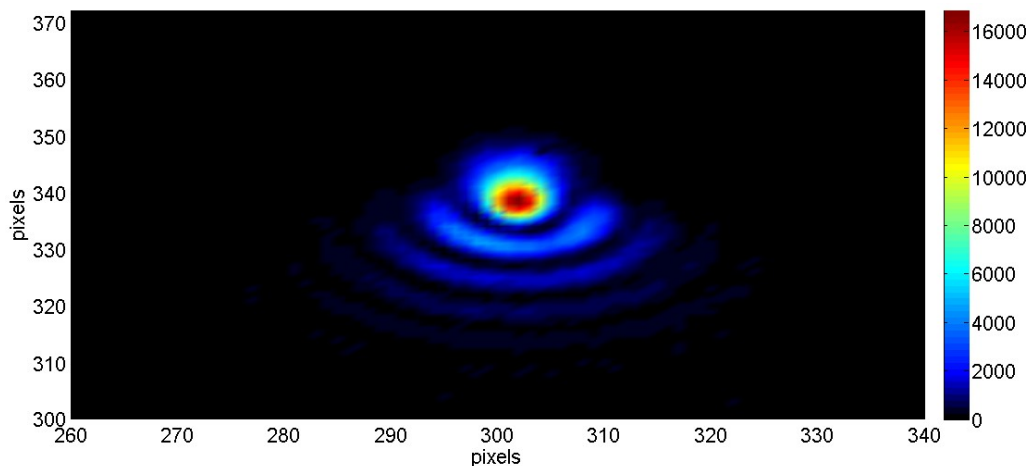


Figura 4.2 : Immagine della sorgente nel punto di fuoco intermedio. La divergenza angolare della sorgente è uguale a 3 mrad.

L'immagine ha una FWHM uguale a $36.1 \mu\text{m}$ nella direzione sagittale (orizzontale). Il coma dell'immagine è molto più accentuato lungo la direzione tangenziale (verticale) rispetto al caso precedente dal momento che è aumentata la divergenza angolare della sorgente.

In fig. 4.3 è mostrato il fuoco intermedio nel caso di sorgente con un'apertura di 4 mrad:

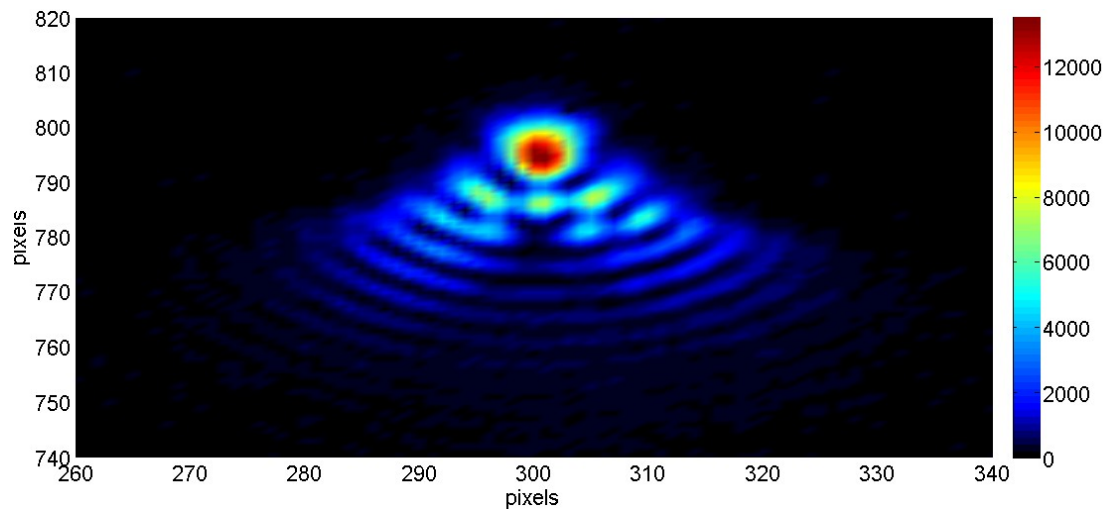


Figura 4.3 : Immagine della sorgente nel punto di fuoco intermedio. La divergenza angolare della sorgente è uguale a 4 mrad.

L'immagine ha una FWHM uguale a $47.5 \mu\text{m}$ in direzione sagittale. Il coma è ulteriormente accentuato. È evidente come al crescere della divergenza angolare della sorgente aumenta anche la FWHM dell'immagine nel fuoco intermedio in quanto si accentua l'effetto delle aberrazioni.

4.1.1 CONFRONTO TRA LE CONFIGURAZIONI A Z E A C

Di seguito viene fatto il confronto tra le immagini nel fuoco d'uscita nelle due configurazioni a Z e a C nei tre diversi casi di sorgente con un'apertura di 2 mrad, 3 mrad e 4 mrad. La FWHM della sorgente è pari a $50 \mu\text{m}$ in tutti e tre i casi.

In fig. 4.4 si vede l'immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita nel caso di configurazione a Z e di sorgente con un'apertura pari a 2 mrad:

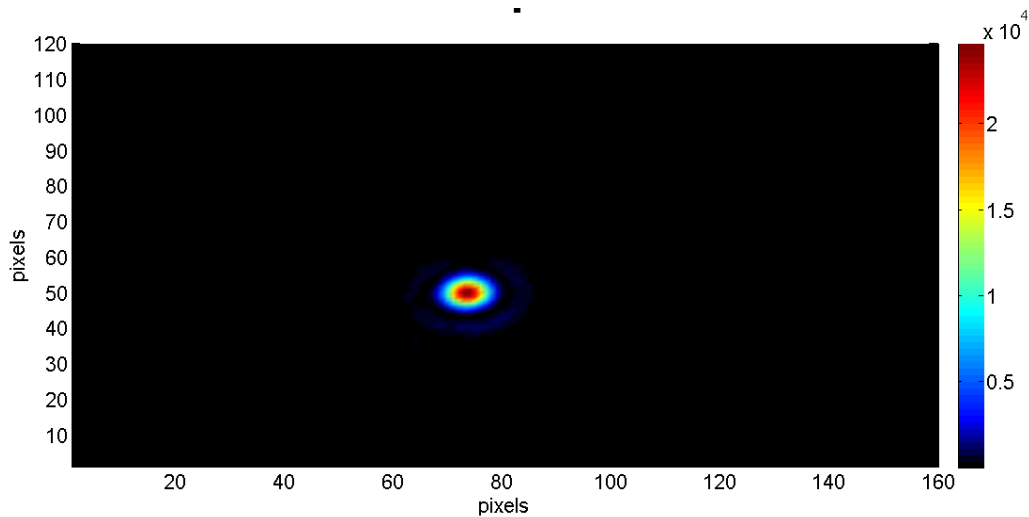


Figura 4.4 : Immagine della sorgente nel fuoco d'uscita per la configurazione a Z. La divergenza angolare della sorgente è uguale a 2 mrad.

L'immagine, priva di coma, ha una FWHM uguale a $28 \mu\text{m}$ in direzione sagittale. La simulazione di ray-tracing, fatta per una sorgente con FWHM di $50 \mu\text{m}$ e divergenza angolare di 2 mrad, aveva prodotto un'immagine nel fuoco d'uscita con una FWHM sagittale di $31 \mu\text{m}$ e una FWHM tangenziale di $27 \mu\text{m}$.

In fig. 4.5 si vede l'immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita nel caso di configurazione a C e di sorgente con un'apertura pari a 2 mrad:

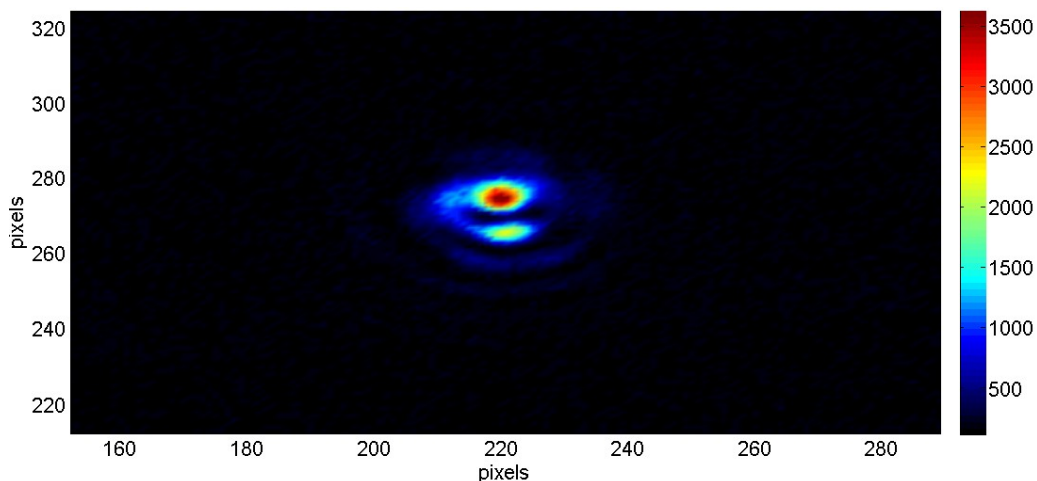


Figura 4.5 : Immagine della sorgente nel fuoco d'uscita per la configurazione a C. La divergenza angolare della sorgente è uguale a 2 mrad.

Quest'immagine mostra come nella configurazione a C, come si è già detto, non c'è una compensazione del coma in corrispondenza del fuoco d'uscita.

In fig. 4.6 si vede l'immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita nel caso di configurazione a Z e di sorgente con un'apertura pari a 3 mrad:

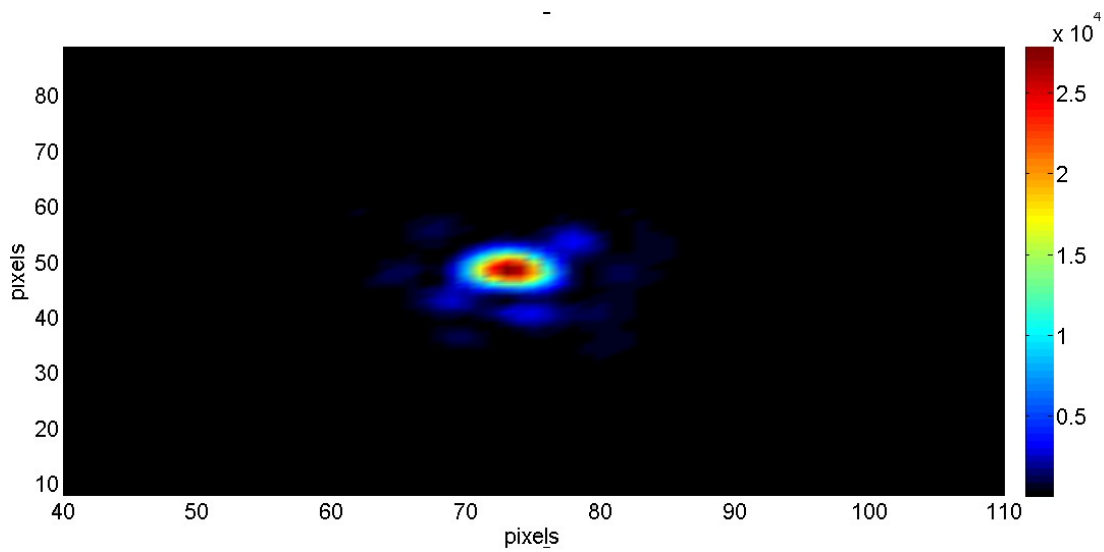


Figura 4.6 : Immagine della sorgente nel fuoco d'uscita per la configurazione a Z. La divergenza angolare della sorgente è uguale a 3 mrad.

La FWHM dell'immagine lungo la direzione sagittale è pari a 24 μm . Nel caso di divergenza angolare uguale a 2 mrad, la FWHM era uguale a 28 μm ; quindi la riduzione della FWHM è riconducibile al fatto che, aumentando l'apertura della sorgente, si riduce l'effetto della diffrazione.

In fig. 4.7 si vede l'immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita nel caso di configurazione a C e di sorgente con un'apertura pari a 3 mrad:

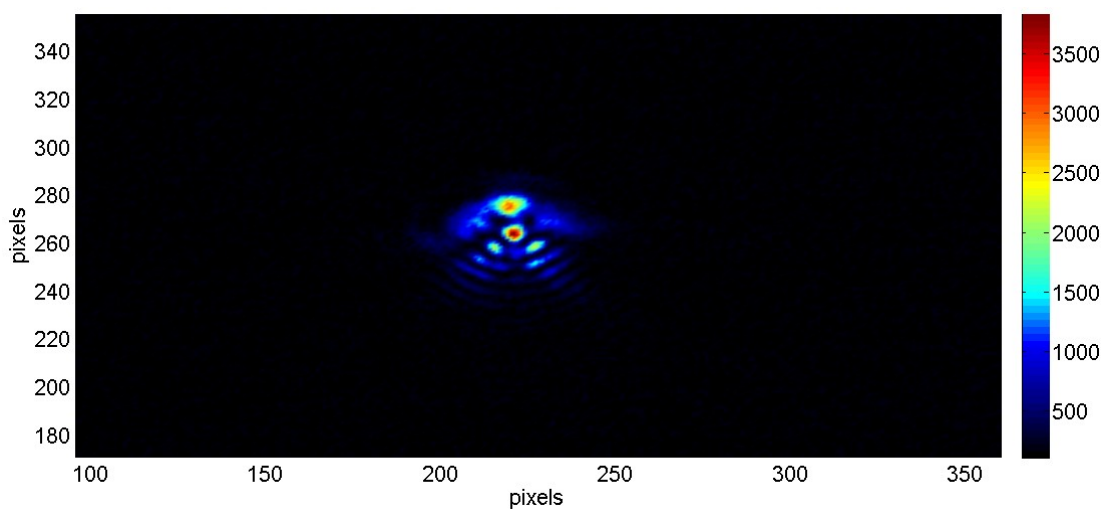


Figura 4.7 : Immagine della sorgente nel fuoco d'uscita per la configurazione a C. La divergenza angolare della sorgente è uguale a 3 mrad.

Il coma dell'immagine è ancora più accentuato in corrispondenza del fuoco d'uscita della configurazione a C, in quanto è aumentata la divergenza angolare della sorgente.

In fig. 4.8 si vede l'immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita nel caso di configurazione a Z e di sorgente con un'apertura pari a 4 mrad:

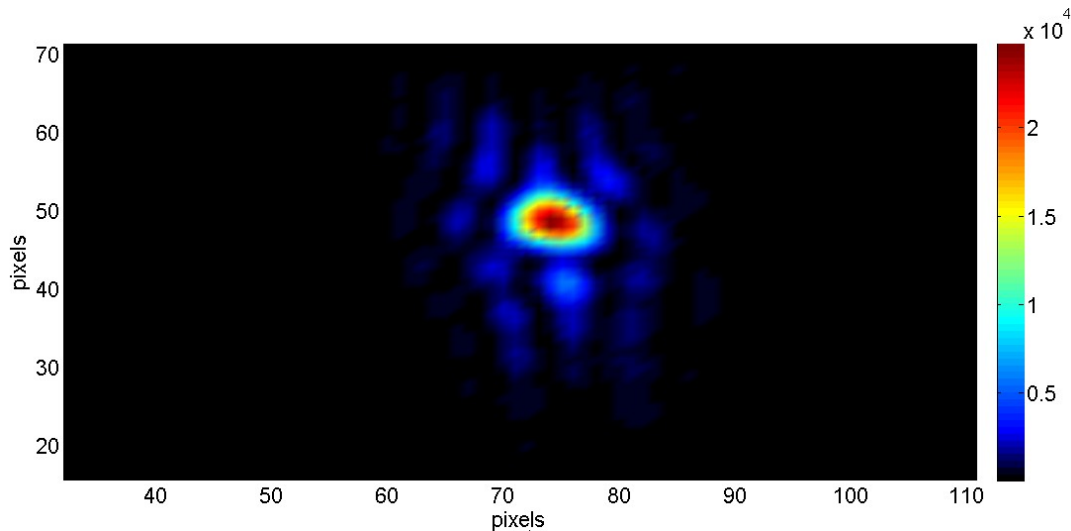


Figura 4.8 : Immagine della sorgente nel fuoco d'uscita per la configurazione a Z. La divergenza angolare della sorgente è uguale a 4 mrad.

La FWHM dell'immagine lungo la direzione sagittale è pari ancora a 24 μm . Nonostante sia aumentata l'apertura della sorgente, la FWHM sagittale dell'immagine nel fuoco di uscita è rimasta uguale a 24 μm ; questo è riconducibile al fatto che gli effetti della diffrazione e delle aberrazioni si compensano.

Infine in fig. 4.9 si vede l'immagine in corrispondenza del fuoco d'uscita nel caso di configurazione a C e di sorgente con un'apertura pari a 4 mrad:

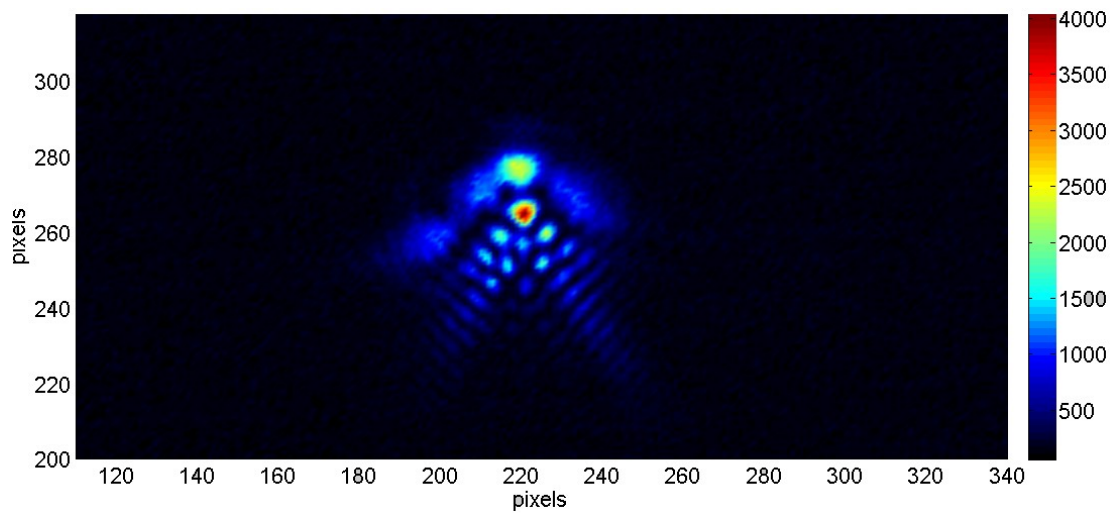


Figura 4.9 : Immagine della sorgente nel fuoco d'uscita per la configurazione a C. La divergenza angolare della sorgente è uguale a 4 mrad.

In fig. 4.10 è mostrata la FWHM del fuoco d'uscita per configurazione a Z nel caso di sorgente con apertura di 2 mrad:

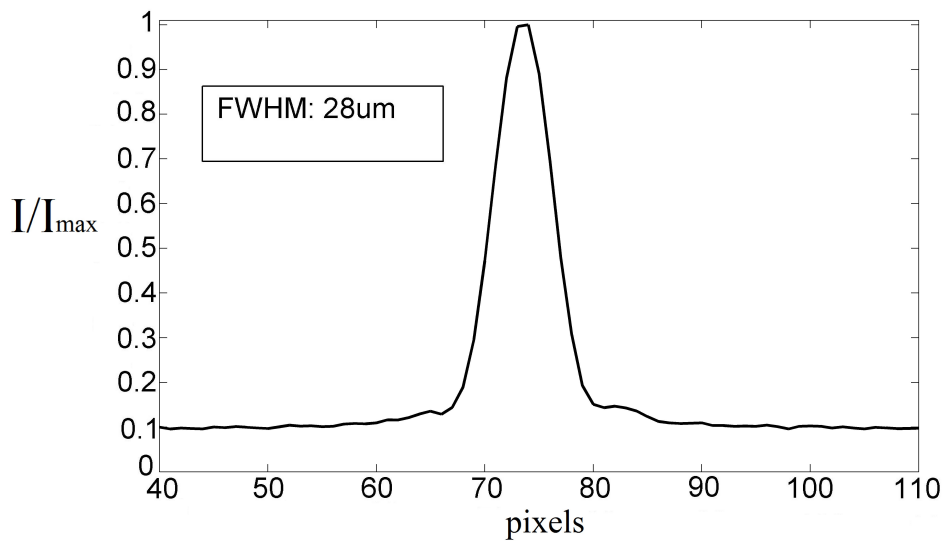


Figura 4.10 : Profilo dell'intensità normalizzata lungo la direzione x per lo spot nel fuoco d'uscita nel caso di configurazione a Z e sorgente con divergenza angolare uguale a 2 mrad.

La FWHM è pari a 28 μm in direzione sagittale.

In fig. 4.11 è mostrata la FWHM del fuoco d'uscita per configurazione a Z nel caso di sorgente con apertura di 3 mrad:

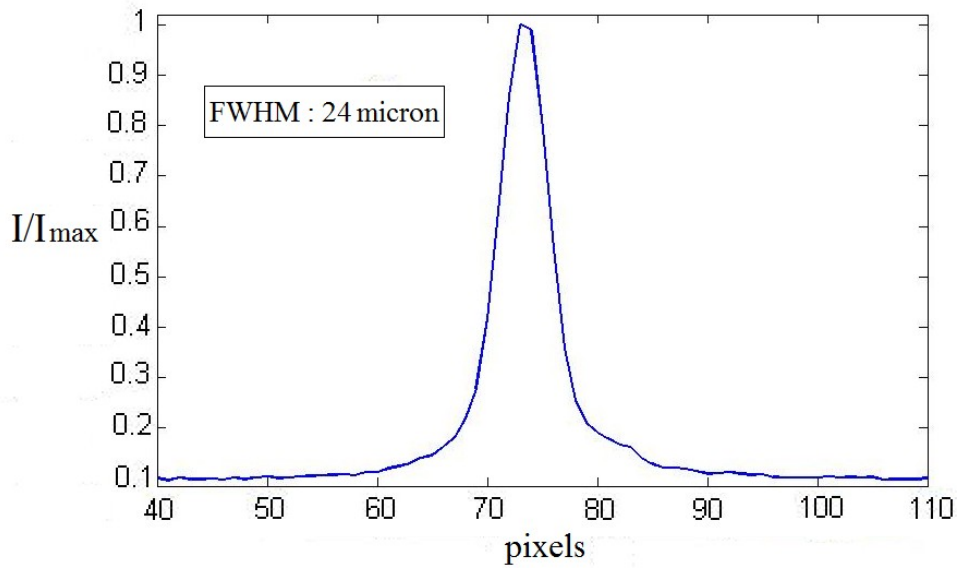


Figura 4.11 : Profilo dell'intensità normalizzata lungo la direzione x per lo spot nel fuoco d'uscita nel caso di configurazione a Z e sorgente con divergenza angolare uguale a 3 mrad.

La FWHM è pari a 24 μm in direzione sagittale.

In fig. 4.12 è mostrata la FWHM del fuoco d'uscita per configurazione a Z nel caso di sorgente con apertura di 4 mrad:

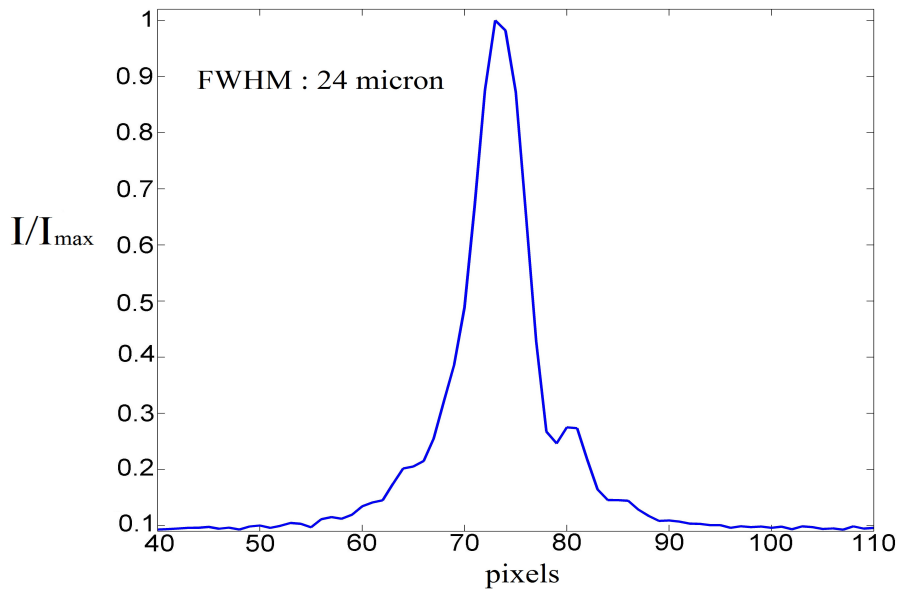


Figura 4.12 : Profilo dell'intensità normalizzata lungo la direzione x per lo spot nel fuoco d'uscita nel caso di configurazione a Z e sorgente con divergenza angolare uguale a 4 mrad.

La FWHM è pari a 24 μm in direzione sagittale.

Questi risultati mostrano che aumentando la divergenza angolare della sorgente, la FWHM sagittale dell'immagine nel fuoco d'uscita tende a ridursi. La FWHM è uguale a 28 μm nel caso di un'apertura di 2 mrad, mentre è pari a 24 μm per aperture di 3 e 4 mrad. Questo andamento deriva dall'effetto della diffrazione. In ogni caso, aumentando l'apertura della sorgente aumenta anche l'effetto delle aberrazioni, quindi l'immagine che si ha nel fuoco d'uscita è, in realtà, il risultato di due meccanismi in competizione, cioè la diffrazione e le aberrazioni.

4.2 OTTIMIZZAZIONE

Il software presentato nel capitolo precedente è stato utilizzato per fare un'ottimizzazione tramite algoritmi genetici della micro-focalizzazione del sistema ottico. Un approccio di questo tipo si è rivelato necessario per allineare finemente i vari elementi ottici del sistema sperimentale. Infatti in questo modo è stato possibile allineare elementi ottici difficilmente allineabili manualmente ed ottenere un'immagine focalizzata della sorgente in maniera semplice ed automatica. Sono state eseguite diverse ottimizzazioni variando di volta in volta i numerosi parametri genetici a disposizione, cercando di individuare per questi ultimi i valori migliori per il buon esito della ricerca genetica.

Le singole soluzioni nelle ottimizzazioni sono rappresentate da un set di 12 posizioni assolute degli assi motorizzati delle stage: ogni soluzione produce un'immagine diversa dalla quale viene valutata la fitness della soluzione stessa. Quindi, la valutazione della fitness di una soluzione avviene in modo indiretto, ossia valutando non la soluzione, bensì l'immagine che essa ha prodotto nel fuoco d'uscita del sistema ottico. Il sistema ottico ha 17 gradi di libertà dato che le tre stage su cui sono montati gli specchi, hanno in totale 17 assi motorizzati (la prima ne ha 5, mentre la seconda e la terza ne hanno 6 ciascuna); tuttavia si è scelto di utilizzare 12 gradi di libertà, cioè 12 assi motorizzati, per fare le ottimizzazioni, quindi sono state usate le due stage su cui sono montati il

secondo ed il terzo specchio toroidale, mentre la stage su cui è montato il primo specchio toroidale ha mantenuto una posizione fissa. Questa scelta è stata necessaria per fare uno studio preliminare del problema e comprendere come l'allineamento del secondo e del terzo specchio toroidale influiscono sull'immagine nel fuoco d'uscita. Ciò non toglie che in futuro si possa fare uno studio completo del problema utilizzando tutti i 17 gradi di libertà.

Ogni singola ottimizzazione viene eseguita in numerosi cicli iterativi. Nella prima iterazione, cioè nella prima generazione, l'algoritmo genetico genera un insieme di numeri casuali che vengono tradotti in comandi da inviare agli assi motorizzati delle stage su cui sono montati gli specchi toroidali. Tali comandi rappresentano le nuove posizioni assolute che gli assi motorizzati assumono, quindi, in questo modo, viene modificata la posizione corrente degli specchi toroidali. È necessario specificare che, per posizione assoluta di un asse della stage, si intende la sua posizione rispetto allo zero di riferimento, rispetto al quale gli assi possono compiere traslazioni e rotazioni. Quindi, il fascio del laser ad He-Ne viene riflesso dai tre specchi toroidali, che si trovano nelle loro nuove posizioni, ed infine viene catturato dalla telecamera posta in corrispondenza del fuoco d'uscita del sistema ottico. L'immagine prodotta dalla soluzione corrente (cioè dal set di 12 posizioni assolute dei 12 assi della seconda e terza stage) viene opportunamente elaborata, quindi ad essa viene associato un valore scalare corrispondente al suo valore di fitness. Come si è già detto, l'obiettivo dell'ottimizzazione è la massimizzazione del valore di fitness di una soluzione, poiché maggiore è la fitness, minore è l'errore che essa produce. Il valore ottimale di fitness è definito da un parametro specifico dell'algoritmo genetico; questo parametro è la fitness obiettivo che ha la funzione di dirigere l'intera ricerca genetica nelle regioni dello spazio di ricerca in cui l'errore è minimo. Quindi, alle singole soluzioni (individui) della popolazione corrente viene assegnato un punteggio che rispecchia il valore di fitness raggiunto. Poi le soluzioni vengono classificate in ordine crescente in base al punteggio conseguito. La soluzione col punteggio più elevato è quella con la fitness maggiore, quindi è la soluzione migliore della generazione corrente, cioè quella che produce

l'errore minore nello spazio di ricerca. Queste operazioni sono ripetute ad ogni ciclo genetico finché non viene trovata almeno una soluzione con un valore di fitness uguale o maggiore della fitness obiettivo, oppure fino al completamento di tutte le generazioni.

Le ottimizzazioni mostrano un progressivo miglioramento della soluzione di generazione in generazione. Tale miglioramento si esprime come una crescita della fitness delle soluzioni: attraverso le generazioni la fitness aumenta o al più resta costante, ma non diminuisce. Le diverse ottimizzazioni presentano diversi valori per i parametri genetici.

Nelle ottimizzazioni di seguito presentate, il tempo di integrazione della telecamera è sempre uguale a 500 ms: un valore così elevato consente di acquisire l'immagine del fascio laser in presenza di un elevato rumore termico dato dalla telecamera stessa; infatti le ottimizzazioni sono state fatte in aria e non in vuoto, con una temperatura interna della telecamera di circa 20 gradi centigradi. Al contrario se la temperatura di quest'ultima viene portata a valori negativi, il contributo di rumore termico si riduce notevolmente consentendo tempi di integrazione minori e quindi tempi di ottimizzazione minori. La temperatura della telecamera può essere portata a valori negativi solo se si opera in vuoto; infatti, se ciò venisse fatto in aria, la telecamera si danneggerebbe.

Inoltre, solo una porzione dell'area della CCD viene investita dalla radiazione. Quest'area ha dimensioni di 200 pixel*200 pixel, ossia 2 mm*2 mm. La riduzione di quest'area è stata un provvedimento necessario per ridurre i tempi di elaborazione dell'immagine da parte del software.

Il tempo di integrazione della CCD è stato il fattore maggiormente limitante nelle ottimizzazioni dato che ognuna di queste richiede all'incirca un'ora per essere completata.

Come si è già detto, per fitness di una soluzione si intende il valore massimo raggiunto dall'intensità dell'immagine che essa ha prodotto. Per maggiore chiarezza, è necessario ricordare che ogni immagine è rappresentata da una matrice bidimensionale i cui elementi, corrispondenti ai singoli pixel della telecamera, contengono valori interi, corrispondenti ai conteggi d'intensità. Quindi il valore della fitness di un'immagine è dato dall'elemento della matrice contenente il valore più elevato di conteggi. Intuitivamente questo è un buon modo per valutare la bontà di un'immagine

perché un'immagine ben focalizzata e demagnificata deve necessariamente presentare valori d'intensità elevati. Nelle ottimizzazioni seguenti il valore di fitness obiettivo è fissato a 50000: in questo modo la ricerca genetica si fermerà quando sarà trovata almeno una soluzione con questo valore di fitness, oppure completerà il numero delle iterazioni fissato nei parametri, se l'obiettivo non viene raggiunto prima. Bisogna dire che il valore massimo d'intensità che un pixel può registrare, è uguale a 65000 conteggi, quindi, perché l'algoritmo completi tutte le generazioni, basta impostare per la fitness obiettivo un valore maggiore o uguale a 65000. In ogni caso è meglio evitare che la telecamera arrivi a saturazione, quindi, per evitare danni, si è scelto un valore di fitness obiettivo uguale a 50000.

In tutte le ottimizzazioni la probabilità di ricombinazione, cioè la probabilità con cui viene applicato l'operatore di crossover a due potenziali soluzioni, è sempre uguale a 0.85. Essendo questo valore molto elevato, la ricombinazione è un operatore molto importante nell'introdurre variabilità "genetica" tra gli individui.

Nelle ottimizzazioni anche altri parametri genetici hanno sempre lo stesso valore; questi sono il valore minimo ed il valore massimo del tasso di mutazione, uguali rispettivamente a 0.0005 e 0.25. Questi ultimi due parametri rappresentano solo gli estremi del dominio di variazione del tasso di mutazione. Infatti, se durante un'ottimizzazione si sceglie di modificare dinamicamente il tasso di mutazione, in base all'andamento dell'ottimizzazione stessa, la probabilità con cui l'operatore di mutazione verrà applicato ad una soluzione potrà variare ed assumere un valore compreso tra i valori minimo e massimo.

4.2.1 OTTIMIZZAZIONE 1

La prima ottimizzazione presenta i seguenti parametri genetici:

Tabella 4.1 : Parametri genetici della prima ottimizzazione.

Numero delle popolazioni	30
--------------------------	-----------

Numero delle generazioni	50
Modalità di mutazione	tasso variante con la fitness
Creep mutation	ON
Piano di riproduzione	Stazionario con sostituzione dell'individuo peggiore
Elitismo	ON

Come si è accennato in precedenza, non c'è alcuna garanzia che l'algoritmo genetico arrivi alla soluzione ottimale del problema. Ad ogni modo, assegnando valori opportuni ai diversi parametri genetici, è possibile avvicinarsi alla soluzione migliore. In particolare aumentando il numero delle popolazioni e quello delle generazioni, aumenta anche la probabilità di trovare una soluzione che abbia una fitness elevata. In questa prima ottimizzazione, questi due parametri hanno valori bassi (anche nelle successive ottimizzazioni questi parametri non avranno valori elevati dal momento che i tempi di esecuzione del software sono lunghi). È stato usato un piano di riproduzione stazionario che ad ogni generazione prevede la sostituzione della soluzione peggiore con un'altra soluzione con fitness più elevata. È stato attivato l'elitismo perché questo è comunque una garanzia che la ricerca genetica dia un buon risultato, cioè che ci sia un effettivo miglioramento delle soluzioni nel corso delle generazioni. L'attivazione del parametro 'creep mutation' fa in modo che il cambiamento degli individui dovuto alla mutazione è molto lento. Infine il tasso di mutazione varia in funzione della fitness delle soluzioni.

In fig. 4.13 si può vedere la progressiva crescita della fitness nel corso del tempo

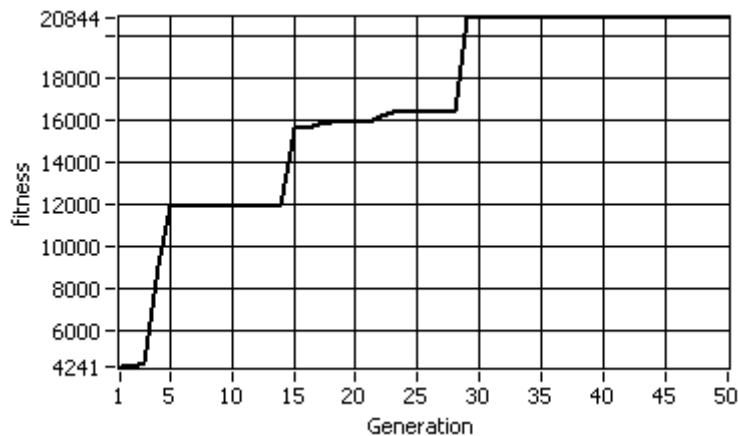


Figura 4.13 : Andamento della fitness della migliore soluzione nel corso delle generazioni.

Il valore massimo della fitness è uguale a 20844. Il grafico mostra chiaramente come l'ottimizzazione presenta miglioramenti improvvisi, dopodiché tende a stabilizzarsi (la fitness migliore mantiene un valore costante per oltre 20 generazioni). In questo caso il valore massimo di fitness si ottiene fin dalla ventottesima generazione. Nelle rimanenti 21 generazioni l'algoritmo non trova soluzioni migliori, quindi la soluzione migliore, trovata alla ventottesima generazione, viene conservata fino alla fine dell'ottimizzazione.

In fig. 4.14 viene fatto un confronto tra le immagini prodotte dalla peggiore e dalla migliore soluzione della prima generazione:

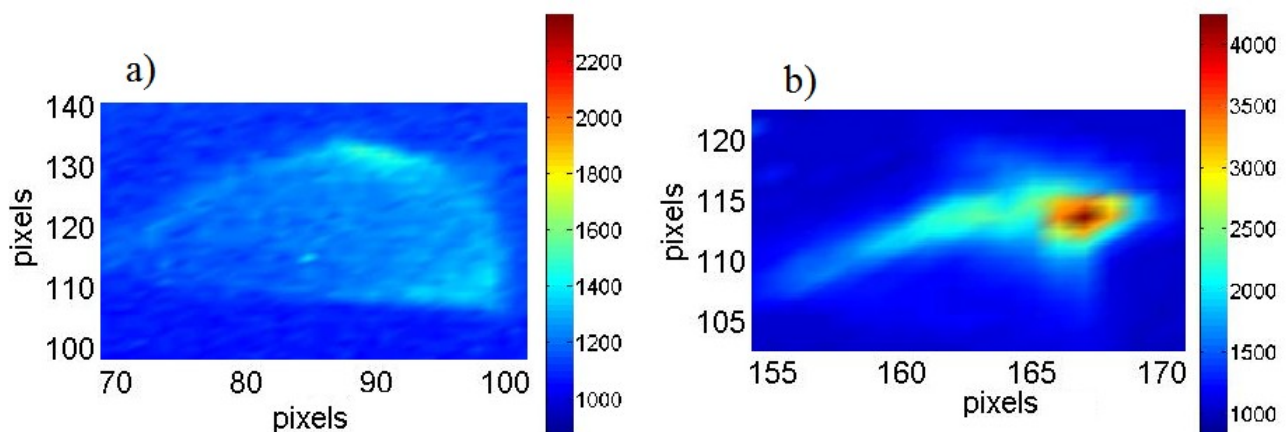


Figura 4.14 : a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della prima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della prima generazione.

Fin dalla prima generazione è evidente la differenza tra le immagini prodotte dalla peggiore e dalla migliore soluzione. Per questa prima generazione la fitness della soluzione peggiore è uguale a

1521, mentre quella della soluzione migliore è pari a 4241. Questo si traduce in un evidente cambiamento della forma dell'immagine nel fuoco d'uscita del sistema ottico.

In fig. 4.15 viene fatto un confronto tra le immagini delle soluzioni migliori date dalla quinta generazione, dalla quindicesima e dalla cinquantesima (cioè l'ultima).

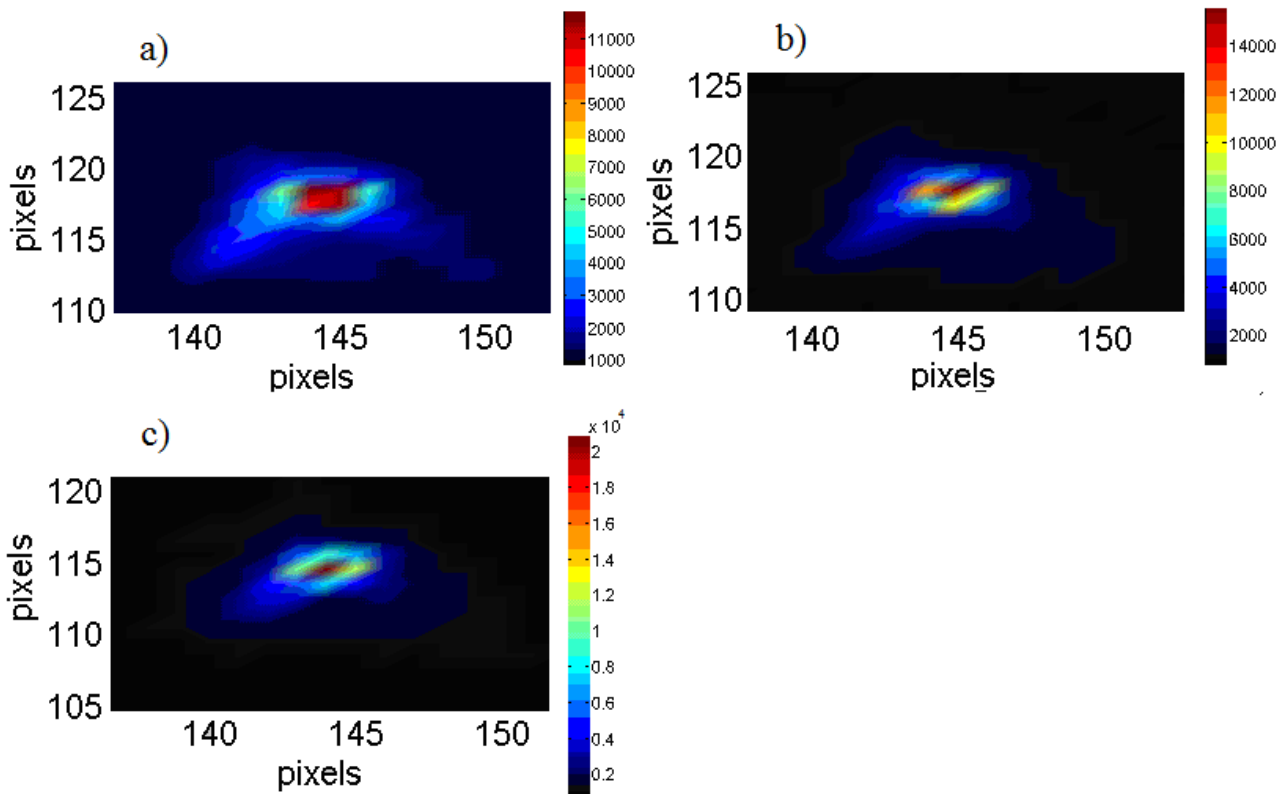


Figura 4.15 : a) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della quinta generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della quindicesima generazione. c) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della cinquantesima generazione.

Le precedenti tre immagini mostrano chiaramente un progressivo incremento dell'intensità massima dell'immagine. La soluzione migliore della quinta generazione ha una fitness uguale a 11879, quella della quindicesima generazione ha una fitness di 15592, infine quella della cinquantesima generazione ne ha una uguale a 20844. Inoltre, osservando le coordinate (cioè il valore numerico dei pixel) in corrispondenza delle quali si trova il picco d'intensità, si può vedere come, dalla quinta generazione in poi, non ci sia un cambiamento sostanziale della posizione del picco stesso nell'area di ricerca. Ciò significa che, fin dalla quinta generazione, l'algoritmo ha ristretto l'area di

indagine ad una piccola regione dell'intero spazio di ricerca, in cui la fitness delle soluzioni trovate presenta valori progressivamente crescenti.

4.2.2 OTTIMIZZAZIONE 2

I parametri genetici della seconda ottimizzazione sono mostrati in tabella

Tabella 4.2 : Parametri genetici della seconda ottimizzazione.

Numero delle popolazioni	100
Numero delle generazioni	30
Modalità di mutazione	Tasso variante con la fitness
Creep mutation	ON
Piano di riproduzione	Stazionario con sostituzione dell'individuo peggiore
Elitismo	ON

In questa seconda ottimizzazione un numero così elevato di popolazioni (100) serve ad ampliare la ricerca della soluzione migliore su uno spazio di ricerca più esteso. Tuttavia il numero di generazioni è stato limitato a 30 per ridurre i tempi di esecuzione del software.

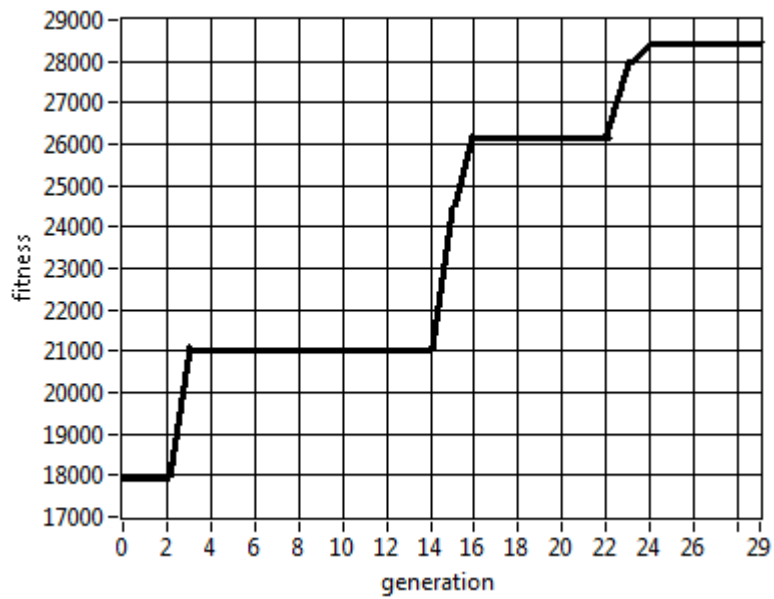


Figura 4.16 : Andamento della fitness della migliore soluzione nel corso delle generazioni.

Il valore massimo della fitness è uguale a 28469.

In fig. 4.17 viene fatto un confronto tra le immagini migliori ottenute nella quarta, nella diciottesima e nella ventiseiesima generazione:

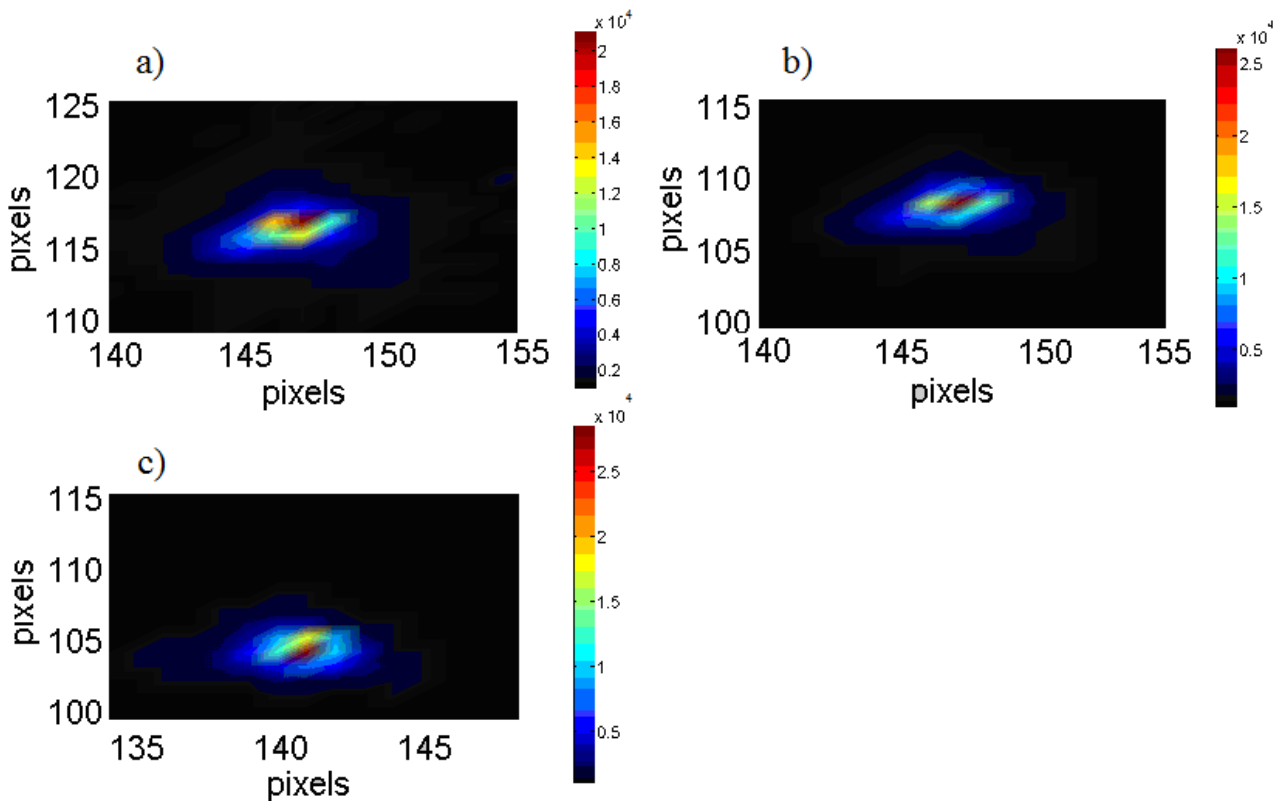


Figura 4.17 : a) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della quarta generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della diciottesima generazione. c) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della ventiseiesima generazione.

Dalle immagini è evidente l'incremento progressivo della fitness della soluzione migliore. Le soluzioni migliori della quarta, diciottesima e ventiseiesima generazione hanno valori di fitness pari a 21085, 26129 e 28469 rispettivamente. Osservando il valore dei pixel in direzione orizzontale e verticale, si nota un lieve spostamento del picco d'intensità nell'area di ricerca.

Inoltre viene mostrato un confronto tra l'immagine prodotta dalla soluzione peggiore della prima generazione e quella prodotta dalla soluzione migliore della trentesima ed ultima generazione:

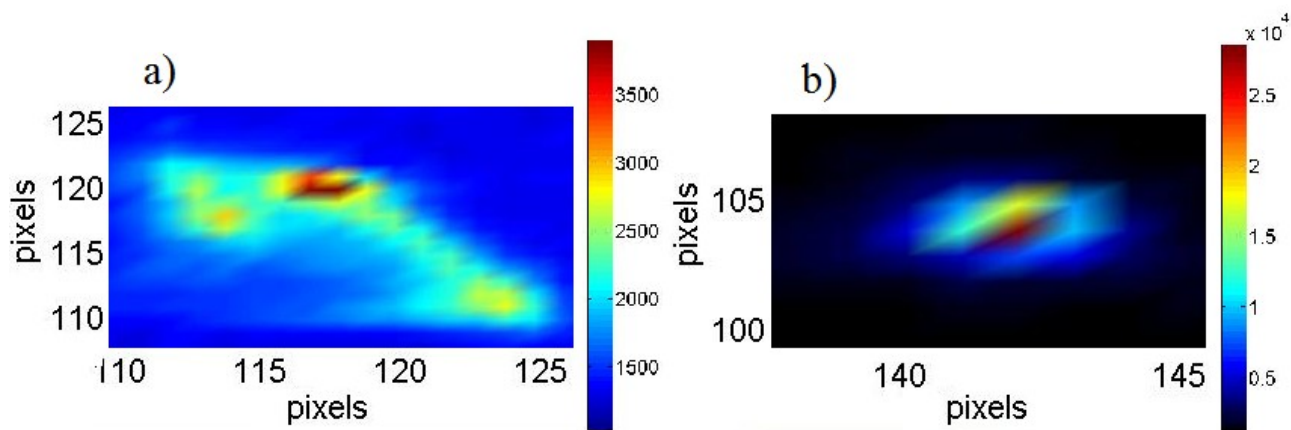


Figura 4.18 : a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della prima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della trentesima generazione.

Da quest'ultimo confronto emerge palesemente l'entità dell'ottimizzazione; l'intensità massima dell'immagine migliore nell'ultima generazione è uguale a 28469, mentre l'intensità massima della soluzione peggiore della prima generazione è uguale a 3894. Inoltre anche la forma delle immagini cambia in maniera significativa. Osservando ancora i pixel in cui si ha il picco d'intensità, in questo caso, dalla prima all'ultima generazione, si nota un cambiamento importante nella regione di ricerca dell'immagine migliore.

Rispetto alla precedente ottimizzazione si è scelto di accrescere a 100 il numero delle popolazioni e di ridurre a 30 il numero delle generazioni, mentre tutti gli altri parametri genetici sono invariati.

4.2.3 OTTIMIZZAZIONE 3

I parametri genetici della terza ottimizzazione sono mostrati in tabella

Tabella 4.3 : Parametri genetici della terza ottimizzazione.

Numero delle popolazioni	50
Numero delle generazioni	50
Modalità di mutazione	Tasso variante con la fitness
Creep mutation	ON

Piano di riproduzione	Sostituzione completa della popolazione
Elitismo	ON

La fitness migliore resta costante nel corso delle generazioni. Il valore massimo della fitness è pari a 23564. La soluzione che restituisce l'immagine con questo valore di fitness, viene trovata fin dalla prima generazione; nelle generazioni successive non vengono trovate soluzioni che diano immagini con valori maggiori di fitness, tuttavia la soluzione migliore, trovata già dalla prima generazione, viene trattenuta dall'algoritmo di ricerca in quanto 'soluzione elitaria'.

Questa ottimizzazione è molto interessante in quanto è stata eseguita con un piano di riproduzione non stazionario, che prevede la sostituzione dell'intera popolazione di individui ad ogni generazione. Le immagini presentate di seguito mostrano in modo chiaro l'effetto dell'ottimizzazione. In fig. 4.19 sono confrontate le immagini prodotte dalla soluzione peggiore e da quella migliore della prima generazione:

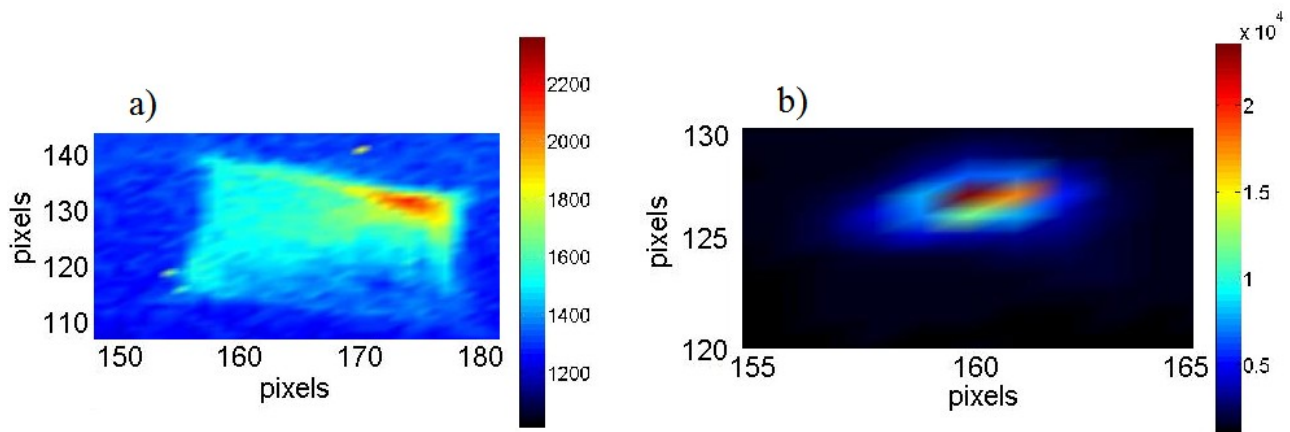


Figura 4.19 : a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della prima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della prima generazione.

Sin dalla prima generazione, la differenza tra la fitness della soluzione migliore e quella della soluzione peggiore, è molto marcata, infatti esse sono uguali a 23564 e 2361 rispettivamente.

In fig. 4.20 sono confrontate le immagini prodotte dalla soluzione peggiore e da quella migliore della decima generazione

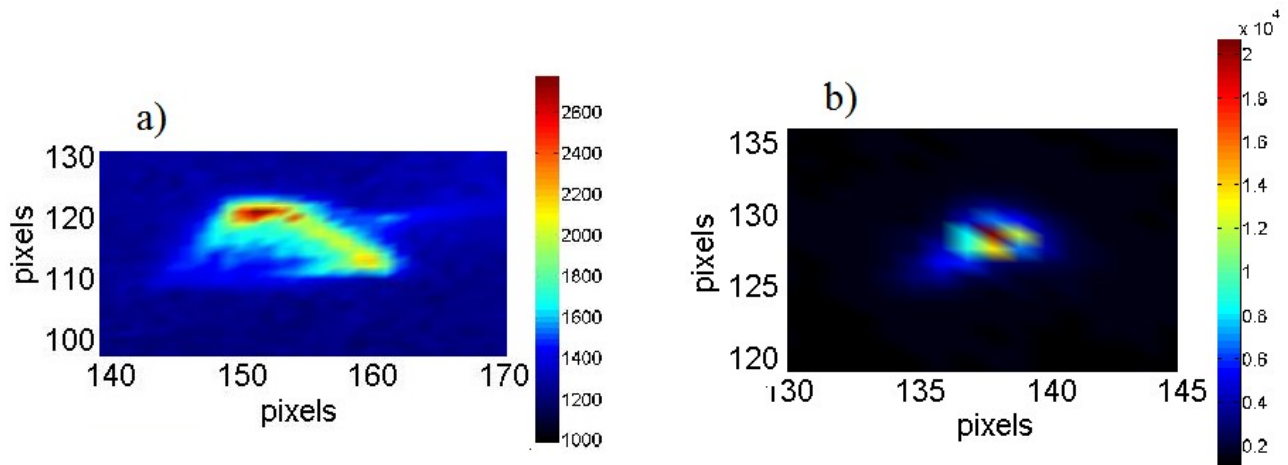


Figura 4.20 : a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della decima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della decima generazione.

Anche da questo confronto emerge la differenza tra le intensità massime della peggiore e della migliore soluzione, uguali a 2778 e 20659. Ad ogni modo la fitness migliore è comunque inferiore a quella della miglior soluzione trovata sin dalla prima generazione.

In fig. 4.21 sono confrontate le immagini prodotte dalla soluzione peggiore e da quella migliore della ventesima generazione:

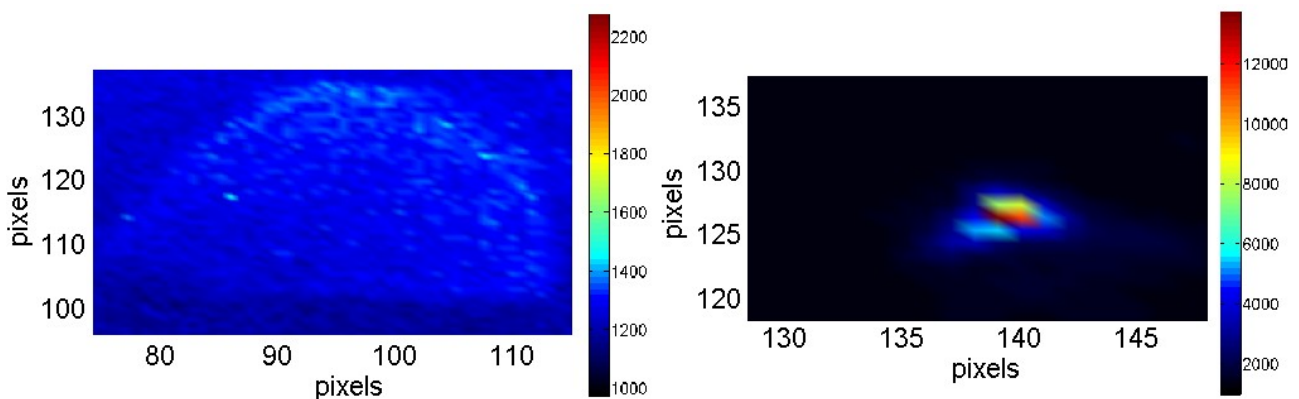


Figura 4.21 : a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della ventesima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della ventesima generazione.

Nella ventesima generazione i valori di fitness sono pari a 2276 per la soluzione peggiore e a 13742 per la soluzione migliore.

In fig. 4.22 sono confrontate le immagini prodotte dalla soluzione peggiore e da quella migliore della trentesima generazione:

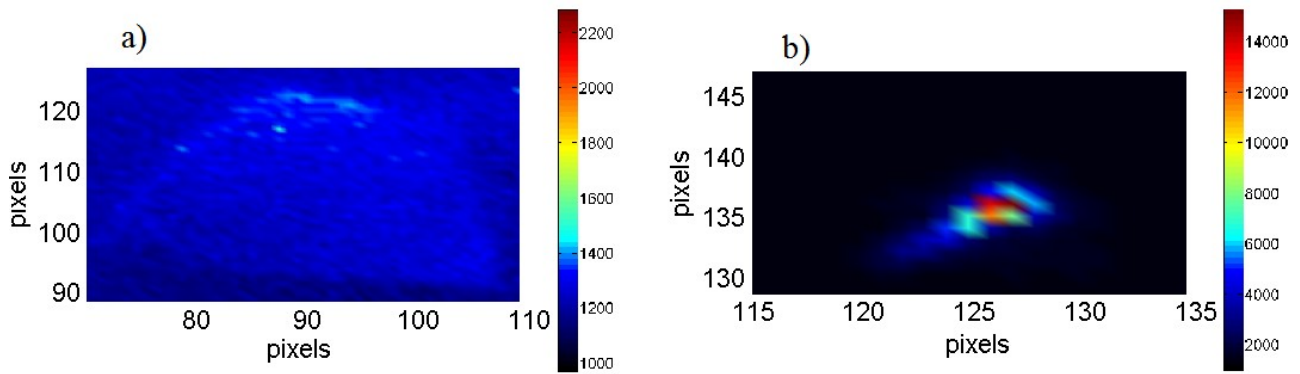


Figura 4.22 : a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della trentesima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della trentesima generazione.

In questa generazione i valori di fitness sono pari a 2281 per la soluzione peggiore e a 15277 per la soluzione migliore.

In fig. 4.23 sono confrontate le immagini prodotte dalla soluzione peggiore e da quella migliore della quarantesima generazione:

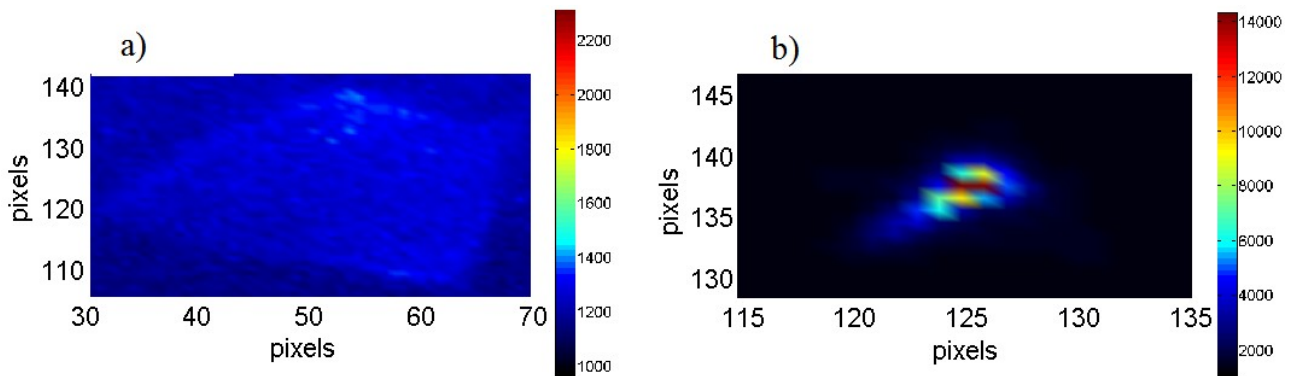


Figura 4.23 : a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della quarantesima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della quarantesima generazione.

Nella quarantesima generazione i valori di fitness sono pari a 2311 per la soluzione peggiore e a 14310 per la soluzione migliore.

In fig. 4.24 sono confrontate le immagini prodotte dalla soluzione peggiore e da quella migliore della cinquantesima ed ultima generazione:

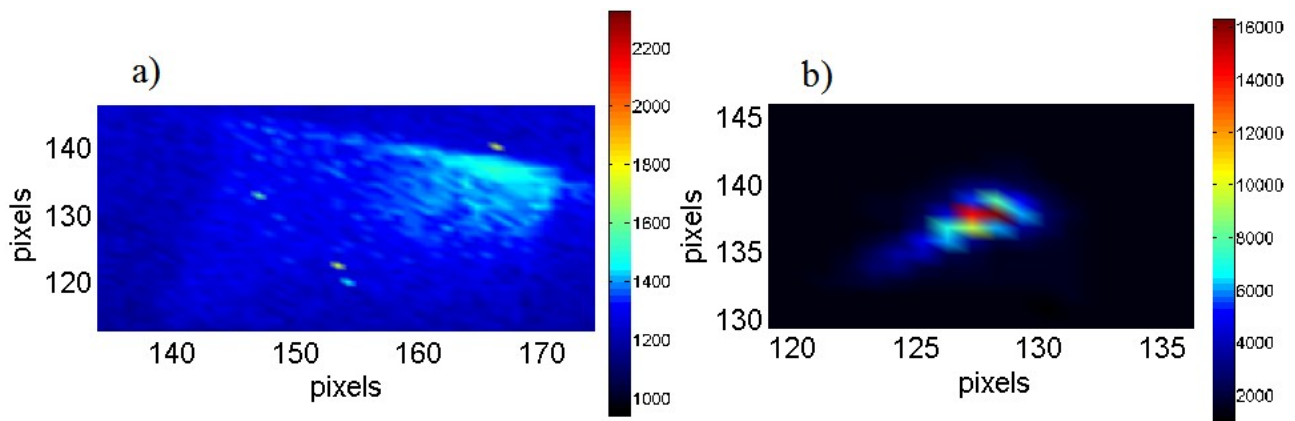


Figura 4.24 : a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della cinquantesima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della cinquantesima generazione.

In quest'ultima generazione i valori di fitness sono pari a 2324 per la soluzione peggiore e a 16296 per la soluzione migliore.

Dai precedenti confronti tra le immagini della peggiore e della migliore soluzione per diverse generazioni, si può comprendere chiaramente la strategia di ottimizzazione seguita dall'algoritmo genetico. Ad ogni singola generazione, la ricerca delle soluzioni avviene sull'intera area di ricerca, ovvero l'algoritmo non restringe mai la ricerca ad una regione limitata, anche se in quella regione dello spazio di ricerca ha trovato un'ottima soluzione. Ciò deriva proprio dalla tipologia del piano di riproduzione scelto, il quale prevede intrinsecamente che l'indagine si estenda su tutta l'area di ricerca. Quindi questa soluzione, rispetto ad un piano di riproduzione stazionario, garantisce una più alta probabilità di trovare il minimo globale, cioè la soluzione che produce il più piccolo errore rispetto a tutte le altre soluzioni nello spazio di ricerca.

4.2.4 OTTIMIZZAZIONE 4

I parametri della quarta ottimizzazione sono mostrati in tabella

Tabella 4.4 : Parametri genetici della quarta ottimizzazione.

Numero delle popolazioni	100
--------------------------	------------

Numero delle generazioni	30
Modalità di mutazione	Tasso variante con la fitness
Creep mutation	OFF
Piano di riproduzione	Stazionario con sostituzione dell'individuo peggiore
Elitismo	ON

Il parametro “creep mutation” è stato disattivato: ciò significa che l’operatore genetico della mutazione è determinante nell’introdurre variabilità genetica tra gli individui. Il piano di riproduzione è stazionario, quindi l’algoritmo limiterà automaticamente la ricerca all’area in cui troverà le prime buone soluzioni.

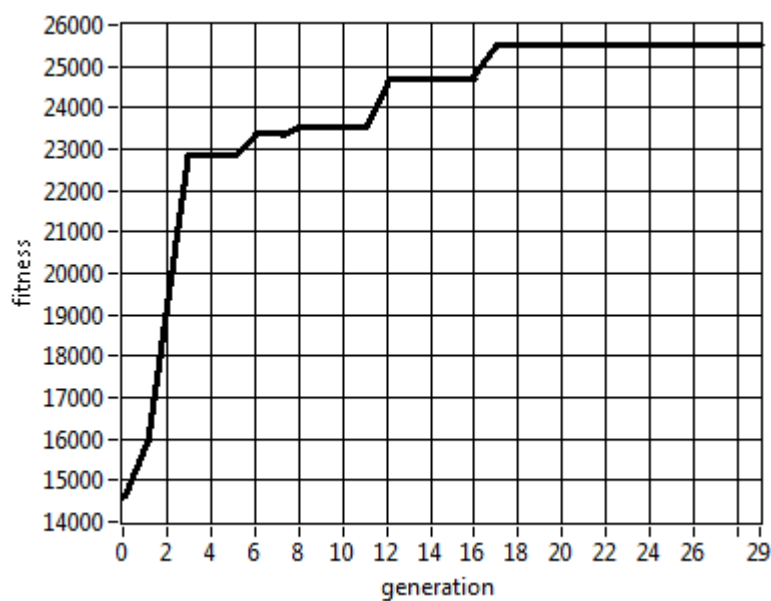


Figura 4.25 : Andamento della fitness della migliore soluzione nel corso delle generazioni.

Il valore massimo della fitness è uguale a 25539.

In fig. 4.26 viene fatto un confronto tra le immagini prodotte dalle soluzioni migliori della prima, terza, tredicesima e diciottesima generazione:

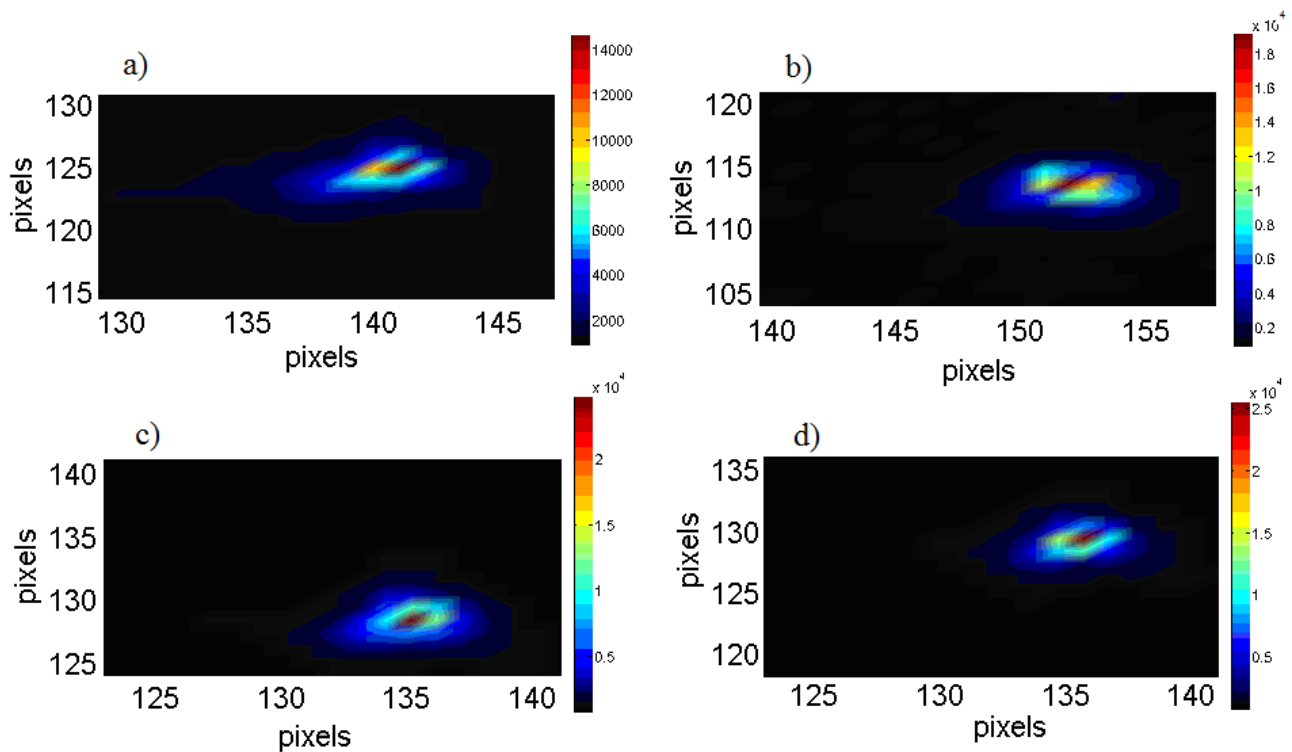


Figura 4.26 : a) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della prima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della terza generazione. c) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della tredicesima generazione. d) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della diciottesima generazione.

L'incremento del valore di intensità massima è palese nel corso delle generazioni. Questa è uguale a 14638 per la soluzione migliore della prima generazione, a 19153 per la soluzione migliore della terza. Per la tredicesima e per la diciottesima generazione i valori di intensità massima, e quindi di fitness, per le soluzioni migliori sono 24677 e 25536.

In questa quarta ottimizzazione dato che il parametro genetico “creep mutation” è stato disattivato, il tasso di mutazione delle soluzioni è elevato e variabile nel corso di tutte le generazioni, anche in prossimità della fine dell'ottimizzazione, quando ormai è stata individuata una buona soluzione al problema. Quindi la mutazione dà un significativo contributo alla diversificazione del genotipo degli individui della popolazione nella generazione corrente. Questo aumenta la probabilità di estendere la ricerca su regioni più ampie poiché aumenta la probabilità di uscire da eventuali minimi locali, anche se il piano di riproduzione scelto è di tipo stazionario.

Inoltre il tasso di mutazione è variabile e viene modificato di generazione in generazione in funzione del valore della fitness della soluzione migliore.

4.2.5 OTTIMIZZAZIONE 5

I parametri della quinta ottimizzazione sono mostrati in tabella

Tabella 4.5 : Parametri genetici della quinta ottimizzazione.

Numero delle popolazioni	100
Numero delle generazioni	40
Modalità di mutazione	Tasso variante con i fenotipi
Creep mutation	OFF
Piano di riproduzione	Stazionario con sostituzione dell'individuo peggiore
Elitismo	ON

Il piano di riproduzione è stazionario; tuttavia, per aumentare la probabilità che la ricerca delle migliori soluzioni esca fuori da eventuali minimi locali, è stato disattivato il parametro “creep mutation” e si è scelto un tasso di mutazione variante con i fenotipi.

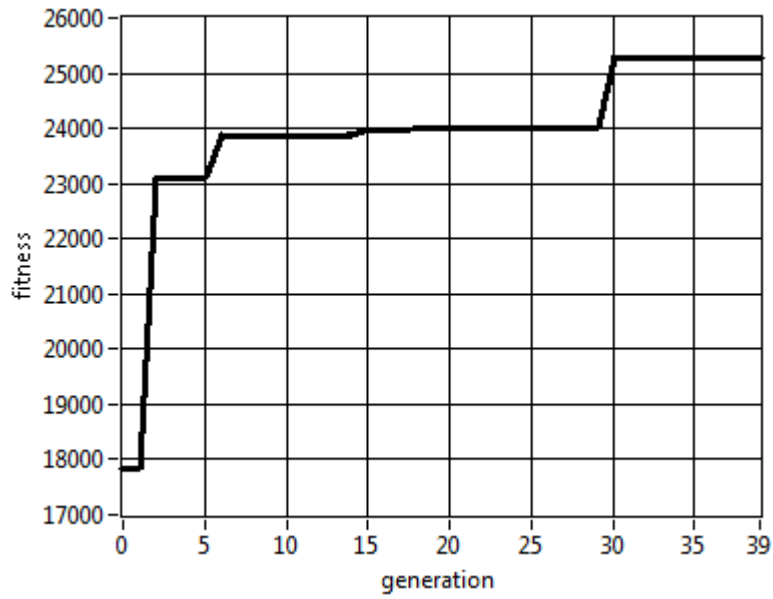


Figura 4.27 : Andamento della fitness della migliore soluzione nel corso delle generazioni.

Il valore massimo della fitness è uguale a 25276.

In fig. 4.28 viene fatto un confronto tra le immagini prodotte dalle soluzioni migliori della prima, dell'ottava e della quarantesima generazione:

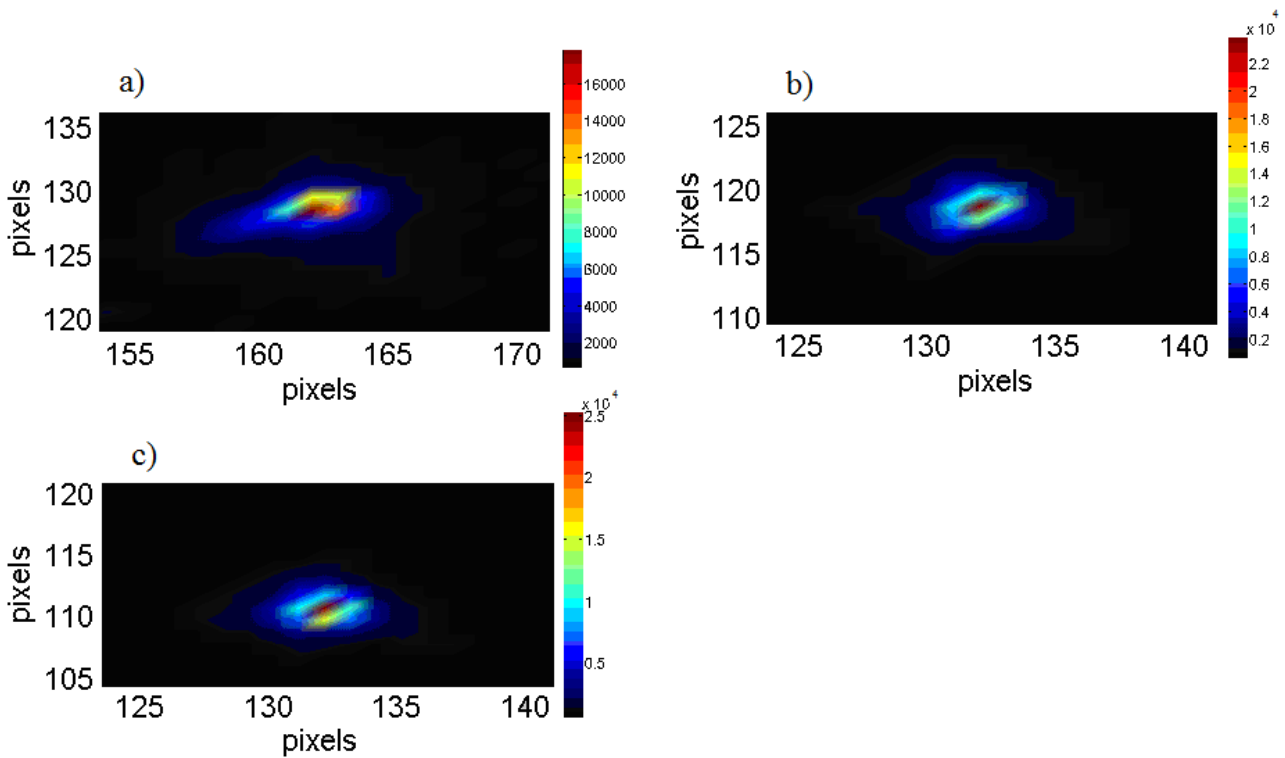


Figura 4.28 : a) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della prima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore dell'ottava generazione. c) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della quarantesima generazione.

L'incremento di fitness della soluzione migliore è palese nel corso delle generazioni. Nella prima generazione la fitness migliore è uguale a 17839, nell'ottava è uguale a 23863, infine nella quarantesima è pari a 25276.

Nella quinta ottimizzazione è stato impostato un tasso di mutazione variante nel tempo, la cui variabilità dipende da quanto i fenotipi dei diversi individui di una popolazione sono simili tra di loro. Questo è un altro modo per introdurre variabilità tra le soluzioni di una popolazione, tenendo conto direttamente dei fenotipi e non delle fitness delle soluzioni. Ciò significa che il tasso di mutazione aumenta se i fenotipi degli individui di una popolazione sono poco diversificati, mentre si riduce se i fenotipi sono sufficientemente diversificati. Questo provvedimento fa in modo che la ricerca si estenda su spazi di ricerca più ampi, in modo tale da accrescere la probabilità che la ricerca stessa esca fuori da eventuali minimi locali. Il parametro "creep mutation" è disattivato, ciò implica proprio che l'azione della mutazione sarà significativa nella diversificazione degli individui.

4.2.6 OTTIMIZZAZIONE 6

I parametri genetici della sesta ottimizzazione sono mostrati in tabella

Tabella 4.6 : Parametri genetici della sesta ottimizzazione.

Numero delle popolazioni	100
Numero delle generazioni	40
Modalità di mutazione	Tasso variante con i fenotipi
Creep mutation	ON
Piano di riproduzione	Stazionario con sostituzione dell'individuo peggiore
Elitismo	ON

Rispetto alla precedente ottimizzazione è stato variato il solo parametro “creep mutation”, che in questo caso è stato attivato, quindi una diversificazione genetica tra gli individui è introdotta principalmente dall’operatore di ricombinazione, mentre l’azione dell’operatore di mutazione è secondaria.

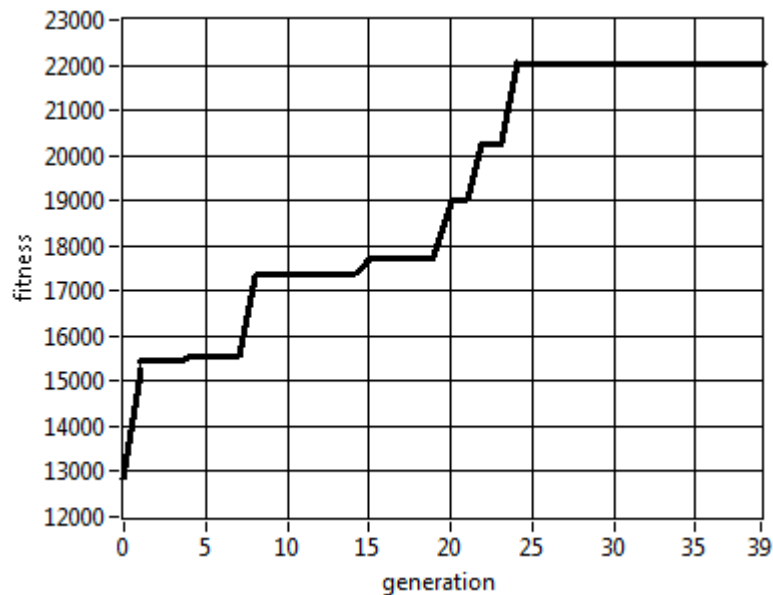


Figura 4.29 : Andamento della fitness della migliore soluzione nel corso delle generazioni.

Il valore massimo raggiunto dalla fitness è uguale a 22072.

In fig. 4.30 viene fatto un confronto tra la peggiore e la migliore immagine della prima generazione:

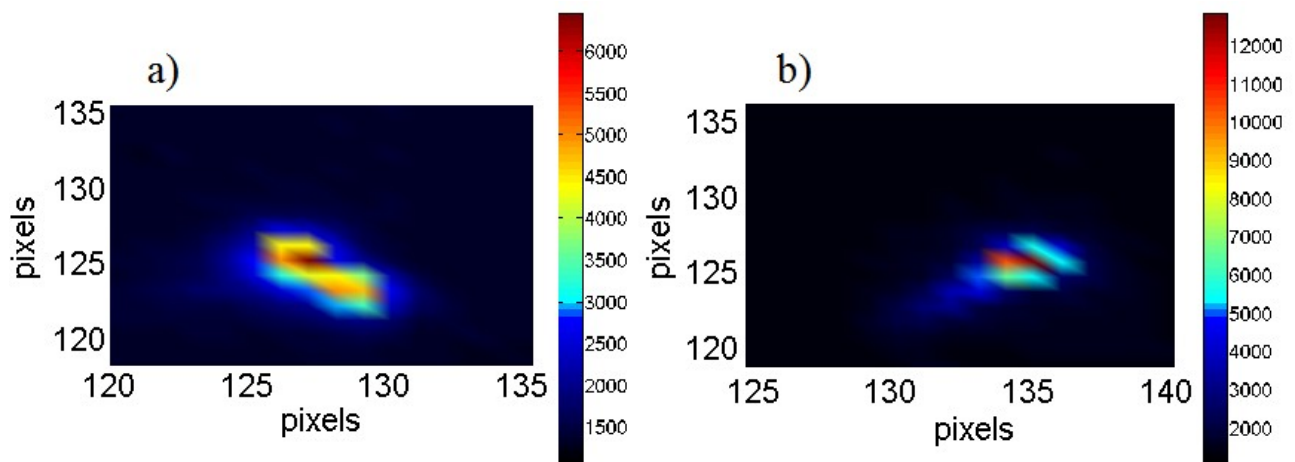


Figura 4.30 : a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della prima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della prima generazione.

I valori di fitness della soluzione peggiore e della soluzione migliore di questa prima generazione sono pari rispettivamente a 6446 e 12830.

Nella fig. 4.31 viene mostrata l'immagine prodotta dalla soluzione migliore dell'ultima generazione:

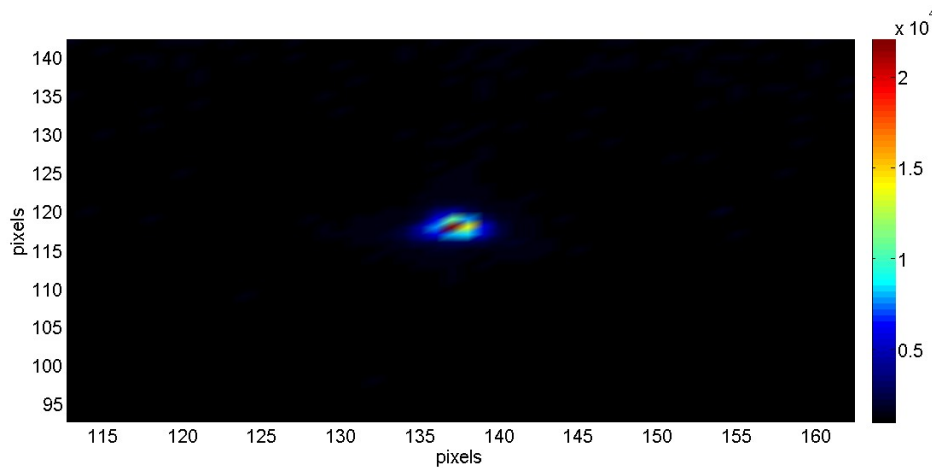


Figura 4.31 : Immagine prodotta dalla soluzione migliore della quarantesima generazione.

C'è un chiaro aumento dell'intensità massima dalla prima all'ultima generazione; tuttavia, il valore massimo raggiunto dalla fitness della soluzione migliore è uguale a 22072, valore comunque significativamente più basso delle fitness migliori registrate nei precedenti casi di ottimizzazione.

4.2.7 OTTIMIZZAZIONE 7

I parametri genetici della settima ottimizzazione sono mostrati in tabella

Tabella 4.7 : Parametri genetici della settima ottimizzazione.

Numero delle popolazioni	50
Numero delle generazioni	40
Modalità di mutazione	Tasso variante con i fenotipi
Creep mutation	OFF
Piano di riproduzione	Sostituzione completa della popolazione
Elitismo	ON

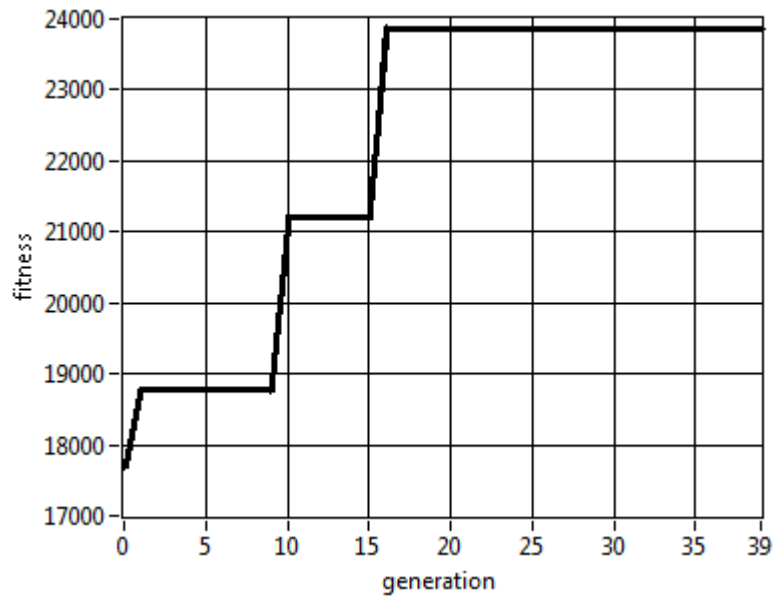


Figura 4.32 : Andamento della fitness della migliore soluzione nel corso delle generazioni.

Il valore massimo della fitness è pari a 23875.

In fig. 4.33 viene presentato un confronto tra le immagini date dalla soluzione peggiore e dalla soluzione migliore della prima generazione:

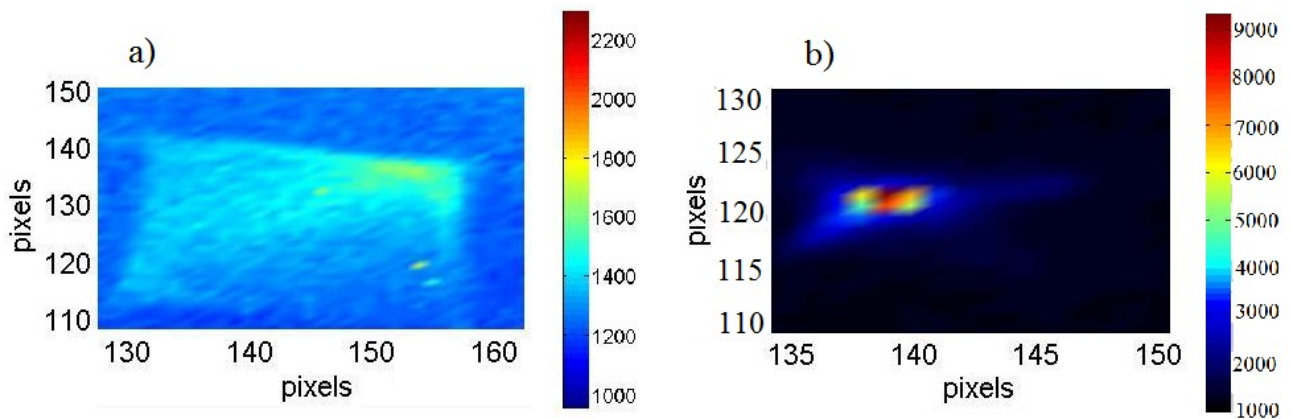


Figura 4.33 : a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della prima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della prima generazione.

In questa prima generazione i valori di fitness sono pari a 2298 per la soluzione peggiore e a 9357 per la soluzione migliore.

In fig. 4.34 viene presentato un confronto tra le immagini date dalla soluzione peggiore e dalla soluzione migliore della quinta generazione:

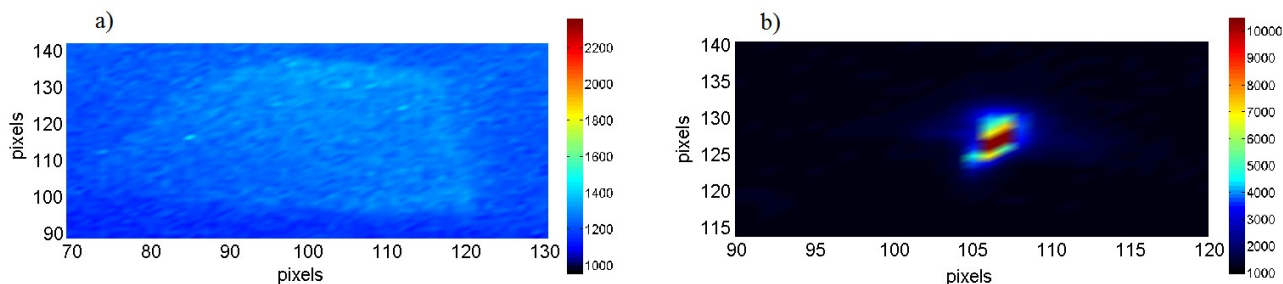


Figura 4.34 : a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della quinta generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della quinta generazione.

Nella quinta generazione i valori di fitness sono pari a 2363 per la soluzione peggiore e a 10488 per la soluzione migliore.

In fig. 4.35 viene presentato un confronto tra le immagini date dalla soluzione peggiore e dalla soluzione migliore della quindicesima generazione:

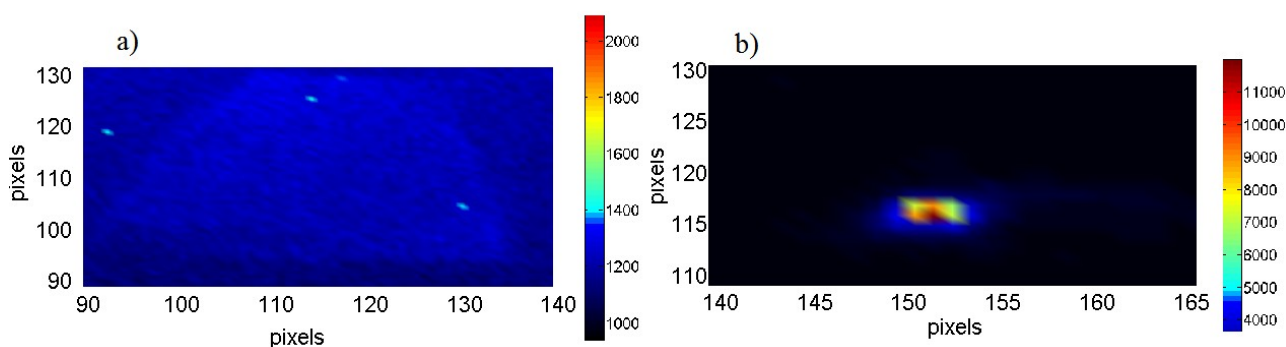


Figura 4.35 : a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della quindicesima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della quindicesima generazione.

Nella quindicesima generazione i valori di fitness sono pari a 2208 per la soluzione peggiore e a 11972 per la soluzione migliore.

In fig. 4.36 viene presentato un confronto tra le immagini date dalla soluzione peggiore e dalla soluzione migliore della venticinquesima generazione:

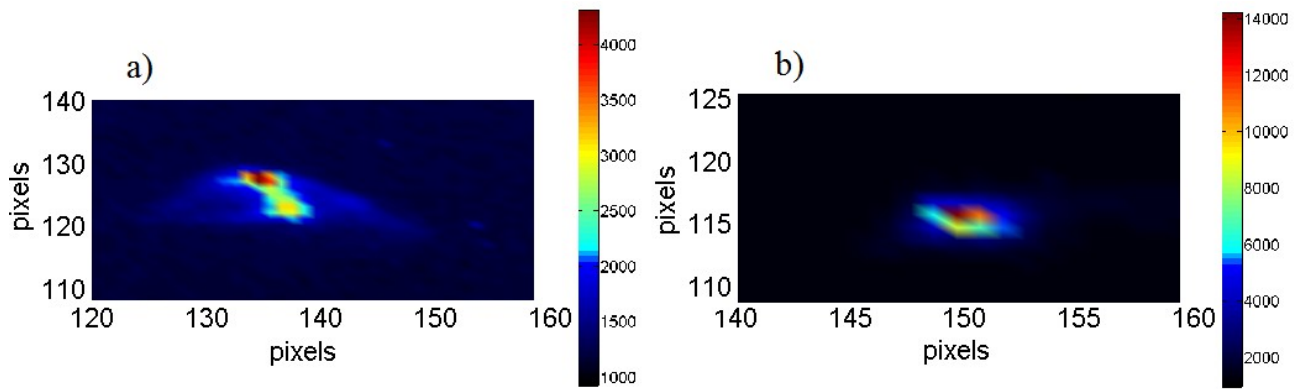


Figura 4.36 : a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della venticinquesima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della venticinquesima generazione.

Nella venticinquesima generazione i valori di fitness sono pari a 4302 per la soluzione peggiore e a 14199 per la soluzione migliore.

In fig. 4.37 viene presentato un confronto tra le immagini date dalla soluzione peggiore e dalla soluzione migliore della quarantesima ed ultima generazione:

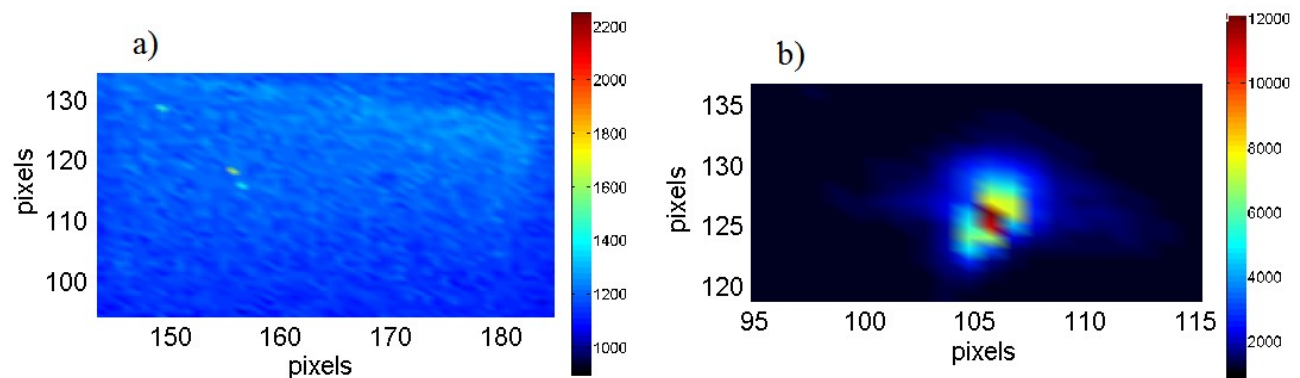


Figura 4.37 : a) Immagine prodotta dalla soluzione peggiore della quarantesima generazione. b) Immagine prodotta dalla soluzione migliore della quarantesima generazione.

In questa prima generazione i valori di fitness sono pari a 2249 per la soluzione peggiore e a 12056 per la soluzione migliore.

Il piano di riproduzione scelto è di tipo non stazionario. Ad ogni generazione avviene la completa sostituzione della popolazione delle soluzioni con una nuova popolazione di individui; come si è già detto in precedenza, con questa tipologia di piano di riproduzione non c'è garanzia alcuna che la popolazione dei figli sia più adattata della popolazione dei padri. Infatti, dalle immagini precedenti

si può vedere come l'intensità massima registrata nella quarantesima ed ultima generazione sia comunque inferiore all'intensità massima dell'immagine prodotta dalla soluzione migliore della venticinquesima generazione. Inoltre, un tasso di mutazione variante con i fenotipi, unitamente al parametro "creep mutation" disattivato, implicano un contributo significativo della mutazione alla diversificazione diretta delle soluzioni.

4.2.8 ESITO DELLE OTTIMIZZAZIONI

I risultati ottenuti mostrano chiaramente quanto sia importante assegnare valori opportuni ai parametri genetici. Ad ogni modo, è vero che non è possibile sapere a priori quale sia la migliore e più efficace strategia di ottimizzazione, cioè quella che darà il miglior risultato. Proprio questo rende necessaria una primissima fase di ottimizzazioni volta a conoscere meglio il problema e i dati a disposizione in modo tale da individuare in seguito il miglior approccio possibile.

In questo caso si è visto che un piano di riproduzione stazionario garantisce un buon risultato, ma sicuramente non il miglior risultato, poiché, non appena viene trovato un minimo locale, lo spazio di ricerca viene automaticamente ristretto ad un intorno di questo minimo. Al contrario, se si sceglie di ampliare la ricerca per trovare soluzioni su uno spazio più esteso, è necessario scegliere un piano di riproduzione che prevede la sostituzione di tutte le soluzioni ad ogni generazione con un nuovo insieme di soluzioni. Ciò assicura una maggiore probabilità di trovare il minimo globale a patto però di utilizzare un numero di popolazioni e di generazioni molto elevato, perché in questo modo la ricerca della soluzione ottima diventa più dettagliata e approfondita. Bisogna precisare che quanto detto è valido a condizione che venga attivata l'opzione dell'elitismo in modo tale da evitare comunque un peggioramento delle soluzioni nel corso delle generazioni. In altre parole, l'elitismo assicura che, se la migliore soluzione viene trovata sin dalle prime generazioni, allora questa verrà conservata come soluzione "elitaria" fino al completamento dell'ultimo ciclo di ottimizzazione. Inoltre emerge che buoni risultati si ottengono usando un piano di riproduzione stazionario (con sostituzione degli individui peggiori) in combinazione con il parametro "creep mutation"

disattivato. Infatti, in questo modo si ha la certezza di trovare una buona soluzione al problema mantenendo comunque alta la probabilità di sondare una regione ampia dello spazio di ricerca, grazie al contributo significativo dato dalla mutazione nell'introduzione di variabilità genetica tra gli individui.

L'ottimizzazione che restituisce il miglior risultato è la seconda: la soluzione migliore ha una fitness uguale a 28469 conteggi. Ciò significa che l'immagine prodotta dal miglior set di 12 posizioni assolute degli assi motorizzati delle stage, ha un pixel che ha registrato 28469 conteggi d'intensità.

L'immagine migliore è mostrata in fig. 4.38 :

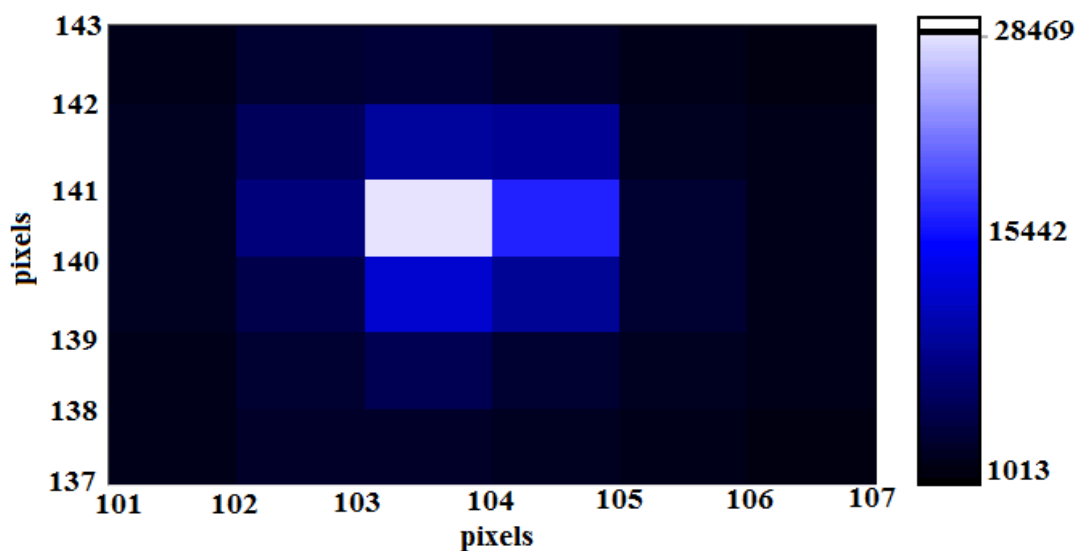


Figura 4.38 : Ingrandimento dell'immagine prodotta dalla miglior soluzione in assoluto, ottenuta nella seconda ottimizzazione. Sono evidenziati i singoli pixel di dimensioni uguali a $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$.

L'effetto della focalizzazione è evidente. La FWHM in questo caso è uguale al singolo pixel centrale; infatti, il pixel centrale, che registra 28469 conteggi, ha un'intensità all'incirca doppia rispetto a quella del secondo pixel con più conteggi (17020 conteggi). Gli altri pixel circostanti hanno valori d'intensità ancora minori.

Questo risultato è stato ottenuto con un piano di riproduzione stazionario con sostituzione degli individui peggiori. L'ottimizzazione è stata fatta in appena 30 generazioni, ma la popolazione complessiva è costituita da ben 100 individui; ciò dimostra che una popolazione di individui molto numerosa assicura una probabilità più elevata di raggiungere obiettivi migliori, perché lo spazio di ricerca viene ampliato. Inoltre il parametro "creep mutation" è stato attivato, quindi il contributo maggiore nell'introdurre variabilità tra gli individui è dato dall'operatore di ricombinazione. L'operatore di mutazione ha un ruolo secondario nella diversificazione delle soluzioni in quanto l'attivazione del parametro "creep mutation" comporta valori molto bassi per il tasso di mutazione che comunque è variante, anche se di poco, con la fitness delle soluzioni.

A questo punto, bisogna ricordare che l'area della CCD della telecamera, indagata nelle precedenti ottimizzazioni, è uguale a soli 200 pixel * 200 pixel. In un'area con questa estensione si ha la certezza che verrà sempre catturata un'immagine da parte della telecamera con i valori scelti per i domini di variazione degli assi motorizzati delle stage. Infatti, ampliando tali domini, si dovrà ampliare anche l'area della CCD della telecamera in cui poter osservare un'immagine, ponendo sempre attenzione a non far variare eccessivamente la posizione degli assi delle stage, perché il fascio del laser ad He-Ne potrebbe, in questo caso, facilmente cadere fuori della CCD della telecamera dopo esser stato riflesso dai tre specchi toroidali. Quindi, dopo un'ottimizzazione, individuando i pixel in corrispondenza dei quali è stata registrata l'immagine con il miglior valore di fitness, è possibile circoscrivere anche la regione spaziale in cui il fascio dovrà incidere nel piano d'uscita del sistema ottico per realizzare un'effettiva micro-focalizzazione della sorgente.

CONCLUSIONI

I risultati ottenuti mostrano la possibilità di ottenere un'elevata focalizzazione con una completa compensazione delle aberrazioni residue con un sistema ottico costituito da tre specchi toroidali montati su tre stage motorizzate, utilizzando una sorgente di radiazione nel visibile. Inoltre le ottimizzazioni eseguite mostrano la possibilità di ottenere tale micro-focalizzazione in modo automatico ed efficiente con un programma che realizza un algoritmo genetico. Futuri ulteriori sviluppi potrebbero derivare da miglioramenti del software genetico: in particolare un'adeguata progettazione della funzione di fitness porterebbe con certezza a risultati migliori, cioè ad impulsi ancora più focalizzati e quindi più intensi. Nelle ottimizzazioni mostrate, ogni immagine è stata valutata semplicemente in base al valore massimo di intensità registrato in uno dei pixel investiti dalla radiazione, quindi è stata fatta un'ottimizzazione a singolo obiettivo. Al contrario, elaborando opportunamente l'immagine ed assegnando ad essa un valore di fitness che tenga conto di più aspetti dell'immagine stessa, sarebbe possibile ottenere un sicuro miglioramento dei risultati. Un approccio multi-obiettivo infatti si basa su una valutazione più accurata e approfondita dei risultati che si ottengono durante l'ottimizzazione, consentendo di orientare quest'ultima nello spazio di ricerca in modo più preciso. D'altro canto, bisogna dire che un approccio multi-obiettivo necessita di un'elaborazione approfondita dell'immagine, quindi nell'ottimizzazione si dispone di numerosi dati e ciò si traduce in una conoscenza migliore del problema studiato. D'altra parte questo comporta tempi di ottimizzazione più lunghi in quanto i tempi di elaborazione dell'immagine sono più lunghi.

È stato dimostrato come un'ottimizzazione genetica completamente automatizzata garantisca ottimi risultati nell'allineamento fine delle componenti del sistema ottico. Un allineamento fine svolto manualmente sarebbe impossibile. Inoltre l'ottimizzazione via software produce un continuo flusso di dati che facilita la comprensione di un problema così complesso. Migliorando la produzione e la gestione dei dati ad ogni ciclo genetico, sarebbe possibile avere una completa ed esaustiva

conoscenza del problema studiato anche dopo una singola ottimizzazione. Infatti, ciò porterebbe ad una conoscenza più approfondita e dettagliata dello spazio di ricerca, consentendo di individuare subito le regioni dove si nascondono le soluzioni migliori. Gli esperimenti presentati sono stati fatti usando una sorgente che emette radiazione nel visibile. In futuro il sistema ottico per la microfocalizzazione sarà usato all'interno della linea XUV-XUV descritta in precedenza. In quel caso, sarà possibile testarne l'efficacia con la radiazione XUV.

Questo sistema ottico è una soluzione alternativa e più economica rispetto a sistemi con componenti ottiche cartesiane. Inoltre i sistemi con ottiche cartesiane sono difficilmente allineabili a differenza dei sistemi con specchi toroidali usati in una configurazione con incidenza radente.

Progressi continui nello sviluppo di sorgenti laser per la generazione di impulsi a femtosecondi, l'utilizzo di nuove tecniche per aumentare l'efficienza di generazione di armoniche di ordine elevato e la realizzazione di nuovi sistemi ottici per focalizzare la radiazione XUV, porteranno alla produzione di impulsi ad attosecondi con energie che vanno da poche decine di nano joule fino a pochi millijoule.

La produzione di impulsi intensi ad attosecondi permetterà di esplorare il campo dell'ottica non lineare nella regione dell'estremo ultravioletto e permetterà di osservare i fenomeni ultraveloci con maggiore risoluzione temporale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Lucchini, Molecular dynamics imaging by attosecond pulses Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano (2011).
- [2] M. Devido, Attosecond Pulse Generation and Application to the Study of Ultrafast Electron Dynamics in Molecules, Master Thesis, Politecnico di Milano (2013).
- [3] G. Sansone, L. Poletto, and M. Nisoli, “High-energy attosecond light sources,” *Nat. Photonics* **5**(11), 655–663 (2011).
- [4] F. Krausz and M. Ivanov, “Attosecond physics,” *Rev. Mod. Phys.* **81**(1), 163–234 (2009).
- [5] M. Nisoli, G. Sansone, New frontiers in attosecond science, *Prog. in Quantum Elect.* **33**, 17-59 (2009).
- [6] H. Mashiko, A. Suda, and K. Midorikawa, “Focusing coherent soft-x-ray radiation to a micrometer spot size with an intensity of 1014 W/cm²,” *Opt. Lett.* **29**(16), 1927–1929 (2004).
- [7] C. Valentin, D. Douillet, S. Kazamias, Th. Lefrou, G. Grillon, F. Augé, G. Mullot, Ph. Balcou, P. Mercère, and Ph. Zeitoun, “Imaging and quality assessment of high-harmonic focal spots,” *Opt. Lett.* **28**(12), 1049–1051 (2003).
- [8] H. Mashiko, A. Suda, and K. Midorikawa, “Focusing multiple high-order harmonics in the extreme-ultraviolet and soft-x-ray regions by a platinum-coated ellipsoidal mirror,” *Appl. Opt.* **45**(3), 573–577 (2006).
- [9] T. Shimizu, T. Okino, K. Furusawa, H. Hasegawa, Y. Nabekawa, K. Yamanouchi, and K. Midorikawa, “Observation and analysis of an interferometric autocorrelation trace of an attosecond pulse train,” *Phys. Rev. A* **75**(3), 033817 (2007).
- [10] D. E. Aspnes, “Imaging performance of mirror pairs for grazing-incidence applications: a comparison,” *Appl. Opt.* **21**(14), 2642–2646 (1982).
- [11] A. M. Malvezzi and G. Tondello, “Grazing incidence toroidal mirror pairs in imaging and spectroscopic applications,” *Appl. Opt.* **22**(16), 2444–2447 (1983).
- [12] H. Haber, “The torus grating,” *J. Opt. Soc. Am.* **40**(3), 153–165 (1950).
- [13] L. Poletto, F. Frassetto, F. Calegari, S. Anumula, A. Trabattoni, and M. Nisoli, “Micro-focusing of attosecond pulses by grazing incidence toroidal mirrors”, *Opt. Express* **20**(5), 4525–4536 (2013).
- [14] M. V. Ammosov, N. B. Delone, V. P. Krafinov, Tunnel ionization of complex atoms and of atomic ions in an alternating electromagnetic field, *Sov. Phys. JEPT* **64**, 1191 (1986)
- [15] P. M. Paul, E. S. Toma, P. Berger, G. Mullot, F. Auge, Observation of a train of attosecond pulses from high harmonic generation, *Science* **292**, 1689-1692 (2001)
- [16] P. B. Corkum, N. H. Burnett, M. Y. Ivanov, Subfemtosecond pulses, *Opt. Lett.* **19**, 1870-1872 (1994).
- [17] I. J. Sola, E. Mevel, L. Elouga, E. Constant, V. Strelkov, L. Poletto, P. Villorresi, E. Benedetti, J. P. Caumes, S. Stagira, C. Vozzi, G. Sansone, M. Nisoli, Controlling attosecond electron dynamics by phase-stabilized polarization gating, *Nature Phys.* **2**, 319-322 (2006)
- [18] G. Farkas, Toth, Proposal for attosecond light pulse generation using laser induced multiple-harmonic conversion processes in rare gases, *Phys. Lett. A* **168**, 447-450 (1992)
- [19] V. Strelkov, A. Za _r, O. Tcherbakov, R. Lopez-Martens, E. Cormier, E. Mevel, E. Constant, Single attosecond pulse production with an ellipticity- modulated driving IR pulse, *Journ. Of Physics B* **38**, (2005)

- [20] Z. Chang, Controlling attosecond pulse generation with a double optical gating, *Phys. Rev. A* 76, 051403(R), (2007)
- [21] S. Gilbertson, Y. Wu, S. D. Kahn, M. Chini, K. Zhao, X. Feng, Z. Chang, Isolated attosecond pulse generation using multicycle pulses directly from a laser amplifier, *Phys. Rev. A* 81, 043810 (2010)
- [22] X. Feng, S. Gilbertson, H. Mashiko, H. Wang, S. D. Khan, M. Chini, Y. Wu, K. Zhao, Z. Chang, Generation of isolated attosecond pulses with 20 to 28 femtosecond lasers, *Phys. Rev. Lett.* 103, 183901 (2009)
- [23] J. Gagnon, Attosecond electron spectroscopy theory and its applications, Ph.D. Thesis, Ludwig Maximilians Universit, Munchen (2010)
- [24] Holland JH (1975) *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, MI
- [25] Beyer HG, Schwefel HP (2002) *Evolution strategies - a comprehensive introduction*, Natural Computing
- [26] Holland JH (1992) *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. MIT Press
- [27] Deb K, Agrawal S, Pratap A, Meyarivan T (2000) A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: Nsga-ii, *Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VI Conference*
- [28] Eshelman LJ, Schaffer JD (1991) Preventing premature convergence in genetic algorithms by preventing incest, *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*
- [29] Holland JH (1992) Genetic algorithms: Computer programs that evolve" in ways that resemble natural selection can solve complex problems even their creators do not fully understand, *Scientific American*

