

Università degli Studi di Bari “Aldo Moro” – Dottorato in Fisica XXXI ciclo

Relazione attività dottorato

Terzo Anno

Dottorando: *Francesco Di Lena*

Tutor: *Milena D'Angelo*
Saverio Pascazio

1 Introduzione

Durante il secondo anno di dottorato è stato realizzato il primo esperimento di Correlation Plenoptic Imaging (CPI) con luce caotica mediante l'uso di una camera (CMOS). Questo esperimento non solo ha prodotto le prime immagini bidimensionali mai ottenute con questa tecnica, ma ha anche portato la CPI a risoluzioni più elevate, avvicinandola ad applicazioni nel campo della microscopia. L'esperimento con luce caotica portato avanti durante il terzo anno di dottorato ha seguito la strada della microscopia spingendo la CPI a risoluzioni ancora più elevate. La nuova configurazione ricava le informazioni spaziali e angolari tramite immagini al primo ordine. Ciò dà la possibilità di vedere una porzione di campione prima di fare la misura di correlazione, rendendo la tecnica più facile da applicare.

In parallelo durante il secondo anno è iniziata la progettazione del setup di CPI con fotoni entangled, accompagnata da alcuni esperimenti preliminari di test della camera e dei cristalli birifrangenti a disposizione. Lo scopo della CPI con fotoni entangled è quello di estendere, in parte, i vantaggi dell'imaging quantistico in termini di Signal Noise Ratio (SNR) [1–3] alla plenottica in correlazione. La progettazione è andata avanti durante il terzo anno con misure di correlazione su un setup simile a [3] sul quale verranno “innestate” le modifiche necessarie a poter realizzare le misure plenottiche.

2 Verso la CPI ad alto SNR

L'esperimento di CPI con fotoni entangled presenta uno schema fatto in modo da avere due setup nello stesso esperimento. Il primo segue quanto fatto da Samantaray ed altri [3], mentre il secondo corrisponde al setup finale di CPI. Il sistema complessivo è studiato in modo che si possa passare da uno all'altro con modifiche non sostanziali. Il laser di pompa $\lambda = 355$ nm raggiunge un cristallo BBO dove un fotone può essere convertito in una coppia di fotoni di frequenza più bassa rispettando le condizioni di conservazione di energia ed impulso (phase matching-condition):

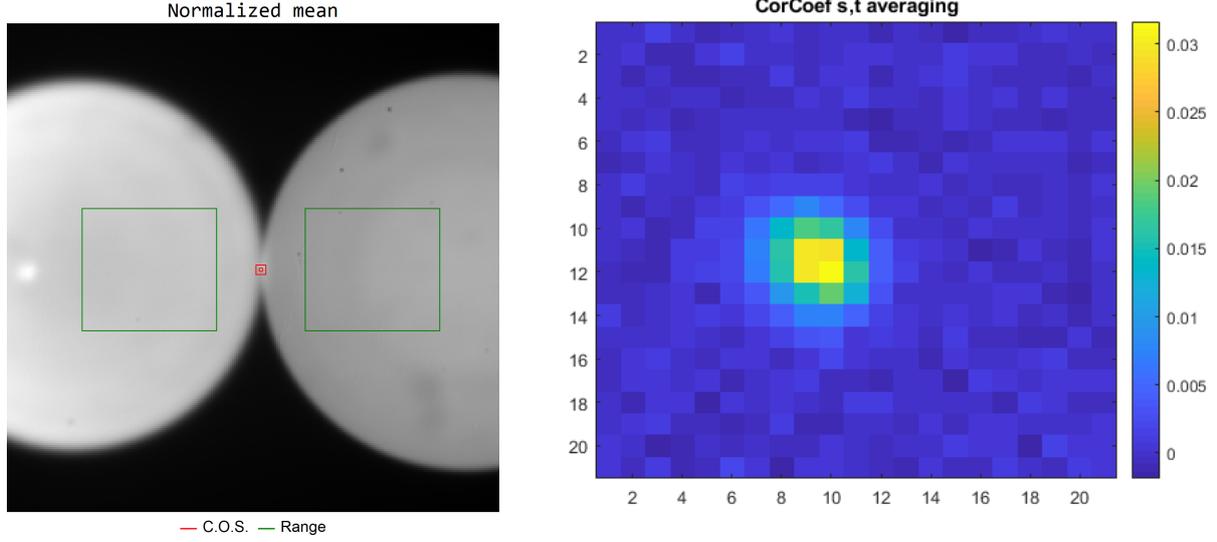


Figura 1: Misura di correlazione incrociata spaziale. A sinistra: immagine della media della misura grezza, composta da 500 fotogrammi e acquisita dalla CCD con esposizione pari a $t_{exp} = 0.1$ s. A destra: la funzione 2D rappresenta il coefficiente di correlazione di 25×25 pixel (in verde nella figura a sinistra) scelti approssimativamente in posizione simmetrica rispetto al piano del detector. Il picco rappresenta la posizione nel quale le regioni sono correlate pixel per pixel. Spostando una delle regioni oltre la deviazione standard la correlazione tra i fotoni cade a zero. Il centro di simmetria (figura a sinistra) è indicato in rosso.

$$\begin{aligned}\omega_p &= \omega_s + \omega_i \\ \mathbf{k}_p &= \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i\end{aligned}\tag{1}$$

L'asse ottico del cristallo è orientato in modo da produrre SPDC tipo II in configurazione beam like. Alle spalle del BBO, dopo un filtro passa basso, necessario per filtrare la pompa, è posizionato un doppietto acromatico di focale $f = 10$ mm. Sul piano focale di questa lente l'area di coerenza stimata è pari a $A_{ch} \simeq 5 \mu\text{m}$. Un obiettivo da microscopio sposta l'immagine del piano focale su una CCD (Andor iXon Ultra 897) i cui pixel hanno lato pari a $16 \mu\text{m}$. Poiché l'obiettivo lavora con ingrandimento $M = 5$ l'area di coerenza sul sensore raggiunge dimensioni pari $A_{ch}^{CCD} \simeq 25 \mu\text{m}$. Per evitare perdite di segnale e ridurre il rumore elettronico [1, 3], le misure sono effettuate con un binning 2×2 in modo da avere $A_{ch}^{CCD} < A_{pixel}$. La configurazione di SPDC beam like, coadiuvata da un filtro passa banda opportunamente scelto in base alle tuning curves (nel caso specifico 40 nm, cfr relazione II anno) fa sì che, nel piano focale del doppietto, le regioni di passaggio dei fotoni signal e idler siano tra loro distinte. Queste due regioni corrispondono ai due pallini in figura 1 (sinistra).

La misura in figura 1 (destra) mostra un picco di correlazione di larghezza nettamente superiore alle dimensioni del pixel e quindi alla larghezza attesa. Ciò indica che le correlazioni sono presenti, anche se allineamento e messa a fuoco non sono ancora del tutto ottimizzate.

3 Misure di CPI con luce caotica in configurazione microscopio turbulence-free

I dettagli sul setup utilizzato per l'esperimento sono contenuti nel brevetto citato nel paragrafo 4. Nel setup realizzato in laboratorio il campione emettitore di luce caotica è realizzato con un laser a singolo modo di lunghezza d'onda pari a $\lambda = 532 \text{ nm}$ incidente su un disco smerigliato rotante posto quasi a contatto con il campione vero e proprio (test target "1951 USAF"). La divergenza del fascio di luce in uscita dal disco e la focale della lente obiettivo (O) fissano l'apertura numerica a $NA = 0.3$, da cui segue una risoluzione attesa a fuoco pari a $\Delta x = 0.61 \frac{\lambda}{NA} \simeq 1 \mu\text{m}$. Sperimentalmente, visti i limiti del test target, si è potuto verificare solo che $\Delta x < 4 \mu\text{m}$, valore comunque migliore della risoluzione a fuoco dell'esperimento precedente [4] pari a $\Delta x \simeq 14 \mu\text{m}$. L'obiettivo O è costituito da una lente asferica di focale $f_O = 26 \text{ mm}$, mentre la tube lens T da una lente di focale $f_T = 175 \text{ mm}$. L'ingrandimento risulta $M = f_T/f_O = 6.73$. Dal valore di M segue che le dimensioni del pixel della camera ($6.5 \mu\text{m}$) risultano, sul piano oggetto, poco inferiori al micron. Quindi il limite di risoluzione fissato dal pixel pari a $\Delta x \simeq 2 \mu\text{m}$

Come nel precedente esperimento i due bracci del setup finiscono in porzioni diverse dello stesso sensore. Per sfruttare lo spazio disponibile su di esso, evitando sovrapposizioni di segnale, la lente L nel braccio angolare ($f_L = 100 \text{ mm}$) è stata scelta in modo da creare l'immagine dell'obiettivo O sul detector angolare con un ingrandimento pari a $M_L = 0.32$. I valori misurati sono $M = 6.9$ e $M_L = 0.33$.

In questo setup la luce che raggiunge il beam splitter (BS) fa percorsi diversi attraverso i due bracci. Per sfruttare il range dinamico della camera, al posto di un semplice beam splitter 50:50, viene utilizzato un sistema composto da una lamina d'onda $\lambda/2$ seguita da un PBS (Polarizing Beam Splitter). La lamina d'onda ruota la polarizzazione della luce proveniente campione in modo che i massimi di intensità sui due lati del sensore siano uguali. Ciò è fatto allo scopo di sfruttare a pieno il range dinamico della camera su entrambi i bracci del setup. L'intensità dei due fasci in uscita dal PBS saranno quindi diverse tra loro. Infine per affiancare i due cammini ottici in modo che finiscano sullo stesso sensore è stato utilizzato un secondo PBS allineato in modo da avere due fasci in uscita paralleli e con una distanza tra loro pari alla metà della larghezza del sensore. La trasformazione di rifocalizzazione risulta essere:

$$\rho_r = \frac{f}{f_T} \rho_a + \left(1 - \frac{f}{f_O}\right) \frac{1}{M_L} \rho_b \quad . \quad (2)$$

La figura 2 mostra un confronto tra i risultati sperimentali in [4] e le nuove misure. Le distanze tra coppie di fenditure consecutive indicate al di sotto di ogni colonna, rappresentano la risoluzione raggiunta nell'immagine. Le nuove misure, oltre ad essere meno rumorose delle precedenti risultano caratterizzate da risoluzioni più elevate. Come si vede in figura 3 l'ogget-

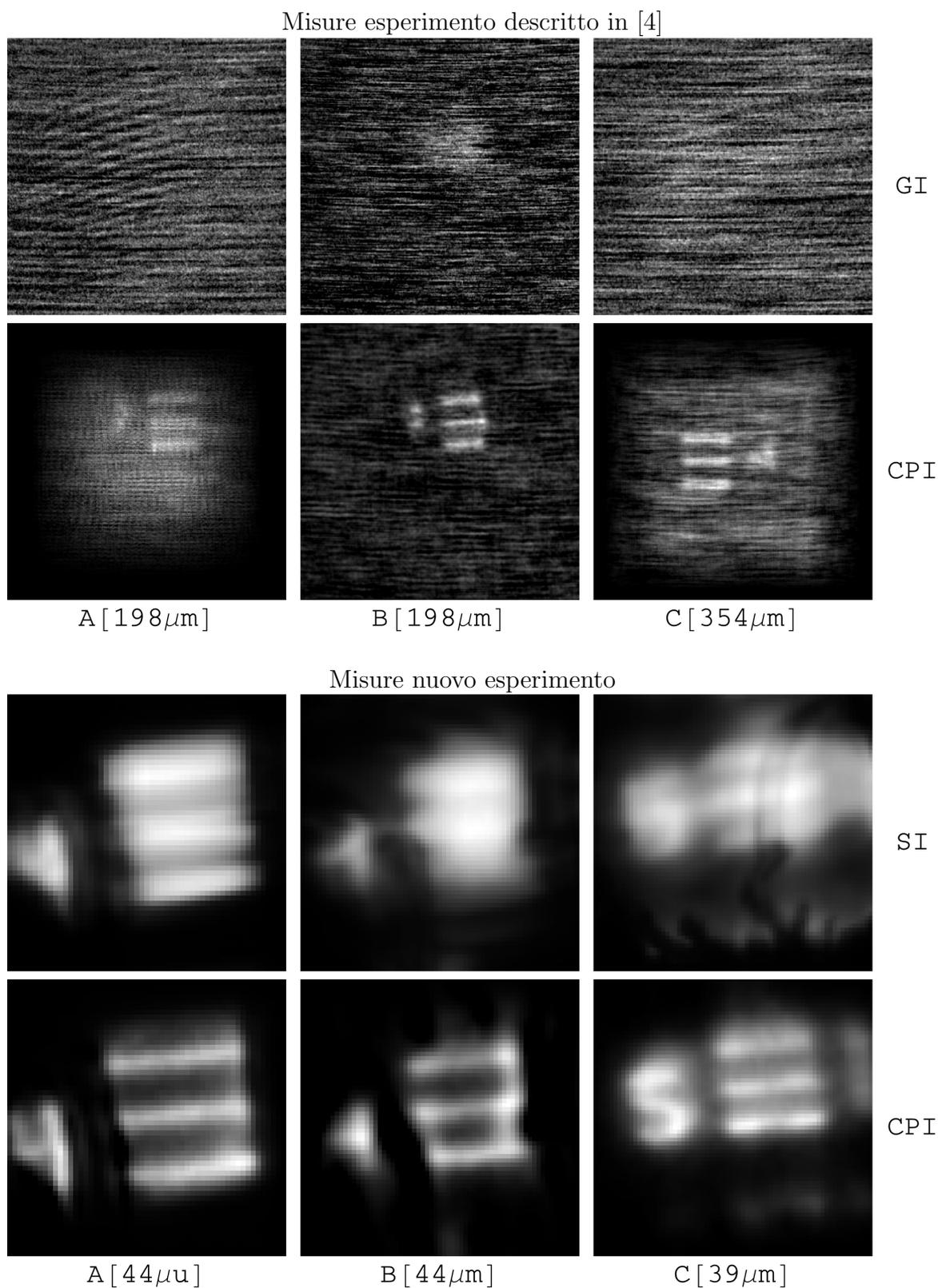


Figura 2: Confronto tra le misure [4] con quelle fatte con il nuovo setup. Tutte le immagini sono mostrate senza il post processing correttivo, per un confronto diretto tra le misure. Al di sotto di ogni colonna è indicata la distanza tra due fenditure consecutive. Nel caso dell'esperimento in [4] la prima riga è costituita da ghost imaging (GI) dell'oggetto non a fuoco, mentre la seconda contiene le misure di CPI nelle medesime condizioni sperimentali. Nel caso delle nuove misure invece, vista la natura del setup, la prima riga è costituita da immagini standard (SI).

to di dettaglio pari a $44 \mu\text{m}$ nella misura A si trova all'interno dell'intervallo di profondità di campo dell'imaging standard (SI) e della CPI, mentre nella misura B i suoi dettagli non sono risolvibili dall'imaging standard. L'oggetto da $44 \mu\text{m}$ posto a $f - f_O = -500 \mu\text{m}$ (f è la distanza dell'oggetto dalla lente O) è risolvibile solo in CPI. I limiti di profondità di campo sono fissati dalla condizione sulla visibilità $V(f - f_O, d) = 0.1$.

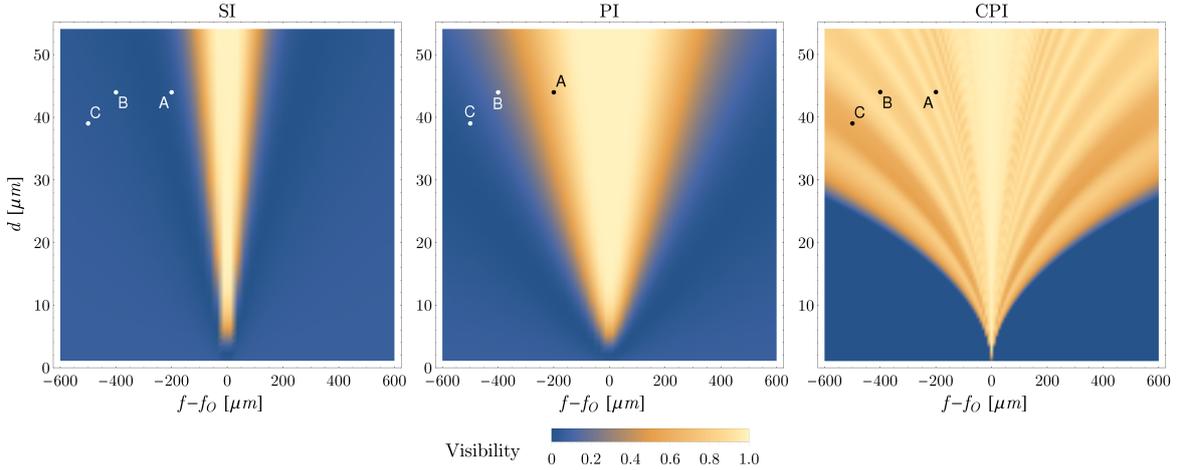


Figura 3: Analisi dell'intervallo di perfect refocusing nel caso di una doppia fenditura ($d = 2a$). Viene calcolata la visibilità dell'immagine nei casi di immagine standard (sinistra), plenottica tradizionale (centro) con $N_u = 3$ e CPI (destra) partendo dalla stessa NA dell'esperimento. I punti A, B e C corrispondono agli scenari sperimentali riportati in figura 2 (terzo e quarto rigo). In particolare la figura a sinistra (SI) corrisponde al terzo rigo di figura 2, mentre la figura di destra (CPI) corrisponde al quarto rigo della stessa figura.

4 Prospettive future

Al momento si sta studiando, sia dal punto di vista teorico che sperimentale, una camera CPI in grado di ottenere immagini plenottiche in correlazione, sfruttando le correlazioni quantistiche per ottimizzare l'SNR. Una volta completata la fase di misura delle correlazioni in modalità copropagazione, inizierà la fase finale di misure di CPI.

Riguardo il setup con luce caotica i passi successivi saranno il test della robustezza dell'immagine alla turbolenza tra il campione e l'obiettivo, la rifocalizzazione di campioni con estensione assiale superiore alla profondità di campo dell'imaging standard e la sua ricostruzione tridimensionale. In particolare riguardo il test della robustezza, sono allo studio diversi metodi per simulare sperimentalmente turbolenza tra il campione e la camera plenottica in correlazione. I passi successivi saranno: studiare la turbolenza con l'oggetto a fuoco [5–7], per poi provare a risolvere i dettagli di un campione 3D lontani dal piano oggetto, con immagine standard sfocata.

Sintesi del terzo anno

Pubblicazioni:

- ✓ Francesco V. Pepe, [Francesco Di Lena](#), Aldo Mazzilli, Eitan Edrei, Augusto Garuccio, Giuliano Scarcelli, and Milena D'Angelo, “Diffraction-limited plenoptic imaging with correlated light ” *Physical Review Letters*, vol. 119, no. 24, p. 243602, 2017.
- ✓ [Francesco Di Lena](#), Alessio Avella, Ivano Ruo-Berchera, Giuliano Scarcelli, Augusto Garuccio, and Milena D'Angelo, “Experimental demonstration of diffraction-limited plenoptic imaging” in *Quantum Technologies 2018*, vol. 10674, p. 106740H, International Society for Optics and Photonics, 2018.
- ✓ Francesco V. Pepe, [Francesco Di Lena](#), Aldo Mazzilli, Eitan Edrei, Augusto Garuccio, Giuliano Scarcelli, and Milena D'Angelo, “Experimental demonstration of diffraction-limited plenoptic imaging” in *Unconventional Optical Imaging*, vol. 10677, p. 1067707, International Society for Optics and Photonics, 2018.
- ✓ Francesco V. Pepe, [Francesco Di Lena](#), Aldo Mazzilli, Eitan Edrei, Augusto Garuccio, Giuliano Scarcelli and Milena D'Angelo, “Experimental demonstration of diffraction-limited plenoptic imaging” in *Computational Optical Sensing and Imaging*, pp. CTh2D-1, Optical Society of America, 2018.
- [Francesco Di Lena](#), Francesco V. Pepe, Augusto Garuccio, and Milena D'Angelo, “Correlation Plenoptic Imaging: An Overview” *Applied Sciences - Special Issues: “Ghost Imaging”* (articolo su invito in fase di pubblicazione).
- [Francesco Di Lena](#), Francesco Pepe, Aldo Mazzilli, Augusto Garuccio, Giuliano Scarcelli and Milena D'Angelo, “Plenoptic imaging through correlation measurement” *Nuovo Cimento C - Colloquia and Communications in Physics* (articolo su invito in fase di pubblicazione).

Brevetti:

- Device and process for the acquisition of microscopic plenoptic images with turbulence mitigation, request n. 102018000007857 of 3 August 2018 to the Italian Patent Office (pending); inventors: Milena D'Angelo, Francesco V. Pepe, Alessio Scagliola, [Francesco Di Lena](#), Augusto Garuccio.

Presentazioni a conferenza:

- ✓ “Plenoptic imaging at the diffraction limit” (presentazione su invito), The 48th Winter Colloquium of the Physics of Quantum Electronics 2018 (PQE-2018), Snowbird, Utah, USA 07 - 12 gennaio 2018.

- ✓ “Correlation plenoptic imaging with entangled photons”, SPIE Photonics Europe 2018, Strasburgo, Francia 22 - 26 aprile 2018.

Altro:

- ✓ Attività didattica in compresenza nel corso: “Laboratorio di ottica Moderna”, anno accademico 2017/2018, primo semestre.

Riferimenti bibliografici

- [1] G. Brida, M. Genovese, and I. R. Berchera, “Experimental realization of sub-shot-noise quantum imaging,” *Nature Photonics*, vol. 4, no. 4, pp. 227–230, 2010.
- [2] A. Meda, E. Losero, N. Samantaray, F. Scafirimuto, S. Pradyumna, A. Avella, I. Ruo-Berchera, and M. Genovese, “Photon-number correlation for quantum enhanced imaging and sensing,” *Journal of Optics*, vol. 19, no. 094002, p. 094002, 2017.
- [3] N. Samantaray, I. Ruo-Berchera, A. Meda, and M. Genovese, “Realization of the first sub-shot-noise wide field microscope,” *Light: Science & Applications*, vol. 6, no. 7, p. e17005, 2017.
- [4] F. V. Pepe, F. Di Lena, A. Mazzilli, E. Edrei, A. Garuccio, G. Scarcelli, and M. D’Angelo, “Diffraction-limited plenoptic imaging with correlated light,” *Physical Review Letters*, vol. 119, no. 24, p. 243602, 2017.
- [5] R. E. Meyers, K. S. Deacon, and Y. Shih, “Turbulence-free ghost imaging,” *Applied Physics Letters*, vol. 98, no. 11, p. 111115, 2011.
- [6] R. E. Meyers, K. S. Deacon, and Y. Shih, “Positive-negative turbulence-free ghost imaging,” *Applied Physics Letters*, vol. 100, no. 13, p. 131114, 2012.
- [7] Y. Shih, “The physics of turbulence-free ghost imaging,” *Technologies*, vol. 4, no. 4, p. 39, 2016.