



Dipartimento di Fisica e Matematica

MARIA BONDANI

INTRODUZIONE ALL'OLOGRAFIA

La parola "olografia" è molto presente ed altamente suggestiva, ma raramente le si associa un'immagine vicina al suo significato.

L'argomento si presta ad una trattazione metodologica e contenutistica accessibile a studenti medi e consente quindi di ricondurre la parola al suo significato.

In più le procedure seguite in questo contesto sono paradigmatiche del procedere scientifico.

Il modulo si propone di far sperimentare in modo diretto il metodo di lavoro scientifico, soprattutto relativamente alla formulazione di un modello di un particolare fenomeno fisico e alla sua verifica sperimentale.

In laboratorio, lo studente verrà invitato a verificare in che misura l'apparato sperimentale si adegua alle ipotesi presenti nel modello e in che misura se ne discosta.

Lo studente dovrà discutere le discrepanze tra i risultati e i valori attesi in base al modello.

Lo studente dovrà inizialmente esprimere le sue opinioni circa l'attività sperimentale.

Nell'ultimo incontro si tornerà sulle stesse domande alla luce dell'attività svolta.

Ciò dovrebbe consentire a ciascuno studente di chiarire aspettative e preconcetti e comprendere meglio propensioni o eventuali idiosincrasie nei confronti dell'attività scientifica.

Un ologramma e':

- **“formazione di immagini tramite la ricostruzione di un fronte d'onda...”**
- **“fotografia senza lenti”**
- **“congelamento di una immagine mentre arriva al nostro occhio e sua ricostruzione con un laser”**

Un ologramma NON e':

- **un'immagine a 3D che appare dal nulla come si vede in Star Trek.**
- **una serie di fotografie prese in posizioni differenti e poi proiettate insieme.**
- **un'illusione ottica con lenti e specchi**

LA VISIONE UMANA

Nel meccanismo della visione umana si possono distinguere tre parti:

- un sistema ottico che forma e proietta le immagini su una superficie sensibile
- una superficie sensibile che raccoglie le immagini e le trasmette
- un elaboratore dei dati raccolti che li elabora, li vaglia e "forma" l'immagine definitiva: la visione umana.

L'occhio umano può essere paragonato ad una macchina fotografica in cui

obiettivo \Leftrightarrow *cristallino*

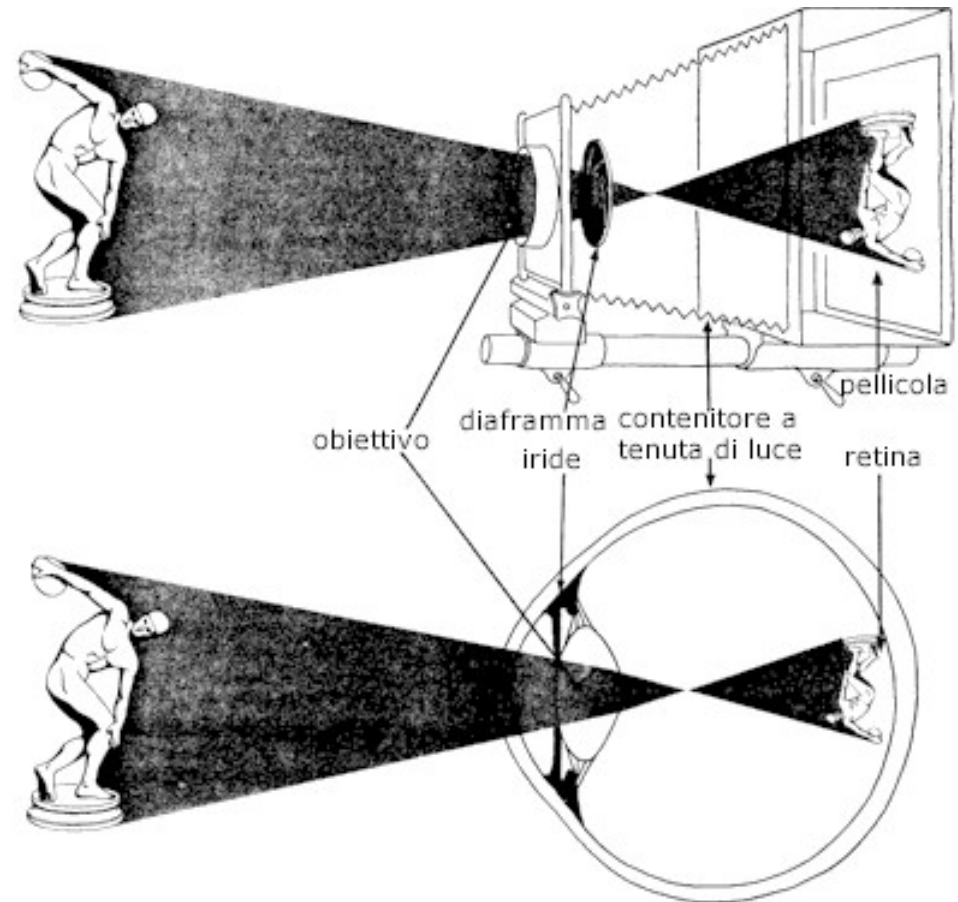
regolazione dell'apertura \Leftrightarrow *iride e pupilla*

superficie sensibile alla luce \Leftrightarrow *retina*

camera oscura \Leftrightarrow *bulbo annerito all'interno*

NOTA:

Sia la retina che la pellicola fotografica (o il sensore CCD) registrano immagini che dipendono dalla **intensità** della radiazione incidente.



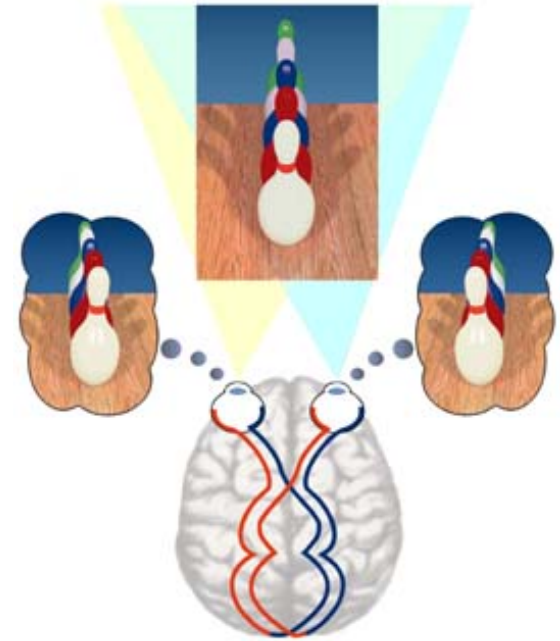
IMMAGINI 3D

Visione stereoscopica

Ciascun occhio cattura l'immagine di un oggetto dal suo punto di vista e le due immagini separate vengono inviate al cervello per l'elaborazione. Quando due immagini arrivano contemporaneamente al cervello vengono ricombinate in un'unica immagine che è più della somma delle sue parti: è un'immagine 3D "stereo".

Profondità di campo

In fotografia, per conferire tridimensionalità alle immagini si può sfruttare la sfocatura (la riduzione della profondità di campo) e l'illuminazione (il contrasto luce - ombra).

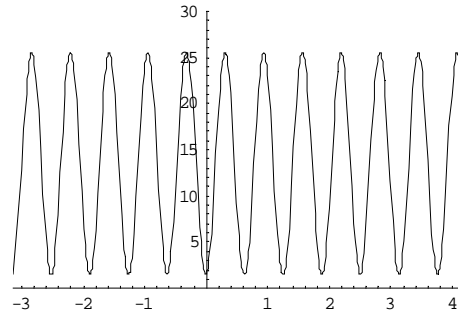
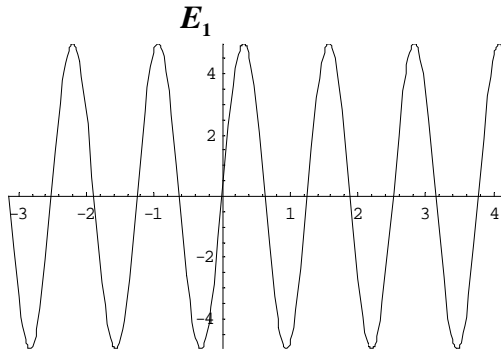


INTERFERENZA

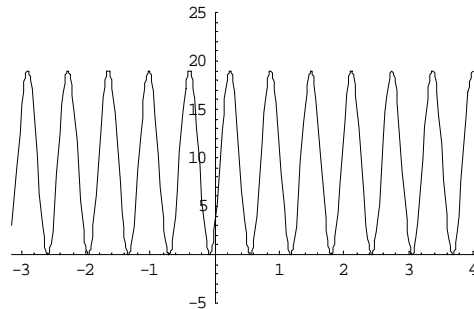
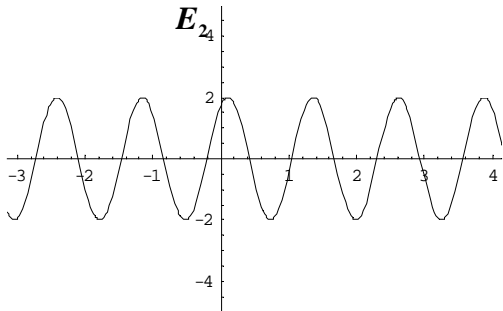
$$E_1(x, t) = a_1 \cos[kx - \omega t + \psi_1] = a_1 \cos[\phi_1] \quad I_1(x, t) = \langle E_1^2(x, t) \rangle = \frac{a_1^2}{2}$$

$$E_2(x, t) = a_2 \cos[kx - \omega t + \psi_2] = a_2 \cos[\phi_2] \quad I_2(x, t) = \langle E_2^2(x, t) \rangle = \frac{a_2^2}{2}$$

$$I = \langle E_1(x, t) + E_2(x, t) \rangle = I_1 + I_2 + I_1 I_2 \cos[\phi_1 - \phi_2]$$

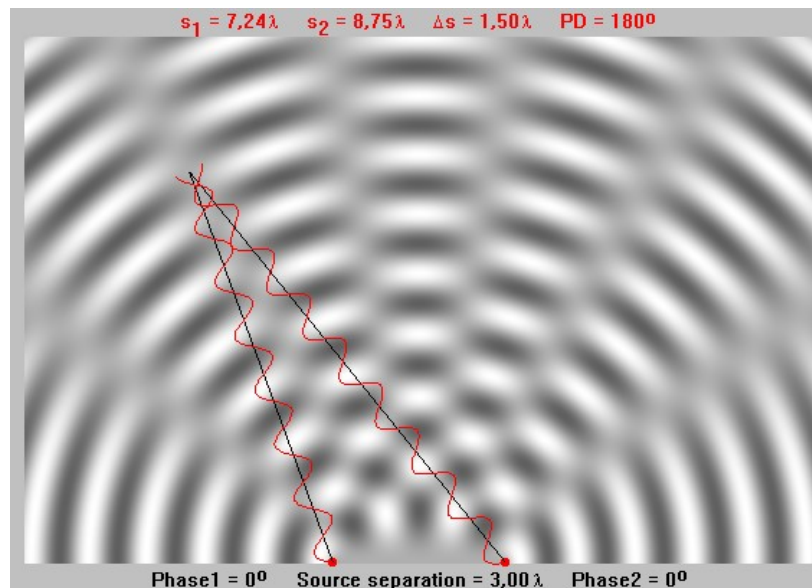
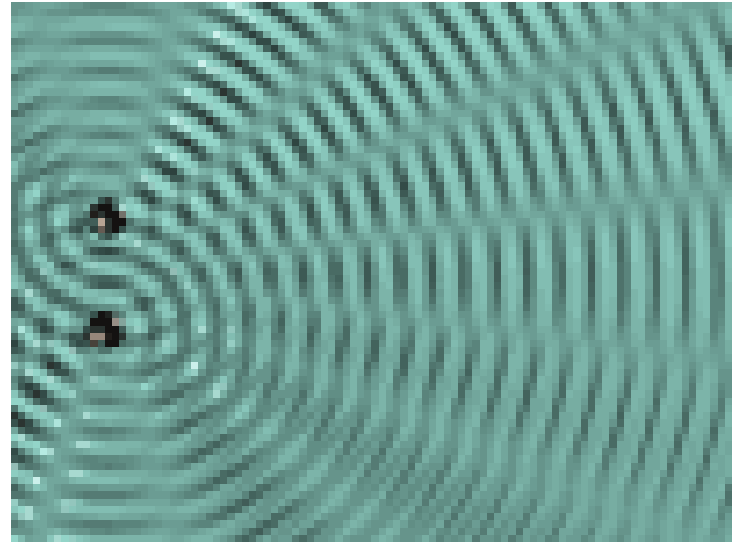
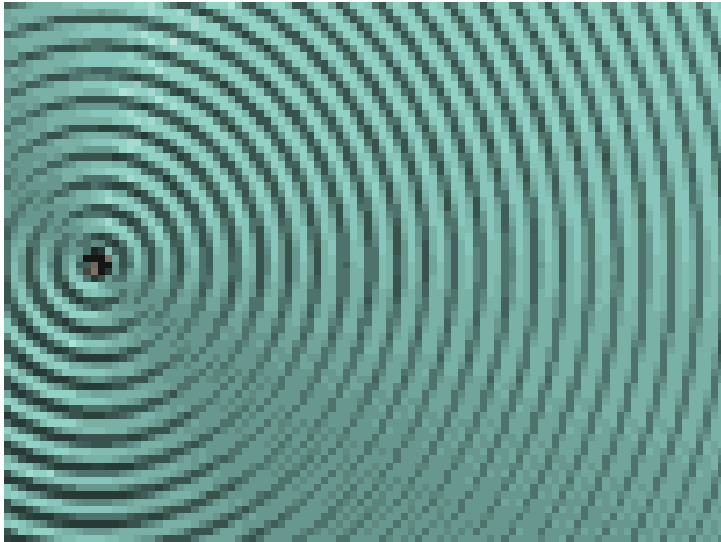


$I_1 + I_2$



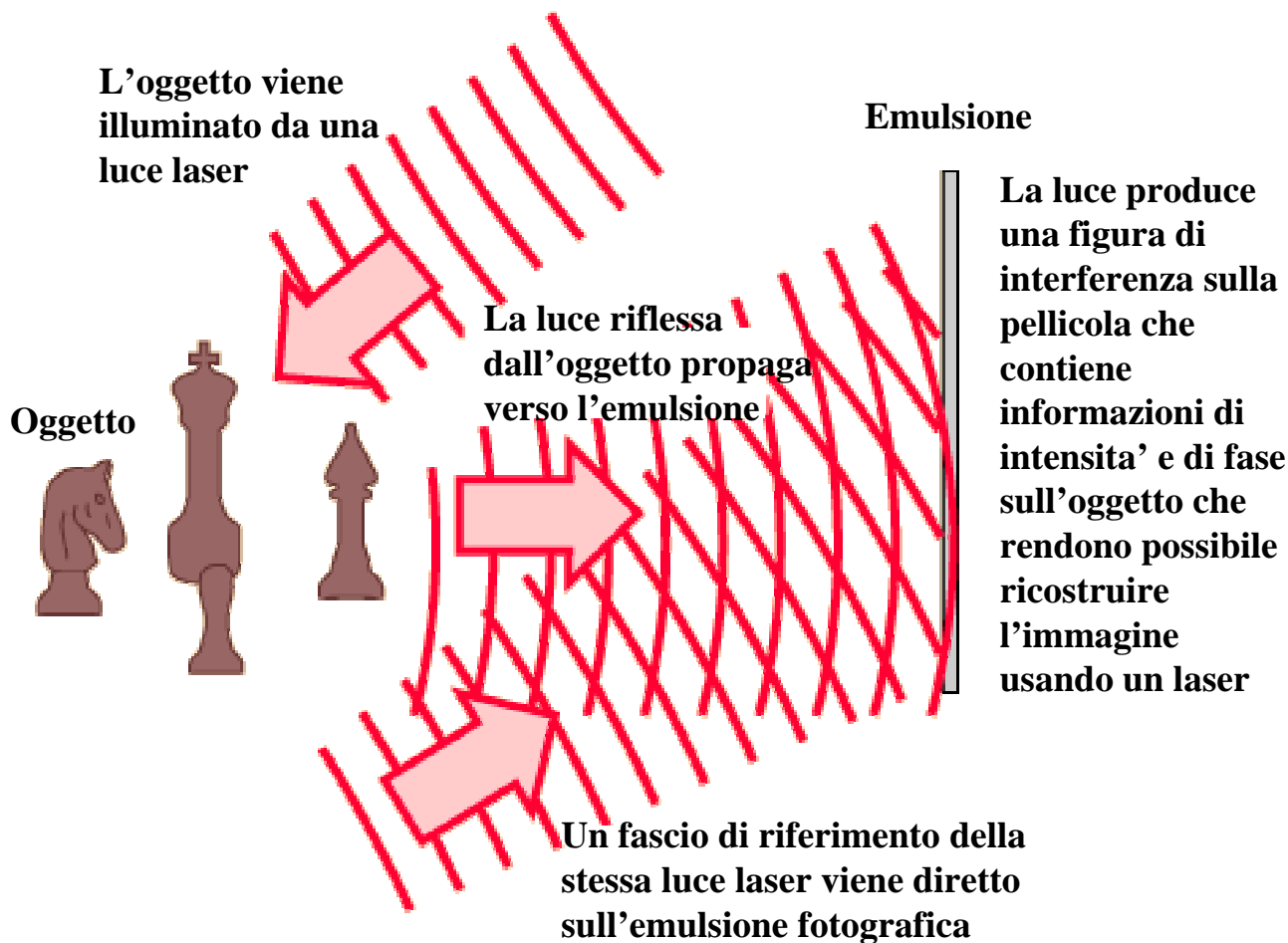
$I_1 + I_2 + I_1 I_2 \cos[\phi_1 - \phi_2]$

INTERFERENZA



OLOGRAFIA

Un ologramma e' la registrazione su un materiale sensibile della figura di interferenza fra due onde



**Campo oggetto
diffuso e campo
coerente di
riferimento
incidono
sull'emulsione
fotografica
generando
interferenza che
modula la
trasparenza del
materiale**

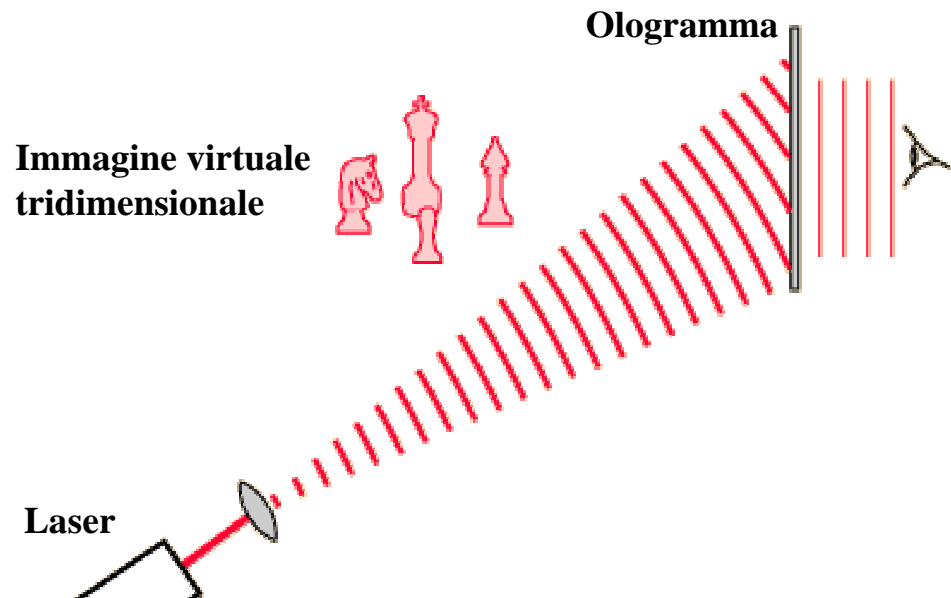
FORMAZIONE delle IMMAGINI

Se il campo di ricostruzione e' uguale al *campo di riferimento*, l'*ologramma* ricostruisce una *immagine virtuale* dell'oggetto olografato

ologramma



immagine virtuale



Campo oggetto $E_o(x, y) = a_o(x, y) \exp[-i\phi_o(x, y)]$

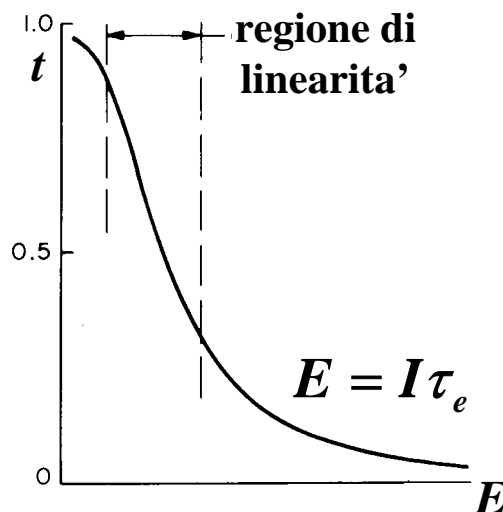
Campo di riferimento $E_R(x, y) = A_R(x, y) \exp[-i\psi_R(x, y)]$

Figura di interferenza nel materiale sensibile

$$I(x, y) = |E_R(x, y)|^2 + |E_o(x, y)|^2 + E_R^*(x, y)E_o(x, y) + E_R(x, y)E_o^*(x, y)$$

Trasmissione del materiale sensibile

$$t(x, y) = \beta I(x, y)$$



La lastra olografica viene sottoposta a
sviluppo fotografico per fissare
in modo permanente
la figura di interferenza registrata
dall'emulsione, ottenendo cosi' un

OLOGRAMMA

FORMAZIONE delle IMMAGINI

Illuminando l'ologramma con un campo $B(x, y)$ che puo' essere: *il campo di riferimento, il coniugato del campo di riferimento, un campo coerente generico, una luce bianca* si ricostruiscono i *fronti d'onda* e quindi le *immagini* (reale e/o virtuale) dell'oggetto olografato

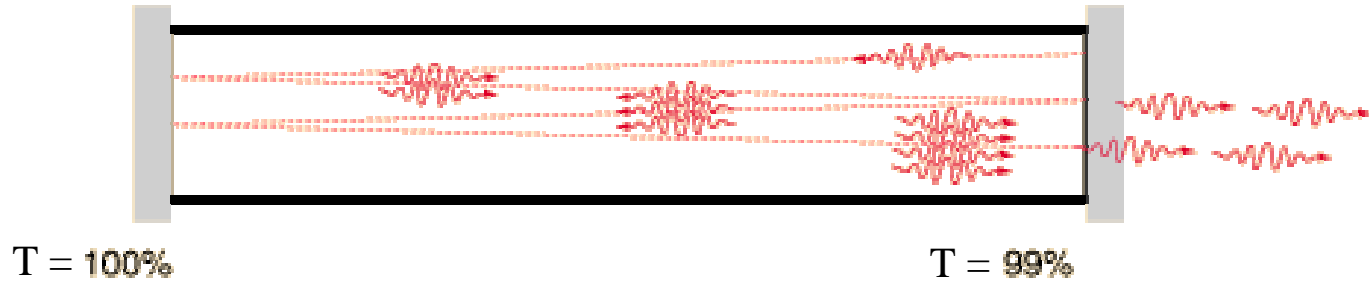
$$E_H(x, y) = B(x, y) t(x, y) = \underbrace{\beta B |E_R|^2 + \beta B |E_O|^2}_{\text{fondo}} + \underbrace{\beta B E_R^* E_O}_{\text{immagine virtuale}} + \underbrace{\beta B E_R E_O^*}_{\text{immagine reale}}$$

Caratteristiche delle immagini olografiche:

- *sono tridimensionali, mostrano profondita' e parallasse e cambiano variando l'angolo di visuale*
- *sono scalabili: le dimensioni dipendono da posizione, frequenza e forma dei fronti d'onda dei campi di riferimento e di illuminazione*
- *ogni frammento di ologramma ricostruisce l'immagine intera vista da un particolare punto di vista*
- *la risoluzione dell'immagine e' $\sim \lambda$*



Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



L'*emissione stimolata* e' il processo quantistico necessario per il funzionamento di un *laser*.



La luce laser e'

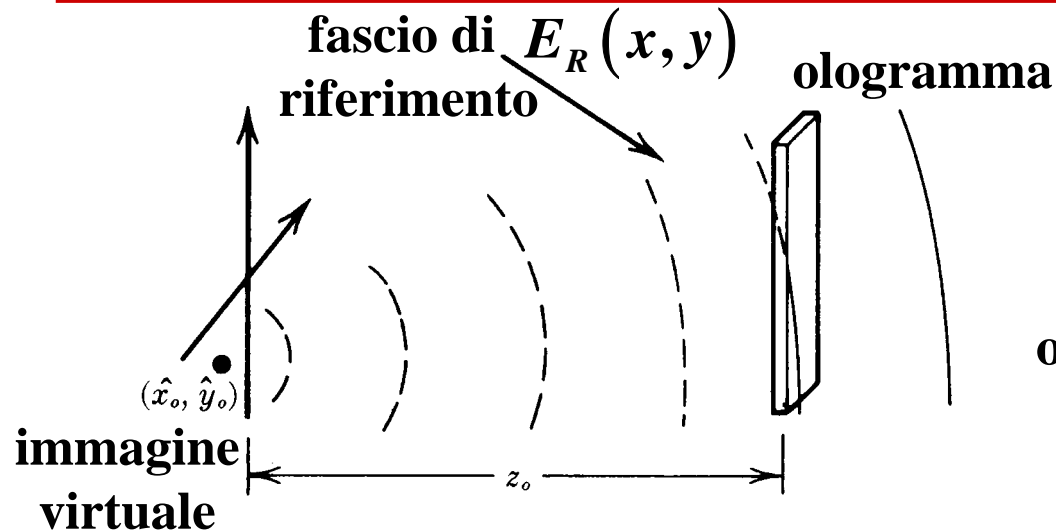
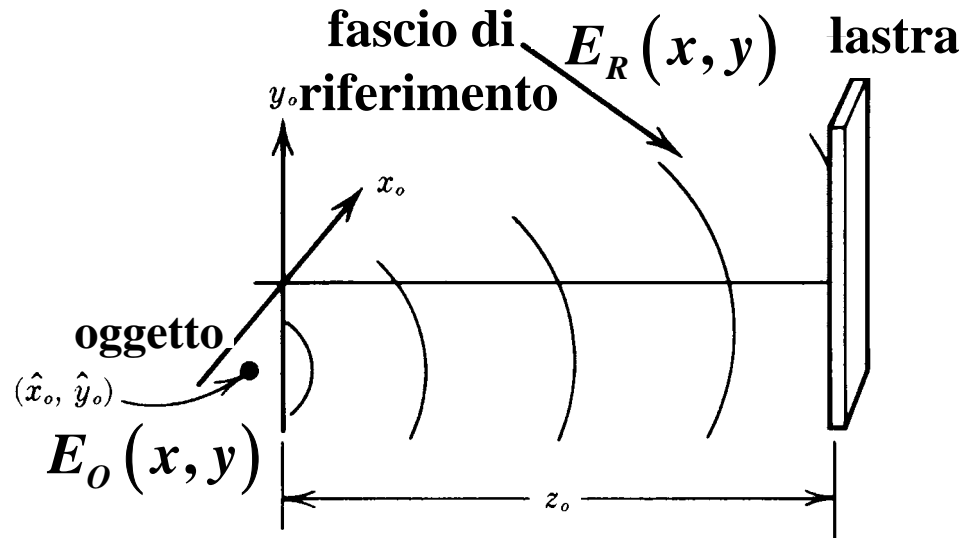
coerente: parti diverse del fascio laser sono in fase l'una rispetto all'altra e queste relazioni di fase sono mantenute abbastanza a lungo da permettere di produrre interferenza

monocromatica: la luce laser consiste essenzialmente di una sola lunghezza d'onda, essendo originata da una transizione atomica

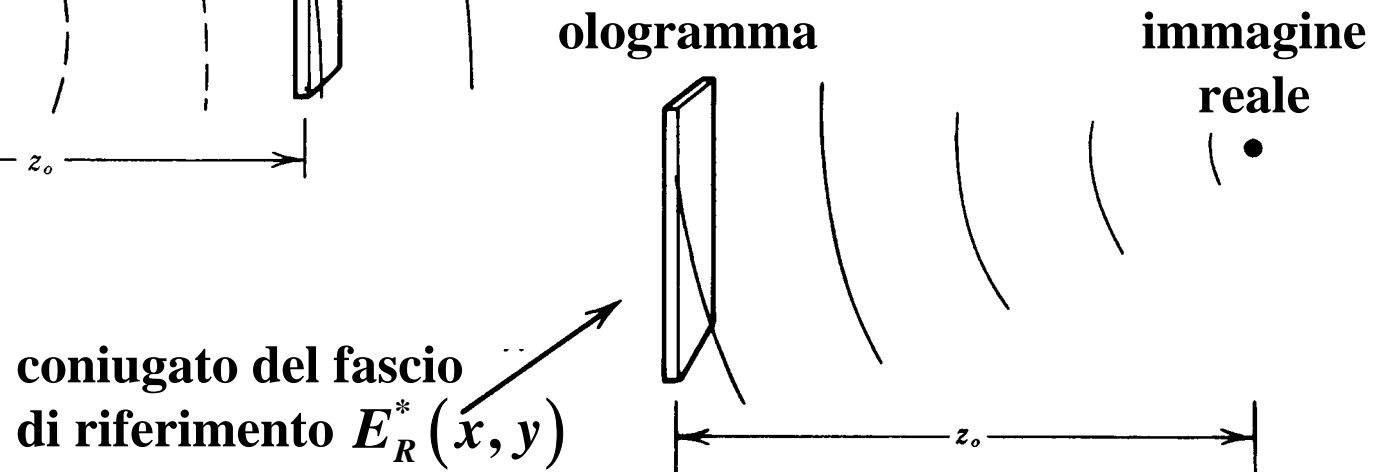
collimata: la direzione di emissione e' selezionata dagli specchi che riflettono molte volte il fascio laser

SCHEMA GENERALE

Registrazione
dell'ologramma



Formazione
delle immagini



Sviluppo storico dell'OLOGRAFIA

- 1947 :** Invenzione del principio dell'olografia (*Gabor*)
- 1962 :** Primo sviluppo nella produzione degli ologrammi dovuto a: invenzione del laser e dell'olografia fuori asse (*Leith-Upanietsk*)
- 1962 :** Invenzione degli ologrammi visibili in luce bianca (*Denisyuk*)
- 1967 :** Primo ritratto olografico con una sorgente impulsata
- 1968 :** Invenzione degli ologrammi in trasmissione visibili in luce bianca (*Benton*): “rainbow holograms”
- 1974 :** Produzione del primo ologramma “embossed” in cui il reticolo di interferenza dell'ologramma viene stampato sulla plastica e quindi riprodotto in copie ⇒ applicazioni commerciali dell'olografia
- 1982 :** Applicazione degli ologrammi per la sicurezza delle carte di credito
- 1988 :** Utilizzo anticontraffazione degli ologrammi
- '80 :** The Polaroid Corporation sviluppa ologrammi in riflessione su fotopolimeri (*Mirage*) visibili in luce bianca
- 1991 :** Sviluppo delle tecniche per la generazione di ologrammi al computer
- 1992 :** Sviluppo della produzione di ologrammi di grandi dimensioni
- 1993 :** Sviluppo del primo ologramma dedicato alla stampa di documenti
- '90 :** Rapido aumento dei prodotti olografici disponibili per applicazioni (OVD: optical variable devices)
- 2001 :** 13 miliardi di ologrammi sulle banconote in Euro

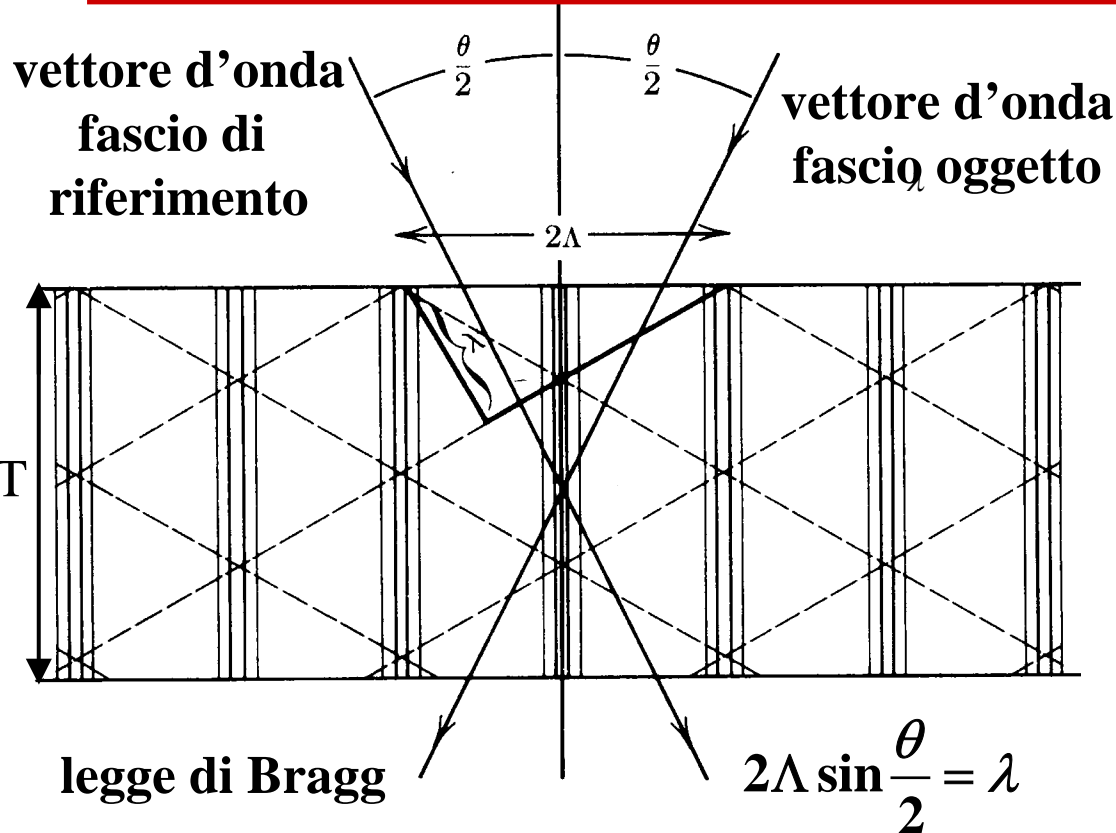
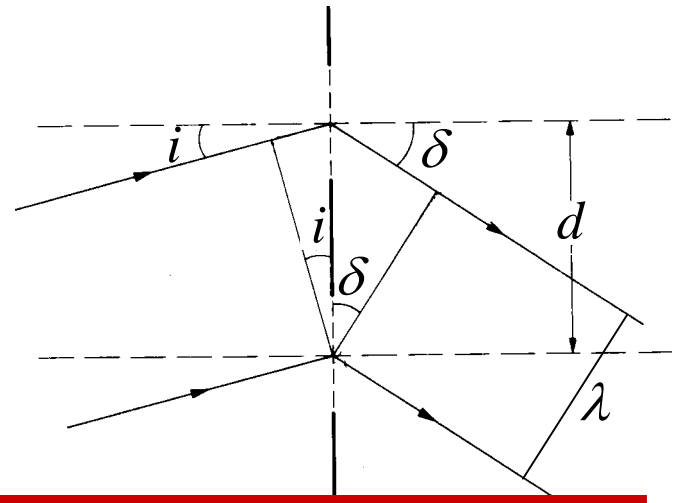
CLASSIFICAZIONE degli OLOGRAMMI

Rispetto al materiale sensibile	{	<i>di assorbimento</i> : solo sviluppo
Rispetto alla geometria per la registrazione	{	<i>di fase</i> : sviluppo e bleaching <i>di superficie</i> : angolo fra i fasci minore di 90° <i>di volume</i> : angolo fra i fasci tra 90° e 180°
Rispetto alla ricostruzione delle immagini	{	<i>in trasmissione</i> : fascio coerente di riferimento trasmesso attraverso ologramma <i>in riflessione</i> : visibili il luce bianca
Ologrammi multipli	{	<i>semplici</i> : due o tre immagini visibili ad angoli diversi <i>multiplex</i> : immagine 3-D costruita attraverso molte immagini bidimensionali sovrapposte <i>rainbow</i> : la stessa immagine appare in diversi colori se vista ad angoli diversi
Ologrammi per la produzione di massa	{	<i>polimerici</i> : fatti di plastica sensibile alla luce <i>embossed</i> : stampati su un foglio di materiale plastico usando una matrice metallica. <i>dichromatici</i> : registrati su uno strato di gel.
Ologrammi in tempo reale	{	<i>cristalli elettroottici</i> <i>materiali fotoplastici</i> <i>cristalli liquidi</i>

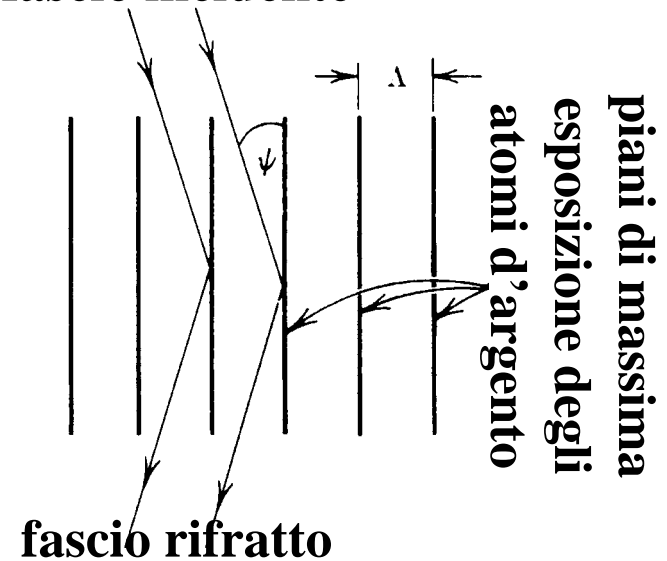
Ologramma di SUPERFICIE

*visibili solo
in trasmissione*

diffrazione al
primo ordine
 $d(\sin i - \sin \delta) = \lambda$



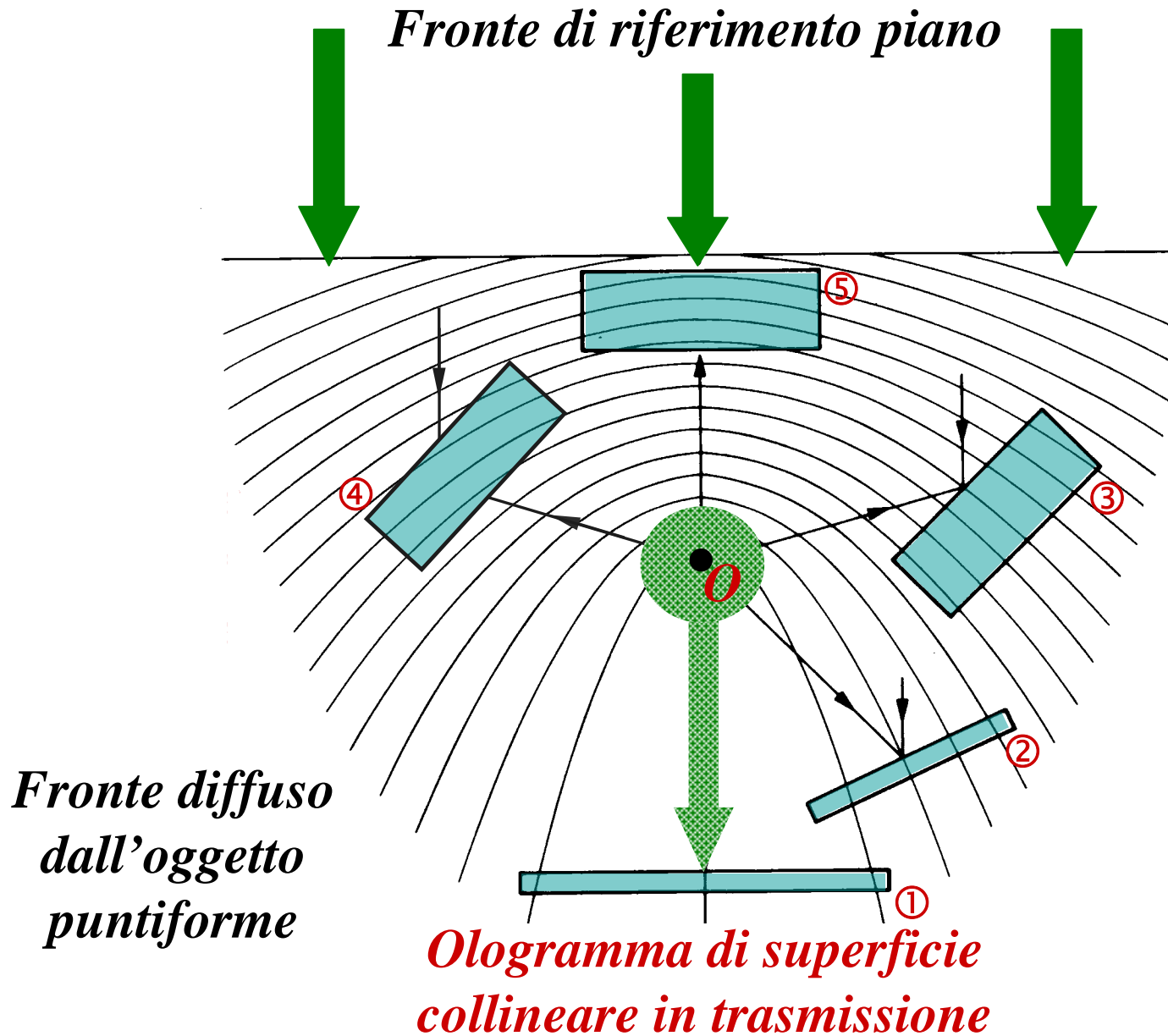
fascio incidente



fascio rifratto

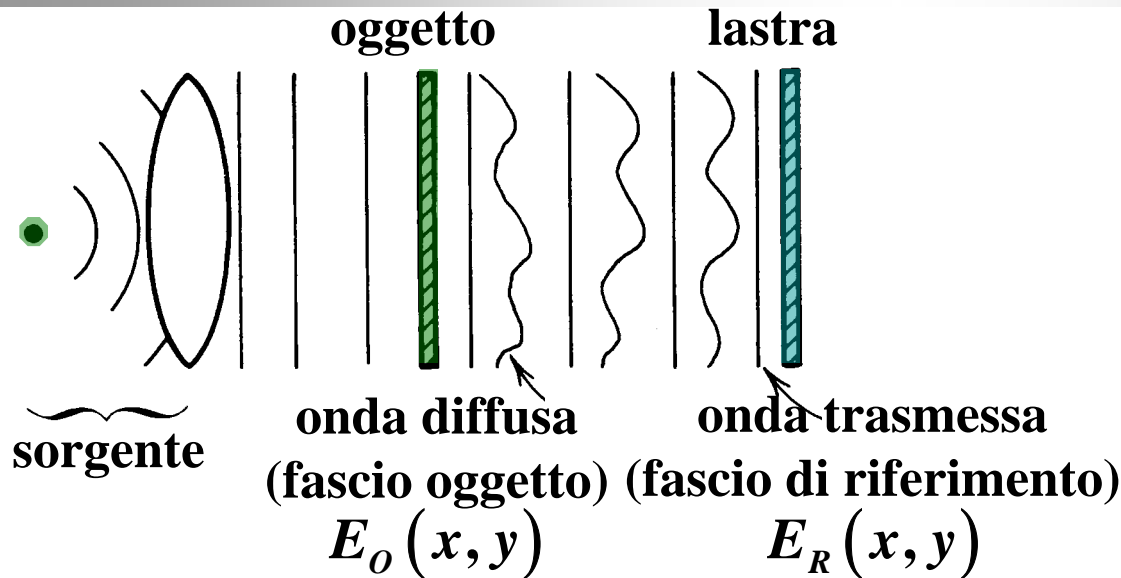
Ologramma di VOLUME

GEOMETRIE per la REGISTRAZIONE degli OLOGRAMMI



①

Gabor

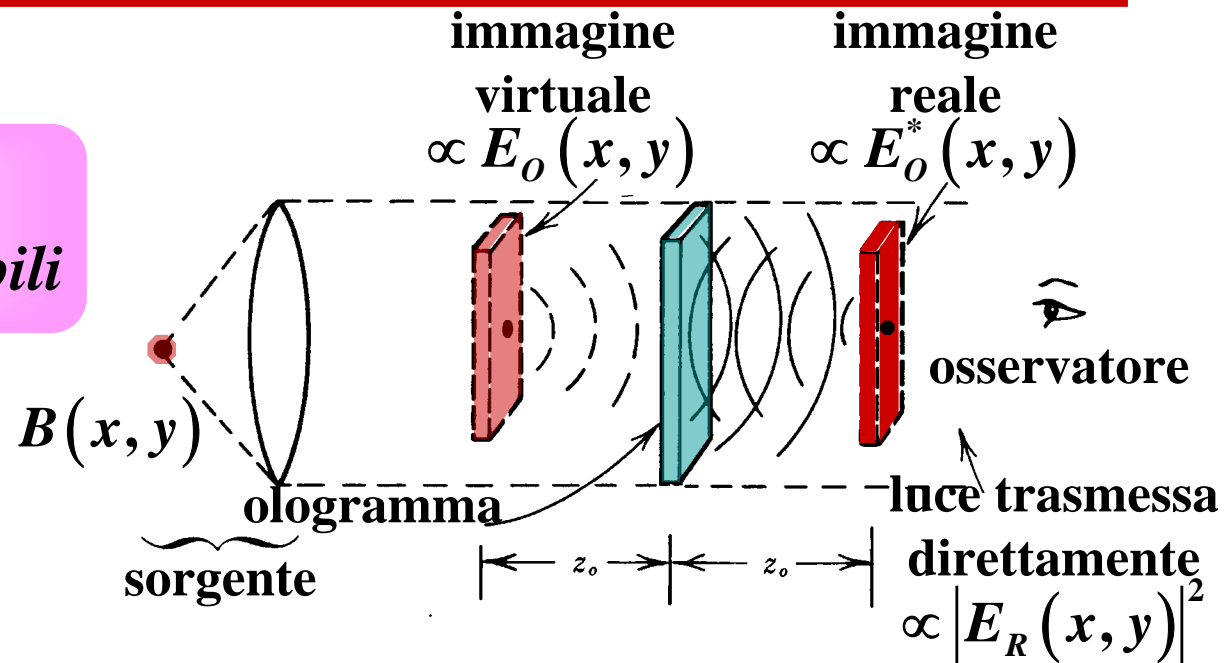


Registrazione
dell'ologramma

*oggetto altamente
trasparente*

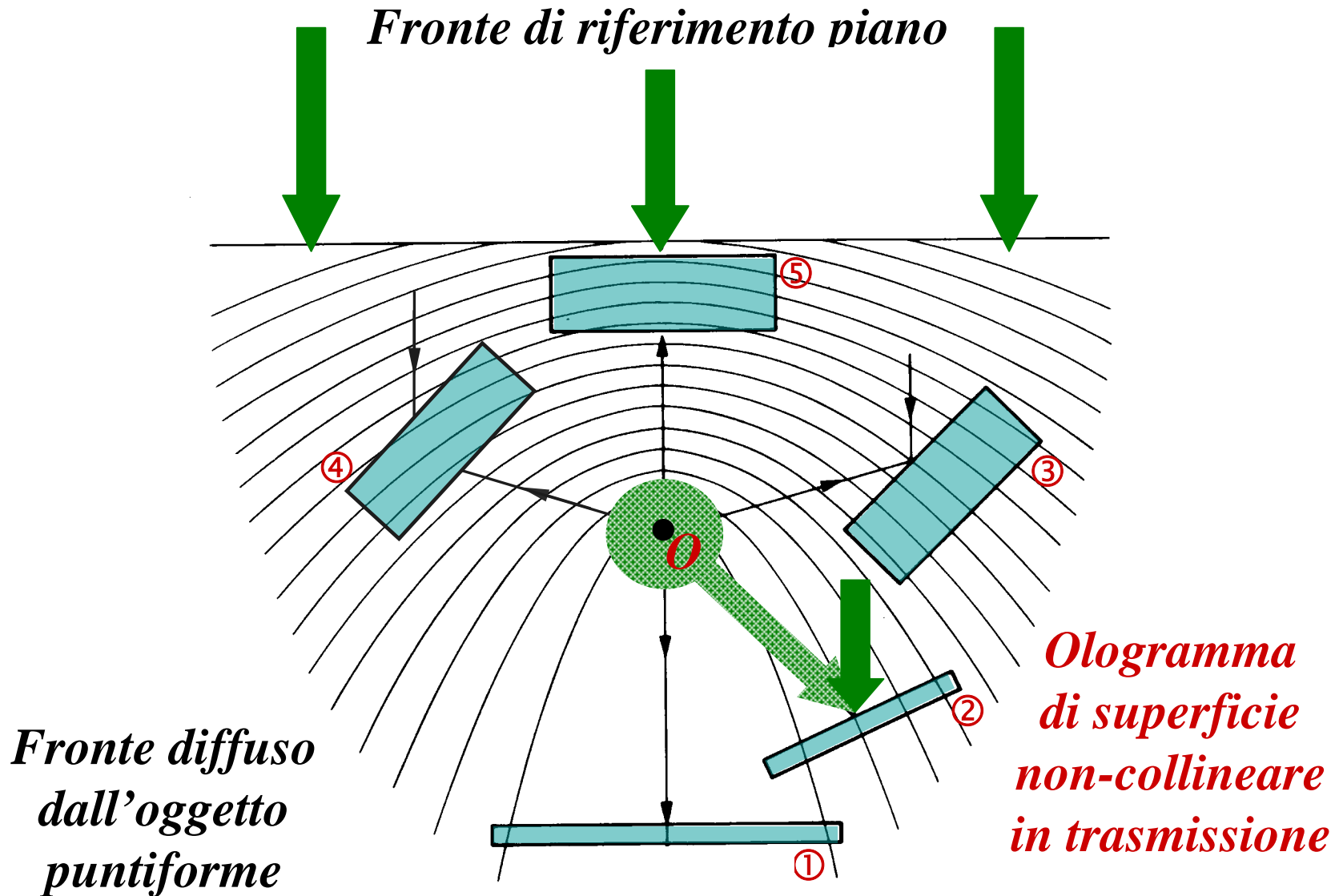
$$|E_O(x, y)| \ll |E_R(x, y)|$$

*immagini gemelle
simultanee inseparabili*



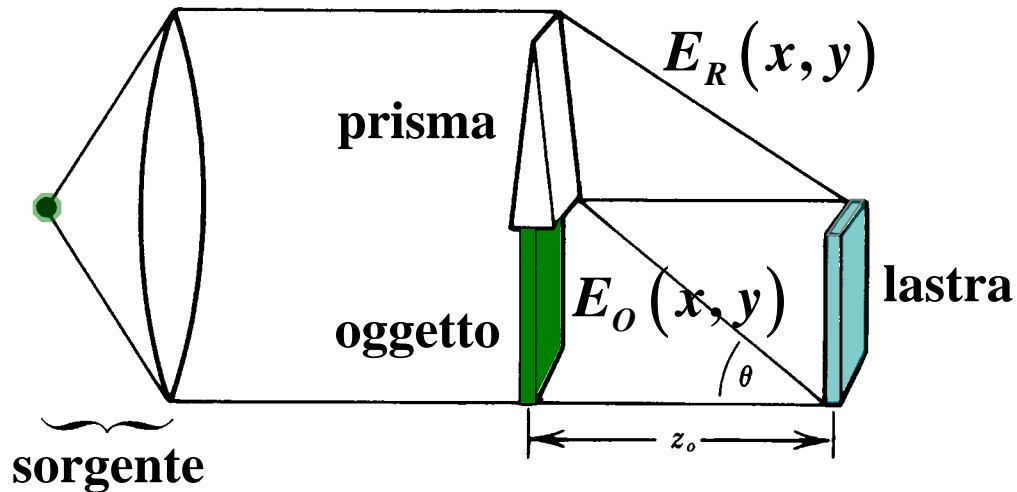
Formazione
delle immagini

GEOMETRIE per la REGISTRAZIONE degli OLOGRAMMI



②

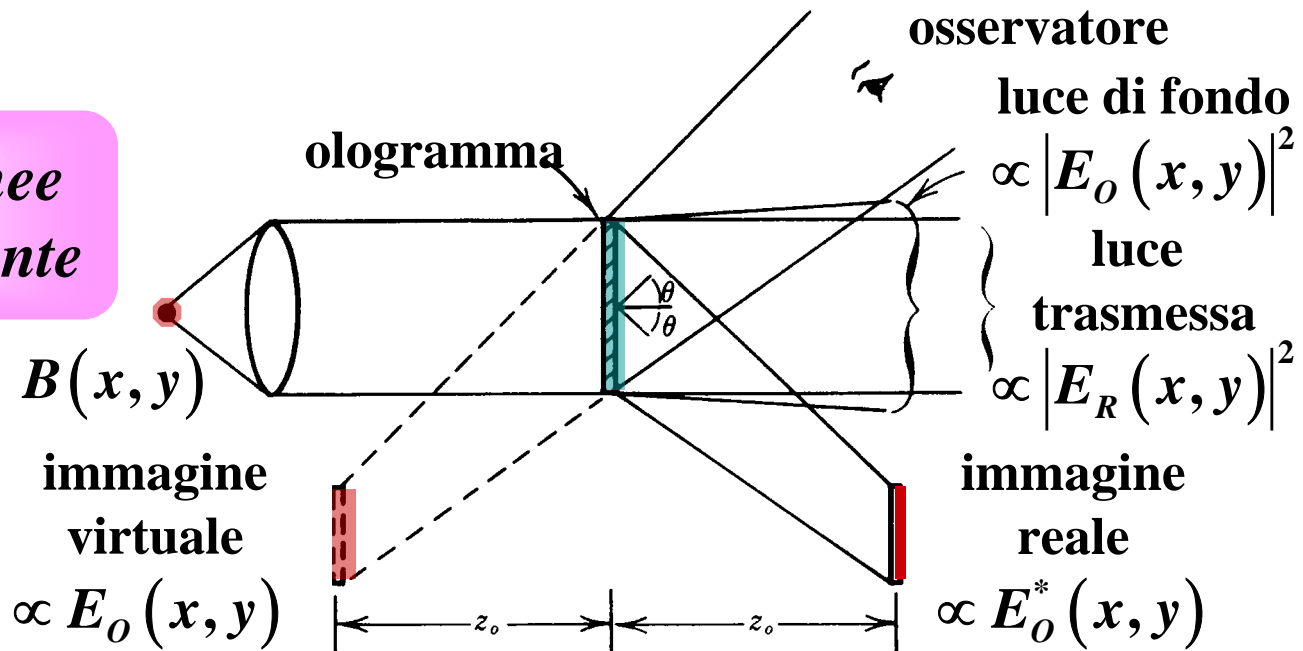
Leith-Upatnieks



Registrazione dell'ologramma

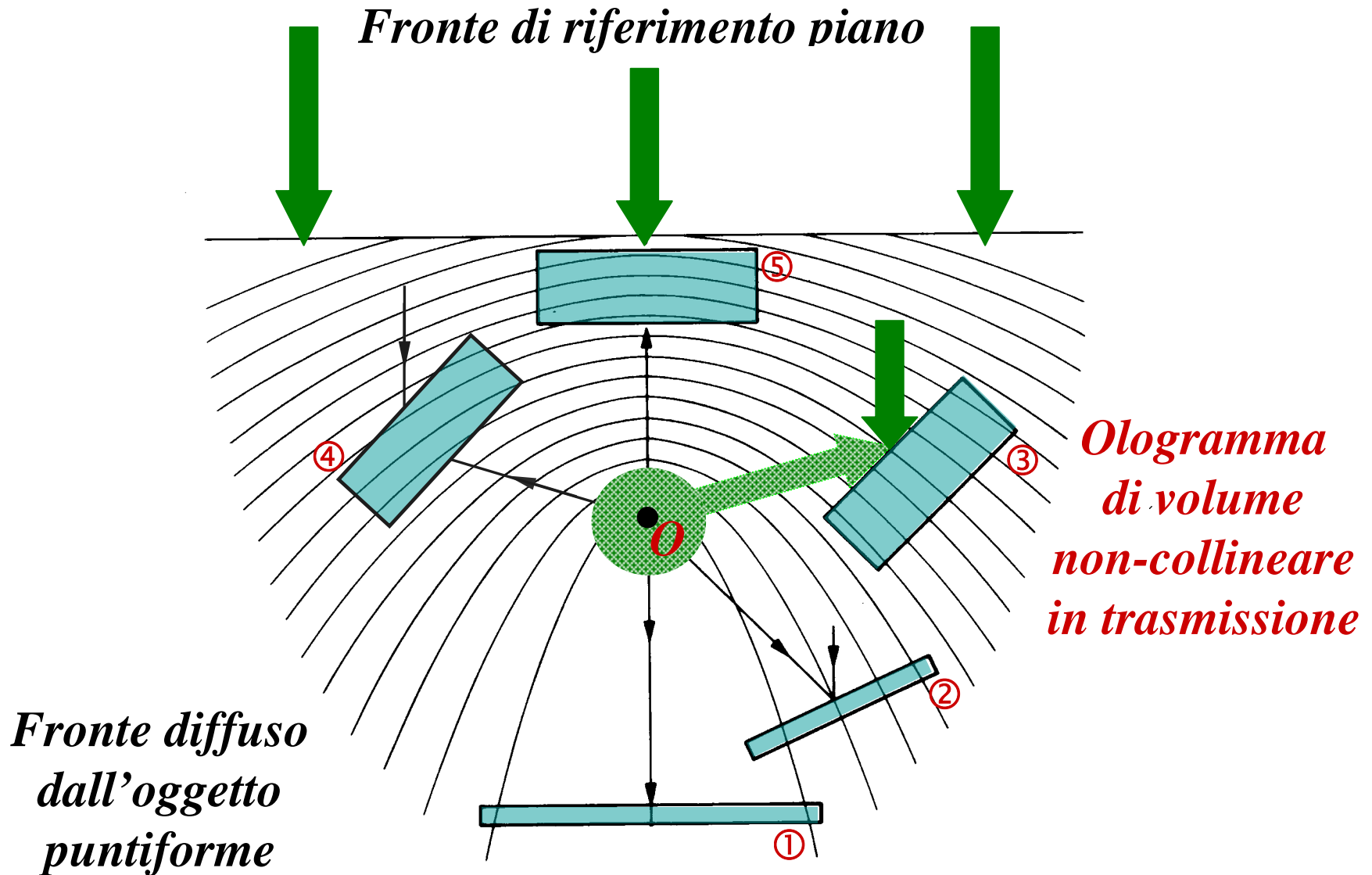
oggetto non necessariamente trasparente

immagini simultanee separate spazialmente



Formazione delle immagini

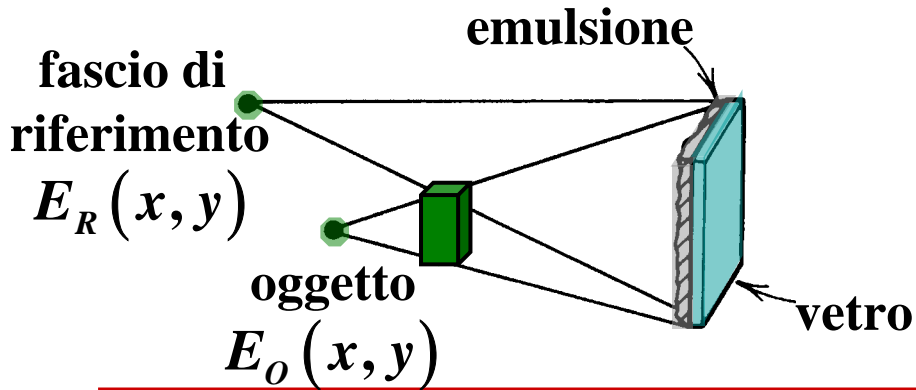
GEOMETRIE per la REGISTRAZIONE degli OLOGRAMMI



③

van Heerden

Registrazione dell'ologramma



oggetto non necessariamente trasparente

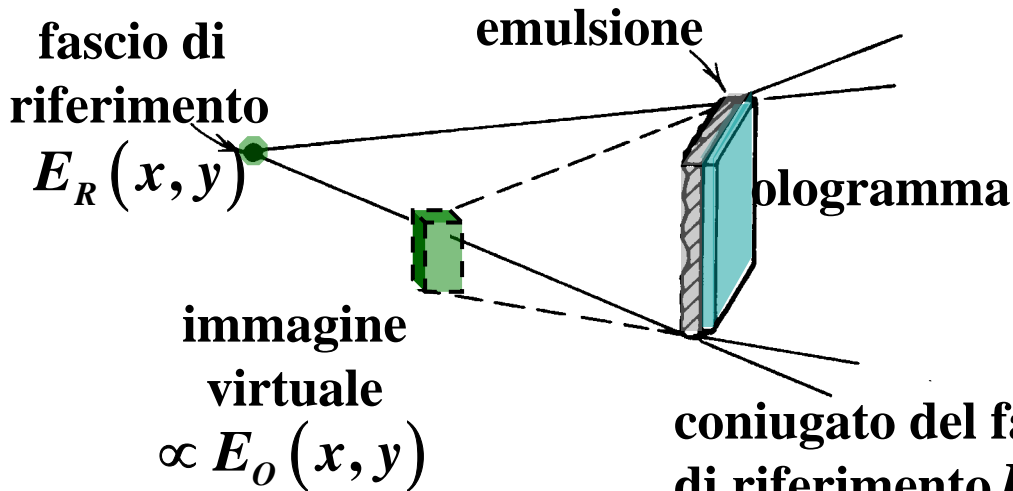
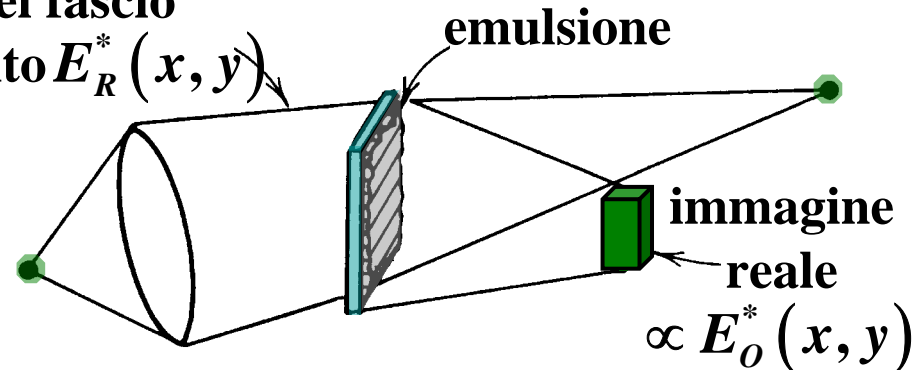
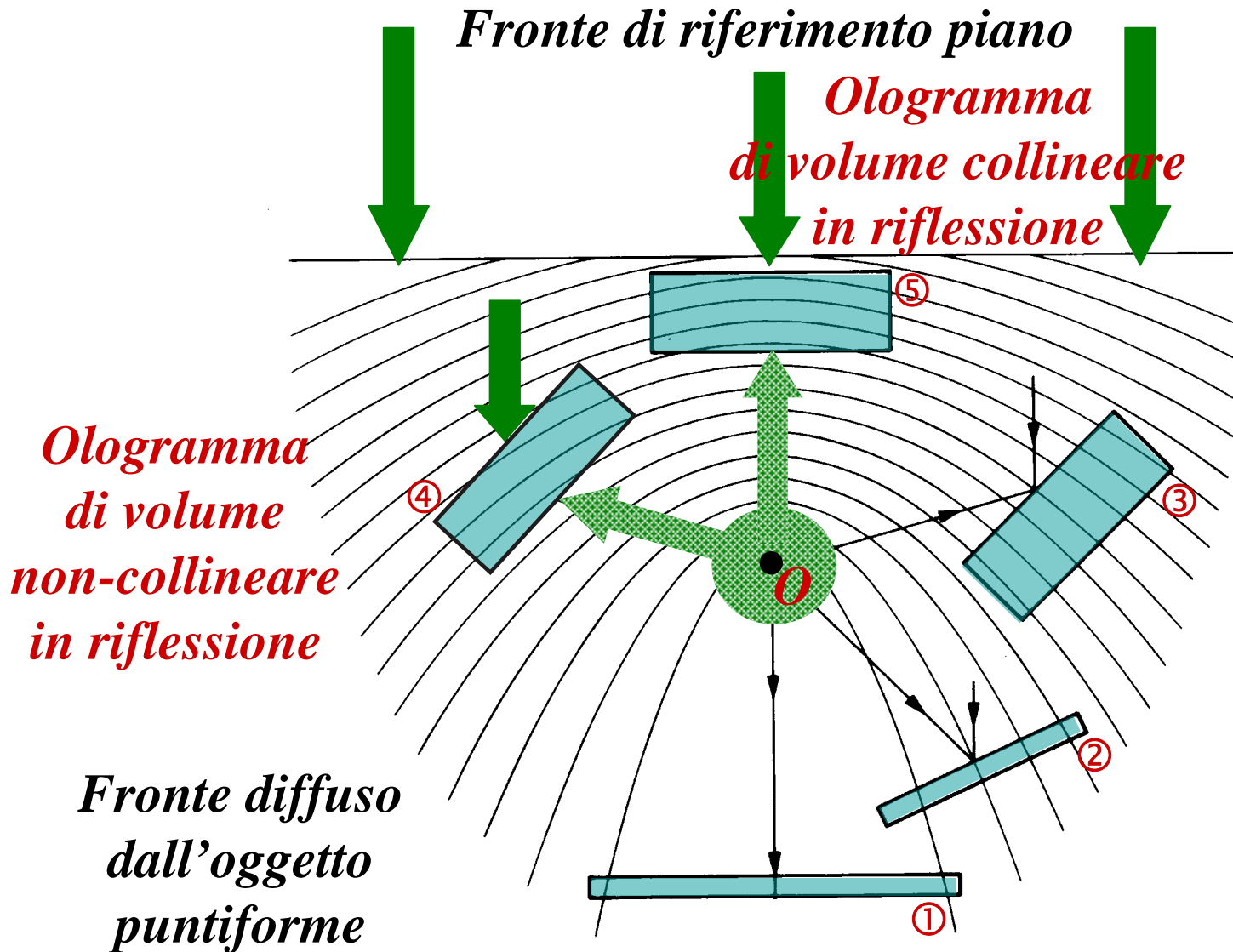


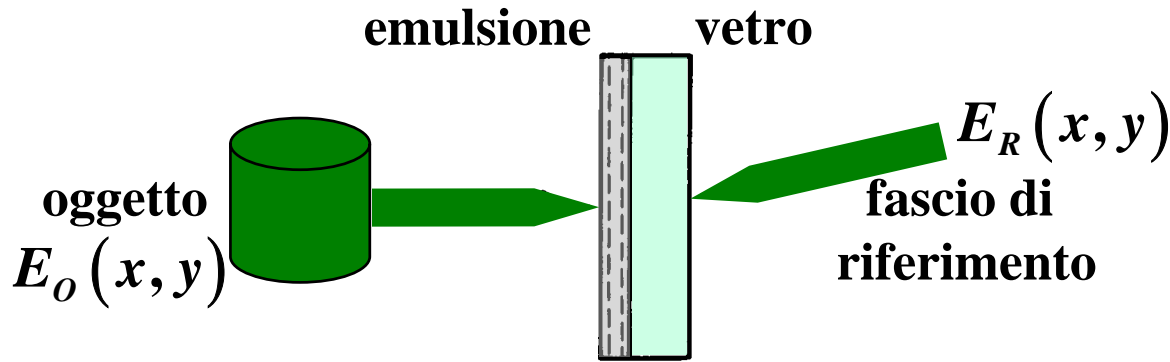
immagine virtuale e immagine reale separate



Formazione delle immagini

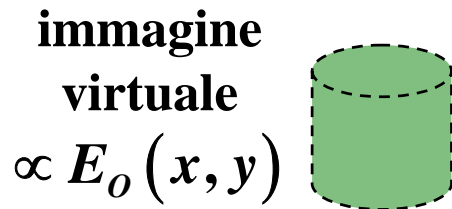
GEOMETRIE per la REGISTRAZIONE degli OLOGRAMMI



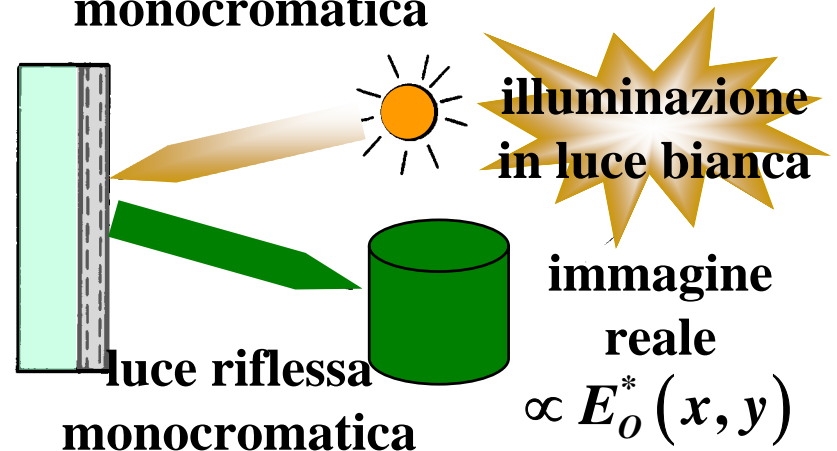
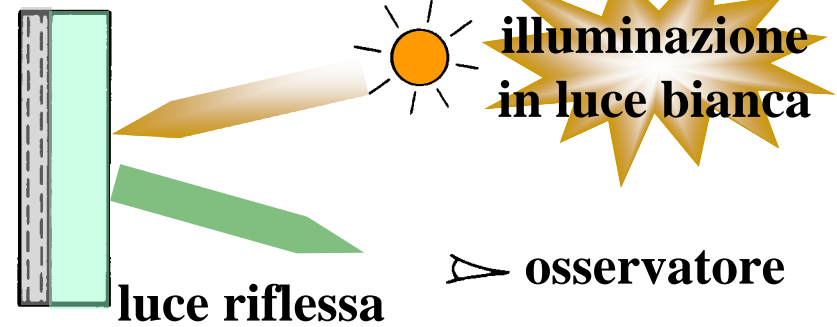


Registrazione dell'ologramma

registrazione con luce coerente



la lunghezza d'onda della luce riflessa e' quella di registrazione



Formazione delle immagini

APPLICAZIONI dell'OLOGRAFIA

Non solo luce laser ma anche

raggi X e luce UV - per oggetti piu' piccoli della luce visibile

microonde - per la registrazione delle immagini dallo spazio profondo

onde acustiche - per la registrazione dell'interno degli oggetti solidi

Tra le applicazioni

Arte olografica - musei olografici, pubblicita', francobolli, gioielli...

Sicurezza dalla frode - carte di credito, carte telefoniche, biglietti, archiviazione di immagini olografiche di opere d'arte e reperti da museo...

Strumentazione ottica - lenti olografiche, reticoli di diffrazione olografici...

Interferometria olografica - per analisi di deformazioni, controllo di qualita'...

Riconoscimento di immagini - sistemi elettroottici per applicazioni civili e militari, microscopio olografico, radar olografico

Olografia subacquea

Applicazioni mediche - combinano immagini 3-D, ologrammi "multiplex" ed olografia ad ultrasuoni.

Computer - memorie olografiche ed unita' di calcolo per i computer ottici, reti neurali in grado di autoistruirsi...

BIBLIOGRAFIA

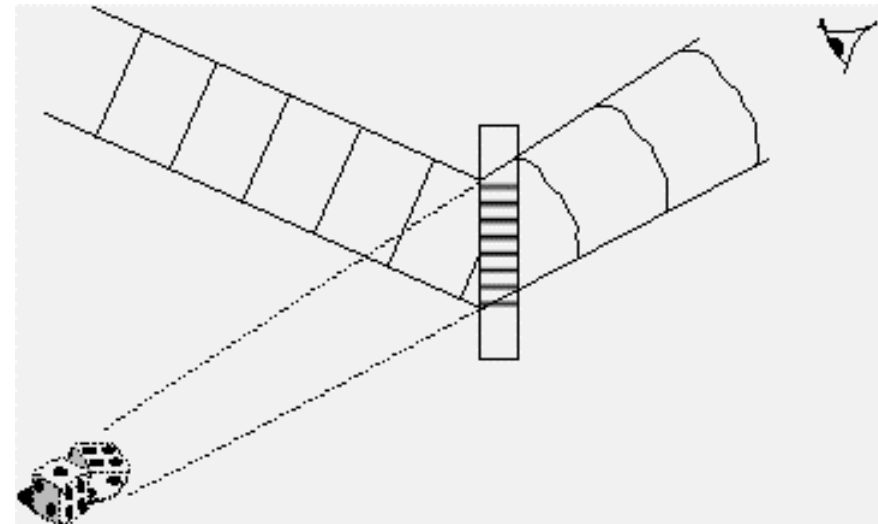
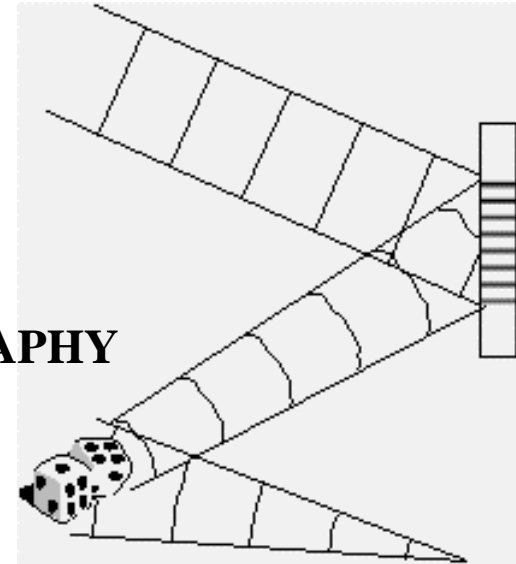
R.J. Collier, C.B. Burckhardt, L.H. Lin
OPTICAL HOLOGRAPHY
Academic Press (1971)

W. T. Cathey
OPTICAL INFORMATION PROCESSING AND HOLOGRAPHY
John Wiley & Sons (1974)

F.T.S. Yu
OPTICAL INFORMATION PROCESSING
John Wiley & Sons (1983)

J.W. Goodman
FOURIER OPTICS
McGraw-Hill (1968)

www.holo.com
www.holophile.com

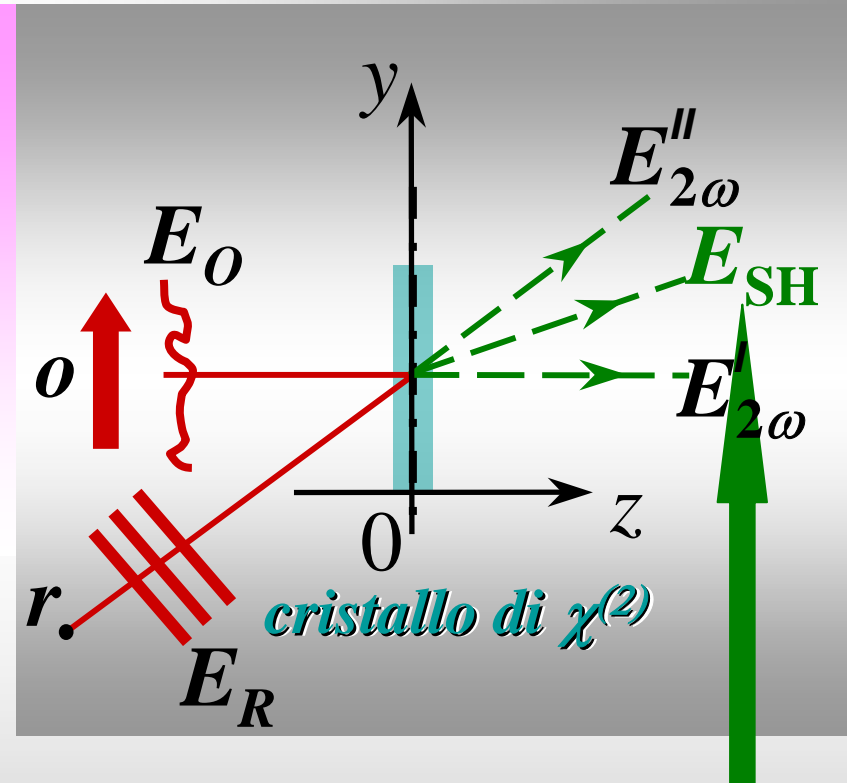


Il processo di cross-correlazione in seconda armonica tra il campo $E_O(\omega)$ diffuso da un oggetto O con un campo $E_R(\omega)$ di riferimento ha caratteristiche olografiche

Campo elettrico $E_\omega = E_O + E_R$ ad ω in un cristallo con non-linearita' $\propto \chi^{(2)}$

$$E_\omega = \text{Re} \left\{ A_R \exp \left\{ i \left[k_1 L_R(x, y) + \omega t \right] \right\} + a_o(x, y) \exp \left\{ i \left[k_1 L_o(x, y) + \omega t \right] \right\} \right\}$$

L'interazione non lineare in un cristallo sottile genera un campo a 2ω con tre contributi



$$E_{2\omega} \propto A_R^2 \exp \left\{ i \left[2k_1 L_R(x, y) + 2\omega t \right] \right\} + a_o^2(x, y) \exp \left\{ i \left[2k_1 L_o(x, y) + 2\omega t \right] \right\} + 2A_R a_o(x, y) \exp \left\{ i \left[k_1 \left(L_o(x, y) + L_R(x, y) \right) + 2\omega t \right] \right\}$$

I fronti d'onda del campo a 2ω ricostruiscono immagini olografiche dell'oggetto, infatti:

per il campo ottenuto come cross-correlazione a 2ω abbiamo

$$E_{SH} \propto A_R a_O(x, y) \exp \left\{ i \left[k_2 \frac{L_O(x, y) + L_R(x, y)}{2} + 2\omega t \right] \right\} \quad \text{con } k_2 = 2k_1$$

per un ologramma di Gabor registrato ad ω e ricostruito a 2ω avremmo

$$E_H = \beta_1 B a_O^2(x, y) \exp \{ i [k_2 L_O(x, y) + 2\omega t] \} +$$

$$+ \beta_2 B a_O(x, y) \exp \left\{ i \left[k_2 \frac{L_O(x, y) + L_B(x, y)}{2} + 2\omega t \right] \right\} +$$

$$+ \beta_3 B a_O(x, y) \exp \left\{ i \left[k_2 \frac{2L_B(x, y) - L_O(x, y)}{2} + 2\omega t \right] \right\} +$$

$$+ \beta_4 B \exp \{ i [k_2 L_B(x, y) + 2\omega t] \}$$

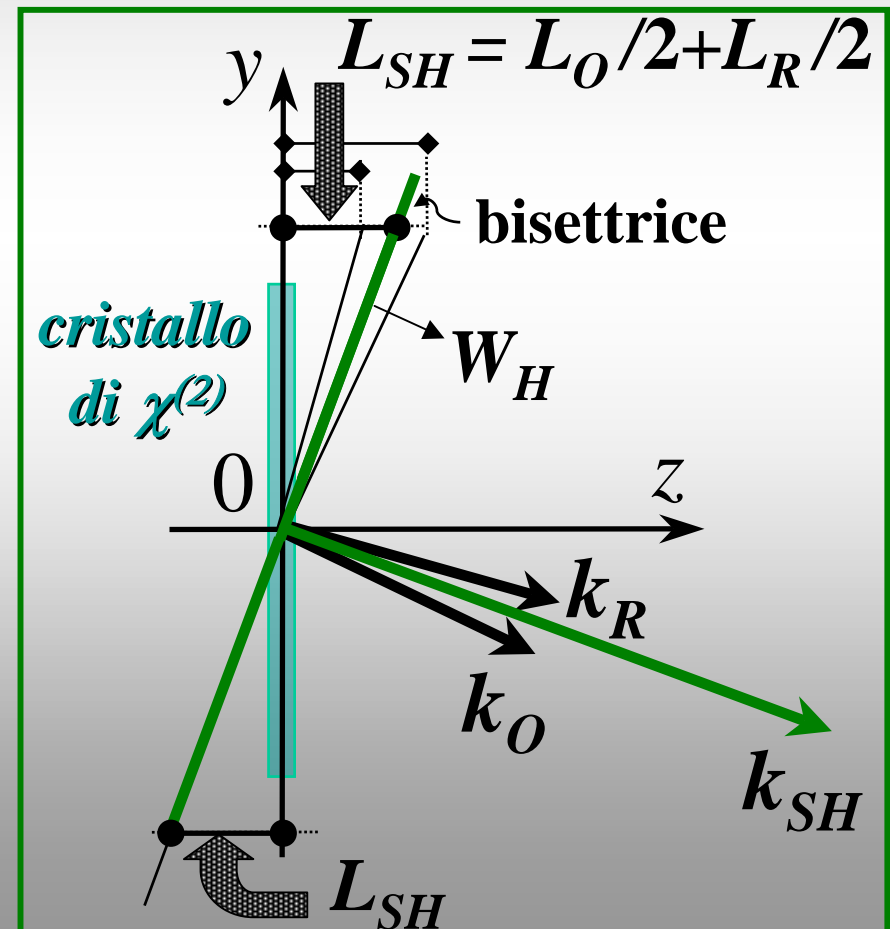
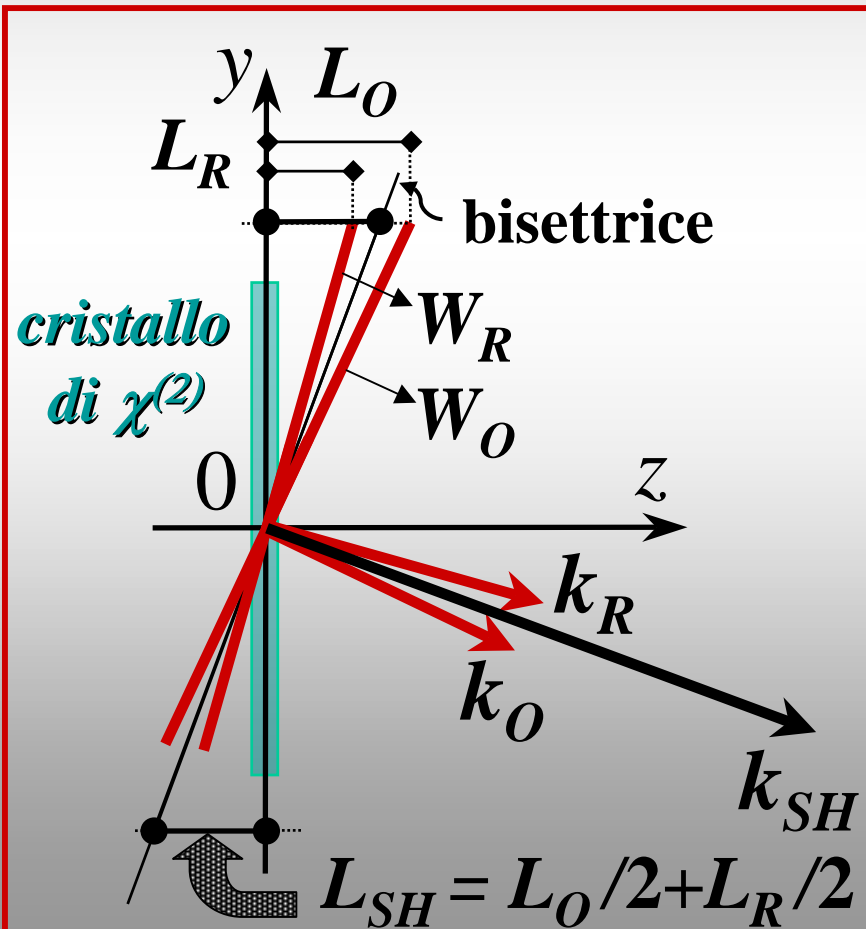
immagine
olografica
virtuale

dove i coefficienti β_j dipendono dal fascio di riferimento usato per la registrazione e dal materiale utilizzato per la registrazione

Il campo di seconda armonica ricostruisce in tempo reale un'immagine olografica virtuale $E_{SH} \propto E_O$

$$E_{SH} \propto A_R a_O(x, y) \exp \left\{ i \left[k_2 \frac{L_O(x, y) + L_R(x, y)}{2} + 2\omega t \right] \right\} \quad \text{con } k_2 = 2k_1$$

POSIZIONE e DIMENSIONI dell'IMMAGINE OLOGRAFICA a 2ω

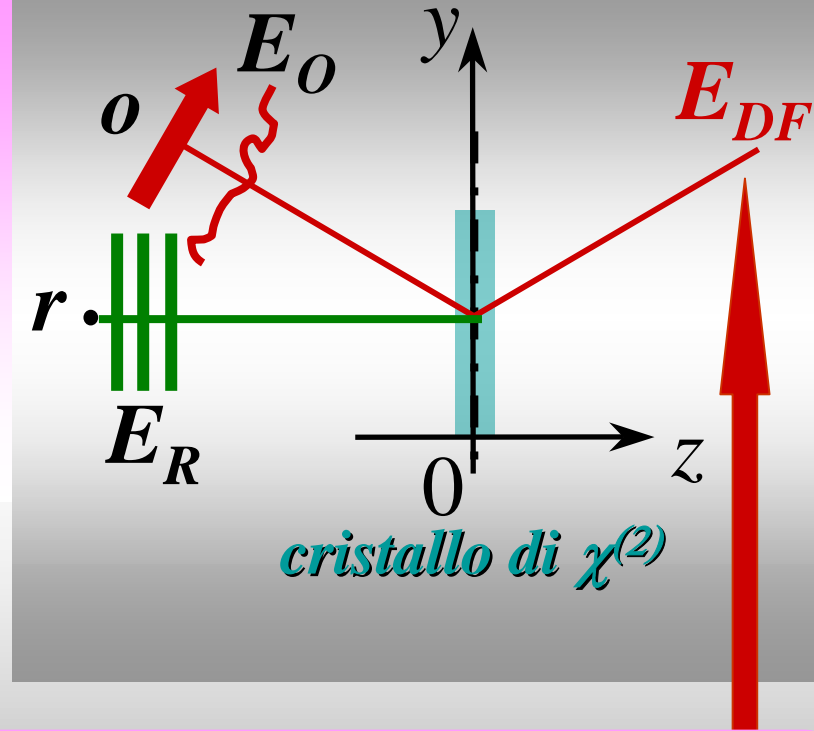


Il processo di cross-correlazione in frequenza differenza tra il campo $E_O(\omega)$ diffuso da un oggetto O con un campo $E_R(2\omega)$ di riferimento ha caratteristiche olografiche

Campo elettrico $E_T = E_O + E_R$
 in un cristallo con non-linearita' $\propto \chi^{(2)}$

$$E_T = \text{Re} \left\{ A_R \exp \left\{ i \left[k_2 L_R(x, y) + 2\omega t \right] \right\} + a_o(x, y) \exp \left\{ i \left[k_1 L_o(x, y) + \omega t \right] \right\} \right\}$$

L'interazione non lineare alla
 frequenza differenza
 genera un campo
 ad ω



$$E_{DF} \propto a_o(x, y) A_R \exp \left\{ i \left[k_2 L_R(x, y) - k_1 L_o(x, y) + \omega t \right] \right\} =$$

$$= a_o(x, y) A_R \exp \left\{ i \left[k_1 \left(2L_R(x, y) - L_o(x, y) \right) + \omega t \right] \right\}$$

$$k_2 = 2k_1$$

I fronti d'onda del campo a ω ricostruiscono immagini olografiche dell'oggetto, infatti:

per il campo ottenuto come frequenza differenza ad ω abbiamo

$$E_{DF} \propto A_R a_O(x, y) \exp \left\{ i \left[k_1 (2L_R(x, y) - L_O(x, y)) + \omega t \right] \right\} \quad \text{con } k_2 = 2k_1$$

per un ologramma di Gabor registrato ad ω e ricostruito a 2ω avremmo

$$E_H = \beta_1 B a_O^2(x, y) \exp \left\{ i \left[k_2 L_O(x, y) + 2\omega t \right] \right\} +$$

$$+ \beta_2 B a_O(x, y) \exp \left\{ i \left[k_2 \frac{L_O(x, y) + L_B(x, y)}{2} + 2\omega t \right] \right\} +$$

$$+ \beta_3 B a_O(x, y) \exp \left\{ i \left[k_2 \frac{2L_B(x, y) - L_O(x, y)}{2} + 2\omega t \right] \right\} +$$

$$+ \beta_4 B \exp \left\{ i \left[k_2 L_B(x, y) + 2\omega t \right] \right\}$$

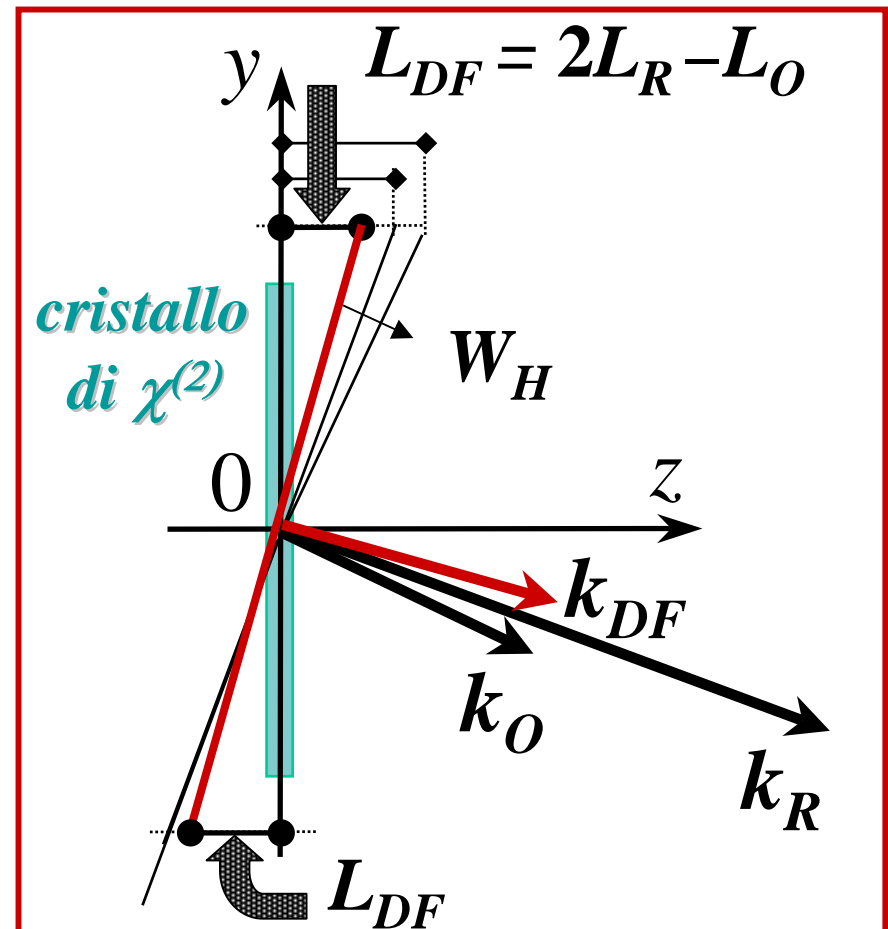
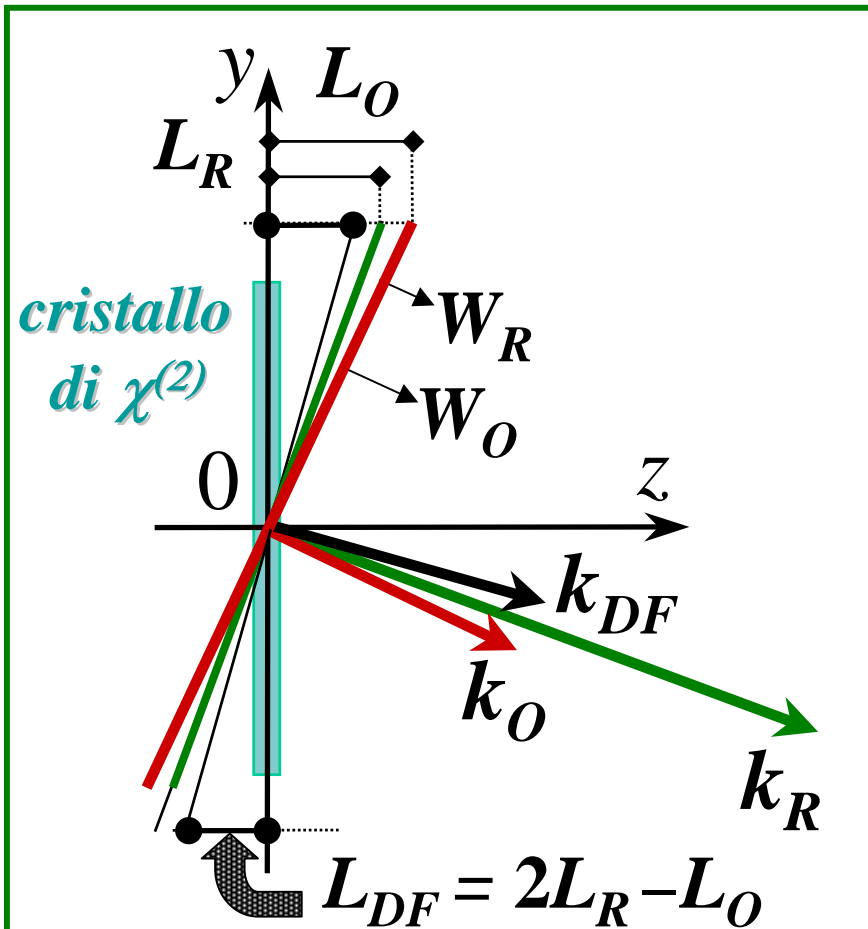
dove i coefficienti β_j dipendono dal fascio di riferimento usato per la registrazione e dal materiale utilizzato per la registrazione

immagine
olografica
reale

Il campo alla frequenza differenza ricostruisce in tempo reale un'immagine olografica reale $E_{DF} \propto E_0^*$

$$E_{DF} \propto A_R a_0(x, y) \exp \left\{ i \left[k_1 (2L_R(x, y) - L_0(x, y)) + \omega t \right] \right\}$$

POSIZIONE e DIMENSIONI dell'IMMAGINE OLOGRAFICA ad ω



L'interazione a tre onde in un cristallo con non-linearità di $\chi^{(2)}$ e' un processo olografico in tempo reale

se

un campo e' nullo all'ingresso del cristallo cosi' che solo due campi incidano sul cristallo

e

uno dei due campi e' cosi' intenso da rimanere costante durante l'interazione (RIFERIMENTO)

allora

il campo inizialmente nullo esce proporzionale a quello non nullo all'ingresso (OGGETTO) o al suo coniugato

quindi

il campo in uscita e' un OLOGRAMMA

La natura (reale o virtuale) dell'immagine olografica dipende dalla scelta delle condizioni iniziali e dalla natura dell'oggetto.

In particolare:

SHG : oggetto reale \Rightarrow immagine virtuale

DFG : *campo di riferimento a 2ω* : oggetto reale \Rightarrow immagine reale
campo di riferimento ad ω : oggetto reale \Rightarrow immagine virtuale

APPARATO SPERIMENTALE

SHG HOLOGRAMS

Rivelatore dell'immagine reale **CCD**
Lente che forma l'immagine reale **L₅**
Cristallo non-lineare **BBO I**

*Oggetto reale ad ω **O***

o (~100 mJ)

r (~100 mJ)

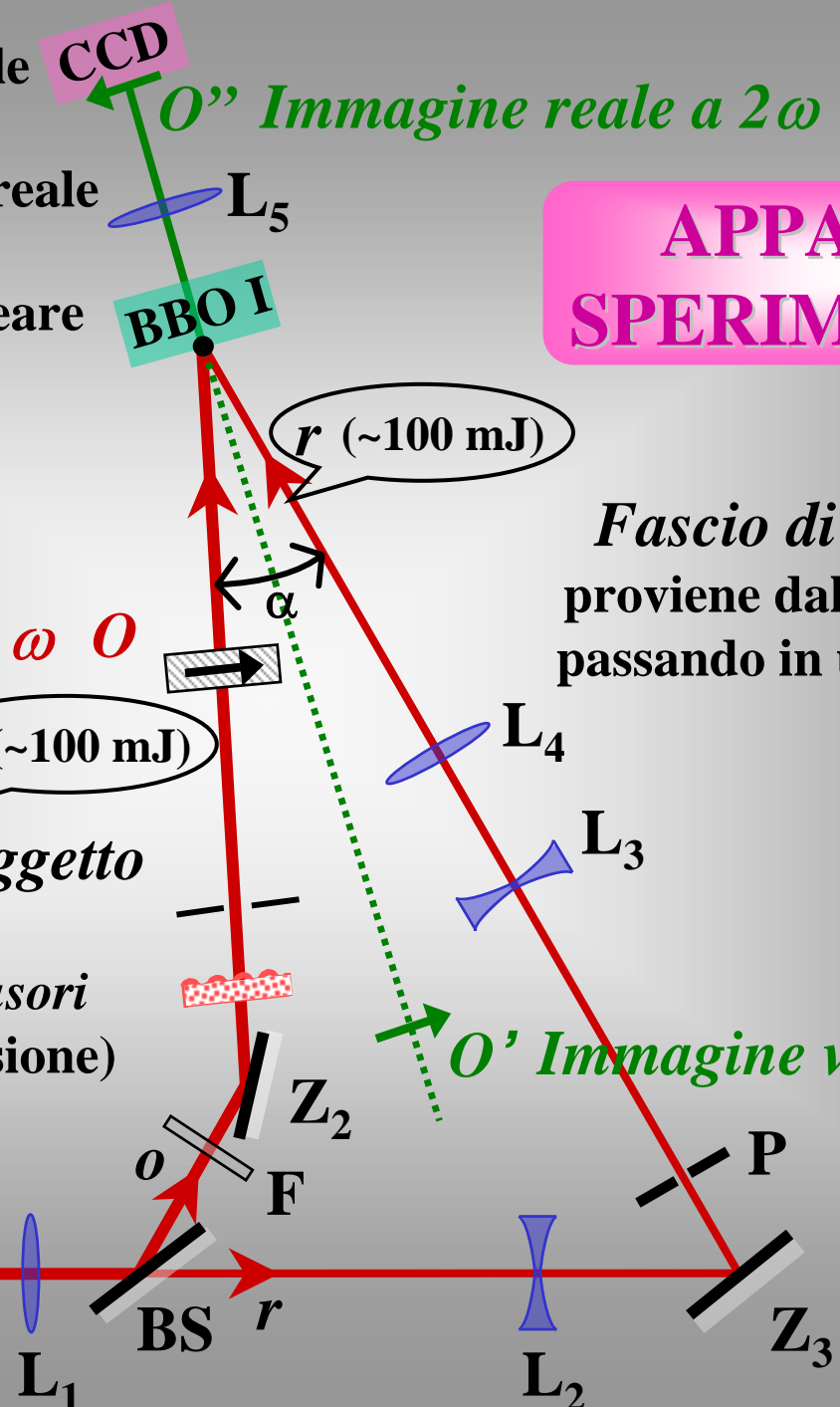
Fascio di riferimento proviene dal laser Nd:YAG passando in un filtro spaziale

Fascio che illumina l'oggetto proviene dal laser passando attraverso i diffusori (50 mrad di angolo di diffusione)

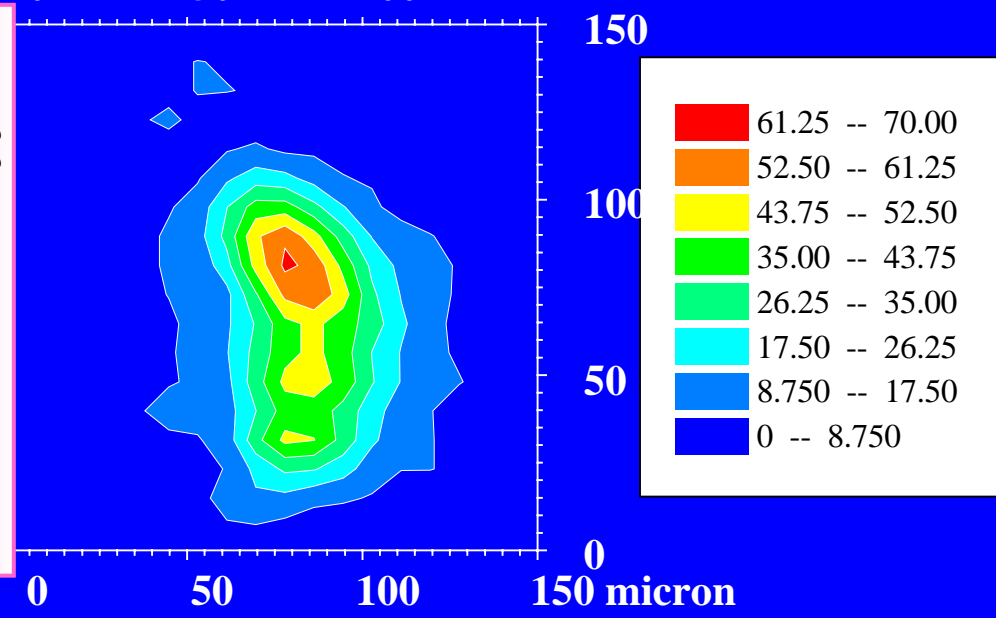
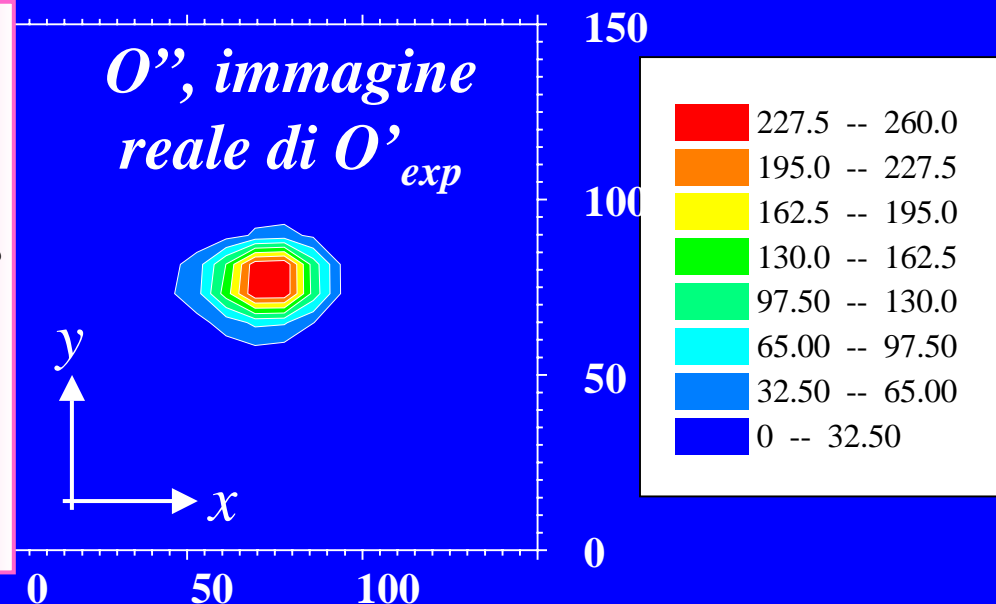
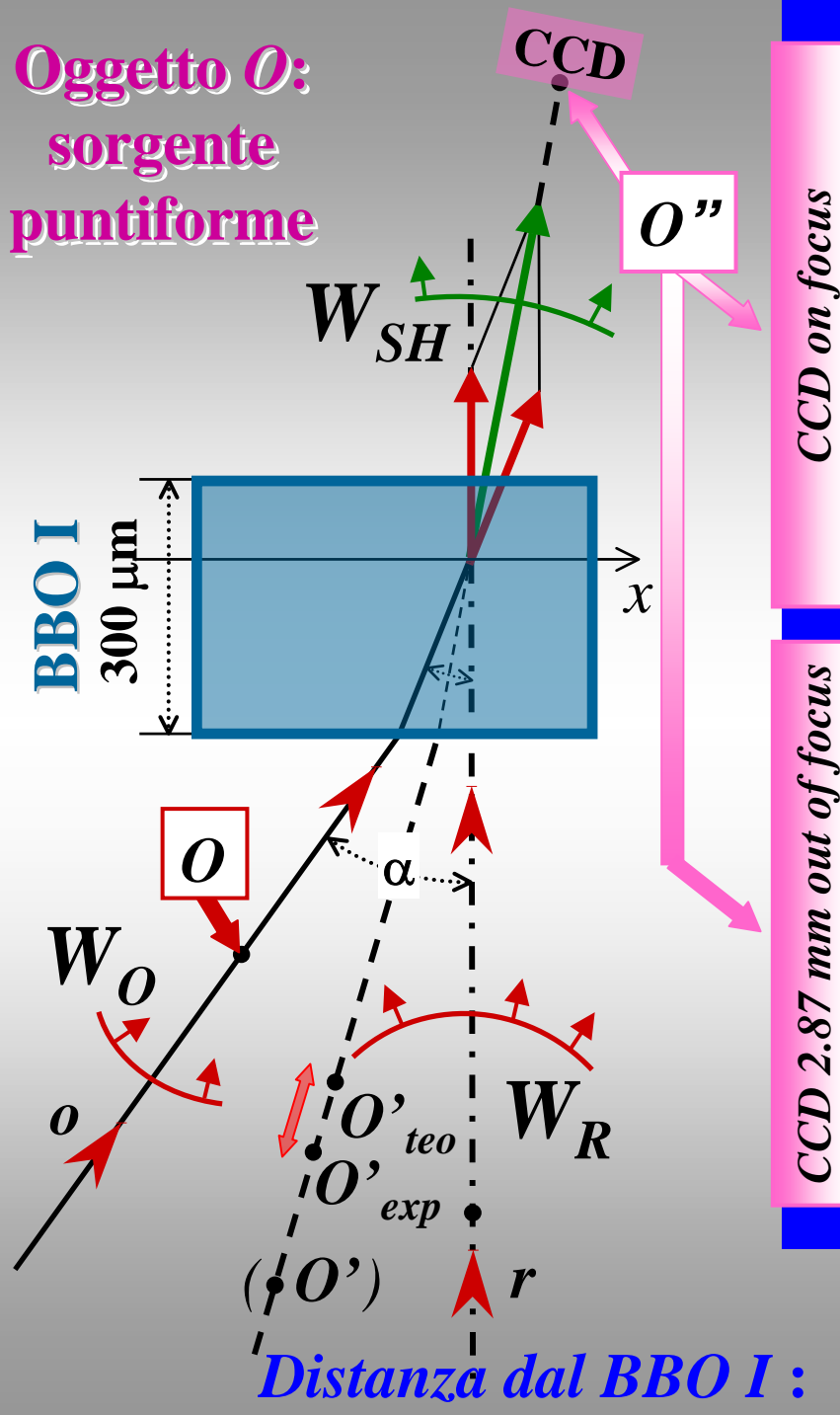
O' Immagine virtuale a 2ω

Laser Q-switched 18 ns, 10 Hz

Nd:YAG



Oggetto O :
sorgente
puntiforme



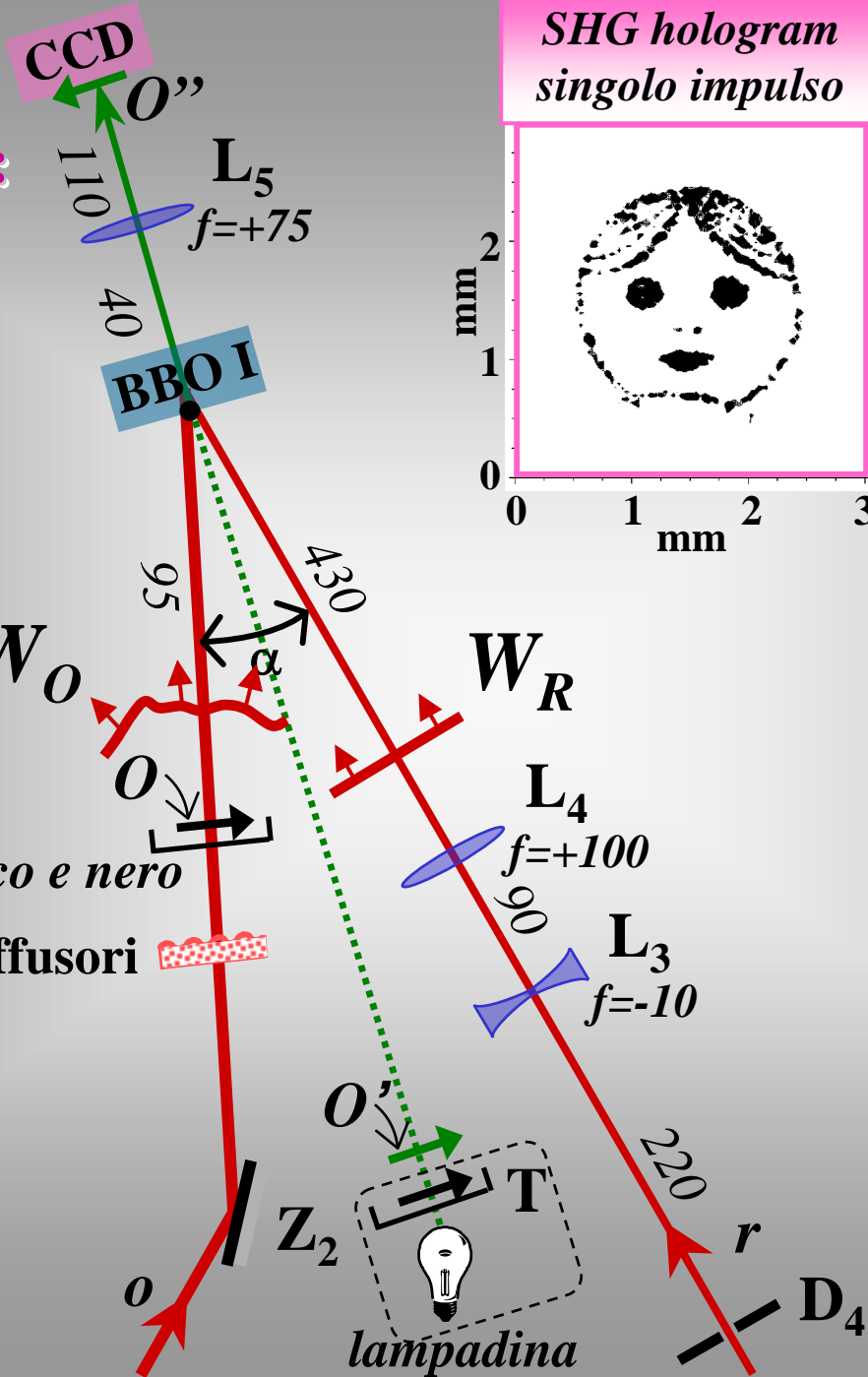
Risoluzione: $2.3 \times$ limite di diffrazione

Distanza dal BBO I : $O'_{teo} = 188 \text{ mm} \longleftrightarrow O'_{exp} = 205 \text{ mm}$

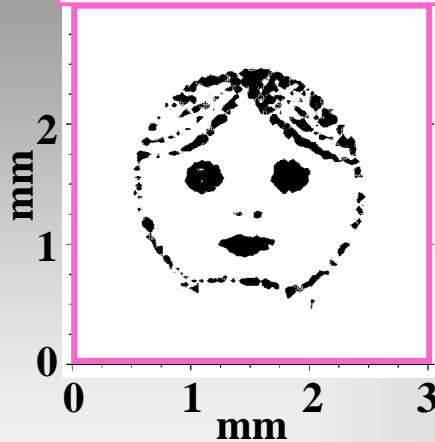
Oggetto O
bidimensionale:
disegno su una
diapositiva

Diapositiva in bianco e nero

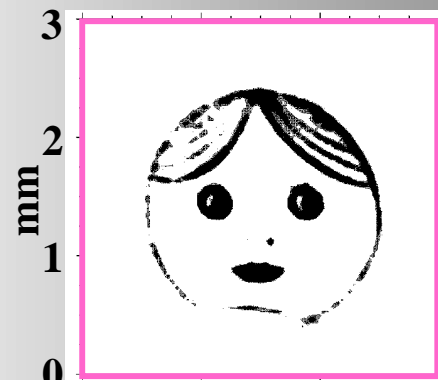
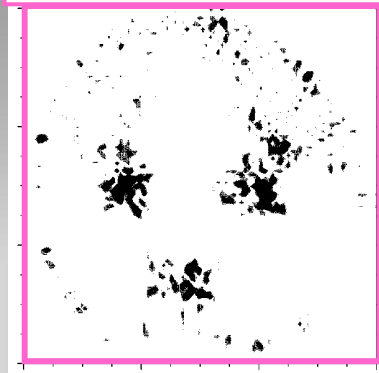
Diffusori



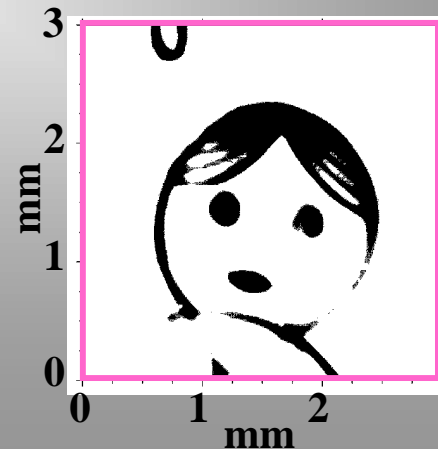
SHG hologram
singolo impulso



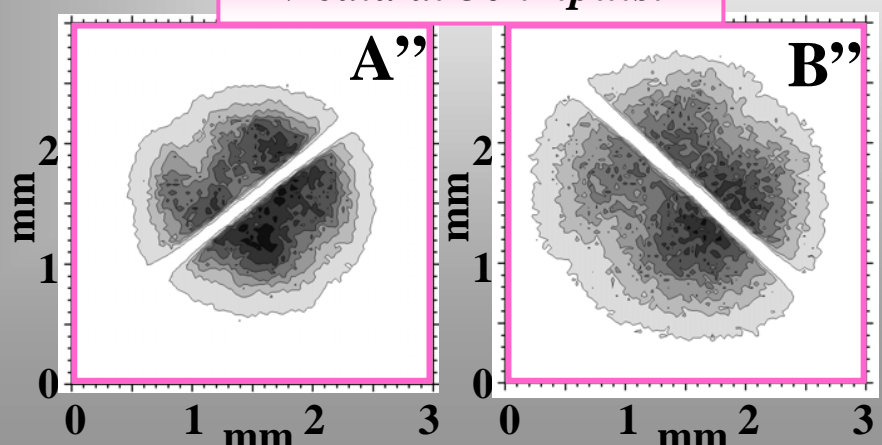
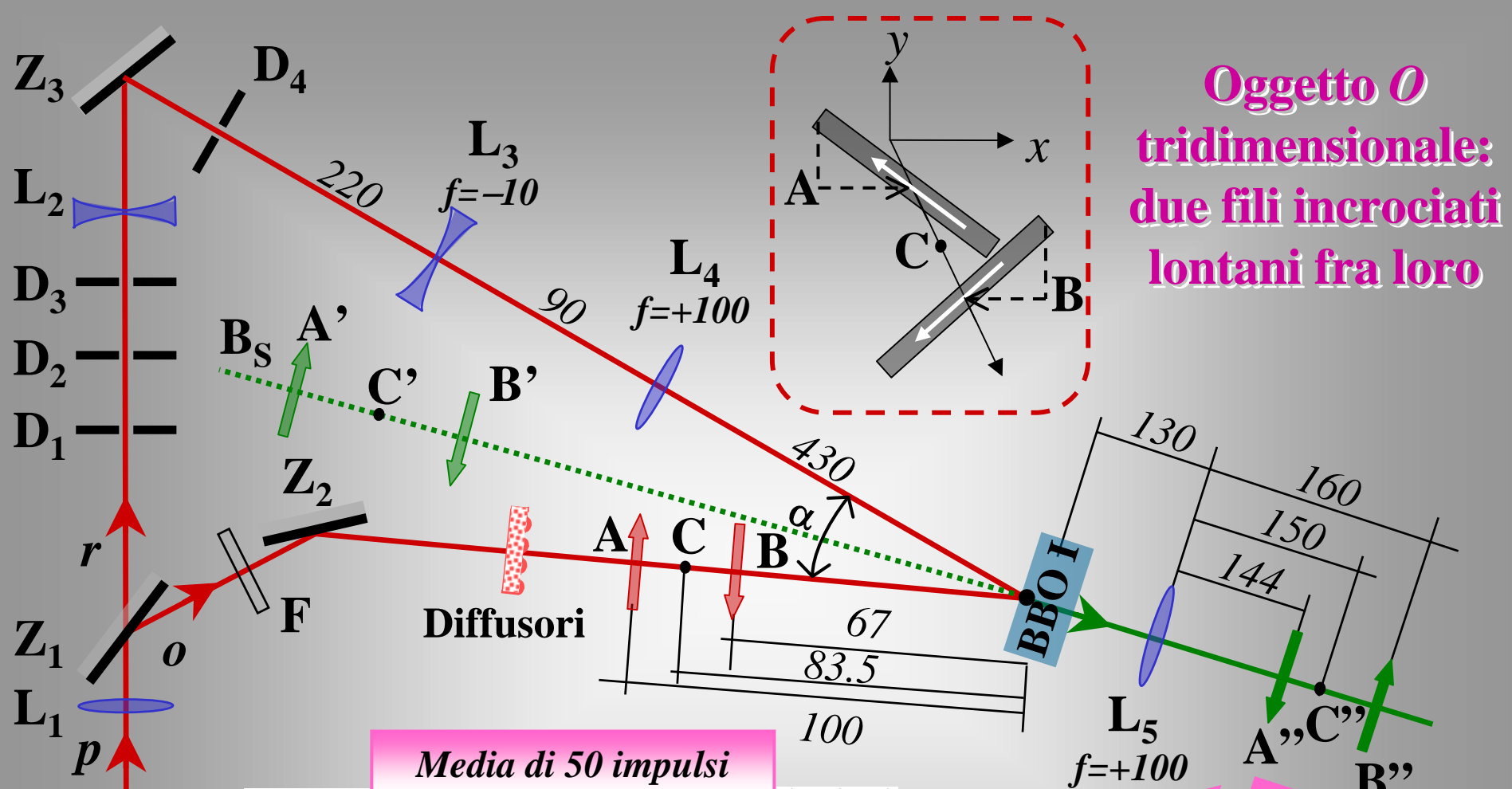
CCD
fuori fuoco



Media di
50 impulsi



Diapositiva
originale



DFG HOLOGRAMS

Oggetto O :
sorgente virtuale
puntiforme

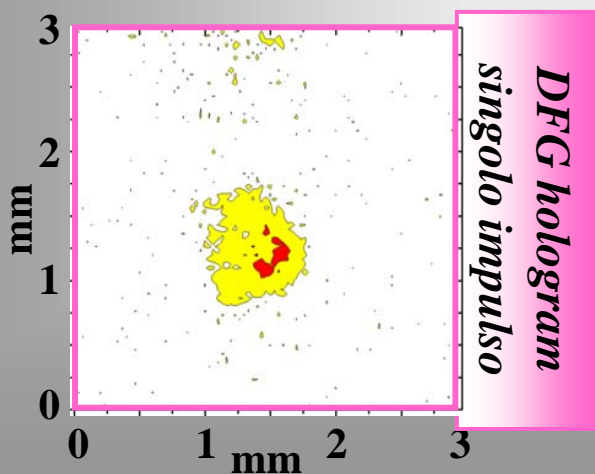
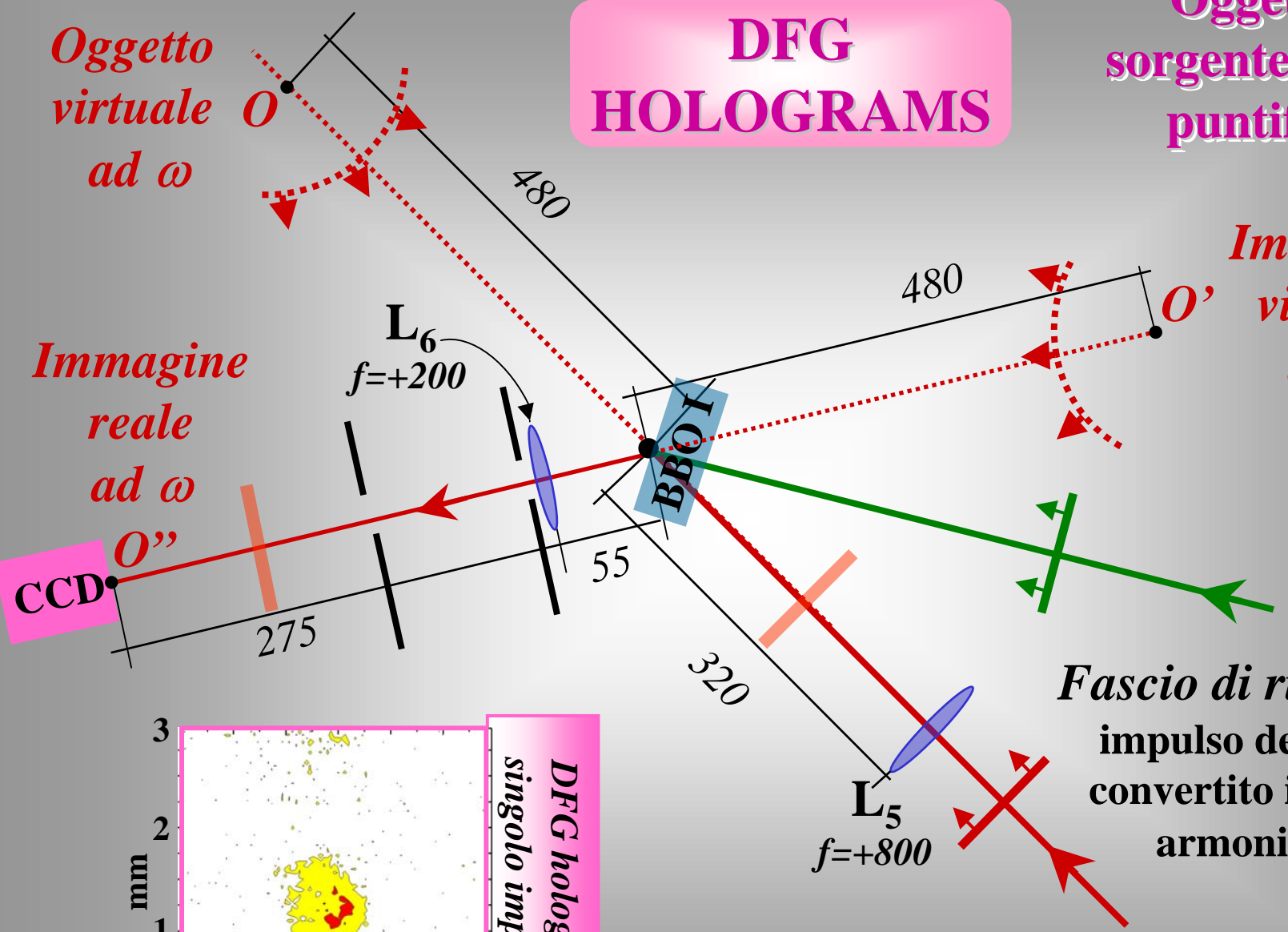
Oggetto
virtuale
ad ω

Immagine
virtuale
ad ω

Immagine
reale
ad ω

Fascio di riferimento
impulso del laser (ω)
convertito in seconda
armonica (2ω)

Risoluzione: $\sim 2 \times$ limite di diffrazione



CONCLUSIONI

- **gli ologrammi in seconda armonica (SHG) e in frequenza differenza (DFG) si generano alle POSIZIONI e con le DIMENSIONI previste dalle teorie olografiche**
- **RISOLUZIONE SPAZIALE: circa due volte il limite di diffrazione per una pupilla di $5 \times 5 \text{ mm}^2$ (sezione del cristallo)**
➡ **la risoluzione angolare e' uguale a quella dell'occhio umano**
- **gli ologrammi in seconda armonica sono ottenuti in TEMPO REALE, ovvero durano quanto l'impulso laser**
- **possibilita' di realizzare operatori logici CALCOLO OTTICO operanti in modo PARALLELO**

APPLICAZIONI dell'OLOGRAFIA in SHG e DFG

Calcolo ottico altamente parallelo e in tempo reale:

- Operatori logici AND e OR
- SEMI-SOMMATORE parallelo

Possibilita' di avere una logica chiusa con campi in ingresso e in uscita alla stessa frequenza:

- due stadi: SHG seguita da DFG con campo di riferimento ad ω
- uno stadio solo: DFG con fascio di riferimento a 2ω

A. Andreoni, M. Bondani, Yu.N. Denisyuk and M.A.C. Potenza
J. Opt. Soc. Am. B, 17 (2000) 977-983

Yu.N. Denisyuk, A. Andreoni, M. Bondani, and M.A.C. Potenza
Optika i Spectroscopia, 89 n.3 (2000) 113-120

Yu.N. Denisyuk, A. Andreoni, M. Bondani, and M.A.C. Potenza
Opt. Letters, 25 (2000) 890-892

Yu.N. Denisyuk, A. Andreoni, M. Bondani, and M.A.C. Potenza
Optical Memory & Neural Networks (2000). *In corso di stampa.*

A. Andreoni, M. Bondani, and M.A.C. Potenza
Opt. Letters, 25 (2000) 1570-1572

Yu.N. Denisyuk, A. Andreoni, M. Bondani, and M.A.C. Potenza
SPIE Conference Proceedings APCOM'2000. Relazione ad invito.

A. Andreoni, M. Bondani, Yu.N. Denisyuk, M.A.C. Potenza, and E. Puddu
Rev. Sci. Instrum. (2000). *In corso di stampa.*

M. Bondani and A. Andreoni

Holographic nature of three-wave mixing

Phys. Rev. Letters (2001). *Inviato per la pubblicazione.*

A. Andreoni, M. Bondani, M.A.C. Potenza, and Yu.N. Denisyuk

Real-time holographic fields in three-wave mixing: an experimental demonstration

Phys. Rev. A (2001). *Manoscritto in preparazione.*

