

# 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'intensità<sup>1</sup> ( $t = \gamma I$ ) 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,

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

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.<sup>2</sup>

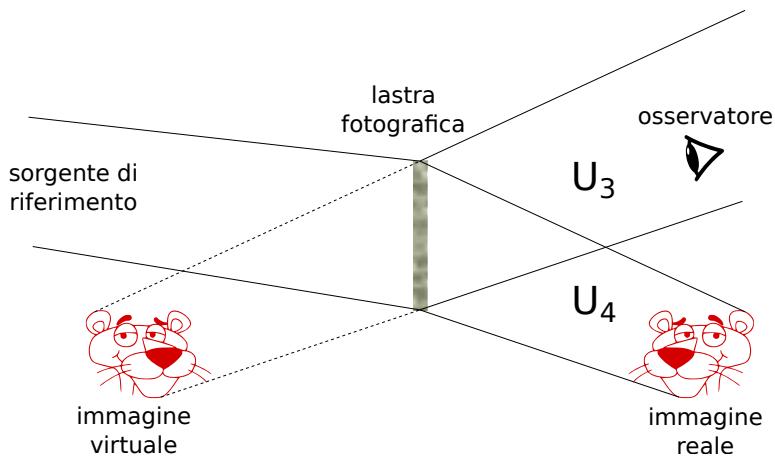


Figura 1: Schema olografia di Leith-Uptanieks

<sup>1</sup>In 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.

<sup>2</sup>In 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  $\gamma A^2a$  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

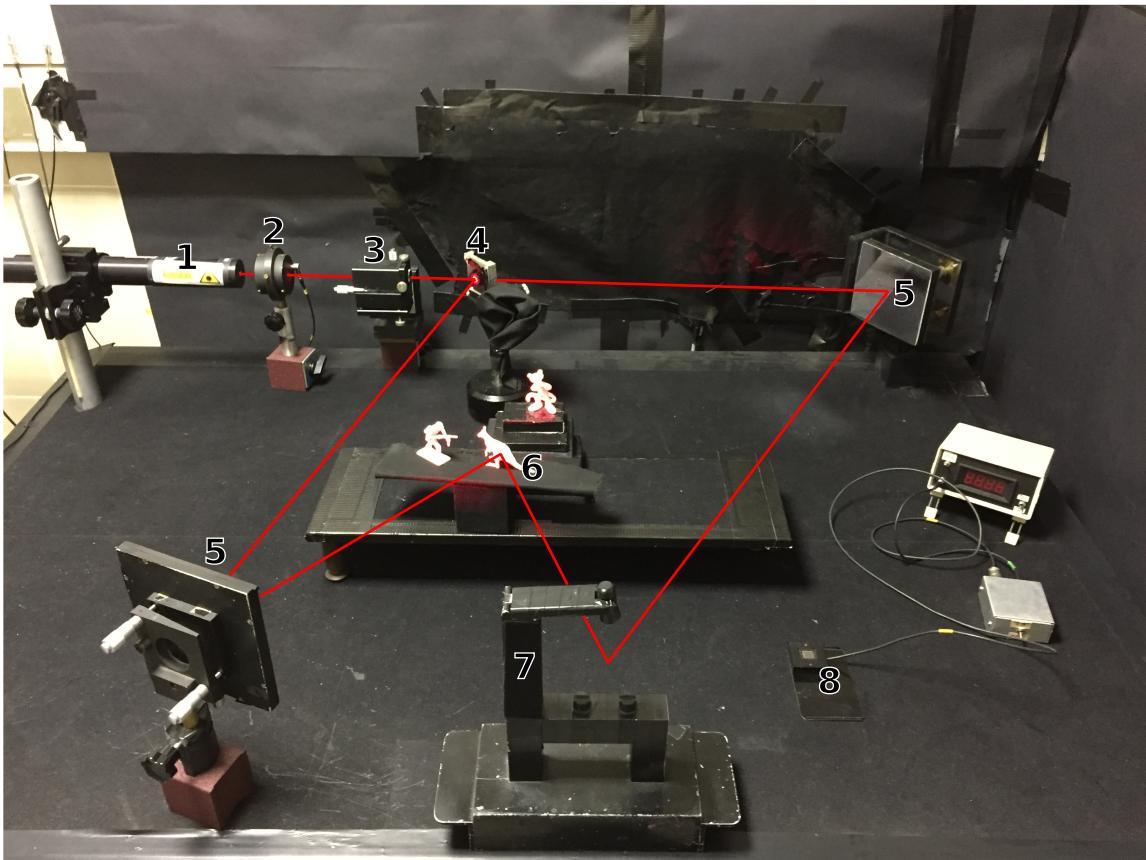


Figura 2: Schema olografia di Leith-Uptanieks. In rosso è tracciato il percorso del fascio laser.

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

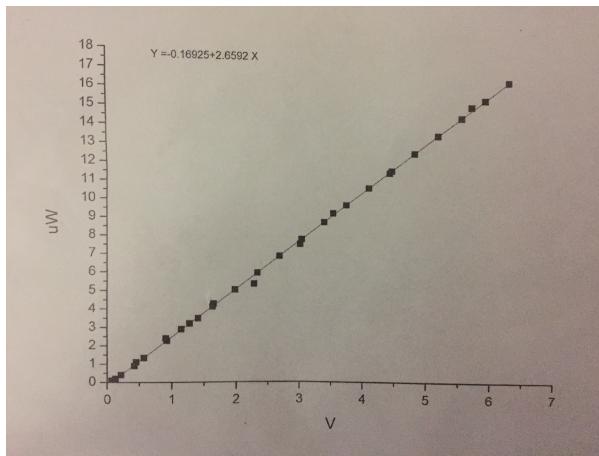
1. Laser He-Ne ( $\lambda=633$  nm) di potenza  $\sim 15$  mW e con una lunghezza di coerenza di  $\sim 30$  cm.
2. Shutter, azionabile dall'esterno, per oscurare completamente il fascio.
3. Obiettivo x20 e filtro spaziale (*pin-hole*). Il primo trasforma un'onda piana in un'onda sferica, il secondo è posizionato nel fuoco della lente divergente ed ha un diametro  $12.5 \mu\text{m}$ ; serve a selezionare il modo  $\text{TEM}_{00}$ , 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  $1 \text{ cm}^2$  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  $\text{cm}^2$  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:

$$A + B = C + D + E \quad (2)$$

È inoltre necessario calcolare il corretto tempo di esposizione della lastra. Per farlo serve conoscere la densità superficiale di energia necessaria per un anneddimento 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 misurate 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
60.0	92.5	78.5	38.0	36.0

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  $\mu\text{W}$

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



Figura 3

## 5.2 La caccia

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

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

Distanze in cm con un errore di 0.5 cm

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

67	69	70
68	70	71
69	68	71

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

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

3.15	3.28	3.15
3.98	4.06	3.87
3.15	3.21	3.13

Valori di  $P_{tot}$  espressi in  $\mu\text{W}$

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



Figura 4

## 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
62.5	89.5	78.0	39.0	35.0

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  $\mu\text{W}$

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
63.0	87.5	69.0	36.5	44.0

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  $\mu\text{W}$

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

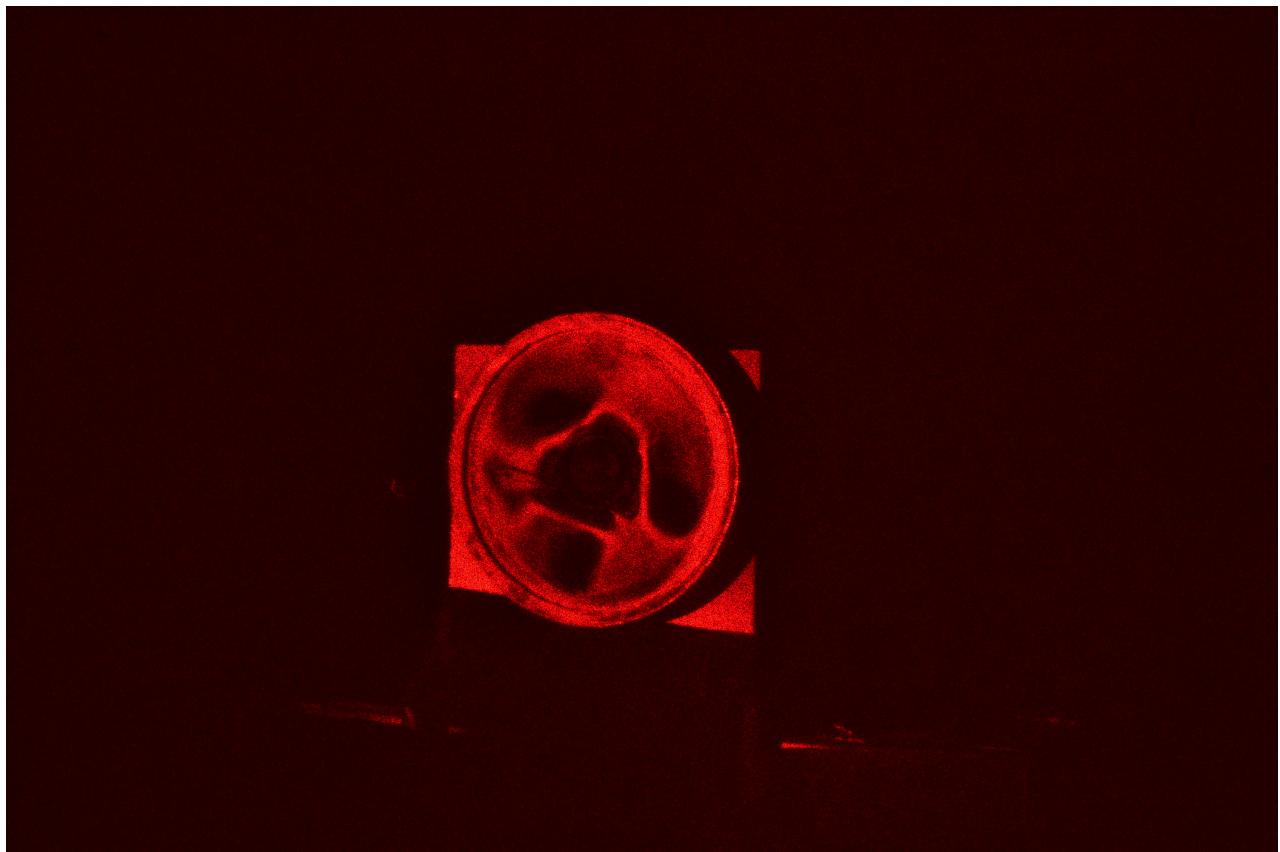


Figura 6

## 7 Lampada spettrale

Una lampada spettrale è in grado di emettere luce a diverse lunghezze d'onda nel visibile. Osservando l'ogramma in trasmissione, l'interferenza fra la luce di

ogni  $\lambda$  e il pattern d'interferenza impressionati sulla lastra genera un'immagine spostata rispetto a quella ottenuta col fascio con cui è stata impressionata la lastra. Le immagini relative alle diverse d'onda vengono quindi separate come mostrato in Figura 7:

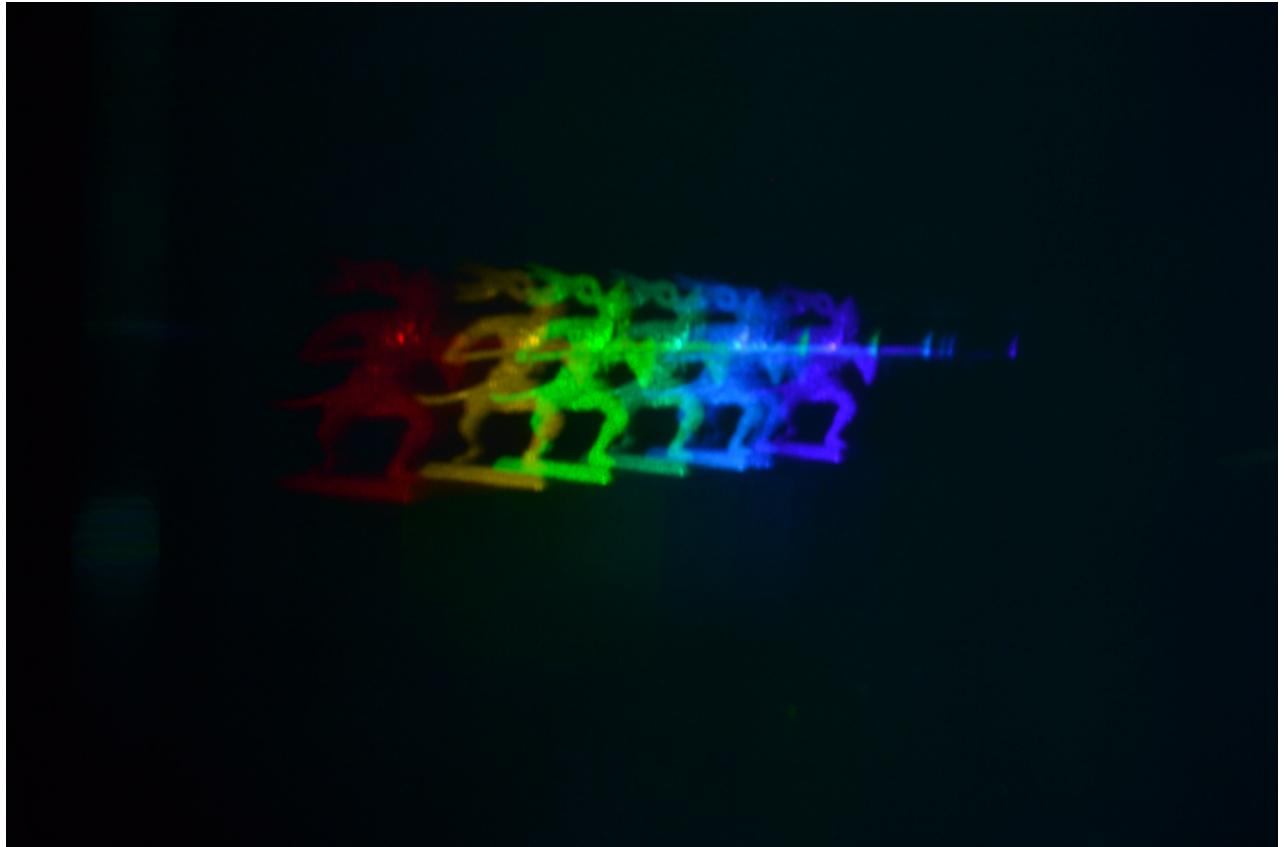


Figura 7