

Olografia

Alberto Bordin, Giulio Cappelli

13-17 Novembre 2017

Sommario

Ologramma di una figura statica.

Ologramma di una figura che viene mossa.

1 Teoria

L'olografia è basata sulla registrazione di fase e ampiezza di un'onda elettromagnetica $a(x, y) = |a(x, y)|e^{i\phi(x, y)}$ su di un supporto che giace nel piano $x - y$. A questo scopo utilizziamo una lastra fotografica.

È necessaria un'onda $A(x, y) = |A(x, y)|e^{i\psi(x, y)}$ di riferimento, infatti l'interferenza tra il fascio di riferimento e il fascio diffuso dall'oggetto provoca un pattern d'interferenza che contiene tutta l'informazione su ampiezza e fase del campo elettromagnetico:

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |A(x, y) + a(x, y)|^2 = \\ &= |A|^2 + |a|^2 + aA^* + Aa^* \end{aligned}$$

In fase di impressione la lastra fotografica si annerisce punto per punto in modo proporzionale all'intensità incidente I . Assumendo che la trasmittività della lastra sia lineare con l'intensità¹ ($t = \gamma I$) si ha:

$$t(x, y) = t_{ref} + \gamma(|a|^2 + aA^* + Aa^*)$$

dove $t_{ref} = \gamma|A|^2$ è la trasmittività di background dovuta all'onda di riferimento.

Dopo che la lastra è stata impressionata e sviluppata, utilizzando un'onda di ricostruzione $B(x, y)$ si ottiene, per il campo trasmesso,

$$\begin{aligned} E_{trasm} &= Bt = Bt_{ref} + \gamma(B|a|^2 + BaA^* + BAa^*) = \\ &= U_1 + U_2 + U_3 + U_4 \end{aligned}$$

Se utilizziamo come fascio di ricostruzione lo stesso fascio di luce usato per il riferimento e assumendo che $|A|^2$ sia costante su tutta la lastra, si recuperano i termini lineari in a e a^* , che contengono tutta l'informazione di fase e ampiezza:

$$U_3 = \gamma|A|^2a \quad U_4 = \gamma A^2a^*$$

Per osservare nitidamente l'immagine occorre separare spazialmente queste due componenti del campo trasmesso e per farlo si utilizza lo schema mostrato in Figura 1 che riprende quello dell'ologramma di Leith-Uptanieks.²

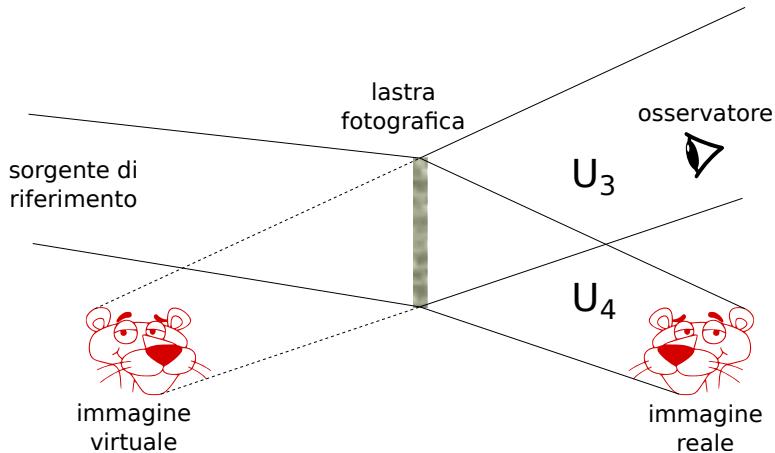


Figura 1: Schema olografia di Leith-Uptanieks

¹In realtà, poiché la lastra si annerisce, verosimilmente è $(1 - t)$ ad essere proporzionale all'intensità incidente; in ogni caso, mutatis mutandis, il discorso rimane valido.

²In verità è difficile utilizzare come fascio di ricostruzione esattamente lo stesso $A(x, y)$ utilizzato per il riferimento, poiché basta un minimo movimento per far comparire uno sfasamento $B = A(x, y)e^{i\psi(x, y)+i\delta(x, y)}$ questo fa sì che compaiano anche dei termini γA^2a e $\gamma|A|^2a^*$. Il primo però non è importante perché è un termine rapidamente oscillante, il secondo è quello che va a formare l'immagine reale.

2 Apparato sperimentale

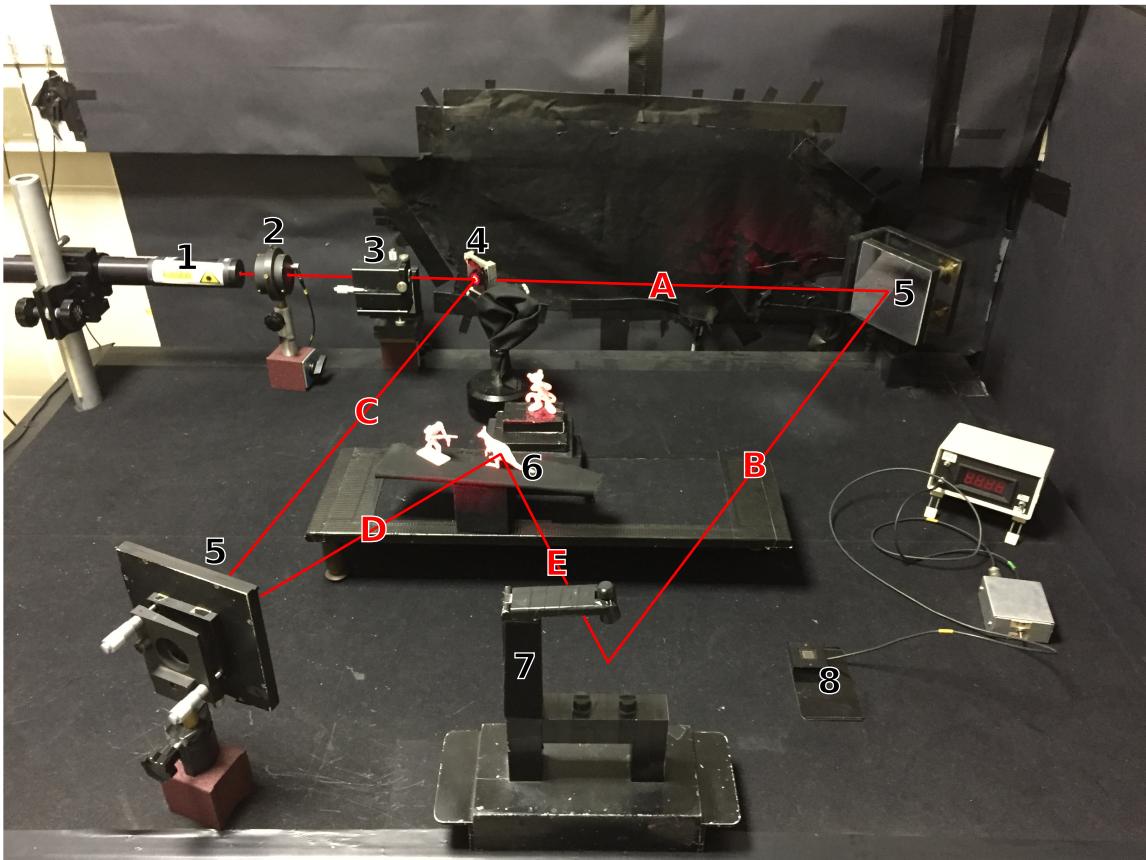


Figura 2: Schema olografia di Leith-Uptanieks. In rosso è tracciato il percorso del fascio laser.

L'apparato a disposizione è riportato in Figura 2 ed è composto da:

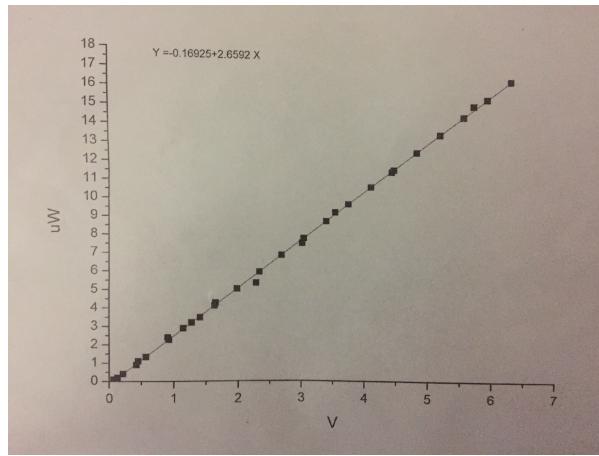
1. Laser He-Ne ($\lambda=633$ nm) di potenza ~ 15 mW e con una lunghezza di coerenza di ~ 30 cm.
2. Shutter, azionabile dall'esterno, per oscurare completamente il fascio.
3. Obiettivo x20 e filtro spaziale (*pin-hole*). Il primo trasforma un'onda piana in un'onda sferica, il secondo è posizionato nel fuoco della lente divergente ed ha un diametro $12.5 \mu\text{m}$; serve a selezionare il modo TEM_{00} , grazie al quale si ha un'illuminazione uniforme.
4. *Beam splitter*: trasmette il 5% del fascio come riferimento e ne riflette il 95%, che viene poi indirizzato sull'oggetto.
5. Specchi per indirizzare i due fasci uno sulla lastra e uno sull'oggetto.
6. Oggetto di cui vogliamo fare l'olografia; dipinto di bianco così da massimizzare la riflessione della luce su di esso.
7. Supporto per la lastra fotografica.

8. Rivelatore al silicio con una superficie attiva di 1 cm^2 montato su un supporto che permette di misurare l'intensità incidente su tutta la superficie della lastra.



Il fotodiodo restituisce una tensione che è possibile convertire in una potenza per cm^2 grazie alla curva di taratura presente in laboratorio:

$$P[\mu\text{W}] = -0.16925 + 2.6592V_{mis} \quad (1)$$



Abbiamo inoltre a disposizione 4 lastre fotografiche ai sali d'argento; non esistono infatti dispositivi di acquisizione elettronici con la risoluzione necessaria a registrare l'interferenza di luce visibile.

3 Accorgimenti sperimentali

Come scritto, utilizziamo lo stesso fascio laser diviso in ampiezza come onda di riferimento e onda incidente sull'oggetto.

È necessario porre particolare attenzione al cammino ottico percorso dai due fasci; infatti la fase relativa fra il fascio proveniente dall'oggetto e quello di riferimento deve essere ben definita. Per questo la differenza di cammino tra i due fasci deve essere molto minore della lunghezza di coerenza del laser He-Ne. Si deve cioè avere:

$$\text{diff} := |A + B - (C + D + E)| \lesssim 1 \text{ cm} \quad (2)$$

Affinché la luce riflessa dagli oggetti illumini bene la lastra fotografica è opportuno verificare che l'altezza degli oggetti sia uguale a quella della lastra.

È inoltre necessario calcolare il corretto tempo di esposizione della lastra. Per farlo serve conoscere la densità superficiale di energia necessaria per un annellamento ottimale che il professore ci ha detto essere $50 \frac{\mu\text{J}}{\text{cm}^2}$.

Conoscendo la potenza incidente sulla lastra è quindi possibile ricavare il tempo di esposizione:

$$t[\text{s}] = \frac{50[\mu\text{J}]}{P[\mu\text{W}]} = \frac{50[\mu\text{J}]}{-0.16925 + 2.6592V_{mis}} \quad (3)$$

Come spiegato nella parte di teoria la lastra deve essere illuminata in modo uniforme, per questo sono state misurate le intensità I_r , I_o e I_{tot} , rispettivamente, del fascio di riferimento, della luce diffusa dall'oggetto e quella totale. Misurando separatamente I_r e

I_o ci si è preoccupati anche di avere un buon rapporto segnale rumore verificando che l'intensità del fascio di riferimento fosse maggiore di quella del fascio oggetto.

3.1 Elaborazione lastra

La lastra fotografica non deve essere esposta alla luce ambientale prima di essere impressionata e sviluppata. Una volta impressionata, la lastra deve essere inserita in un contenitore in modo tale che non venga esposta alla luce e che possa essere quindi sviluppata senza essere danneggiata.

Il processo di sviluppo è costituito da 4 fasi che prevedono di riempire il contenitore con 3 diversi liquidi:

- Riempire il contenitore con il liquido di sviluppo e attendere 5 minuti
- Riempire il contenitore con acqua distillata e attendere 5 minuti
- Riempire il contenitore con il liquido di fissaggio e attendere 5 minuti
- Riempire il contenitore con acqua distillata e attendere 5 minuti

Dopo questi 4 passaggi è possibile estrarre la lastra dal contenitore e una volta asciutta può essere osservata posizionandola nuovamente sul supporto e illuminandola col fascio di ricostruzione.

4 Misure preliminari

Prima di posizionare ed impressionare la lastra fotografica sono necessarie alcune misure preliminari come evidenziato negli accorgimenti sperimentali.

Per ognuna delle 4 lastre impressionate sono state eseguite le seguenti misure:

- Abbiamo misurato le distanze A, B, C, D, E in modo che fosse verificata la relazione 2.
- Abbiamo interrotto il fascio che incideva sull'oggetto e misurato l'intensità I_r del fascio di riferimento.
- Abbiamo interrotto il fascio di riferimento e misurato l'intensità I_o della luce diffusa dall'oggetto.
- Abbiamo misurato l'intensità totale I_{tot} incidente sulla lastra.
- Abbiamo calcolato la potenza totale P_{tot} incidente sulla lastra utilizzando l'equazione 1.
- Abbiamo calcolato il tempo di esposizione considerando il valore centrale di P_{tot} utilizzando l'equazione 3.

Nelle seguenti sezioni sono riportate varie tabelle in cui sono presenti tutti i valori misurati per ognuna delle quattro lastre.

5 Olografia statica

Abbiamo utilizzato le prime due lastre per effettuare l'olografia di alcuni oggetti immobili e posizionati come in Figura 2.

56		59
	59	
54		59

Valori di I_o espressi in mV con un errore di 1 mV

5.1 Soldatino con lancia

Come primo oggetto abbiamo scelto un soldatino dotato di una lancia.

A	B	C	D	E	diff
60.0	92.5	78.5	38.0	36.0	0

Distanze in cm con un errore di 0.5 cm

1.09	1.13	1.11
1.43	1.50	1.45
1.21	1.26	1.24

Valori di I_{tot} espressi in V con un errore di 0.01 V

1.14		1.12
	1.48	
1.12		1.13

Valori di I_r espressi in V con un errore di 0.01 V

2.73	2.84	2.78
3.63	3.81	3.69
3.04	3.18	3.13

Valori di P_{tot} espressi in μW

Abbiamo così ottenuto un tempo di esposizione $t = 13$ s che ha portato all'ogramma mostrato in Figura 3.



Figura 3: Orogramma soldatino. Il pallino che si vede oltre la lancia è il *beam splitter* anche se questo è molto lontano dalla lastra (vedi sezione Approfondimenti).

5.2 La caccia

Per la seconda lastra abbiamo scelto tre oggetti diversi: un canguro, un soldato con un fucile e la pantera rosa.

67	69	70
68	70	71
69	68	71

Valori di I_o espressi in mV con un errore di 1 mV

Oggetto	A	B	C	D	E	diff
Soldato	62.5	89.5	77.5	34.5	39.0	1
Canguro	-	-	-	38.5	35.5	0.5
Pantera	-	-	-	50.0	46.0	21.5

Distanze in cm con un errore di 0.5 cm

1.25	1.30	1.25
1.56	1.59	1.52
1.25	1.27	1.24

Valori di I_{tot} espressi in V con un errore di 0.01 V

1.19	1.24	1.19
1.50	1.54	1.49
1.20	1.22	1.19

Valori di I_r espressi in V con un errore di 0.01 V

3.15	3.28	3.15
3.98	4.06	3.87
3.15	3.21	3.13

Valori di P_{tot} espressi in μW

Abbiamo così ottenuto un tempo di esposizione $t = 12$ s che ha portato all'ologramma mostrato in Figura 4:



Figura 4: Ologramma caccia. La pantera rosa è più sfocata rispetto al canguro e al soldato perché è molto più distante dalla lastra (vedi sezione Approfondimenti).

6 Olografia dinamica

Le restanti due lastra le abbiamo utilizzate per effettuare due ologrammi dinamici, cioè i due oggetti scelti sono stati posti in due stati diversi per metà tempo di esposizione ciascuno.

6.1 Cubo con martelletto

Il primo oggetto scelto è un cubo dotato di un martelletto che può sbatterci sopra. Per effettuare l'ologramma abbiamo preparato la lastra, premuto il martelletto, acceso il laser, lasciato il martelletto e infine spento il laser.

A	B	C	D	E	diff
62.5	89.5	78.0	39.0	35.0	0

Distanze in cm con un errore di 0.5 cm

1.24	1.29	1.25
1.53	1.55	1.51
1.19	1.24	1.15

Valori di I_r espressi in V con un errore di 0.01 V

51	51	51
53	52	53
50	50	50

Valori di I_o espressi in mV con un errore di 1 mV

1.23	1.30	1.25
1.55	1.58	1.54
1.25	1.30	1.22

Valori di I_{tot} espressi in V con un errore di 0.01 V

3.10	3.29	3.15
3.95	4.03	3.93
3.15	3.29	3.07

Valori di P_{tot} espressi in μW

Abbiamo così ottenuto un tempo di esposizione $t = 12$ s diviso in due parti da 6 s ciascuna che ha portato all'oggetto mostrato in Figura 5.

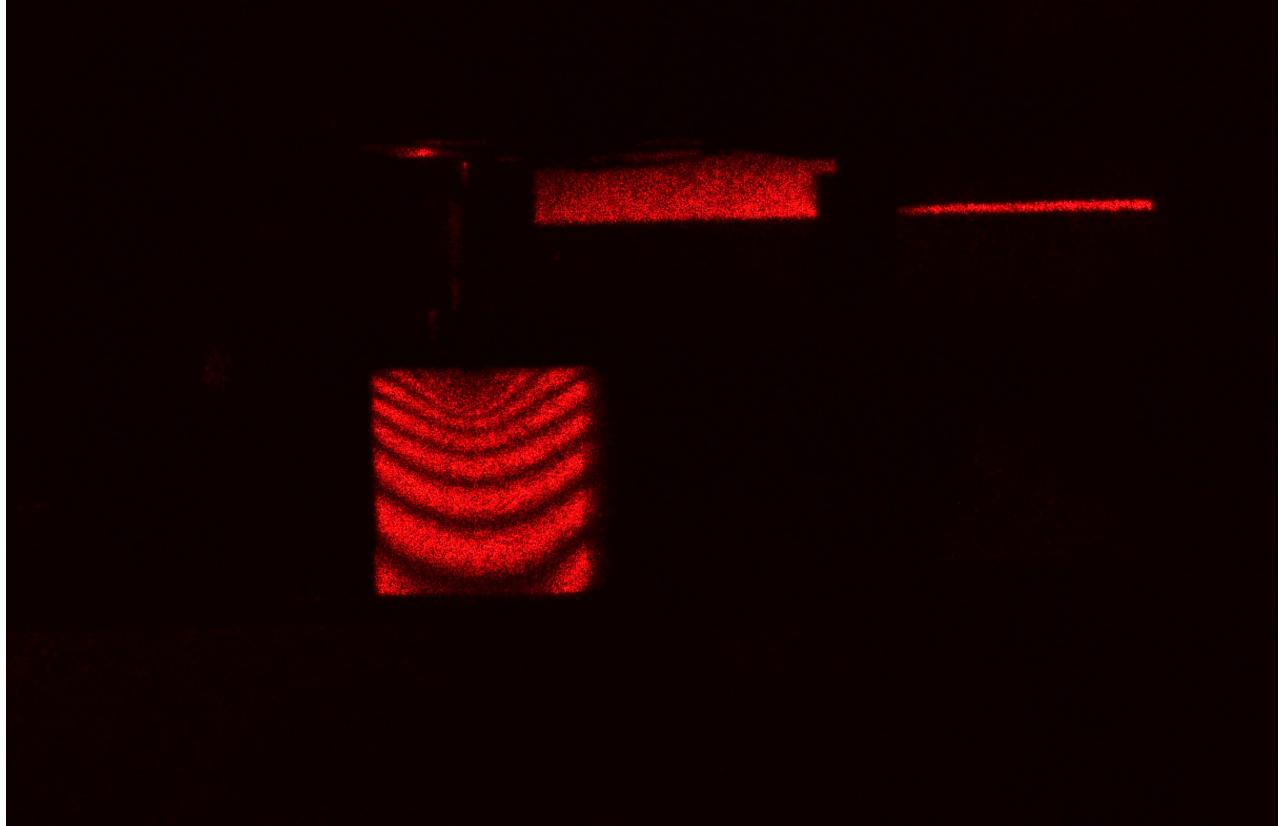


Figura 5

6.2 Altoparlante

Abbiamo utilizzato l'ultima lastra a nostra disposizione per effettuare l'olografia di un altoparlante collegato ad un generatore di funzioni impostato a 783 Hz (un Sol5). Come per il cubo abbiamo tenuto acceso l'altoparlante per la prima metà del tempo di esposizione e lo abbiamo tenuto spento durante la seconda metà.

A	B	C	D	E	diff
63.0	87.5	69.0	36.5	44.0	1

Distanze in cm con un errore di 0.5 cm

1.24	1.31	1.28
1.58	1.61	1.57
1.26	1.33	1.25

Valori di I_r espressi in V con un errore di 0.01 V

98	95	96
94	97	100
93	97	99

Valori di I_o espressi in mV con un errore di 1 mV

1.34	1.38	1.36
1.62	1.67	1.65
1.29	1.38	1.30

Valori di I_{tot} espressi in V con un errore di 0.01 V

3.39	3.50	3.44
4.14	4.27	4.22
3.26	3.50	3.29

Valori di P_{tot} espressi in μ W

Abbiamo così ottenuto un tempo di esposizione $t = 11.7$ s che ha portato all'ogramma mostrato in Figura 6.

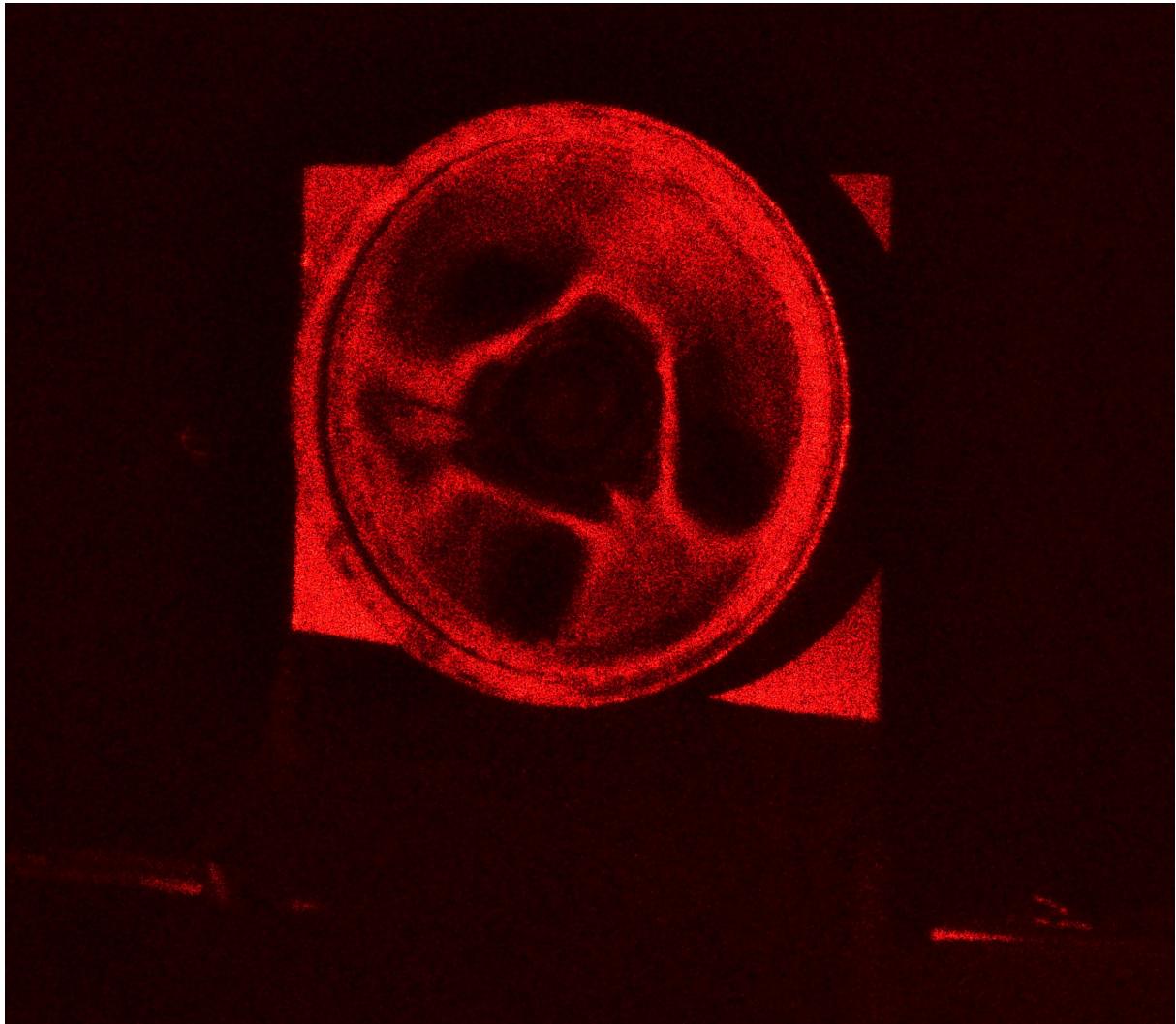


Figura 6

7 Lampada spettrale

Una lampada spettrale è in grado di emettere luce a diverse lunghezze d'onda λ_i nel visibile. L'interferenza fra la luce di ogni λ_i e il pattern d'interferenza impresso sulla lastra genera un'immagine trasla-

ta diversamente al variare di λ_i . Le immagini relative alle diverse lunghezze d'onda vengono quindi separate come mostrato in Figura 7.

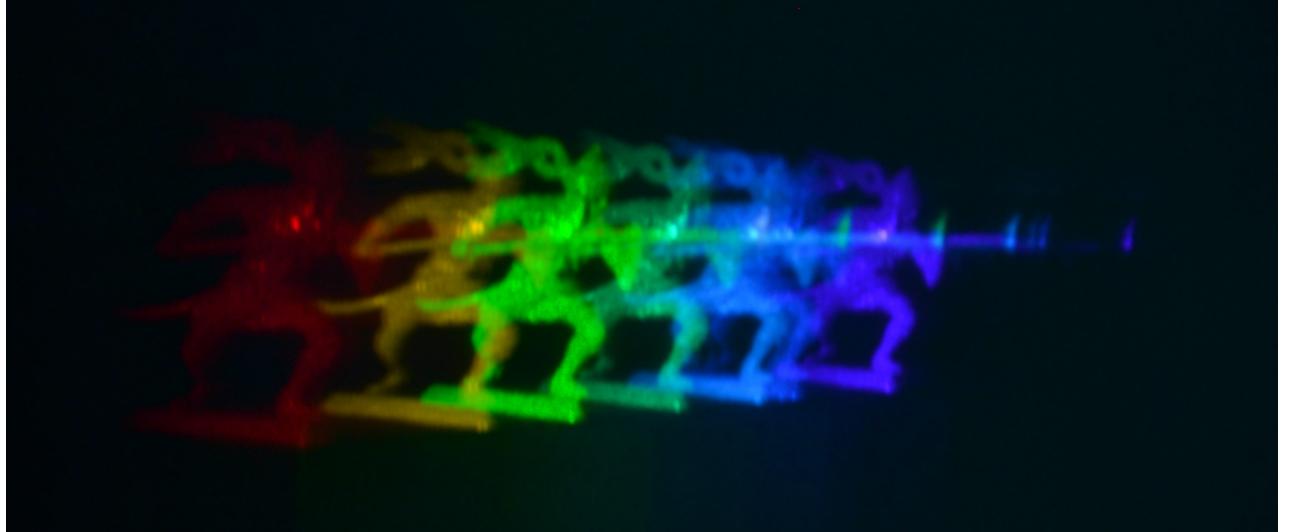


Figura 7

8 Approfondimenti

Una volta fatto l'ologramma del soldatino (vedi Figura 3) abbiamo notato il *beam splitter* sullo sfondo. Questo, come si può vedere in Figura 2, è ad una distanza dalla lastra che viola l'equazione 2.

Abbiamo allora deciso di fare l'oggetto di un oggetto posto ad una distanza dalla lastra tale che la differenza di cammino ottico fra il fascio di riferimento e il fascio oggetto fosse maggiore di 1 cm. Il risultato di questa decisione è l'oggetto della caccia (vedi Figura 4) in cui la pantera rosa è molto più lontana dalla lastra rispetto agli altri oggetti. Nonostante una differenza di cammino ottico fra i due fasci di 21.5 cm abbiamo ottenuto un ottimo risultato; si riescono infatti a vedere anche i dettagli del viso della pantera, come mostrato in Figura 9.



Figura 8: Foto dell'oggetto della caccia sopra il quale si notano anche due ordini di diffrazione.



Figura 9: Foto dell'ologramma della pantera rosa