

Incontri di Orientamento Consapevole
Bari, 23 Febbraio 2022



Imaging quantistico: la scienza che vede
lontano ... anche quando non guarda
Posso fare una foto puntando al sole?



Milena D'Angelo

Dipartimento Interat. di Fisica - Università degli Studi di Bari

INFN sez. Bari



UNIVERSITÀ
degli Studi di Bari
ALDO MORO

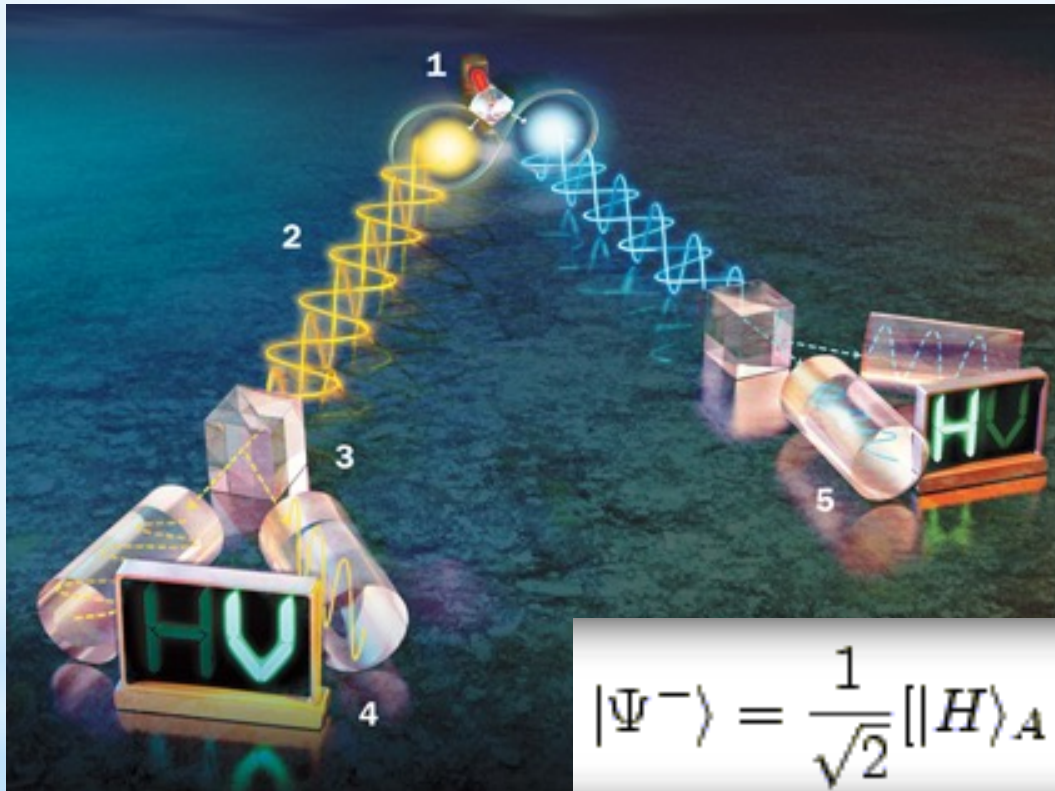
Meccanica quantistica, ma cosa vuoi farmi credere?

Il concetto di sovrapposizione coerente



$$|\Psi\rangle = (|\text{gatto vivo}\rangle + |\text{gatto morto}\rangle) / \sqrt{2}$$

e c'è di più: l'inseparabilità, o entanglement



$$|\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [|H\rangle_A |V\rangle_B - |V\rangle_A |H\rangle_B]$$

Due sistemi fisici entangled perdono la propria individualità:
lo stato del singolo sistema non è definito!

Molti problemi fondamentali



Can quantum mechanics be considered complete?



If you think you understand quantum mechanics, you do not understand quantum mechanics

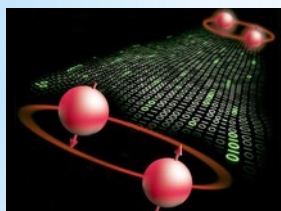
Entanglement: dalla fisica fondamentale alla 2° rivoluzione quantistica



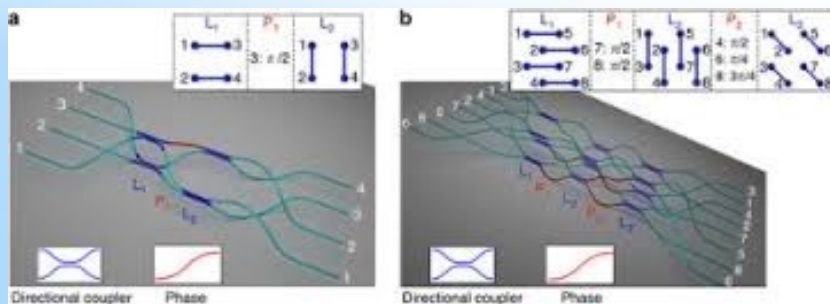
doi:10.1038/nature11472

Quantum teleportation over 143 kilometres using active feed-forward

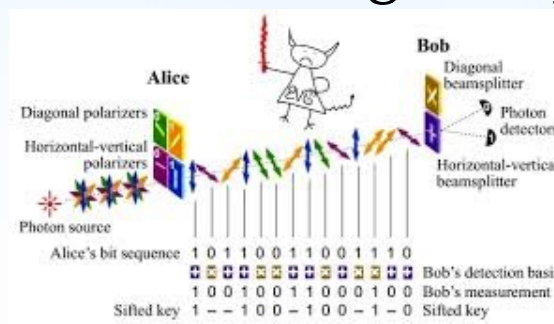
Xiao-Song Ma^{1,2*}, Thomas Herbst^{1,2}, Thomas Scheidl¹, Bernhard Wittmann^{1,2}, Alexandra Mech^{1,2}, Johannes K. Ruit¹, Rupert Ursin¹ & Anton Zeilinger^{1,2}



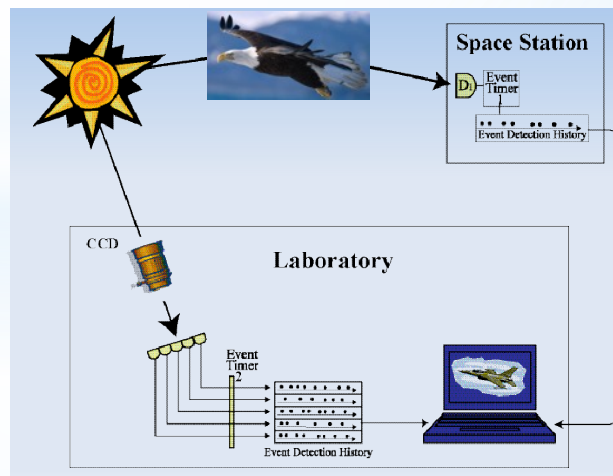
Computer quantistico



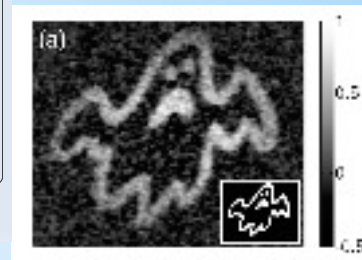
Crittografia quantistica



Imaging quantistico



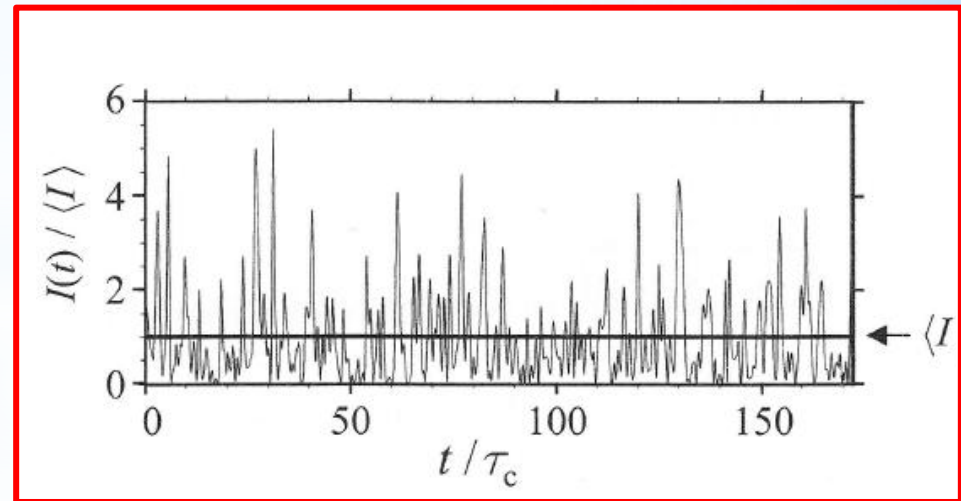
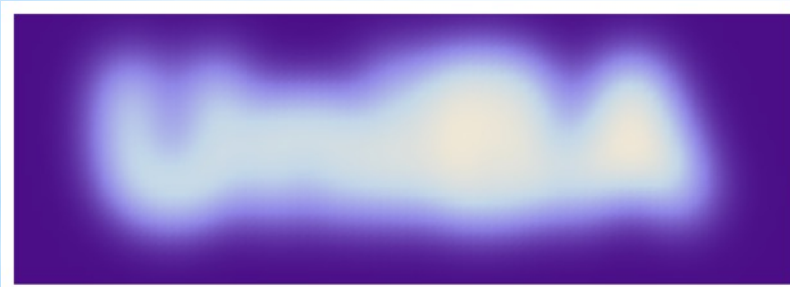
"ghost" imaging





Imaging quantistico

La scienza che vede lontano ... anche quando non guarda

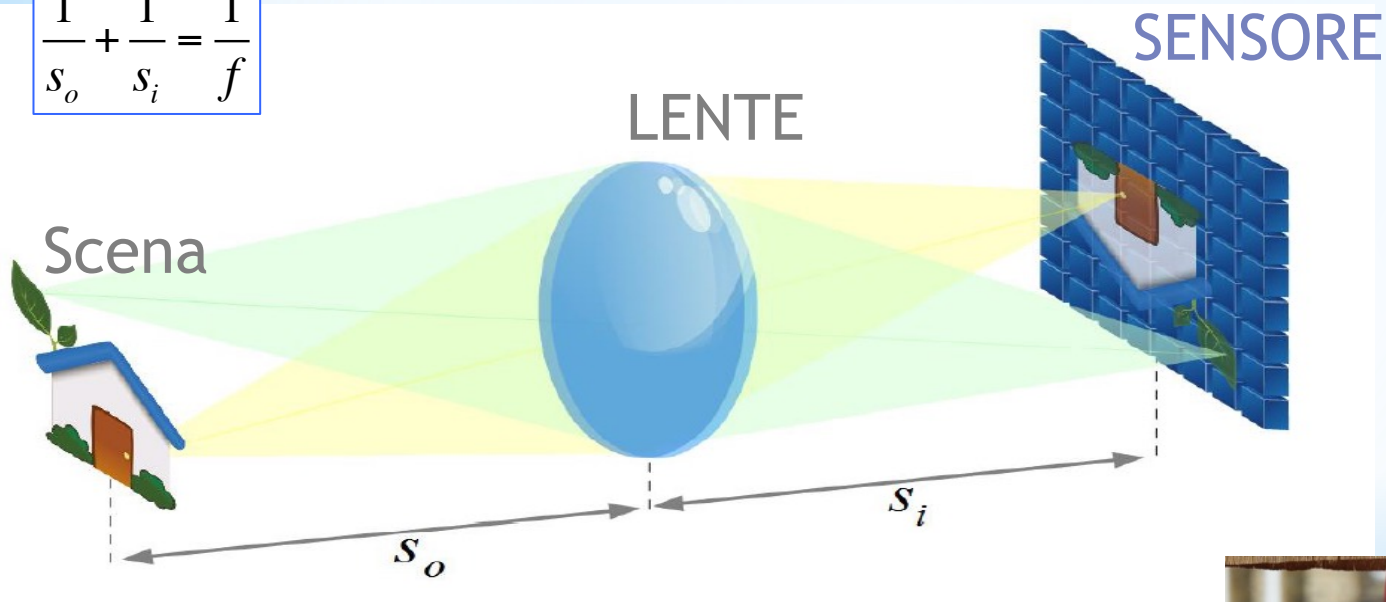


Una fotografia sfocata e una sorgente luminosa rumorosa
non sono da buttar via ... anzi, sono ricche di informazione
... l'imaging quantistico consente di utilizzarla al meglio

Imaging standard

Lente = **strumento per focalizzare** → corrispondenza punto-punto tra l'oggetto e **//** piano immagine

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}$$

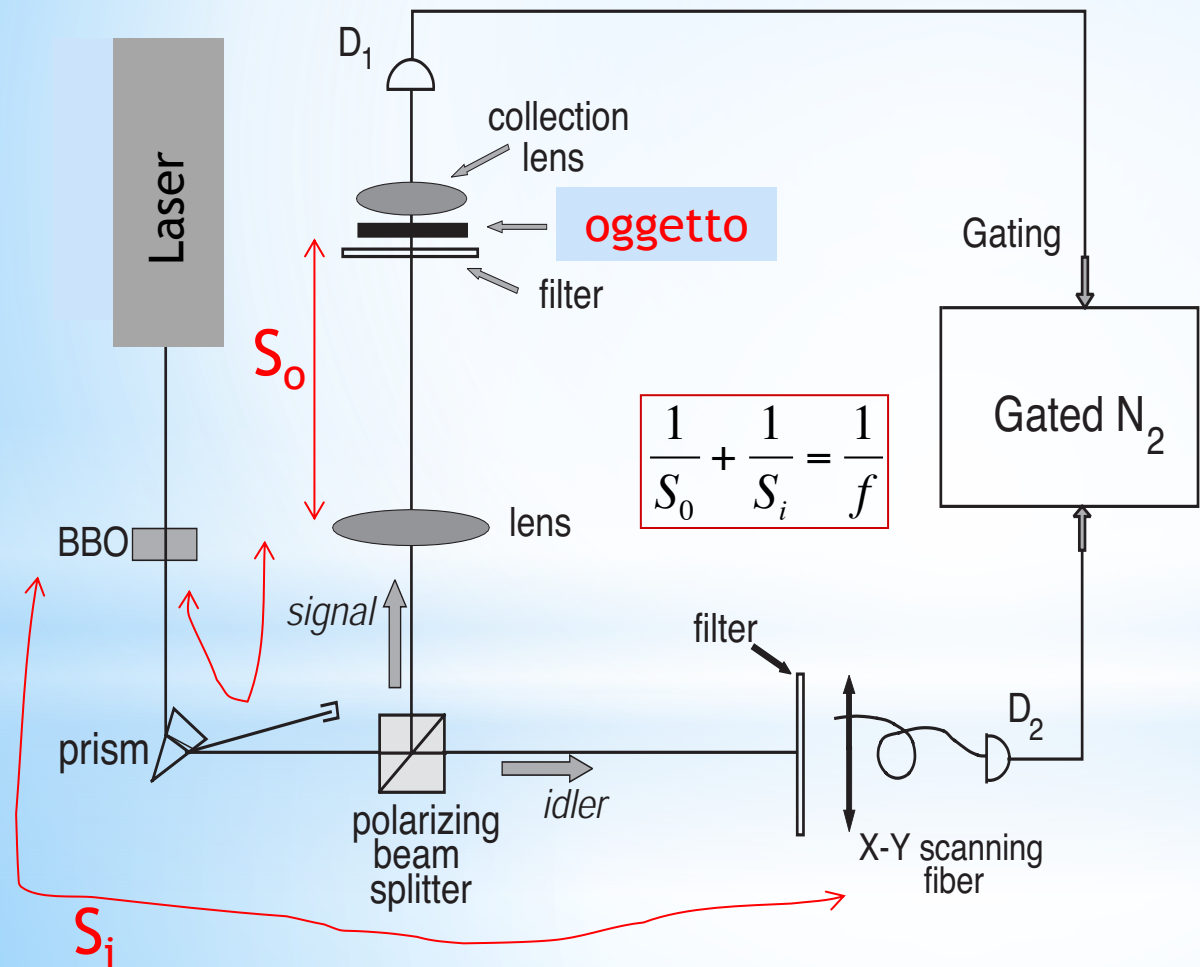


No info sulla
direzione dei raggi
luminosi !

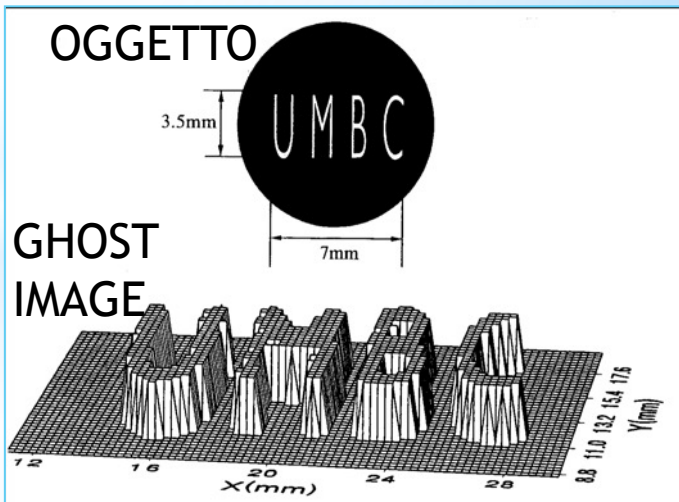
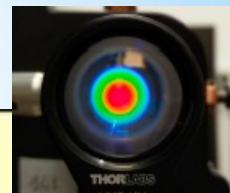
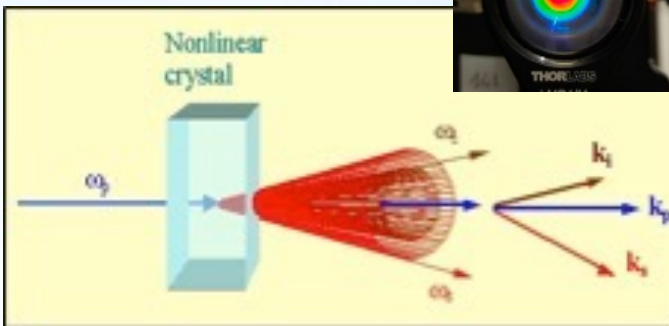
Oggetti al di fuori della profondità di fuoco appaiono sfocati



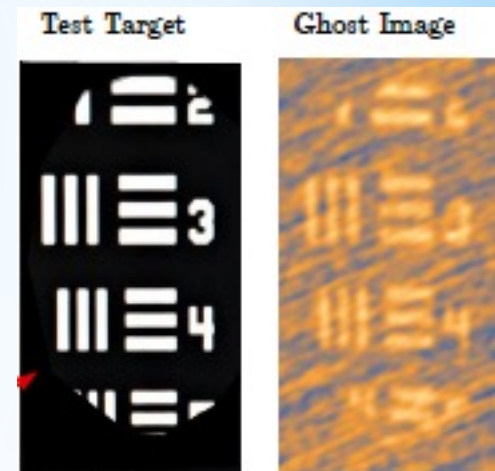
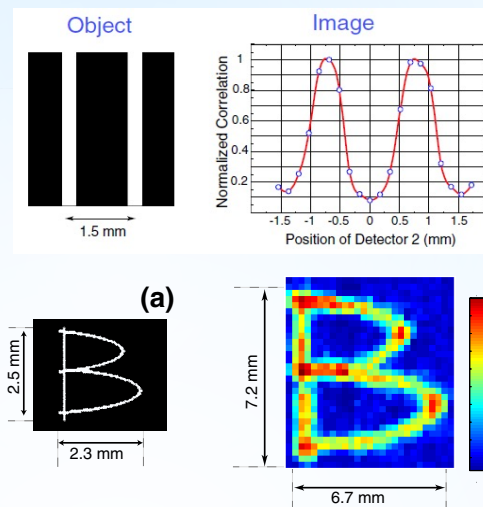
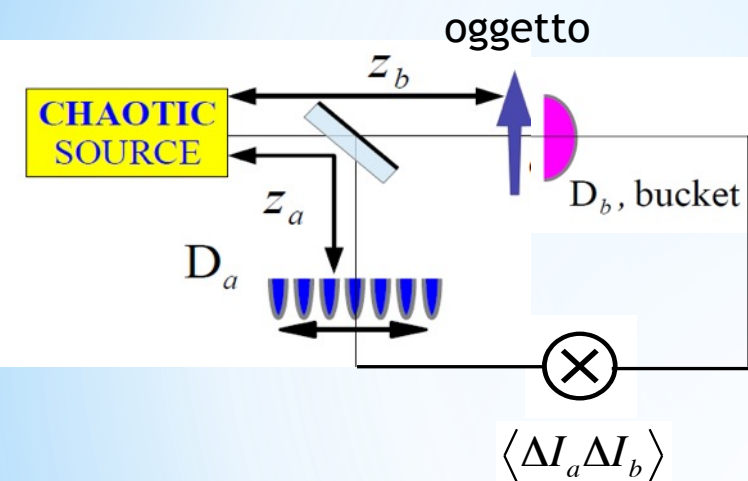
Il 1° esperimento di imaging quantistico: “ghost” imaging con fotoni entangled



Fotoni entangled



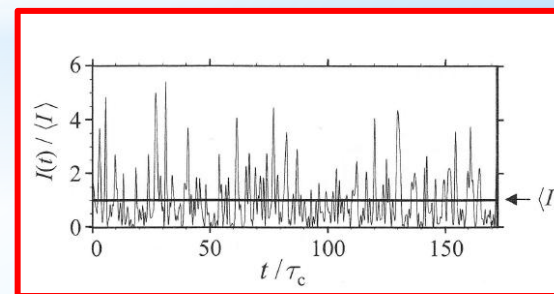
10 anni dopo: Ghost imaging senza lenti



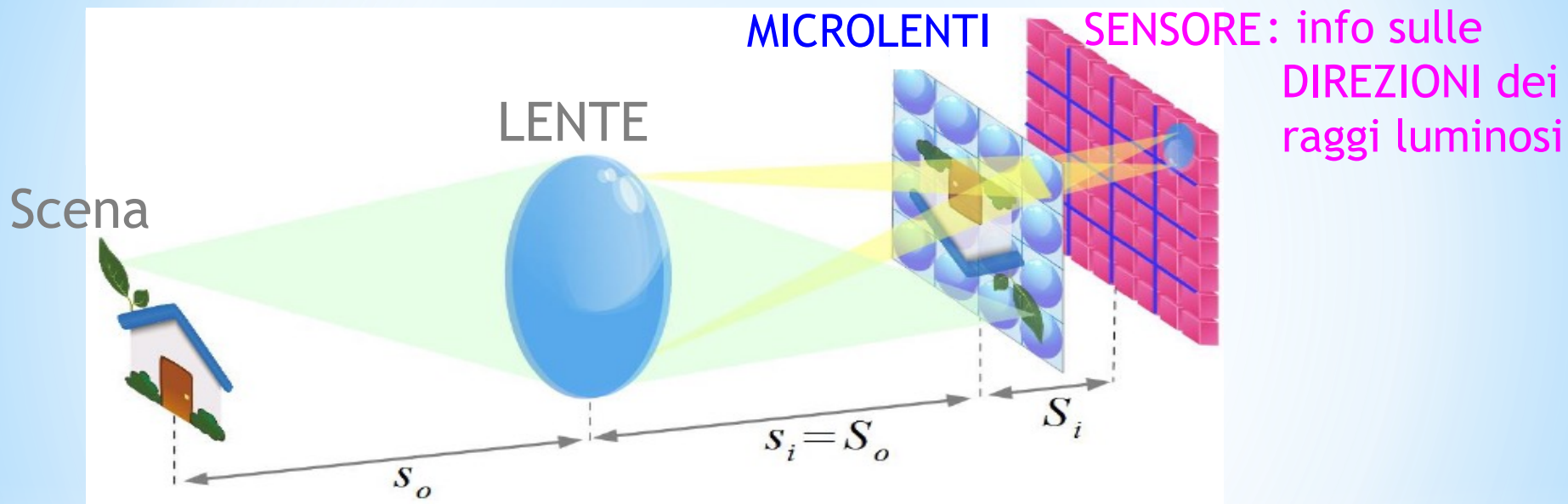
Sorgente di luce caotica = "strumento" per focalizzare (mediante la misura di correlazioni!) $\rightarrow$ corrispondenza punto-punto tra l'oggetto e *IL piano della "ghost" image*: $z_b = z_a$

No chaos $\rightarrow$ no immagine!

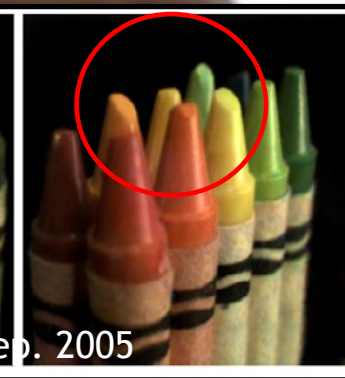
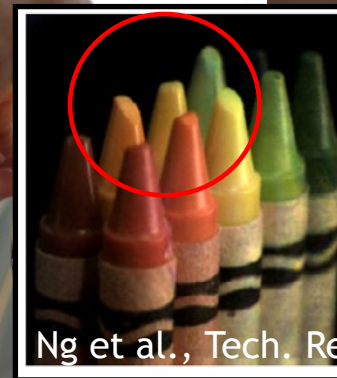
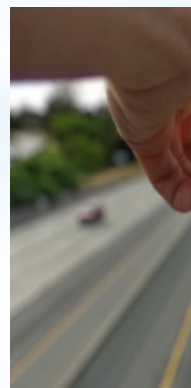
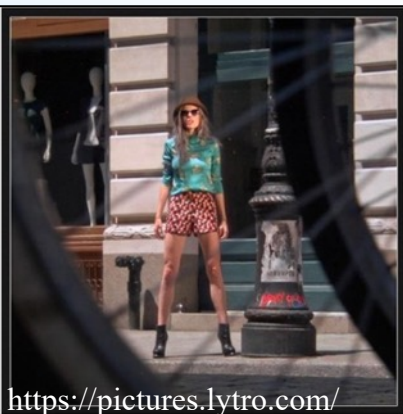
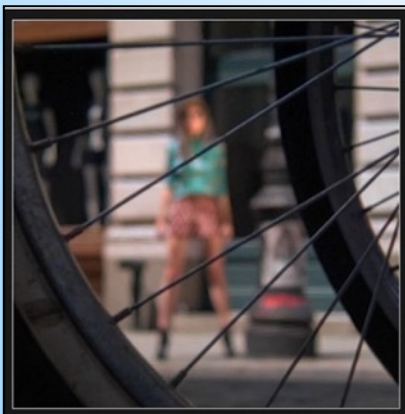
Chaos = **fluttuazioni di intensità** $\rightarrow$ fasci correlati



Fotografia plenottica (o lightfield)



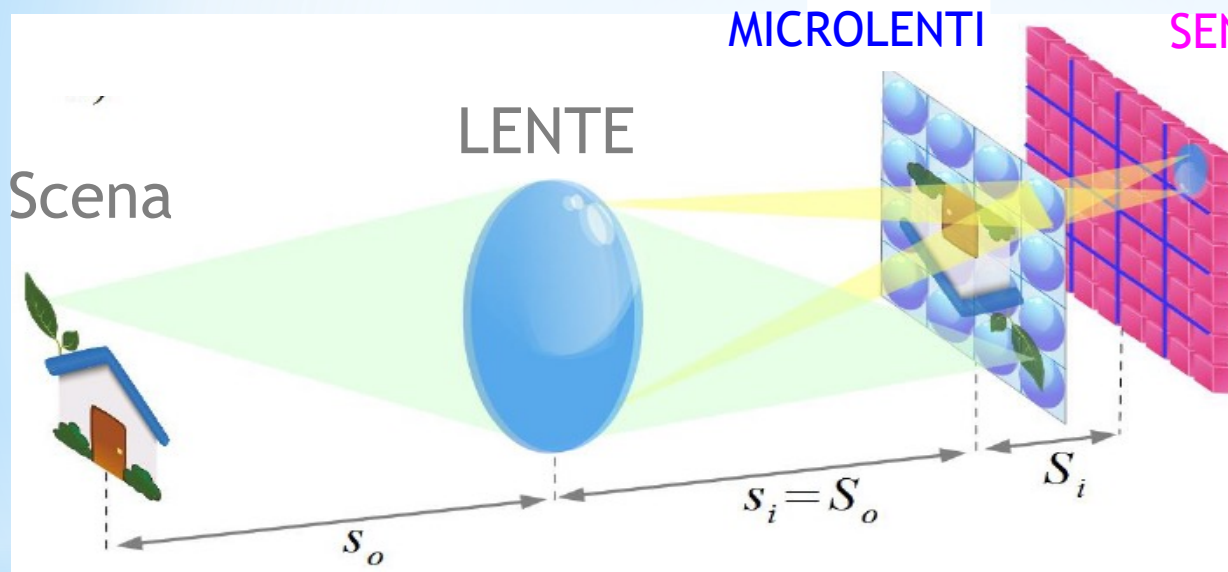
Consente di rifocalizzare le immagini ... e di cambiare il punto di vista



Ng et al., Tech. Rep. 2005

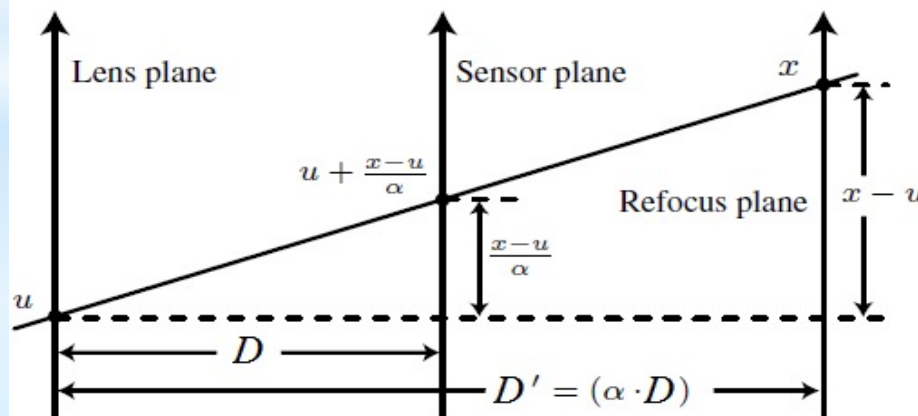
Fotografia plenottica: principio di funzionamento

Lippman (1908), Adelson and Wang (1992), Ng [2005]



SENSORE : info sulle
DIREZIONI dei
raggi luminosi

Tracciamento dei raggi
→ rifocalizzazione



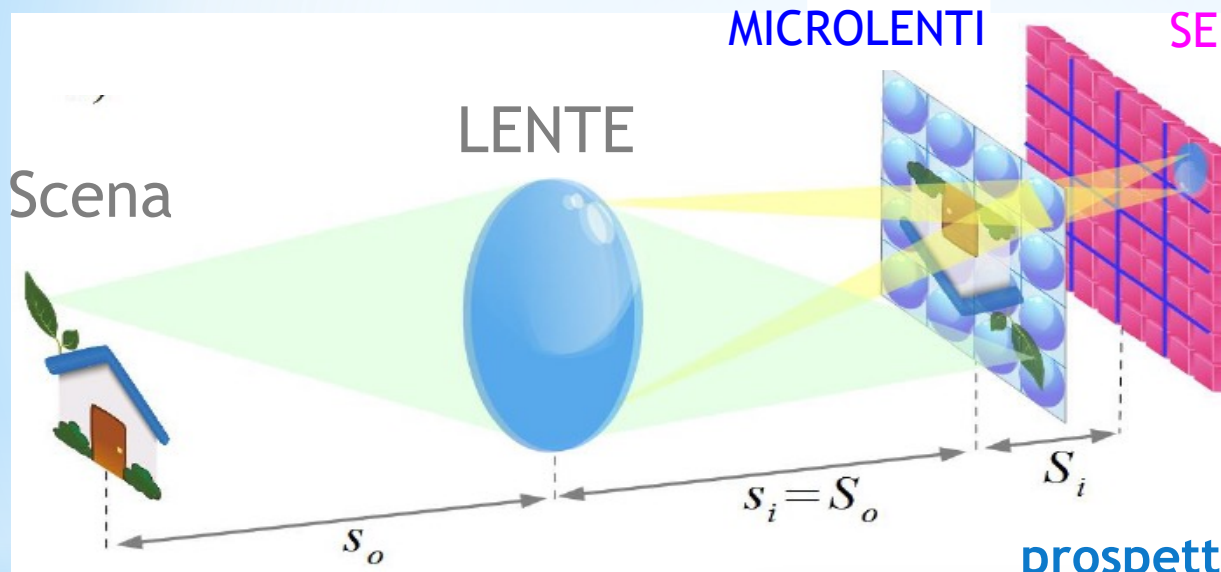
$$L_{\alpha D}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = L_D\left(\frac{\mathbf{x}}{\alpha} + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)\mathbf{u}, \mathbf{u}\right)$$

Rifocalizzazione:

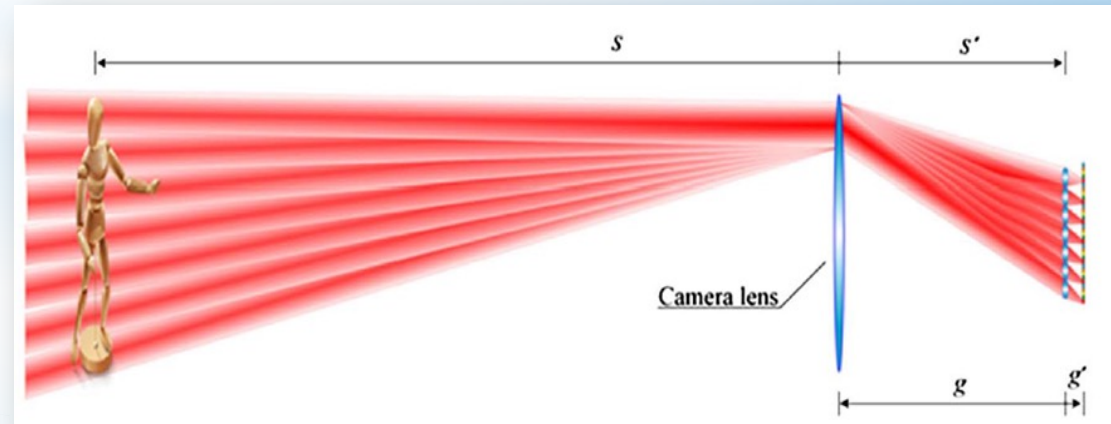
$$I_{\alpha D}(\mathbf{x}) \propto \int L_{\alpha D}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) d^2 u$$

Fotografia plenottica: principio di funzionamento

Lippman (1908), Adelson and Wang (1992), Ng [2005]

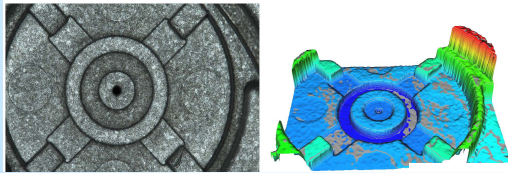
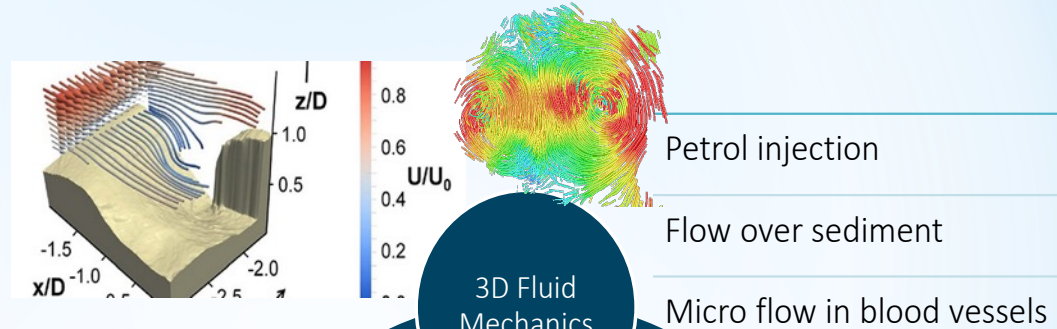


Acquisizione parallela di prospettive diverse → Imaging 3D



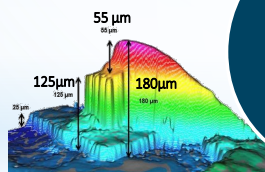
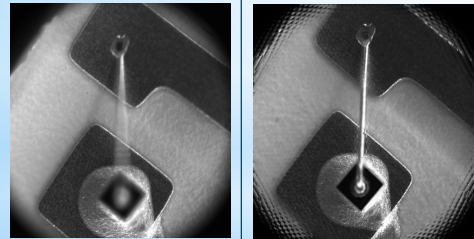
Fotografia plenottica: Applicazioni

www.raytrix.de/



Standard 4MP Camera

Raytrix Lightfield Camera R5μ

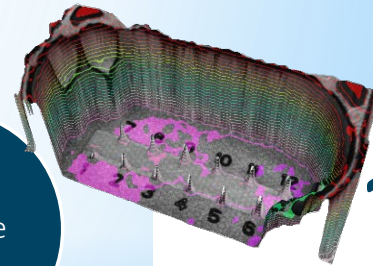


3D
Microscopy



www.raytrix.de/

3D
Machine
Vision

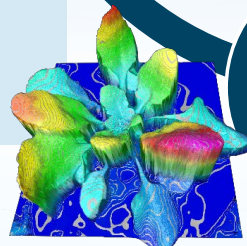


Connector pin inspection

Surface inspection

Contaminations in Glass

3D Plant
Analysis



Plant breeding

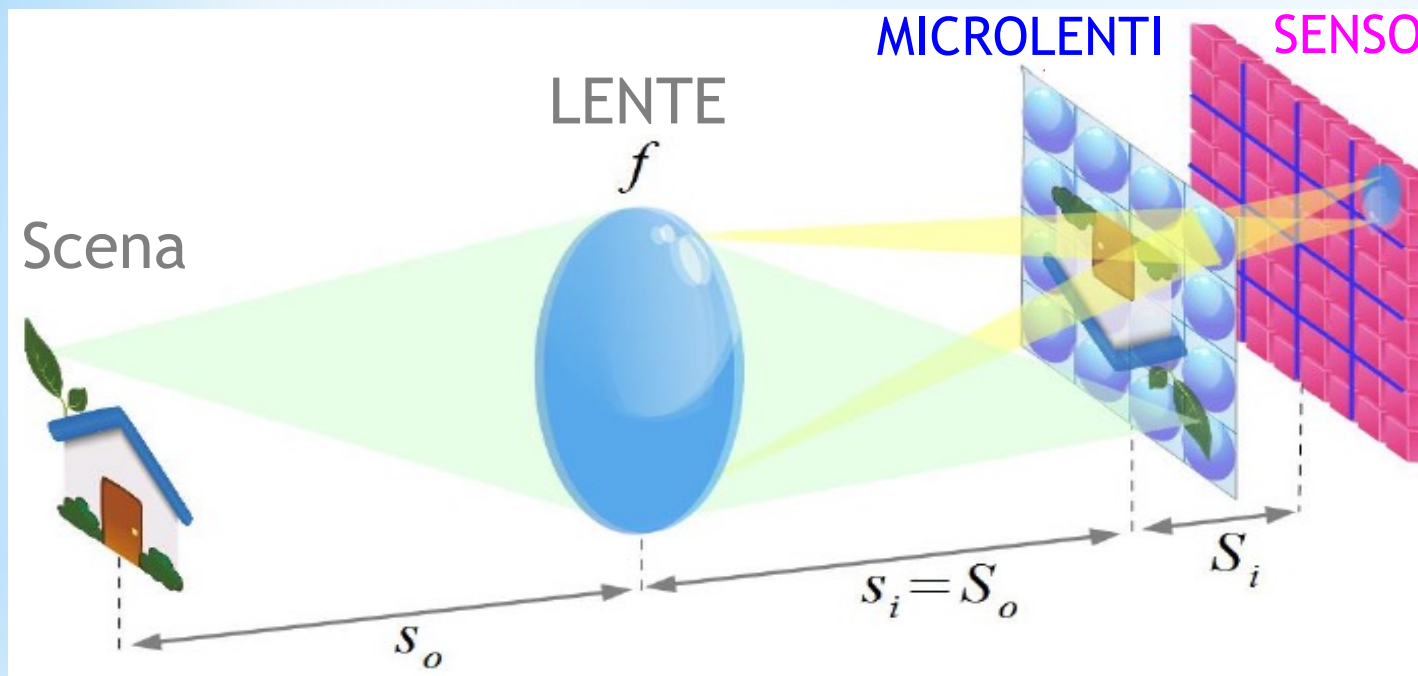
Picking

Weeding

R. Prevedel: Nature Meth. 2014 & 2019

- Imaging 3D dell'attività neuronale
- Imaging 3D di processi biologici veloci

Limiti della fotografia plenottica

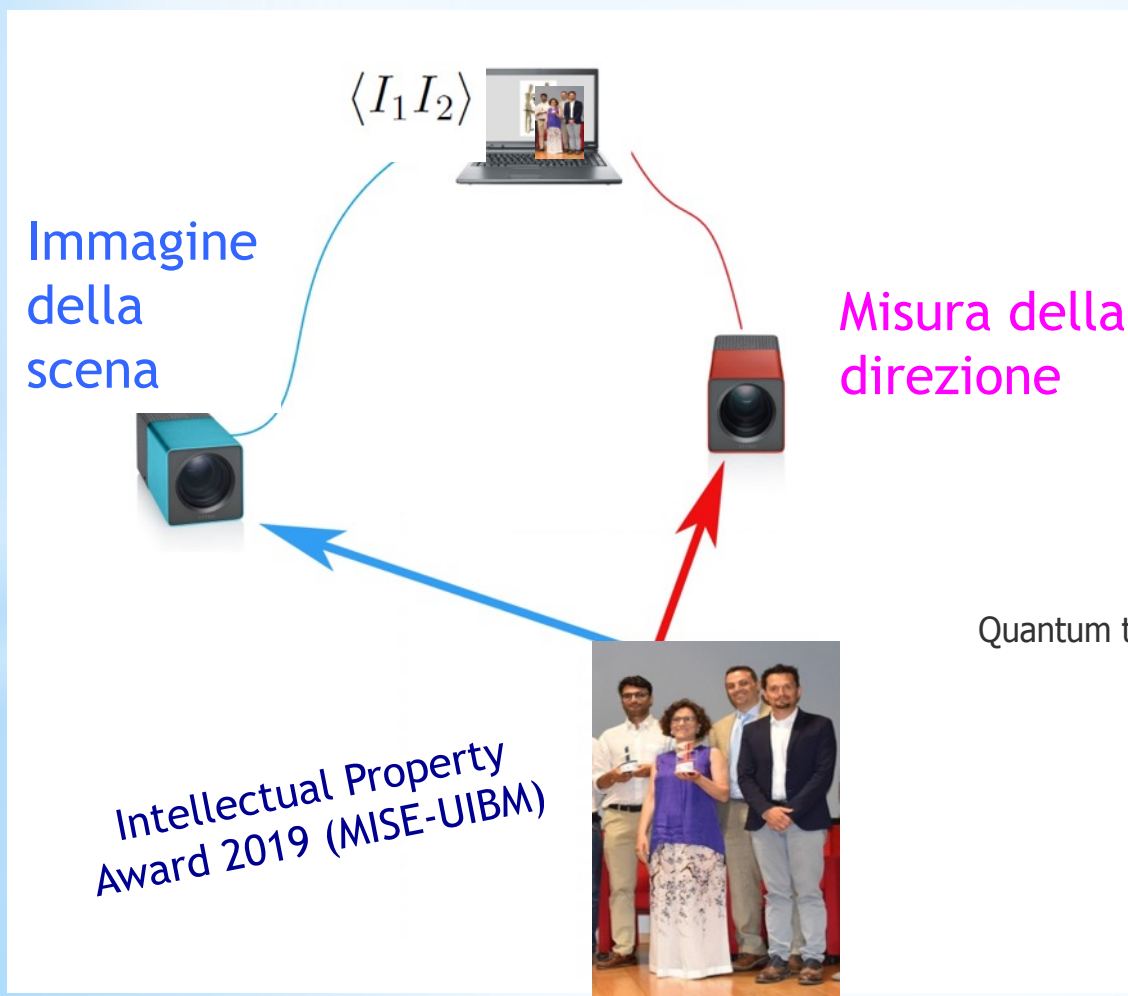


→ una camera da 16 Megapixel si comporta come se avesse solo 4 Megapixel ... e il cambio di prospettiva è molto sacrificato ☹

L'imaging quantistico può aiutare ? 😊

* Imaging plenottico in correlazione

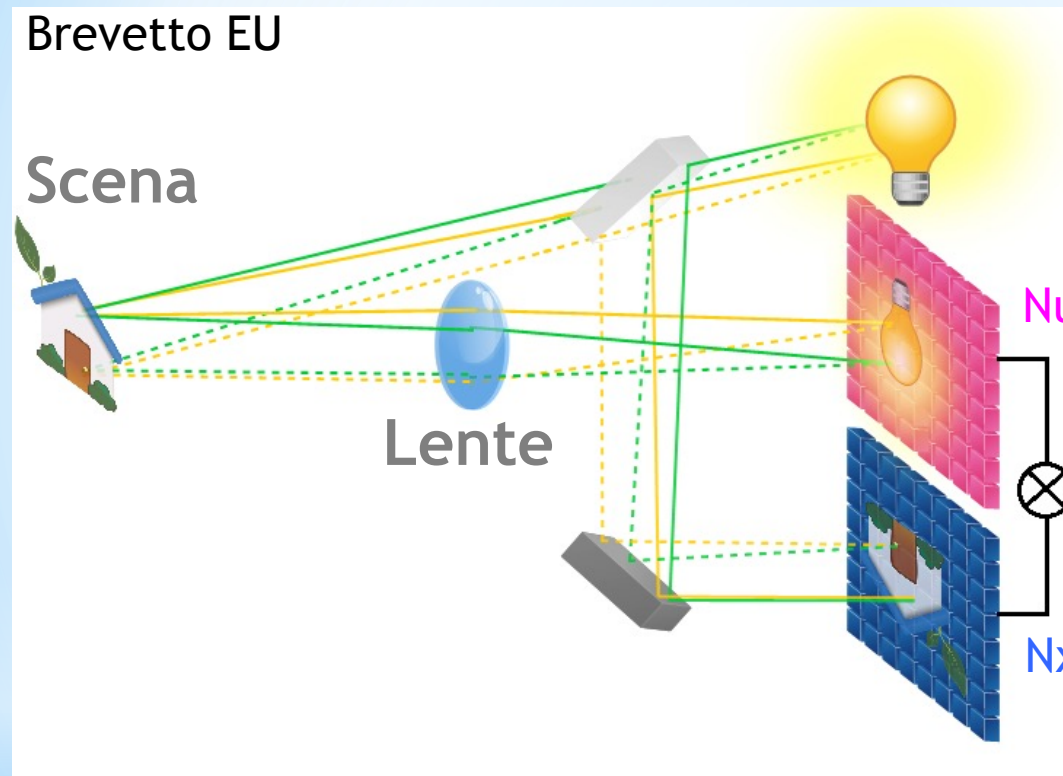
Sfrutta le correlazioni quantistiche della luce per disaccoppiare l'immagine dalla misura della direzione dei raggi luminosi!



Quantum technology: more security and improved imaging



* Imaging plenottico in correlazione



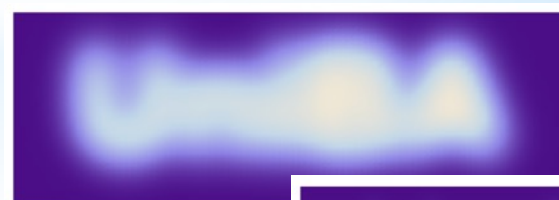
Sorgente di luce
entangled/caotica

SENSORE 1 → direzione
dei raggi di luce

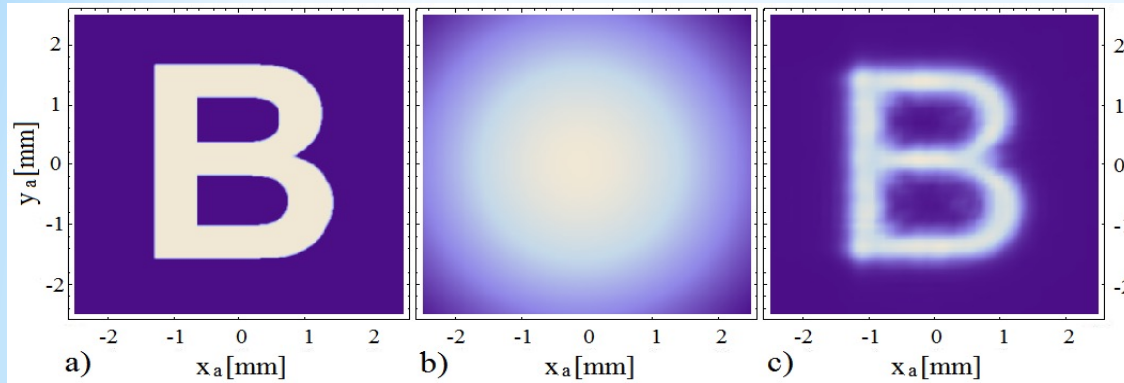
SENSORE 2 → immagine
"fantasma" della scena

microlenti → 1 lente !

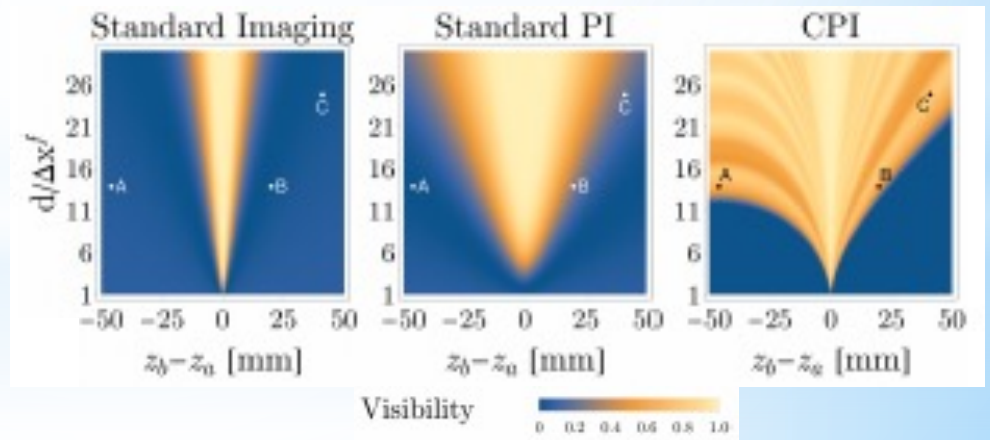
Consente di **rifocalizzare** immagini sfocate,
con la massima risoluzione possibile & un
cambio di prospettiva molto ampio



CPI - alcuni risultati



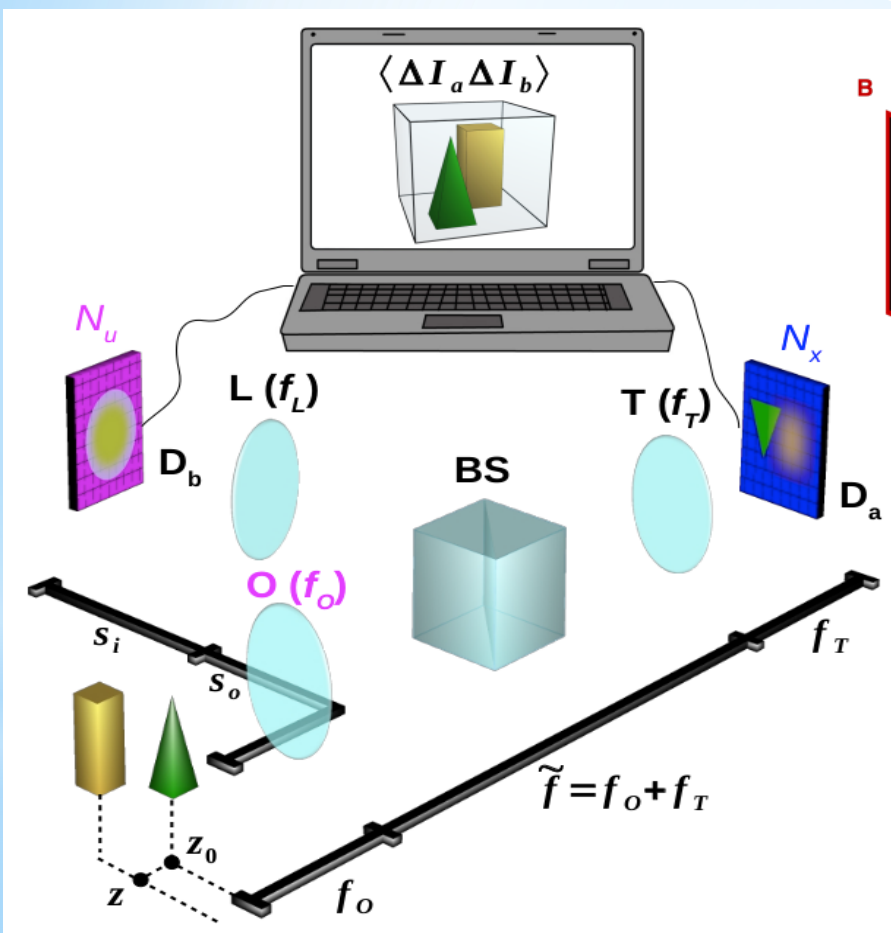
CPI ha profondità di fuoco 40 volte superiore ad un'immagine plenottica standard, con uguale risoluzione !!!



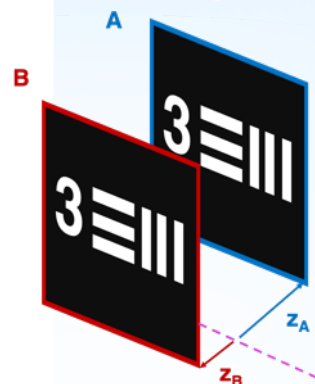
CPI raggiunge profondità di fuoco maggiori, senza sacrificare la risoluzione !!

Microscopia plenottica in correlazione

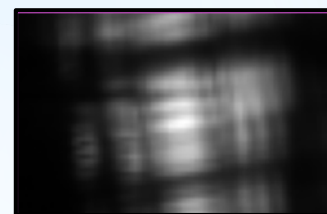
Brevetto 2018 + 2 articoli



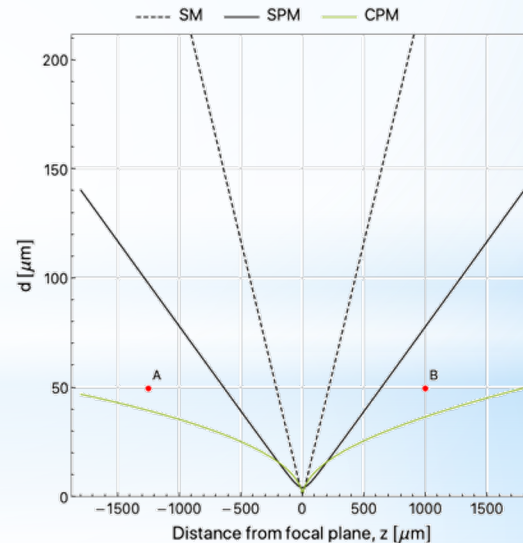
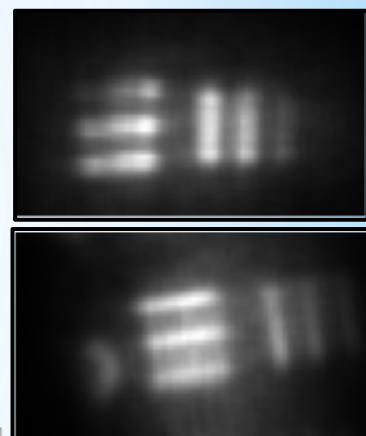
3D Sample



Acquired



REFOCUSED



6 times higher resolution, at fixed DOF (@ $z = 1250 \mu\text{m}$)
6 times larger DOF, at fixed resolution (@ $d = 50 \mu\text{m}$)

Microscopia plenottica in correlazione

Brevetto 2018 + 2 articoli

Amido in gel (campione 3D: 1 mm³):

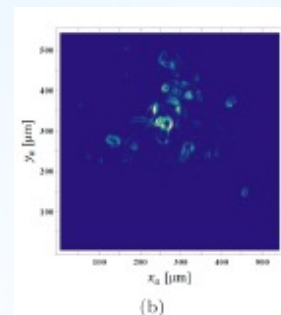
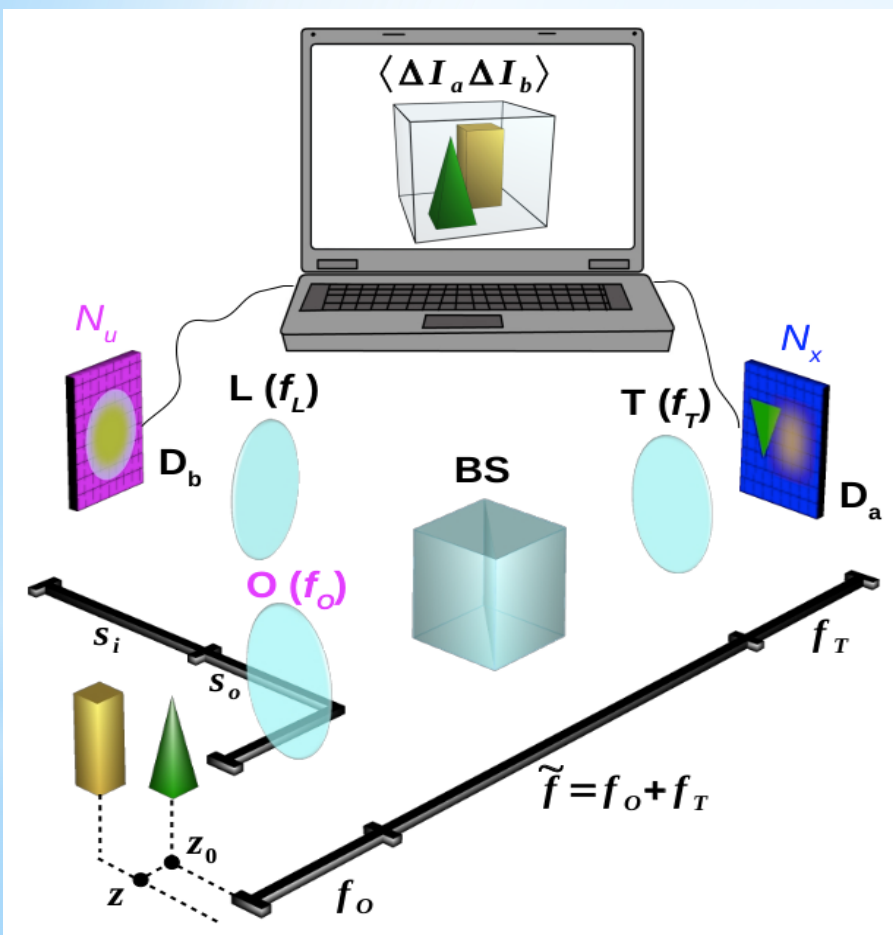


Immagine
acquisita

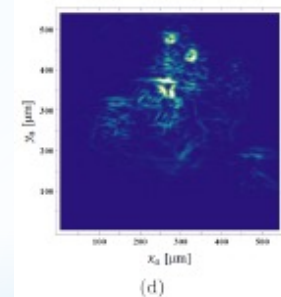


Immagine
rifocalizzata a
-280 μm

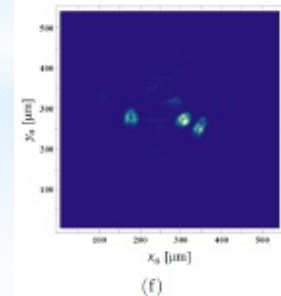
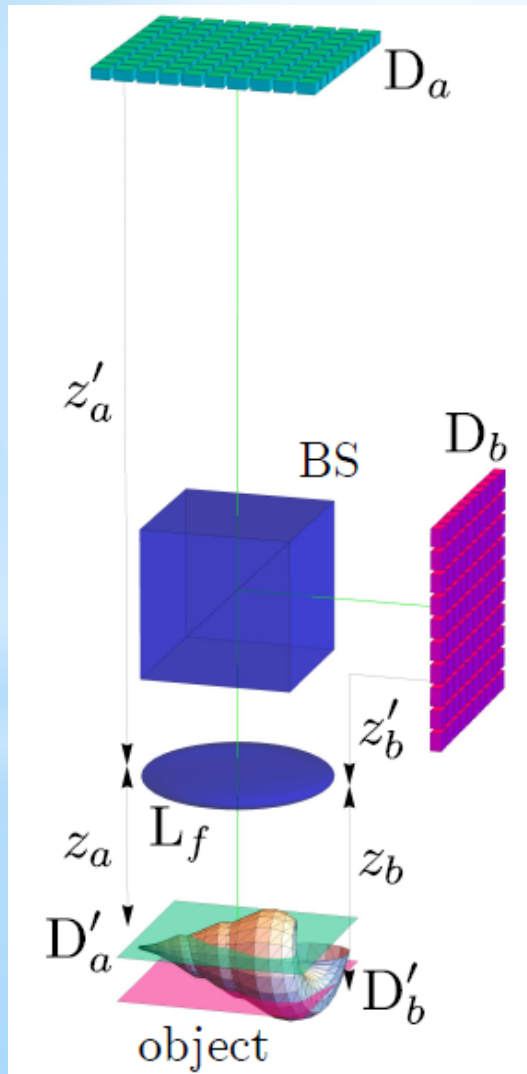


Immagine
rifocalizzata a
+350 μm

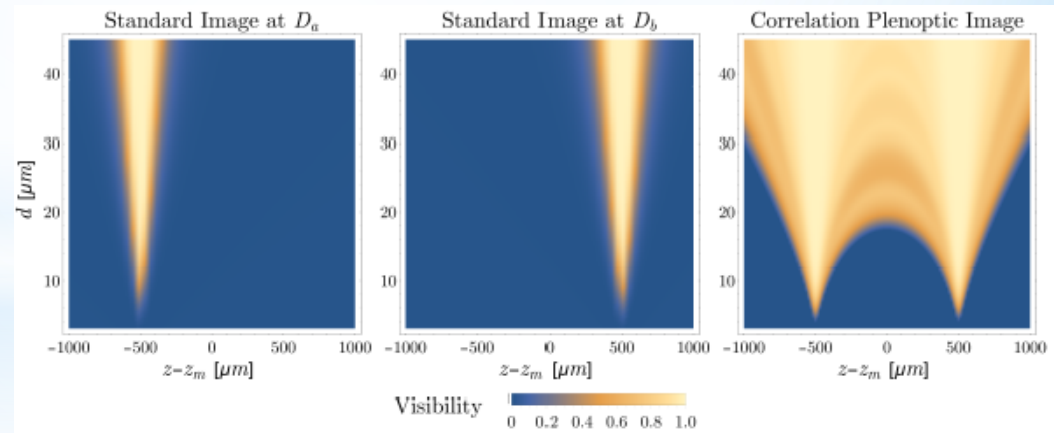
Grani: 20 μm

Imaging plenottico in correlazione tra piani arbitrari

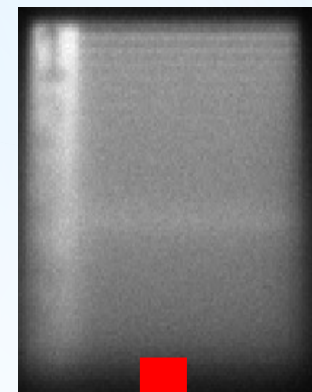
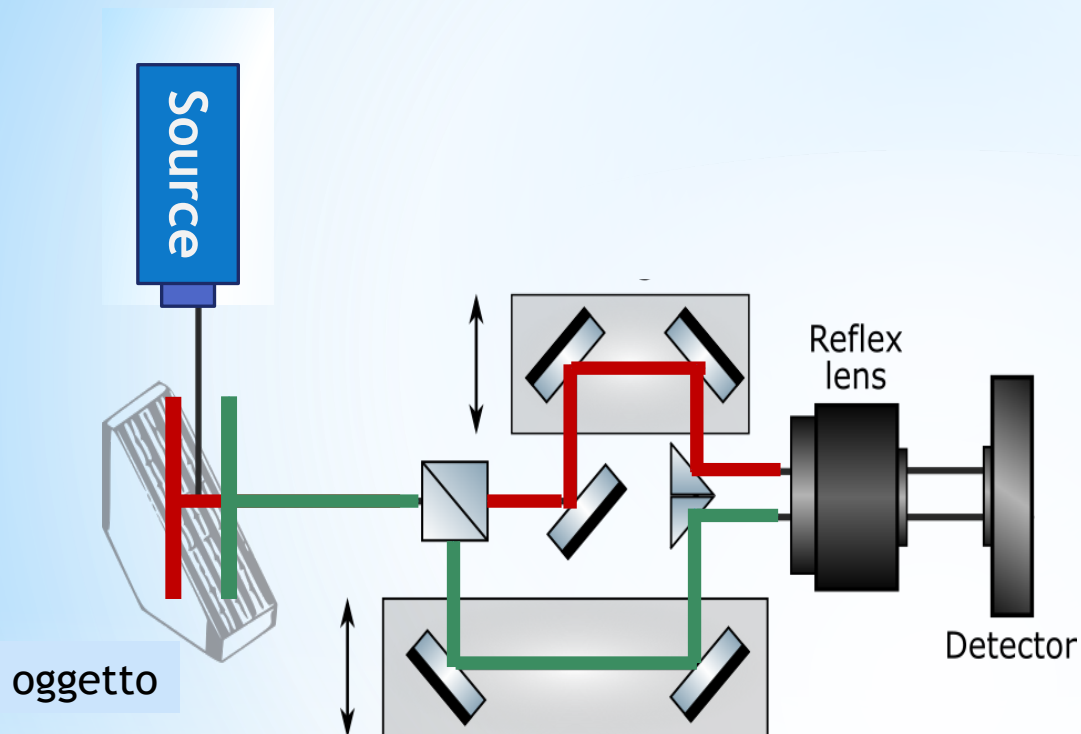
F. Di Lena, Tesi dottorato (2019) + brevetto 2019 + Opt. Exp. 2020



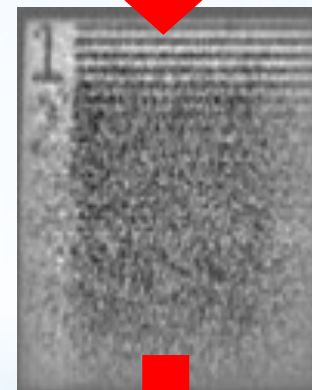
2 diversi piani arbitrari scelti all'interno della scena 3D di interesse sono focalizzati dalla lente su 2 sensori disgiunti



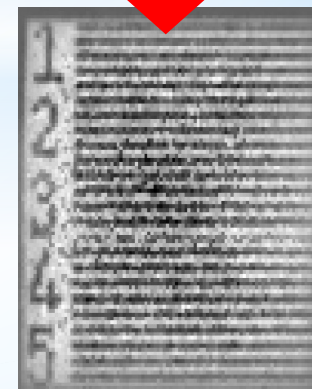
Prototipo di una camera plenottica in correlazione



**Immagine
acquisita**



**CPI:
immagine
rifocalizzata**



**CPI:
tutto a fuoco**

Vantaggi dell'imaging plenottico in correlazione

Rifocalizzazione, senza scansioni, di oggetti 3D

Acquisizione in parallelo di prospettive multiple → 3D imaging

con

Risoluzione al limite di diffrazione

Profondità di fuoco senza precedenti, a una data risoluzione

Capacità di attenuare turbolenze/scattering ...

* Progetto Qu3D – Quantum 3D imaging ad alta velocità e alta risoluzione

Coordinatore:, UINFN sez. Bari

Partners: Politecnico di Losanna, Università di Olomouc, Planetek Hellas



SWISS NATIONAL SCIENCE FOUNDATION

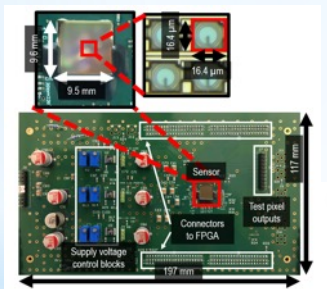
Quantum technology: more security and improved imaging

21/Nov/2019

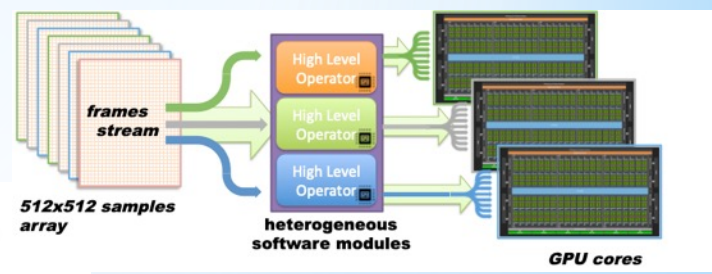


* Progetto Qu3D – Quantum 3D imaging ad alta velocità e alta risoluzione

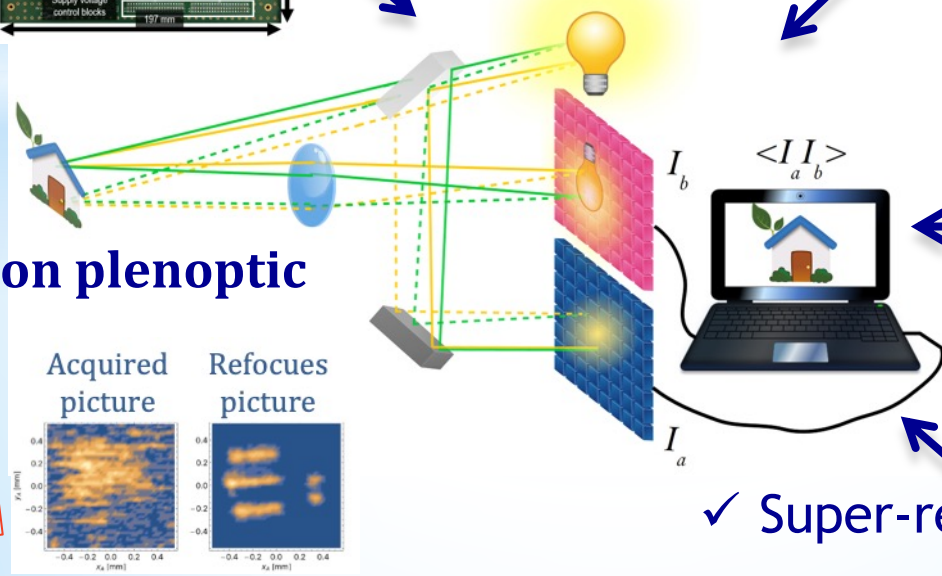
EPFL
✓ Ultra-fast sensors



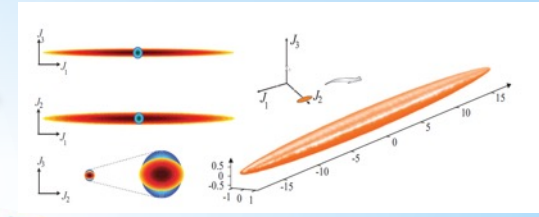
planetek hellas ✓ Fast computing



✓ Correlation plenoptic imaging

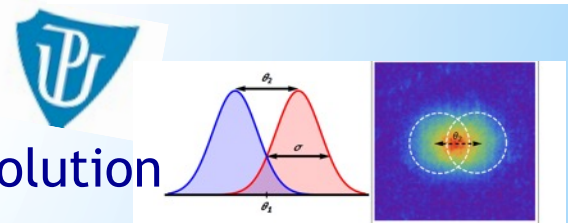


✓ Quantum tomography

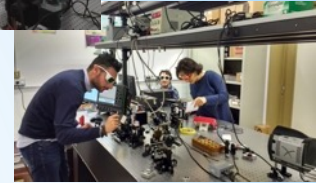
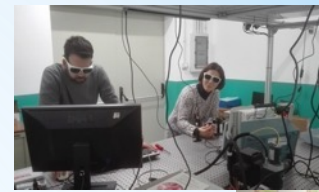


Intellectual Property Award 2019

✓ Super-resolution



Conclusioni & prospettive

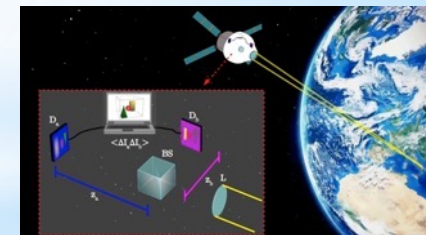


*Correlation Plenoptic Imaging

- *Sfrutta le correlazioni insite nella luce per **portare l'imaging plenottico verso il suo limite ultimo di risoluzione e profondità di fuoco !!**
- *Rifocalizzaione e imaging 3D
- *CPI = correlazioni al lavoro $\rightarrow$ pronti per la 2° rivoluzione quantistica ;)

*Prospettive future:

- *CPI al lavoro : microscopia, space imaging, imaging 3D,... $\rightarrow$ **super-risoluzione, real-time, 3D imaging, turbulence free,...**



*Grazie per l'attenzione

Per info, curiosità, ecc:

milena.dangelo@uniba.it