

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale  
in Architettura Costruzione e Città

Tesi di Laurea Magistrale

**Ologrammi per la Scienza delle Costruzioni:  
Architettura ed Ingegneria attraverso l'olografia**



**Politecnico  
di Torino**

Relatore:  
Prof. A. D. B. Manuello Bertetto

Candidata:  
Carla Serra

Anno Accademico 2022/2023



# INDICE

<b>INTRODUZIONE</b>	<b>7</b>
<b>1. LA GENESI DELL’OLOGRAFIA E IL SUO SVILUPPO: DAGLI INIZI DEL 900 FINO AGLI ANNI 2000</b>	<b>9</b>
<b>1.2 I pionieri dell’olografia</b>	<b>9</b>
1.2.1 Gabriel Lippmann	10
1.2.2 Gábor Dénes	11
1.2.2 Gordon Leonard Rogers	14
1.2.3 Nikolay Gennadiyevich Basov	16
1.2.4 Aleksandr Mikhailovich Prokhorov	17
1.2.5 Charles Hard Townes	19
1.2.6 Theodore Harold Maiman	22
1.2.7 Robert Powell and Karl Stetson	27
1.2.8 Karl Stetson	30
1.2.9 Adam Kozma	32
1.2.10 Emmett Leith e Juris Upatnieks	32
1.2.11 Yuri Nicholaevich Denisyuk	37
1.2.12 Keeve M. Siegel	43
1.2.13 McDonnell Douglas	45
1.2.14 Louis J. Cutrona	47
1.2.15 Gary Cochran	49
1.2.16 Stephen A. Benton	50
1.2.17 Lloyd Cross	53
1.2.18 Adolf Lohmann	56
1.2.19 Larry Siebert	58
<b>1.3 L’arte come promotrice dell’olografia</b>	<b>59</b>
1.3.1 Bruce Nauman	59
1.3.2 Margaret Benyon	62
1.3.3 Carl Fredrik Reuterswärd	65
1.3.4 Dieter Jung	68
<b>1.4 L’Olografia e la produzione industriale</b>	<b>71</b>
1.4.1 Michael Foster	71
1.4.2 Richard Dennis Rallison	72
1.4.3 Steve McGrew	74
1.4.4 George W. Stroke	76
1.4.5 Nicholas John Phillips	78
<b>1.5 Ologrammi in Oriente a 360 gradi</b>	<b>79</b>
1.5.1 Tung Hon Jeong	80

<b>1.6 Olografia nell'Unione Sovietica e altri sviluppi scientifici in Europa</b>	<b>82</b>
1.6.1 Victor G. Komar	82
1.6.2 Hamish Shearer e Larry Daniels	83
1.6.3 Du Pont	84
1.6.4 Landis & Gyr	85
1.6.5 Craig Newswanger	86
<b>1.7 L'evoluzione olografica dopo gli anni '80</b>	<b>87</b>
<b>2 GLI OLOGRAMMI DOPO GLI ANNI 2000: TIPOLOGIE E POTENZIALITÀ</b>	<b>90</b>
<b>2.1 Differenza tra Ologramma e fotografia</b>	<b>90</b>
<b>2.2 Tipologie di Ologrammi</b>	<b>95</b>
2.2.1 Ologramma di Trasmissione	96
2.2.2 Ologramma di Riflessione	98
2.2.3 Ologramma ibrido	99
<b>2.3 Lo stato dell'arte dei sistemi di olografia digitale</b>	<b>111</b>
2.3.1 La cortina fumogena olografica	112
2.3.2 Proiezioni su schermi d'acqua	113
2.3.3 Reti olografiche	114
2.3.4 Schermi Oled Semitrasparenti	114
2.3.5 Piramide olografica	115
2.3.6 Pannelli LED trasparenti	116
2.3.7 Ventola olografica	117
<b>3 PERCEZIONE VISIVA</b>	<b>118</b>
<b>3.1 Come il cervello umano rielabora le informazioni visive</b>	<b>118</b>
3.1.1 Occlusione	122
3.1.2 Sistemazione oculare	122
3.1.3 Convergenza prospettica	122
3.1.4 Costanza Dimensionale	123
3.1.5 Persistenza retinica	124
<b>3.2 Persistenza retinica attraverso ventola olografica 3D</b>	<b>126</b>
<b>3.3 Gli stadi della percezione</b>	<b>129</b>
<b>3.4 Come percepisce le immagini l'occhio umano</b>	<b>130</b>
<b>3.5 Comunicazione visiva</b>	<b>135</b>
<b>3.6 La facoltà cognitiva</b>	<b>136</b>
<b>3.7 Come viene percepita dall'occhio umano l'immagine tridimensionale</b>	<b>138</b>

<b>4 L'OLOGRAMMA: UNO STRUMENTO PER LA DIDATTICA</b>	<b>139</b>
4.1 Differenza tra Realtà Virtuale, Realtà Mista e Realtà Aumentata	139
4.2 Impatto degli ologrammi all'interno della realtà che ci circonda	140
4.3 Importanza e necessità della proiezione olografica	142
4.4 Insegnare attraverso le immagini e la realtà aumentata	144
4.5 La possibilità di introdurre AR in una moltitudine di discipline differenti	147
4.6 Aspetti cognitivi	148
4.7 La motivazione con la Realtà Aumentata	149
4.8 Ologrammi per la didattica alcuni esempi su differenti applicazioni ed esperimenti	154
4.8.1 Ricerca cognitiva ologrammi	156
4.8.2 Esempi di tecnologie olografiche all'interno delle università per l'apprendimento integrato	157
<b>5 ESPERIENZA CON GLI OLOGRAMMI</b>	<b>163</b>
5.1 La Biennale di Tecnologia e l'esperienza laboratoriale	163
5.2 Conclusione dell'esperienza laboratoriale	169
5.3 Produzione del materiale olografico per il nuovo Corso di Scienze delle Costruzioni	170
5.4 Video creati su Blender	171
5.4.1 Vincolo Cerniera	171
5.4.2 Vincolo Carrello	171
5.4.3 Doppio pendolo	173
5.4.4 Mensola spostamento verticale	173
5.4.5 Mensola spostamento laterale	174
5.4.6 Mensola a compressione	174
5.4.7 Mensola a trazione	175
5.4.8 Mensola a torsione	176
5.4.9 Formula di Jourawsky	176
5.5 Video estrapolati dal canale Youtube "The Efficient Engineer"	177
5.5.1 Trave sezione piena rettangolare sottoposta a momento flettente	177
5.5.2 Trave IPE sottoposta a momento flettente	179
5.5.3 Trave IPE distribuzione delle sollecitazioni di flessione con diagramma a farfalla	179
5.5.4 Trave sezione piena rettangolare porzione interna	181
5.5.5 Mensola in legno sottoposta a momento flettente	182
5.5.6 Trave IPE sforzo a taglio verticale	183
5.5.7 Torsione di differenti elementi con sezioni differenti	184
5.5.8 Compressione e trazione di elementi a sezione circolare	185
5.5.9 Trave reticolare	186

<b>CONCLUSIONI</b>	<b>187</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>189</b>
<b>SITOGRAFIA</b>	<b>191</b>
<b>INDICE DELLE FIGURE</b>	<b>198</b>

## Introduzione

Lo scopo della tesi è quello di partire dalle origini dell'olografia e osservarne l'evoluzione e i risultati raggiunti dal 1948 data di nascita del principio fisico fino ad oggi, sia dal punto di vista fisico-ottico come nel caso del primo capitolo, ma anche a livello di strumentazioni olografiche e come questa tecnologia potrebbe essere integrata a supporto della didattica nell'ambito della Scienza delle Costruzioni, per garantire una maggiore comprensione del comportamento delle strutture sottoposte a sollecitazione a causa di forze agenti.

Tale approccio è pensato con il fine di rendere più semplice, per gli allievi architetti, la comprensione di concetti di tipo fisico-geometrico che sono alla base di nozioni quali la torsione, la flessione e la deformazione dei solidi elastici. Negli ultimi capitoli viene approfondito sia il tema della percezione determinato dalla vista, che quello cognitivo degli studenti in relazione alla visione di elementi tridimensionali e dinamici.

In base ad una serie di ricerche accurate si evince che l'olografia nasce precocemente e per puro caso. Dall' 800 si iniziano a creare degli effetti tridimensionali con il metodo Pepper's Ghost, che non è altro che un'illusione ottica utilizzata soprattutto in ambito artistico per generare l'effetto semitrasparente di alcuni personaggi ma in realtà non si tratta di veri ologrammi. Solo nel 1949 con Gábor Dénes si raggiunge una giustificazione scientifica, scoperta per puro caso tramite la ricerca portata avanti con il fine di migliorare il microscopio elettronico. In merito alle scoperte di questo ricercatore solo dopo alcuni anni, nasce l'interesse da parte dei colleghi di investigare questo nuovo principio fisico-ottico.

I suoi miglioramenti vengono apportati sempre per altri fini, come nel caso del laser negli anni '60 che vengono utilizzati come fonte luminosa coerente per creare gli ologrammi, che precedentemente vengono generati grazie alla lampada ad arco di mercurio. Tutto questo deriva dalle scoperte di Emmett Leith e Juris Upatnieks che ad inizio anni '60 iniziano a sperimentare i raggi laser e decidono di applicarli all'olografia. Il suo sviluppo è dovuto soprattutto alle ricerche fatte in ambito militare per i radar, nonostante la sua nascita sia di origine scientifica, questo non ha ostacolato altre discipline come l'arte di avere l'opportunità di divulgare maggiormente questa nuova scienza, che ha la peculiarità di far percepire gli oggetti o qualsiasi tipo di rappresentazione, in tre dimensioni. L'aspetto tridimensionale è dato soprattutto dalla brillantezza dei colori e questo rende la percezione maggiormente realistica delle immagini rappresentate.

Durante gli anni gli studi si sono evoluti e l'olografia è diventata una vera e propria disciplina, sono nate numerose scuole e corsi di formazione.

L'olografia è un tema che ha da sempre affascinato e affascina tutt'oggi scienziati, ingegneri, architetti, artisti, artigiani e imprenditori. Soprattutto negli ultimi anni, si sta cercando di utilizzarla per incrementare e perfezionare il supporto nei vari settori della telecomunicazione, il commercio, l'istruzione e la sanità. L'etimologia della parola "Olografia"<sup>1</sup> deriva dal greco antico ὅλος, holos che significa "tutto"<sup>2</sup>, e γραφή, grafè, "scrittura"<sup>3</sup> e significa letteralmente "descrivo tutto"<sup>4</sup>. Si basa sulla natura ondulatoria della luce, questo viene dimostrato in modo convincente nel 1801, da Thomas Young che porta avanti due esperimenti: nel primo fa entrare un raggio di sole in una stanza buia, dove posiziona davanti ad uno schermo scuro nel quale realizza due piccoli fori e ad una certa distanza posiziona uno schermo bianco; nella fase ultima dell'esperimento, si accorge di due linee scure, su entrambi i lati di una linea luminosa. Questo lo conduce a portare avanti anche il secondo esperimento. Si tratta di un metodo di registrazione e riproduzione di immagini tridimensionali basato sull'impiego di un fascio di luce coerente, la proprietà di coerenza di cui possono godere tutti i tipi di onda, si verifica quando i raggi sono provenienti da due sorgenti e per produrre una figura di interferenza è necessario che le differenze di fase nei singoli punti dello schermo non cambino nel tempo. Questo fascio di luce viene indirizzato sia nell'oggetto che deve essere riprodotto, sia verso una lastra di materiale sensibile, in modo che l'interferenza tra la luce che proviene direttamente dalla sorgente di luce coerente e la luce rinviata all'oggetto produca sulla lastra una figura assimilabile a un reticolo di diffrazione ovvero, l'ologramma che contiene a sua volta tutte le informazioni relative sia all'intensità, sia alla fase delle onde luminose che lo producono.

Se l'ologramma viene illuminato da luce coerente si verifica un processo di diffrazione, ossia la ricostruzione completa del fronte d'onda che è stato emesso dall'oggetto, la cui immagine stereoscopica appare con prospettive diverse a seconda del punto di osservazione.

---

<sup>1</sup> Muratori, M, "Olografia", Principi ed Esempi di Applicazioni, Elettronica e Telecomunicazioni, n.3 Dicembre 2006.

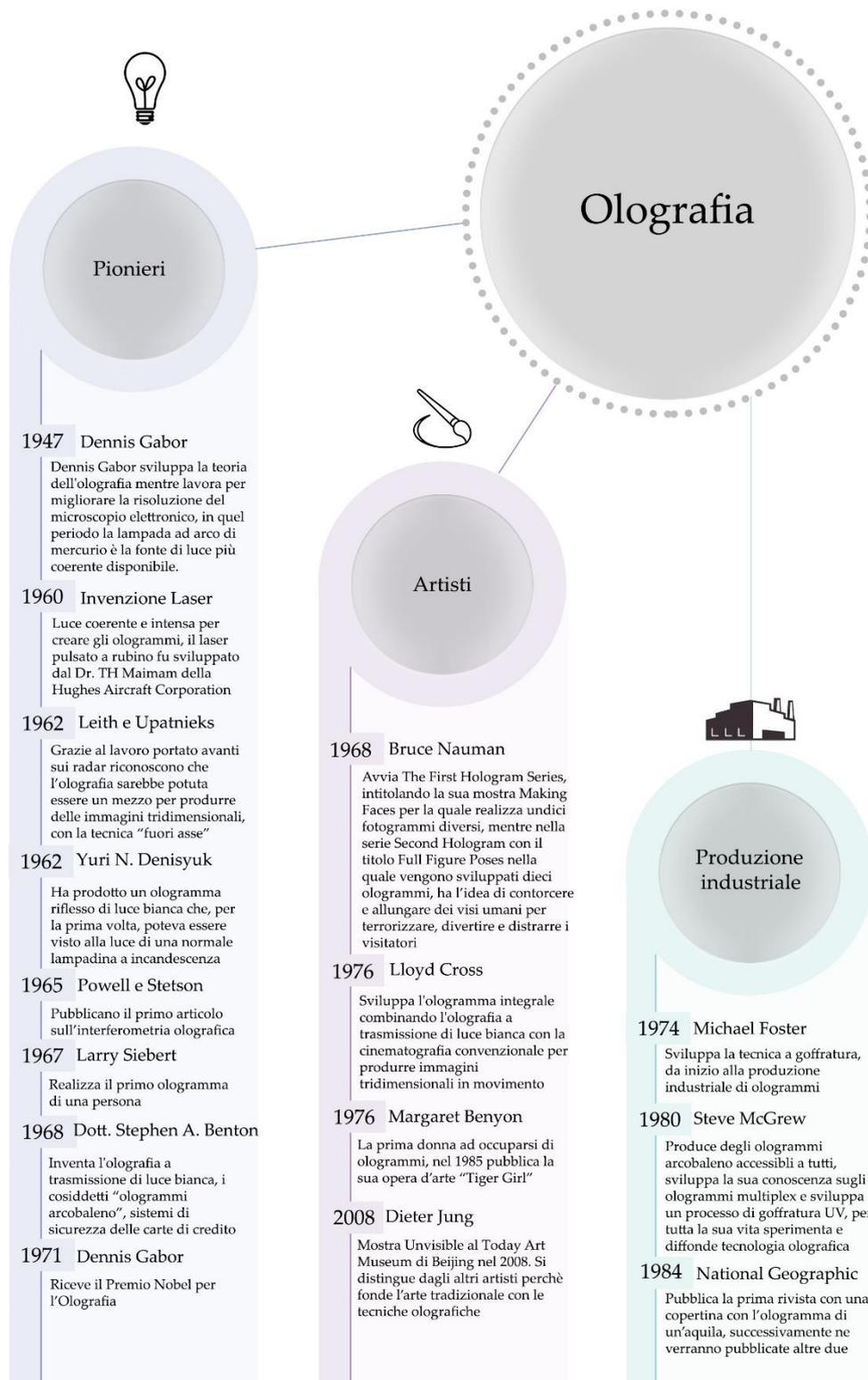
<sup>2</sup> Ibidem

<sup>3</sup> Ibidem

<sup>4</sup> Ibidem

# 1. La Genesi dell'Olografia e il suo sviluppo: dagli inizi del 900 fino agli anni 2000

## 1.2 I pionieri dell'olografia



### 1.2.1 Gabriel Lippmann

Nei primi anni del ventesimo secolo, Gabriel Lippmann un francese nato a Hollerich nel 1845, in una cittadina che si trova a Lussemburgo, successivamente decide di trasferirsi a Parigi dove intraprende gli studi nella facoltà di Scienze dove ha l'opportunità di crescere sia dal punto di vista accademico che personale, dopo pochi anni viene nominato direttore del Laboratorio di Ricerca. Avendo delle alte competenze in campo fisico e avendo studiato per numerosi anni, anticipa quelli che sono i presupposti per la nascita dell'olografia, questo gli permette di ricevere il premio Nobel nel 1908 per il metodo di riproduzione fotografica dei colori, che si basa sulla manifestazione dell'interferenza. Questa ricerca è stata portata avanti nel 1890 sui requisiti di risoluzione e granulometria degli alogenuri d'argento dei materiali di registrazione olografica.

Fondamentalmente scopre l'importanza delle emulsioni agli alogenuri d'argento e sperimenta un metodo per elaborarli, che contribuisce alla creazione di uno strato trasparente. Sistemando la composizione sandwich a contatto con una superficie dello specchio di mercurio liquido Lippmann riesce a sviluppare un processo di registrazione, al contrario del semplice strato nero che produce contrasto con l'immagine a sfondo bianco che si può riconoscere nella fotografia tradizionale in bianco e nero. Poiché la velocità di un materiale fotografico è proporzionale alla sua granulometria, proprio per questo motivo la tecnica di Lippmann richiede maggiore stabilità dell'attrezzatura e dell'oggetto stesso.

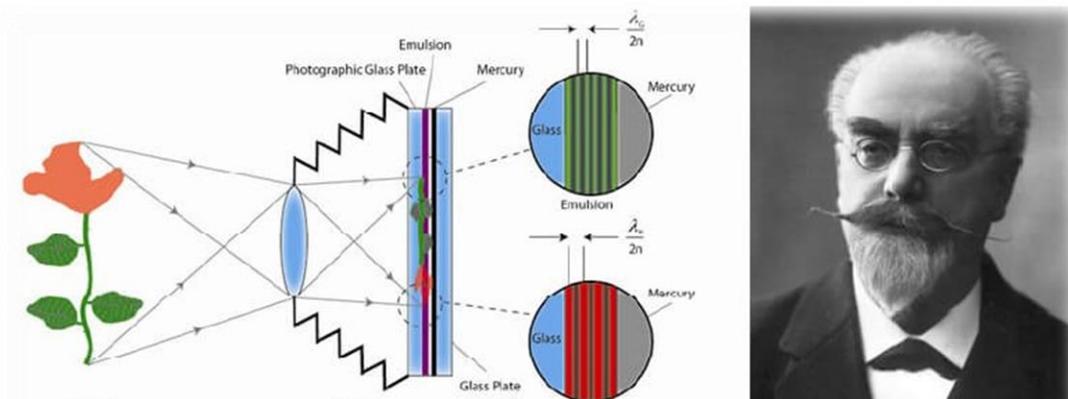


Figura 1\_ metodo di riproduzione fotografica dei colori, (Mizsey. N, <https://theclippingpathservice.com/when-did-color-photography-became-common/>)

Oggi questo problema persiste nell'olografia moderna, sia la complessità della produzione di emulsioni, ma soprattutto la lavorazione a grana fine.

La fotografia a colori prodotto della ricerca prima citata, è generata tramite cristalli di alogenuro d'argento nella carta fotografica, che nel momento in cui vengono esposti si forma un'immagine dormiente per mezzo di un'esposizione

RGB. Questo fenomeno si crea attraverso uno schema di onde stazionarie nel quale, un campo d'onda si incontra nuovamente dopo che avviene la riflessione in uno specchio, che proietta un'immagine ottica su una lastra fotografica, ma attraverso questa lastra trasparente, l'immagine colpisce lo specchio, così restituendo la luce all'emulsione.

Questo processo si genera tramite due fasi: la fase di interferenza e la fase di diffrazione.

Inizialmente viene codificata l'immagine in uno schema di interferenza, successivamente viene ricostruita l'immagine per mezzo della diffrazione sempre su questo schema. Lo scopo primario di Lippmann è quello di produrre delle immagini dove l'osservatore possa testare la variazione della parallasse con lo spostamento degli occhi in orizzontale e verticale, inoltre la cosiddetta "fotografia Lippmann"<sup>5</sup> può registrare l'intero spettro di colori garantendo una migliore resa cromatica e materiali che vengono ritratti molto più realistici, infatti è il primo a riuscire a registrare gli spettri monocromatici e policromatici.

### 1.2.2 Gábor Dénes

Lo stesso principio viene utilizzato da quello che viene definito l'inventore ufficiale dell'ologramma. Nasce a Budapest nel 1900 con il nome di Gábor Dénes, di origine Ungherese in seguito viene conosciuto con il nome nella sua versione inglese ossia Dennis Gabor. Si tratta di una persona poliedrica, fortemente stimolata dal padre che lascia a disposizione in casa una vasta collezione di libri e opere di ogni genere. Questo sarà fondamentale per la sua istruzione, in gran parte supportata nell'ambito domestico, il suo solido background in fisica e matematica a supporto della sua infallibile memoria, contribuiscono alla costruzione di un futuro grandioso. Gli studi compiuti in Germania precisamente a Berlino, il suo trasferimento in Inghilterra per lavoro e la sua ultima parte di vita trascorsa negli Stati Uniti fino alla sua morte nel 1979 lo porta a scoperte molto importanti come la nascita dell'ologramma. Il 10 Dicembre del 1971, a Stoccolma in Svezia a fine carriera ormai anziano, riceve il Premio Nobel per la Fisica, gli viene riconosciuto il lavoro che considera per tutta la vita un fallimento, ossia l'invenzione dell'ologramma. È giusto precisare che non è nato durante la vita di un singolo individuo, ma è il prodotto di numerose ricerche di studiosi, il tutto ha inizio nell'articolo del 1948 quando Gabor ne descrive i principi fondamentali. Ciò che conduce Gabor a questa scoperta, è la sua passione e curiosità per la teoria del microscopio di Abbe e la continua ricerca per garantire

---

<sup>5</sup>Biedermann. K, "Lippmann's and Gabor's revolutionary approach to imaging", Nobel Prize, 15 Maggio 2005.

il miglioramento del microscopio elettronico che in quegli anni perde il suo potenziale. Questo apparecchio garantisce migliore risoluzione, ma soprattutto Gabor sta a un passo dal risolvere la composizione delle strutture atomiche e garantire la visione dei singoli atomi. Il maggiore limite di questa macchina è l'aberrazione sferica delle lenti magnetiche che tendono a distorcere l'immagine. Gabor decide di riflettere per trovare una soluzione plausibile e si chiede: «Perché non prendere una cattiva immagine dell'elettrone, ma che contenga l'intera informazione, e correggerla con mezzi ottici?».

I primi ologrammi sono differenti da quelli che sono oggi presenti, la fonte di luce è differente, per ottenere le frange di interferenza di contrasto si ha la necessità di utilizzare una sorgente luminosa ad alta coerenza, che negli anni 40 del 900 non è ancora stata sperimentata.

Il primo studio viene condotto con una lampada ad arco di mercurio con un filtro verde a banda stretta, una delle migliori sorgenti luminose precedente la nascita del laser. Nel 1947 grazie a questi tentativi iniziali si avviano i primi passi per l'olografia. Conduce l'esperimento in due fasi, i principi fisici dell'olografia si possono ricondurre alla natura ondulatoria della luce e sono l'interferenza chiamata anche fase di registrazione e la diffrazione ossia la fase di ricostruzione, questi principi in quel periodo vengono chiamati Ricostruzione del Fronte d'Onda. Non è altro che il metodo di registrazione e riproduzione di immagini tridimensionali basato sull'impiego di un fascio di luce coerente, la proprietà di coerenza di cui possono godere tutti i tipi di onda, si verifica quando i raggi sono provenienti da due sorgenti e per produrre una figura di interferenza è necessario che le differenze di fase nei singoli punti dello schermo non cambino nel tempo. Nella prima fase, ossia durante la registrazione, il fascio di luce viene indirizzato sia nell'oggetto che deve essere riprodotto, sia verso una lastra di materiale sensibile, per far sì che l'interferenza tra la luce che proviene direttamente dalla sorgente di luce coerente e la luce rinviata all'oggetto produca sulla lastra una figura assimilabile a un reticolo di diffrazione ossia l'ologramma, che viene identificato come modello di interferenza, che a sua volta contiene tutte le informazioni relative sia all'intensità sia alla fase delle onde luminose che la producono, mentre nella seconda fase, avviene il processo di ricostruzione, l'ologramma viene illuminato da luce coerente e si verifica un processo di diffrazione, ovvero la ricostruzione completa del fronte d'onda che viene emesso dall'oggetto, affinché le aberrazioni del microscopio elettronico possano essere risolti con metodi ottici. Ciò che si ottiene è un'immagine stereoscopica che appare con prospettive diverse a seconda del punto di osservazione.

Il limite iniziale è l'ottenimento di immagini di dimensioni ridotte e sfocate, per trovare un oggetto della dimensione giusta decide di fare un elenco di nomi, questi vengono ridotti fotograficamente della larghezza di un millimetro,

ottenendo un risultato di trasparenza composta da piccole lettere nere su pellicola trasparente, queste parole compongono i nomi degli scienziati precedenti, per il quale molto probabilmente Gabor prova forte ammirazione, usandoli come primi soggetti per i suoi ologrammi. Il primo rappresenta i nomi di Huygens, Young e Fresnel mentre i due ologrammi successivi ne aggiunge altri otto Newton, Faraday, Maxwell, Kirchhoff, Planck, Einstein, Bohr e Dirac, tutti studiosi della luce.

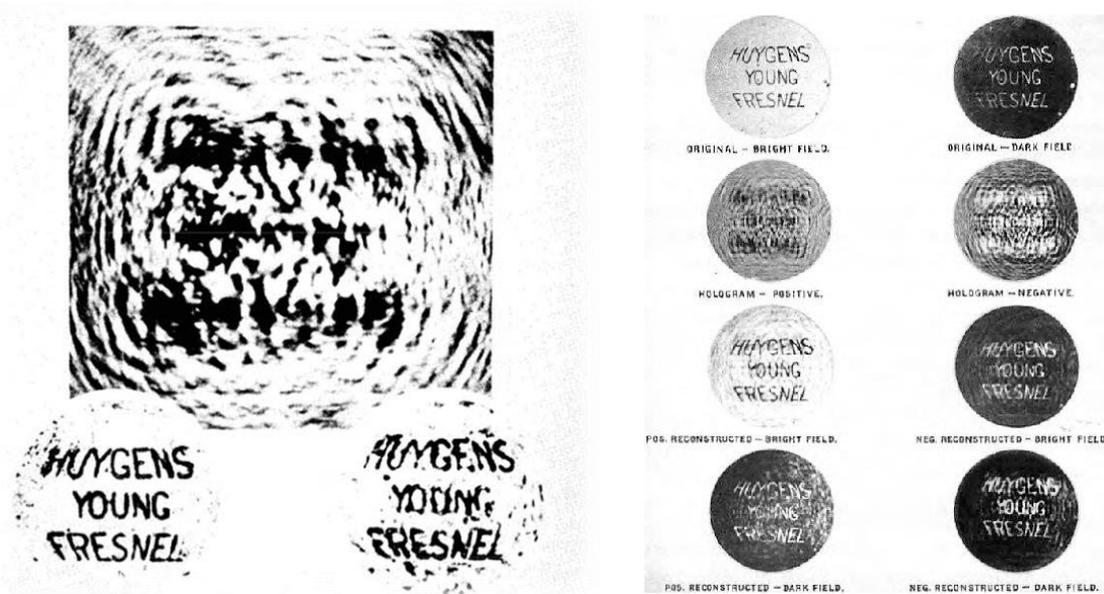


Figura 2\_Primo ologramma e ricostruzione olografica 1948, (Open Mind, 2015, <https://www.bbvaopenmind.com/en/science/leading-figures/dennis-gabor-father-of-holography/>)

Figura 3\_Poster conferenza di Gabor del 1948, ( Museo del MIT – Collezione di olografia del Museo di Olografia)

Questa scoperta viene chiamata da Dennis Gabor il Nuovo Principio Microscopico e nello stesso anno della scoperta scrive un articolo per la rivista Nature e successivamente scrive un articolo chiamato Microscopy by reconstructed Wave- Fronts dove dice « Il nome ologramma non è ingiustificato, in quanto la fotografia contiene insieme delle informazioni necessarie per ricostruire l'oggetto, che può essere bidimensionale o tridimensionale » <sup>6</sup>. Dichiarando questo per la prima volta nell'abstract, dove introduce la definizione di ologramma e il suo funzionamento scrivendo «L'oggetto di questo articolo è

<sup>6</sup> Gabor, D, "Microscopy by reconstructed Wave- Fronts", 17 Febbraio 1949.

un nuovo metodo in due fasi di immagini ottiche. In una prima fase l'oggetto viene illuminato con un'onda monocromatica coerente e il modello di diffrazione risultante dall'interferenza dell'onda secondaria coerente emessa dall'oggetto con lo sfondo forte e coerente viene registrato su una lastra fotografica. Se la lastra fotografica, opportunamente elaborata, viene ricollocata nella posizione originaria e illuminata con il solo sfondo coerente, dietro di essa apparirà un'immagine dell'oggetto, nella posizione originaria. ».<sup>7</sup>

Il 15 settembre 1948 il New York Times pubblica la prima notizia sull'ologramma, questa nuova scoperta viene ben accolta da Lawrence Bragg e Max Born due fisici entrambi premi nobel, che favoriscono la diffusione di questa nuova scoperta, che incrementa la crescita e il miglioramento della carriera di Gabor. A seguito di ciò guadagna la nomina di nuovo Mullard Readership in Elettronics presso l'Imperial College di Londra e diventa direttore di un nuovo laboratorio di elettronica. Si può dire che sia Lippmann che Gabor attuano dei metodi rivoluzionari alla fisica fondamentale invece di rimanere fedeli all'ingegneria. Mentre il primo concepisce un metodo in due fasi per registrare e riprodurre immagini a colori e migliora la fotografia dal bianco e nero al colore, il secondo amplia la visione della fotografia da immagini bidimensionali a tridimensionali. La fisica di entrambe le scoperte si può recepire con lo stesso principio, ossia la propagazione ondulatoria della luce, che viene maggiormente percepita a occhi nudo sulla superficie dell'acqua, osservando le onde hanno una direzione di propagazione, una velocità e una lunghezza del loro periodo, mentre per quelle della luce diventa molto arduo osservarle. Negli anni '50 vengono pubblicati circa cinquanta articoli sulla teoria degli ologrammi di Gabor, all'inizio a causa del limite imposto dalle fonti luminose non ci sono stati grandi passi in avanti infatti proprio nel 1955 dopo aver studiato diversi assemblaggi ottici per minimizzare l'effetto dell'immagine combinata, rinuncia alla ricerca in campo olografico.

### **1.2.2 Gordon Leonard Rogers**

Nasce nel 1916, è il ricercatore più entusiasta e coerente della microscopia a diffrazione in Gran Bretagna, ma soprattutto a differenza di tutti gli altri ricercatori divulga il suo sapere ed è un supporto importante per Gabor. Lavora come docente al College di Dundee, collabora insieme a Gabor sulla ricerca per incrementare il funzionamento della microscopia, nello specifico il concetto di Bragg del microscopio e cercano di approfondire l'imaging a raggi X

---

<sup>7</sup> Gabor. D, "Microscopy by reconstructed Wave-Fronts", 17 Febbraio 1949

stereoscopico. Utilizza una strumentazione differente ossia gli obiettivi cinematografici invece di quelli da microscopio e consiglia dei miglioramenti alla tecnica di Gabor. Gran parte della sua vita professionale è a contatto diretto con quest'ultimo soprattutto per la ricostruzione del fronte d'onda o microscopia di diffrazione che abbrevia con l'acronimo D.M. Nel Novembre del 1949 legge il documento di Gabor, *Proceedings of the Royal Society* e da quel momento si appassiona alla ricerca. Quest'ultima è fondamentale per lo sviluppo sul nuovo argomento della ricostruzione del fronte d'onda, per prima cosa gli si deve la facilità di descrizione maggiormente comprensibile rispetto a quella di Gabor, inoltre pubblica un resoconto dettagliato dei suoi esperimenti, quindi divulga il suo sapere al contrario di altri teorici e avvia con entusiasmo delle collaborazioni con altri ricercatori interessati a portare avanti questa tecnica.

Rogers però è critico nei confronti della formulazione di Gabor riguardante la ricostruzione del fronte d'onda e concepisce un collegamento con l'ottica fisica che a Gabor sfugge, ossia che l'ologramma si può concepire come una piastra di zona generalizzata, si tratta di un modello a forma di occhio di bue con cerchi opachi e trasparenti pensati in modo che i bordi dei cerchi neri diffrangano la luce in corrispondenza dell'asse ottico dove si incontrano per produrre un punto luminoso, il comportamento è simile a quello di una lente di vetro che produce un'immagine focalizzata, a differenza di quest'ultima funziona solo con la luce monocromatica e la sua distanza focale dipende dalla lunghezza d'onda.

Ne deduce che un ologramma non è altro che la sovrapposizione di queste lastre di zona che ricostruiscono i singoli punti focalizzati che vanno a comporre l'immagine. Pubblica questa sua intuizione in una breve nota sulla rivista *Nature*. All'inizio dei suoi studi nel 1949 non è ancora consapevole di questa intuizione, solo nel 1950 scopre che l'ologramma obbedisce alla formula della lente, Rogers lotta per estendere la descrizione della piastra zonale stessa, poiché queste ultime producono non solo due fuochi, ma un'intera serie.

Gabor commenta la pubblicazione di Rogers e ne riconosce la scoperta, infatti nei primissimi anni 50 continuano a comunicare a stretto contatto. Sempre in questi anni limitati dal mancato avanzamento all'AEI nella creazione di ologrammi elettronici, iniziano a considerare la costruzione del fronte d'onda come mezzo utile per migliorare la microscopia ottica, nel frattempo Gabor riceve una sovvenzione dal Royal Society Paul Instrument Found per realizzarlo e si iniziano ad avere dei dubbi sulla ricostruzione dell'immagine, pensando che un ologramma non è sufficiente per registrare l'immagine completa.

Sia Rogers che Gabor nei due anni successivi iniziano ad investigare vari schemi ottici in modo da ricostruire un'immagine completa non contaminata da una gemella sfocata. Per portare avanti le ricerche in modo rapido Gabor chiede l'assunzione di Rogers all'interno dell'AEI.

Collabora in un articolo che si occupa della soluzione del problema dell'immagine gemella, cercando di eliminarne gli effetti servendosi di un ologramma subsidiario e sottraendolo dalla ricostruzione, in sostanza mentre un ologramma fornisce due immagini è possibile utilizzarne solo uno per creare un'immagine. L'idea è quella di creare un secondo ologramma dell'immagine coniugata e di sottrarlo otticamente all'originale mettendo a contatto due ologrammi, in questo processo la problematica è la precisione di registrazione, infatti quando Gabor avvia questo esperimento suscita scarso entusiasmo.

Rogers nel tempo diventa intermediario tra Gabor e altri ricercatori per la ricostruzione del fronte d'onda, infatti nel 1950 decide di avviare una corrispondenza con Paul Kirkpatrick poiché risulta essere interessato a questa teoria, in realtà successivamente dichiara di voler realizzare un telescopio a raggi X focalizzandoli da specchi cilindrici curvi, questo spinge Rogers a consigliare a Gabor di collaborare con gli americani.

### **1.2.3 Nikolay Gennadiyevich Basov**

Solo all'inizio del 1960 la barriera della fonte luminosa viene superata grazie alla scoperta del laser e del maser, di due scienziati russi. Nikolay Gennadiyevich Basov nasce nella Russia centrale nella piccola città di Usman all'interno della regione di Lipetsk nel 1922, presta servizio militare e frequenta l'Accademia Medica Militare di Kuibyshev. Nel 1943 lascia l'Accademia dopo aver acquisito la qualifica di assistente di medico militare. Partecipa alla Seconda Guerra Mondiale, viene smobilitato e dopo questa breve carriera militare nell'esercito russo, nel 1946 entra a far parte dell'Istituto di fisica ingegneristica di Mosca dove decide di studiare fisica teorica e sperimentale, conseguendo la laurea nel 1950 come ingegnere-fisico. Porta a compimento la sua tesi di dottorato in scienze presso il PN Lebedev Physical Institute, dove successivamente ne diventa il direttore nel 1959 sotto la guida del professore Aleksandr Mikhailovich Prokhorov il suo contributo sarà fondamentale per lo sviluppo dei maser. Dal 50 al 53 del 1900 diventa studente dell'Istituto di Ingegneria e di Fisica di Mosca. In questi anni intorno al 1952 Basov e Prokhorov sono i primi a dimostrare, sulla base dell'analisi teorica, la costruzione di generatori e amplificatori di onde elettromagnetiche utilizzando il fenomeno della transizione stimolata nei sistemi quantistici dei livelli di popolazione. Nel 1955 propongono un principio per ottenere l'inversione della popolazione enfatizzando un sistema a tre livelli, tecnica ancora utilizzata nei laser e nelle gamme spettrali. La peculiarità della ricerca di Basov è che segue una logica contraria a quella del pensiero basato sulla procedura più semplice, ossia del passaggio della fisica base.

Negli anni '50 durante un esperimento sulla larghezza di linea di una radiazione maser, ipotizza che la linea di radiazione può essere maggiormente ridotta rispetto alla larghezza di linea naturale a causa della rigenerazione nella cavità. Due anni prima del 1950 diventa assistente di laboratorio presso l'Istituto di fisica PN Lebedev di Mosca, dove conduce numerose ricerche infatti a lui si deve il metodo per amplificare le onde originarie facendo rilasciare ad atomi e molecole onde identiche, in fase a velocità moltiplicativa e lavora insieme al suo insegnante Aleksandr Mikhailovich Prokhorov nel 1953 quando consegue una laurea presso l'istituto di Fisica e Ingegneria. Nel 1956 riceve un dottorato in scienze fisiche e matematiche dal PN Lebedev Physical Institute per il suo lavoro sperimentale e teorico con gli oscillatori molecolari che utilizzano l'ammoniaca come mezzo attivo, questo lavoro si conclude con una tesi dal titolo un Oscillatore Molecolare. Scoperta di fondamentale importanza per l'Istituto e riconosciuta da numerosi scienziati. L'oscillatore molecolare, noto come maser ossia Microonde Amplificazione Mediante Emissione Stimolata di Radiazioni che viene coniato come acronimo nel 1953 da Townes e dai suoi colleghi della Columbia University di New York City.

Basov e i suoi collaboratori conducono numerose indagini che portano alla costruzione di una grande famiglia di laser: fotodissociazione (iodio atomico) che si basa sul pompaggio di una forte onda d'urto, laser che sono controllati da fasci di elettroni, eccimeri, chimici e altri. Ha il primato per aver proposto l'uso di semiconduttori come mezzo attivo di laser eccitati da una varietà di metodi, inclusa l'iniezione tramite la giunzione ap-n. Quest'ultimo ha portato alla scoperta dei laser a diodi di iniezione che vengono utilizzati frequentemente nella scienza e nella tecnologia.

#### **1.2.4 Aleksandr Mikhailovich Prokhorov**

Aleksandr Mikhailovich Prokhorov nasce nel 1916 in Australia precisamente a Russell Road nel Queensland, nel 1923 si trasferisce con la sua famiglia in Unione Sovietica e nel 1934 entra nel dipartimento di fisica dell'Università statale di Leningrado. Dopo il 1939 diventa studente dell'Istituto di Fisica PN Lebedev di Mosca, precisamente fa il ricercatore nello studio di oscillazioni, inizia ad indagare i problemi della propagazione delle onde radio sulla superficie terrestre.

Partecipa alla seconda guerra mondiale e dopo vari sfortunati eventi viene smobilitato e si dedica nuovamente alla sua vita accademica all'interno del laboratorio di oscillazioni. In questa fase della sua vita inizia ad occuparsi delle oscillazioni non lineari su cui scrive la tesi dal titolo Teoria della stabilizzazione della frequenza di un oscillatore a tubo nella teoria di un piccolo parametro. A

partire dal 1947 conduce uno studio sulla radiazione coerente degli elettroni prodotti nel sincrotrone (un dispositivo che accelera particelle cariche sempre più ampi a energie molto elevate) nella regione delle onde centimetriche, questo studio avviato durante il suo periodo di dottorato di ricerca, sulla base di questa scoperta nasce la tesi dal titolo Radiazione coerente di elettroni nell'acceleratore di sincrotrone. Dagli anni '50 del '900 diventa assistente capo del laboratorio e inizia ad indagare su vasta scala per quanto riguarda la radiospettroscopia e successivamente l'elettronica quantistica. Nel 1954 diventa capo del laboratorio, nel 1959 viene organizzato il Laboratorio di Radioastronomia e nel 1962 un laboratorio viene dedicato alla Fisica Quantistica. Ha la capacità di radunare attorno a sé un gruppo di ricercatori e con loro porta avanti le tecniche di radiodiffusione radar e radio, che vengono portate avanti sia negli Stati Uniti che in Inghilterra, tramite studi degli spettri vibrazionali e rotazionali delle molecole. Prokhorov si sofferma su una classe di molecole che chiama come asimmetriche, la loro peculiarità è che hanno tre diversi assi rotazionali di simmetria, inoltre svolge anche un'analisi teorica sull'applicazione degli spettri di assorbimento a microonde per migliorare gli standard di frequenza e di tempo, quest'ultimo studio contribuisce alla collaborazione nel '55 di Nikolay Bassov e Prokhorov, da quel momento conducono delle indagini in relazione alla spettroscopia a microonde che portano all'invenzione di un oscillatore molecolare o maser, inoltre progettano anche un oscillatore molecolare funzionante con ammoniaca, nati dall'idea di utilizzare una cavità piena di gas con riflettori alle due estremità dove il raggio di microonde viene intensificato, scoprendo che questo metodo porta alla creazione di microonde con gamma di frequenza molto ristretta. Il maser creato è un dispositivo che sprigiona radiazioni a microonde di una singola lunghezza d'onda ed è il precursore ufficiale del laser. Sempre nel '55 propongono una strategia per la produzione di un assorbimento negativo chiamato metodo di pompaggio e sempre in quest'anno Prokhorov inizia a sviluppare la ricerca sulla risonanza paramagnetica elettronica EPR. Studia gli spettri di rubino che viene successivamente consigliato come materiale per il laser nel 1957, i due ricercatori decidono di annunciare la loro scoperta del generatore molecolare nel 1952 in un documento letto prima della All- Union Conference on Radio Spectroscopy tenuta dall'Accademia delle Scienze dell'URSS, dopo questo evento per ben due anni decidono di non pubblicare i risultati.

Prokhorov e Bassov progettano e sviluppano i maser in differenti tipologie e materiali. Nel '58 Prokhorov consiglia un laser per la generazione di onde infrarosso, i principali interessi di Prokhorov risiedono nel campo dei laser solidi e il loro utilizzo a scopo fisico, possiamo ricondurre le applicazioni laser proprio alla ricerca condotta da questi fisici in particolare quest'ultimo, il suo lavoro ha

fornito per la prima volta la dimostrazione pratica dell'elettronica quantistica e l'origine dell'industria laser, altre applicazioni possono essere ricondotte alla chirurgia, la stampa, l'astronomia e la ricerca spaziale nonché gli ologrammi, anche se oggi consideriamo questa tecnologia banale, nei primi dieci anni dalla scoperta è considerata come una scoperta geniale, anche se afferma lo stesso Prokhorov "molti credevano che fossimo impazziti, che era impossibile, è stato un passo coraggioso, perché prima nessuno aveva detto che fosse possibile creare un generatore di portata ottica. Poi è diventata una nuova scienza indipendente: l'ottica" affermato in un'intervista televisiva nel 2002, infatti le sue potenzialità della tecnologia iniziano ad emergere nel 1964, anche dopo aver ricevuto il premio Nobel Prokhorov continua la produzione di vari tipi di laser.

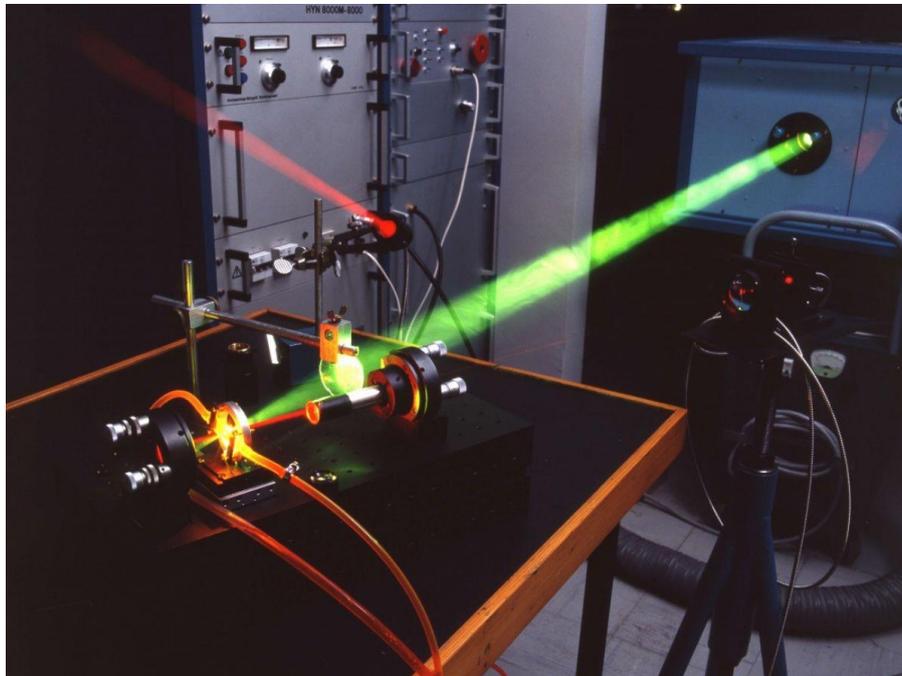


Figura 4\_ esempio di laser <sup>8</sup> , (Science et avenir, SUPERSTOCK/SUPERSTOCK/SIPA, [https://www.sciencesetavenir.fr/fondamental/l-inventeur-du-laser-s-est-eteint\\_23234](https://www.sciencesetavenir.fr/fondamental/l-inventeur-du-laser-s-est-eteint_23234))

### 1.2.5 Charles Hard Townes

Questi due fisici non son stati i soli a dare una svolta sulla ricerca dei laser e maser ma c'è uno statunitense Charles Hard Townes che durante questi due anni di assenza di pubblicazione dei dati della ricerca sui Maser, ne costruisce uno funzionante e pubblica le conclusioni nella rivista Physical Review.

---

<sup>8</sup> Il laser è un fascio sottile e preciso formato da un insieme di fotoni, questi granelli di luce, che hanno esattamente la stessa frequenza e si muovono rigorosamente nello stesso tempo

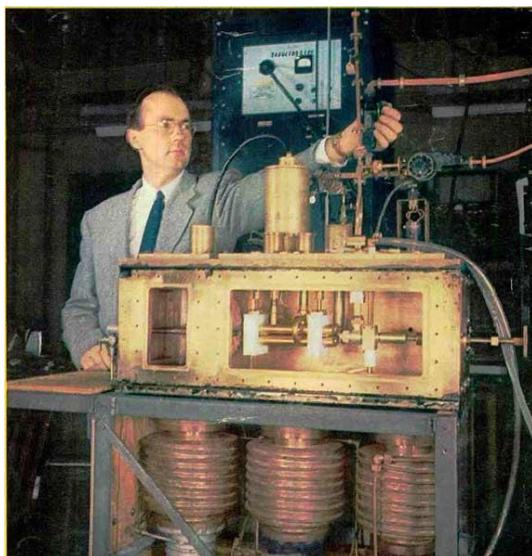


Figura 5, Charles Townes che mostra per la prima volta il prototipo di Maser, (Open mind, 2015 <https://www.bbvaopenmind.com/en/science/physics/the-beam-of-light-that-emerged-from-the-cold-war/>)

---

Nasce nel 1915 a Greenville, nella Carolina del Sud, dopo aver coltivato durante l'infanzia questa passione per le stelle del cielo notturno, entra alla Furman University, un piccolo college della sua città natale. Studia tutte le scienze e la sua laurea arriva molto presto all'età di diciannove anni. Consegue sia la laurea in lingue moderne che in fisica, in questo modo riesce ad entrare in stretto contatto con le teorie della relatività e della meccanica quantistica. Deciso a dedicarsi alla fisica entra nella Duke University che conclude con un dottorato nel 1939 e accetta un lavoro a New York per Bell Labs, dove lavora per tutta la durata della Seconda Guerra Mondiale. Durante questo periodo lavora all'approfondimento su un sistema di radar come strumento di guerra. Mentre gli altri scienziati ricercavano applicazioni per lunghezze d'onda sempre più corte, il suo lavoro trasla dal segmento radio dello spettro elettromagnetico a quello delle microonde. Impaziente di sfruttare il suo lavoro per apporre le microonde alla spettroscopia, ossia l'uso delle radiazioni per studiare le proprietà della materia. Lui è fin da subito consapevole che le microonde avrebbero garantito un'esplorazione delle strutture di molecole e atomi.

Successivamente alla guerra, diventa professore associato di fisica alla Columbia University, mentre nel 1950 diventa professore ordinario e viene nominato direttore esecutivo del Columbia Radiation Laboratory. L'anno seguente concepisce un'idea, ossia immagina che le microonde possano essere amplificate

attraverso il contatto con un elettrone in stato eccitato, in modo da creare un flusso intenso e continuo di energia a microonde, che insieme al suo team lavora per fare in modo che diventi realtà, il risultato finale si chiama Maser, acronimo di Amplificazione a Microonde mediante Emissione Stimolata di Radiazioni. Il governo continua a garantire finanziamenti per questa ricerca, nonostante non appoggiato da molti colleghi della Columbia che ritengono fin da subito il suo lavoro una perdita di tempo e di denaro. Nel 1952 la sua visione è confermata e nel 1955 pubblica un libro da nome Microwave Spectroscopy insieme alla sua spalla destra Schallow con cui collabora durante il periodo di ricerca. Dopo di che decide di prendersi un anno sabatico e va in giro per il mondo a discutere delle sue nuove scoperte con differenti studiosi che gli danno un loro punto di vista. Torna alla Columbia nella metà degli anni 50 e sviluppa maggiormente il concetto di Maser.

In quel periodo pensa di amplificare l'energia a lunghezze d'onda mille volte più corte del maser. Mentre le sorgenti luminose esistenti hanno un raggio di amissione diffuso su una gamma di frequenze con un'intensità incoerente, Townes immagina al contrario un raggio stretto, focalizzato e costante, attivo su una singola lunghezza d'onda con intensità controllata.

Nel 1958 lui e il suo collega citato precedentemente pubblicano un articolo sulla rivista Physical Review, proponendo quello che è il concetto laser ossia luce amplificata dall'emissione stimolata di radiazioni. Con la pubblicazione di quest'ultimo inizia una gara tra i vari studiosi per la realizzazione del primo laser pratico, mentre al contrario dei suoi colleghi Townes non ha nessuno scopo di lucro e semplicemente vuole regalare il brevetto laser ai Bell Labs per cui lavora anni prima, con le stesse modalità con cui concede il brevetto maser alla Research Corporation. Nel 1960 ottiene il suo brevetto e il primo laser viene realizzato da Theodore Maiman. Townes si congeda dalla Columbia per occuparsi della ricerca per l'Institute for Defense Analysis di Washington. La scoperta del Laser viene accettata repentinamente nell'industria e nelle telecomunicazioni. Nel 1966 diventa professore presso il Massachusetts Institute of Technology (MIT). Nel 67 ottiene una cattedra di fisica presso l'Università della California, dove conclude la sua carriera accademica fino al raggiungimento del pensionamento nel 1986. Townes riceve insieme a Prokhorov e Basov il Premio Nobel per la fisica nel 1964 nonostante porta avanti la ricerca autonomamente dai due fisici russi. Le loro ricerche conducono ad un lavoro fondamentale nel campo dell'elettronica quantistica, che guida verso la costruzione di oscillatori e amplificatori basato sul principio maser-laser e questa soluzione di laser puri monocromatici, monocromatici e intensi sono ideali per la creazione di ologrammi, inoltre raccolgono onde di energie e le intensificano centinaia di volte.

In relazione a questa scoperta nel 1964 condividono il Premio Nobel per la Fisica. Il progetto che garantisce il raggiungimento di questo premio è un dispositivo che genera un intenso raggio di pura radiazione di microonde chiamato maser, così gli stessi principi dell'elettronica quantistica vengono successivamente applicati alla generazione di un chicco di luce pura che viene chiamato Laser. Negli anni 80, le applicazioni laser diventano sempre più frequenti per la trasmissione dei dati su fibra ottica il cavo e la lettura di supporti ottici, diventano fondamentali anche per la distribuzione commerciale.

### **1.2.6 Theodore Harold Maiman**

Nasce a Los Angeles, in California ma la sua famiglia decide di trasferirsi subito dopo a Denver in Colorado, fin da piccolo sviluppa la passione per l'ingegneria elettronica, grazie a suo padre che essendo ingegnere elettrico realizza all'interno della propria casa un vero laboratorio dove Maiman conduce alcuni esperimenti. All'età di diciassette anni si arruola nell'esercito degli Stati Uniti e viene accettato nel programma di formazione sui radar e sulle telecomunicazioni. Alcuni fenomeni come la luminosità emanata dai tubi a vuoto, lo spingono ad approfondire il suo interesse nei confronti dell'elettronica e di conseguenza ad iscriversi all'università di ingegneria e fisica del Colorado, precisamente a Boulder. Dopo la laurea frequenta il corso in fisica alla Columbia University che segue per un breve periodo, dopodiché successivamente si iscrive ai corsi di fisica a Stanford dove viene accettato per il dottorato. Willis Lamb un fisico teorico di Stanford nonché il suo relatore, coglie le impressionanti capacità e gli chiede di capire le formulazioni matematiche delle ipotesi fisiche e di convertirle in esperimenti per confutarne la validità.

Uno degli esperimenti importanti è quello descritto nel suo libro *The Laser Odyssey* ossia la dimostrazione dello Spostamento di Lamb, il progetto include lo studio di una cavità a microonde a piastre parallele che è alimentata da un magnetron in eccedenza di guerra, in sostanza una bobina magnetica mantenuta attiva da un alimentatore regolato in corrente per l'eccitazione dell'elio tubo, un amplificatore a basso rumore sintonizzato con moltiplicatore Q sensibile e un rilevatore di fase.

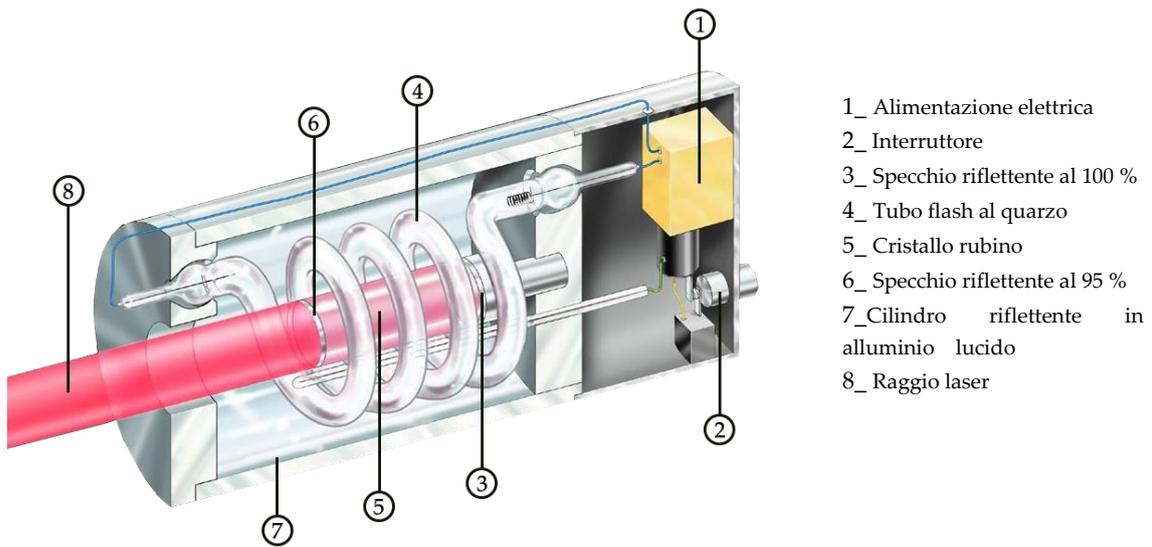
Nel 1955 svolge la sua tesi di dottorato e nello stesso anno riceve Lamb riceve il premio Nobel per la fisica per l'esperimento dello Spostamento di Lamb. Qualche anno si verifica un'importante svolta soprattutto per l'invenzione del laser da parte di Maiman, Lamb inizia ad interessarsi al funzionamento del laser e in un articolo cita un fenomeno fisico del comportamento del laser che diventa famoso con il nome di Lamb Dip.

Maiman nonostante la sua fase di ricerca rifiuta una posizione accademica aspetta il termine della sua istruzione formale, di conseguenza svolge un breve periodo presso la divisione aerospaziale della Lockheed e successivamente inizia a lavorare presso lo Hughes Research Laboratory HRL della città di Culver in California, per collaborare con il Dipartimento di fisica atomica. Si focalizza sullo sviluppo di un dispositivo capace di convertire la radiazione elettromagnetica a frequenza mista in luce altamente amplificata e coerente di frequenza discreta, l'incarico è quello di sondare i limiti pratici dello spettro elettromagnetico coerente a lunghezze d'onda più corte, un dispositivo simile conosciuto come maser è costruito nel 1953 da Charles H. Townes. Maiman viene selezionato per essere il direttore per la costruzione di un amplificatore a microonde nominato Ruby Maser da parte dell'US Army Signal Corps. Il maser vigente è delle dimensioni di una stanza con un complesso sistema di raffreddamento criogenico e con un enorme elettromagnete, ma non è stabile, di conseguenza il compito di Maiman è quello di renderlo di dimensione maggiormente ridotta, leggero, meno dispendioso e maggiormente stabile. In un arco temporale si sono raggiunti gli obiettivi sopracitati, nonché la potenza delle microonde risulta essere maggiore, tuttavia nonostante i risultati ottenuti il maser appena modificato viene cambiato.

Nel 1917 per la prima volta Albert Einstein sperimenta l'emissione stimolata, ossia l'inversione di popolazione degli elettroni, in cui più atomi si trovano in uno stato eccitato, per anni questa scoperta non porta ad ulteriori approfondimenti. Solo nel 1940 un giovane fisico russo di nome Valentin Alexandrovich Fabrikant, nella sua tesi di dottorato descrive le condizioni necessarie per l'amplificazione della luce mediante emissione stimolata. Anche se non riesce ad ottenere la luce coerente, però il suo lavoro teorico anticipa la dimostrazione di qualunque dispositivo simile al laser. Il concetto di laser emerge nuovamente alla luce nel 1958 con Schawlow e Townes che pubblicano un articolo del Physical Review sulla probabilità di riuscita di progettazione di un laser a infrarossi con l'uso del potassio caldo, ma la loro proposta è del tutto irrealizzabile, però questa alimenta la ricerca per la generazione di una luce coerente. Maiman in questo periodo concentra tutte le proprie forze nella progettazione del Ruby Maser. Nel 1959 si rivolge ai dirigenti della Hughes come garanti per i finanziamenti, per portare a compimento lo sviluppo del laser, anche se in estremo ritardo rispetto ai colleghi che avviano le ricerche mesi prima. I capi gli affidano 50000 dollari, un tecnico e nove mesi per lavorare, in forte svantaggio rispetto ai suoi colleghi. Grazie all'esperienza precedente del maser, questo fa sì che alcuni punti sono ben fissati come per esempio: il design semplice; no all'applicazione del raffreddamento criogenico e l'affidamento su componenti e materiali prontamente disponibili. Nel 1959 Townes organizza una conferenza,

in quel momento è alla guida del più grande gruppo Laser presso Bell Telephone Laboratories, questa discussione si basa sulle idee per la realizzazione di un laser. In questa conferenza viene fortemente criticata l'idea di utilizzare un rubino come mezzo laser, poiché fino al quel momento si erano sperimentati solo i vapori alcalini, questa critica viene appoggiata da un documento scritto di Schawlow. Nonostante le informazioni raccolte e i punti di vista, Maiman non si fa condizionare e procede con il suo pensiero, ossia di testare con i solidi piuttosto che i gas. Rielabora i calcoli i calcoli errati sulle proprietà del rubino e conferma la precedente convinzione che sarebbe stato un mezzo laser difficile ma praticabile. La dimensione del rubino è molto importante, maggiore è l'estensione in lunghezza e migliore per la cavità di risonanza, ma la complessità è la produzione dei cristalli sintetizzati poiché il metodo è ancora poco sperimentato, quindi il rischio è quello di produrre dei difetti, inoltre un altro problema è quello legato alla lunghezza per l'instabilità termica e quindi l'esposizione alle sollecitazioni meccaniche nel cristallo, che portano alla degradazione dei parametri ottici dell'asta di rubino.

In ogni caso Maiman opta per un rubino di lunghezza contenuta, a forma di cilindro, con due superfici opposte piatte, parallele e argentate. Per gli specchi usa dell'argento evaporato con un piccolo foro, solo in uno per permettere la fuoriuscita di luce coerente, perché vuole garantire la massima luce di pompaggio sul cristallo di rubino, di conseguenza sceglie la più potente lampada flash fotografica a spirale di GE, quando espone la bacchetta alla luce rilasciata dalle lampade stroboscopiche, gli atomi di cromo in quest'ultima eccitati fanno avviare una reazione a catena interna. Grazie a questa reazione, i fotoni consegnati dagli atomi eccitati vengono riflessi dalle due estremità del rubino generando una maggiore eccitazione dell'atomo e rilascio di fotoni.



- 1\_ Alimentazione elettrica
- 2\_ Interruttore
- 3\_ Specchio riflettente al 100 %
- 4\_ Tubo flash al quarzo
- 5\_ Cristallo rubino
- 6\_ Specchio riflettente al 95 %
- 7\_ Cilindro riflettente in alluminio lucido
- 8\_ Raggio laser

Figura 6\_ Componenti emissione laser rubino, (scienza in rete, 2018, <https://www.scienzainrete.it/articolo/e-laser-fu/marco-taddia/2018-05-16>)

Al termine l'emissione stimolata genera sufficiente energia da facilitare l'impulso di fotoni e riuscire a sfondare uno dei lati argentati del rubino andando a produrre uno stretto raggio di luce monocromatica con lunghezza d'onda di circa 694 nanometri. Posiziona il cristallo all'interno della lampada a spirale per ottenere più luce concentrata sul rubino, costruisce un cilindro di alluminio che circonda la spirale della lampada flash. Il tutto era abbastanza piccolo in modo tale da essere tenuto su un palmo della mano.

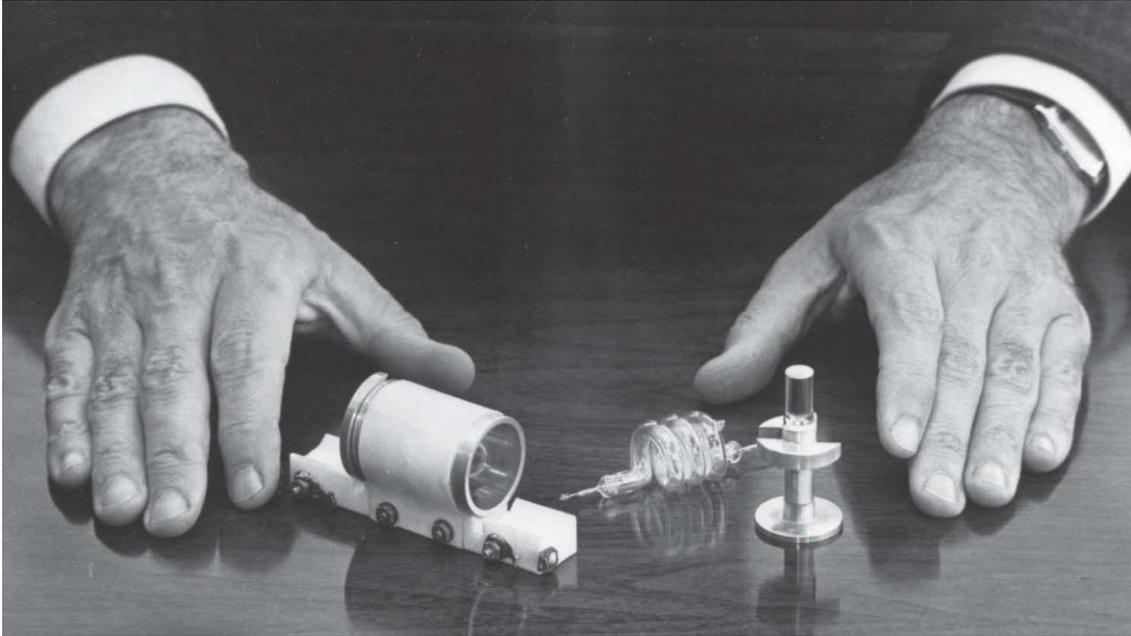


Figura 7\_ laser rubino di dimensioni ridotte progettato da Maiman, (World Magazine, 2022, <https://www.worldmagazine.it/664956/>)

La prova ufficiale avviene nel Maggio del 1960, quando viene acceso un alimentatore CC ad alta tensione per produrre una tensione alla lampada flash. La luce emessa dal cristallo di rubino è diretta tramite un monocromatore a un rilevatore molto sensibile, che a sua volta è collegato elettricamente a un memoscopio Hughes. Quando Maiman imposta la tensione a 500 volt, rileva tracce di rubino, aumenta maggiormente la tensione, incrementandola di volta in volta circa 50 volt. Negli appunti del suo libro descrive il momento di nascita del laser «quando abbiamo superato i 950 volt sull'alimentatore, tutto è cambiato. La traccia di output ha iniziato a salire di picco di intensità e il tempo di decadimento iniziale è diminuito rapidamente. Il laser è nato»<sup>9</sup>. Il primo articolo di Maiman di questo risultato viene pubblicato nella rivista Nature con il nome di Radiazione Ottica Stimolata nel Rubino nel 1960, questo sistema di laser a differenza di quello ad onda continua emette un lampo di luce molto potente che dura solo pochi nanosecondi ossia un milionesimo di secondo, congela in maniera ottimale il movimento e garantisce la produzione di ologrammi di eventi ad alta velocità, come un proiettile in volo. Essendo fortemente convinto della sua scoperta abbandona lo Hughes Research Laboratory HRL nel 1962 e decide di fondare la sua compagnia, la Korad Corporation che è specializzata nella produzione e ricerca di laser, dopodiché fonda la seconda società la Maiman

<sup>9</sup> Rawicz. A. H. & Holonyak. N. Jr, "Biographical Memories"

Associates e pochi anni dopo fonda la terza Laser Video Corporation qualificata nella produzione di visualizzazione video basati su laser, nel 1976 diventa vicepresidente del TRW.

Per provare le proprietà del laser, i ricercatori effettuano altre misurazioni dell'ampiezza spettrale della luce emessa.

Maiman utilizza uno spettrografo altamente specializzato, costoso e ad alta risoluzione. Grazie a quest'ultimo si può dimostrare che solo una delle due modalità fluorescenti, riferite a due linee spettrali, può essere laser. Per le sue scoperte riceve numerosi premi, uno dei più importanti nel 1984 il Premio Wolf che è equiparabile al Premio Nobel. Nel 2000 pubblica *The laser Odyssey* che non è altro che il resoconto di tutte le sue scoperte e sperimentazioni sulla creazione dei laser, inoltre gli conferiscono numerose lauree honoris la più recente nel 2002 dalla British Columbia's Simon Fraser University.

### **1.2.7 Robert Powell and Karl Stetson**

Nel 1965 Robert Lowell Powell e Karl. A. Stetson che lavorano presso l'Università del Michigan e condividono per anni le varie scoperte, si incontrano la prima volta nell'Università del Massachusetts a Lowell, nello stesso periodo Stetson ha un'offerta di lavoro presso la Sylvania Electric Co a Waltham in Massachusetts, mentre Powell in quel periodo è un professore, successivamente decide di trasferirsi al IBM di Owego New York, nel Settembre del 1962 Stetson si trasferisce ad Ann Arbor, nel Michigan e si unisce all'Institute of Science and Technology (IST) dell'Università del Michigan, in quel periodo descrive il lavoro di elaborazione ottica di Fourier che si sta portando avanti in quell'Istituto. Dopo le scoperte sulla prima soluzione di guida d'onda per fibra di vetro circolari e l'invenzione del laser al neodimio, nel 1964 Powell decide di abbandonare IBM per cercare di risolvere il problema matematico riguardante la soluzione di guida d'onda per fibre di vetro rettangolare e viene accettato presso IST, questo permette l'inizio della collaborazione tra Powell e Stetson che in quel periodo si occupano del radar ad apertura sintetica aviotrasportato dall'aspetto laterale, una diramazione è l'ologramma fuori asse grazie alla loro acquisizione del laser He-Ne. Nel 64 gli ologrammi subiscono un forte cambiamento, da percezione delle immagini di trasparenze a tono continuo e da trasparenze illuminate diffusamente a oggetti tridimensionali. Stetson e Powell continuano a lavorare in questo laboratorio portano avanti una serie di esperimenti, questa collaborazione è alimentata da Emmett Leith che in quel periodo lavora presso l'IST e chiede a Stetson di ricreare degli ologrammi con le stesse caratteristiche di quello del treno da lui creato che è molto più luminoso di tutti gli altri ma non riesce a replicare,

poiché l'efficienza di diffrazione degli ologrammi con luce diffusa che illumina una trasparenza è circa la metà di quella che si ottiene per una trasparenza senza diffusore, uno di questi è molto importante, ossia la scoperta delle immagini olografiche in movimento che tendono a presentarsi sbiadite, per risolvere questo problema si utilizza la doppia esposizione, prima con l'oggetto a riposo, successivamente in vibrazione o per esposizione prolungata, questo genera delle frange che segnano lo spostamento che è pari a multipli di mezza lunghezza d'onda, è proprio con la ricerca di risoluzione di questo problema che scoprono l'interferometria olografica. Sempre nello stesso anno ossia il 1965 sperimentano le vibrazioni di una membrana di un altoparlante registrandole, o quelle di una chitarra reperite dal laboratorio del professor Erik Ingelstam. Sia gli interferometri del gruppo TRW che quelli di Stetson e Powell precedono quella che è un'applicazione meno complessa del principio di interferometria, è quello che sarebbe dovuto avvenire prima di tutte queste scoperte se solo qualcuno avesse scelto la strada più semplice. Mesi prima Emmett Leith e Juris Upatnieks osservano i risultati delle ricostruzioni di ologrammi che sono esempi di interferometria olografica, anche se non hanno mai cercato di comprenderne i fenomeni, Stetson e Powell invece al contrario dei primi due cercano di trovare delle risposte, proprio per questo motivo sono andati ad osservare l'olografia degli oggetti vibranti, come citato prima delle vibrazioni del suono della chitarra, o dell'altoparlante. Quando portano avanti le osservazioni suggeriscono che i raggi di luce sono coerenti durante la registrazione di un ologramma diventano coerenti nella sua ricostruzione, Powell riconosce che si tratta di una scoperta innovativa, incentivata dalla loro affinità professionale.

L'interferometria olografica utilizza pienamente le capacità di un ologramma di riprodurre un campo ottico riflesso o trasmesso da un oggetto, la prima peculiarità è che può registrare campi incoerenti ma allo stesso tempo ricostruirli in campi coerenti in modo che possano interferire, possono essere incoerenti perché vengono generati da differenti lunghezze d'onda del laser, poiché potrebbero non esistere contemporaneamente o derivare dal movimento dell'oggetto come la vibrazione. In secondo luogo, un ologramma ha la capacità di ricostruire il campo ottico da un oggetto in modo totalmente realistico da interferire con il campo originale dell'oggetto quando l'ologramma viene riposizionato nella sua posizione originale. Questa scoperta è stimolata grazie a Fred Rotz un loro collega che in laboratorio in quel periodo usa uno spettrometro per monitorare le coerenze dei laser. Inoltre il rappresentante della Spectra-Physics dichiara le peculiarità dei nuovi laser che garantiscono una coerenza longitudinale periodica nel doppio della lunghezza della cavità, che è di 60 cm, proprio per questo motivo Stetson e Powell decidono di dimostrare le potenzialità di questi laser. L'esperimento consiste nel posizionamento di una

lastra dell'ologramma per poterla guardare attraverso uno specchio nell'altro e vedere una sequenza di immagini, ognuna di 10 cm più avanti della lunghezza del percorso, in questo modo si ottiene la registrazione di più ologrammi, che presentano una variazione periodica della luminosità dell'immagine in funzione della lunghezza del percorso. Il punto cruciale è quello dell'apparizione della frangia nera nell'immagine più vicina del punto di raggio dell'oggetto, spostando lo sguardo si rendono conto che è qualcosa di non fisso sull'oggetto stesso.



Figura 8\_ Ologramma che dimostra la coerenza periodica dei nuovi laser con cavità 60 cm, ( Niels Bohr Library & Archives, <https://repository.aip.org/islandora/object/nbla%3A283488#page/1/mode/2up>)

Dopo questa dimostrazione allestiscono un esperimento dove contengono l'intero raggio su una superficie bianca e catturano l'intero raggio di riferimento sulla lastra dell'ologramma. Nel 1965 a fronte di questi esperimenti condotti decidono di presentare il documento all'OSA per il meeting della Optical Society of America Dallas, proponendo ad Emmett Leith di presentare anche la moltitudine di esperimenti precedenti alla scoperta.

Stetson nel 1965 decide di lasciare l'IST per entrare GCA Corporation del Massachusetts, anche Powell nel 66 decide di abbandonare l'IST per lavorare presso Grant/Crafton Optronics, GCO. Mentre quell'anno Stetson parte per il

dottorato nell'Istituto di Ricerca Ottica presso il Royal Institute of Technology (KTH) di Stoccolma. Successivamente Powell lascia la GCO e si unisce all'American Optical a Southbridge del Massachusetts. Con il passare degli anni i due perdono gradualmente i contatti, nel 1970 mentre Stetson lavora presso la National Physical Laboratory in Inghilterra, Powell fonda la sua compagnia e nel frattempo i due scrivono le questioni legali sorte riguardo i brevetti dell'Università del Michigan sull'interferometria olografica. Infine Powell lavora presso l'Oakland University di Rochester nel Michigan e lavora con Joseph Hovanesian sugli effetti fotoelastici nell'interferometria olografica.

### **1.2.8 Karl Stetson**

Si laurea presso il Lowell Technological Institute, che ora è conosciuta come University of Massachusetts at Lowell, inoltre riceve un'offerta di lavoro presso la Sylvania Electric Co. A Waltham in Massachusetts, dopodiché decide di intraprendere la scuola di specializzazione nel Dipartimento di Fisica Applicata di Harvard. L'imminente convivenza con la futura moglie lo porta a frequentare l'Università del Michigan ad Ann Arbor, nel 1962 sostiene il colloquio al Radar Laboratory presso l'Istituto di Scienza e Tecnologia che si trova nel Willow Run Airport di Ann Arbor, precedentemente lavora per Bell Aerosystems a Niagara Falls a New York. La richiesta è quella di studiare dei simulatori spaziali che richiedono l'analisi dei sistemi TV dalla risoluzione spaziale delle loro telecamere e display, fino alla larghezza di banda temporale dell'elettronica. In questo modo si forma sull'analisi della frequenza spaziale e apprende le applicazioni pratiche della teoria della trasformata Di Fourier appresa durante un corso di laurea tenuto da Wilfred Kaplan. Durante la sua permanenza all'IST accompagna il capo del gruppo Wendell Blicken in viaggio a Newport, precisamente a Rhode Island per visitare gli Eppley Laboratories, per acquistare una delle loro termopile per misurare la radiazione in uscita di un laser di nuova invenzione, dopo il loro ritorno ricevono sia la termopila sia il laser che viene venduto come prodotto cooperativo tra la società in California ossia la Spectra Physics e la società di ottica, Perkin Elmer, nel Connecticut. Quest'ultimo fornisce il mirror mentre la Spectra Physics fornisce il resto del sistema, questa collaborazione dura un anno. La peculiarità di questo laser è il generatore di radiofrequenza montato al centro dell'unità che genera un campo di 40 MHz che ionizza la miscela Elio-Neon nel tubo di scarica, ad un certo punto Wendell Blicken lascia il gruppo e viene sostituito da Emmett Leith. L'attività principale del laboratorio è l'elaborazione ottica di dati provenienti da radar ad apertura sintetica con osservatore laterale. Negli anni 50 viene proposta una soluzione per risolvere le complicazioni del

radar aereo, la problematica della distanza è facilmente conseguibile con la trasmissione di impulsi brevi o di frequenza in modo tale da essere compresi al loro ritorno. Si decide di tenere in funzione continua l'oscillatore di impulsi in modo da registrare i segnali emessi.

Per la registrazione si ha il supporto di memorizzazione dei dati della pellicola fotografica, si decide di far avanzare il film continuamente in modo da avere dei dati elaborati otticamente. Si scopre che per la luce coerente, il campo sul piano focale posteriore di una lente è la trasformata di Fourier del campo sul piano focale anteriore, questo processo porta alla possibilità di procedere con le convoluzioni e altre operazioni che garantiscono la conversione dei modelli su pellicola in immagini del terreno scansionate dal sistema radar. Tutte le differenti tipologie di laser sono state portate all'interno del laboratorio di lavoro di Stetson per queste ragioni riflette sulla differenza della luce parzialmente coerente delle lampade ad arco di mercurio, che è maggiormente tollerante nei confronti dello sporco e dei riflessi di lenti, mentre la luce laser perfettamente coerente richiede una perfetta pulizia e un rivestimento antiriflesso, inoltre negli stessi anni Emmett Leith elimina la pellicola fotografica. Nel 1963 durante una riunione dell'American Physical Society ha la possibilità di conoscere alla presentazione da parte della Corning Glass Works di nuovi materiali piroceramici, come anche il vetro fotocromatico con la peculiarità di avere una risoluzione spaziale molto elevata, dopo questa scoperta decide di prelevarne dei campioni e usarli per registrare degli ologrammi. I campioni vengono esposti alla luce ultravioletta per scurirli e successivamente esposti alla luce laser He-Ne rossa per cancellarli selettivamente. Posiziona due raggi laser in modo che intersechino i campioni, uno con una trasparenza bloccandolo, l'altro raggio viene diffratto in una replica del raggio bloccato, insieme ad un'immagine della trasparenza. Un anno prima della scoperta in collaborazione del 1965 con il suo professore universitario Lowell, la registrazione degli ologrammi passa da diapositive a tono continuo di trasparenze illuminate da luce diffusa, a oggetti tridimensionali. Dopo la scoperta la difficoltà è quella di non avere le competenze giuste nel campo dell'ingegneria meccanica, poiché due dei modelli di vibrazione che registrano sul fondo della pellicola mostrano un modello a cinque lobi modalità impossibile per la struttura vibrante circolare, di conseguenza comunicano le modalità a Ralph Grant un professore di acustica ed entrano in contatto con Donald Gillespie interessato dal punto di vista economico per il finanziamento dei nuovi ologrammi, proprio per questo motivo allestisce un laboratorio di olografia dove realizza ologrammi a scopo dimostrativo, dopo questa esperienza lui e suo fratello fondano un'azienda per produrre apparecchiature specifiche per laboratori di olografia chiamata Jadon Engineering.

Dopo il 1965 Stetson lascia l'University of Michigan e lavora alla GCA Corp a Bedford, l'obiettivo è quello di trovare delle tecnologie olografiche non specifiche. Inevitabilmente dopo la scoperta le vite di Stetson e Lowell sono totalmente differenti, in alcuni periodi si incontrano ma non collaborano più.

### **1.2.9 Adam Kozma**

Nasce e cresce nell'area di Detroit, si laurea presso l'Università del Michigan, poi frequenta la Wayne State University e il dottorato lo consegue nell'Università di Londra. Per tutta la vita si occupa di ricerca, si specializza in radar e imaging ottico, successivamente ricopre il ruolo di vicepresidente per l'Environmental Research Institute of Michigan sulla ricerca del radar e sviluppo aziendale, assume lo stesso ruolo anche nella Syracuse Research Corporation. È fondamentale per la fase successiva alle scoperte di Stetson e Lowell, in merito al suo ragionamento di come sarebbe la ricostruzione di un ologramma se l'oggetto si muovesse in modo casuale durante l'esposizione dell'ologramma. Questo ragionamento sottolinea il punto di vista secondo cui la lastra fotografica registra ologrammi elementari per ogni posizione dell'oggetto e poi li ricostruisce simultaneamente.

### **1.2.10 Emmett Leith e Juris Upatnieks**

Emmett Leith viene riconosciuto come figura fondamentale nel campo degli ologrammi, nasce a Detroit in Michigan nel 1927, appena diciottenne si unisce alla Marina negli ultimi mesi della Seconda Guerra Mondiale, dopo questa esperienza ottiene la triennale in scienze nel 1949 e poi un master in Fisica nel 1952, presso la Wayne State University, prima della laurea entra nel Willow Run Laboratory dell'Università del Michigan che è tutelata dai ricercatori dell'università del Michigan e alcuni studenti laureati.

Un argomento di ricerca che si sta richiedendo in quegli anni è il radar ad apertura sintetica, in grado di formare immagini del terreno. Viene coinvolto nel progetto Michigan, il più grande contratto del Dipartimento della Difesa per l'Università del Michigan continuato per oltre quindici anni. In quegli anni si sta sviluppando il primo computer digitale e l'elettronica analogica, ma purtroppo non sono compatibili per la produzione del materiale richiesto per i radar.

Emmett Leith al contrario dei suoi colleghi ingegnerie elettrici è un fisico che segue quattro corsi differenti: ottica fisica, spettroscopia, cristallografia a infrarossi e a raggi X, di conseguenza questo gli consente di avere delle

conoscenze approfondite in svariati campi, si ritrova a studiare metodi ottici per i calcoli essenziali per trasformare il complesso segnale radar in un'immagine. È opportuna la trasformazione di Fourier del segnale, ma anche ritocchi maggiormente mirati, infatti capiscono che è fondamentale la posizione dell'antenna per la registrazione dei dati evitando di averla puntata direttamente sul lato dell'aereo, ma avanti o indietro con una piccola angolazione. Leith e due colleghi iniziano a studiare teoricamente il problema all'inizio del 1954, tramite la luce incoerente, ma trovano delle anomalie, di conseguenza prova ad utilizzare una luce coerente di una lampada al mercurio filtrata. Nei due anni seguenti lui e altri colleghi provano ad esplorare i vantaggi dei processori ottici che utilizzano luce coerente e incoerente.

Nel 1955 Leith si ritrova a condividere il lavoro di ricerca con il neolaureato Len Porcello, studiano per alcuni mesi le proprietà della radiazione coerente e non coerente con il supporto di un processore ottico, un cross-correlatore ottico. In questo modo ottengono un promemoria dettagliato ed esteso che analizza la matematica del processo, che viene discussa in termini di ottica fisica classica. Dopo poco tempo scoprono un documento tenuto al congresso annuale sui radar da Ed O' Neill che unisce l'ottica con la teoria della comunicazione.

Nel 1956 viene promosso come ricercatore associato, il sistema di elaborazione ottica di Leith è non verificato e il lavoro svolto non è soddisfacente per gli amministratori del Willow Run. Il punto di vista dell'ottica fisica è troppo distante dal tipo di lavoro e dai ragionamenti portati avanti dagli ingegneri che si occupano di radar, inoltre la strada è molto incerta anche per lo sviluppo del sistema SAR, nel 1957 lo sviluppo del radar continua ad evolversi in modo negativo, i primi otto voli aerei che possiedono dei radar producono solo delle informazioni ma purtroppo non le immagini del terreno richieste, ad ogni modo il nono volo sviluppa delle immagini anche se ancora acerbe, ma fornisce anche il sistema nel suo insieme, di conseguenza il lavoro di Emmett Leith viene rivendicato nonostante le poche aspettative dei suoi colleghi. Dopo questo successo, alla fine degli anni '50 la SAR adotta l'elaborazione ottica coerente non solo esclusivamente per i radar ma anche per altre forme di trasformazioni matematiche e filtraggio. Leith continua ad ampliare e diffondere i suoi concetti di ottica fisica e teoria della comunicazione per produrre dei metodi pratici di elaborazione delle informazioni, per esempio: impulsi radar a frequenza cinguettata o spazzata nel sistema SAR e per comprimerli otticamente per generare un'immagine che sembra un ologramma allungato. Nel 1958 viene sviluppata una configurazione ottica, che elimina la necessità di un complicato sistema di filtraggio elettrico.

Il processo di elaborazione ottica coerente significa che le operazioni generalmente separate di elaborazione dei dati di compressione dell'impulso e

apertura sintetica, ora diventano due di un'unica operazione bidimensionale. Dopo questi risultati il gruppo di ottica inizia ad investigare altri tipi di applicazioni, soprattutto maggiore complessità nello sviluppo dei dati SAR a partire da elaborazione ottica di segnali acustici subacquei o da sonar, dei dati sismici, e metodi di riconoscimento dei caratteri con filtraggio ottico abbinato. Molti dei ricercatori non riescono a vedere compiuto il loro lavoro. Leith all'età di trent'anni viene citato in alcuni articoli con più autori in conferenze private, ma la relazione tra elaborazione ottica e dati radar rimane segreta. Per anni la ricerca SAR rimane allo scuro, dopodiché ne viene pubblicata solo una porzione non integrale, a causa di questo, Leith e la sua ricerca nell'elaborazione ottica è sconosciuta fino all'inizio degli anni '60. Successivamente gli vengono riconosciuti progetti maggiori, come per esempio il suo contributo nel progetto Michigan che viene in gran parte finanziato.

Alla fine del 1956 scopre un articolo di Hussein El-Sum che in giovane età conduce una ricerca approfondita sulla teoria del Fronte d'onda di Dennis Gabor. Dalla metà degli anni '50 Leith decide di occuparsi della semplificazione dei processori ottici coerenti e via via che va avanti con le ricerche, si rende conto che la teoria sul radar ad apertura sintetica è molto vicino e simile al ragionamento di Gabor, nei successivi tre anni decide di occuparsi dell'estensione di questa ricerca.

In questo momento della sua vita incontra una persona molto importante per la sua fase di sperimentazione, un nuovo collega di nome Juris Upatnieks si unisce al laboratorio nel 1960, nasce nel 1936 a Riga in Lettonia, in tenera età scappa con la sua famiglia dall'occupazione sovietica e si trasferiscono in Germania, ma nel 1951 decidono di trasferirsi negli Stati Uniti. Studia ingegneria elettrica presso l'Università di Akron in Ohio e nel 1960 ottiene una laurea, dopodiché decide di seguire dei corsi di studio dell'Istituto di Scienza e Tecnologia dell'Università del Michigan e al termine del percorso ne consegue un Master Laurea in Ingegneria Elettrica nel 1965, mentre dal 1973 al 1993 lavora nell'Environmental Research Institute del Michigan, dove consegue la carica come professore aggiunto presso Electrical and Computer Engineering Department e tiene un corso di Laboratorio in ottica fino al 1996. Dal 1993 al 2001 diviene consulente dell'Applied Optics ad Ann Arbor. La sua fortuna arriva quando incontra il collega Emmett Leith, insieme dimostrano i primi ologrammi tridimensionali che fino a quel momento vengono sviluppati solo in due dimensioni e insieme pubblicano una serie di articoli tecnici dal 1962 al 1964.



Figura 9\_ Leith e Upatnieks riprendono un ologramma di trasmissione laser con la tecnica "fuori asse", (Fritz Goro for Life Magazine, 1967, <http://www.holophile.com/history.htm>)

Figura 10\_ "Train and Bird" primo ologramma realizzato con la tecnica "fuori asse", ( Fritz Goro for Life Magazine, 1967, <http://www.holophile.com/history.htm>)

A partire dal 2009 Upatnieks possiede 19 brevetti, nel 1975 riceve il RW Wood Prize della Optical Society of America e nel 1976 la Holley Medal della American Society of Mechanical Engineers. In questo periodo di collaborazione i due colleghi cercano di investigare le idee sviluppate dal lavoro di Willow Run. Per quattro anni, sviluppano conoscenze e tecniche che estendono il concetto di Gabor, questo lavoro porta al legame tra la teoria della comunicazione sperimentato precedentemente e la teoria sul fronte d'onda di Gabor, questo permette ai due di risolvere il problema limitante che non consente di far progredire il fronte d'onda, ossia come separare le due immagini coniugate indotte da un ologramma.

Leith e Upatnieks pubblicano due articoli sui miglioramenti ottenuti, uno tra la fine del 1960 e l'estate del 1961. Nel primo decidono di descrivere una geometria fuori asse per la ricostruzione del fronte d'onda, che si basa sui reticoli di diffrazione, in generale prismi o specchi in modo da dividere e deviare un campione e un raggio di riferimento. Nella seconda pubblicazione, ufficializzano la comprensione della ricostruzione del fronte d'onda in termini di teoria della comunicazione. La loro scoperta non è casuale in laboratorio, ma si tratta di una ricerca durata anni con la progettazione di differenti processori e sulla riflessione di Leith sulle profonde relazioni tra fisica ottica e ingegneria elettronica. Per la prima volta i due colleghi risolvono i problemi emersi durante le sperimentazioni di Gabor, ossia la complessità del raggiungimento di una buona qualità delle immagini binarie. Nonostante tutti i loro risultati e risoluzioni di problemi questi non destano l'interesse sperato dai loro colleghi, il progetto si arresta e Upatnieks

e le loro strade si dividono a causa del congedo preso da Upatnieks per il servizio militare, mentre in questi mesi di assenza del collega Leith decide di concentrare tutte le sue forze sul progetto Michigan.

Nel 1962 al ritorno di Upatnieks a Willow Run, i due dedicano il loro tempo alla ricerca agli ologrammi di trasparenze in scala di grigi, al momento la loro strumentazione è una lampada a mercurio con filtro. Ma ben presto hanno l'opportunità di provare il primo laser elio-neon che viene acquistato per un ulteriore laboratorio di elaborazione ottica di Willow Run, da subito si rendono conto dell'elevata luminosità, anche se all'inizio le prove effettuate sono poco soddisfacenti come: riflessi indesiderati e interferenze inondano l'immagine con ulteriore rumore. Questa situazione di innumerevoli prove dura per un anno, i laser si rivelano problematici, ma c'è un punto di svolta nei sei mesi successivi nel 1963 riescono a ad avere dei risultati superlativi. Al contrario delle prime pubblicazioni questa volta con l'annuncio delle trasparenze in scala di grigi riescono ad ottenere un forte impatto dagli altri esperti. Inoltre sempre in quell'anno tengono una conferenza sui loro risultati e l'American Institute of Physics pubblicizza i loro risultati come Fotografia senza Obiettivo, di conseguenza passano da una situazione in ombra ad una pubblica. Leith viene intervistato dai giornalisti sulle qualità dei nuovi ologrammi, ad ogni modo la ricostruzione delle trasparenze monocromatiche cattura soprattutto l'interesse dei fotografi.

Nel 1963 i giornali iniziano a descrivere in modo più complesso le proprietà di queste immagini, Leith e Upatnieks continuano ad estendere la tecnica, cercano di mappare il lavoro del radar ad apertura sintetica su questo nuovo dominio. Durante il '63 studiano le peculiarità delle sorgenti di luce laser HeNe e cercano di incrementare la risoluzione degli ologrammi bidimensionali, per fare ciò studiano dei filtri ottici complessi e cercano di comprendere maggiormente la compressione dell'impulso, ma anche alla valutazione delle caratteristiche della ricostruzione del fronte d'onda e utilizzano diapositive illuminate e oggetti tridimensionali che riflettono diffusamente. Nell'aprile del 1964 si occupano della dimostrazione di un ologramma che rappresenta un treno, in una serie di conferenze. Inizialmente questa situazione è di forte potere, la voce degli ologrammi tridimensionali prima viene divulgata tra gli scienziati ottici, successivamente tra le professioni ingegneristiche americane. Dopo queste pubblicazioni l'American Institute of Physics prepara un comunicato stampa per divulgare la fotografia senza obiettivo. Nel 1964 gli ologrammi diventano famosi in tutto il mondo, gli amministratori di Willow Run e gli sponsor militari finanziano la nuova ricerca.

Il Radar and Optics Laboratory avviano una vasta raccolta di studi, di conseguenza dai laboratori emergono le tecniche del contorno olografico,

interferometria olografica, filtraggio complesso olografico, ricostruzione multicolore, primi studi sulla memorizzazione dei dati e il multiplexing di più immagini su un'unica lastra. Lo studio di elaborazione ottica non è molto noto, ma ciò non esclude il coinvolgimento di Leith in entrambi i domini.

L'olografia rende Leith una figura molto importante all'interno dell'università ma anche esternamente, diventa professore associato del Dipartimento di ingegneria elettrica dell'Università del Michigan nel 1965 mentre nel '68 diventa professore ordinario. Inoltre porta a termine un dottorato di ricerca presso la Wayne State University all'età di 51 anni, rimane attivo nell'olografia e nell'elaborazione ottica, dividendosi tra l'Università del Michigan e il Willow Run Laboratories. Dagli anni 60, lui e il suo collega tengono numerose conferenze pubbliche sull'olografia e scrivono numerosi articoli.

### **1.2.11 Yuri Nicholaevich Denisyuk**

Yuri Nicholaevich Denisyuk personaggio importante per il lavoro svolto nella produzione olografica, inizia le sue indagini su ciò che chiama Fotografia delle Onde.

Nasce nel 1927 a Sochi, una cittadina sul Mar Nero, ma cresce a Leningrado, ottiene la prima laurea dopo gli studi portati al termine nel Dipartimento di Ingegneria Fisica presso l'Istituto di meccanica e ottica della sua città nel 1954. Decide di non seguire il percorso di fisica fondamentale, ma inizia a lavorare presso l'Istituto di ottica statale di Vavilov per trentaquattro anni. Lo stato Optical Institute conosciuto anche con l'acronimo GOI, viene fondato nel 1918 e si tratta del principale centro di ricerca e di sviluppo dell'ottica, il suo lavoro spazia dalla ricerca pura alle applicazioni per le forze armate. Durante i primi sette anni di lavoro, lavora sotto la figura di Alexander E. Elkin, nell'ambito della strumentazione ottica per la Marina sovietica, occupato per un determinato periodo nella ricerca dello sviluppo di dispositivi ottici convenzionali costituiti da lenti e prismi. Decide di conseguire una laurea avanzata, viene supportato da un professore di nome Elkin, che nel 1958 gli dà il tempo di fare ricerca per la tesi di Kandidat, pressappoco equivalente al dottorato di ricerca occidentale e chiede al suo collega, il Dottor Eugenii Ludin di fare da supervisore, anche viene a mancare dopo poco tempo in ogni caso Denisyuk prosegue i suoi studi, con un piccolo supporto di denaro e con la disponibilità di risorse materiali destinate alla ricerca sottomarina in corso all'interno dell'Istituto Vavilov.

In seguito decide di studiare il problema dell'imaging generale, nel 1958 conduce delle indagini per sistemare i dispositivi di visualizzazione di immagini in modo tale da riprodurre un'illusione assoluta della presenza di oggetti esposti,

studia le ricerche di Gabriel Lippmann, precedentemente citato, fisico francese che ad inizio 900 sviluppa una produzione di fotografia a colori e dopo questo lavoro ottiene il Premio Nobel sull'interferenza ottica, propone una forma di fotografia tridimensionale che si basa su un sistema di apertura costituito da piccole lenti. La disposizione a occhio di mosca delle fotografie integrali presentano dei difetti teorici, in modo da ottenere degli spostamenti di parallasse quasi ininterrotti mentre l'osservatore si muove, man mano che gli obiettivi vengono ridotti sorge il problema della diminuzione della loro risoluzione, andando a limitare la qualità dell'immagine.

Tra il 1958 e 59 Denisjuk studia teoricamente il problema e inizia a pensare che le informazioni ottiche complete su un oggetto complesso possano essere registrate con la combinazione della luce con un'onda di riferimento, fin dall'inizio concentra il suo pensiero sulle onde stazionarie nello spazio, una situazione in cui la fase e l'ampiezza del campo d'onda sono costanti nel tempo e nella posizione.

Questa condizione potrebbe essere condotta tramite due onde contro-propaganti. Le due onde si sovrappongono, con il risultato di un'onda stazionaria, un campo inalterabile con l'intensità e fase fisse in ogni punto che spera di registrare come una fetta bidimensionale su un'emulsione fotografica. Inizialmente pensa di provare a registrare una sezione trasversale del campo ondulatorio di luce, come schema di interferenza in una sottile emulsione di pellicola fotografica. A differenza dell'approccio di Gabor fa in modo che l'onda di riferimento sia trasmessa sull'onda dell'oggetto anziché aver origine dalla stessa direzione. Questa configurazione impone un serio vincolo pratico, ossia invece di ottenere delle frange di interferenza grandi, quelle di Denisjuk formano superfici quasi parallele all'emulsione. Nella prima fase considera un'emulsione fotografica più sottile di una lunghezza d'onda in modo da non produrre una macchia fangosa, ma il problema è che questa è più sottile di tutte le emulsioni disponibili. In questo frangente non considera le altre disposizioni dei due fasci di luce interferenti che creano una spaziatura maggiormente praticabile delle frange di interferenza.

Un'ulteriore preoccupazione è il verificarsi del disturbo della fase e l'ampiezza d'onda da parte delle variazioni nell'emulsione e di conseguenza impedisce la ricostruzione del campo d'onda. A questo punto Denisjuk concepisce una possibile soluzione, con la generalizzazione del concetto di fotografia di interferenza sviluppato da Lippmann. Utilizza la luce monocromatica con una lampada ad arco di mercurio invece di servirsi della luce naturale, uno specchio curvo al posto dello specchio di mercurio liquido e un fascio parallelo piuttosto che un'immagine focalizzata. La luce della lampada al mercurio passa attraverso questa emulsione in modo tale da essere riflessa dallo specchio convesso verso

l'emulsione. Il conseguente modello di interferenza dell'onda stazionaria sferica viene registrato grazie alla profondità dell'emulsione densa. Denisyuk all'inizio del suo nuovo metodo espone le sue conclusioni dichiarando che avrebbe creato una struttura nell'emulsione fotografica densa che registra strati di interferenza che modellano la superficie di un oggetto minimamente profondo riflettente.

A metà del 1958 inizia a preparare l'attrezzatura ottica e la chimica di elaborazione necessaria e studia i documenti in francese di Lippmann, sempre in quell'anno inizia i suoi primi esperimenti per testare delle idee. Ma il problema è che all'inizio del suo lavoro i risultati non sono soddisfacenti, poiché si rende conto che le lastre ad alta risoluzione necessarie per registrare i modelli di frange molto vicine delle onde stazionarie sono troppo insensibili per registrare il motivo delle frange di conseguenza Denisyuk è limitato a una lampada a emissione fioca e altamente filtrata. Insieme alla dottoressa Rebekka R. Protas, specializzata in emulsioni agli alogenuri d'argento presso l'Istituto Vavilov, lo scopo è quello di migliorare la sensibilità delle lastre. Sperimentano all'incirca 200 formule di emulsione, cercando di bilanciare la dimensione dei granuli di alogenuro d'argento e lo spessore dell'emulsione per migliorarla e renderla maggiormente sensibile.

Deve mantenere lo spessore inalterato dopo che viene sviluppato, in modo che il colore dell'immagine prodotta effettui lo spostamento e la dimensione dei grani fotosensibili è fondamentale per la registrazione delle onde stazionarie e per la qualità delle frange. Negli anni successivi scoprono ulteriori passaggi per la variazione chimica per la sensibilizzazione all'oro e dell'ipersensibilità alla trietanolamina rendono l'emulsione maggiormente veloce lasciando invariata la risoluzione.

Questa esperienza con la dottoressa Protas è fondamentale per il suo progetto. Durante il 1959, utilizza questa emulsione prodotta e scopre che il suo schema funziona, la lastra fotografica riflette la luce collimata al mercurio, come lo specchio sferico originale, che produce luce divergente. Le piccole lastre si comportano come specchi convessi autentici, questo dimostra che una fotografia spaziale di onde stazionarie procura una riproduzione finita del campo d'onda registrato. Denisyuk quando ispeziona gli ologrammi poi si rende conto che agiscono come degli specchi convessi, ma che al contrario degli altri garantiscono il cambiamento della lunghezza focale con la lunghezza d'onda, infatti si tratta del primissimo elemento olografico riflettente. Dopodiché scopre l'ultimo lavoro di Gabor troppo tardi, durante il completamento della sua tesi. Nel 1962 viene pubblicato il primo articolo, riguardante le sue scoperte e successivamente due articoli ma con un contenuto maggiormente consistente. Il primo articolo si compone di tre pagine e annuncia "un fenomeno scoperto dall'autore, in cui le proprietà riflettenti di un oggetto si manifestano con straordinaria fedeltà".

Direttamente dalla citazione dell'opera di Gabor e Lippmann che descrivono in quale modo gli oggetti diffondono la luce che cade su di loro verso la fonte originale. Il prodotto finale è un'interferenza che si verifica tra l'onda originale e l'onda diffusa, andando a generare un'onda stazionaria che si può fotografare, proprio grazie a questa scoperta Denisjuk descrive la sua Fotografia dell'Onda, come un tipo unico di equivalente ottico dell'oggetto, scrive: «Se la radiazione proveniente dalla stessa sorgente che ha illuminato l'oggetto durante l'esposizione può incidere su questa struttura, rifletterà questa radiazione in modo tale che il campo d'onda della radiazione riflessa dall'oggetto»<sup>10</sup>.

Dopo alcuni mesi presenta un documento che è più corposo di tutti quelli pubblicati fino a quel momento con lo stesso titolo ossia Ottica e spettroscopia. Osserva anche i reticoli di diffrazione e gli elementi ottici che dipendono dalla lunghezza d'onda e nota che la tecnica di registrazione è limitata dalla luminosità della sorgente proveniente di mercurio e la monocromaticità.

La pubblicazione non è semplice, poiché quando chiede delle referenze non gli sono concesse, in questo periodo è difficile trovare sponsor, alla fine un altro accademico di nome Vladimir Linnik legge il giornale davanti all'Accademia delle Scienze e con questa opportunità Denisjuk riesce a pubblicare il documento anche se all'inizio non viene apprezzato poiché le sue pubblicazioni non suggeriscono una soluzione convincente per la fotografia delle onde a causa della limitata coerenza del mercurio che genera la vanificazione di ogni oggetto tridimensionale a dimensioni banali. Fino al 1964 inoltre non gli viene concessa la laurea in Kandidat, nel frattempo intorno al 1961, termina il lavoro di dissertazione e diviene direttore del laboratorio Vavilov che è responsabile per lo sviluppo dell'infrarosso, Sonar e Radar per immagini da fornire alla Marina Militare, simile alla ricerca condotta dal suo collega Emmett Leith nel Willow Run Laboratories in Michigan.

Come ogni collega passato all'inizio delle pubblicazioni degli studi e delle nuove ricerche il pubblico ma gli stessi colleghi non accettano le nuove scoperte le criticano fortemente.

Fino al 1965 ulteriori ricerche sulla fotografia delle onde vengono condotte da due studenti del Laboratorio, ma quell'anno si inizia ad utilizzare il laser a elioneon, inoltre si risveglia l'interesse generale per la ricostruzione del fronte d'onda grazie ai risultati delle ricerche ottenuti dai due colleghi Leith e Upatnieks negli Stati Uniti. Gradualmente si verifica la comprensione della connessione tra la ricerca di Denisjuk, nel 1965 tre americani riscoprono la sua geometria, che permette la ricostruzione a luce bianca di immagini olografiche, infatti da

---

<sup>10</sup> Johnston. S. F, "Yuri Denisjuk: An appreciation", Proceedings of the 7th International Symposium on Display Holography, 2006.

quest'anno Denisjuk e i suoi collaboratori prestano maggiore attenzione ai soggetti uniti di: ricostruzione del fronte d'onda, fotografia senza obiettivo e fotografia dell'onda che sta diventando in quegli anni molto nota con il nome di olografia. Trova ulteriore supporto dal fisico dell'Unione Sovietica di nome Petr Kapitsa che lavora per un periodo con il Lord Rutherford negli anni 30 e usa la sua influenza per garantire delle recensioni positive, di conseguenza dopo il 1970 il culmine del lavoro sull'olografia delle onde permette al ricercatore di avere una forte ascesa nell'Unione Sovietica, in quest'anno riceve il Lenin Prize, questo permette la riabilitazione del lavoro di Denisjuk nell'Unione Sovietica, i giornalisti delle testate giornalistiche più importanti descrivono il suo lavoro in termini popolari per essere divulgato maggiormente, la sua fama ha i suoi contro infatti il ricercatore dichiara: «le mie lotte con i colleghi conservatori e il mio successivo trionfo hanno avuto una cattiva sulle mie indagini nel campo dell'olografia. In questi lunghi anni sono stato bombardato da giornalisti e da numerosi neofiti desiderosi di avvicinarsi all'olografia. Questi non sono stati gli anni migliori»<sup>11</sup>. Questo astio da parte della maggior parte dei colleghi porta Denisjuk ad essere conosciuto solo secondariamente ad ovest, poi successivamente diventa molto conosciuto e intraprende il suo primo viaggio intorno al 1970, visitando la Francia, per una conferenza sull'olografia. Ha l'opportunità di conoscere Emmett Leith al meeting di Novosibirsk nel 1973, sei anni dopo quest'ultimo viene invitato a visitare l'Unione Sovietica.

Denisjuk dopo il primo viaggio all'estero decide di intraprendere ulteriori viaggi in differenti paesi come: Italia, Canada, America e Colombia. Dopodiché si trasferisce nel Ioffe Institute nel 1988, nel 2005 tiene la sua ultima conferenza all'estero, a Varna in Bulgaria. Durante la fine degli anni 60 nel Laboratorio vengono sviluppati laser pulsanti per ritratti umani da parte di Dimitri Staselko. Con l'avanzare delle tecnologie e dello sviluppo delle emulsioni di alta qualità da parte dei Sovietici, gli ologrammi realizzati da Denisjuk e dai suoi collaboratori iniziano ad ottenere l'attenzione occidentale durante gli anni 70 e attirano numerosi ricercatori come per esempio Stephen Benton negli Stati Uniti e Nick Phillips nel Regno Unito. Gli ologrammi di tipo Denisjuk rimangono i più importanti e conosciuti per anni in Occidente e questo contribuisce ad un maggiore impegno nelle ricerche per cercare di migliorare la chimica di elaborazione e le geometrie ottiche, questo spinge l'Occidente a cercare di superare i risultati russi.

---

<sup>11</sup> Johnston. S. F, "*Yuri Denisjuk: An appreciation*", Proceedings of the 7th International Symposium on Display Holography, 2006.



Figura 11\_ Denisyuk con in mano il suo autoritratto olografico a riflessione  
(H. J. Caulfield, Ed., *The Art and Science of Holography . A Tribute to Emmett Leith and Yuri Denisyuk*, SPIE Press, Bellingham, 2003)

---

Denisyuk contribuisce allo sviluppo di queste tecnologie, infatti nel 1969 concepisce una tecnica per la registrazione di un treno d'onda di luce in volo e alla fine egli anni 70 sviluppa degli ologrammi generati da onde di intensità in viaggio.

Dieci anni dopo descrive la registrazione di questi ultimi chiamati pseudo-profondi per una classe speciale di oggetti. Durante gli anni 90, crea i selettogrammi, per registrare immagini in tre dimensioni senza un raggio di riferimento, si tratta di un concetto simile alla ricerca sulla fotografia di Lippmann iniziata una decina di anni prima. Infatti prima delle ricerche prodotte dal ricercatore sovietico ci sono delle pubblicazioni sulle memorie olografiche, cinema olografico, supporti di registrazione e altre scoperte. Yuri Denisyuk diviene il protagonista in ambito di ologrammi in quel periodo, dopo la sua visita nel Regno Unito nel 1987 riceve il premio dalla Royal Photographic Society e partecipa all'International Symposium on Display Holography che si tiene negli Stati Uniti nel 1989. La sua notorietà cresce rapidamente, dalla metà degli anni 70 del 900, gli olografi iniziano a identificare gli storici dell'olografia infatti Yuri Denisyuk, Emmett Leith e Dennis Gabor vengono identificati come i tre fondatori.

### 1.2.12 Keeve M. Siegel

Nasce nel 1923 a New York, consegue la laurea in fisica presso il Rensselaer Polytechnic Institute tra il 1948 e il 1950. In questi anni diventa parte dell'Università del Michigan ad Ann Arbor, prima con il ruolo di ricercatore associato e successivamente come ingegnere ricercatore fino al 1962.

Nel 1949 raggiunge la mansione di capo della Sezione di Fisica dell'Alta Atmosfera e del Dipartimento di Teoria e Analisi nel '52, nei cinque anni successivi assume il ruolo di capo del Laboratorio di Radiazioni dell'Università e diventa professore di Ingegneria Elettrica, sonda il campo della teoria elettromagnetica, inoltre si occupa di ricerca in Alta Quota, di termodinamica e idrodinamica e passaggio di onde piane del suono nell'aria. Nel '61 raggiunge una funzione molto importante ossia il presidente e direttore della divisione Ann Arbor del Conductron. È membro di numerose società come per esempio l'American Physical, l'American Institute of Physics, American Mathematical e Sigma Xi. Associato della Fellow of the Institute of Aeronautical Sciences, un membro della USAF Scientific Advisory Board, e un consulente dell'Advanced Research Projects Agency e di altre importanti società. Inoltre è membro di comitati editoriali come il Journal of Research of the National Bureau of Standards e il Journal of Mathematical Physics.

È il fondatore della Conductron Corporation, che si occupa delle più importanti esplorazioni commerciali sull'olografia e viene fondata nel 1960. Non si occupa solo di ingegneria, ma anche di imprenditorialità, nel 1948 decide di trasferirsi ad Ann Arbor e di entrare nell'Upper Atmospheric Physics Group, che in quel periodo è parte del Michigan Aeronautical Research Center (MARC) dove dirige un gruppo di ricercatori dal 1949 al 1953. Negli anni '50 a fronte dell'espansione del WRL il gruppo cresce, muta e cambia sede. Al termine di questi anni entra nel Dipartimento di Ingegneria Elettrica e viene riorganizzato come Willow Run Radiation Laboratory. Siegel dirige il laboratorio in maniera autorevole e carismatica, continua a dirigere il laboratorio per un anno nonostante la presidenza di Conductron.

Siegel fonda sia Conductron che due ulteriori società ad Ann Arbor, KMS Industries e KMS Fusion. Nei primi anni di Conductron, la maggior parte dei dipendenti del Radiation Laboratory si trasferisce e il numero diminuisce soprattutto negli anni '60. Nel '67 Siegel si dimette, dopo delle divergenze sui piani di espansione, con Jim McDonnell Douglas e altri dipendenti che decidono di formare con lui KMS Industries, inoltre fondano la KMS Fusion per produrre la fusione del laser e impiegarla come fonte di energia, con il contributo di innumerevoli conoscenze attira il personale di Willow Run, Conductron e KMS Industries.

Una produzione fondamentale della società è quella dei processori ottici per radar ad apertura sintetica, attività che viene sponsorizzata presso il Radar and Optics Laboratory di Willow Run, infatti di due creatori di elaborazione ottica Willow Run SAR, Louis J. Cutrona e Weston E. Vivian i fondatori del Radar Laboratory si uniscono nel 1961 per revisionare i contratti.

La Conductron Corporation all'inizio degli anni '60 si occupa di olografia, sempre con l'utilizzo di radar ad apertura sintetica. Questo è incentivato da Gary Cochran laureato in fisica e impiegato part-time al Willow Run sempre durante quegli anni insieme ad Arthur Ingalls ex ingegnere di produzione ottica al WRL che sono assunti per collaborare sul processo ottico SAR. Leggono le scoperte di Leith e Upatnieks sulla ricostruzione del fronte d'onda e li collegano al lavoro SAR, in quel momento si fanno passi in avanti con l'olografia poiché i ricercatori si servono di ottiche di precisione, piattaforme stabili, specchi di precisione e laser HeNe. Tutto questo grazie a Siegel che è un sostenitore, interessato a portare avanti la tecnologia come strumento di investimento supportato dalla fede per il progresso.

La Conductron si prefissa l'obiettivo di sviluppare degli ologrammi sempre più definiti, Cochran all'inizio del 1965 realizza degli ologrammi di maggiori dimensioni e viene supportato da Siegel che gli lascia carta bianca, le indagini che vengono sviluppate in questo periodo sono soprattutto a livello di visualizzazione. La maggior parte delle immagini olografiche che producono sono destinate per l'uso commerciale, in esposizioni fieristiche e illuminati con lampade al mercurio filtrate, mentre altre non vengono esposte. Nonostante nel 1966 la Conductron viene venduta a McDonnell Douglas, consente a Siegel e la sua squadra di perseguire gli obiettivi sul miglioramento in campo olografico. Uno degli obiettivi è quello di incrementare l'olografia come mezzo per la registrazione di eventi, per esempio a livello televisivo e di realizzare un film olografico dei giochi olimpici, inizialmente gli aspiranti partner della McDonnell Douglas Corporation si mostrano scettici per la fattibilità. Per eliminare qualsiasi tipo di incertezza, registrano dozzine di fotogrammi olografici di un oggetto con un movimento ciclico, ossia un modello di giostra, producendo un film animato in 3D, per creare ciò modificano un proiettore commerciale in modo da creare la sorgente laser stroboscopica, con l'aggiunta di un otturatore per illuminare ciascun fotogramma, si pensa di creare ottiche di ingrandimento per conferire una percezione realistica variabile, le recensioni dei telespettatori sono positive e questo alimenta il desiderio dei ricercatori della Conductron a portare avanti degli esperimenti con macchinari sempre più complessi, giungono alla conclusione dell'acquisto di un laser pulsato per la registrazione degli oggetti in movimento. Si verificano due sfide ardue: la prima è quella di sviluppare un laser con un'adeguata coerenza ottica, i primi laser a rubino purtroppo limitano la

percezione della profondità della scena a causa della riflessione delle parti più profonde con la luce non coerentemente associata al raggio di riferimento, mentre la seconda sfida riguarda la disponibilità dei materiali che nella maggior parte dei casi sono poco sensibili alla colorazione rossa del rubino che genera dei brevi impulsi rispetto all'illuminazione continua a bassa potenza. Le previsioni fiduciose di Siegel vengono successivamente riportate da Cross riguardante gli sviluppi della registrazione di scene animate, ologrammi a colori naturali e prospettive per la televisione e film tridimensionali, inoltre prevede la realizzazione dell'uso di ologrammi sui vetri delle finestre dei grattacieli per rappresentare delle immagini di enormi dimensioni per intrattenere le persone all'interno.

Siegel dopo aver aperto sempre ad Ann Arbor KMS Industries cerca dei ricercatori per comporre un team, cerca di coinvolgere Emmett Leith, subito dopo entra a far parte dell'azienda Lloyd Cross e anche Gary Cochran lo segue a ruota e diventa manager dei progetti di ottica, mentre Cross assume il ruolo di esperto laser, porta avanti le ricerche in questo ambito che gli permette di produrre un laser pulsato e inizia ad esplorare l'olografia sia nel laboratorio aziendale che a casa.

Intorno agli anni '65 del '900 si verifica un calo dell'interesse nei riguardi dell'olografia, infatti c'è una diminuzione delle vendite e vengono colpite sia Conductron che KMS. Negli anni successivi le previsioni di Siegel si verificano e l'olografia viene sviluppata con delle strumentazioni sempre più potenti e ricercate.

### **1.2.13 McDonnell Douglas**

McDonnell Douglas acquista nel 1966 Conductron e diventa una filiale, infatti la maggior parte delle azioni di quest'ultima sono utilizzate per acquistare la McDonnell Electronics Corporation, che si occupa della produzione di simulatori aerei e veicoli spaziali per l'equipaggio Mercury e Gemini. Dopo la proposta di Siegel per la produzione di film olografici, gli ingegneri realizzano la possibilità di incrementare l'utilizzo di laser pulsati per favorire la produzione di questa tipologia di film per registrare oggetti in movimento, ma allo stesso tempo anche persone. Nel 1966 entra Larry Sierbert che nonostante le sue scoperte su questo tipo di laser e nonostante i risultati raggiunti l'anno successivo questo non garantisce ancora la produzione dei film. In questo periodo si occupano della produzione di un ologramma raffigurante una mano con un gioiello per la vetrina di Cartier sulla Fifth Avenue di New York. La sezione di marketing entusiasta percepisce il potenziale della tecnica e produce la pubblicità per

favorire la ricerca delle applicazioni. Organizzano ologrammi di un gruppo di dieci membri dello staff Conductron, la scena di gioco del poker e altri prodotti commerciali per evidenziare quale sia il potenziale dell'olografia pulsata, collaborano molti artisti come Bruce Nauman e Salvador Dalì. Nel 1970 si decide di trasferire i laboratori di olografia ad Ann Arbor, dove il team di McDonnell Douglas produce ologrammi per numerosi clienti, il tutto dura tre anni quando si valuta di bloccare il tutto perché il mercato non è ancora pronto per la diffusione degli ologrammi pulsati, ma soprattutto si scopre che l'elaborazione chimica delle lastre fotografiche è inappropriata per l'analisi ingegneristica in tempo reale, infatti tra il 1965 e 1973 tutto ciò che promuovono ossia riflessione, trasmissione, piano dell'immagine e ologrammi pulsati non lascia traccia. Nel frattempo Conductron inizia a produrre un numero spropositato di ologrammi che riproducono calchi in gesso di organi anatomici, squali, modelli di aerei, quest'azienda riesce ad ottenere del materiale consistente, proseguendo con applicazioni pubblicitarie creando display di prodotti, questa strategia attira la McDonnell Douglas che come precedentemente citato acquista l'azienda nel 1966.



Figura 12\_ Esempi di ologrammi riflessi, prodotti all'interno della Conductron ma successivamente di proprietà della McDonnell Douglas, (Hologram, <https://hologram.se/historic-holograms-by-mcdonnell-douglas/>)

Successivamente Siegel e Jim McDonnell non essendo d'accordo su alcune decisioni future, questo causa l'abbandono di Siegel e la fondazione della KMS Industries, che porta via anche numerosi dipendenti.

Uno dei clienti più importanti della Conductron è il Kingsport Press che si trova in Tennessee, si tratta di coloro che si occupano di stampare le riviste di National Geographic Magazine e World Book Encyclopedia, nel 1966 pensano di introdurre un ologramma nella copertina. Il progetto include una produzione di un ologramma principale per realizzarne cinquecento mila copie, illuminata da qualsiasi fonte di luce bianca e filtrata attraverso una colorazione rossa in dotazione. Ingegneri e tecnici adattano lo stile sperimentale per la produzione su larga scala, inoltre sviluppano soluzioni di copia a contatto cercando di adattare apparecchiature fotografiche commerciali e servendosi di due laser HeNe come fonte di luce e optano per la pellicola Agfa, escludendo quella Kodak. Nel 1984 producono l'ologramma dell'aquila con l'articolo dal nome Lasers a splendid Light for Man's Use, mentre nel 1985 crea un ulteriore ologramma del teschio in rilievo che si chiama Search for Early Man, si tratta del teschio di un bambino Africano Taung di due milioni di anni.

Mentre nel 1988 produce l'ultima copertina olografica, dove viene raffigurata una doppia immagine di una Terra che esplose, con delle scritte tridimensionali lungo il dorso e una pubblicità olografica di McDonald's sul retro, come ultimo progetto risulta essere molto dispendioso, rispetto ai precedenti.

#### **1.2.14 Louis J. Cutrona**

Nasce nel 1915, lavora per Bell Telephone Laboratories, la Federal Telecommunications Corporation e la Sperry Gyroscope Company e successivamente viene nominato professore di Ingegneria Elettrica ed entra a far parte del Willow Run nel 1949. Nel 1953 fonda insieme a Weston E. Vivian che entra a far parte di Willow Run nel 1951, il Radar Laboratory nel 1953 che è supportato finanziariamente dal Progetto Michigan avviato nel 1954 come fase di un programma di ricerca della marina militare, dell'aeronautica e dell'esercito e viene finanziato fino alle fine degli anni '60, successivamente entra a far parte del laboratorio Emmett Leith, che precedentemente si occupa presso il Willow Run di ricerca nel 1952 sullo studio preliminare dell'elaborazione ottica dei dati radar. Questa ricerca è portata avanti da ingegneri elettrici, questo lavoro all'inizio risulta difficile poiché non si ha un gergo comune e diventa complesso comunicare i vari risultati ottenuti. Cutrona e Vivian a seguito di un diverbio con Russell Varian a cui si deve la creazione del radar Klystron, riflettono sulla possibilità di generare delle immagini ad alta risoluzione dai dati SAR con

l'elaborazione ottica, fin da subito sembra fattibile per la somiglianza formale tra matematica dell'analisi SAR e matematica dei sistemi ottici. La peculiarità di questa sistema è la generazione della lente posizionata in un determinato modo della trasformazione di Fourier di un'immagine su un altro piano, inoltre la trasformazione ottica al contrario dei sistemi elettronici e dei computer digitali è istantanea.

Durante gli studi di Leith e Len Porcello si dedicano all'approfondimento delle proprietà di radiazione coerente e non coerente nel cross-correlatore ottico, inoltre portano avanti una discussione sull'ottica fisica classica. Cutrona si interessa al lavoro e pensa ad una connessione con la teoria della comunicazione, raccontando ai due ricercatori di un documento presentato durante la conferenza annuale sul radar, tenuto da Ed O' Neill dove nel suo ragionamento preme sull'idea di collegare l'ottica alla teoria della comunicazione, da quel momento iniziano a sviluppare le tecniche all'interno della struttura di Fourier. Nell'associazione di ottica e radar, chi si occupa di radar non può occuparsi di ottica e viceversa, semplicemente si può lavorare in entrambi ma si possono pubblicare gli articoli solo in un settore, in ogni caso l'ottica viene riconosciuta come metodo elegante e fattibile in campo di tecnologia radar, a fronte di queste conferme Willow Run Optics e Radar Laboratory continuano a portare avanti le ricerche e questo garantisce dei risultati soddisfacenti.

Cutrona è un personaggio molto importante perché parte dall'essere ideatore e supervisore delle ricerche sull'elaborazione ottica WRL ad assumere il ruolo di co-fondatore della Conductron, inoltre scrive un promemoria interno per elencare tutte le soluzioni tecniche per i processori radar ottici che hanno la stessa finalità dell'utilizzo di una funzione fuori asse per la registrazione di un ologramma. Riesce a sostenere queste dichiarazioni per merito di Gary Cochran, il manager del lavoro ottico di Conductron che intorno al 1964 si accinge con entusiasmo alla ricerca olografica.

Nel 1962 Fred B. Llewellyn subentra come direttore del Willow Run Laboratory al posto di Lou Cutrona, infatti in questo periodo a causa del diverbio tra Siegel e Jim McDonnell, viene creata un'altra azienda dal nome KMS Industries fondata dai vecchi ricercatori del Willow Run tra cui Cutrona.

### 1.2.15 Gary Cochran

Nel 1962 Gary Cochran è il manager del lavoro ottico di Conduccion, avvia una ricerca intraprendente nel 1964 sull'olografia, i suoi studi partono dalla lettura dell'articolo sull'olografia di Emmett Leith e Juris Upatnieks che in quel periodo non ha nessun titolo e lavora Louis J. Cutrona.

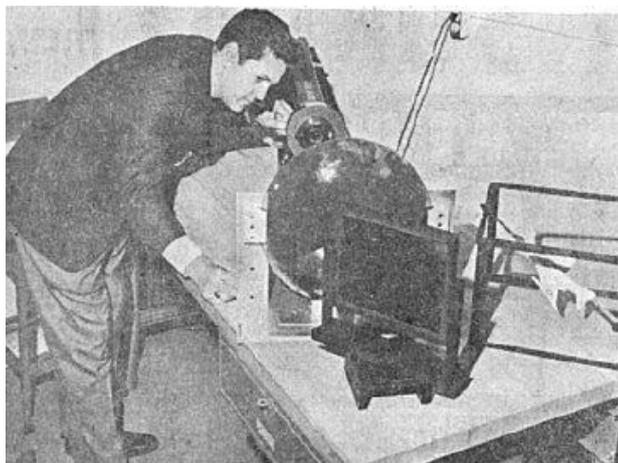


Figura 13\_ Cochran alla Conduccion Corp, 1967, (Research Gate, [https://www.researchgate.net/publication/235222632\\_Explosion\\_with\\_a\\_slow-burning\\_fuse\\_Origins\\_of\\_holography\\_in\\_Ann\\_Arbor\\_Michigan/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/235222632_Explosion_with_a_slow-burning_fuse_Origins_of_holography_in_Ann_Arbor_Michigan/figures?lo=1))

Cochran inizia fin da subito a portare avanti i suoi studi, creando degli ologrammi di dimensioni sempre più maggiori all'inizio del 1965, Siegel gli dà piena fiducia e questo gli permette di avere maggiore sostegno economico per l'acquisto delle attrezzature e dei materiali, nel suo team lavorano numerosi esperti in questo campo come Carleton E. Thomas, Richard Zech specializzato in olografia a colori e a riflessione, Craig Dwyer che si occupa di emulsioni olografiche e chimica sbiancante ed infine Larry Siebert che è esperto in olografia pulsata. Le loro indagini mirano a risolvere tutti i problemi che si sono verificati durante quegli anni per migliorare il prodotto olografico. Alla fine degli anni '60 Cochran e altri entrano a far parte della nuova società fondata da Siegel la KMS Industries, con il ruolo di manager di progetti di ottica, il team si compone anche della presenza di Leith, Cross e Lou Cutrona.

Nel 1967 il team registra un grande ologramma cilindrico di 30 cm di diametro raffigurante una statua di Buddha, questo viene mostrato a numerosi investitori ma non pubblicamente o agli scienziati e inoltre non c'è alcuna documentazione. Queste varianti a 360 gradi non sono commercialmente utili, a causa delle dimensioni, ma anche a causa dell'esposizione poiché richiedono una speciale

disposizione della fonte di illuminazione e soprattutto c'è il problema dell'ingombro. Gli olografi iniziano a sperimentare altri campi commerciali, tra il 1967 e 1969 esaminano una varietà molto più ampia di tecnologie avanzate, che non riguardano l'olografia di visualizzazione. Carleton e Cochran progettano un sistema di sicurezza con il riconoscimento delle impronte digitali basato sul legame ottico, ma purtroppo questi prodotti non sono apprezzati per la paura di posizionare le mani all'interno di un foro per il rilevamento dell'impronta. Dopo una serie di prodotti poco considerati dagli acquirenti, il team non è più motivato, proprio per questo motivo la maggior parte di loro, incluso Cochran cercano delle strade alternative in campo ingegneristico e lui successivamente decide di occuparsi di elettronica automobilistica.

### **1.2.16 Stephen A. Benton**

Nasce a San Francisco nel 1941, ma cresce a Santa Barbara in California, si diploma alla Santa Barbara High School nel 1959. Consegue la laurea come ingegnere elettrico al MIT nel 1963, subito dopo lavora con il Professore Harold Edgerton nel Strobe Lab e porta a termine un dottorato in fisica applicata presso l'università di Harvard e continua come assistente professore di fisica ottica applicata fino al 1973, durante questi anni ha la possibilità di conoscere il cofondatore di Polaroid Corporation ossia Edwin H. Land, nonché inventore della fotografia istantanea e ne diventa impiegato part-time. Durante la sua permanenza presso l'università di Harvard effettua gli studi e si sta occupando simultaneamente di due ricerche: la prima si tratta dello studio sulla riduzione delle informazioni che potrebbe permettere la trasmissione elettronica di un ologramma e in un qualche modo concedere la trasmissione tramite televisione o video in 3D, mentre la seconda ricerca riguarda gli ologrammi su piano dell'immagine.

In questi anni gli Leith giunge alla conclusione nel 1964 che la larghezza di banda richiesta per la televisione olografica è maggiore rispetto all'intero spettro radio. Mentre un altro personaggio di nome, Dominick. J. De Bitetto che fa parte della Philips Laboratories di New York propone ologrammi a striscia per produrre il contenuto informativo., riconosce durante i suoi studi che la parallasse verticale è di scarsa importanza, perché la percezione degli occhi umani si trova su un piano orizzontale, di conseguenza suggerisce di registrare un primo ologramma su una fascia orizzontale molto stretta, si tratta di una versione eccezionale dei primi ologrammi di Leith e Upatnieks su un piano spettroscopico lungo e stretto, il risultato restituisce bene l'intero campo visivo, l'intera scena può essere

osservata senza movimento da parte dell'osservatore, al contrario di uno stretto ologramma a fessura. Mentre per il video olografico prova a registrare e trasmettere l'ologramma a strisce, attraverso questo sintetizzarne un altro multistriscia simile all'estremità ricevente. L'articolo di Bitetto in seguito alle sue scoperte viene pubblicato nel 1968 e sempre in quell'anno Benton incuriosito dalle scoperte portate avanti riprende un'idea simile. La variazione che effettua rispetto a Bitetto è quella di non sintetizzare un nuovo ologramma, ma prova a condurre un arrangiamento ottico e ottiene lo stesso risultato in un'unica registrazione. Si serve di uno specchio a striscia orizzontale stretta per contenere la parallasse verticale, posiziona in raggio di riferimento in alto con lo scopo di colpire l'ologramma dall'alto invece che lateralmente come era la prassi. In questo modo sviluppa la ricostruzione dell'immagine grazie alla fonte di luce bianca. L'ologramma agisce come prisma, disperdendo la luce di differenti colori lungo un arco verticale. È in questo modo che sviluppa la sua prima grande invenzione è la creazione dell'ologramma nel 1968 il White Light Transmission Rainbow conosciuto anche come Benton Hologram, ossia gli ologrammi che si vedono sulle copertine delle riviste o specialmente sulle carte di credito, il primo viene chiamato Motivo 1 e viene presentato su una lastra dimensione di 4 e 5 pollici per lato, la rappresentazione consiste in tre pezzi di scacchi illuminati da un'unica lampadina bianca.



Figura 14\_ brevetto Polaroid ologramma arcobaleno, (Jonathan Ross, Hologram Collection, <http://www.jrholocollection.com/collection/benton.html>)



Figura 15\_ sistema di sicurezza per carte di credito, (Radiant Vision Systems, <https://www.radiantvisionsystems.com/blog/beam-me-scotty-new-developments-hologram-technology>)

La peculiarità di questo ologramma è la sua percezione dello spettatore nella normale luce bianca al contrario del laser, questa nuova scoperta permette di portare l'olografia fuori dal laboratorio, che sacrifica la parallasse verticale dell'immagine a causa della colorazione spettrale dell'arcobaleno che viene proiettata nello spazio visivo dello spettatore, ossia l'immagine reale dell'ologramma principale quando l'ologramma viene sistemato nella posizione prevista, donandole profondità e brillantezza. La sua invenzione viene presentata alla società di ottica della California sempre nello stesso anno dell'invenzione. Ci dà un'innovazione quasi paragonabile alle invenzioni Fuori Asse di Denisjuk e Leith Upatnieks. Nel 1969 descrive per la prima volta pubblicamente la nuova tecnica per ridurre il contenuto informativo di un ologramma durante la conferenza annuale organizzata dalla Optical Society of America di Chicago. Diffonde un forte interesse nell'ambito artistico e non solo, poiché queste rappresentazioni sono molto semplici da riprodurre. Inoltre la sua invenzione è molto importante perché genera la produzione in serie di ologrammi utilizzando una tecnica di goffratura, legata alla tecnica sperimentata da Michael Foster nel 1974 e nel 1979 ne viene garantita la fattibilità commerciale da Steve McGrew. Benton durante la sua carriera universitaria partecipa a numerose iniziative organizzate dal suo ateneo ed entra a far parte del laboratorio di ricerca della Polaroid Corporation, dove successivamente alla sua esperienza è nominato capo ricercatore, diviene affiliato al Center for Advanced Visual Studies (CAVS) del MIT nel 1977, ed entra a far parte del team di artisti, scienziati e ingegneri che precedentemente collaborano con l'ex direttore del CAVS Otto Piene al progetto Centerbeam, che produce un laser a vapore su larga scala, laser e progetto ottico. Nel 1982 entra a far parte della facoltà del MIT con lo scopo di diventare un membro fondatore del Media Laboratory e soprattutto per fondare un percorso di insegnamento e ricerca per l'imaging tridimensionale applicato all'interfaccia uomo/computer, partecipa al primo sistema video olografico al mondo. La ricerca consiste nella collaborazione di tecnologie olografiche e informatiche che porta alla luce Alcove Holograms e Ultragrams è un prototipo di laboratorio dove le immagini olografiche elettroniche vengono computerizzate e mostrate in tempo reale tramite un modulatore opto-acustico e un ulteriore sistema di specchi girevoli. Inoltre contribuisce al progresso della tecnologia olografica integrata nei dispositivi dell'imaging medico come scanner CT e MRI. Ottiene durante la sua carriera quattordici brevetti e una moltitudine di premi. Intorno al 1988 brevetta metodi e dispositivi per la proiezione e la registrazione di stereogrammi olografici, utilizza il cosiddetto sistema "alcova" di forma semicilindrica davanti al quale viene proiettata un'immagine, in questo modo lo spettatore ha una visione molto più ampia dell'immagine proiettata, rispetto alle possibilità dell'ologramma tradizionale,

inoltre con i suoi studenti ottimizza la produzione di ologrammi pseudocolori, collaudata nel 1989, questo garantisce la produzione di progetti tridimensionali prodotti dal computer. L'aspetto che contraddistingue Benton dai suoi colleghi è anche la sua propensione arte, lui pensa all'olografia come un incontro tra arte, scienza e tecnologia. Produce numerosi lavori che vengono esposti in mostra al Brigham and Women's Hospital in particolare un'opera di nome Digital Hologram. Le sue opere in gran parte sono pubblicate al Museum of Holography in Mercer Street a Manhattan, dove il MIT possiede l'intera collezione di ologrammi di Benton, perché il museo di Olografia chiude nel 1992. Nel 1995 gli si riconosce il premio Vinci of Excellence del concorso internazionale Science for Art. Viene riconosciuto come leggenda vivente nel campo dell'olografia moderna.

### **1.2.17 Lloyd Cross**

Nasce in Michigan nella cittadina di Flint, frequenta il college e diventa in giovane età un membro importante dei team che si occupano e sviluppano tecnologie innovative durante gli anni '60, è una figura fondamentale per le attività svolte ad Ann Arbor. Nel 1965 vede il primo ologramma nel Willow Run Michigan, un laboratorio organizzato all'interno di un impianto di bombardieri dismesso, in questo centro di ricerca si portano avanti le sperimentazioni riguardanti i radar e ottica a infrarossi per la sorveglianza sul Campo di Battaglia a livello militare, direttamente dal professore Chihiro Kikuchi che per primo dimostra l'azione del maser in un cristallo di rubino nel 1957. Tre anni dopo l'invenzione sulla ricostruzione della realtà con raggio di luce concentrato, Cross inventa il primo ologramma in movimento attraverso la collaborazione investigativa sul laser, questo lo porta a co-fondare Trion Instruments, che si tratta di una delle prime aziende per la produzione di laser a livello commerciale sia per uso che per la ricerca. Si tratta di uno dei pionieri delle tecnologie per gli spettacoli di luci laser, il primo si tiene a New York alla fine degli anni 60. Emancipa l'olografia e ne rifiuta l'utilizzo a puro scopo militare o commerciale, lavora con numerosi artisti durante la fase culminante della nuova tecnologia e allo stesso tempo si allontana dal mondo degli affari in modo da creare dei prodotti accessibili a tutti. Poiché il problema è il supporto di queste tecnologie, come per esempio letti l'acciaio molto dispendiosi e ingombranti, di conseguenza in collaborazione con Gerry Pethick sviluppano un design semplice a "Scatola di sabbia" ossia una grande scatola di legno piena di sabbia su camere d'aria, andando a creare una piattaforma economica e versatile, con lo scopo di permettere il suo galleggiamento, crea un supporto semplice ed economico, i

componenti ottici sono stabilizzati utilizzando tubi idraulici in PVC inseriti nella sabbia, rendendolo accessibile agli artisti.

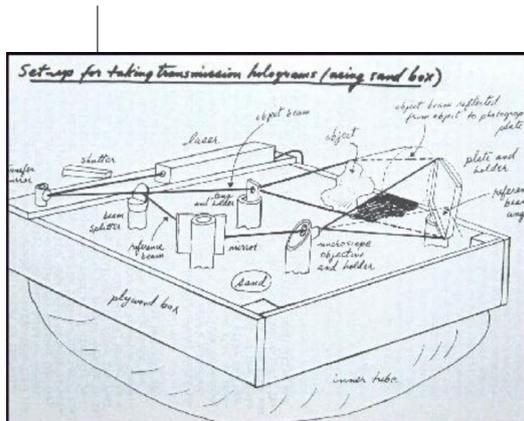


Figura 16\_ disegno "Scatola di Sabbia", (Journal of physics, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/415/1/012070/pdf>)

Figura 17\_ esempio di Scatola di Sabbia all'Evergreen State College Olympia Washington, USA, (Journal of physics, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/415/1/012070/pdf>)

---

Nel 1973 viene realizzato il "Rainbow Spaceman" un ologramma a trasmissione di luce bianca prodotto da Gerry Pethick sul tavolo precedentemente citato. La produzione di progetti gli permette la fondazione della School of Holography a San Francisco nel 1971 in un vecchio magazzino, ideatore degli spazi hacker, la scuola permette e porta avanti quest'idea di democratizzazione dei materiali, aspetto molto importante per lui. questo permette a numerosi studiosi e scienziati di immergersi in questa nuova esperienza degli ologrammi. Inoltre nel 1969 allestisce la prima mostra di ologrammi alla Cranbrook Academy of Art, con una ricostruzione Love di Robert Indiana del 1967. Nel 1972 con il supporto di alcuni cineasti della Bay Area inventa una tecnica per creare degli ologrammi chiamati "multiplex" da questa collaborazione nasce la Multiplex Company. Questi ologrammi integrali permettono la creazione di immagini tridimensionali in movimento da bobine di film per mezzo della combinazione della luce bianca con la cinematografia convenzionale. Sempre grazie alla collaborazione con gli artisti il batterista jazz e olografo sudafricano Selwyn Lissack informa il suo amico Salvador Dalí (per tutta la vita attratto da nuove scoperte) e insieme decidono di creare un ologramma multiplex rotante di altezza dodici pollici della rock star Alice Cooper che indossa una tiara di diamanti e tiene in mano una statua della Venere di Milo, un cervello di gesso con all'interno un éclair al cioccolato e formiche sospese dietro la sua testa, Cross produce un ologramma

vero e proprio a San Francisco e in quell'anno, Dalì dà all'olografia un maggiore riconoscimento esponendo i suoi disegni olografici alla Knoedler Gallery di New York.

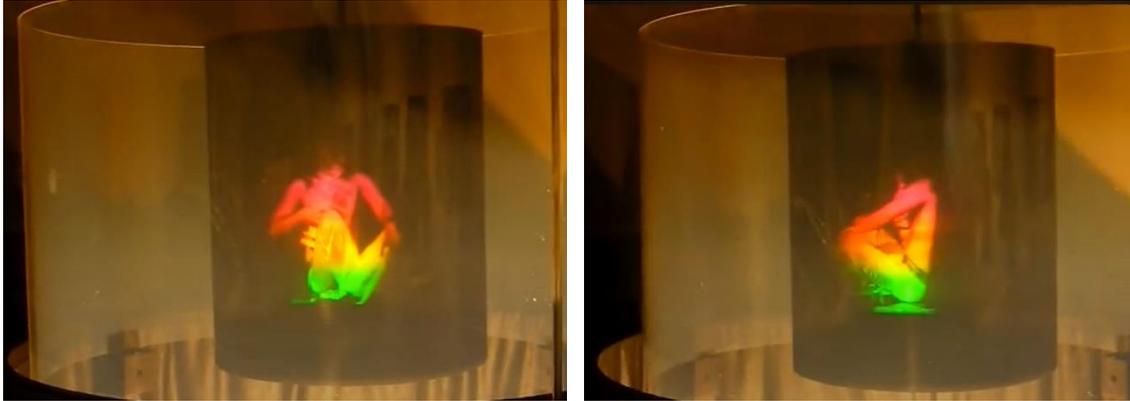


Figura 18\_ ologramma realizzato da Lloyd Cross, commissionato da Salvador Dalì di Alice Cooper, ([https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=XY5h\\_sGpGls](https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=XY5h_sGpGls))

---

Gene Youngblood conclude nel 1970 il libro dal nome *Expanded Cinema*, dove dedica il settimo capitolo interamente all'olografia nel settore del cinema, definendola come mezzo del futuro: «un processo di divenire, l'impulso storico in corso dell'uomo a manifestare la sua coscienza fuori dalla sua mente, davanti ai suoi occhi»<sup>12</sup>, l'olografia sembra manifestare un nuovo tipo di spazio corporeo e pittorico, modalità di comunicazione punto di unione un'umanità globale in una nuova comunità sensoriale. A causa della loro complessità tecnica della carenza di un formato standard, viene messo da parte dalla storia dell'arte per servire solamente come via di fuga da quella che è la dimensione reale per rifugiarsi in un'immaginazione surrogata del futuro. Dopo lo scalpore creato attraverso la comparsa della principessa Leila in *Guerre Stellari* rappresentazione del vero ologramma, ma purtroppo pura invenzione cinematografica, gli ologrammi iniziano ad apparire sulle carte di credito e riviste dopo l'invenzione dell'ologramma arcobaleno di Benton, successivamente sono stati utilizzati per il fine utilitario e la registrazione di informazioni, imaging medico e la mappatura dei campi di battaglia come sopraccitato.

---

<sup>12</sup> Youngblood. G., *EXPANDED CINEMA*, P. Dutton & Co., Inc., New York 1970

### 1.2.18 Adolf Lohmann

Nasce in Germania nel 1926, fin dall'adolescenza che trascorre a Stade in Germania, si interessa alle teoria dell'elaborazione dei segnali che apprende da un amico di nome Horst Wegener nel periodo della seconda guerra mondiale, al termine proseguono insieme la carriera università presso l'Università di Amburgo, sotto la supervisione del professore Rudolf Fleischmann che tratta di un argomento non consentito ossia fisica nucleare, di conseguenza inizia ad occuparsi della ricerca sui film sottili, Lohmann è incaricato di occuparsi della diffrazione mediante reticoli. Nel 1949 consegue la laurea, nel 1951 un master e successivamente decide di intraprendere il percorso del dottorato in fisica che ottiene nel 1953 sempre con Wegener, successivamente pubblicano un documento che utilizza l'approccio di elaborazione del segnale all'ottica. In quel periodo Dennis Gabor sta sviluppando il microscopio a diffrazione e uno dei fisici che si interessa a questa nuova scoperta è Lohmann, infatti decide di concentrare i propri studi sulla teoria del microscopio di Abbe e sulla comprensione dell'immagine in termini di frequenza spaziale, sostanzialmente effettua la decomposizione di Fourier una minuziosa comprensione della formazione e alterazione dell'immagine, infatti da questa scoperta ne deduce che la teoria dei microscopi di Abbe potrebbe essere generalizzata matematicamente per descrivere qualunque processo ottico, dal campo della teoria della comunicazione all'ottica fisica. Durante il suo percorso universitario lavora per due anni come assistente di ricerca, questo gli permette di essere assunto nello stesso anno del dottorato come professore Associato presso l'Istituto di Fisica dell'Università Tecnica di Braunschweig che si trova in Germania, in quegli anni ha la possibilità di partecipare in prima persona ad una conferenza di Gabor, dove le sue teorie in quel periodo vengono derise, ma Lohmann capisce che sono delle scoperte rivoluzionarie e vuole approfondire il suo lavoro. Di conseguenza prova ad analizzare la ricostruzione del fronte d'onda dal punto di vista della teoria del segnale e ha l'opportunità di confrontarsi direttamente con Gabor durante un viaggio nel 1955, in questo incontro Lohmann gli suggerisce il suo metodo per evitare il problema dell'immagine gemella, infatti insieme ad altri studiosi contribuisce alla definizione della natura e dei problemi del fronte d'onda, è citato nell'articolo del 1962 di Leith e Upatnieks che fanno riferimento al suo lavoro. Il problema è che durante il 1957 il concetto di Gabor viene abbandonato da tutti. La sua strada cambia rotta tra il 1958 e 1959 poiché si sposta dalla Germania e viene assunto come ricercatore ospite presso l'Istituto di ottica all'interno del Royal Institute of Technology di Stoccolma, in Svezia. Dopodiché decide di emigrare negli Stati Uniti e recarsi precisamente in California intorno al 1961 con la figura di consulente presso l'IBM Development Laboratory di

San Jose, avendo un grande successo nel 1963 viene nominato direttore della divisione di elaborazione del segnale ottico dell'IBM Research Laboratory.

Nel 1973 torna in Germania per adempiere l'incarico di professore ordinario e presidente del Dipartimento di ottica applicata presso l'Università di Erlangen, posizione che si conclude con il suo pensionamento avvenuto nel 1992. Successivamente tiene lezioni in varie parti del mondo come l'Università di Valencia, Spagna; INAOE l'Istituto Nazionale di Ricerca in Messico; Università di Tel Aviv in Israele e lavora presso il College of Optics dell'Università dell'Arizona.

Per quanto riguarda la sua carriera da ricercatore, lo porta a sviluppare delle ricerche molto importanti che ricoluzionano la storia degli ologrammi, soprattutto la loro percezione. Il suo interesse più grande per tutta la sua vita sono i fondamenti e le applicazioni dell'ottica fisica, infatti dagli anni 50, si concentra nello sviluppo dell'elaborazione analogica e digitale delle informazioni utilizzando tecniche ottiche, dopo una serie di elaborazioni nel 1955 giunge ad una scoperta molto importante ossia l'olografia a banda laterale singola che permette di sopprimere l'immagine gemella olografica avvicinandosi all'olografia teoricamente come un sistema di comunicazione, è il primo a pubblicizzare la connessione dell'elaborazione del segnale con l'olografia e risolvere il problema dell'immagine gemella di Gabor.

Mentre intorno agli anni 60 giunge ad una scoperta senza precedenti, che lo rende maggiormente famoso, anche se durante gli anni '60 e '70 l'ologramma generato dal computer non riscuote molto successo, questa scoperta genera l'aggiunta di un'onda di riferimento e un'onda oggetto per produrre uno schema marginale, anche in questo caso come nel caso della scoperta di Gabor, i colleghi contemporanei vedono questa scoperta come irrilevante. Lo stesso Gabor ritiene la fabbricazione degli ologrammi sintetici come una mancanza di immaginazione, al contrario il datore di lavoro la pensava diversamente, negli anni '60 Byron Brown, Dieter Paris, Harald Werlich e Lohmann compongono un piccolo dipartimento di elaborazione del segnale ottico, purtroppo l'hardware disponibile in questo periodo è limitante per la generazione degli ologrammi digitali di prova, nei primi mesi di ricerca utilizzano una parte di budget per andare a modificare il computer IBM 7094 per far sì che il centro di calcolo possa utilizzarlo per eseguire delle minime variazioni digitali di Fourier per le loro prime dimostrazioni, questo ologramma viene stampato come una trasparenza in modo da poter essere impiegato per ricostruire otticamente l'immagine, un altro limite sono i plotter che in quel periodo possono stampare solo motivi binari in bianco e nero, nonostante questi limiti riescono a creare dei binari spostando i punti tracciati grazie alla fase di deviazione. Il loro scopo è quello di utilizzare questi bologrammi binari sintetici come elementi ottici generati dai computer

come alterare il profilo di intensità dei raggi laser per creare degli elementi ottici olografici o per l'elaborazione di immagini, a causa del poco interesse gli studi non vengono portati avanti da questo gruppo di ricercatori, ma nel 1969 l'interesse per questo tipo di nuova olografia investe l'Unione Sovietica.

L'Accademia delle scienze dell'USSR avvia un progetto per studiare la realizzabilità della produzione di display olografici tridimensionali che sfruttano la realizzazione di ologrammi generati dal computer. Molti anni dopo il campo dell'ottica nell'informatica diventa sempre più importante e Lohmann ha la possibilità di svolgere un ruolo di primo piano, nonostante nel 1992 dà le dimissioni, comunque rimane sempre operativo nella ricerca, che riguarda le trasformazioni frazionarie, ottica dello spazio delle fasi, super risoluzione, elaborazione ottica temporale, elaborazione ottica con la luce parzialmente coerente e ottica Flatland. Quest'ultima si tratta di una storia fantascientifica del 1884 scritto da Edwin A. Abbott dove descrive accuratamente un mondo Flat ossia piatto, generato solo da due dimensioni dove la società si compone di differenti figure geometriche e la teoria di Lohmann non è altro che l'implementazione ottica di questo racconto.

Negli anni 90 è presidente della Commissione Internazionale per l'ottica ICO e membro del consiglio della società tedesca di Fisica DPG, dell'Accademia Reale Svedese di Ingegneria e dell'Accademia Bavarese delle Scienze. Durante la sua vita riceve numerosi premi, viene nominato Fellow alla fine degli anni 60, è il primo destinatario della Emmett N. Leith Medal nel 2008. Nonché autore di numerosi articoli e possiede numerosi brevetti.

### **1.2.19 Larry Siebert**

Nasce il 3 Maggio a Salina, in Ohio, appoggiato da un professore delle superiori ha l'opportunità di frequentare, prima l'Elim College nell'Indiana, successivamente si iscrive alla Ohio State University dove studia ingegneria elettrica. Ottiene un master all'OSU, ma ritiene che il Michigan non è alla portata della Conductron, di conseguenza decide di rinunciare.

Fa parte del centro di ricerca per i laser pulsati di fine anni '60, lavora presso la Conductron Corporation e collabora insieme al collega Richard Zech che viene assunto precedentemente. Siebert molto interessato dal tema sull'olografia riesce a sviluppare dei progetti impressionanti. Il fondatore della Conductron in quel periodo sta premendo per lo sviluppo dei laser pulsati, si verificano due sfide distinte: la prima riguarda lo sviluppo del laser pulsato con appropriata coerenza ottica. I primi esempi di laser a rubino vengono realizzati con lunghezza di

coerenza di pochi centimetri che limita la profondità della scena, mentre la seconda sfida riguarda la disponibilità di materiali da registrazione, poiché alcuni sono affini al colore intenso del rubino, altri al contrario sono meno sensibili a brevi impulsi. Siebert e Zech iniziano a registrare delle scene che richiedono poca coerenza, creando ologrammi quadrati da due pollici su pellicola di acetato. In particolare modo Siebert si dedica per sei mesi alla trasformazione di un laser rubino Korad, con l'intento di ampliare la lunghezza di coerenza, poiché è in grado solo di produrre un singolo impulso ogni due o tre minuti. In questo laser vengono installati dei bastoncini di rubino con il problema non essere uniformi, di conseguenza questo causa una distorsione dell'immagine e modalità ottiche multiple. Per favorire una maggiore lunghezza di interferenza, l'impulso deve essere limitato ad un singolo modo ottico, quindi Siebert dopo vari ragionamenti e prove decide di aumentare l'alimentazione e fa passare il raggio attraverso una moltitudine di barre di rubino in modo da ampliare la potenza ottica. In circa sei mesi aggiunge due amplificatori ottici, riduce l'apertura del raggio, e frappa degli Etalon Ottici che garantiscono la selezione di una modalità ottica e la misurazione delle caratteristiche spettrali, in questo modo riesce ad allineare il sistema.

Questa modifica gli permette di sintonizzare il laser per generare due o più Joule di energia nell'impulso, sufficiente per illuminare un volume moderato e registrare un ologramma sulle emulsioni olografiche successive come per esempio Kodak e Agfa Gavaert. Uno dei primi ologrammi generati da Siebert è quello della sua mano nel 1967, successivamente crea l'ologramma del suo viso e poi la parte superiore del suo corpo accanto ad un oscilloscopio. Nonostante la scoperta importante gli ologrammi continuano ad essere poco accessibili, di conseguenza rimangono rinchiusi all'interno dei laboratori.

### **1.3 L'arte come promotrice dell'olografia**

#### **1.3.1 Bruce Nauman**

Nasce nel 1941 a Fort Wayne, nel corso della sua carriera contribuisce allo sviluppo e l'utilizzo di media dalle installazioni, video, scultura, performance, fotografia, disegno e suono. È un'artista importante per aver divulgato in campo artistico la nuova tecnologia degli ologrammi. Nel 1968 contatta il programma Art & Technology di LACMA, dove annuncia il suo interesse nel campo dell'olografia, in questo modo ha la possibilità di incontrare l'olografo Larry Siebert che in quel periodo sviluppa degli ologrammi che raffigurano differenti parti del corpo, lavorando con lui realizza due serie di ritratti olografici.



Figura 19\_ primo ologramma di Nauman, (Kooness, Rastelli. E, 2020, <https://www.kooness.com/posts/magazine/new-body-perception-the-case-of-bruce-nauman>)

---

Questo lo porta a lavorare nel 1968 per la Conductron e sulla base di questo lavoro avvia *The First Hologram Series*, intitolando la sua mostra *Making Faces* per la quale realizza undici fotogrammi diversi, mentre nella serie *Second Hologram* con il titolo *Full Figure Poses* nella quale vengono sviluppati dieci ologrammi, ha l'idea di contorcere e allungare dei visi umani per terrorizzare, divertire e distrarre i visitatori. Questo tipo di ologrammi sono proiettati su vetro creando un'immagine tridimensionale dell'artista, tanto da ricreare una strana qualità subacquea che ricorda i film dell'orrore. Nel 1970 Bruce riprende le diapositive ologramma e seleziona cinque immagini in modo da ricavare le serigrafie. Di dimensioni notevoli sono colorate di giallo su bianco e nero, in particolare queste immagini si focalizzano sulla parte inferiore del viso, in particolare sulla bocca. In entrambe le serie Nauman chiude gli occhi, per proteggerli dall'esposizione alla luce laser utilizzata durante il processo di esecuzione, poiché troppo invasiva da infiltrarsi nei primi strati di pelle, andando a conferire una colorazione pallida al viso.

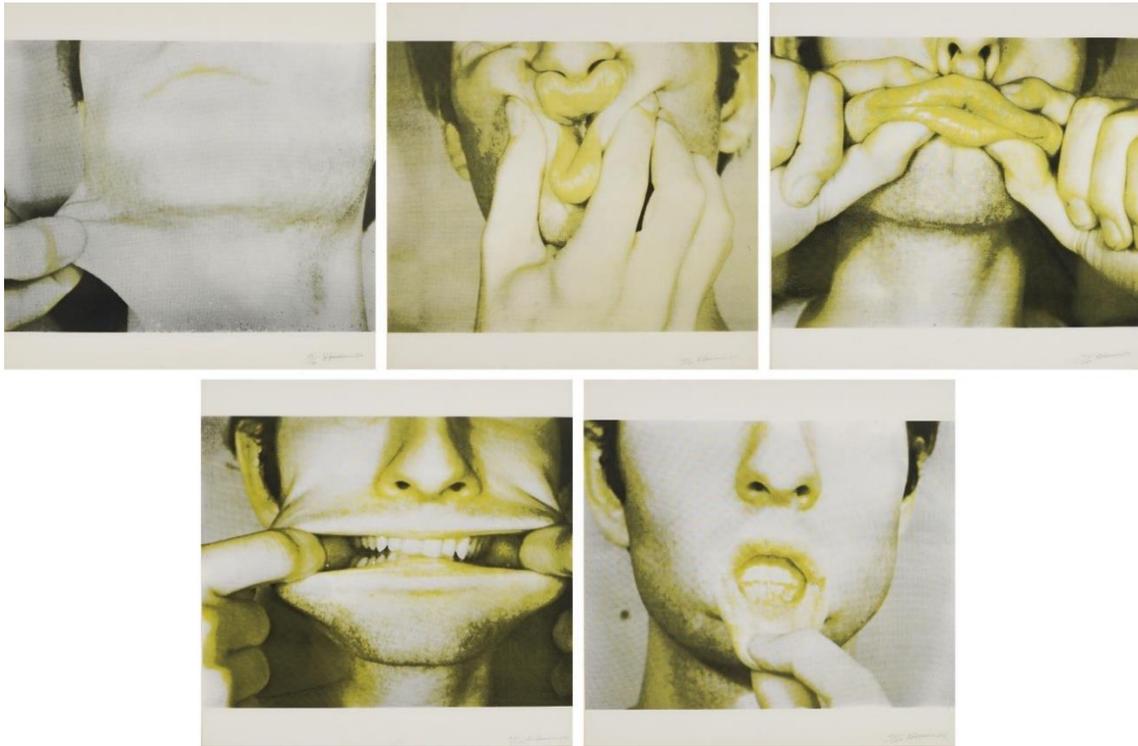


Figura 20\_ studio del 1970 di cinque ologrammi, (Mutual Art, <https://www.mutualart.com/Artwork/Studies-for-Holograms/1D22DD3651620416>)

Gli ologrammi sono mostrati per la prima volta al LACMA dal 1965 al 1972 e successivamente sono riportati alla luce nel 2015 sempre nello stesso museo, per garantirne la visione più accurata il museo ricrea l'angolo esatto e la lunghezza d'onda della luce originale, si tratta di un'installazione molto difficile, proprio per questo motivo presentati solo tre ologrammi. Il problema è l'esposizione, infatti si cerca di trovare un metodo di installazione per la mostra Light, Space, Surface con il titolo Works from the Los Angeles County Museum of Art organizzata da Carol S. Eliel, infatti anche in questo caso riemergono le stesse problematiche e questo fattore implica la ricerca di attrezzature adatte per l'esposizione. Si cerca di rendere il trasporto degli ologrammi il più semplice possibile, di conseguenza per evitare il deterioramento dello strato superficiale delle lastre, si brevetta un modo alternativo per illuminare gli ologrammi, con un laser a diodi da 530 nm. Quando Nauman realizza gli ologrammi nel 1968, i laser e i gas sono molto aggressivi a tratti pericolosi e da maneggiare con cura, infatti successivamente per una maggiore sicurezza vengono prodotti, la lampada ad arco allo xeno e la lampada a vapori di mercurio. Abigail Duckon in collaborazione con l'olografo James Graham sviluppano un nuovo metodo per

l'illuminazione degli ologrammi con il laser a diodi, che si modifica con emissioni di calore molto basse per renderlo sicuro per la visualizzazione. Con questa nuova soluzione le immagini compaiono maggiormente nitide e dettagliate e inoltre l'involucro laser su misura di Graham è facile da trasportare. Di conseguenza soddisfano tutte le richieste e rendono più semplice e sicura l'installazione.

### **1.3.2 Margaret Benyon**

Nasce nel 1940 a Birmingham e con i suoi genitori si trasferisce in Kenya, dove trascorre circa dieci anni della sua infanzia. Studia pittura al Birmingham College of Art per alcuni anni, poi decide di trasferirsi alla Slade School e decide di rimanere oltre un anno post-laurea. È proprio con il suo progetto di dottorato al Royal College of Art che si appassiona al mondo degli ologrammi. Ottiene numerose borse di studio, tra cui Leverhulme Senior Art Fellow, University of Strathclyde negli anni 70 del 900.

Insegna alla Byam Shaw School nel 1965 e come incarichi successivi tra cui tutor in visita all'unità di olografia della Royal College of Art.

Durante la fine degli anni 60 è una pittrice non soddisfatta dell'arte che si sta evolvendo in quel periodo e semplicemente un giorno attraverso la lettura di un giornale, ha l'opportunità di conoscere l'olografia tema ancora non tanto conosciuto in campo artistico, infatti subito riesce a collegare la sua arte a questa nuova tecnologia, poiché la sua arte si occupa di schemi di interferenza, infatti cerca di creare delle immagini che diano la sensazione di profondità.

Decide di contattare Gordon Rogers, che è famoso in Gran Bretagna per l'interesse sull'olografia ma in quel periodo non vuole incontrarla.

Vince nel 1968 una borsa di studio presso l'Università di Nottingham dove il suo lavoro non consiste in molte responsabilità, di conseguenza decide di lavorare di notte in laboratorio e studiare di giorno per portare avanti la tesi. Durante i periodi dove il laboratorio non è disponibile decide di dedicarsi alla ricerca dei dipinti di anaglifi, è così che servendosi delle strutture di laboratorio di base disponibili e avendo una certa conoscenza in campo olografico è in grado di imparare autodidatta l'olografia. Produce il suo primo ologramma costituito da una componente in acciaio lucido del laboratorio su una lastra di dimensioni ridotte. Successivamente sviluppa altri tipi di ologrammi di dimensioni differenti, ha la possibilità di sperimentare differenti laboratori con una moltitudine di attrezzature di vario tipo, questo gli permette di esplorare maggiormente il campo dell'olografia.

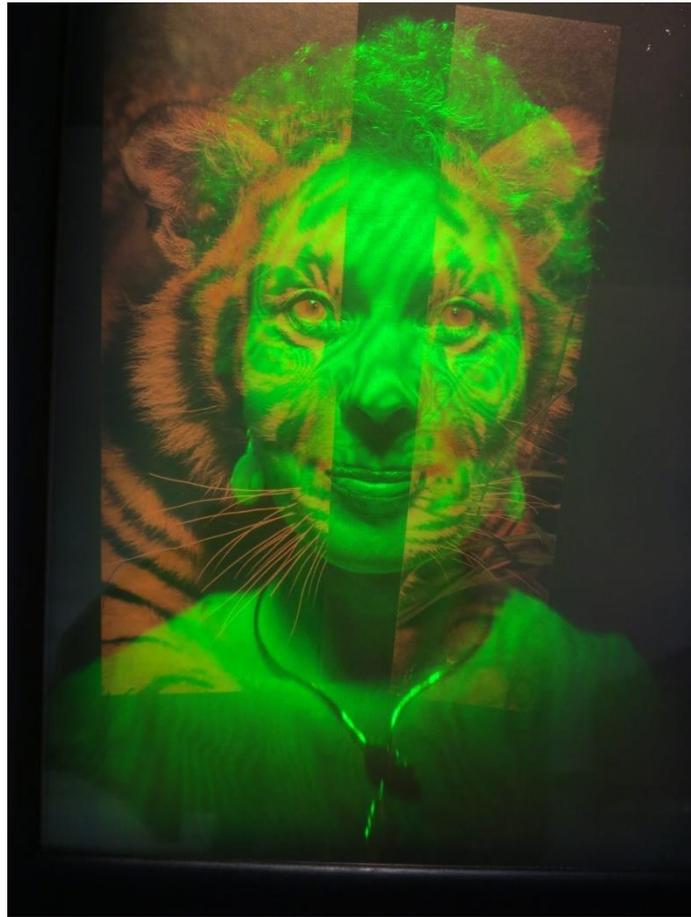


Figura 21\_ Tigirl del 1985, (<https://www.guggenheim.org/blogs/checklist/holography-how-artists-sculpt-with-light-space-and-time>)

---

Per la sua prima mostra decide di sviluppare degli ologrammi di dimensioni maggiori, che realizza nel 1969 A Bristol, con il supporto di Peter Spicer alla British Aircraft Corporation.

Nello stesso anno ha l'opportunità di lavorare nel laboratorio di Tony Ennos presso il National Physical Laboratory (NPL) a Teddington, poiché condividono questa passione per olografia. Durante l'Esposizione Universale del 1970 a Osaka in Giappone, la Gran Bretagna vuole produrre un ologramma, quindi questa nuova arte di Benyon fa un po' sperare nella rappresentazione di una proiezione olografica con lo scopo di rappresentare il paese. Dopo la prima mostra organizzata per Nottingham University Art Gallery nel 1969, le affidano il laboratorio del professore John Butter per lo sviluppo delle proiezioni presso Loughborough University, per questa mostra improvvisa, a causa della disponibilità ridotta di laser e di conseguenza dispone i suoi ologrammi su un

giradischi circolare verticale fatto roteare manualmente dagli spettatori, di conseguenza riesce ad intrattenere il pubblico in modo creativo.

In un'altra stanza, monta cinque ologrammi sempre con una disposizione cilindrica su un giradischi motorizzato orizzontale per permettere agli spettatori di premere un pulsante per avviare la rotazione di un ologramma nel percorso del raggio espando per la visualizzazione. Negli anni successivi predispone un quantitativo maggiore di piattaforme girevoli per mostrare più ologrammi, con l'aiuto di un laser, un arco di mercurio filtrato e una lampada al sodio, in modo da creare delle immagini sfocate di rosso, giallo e verde. Dopo i tre anni a Nottingham, riceve una borsa di studio per conto dell'Università di Strathclyde nel dipartimento di architettura e costruisce un tavolo ottico con l'aiuto dell'ingegnere Bill Fagan.

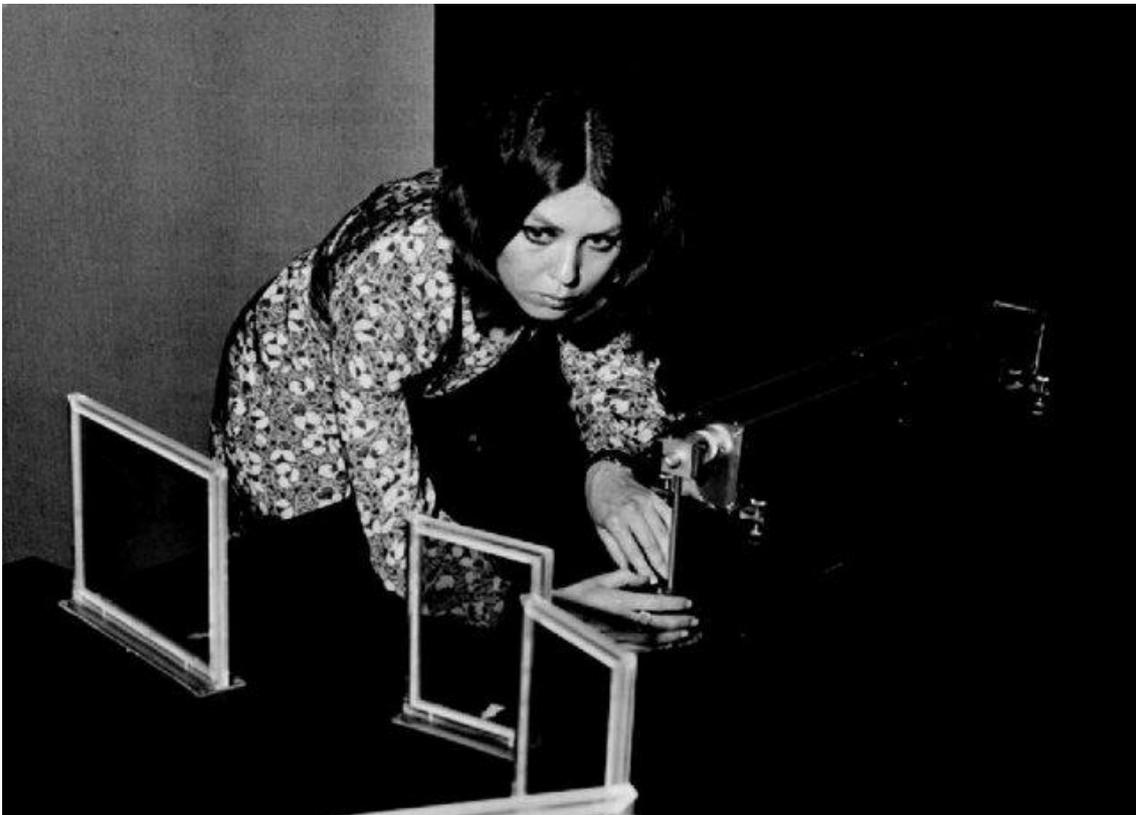


Figura 22\_ la prima esposizione Artistica di Beyond a Nottingham del 1970, (Research Gate, [https://www.researchgate.net/publication/235222634\\_The\\_history\\_of\\_holography\\_multiple\\_visions/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/235222634_The_history_of_holography_multiple_visions/figures?lo=1))

---

Beyond attraversa un periodo difficile poiché le donne in quel periodo sono rare in questo genere di studi, infatti lei si può ritenere la prima donna che si occupa di ologrammi e l'unica a partecipare alla riunione dell'Holography Club di Londra intorno al 1970. Alla fine degli anni '70 decide di trasferirsi in Australia insieme alla famiglia e lavora presso il Dipartimento di Fisica dell'Australian National University (ANU) e nel vicino Royal Military College di Duntroon dal 1979 ottiene i finanziamenti per i laser agli ioni di argon e questo le permette di realizzare una serie di ologrammi con i cadetti, come protesta contro la guerra.

### **1.3.3 Carl Fredrik Reuterswärd**

Nasce nel 1934 in Svezia ma per la maggior parte della sua vita vive in Svizzera, Carl Fredrik Reuterswärd è un artista che si interessa all'ambito olografico, si tratta di uno scultore e pittore che studia con Fernand Léger dal 1951 al 1952 che successivamente ottiene l'impiego di professore di pittura all'Accademia delle Belle Arti di Stoccolma. Anche Reuterswärd diventa professore alla Minneapolis School of Art. Intorno agli anni '70 del 900 provando questo forte interesse per le nuove tecnologie in sperimentazione, crea delle opere olografiche antiche e singolari. Nel 1963 annuncia tramite il New York Herald Tribune la chiusura nell'arco di tempo dal 1963 al 1972 per dedicarsi a all'arte, i laser e l'olografia. Come primo progetto cerca di rappresentare l'opera d'arte Kilroy, presso il Bell's Laboratories nel New Jersey entra in contatto con Billy Klüver che precedentemente dimostra un laser e dopo il loro incontro iniziano una collaborazione per qualche prova di raggi laser.



Figura 23\_ Carl Fredrik Reuterswärd osserva l'ologramma "Whole Kilroy", 1977, (Moderna Museet, <https://www.modernamuseet.se/stockholm/en/event/reutersward-hologram/>)

---

Nel 1963 contatta Per-Ove Stopp in Svezia, che si occupa dell'importazione e vendita di laser in Svezia, di conseguenza coglie nell'immediato l'opportunità di noleggiare una di queste attrezzature. Nils-Robert Nilsson che fa parte dell'Università di Uppsala è uno scienziato che collabora con un artista per creare del materiale laser art. Una delle prime messe in scena di questa creazioni avviene nel 1968 con le decorazioni di scena ricreate attraverso la tecnologia laser, per la scena di Doctor Faust di Ferruccio Busoni che in quegli anni si tiene presso il Teatro dell'Opera di Stoccolma. Alla fine degli anni '60 Reuterswärd organizza un incontro con Nils Abramson che lavora al Royal Institute of Technology di Stoccolma, negli anni precedenti si dedica alla ricerca sui laser e olografia, inoltre si offre di lavorare con Reuterswärd con gli ologrammi di trasmissione generati dal Laser Kilroy che non è una tecnologia molto sviluppata. Con la collaborazione di Hans I. Bjelkhagen, realizza i primi ologrammi di trasmissione fuori asse e successivamente anche ologrammi di riflessione, che registrano all'interno dei laboratori olografici del Royal Institute of Technology e il Lasergruppen Hologvision AB di Stoccolma.

Per dieci anni Kilroy diventa l'opera più importante dell'artista, si tratta di un'opera costituita da nove parti: la mano, il sigillo, il coito, l'osso del cane, il cuore, la scala, l'occhio, il sigillo e la pietra.

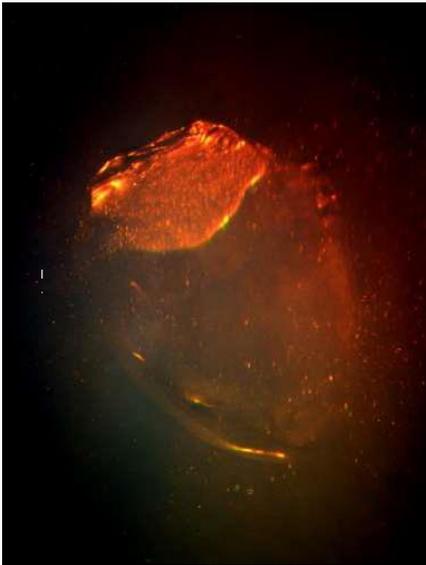


Figura 24\_ ologrammi dell'opera Kilroy rappresentazione del cuore, (Hologram, <https://hologram.se/moderna-museet-kilroysvit-cfr/>)



Figura 25\_ ologrammi dell'opera Kilroy rappresentazione della mano, (Hologram, <https://hologram.se/moderna-museet-kilroysvit-cfr/>)

---

Durante la rappresentazione un laser rosso HeNe illumina in direzione del cuore per creare una macchia rossa e per farlo trafiggere da un raggio laser. Il cuore raffigurato è in bronzo dorato, creato con un modello di argilla di un cuore di cui non si sa l'identità del proprietario a New York, per ricreare l'effetto oro si servono di glitter argento e il laser lo proiettano dopo l'applicazione di questi ultimi, posizionandoli attorno al cuore si cerca di ricreare un effetto di stelle nello spazio. L'opera è prodotta tramite successivamente altri ologrammi sono prodotti in pezzi, come il precedente, al momento l'opera precedentemente citata è conservata al Musée National d'Art Moderne a Parigi. Da queste serie nasce un'altra opera di notevoli dimensioni che si intitola Smoke without Fire o Gateaux Gabor, la cui registrazione viene fatta nel laboratorio delle precedenti opere, ossia LHAB. L'ologramma rappresenta una torta in fiamme e viene realizzato in onore del Premio Nobel del 1971 di Dennis Gabor. In questa registrazione grazie all'interferenza si è visualizzato il calore sopra le candele generando un effetto realistico di fumo tridimensionale sopra la torta, che viene realizzata con del legno e per ricreare la panna montata viene posizionato al di sopra del sigillante silconico di colorazione bianca. Durante la registrazione, le candele vengono accese e la luce emessa da quest'ultima durante il tentativo non appanna la lastra sensibile al verde che viene esposta con la lunghezza d'onda

laser a ioni di Argon. L'accensione viene preceduta dalla copertura di un telo nero che lentamente viene sollevato per evitare delle turbolenze d'aria davanti al piatto.

Nel 1973 riproduce una collezione dal nome Finger Language, si tratta di ologrammi a riflessione e si compone di quattro di questi ultimi in lastre di vetro, vengono registrati dalla mano dipinta d'oro dell'artista servendosi di un rubino pulsato Holobeam laser. Le lastre vengono firmate con un trapano per dentisti.

### **1.3.4 Dieter Jung**

Nasce nel 1941 in Germania precisamente a Bad Wildungen, il suo percorso formativo non è sempre stato artistico, infatti dal 1962 al 1963 studia Teologia, in contemporanea tra il 1962 e il 1964 si forma per diventare insegnante di arte, inoltre fino al 1967 studia Pittura e Arti Grafiche presso la Hochschule für Bildende Künste ossia l'Accademia di Belle Arti di Berlino, accompagnato e seguito da Hann Trier. Dal 1971 al 1974 conclude i suoi studi alla German Film e Television Academy sempre a Berlino e insieme ad altri realizza documentari e film d'animazione. Nel 1975 viene assunto come docente ospite nell'Università Federale di Bahia a Salvador, questo prima di prendere la decisione di iscriversi insieme a due colleghi Dan Schweitzer e Sam Moore alla New York School of Holography nel 1977. Dopo questo periodo di studi lavora per scienziati importanti, che collaborano con lui per la realizzazione delle opere, infatti nel 1977 trova delle piume a Central Park di New York che fluttuano nello spazio e che durante la proiezione olografica assumono le sembianze di oggetti filigranati. Pochi anni dopo intorno al 1985 e 1989, diventa ricercatore all'interno del Center for Advanced Visual Studies (CAVS) del MIT di Cambridge, diventa membro dal 1992 al '96 del Consiglio di Amministrazione dello ZKM I Centro per l'Arte e Tecnologia dei Media a Karlsruhe, anche del Mit Advisory Council on Art-Science-Technology di Cambridge, dal 2011 entra a far parte della György Kepes Society, mentre dal 1990 al 2007 riceve una cattedra in Olografia e Light Art all'Academy of Media Arts di Colonia, per incrementare la partecipazione di artisti e ingegneri mette a disposizione un programma di borse di studio. Le sue opere sono molto famose e la sua notorietà è garantita dal tipo di esposizione all'interno dei musei più conosciuti. Per esempio la mostra Unvisible al Today Art Museum di Beijing nel 2008 e Flying Colors, Moments of Seeing all'OCT Art & Design Gallery di Shenzhen. Questo artista si differenzia per il trattamento delle sue opere, che sono caratterizzate da luce, spazio e movimento, per tutta la sua carriera cerca di perfezionare sempre più gli effetti visivi del colore e della

luce, della superficie e dello spazio dalla metà degli anni '60, l'interesse nei confronti della percezione visiva, la qualità della luce e lo studio, ma allo stesso tempo la composizione della struttura delle immagini inizia a partire dagli studi alla Hochschule für Bildende Künste a Berlino, infatti già dai suoi primi dipinti si possono notare questi studi minuziosi, si occupa soprattutto della rappresentazione della luce e dei riflessi. Per creare questi giochi di luce e movimento, applica sia la tecnica tradizionale ma cerca di fondere anche quella digitale, effettivamente pittura, disegno, incisione e olografia sono legati e in continuo dialogo. Una delle mostre più importanti è *Between and Beyond*, il ZKM, anche in questo caso oltre agli ologrammi, la mostra include dipinti, disegni e stampe.

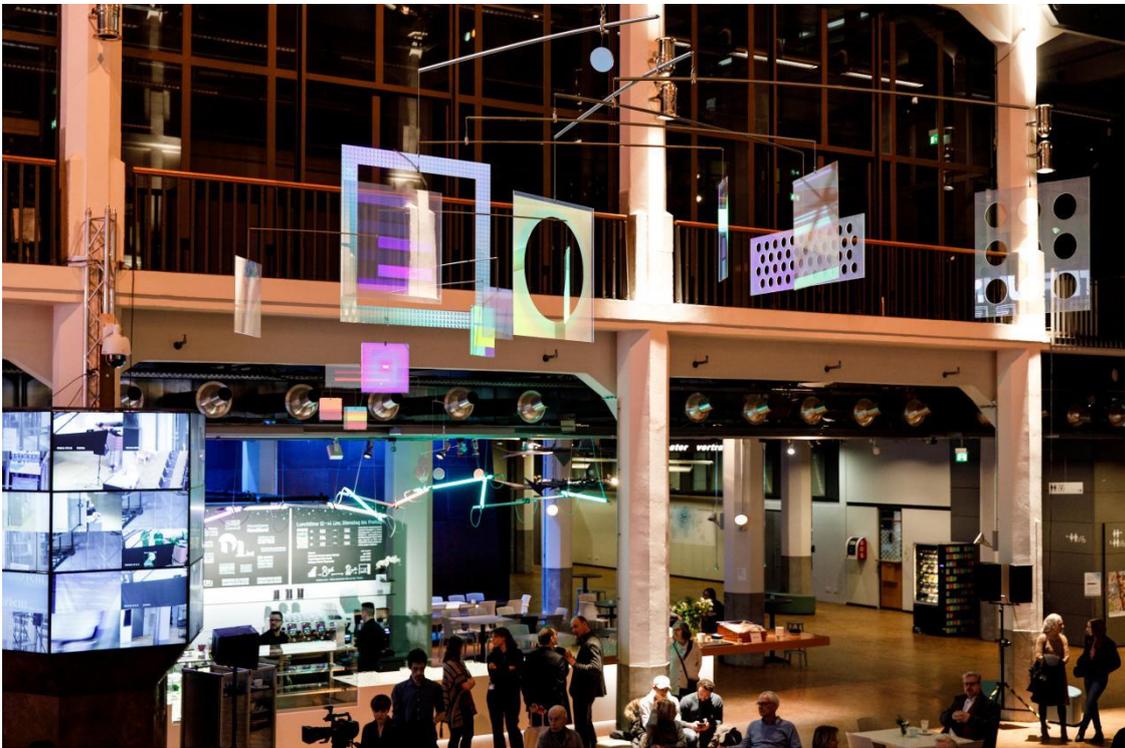


Figura 26\_ mostra d'arte "Between and Beyond", (ZKM, Karlsruhe, <https://zkm.de/en/exhibition/2019/02/dieter-jung>)

---

Negli anni '70 porta avanti un lavoro sulla rappresentazione di una serie di teste di personaggi famosi, come i volti di Sigmund Freud, Ezra Pound e Friedrich Nietzsche che si trovano nel bel mezzo di una composizione di linee orizzontali

e verticali che fanno riferimento alla trama degli arazzi del Rinascimento. Un'altra opera particolare è la trasposizione delle poesie di Hans Magnus Enzensberger servendosi del processo per la creazione degli ologrammi, sviluppa dei modelli per filmarle su una piattaforma che permette la rotazione a 360 gradi. All'inizio degli anni '80, nella serie *Into the Rainbow, Gegenwartsräume* e *Inbetween*, Dieter crea degli spazi di colore astratti utilizzando la tecnica della fase unica di Stephen A. Benton, dove i colori puri dell'arcobaleno oscillano autonomamente nello spazio, senza un percorso predefinito. Dieter Jung ha la possibilità di ampliare notevolmente le sue conoscenze intorno al 1985 e 1988, poiché svolge il ruolo di ricercatore come sopraccitato presso il Center for Advanced Visual Studies (CAVS) del MIT di Cambridge in Massachusetts, qui ha l'opportunità di osservare e collaborare nei laboratori dove creano i primi ologrammi di movimento computerizzati e registrano una quantità di dati molto elevata, che è un grande passo in avanti per il periodo.

## 1.4 L'Olografia e la produzione industriale

### 1.4.1 Michael Foster

È il primo a realizzare un ologramma meccanicamente, poiché converte l'ologramma arcobaleno a luce bianca in un motivo in rilievo superficiale.



Figura 27\_ reticolo di diffrazione olografica su disco LP, (Jonathan Ross Hologram Collection, <http://www.jrholocollection.com/collection/foster.html>)

---

Michael Foster e Richard D. Rallison negli anni dal 1965 al 1972 si occupano di concerti rock nello Utah ed è così che giunge a questa scoperta. Durante quel periodo ogni tanto organizzano delle riunioni per trattare di argomenti scientifici, nello specifico di un articolo pubblicato da Popular Science, scritto da Harry Knowles di Metrologic Instruments che semplicemente spiega il procedimento per realizzare degli ologrammi a trasmissione. Incuriositi decidono di allestire un laboratorio per la creazione del primo ologramma di

grani d'argento, si tratta di una piccola stanza nera dove posizionano una lastra di granito su una camera d'aria e Foster crea un ologramma di un maiale in metallo. Fino a quel momento si occupa di luci per gli spettacoli, mentre all'inizio degli anni 70 decide di dedicarsi all'olografia e ne sviluppa maggiormente la tecnologia. Parte dallo studio dei processi di bicromati e nel 1974 sviluppa un metodo del tutto nuovo che permette la trasmissione delle informazioni olografiche da lastre a spessori goffrati in nichel, per garantirne l'utilizzo per la stampa degli ologrammi su plastica. Dopo anni i due sopraccitati si rincontrano e Foster crea un dicromato delle dimensioni di 8x 10 e il suo collega Rallison si rende conto dell'importanza della scoperta. Successivamente dopo le varie scoperte, ci si concentra sulla vendita di questi tipi di ologrammi, infatti viene fondata l'azienda Foster con l'ologramma 83 in rilievo, Spectratek che diventa il più importante produttore di pellicole olografiche per imballaggio.

#### **1.4.2 Richard Dennis Rallison**

Nasce nel 1945 e vive per un lungo periodo a Cache Valley, frequenta la Logan High School nel 1964 e si laurea in ingegneria elettrica. Per tutta la vita porta avanti esperimenti che lo conducono a numerose scoperte, soprattutto nel campo dell'olografia, è un inventore e pioniere nel campo dell'ottica, conduce delle ricerche sul telescopio spaziale Hubble e quello Subaru alle Hawaii, inoltre anche delle ricerche sul disco ottico per gli scanner di codici a barre e altri progetti che riguardano l'olografia. Nel 1995 porta a termine un dottorato honoris per l'ingegneria elettro-ottica conferitogli dalla Utah State University come riconoscimento delle sue scoperte. Uno degli incontri cruciali durante la sua vita è quello con Michael Foster, che nello stesso periodo si occupa di luci per spettacoli e dopo la lettura di un articolo riguardante gli ologrammi decidono di progettare una stanza per realizzarne uno. Infatti dopo questa esperienza Rallison decide di dedicarsi totalmente all'olografia e costruisce un laboratorio di Sandbox e studia numerosi documenti che trattano a livello teorico l'olografia, realizza reticoli di fase e ne scrive il primo articolo. L'inizio del suo successo inizia nel 1965 quando partecipa alla fiera mondiale di New York dove si svolge la mostra della General Electric, che costruisce un grande organo a colori impiegando il rivestimento a tipo multi-lente Rolux per donare all'immagine una profondità tridimensionale. Successivamente torna nello Utah e con l'aiuto di un ingegnere della General Electric duplica il dispositivo e inizia a vendere questi prodotti all'interno dei bar. Nel 1966 vede lo spettacolo di luci prodotto da Jerry Abrahams, e copia i suoi prodotti per creare dei nuovi effetti di luci. In questo modo genera un grande organo colorato a forma di ombrello e in questo modo

chiama il suo spettacolo "Electric Umbrella", per crearlo usa oli e acqua colorata disposti tra grandi quadranti di orologi per realizzare proiezioni dinamiche dall'aspetto di amebe su schermi, pareti e soffitti, tagliando dei buchi nei gel colorati per poi ruotarli davanti a proiettori di diapositive sfocati per generare uno sfondo fluido in continua evoluzione con la sovrapposizione di immagini nitide e stroboscopiche da ruote maggiormente rapide e proiettori multipli. Successivamente realizza diapositive con l'aiuto di nastri birifrangenti e polarizzatori rotanti posti davanti a proiettori e costruisce alcune luci stroboscopiche per rendere disturbata la visualizzazione degli spettatori.

Durante gli anni 70 conduce una delle scoperte molto importanti nel campo dell'olografia, si tratta di un vero e proprio imprenditore che inizia la sua carriera con la realizzazione di attrezzature per spettacoli di luci mentre frequenta ancora il college negli anni 60 del 900 e poi lavora alla Hughes Aircraft inizio anni '70, dove progetta e costruisce laser, successivamente studia i metodi di rivestimento della gelatina commerciale bicromata (DCG) su superfici di vetro, in modo da garantire la regolarizzazione del colore degli ologrammi registrati su di essa in modo da racchiuderli in un sandwich di vetro. Questo genera un prodotto olografico economico in grado di assicurare una maggiore qualità, uno svantaggio è quello della maggiore sensibilità dei dicromati sensibili alla luce a lunghezza d'onda corta e la richiesta da parte di questi di lunghezze d'onda blu-verdi di laser a ioni di argon costosi e poco affidabili. Successivamente si scopre che le tecniche di sensibilizzazione ne favoriscono la funzionalità alle esposizioni di HeNe. Nel 1974 produce una moltitudine di barattoli in dicromato che favorisce la realizzazione di gioielli olografici ed è uno dei primi ad aver prodotto in serie gli ologrammi a riflessione di luce bianca. Inoltre diffonde i fotopolimeri che sono materiali trasparenti a catena lunga che si reticolano attraverso l'esposizione a luce di lunghezza d'onda corta, questi sono fondamentali in campo olografico e diventano dei prodotti che vendono le grandi aziende, infatti da inizio ad un'industria artigianale. Dalla fine degli anni '80 sono sponsorizzati da aziende come Polaroid Corporation che porta avanti alcune modifiche per migliorarne le prestazioni.



Figura 29\_ esempi di ologrammi riflettenti bicromati su vetro, vaso da farmacia olografico, (Jonathan Ross Hologram Collection, <http://www.jrholocollection.com/collection/electric.html>)



Figura 28\_ esempi di ologrammi riflettenti bicromati su vetro, gioielli, (Jonathan Ross Hologram Collection, <http://www.jrholocollection.com/collection/electric.html>)

Fornisce prodotti bicromati alla Horex Corporation in Pennsylvania e alla Holotron Corporation a Washington. Continua a vendere questi prodotti presso la società originale Electric Umbrella che nel '79 cambia nome in International Dichromates e nell' 84 Dikrotek.

### 1.4.3 Steve McGrew

Un altro personaggio nel campo dell'olografia commerciale è Steve McGrew, che sviluppa la sua conoscenza sugli ologrammi multiplex. Diventa commerciante a tempo pieno presso la Light Impressions, infatti si tratta di un imprenditore olografo americano, infatti è una figura molto importante dello stesso periodo di Rallison che viene coinvolto nella creazione di una produzione DCG per numerose aziende, in contemporanea McGrew sta completando il master in fisica presso L'università di Washington. Nasce nel 1945 e da subito nutre un interesse all'ingegneria elettrica e rimane fortemente affascinato dall'ottica. Durante il 1970 insegna in un corso di laboratorio di fisica e durante il primo anno di scuola di specializzazione ha l'opportunità di aiutare gli studenti a realizzare gli ologrammi come progetto di classe. Durante un'intervista dichiara di essere

fortemente attratto dall'olografia perché è ovvia, ma allo stesso tempo sembra magia. Il tutto alimentato dalla sua passione per i colori e dalla curiosità di come la matematica possa descrivere cosa fa un ologramma, ma soprattutto la sua accessibilità con i laser NeHe e alcune lastre olografiche. Per la realizzazione dell'ologramma per gli studenti, ha studiato la teoria e ha improvvisato attrezzatura utilizzando un pezzo di marmo su una camera d'aria e supportato da sistemi per specchi in compensato e viti, in questo modo capisce che questo tipo di ottica pratica non è supportato nel campo della formula delle lenti, di conseguenza cerca di trovare una soluzione e i due anni successivi, concepisce un computer ottico analogico in modo da garantire i calcoli bidimensionali per ricavare le soluzioni alle equazioni di campo. Durante un viaggio a Seattle vede un ologramma multiplex e successivamente decide di seguire per un po' di tempo la scuola di San Francisco per Olografia e questo gli permette di imparare delle tecniche più avanzate, grazie agli insegnamenti di Michael Kan. Nel 1975 decide di fondare la Europlex Holographics B.V ad Amsterdam insieme a Barrie Boulton e due investitori, in quel periodo realizzano stereogrammi, ologrammi arcobaleno e ologrammi DCG, ma questo tentativo non va a buon fine poiché si sono rispecchiati su un mercato inesistente, infatti vendono solo pochissimi ologrammi e di conseguenza la società fallisce un anno dopo. A fronte di questo fallimento McGrew decide di non abbandonare questa strada, nel 1977 entra a far parte della Horex Corporation in Pennsylvania, dove inizialmente la sua carriera è simile a Rallison, infatti produce ologrammi DCG e quello igroscopico e concepisce un processo di goffatura UV, ma esplora anche altre tecnologie di registrazione ologrammi, include processi di goffatura termica, materiali fotopolimerici e sbiancanti abbronzanti per emulsioni di alogenuro d'argento. Durante il periodo di vendita della Rallison's Fire Diamond Company a Holotron, McGrew decide nuovamente di cambiare compagnia e sviluppa un metodo per gestire gli ologrammi di riflessione DCG compatibile con le loro apparecchiature.

Nel 1979 Holotron si trasferisce dallo stato di Washington a Sunnyvale, in California, in quel periodo McGrew è capo della ricerca e sviluppo, decide di assumere Steve Provence come assistente che incontra a seguito di una visita all'Europlex ad Amsterdam. Il primo ologramma che vede è quello di un riflesso del Conductron, studia olografia a New York nel 1975 presso la School of Holography- Museum of Holography, un anno dopo entra a far parte della Compagnia Multiplex di San Francisco.

McGrew decide di allestire il suo garage per portare avanti i progressi dei processi di DCG e goffatura termica, mentre Provence accetta il lavoro presso la Spectra-Physics come tecnico laser. In ogni caso McGrew continua a sviluppare e diffondere la tecnologia, infatti nel 1980 immagina ologrammi arcobaleno in

rilievo economici in modo da essere accessibili a tutti, il suo metodo di goffatura ricorda le tecniche e i metodi dei reticoli di diffrazione, per questo motivo decide di contattare la Diffraction Company di Baltimora, che produce questo tipo di reticoli da diversi anni e inizia a fornire loro del materiale. Nel 1981 decide di aprire la sua impresa personale di Light Impressions Inc e produce ologrammi generati da un processo di stampaggio a pressione.

Produce ologrammi in rilievo 2D-3D, si trattano di opere d'arte piatte che ricostruiscono un'immagine su due piani, uno a pochi millimetri dietro la superficie dell'ologramma e un altro sulla superficie stessa. Producono un colore brillante dagli effetti del reticolo di diffrazione generati dalle ondulazioni della superficie dell'ologramma. Mastercard aggiunge un ologramma alle sue carte di pagamento per ridurre le frodi, l'anno successivo Visa decide di percorrere la stessa strada. I suoi prodotti in rilievo sono impiegati per il film ET nel 1982 e vengono ampiamente utilizzati negli anni '80.

#### **1.4.4 George W. Stroke**

Professore di Ingegneria Elettrica all'Università del Michigan, è un personaggio cruciale poiché influenza la storiografia dell'olografia e ha un background professionale molto importante che riguarda sia la fisica che l'ingegneria. Nasce in Jugoslavia nel 1924, ma cresce in Francia e nel 1949 consegue un diploma in ingegneria ottica presso École Supérieure d'Optique di Parigi. Nel 1952 decide di trasferirsi negli Stati Uniti e di accettare un posto con il ruolo di ricercatore associato con George R. Harrison, direttore di Scienza al MIT e capo del laboratorio di spettroscopia. Stroke ha l'opportunità di incrementare le sue conoscenze tecniche, infatti in quel periodo collabora per lo sviluppo di un motore interferometrico servocomandato, ossia un dispositivo per garantire la precisione della lastra di vetro con sottili linee parallele per favorire la creazione del reticolo di diffrazione. Decide di concludere questo lavoro ritornando a Parigi durante il dottorato di scienza che consegue nel 1960, per approfondire la formazione dall'ottica ingegneristica alla fisica matematica.

Successivamente si trasferisce nuovamente al MIT per circondarsi di maggiori rapporti interpersonali e ampliare la conoscenza nell'ambito matematico e l'ingegneria ottica.

Seguentemente all'offerta di una cattedra di elettro-ottica durante il 1962, l'anno successivo accumula una piccola squadra di studenti e tecnici per portare avanti le ricerche nel suo laboratorio di scienze elettro-ottiche all'interno dell'A-M Campus di Ann Arbor.

Si rende subito conto del poco interesse per quanto riguarda le ricerche di Willow Run sul fronte d'onda, di conseguenza decide di proporsi per aiutare su alcuni fronti come reticoli e strumentazione ottica, inoltre si applica nel lavoro condiviso riguardante le comunicazioni. Nel 1963 inizia a visitare WRL almeno due volte al mese, e entra in contatto diretto con il lavoro di Leith e Upanieks, dopo numerose visite e avendo assunto il suo incarico presso l'Università del Michigan, si propone per il trasferimento della ricerca sul fronte d'onda all'interno del suo laboratorio, la maggior parte dei colleghi è entusiasta di questa proposta, ma soprattutto di combinare l'ambiente universitaria con quella del lavoro del Willow Run, di conseguenza dopo le approvazioni iniziano a cercare dei finanziamenti da parte della National Science Foundation (NSF). Rapidamente si verificano dei disaccordi tra i due laboratori precedentemente citati, Stroke nel 1964 scrive al presidente del sottocomitato per la politica di ricerca messaggistica unificata mentre le controversie con Leith e Upatnieks sono in corso. Successivamente si appella ai superiori di Leith per denunciare che è portata avanti dal suo laboratorio la scoperta dell'illuminazione diffusa degli oggetti durante la realizzazione di ologrammi di trasparenze bidimensionali. Per evitare ulteriori dispute il capo dell'ingegneria elettrica raccomanda di sciogliere questo legame tra i due laboratori. Mentre Leith mostra l'ologramma di un carro armato, Stroke pubblica un ologramma di Abraham Lincoln e successivamente annuncia i progressi nell'olografia a colori mostrando un ologramma raffigurante soldati posizionati davanti alla bandiera americana rossa, bianca e blu.

Stroke servendosi di conferenze informali, presentazioni durante conferenze, documenti e articoli popolari cerca di pubblicizzare la sua versione della storia olografica, infatti nella sua biografia afferma di essersi interessato al campo dell'olografia nel 1962 e grazie al suo interesse porta avanti la ricerca, ma soprattutto numerosi contributi scientifici. Per dichiarare le sue affermazioni ad un grande pubblico pubblica il primo libro dal titolo *An Introduction to Coherent Optics and Holography*, in questo scritto si minimizza il lavoro di Leith e Upatnieks, ma viene fortemente criticato, sia per gli errori contenuti nel testo ma soprattutto per la poca chiarezza delle argomentazioni, infatti Emil Wolf mette in luce tutte le criticità del libro, avendo una certa conoscenza nel campo dell'olografia e seguendo la scrittura del libro di Dennis Gabor e Max Born dal titolo *Principles of Optics*.

Dennis Gabor contribuisce alla diffusione della storiografia di George Stroke, si incontrano per la prima volta nel 1964, proprio durante la scrittura del libro precedentemente citato, Gabor apprezza l'interesse di Stroke nei suoi confronti, dopo il passaggio in secondo piano a causa delle scoperte di Leith e Upatnieks. Stringono accordi per la pubblicazione del libro e questo si rivela vantaggioso

per entrambe le parti, inoltre Stroke cerca di limitare i rapporti tra Gabor e Leith cercando di fargli da mentore, tra il 1966 e 1967 entrambi sono negli Stati Uniti, e Gabor si affida pienamente a Stroke per quanto riguarda la letteratura, soprattutto per gli ultimi sviluppi nell'olografia laser, essendo un argomento poco conosciuto, fa riferimento su questi resoconti per le sue lezioni. Inoltre Stroke negli anni successivi afferma di essere stato determinante nell'ottenere il Premio Nobel per Dennis Gabor, altrettanti premi vengono negati ad altri colleghi a causa della sua influenza.

I due lavorano per la produzione di un film prodotto dalla National Science Foundation sull'olografia, dopo la morte di Gabor nel 1979, Stroke continua a portare avanti le indagini sull'olografia e sulla sua storia.

#### **1.4.5 Nicholas John Phillips**

Nasce nel 1933 a Londra, si laurea all'Imperial College, dal 1959 al 1962 svolge il ruolo di ricercatore senior presso l'Atomic Weapons Research Establishment, successivamente lavora per la Sperry Rand Research Center, negli Stati Uniti dal 1962 al 1963, nei due anni successivi svolge la mansione di teorico alla English Electric. Dal 1965 al 1993 è professore di Ottica Applicata alla Loughborough University, alla fine di questi anni viene assunto come professore di Scienze dell'Imaging alla De Montfort University a Leicester. Negli anni '70 è cofondatore di Holoco, che servendosi dei laser di The Who organizza mostre Light Fantastic come The Royal Academy of Arts a Londra intorno al 1977, oltre ad esporre gli ologrammi vengono esposte anche delle dimostrazioni realizzate con il suo gruppo composto da Anton Furst e John Wolff, conosciuti come il gruppo Holoco. La società cambia nome nel 1980 in Advanced Holographics quando The Who si distacca e successivamente diventa parte di Markem System.

A Phillips viene riconosciuto lo sviluppo di tecniche di sbiancamento e lavorazione, che garantiscono la registrazione di ologrammi di riflessione multicolore da un laser a singola lunghezza d'onda. Inoltre si occupa delle ricerche sui display, ologrammi illuminati dai bordi, codifica ottica per la sicurezza, fotopolimeri e sistemi micro-ottici, il tutto riconosciuto da una moltitudine di brevetti. Una delle sue scoperte più note è quella della tecnica per generare degli ologrammi di luce bianca che funzionano con ridotta illuminazione.

Inoltre riceve una medaglia Thomas Young dell'istituto di fisica, soprattutto per il raggiungimento dell'alta qualità visiva. Scrive un documento molto importante con la collaborazione di D. Porter dal titolo An Advance In The Processing Of

Holograms, in questo scritto introducono l'utilizzo di un nuovo concentrato dal nome Neofin Blue, uno sviluppatore per l'olografia pulsata, si tratta di un materiale costoso e complicato da ottenere, di conseguenza l'uso viene sostituito da formulazioni differenti, inoltre in questo documento viene immesso un agente ossidante, ossia il nitrato ferrico che ha la capacità di agente ipo-clearing, con la funzione di rialogenare l'argento.

Un altro articolo importante è *Advances in Holographic Bleaches*, che svela un nuovo concetto di sbiancamento in contemporanea ad una nuova linea di emulsioni Holotest, rialogenando si salta la fase di fissaggio e questo comporta una maggiore brillantezza dell'immagine.

Gli ologrammi prodotti con il metodo Phillips permettono il raggiungimento del successo delle mostre della Light Fantastic gallery exhibition alla fine degli anni '70, che producono per il pubblico delle immagini ad alta definizione e realistiche, grazie all'elevata luminosità e alle ombre nere generate dal basso rapporto segnale/ rumore. Questo permette di produrre delle immagini olografiche di grandi dimensioni, che negli anni precedenti sviluppa inizialmente nell'Università di Loughborough.

### **1.5 Ologrammi in Oriente a 360 gradi**

Tutte le scoperte portate avanti in occidente, avvengono quasi casualmente poiché si cerca di sperimentare altre tecnologie, infatti l'interferometria olografica, gli ologrammi a riflessione prodotte da Denisyuk e gli ologrammi sul piano delle immagini nascono per caso, inoltre tutte le scoperte stimolano entusiasmo per la comunità olografica e questo tende a cercare maggiormente di ricercare ulteriori miglioramenti per i prodotti olografici. Fino a quando nel 1965 un giornale giapponese pubblica la notizia di un ologramma che fornisce una vista a 360 gradi, questa notizia genera forte scalpore. Si tratta di una pellicola curva in un cilindro, al contrario delle emulsioni fotografiche a superficie piatta che si stanno sviluppando e studiando in occidente. Questa nuova invenzione si tratta di un'estensione dell'ologramma di Leith-Upatnieks, il raggio di riferimento viene proiettato dal basso del cilindro per permetterne l'ingresso per riflessione sulla superficie interna grazie ad una lente sferica. In questo modo quando l'ologramma viene illuminato con il raggio di riferimento con la geometria identica, questo permette all'immagine di essere osservata a 360 gradi e quindi vedere tutti i lati dell'oggetto proiettato. Gli spettatori raggiungono il cilindro ma non percepiscono fisicamente qualcosa di solido, è percepibile attraverso la vista. In questi anni nascono sempre più frequentemente le scuole

che hanno lo scopo di insegnare il funzionamento e la creazione di ologrammi prima degli anni '70 questo movimento nasce da un gruppo di studenti la Celestial Hologram, successivamente iniziano a nascere numerose scuole in differenti paesi. La San Francisco School of Holography raggiunge il livello dell'Optics Group della Willow Run e inoltre forma ulteriori insegnanti di olografia. Nel 1974 Fred Unterseher fonda la scuola con il nome Holografix e il suo corso di studi si compone di studenti che dopo aver concluso il percorso di studi diventano artisti e fotografi. Altre scuole di olografia aprono in altre città come per esempio il Lake Forest College a Illinois, o la New York School of Holography, inoltre iniziano ad apparire i libri di istruzioni pratiche. Uno dei libri maggiormente utili viene da Graham Saxby nel 1980 dal nome How to Make and Display Them che successivamente continua con ulteriori pubblicazioni come: Practical Holography e Manual of Practical Holography. Si tratta di veri e propri manuali operativi dove viene spiegato come realizzare gli ologrammi con la giusta quantità di prodotti, descrive le prime formulazioni di acido ascorbico per la fotografia e lo sviluppatore Agfa, inoltre si occupa della descrizione della procedura dell'ologramma a riflessione tramite l'esposizione al laser a impulsi di rubino, valuta attentamente la possibilità di produrre la registrazione di ologrammi senza collimatori, poiché l'ostacolo è quello dell'acquisto di lenti molto dispendiose ma soprattutto di specchi in vetro di alta qualità. Fornisce una serie di riflessioni che guidano numerosi olografi durante i loro esperimenti, questi libri diventano molto famosi per le spiegazioni esaustive e per il contributo scientifico nei confronti dell'olografia. Un altro teorico molto importante è Howard M. Smith che nel 1969 si occupa della scrittura di un libro fondamentale dal punto di vista matematico dei principi degli ologrammi, senza riferimento agli sviluppi pratici che poi si sarebbero evoluti successivamente.

### **1.5.1 Tung Hon Jeong**

Nasce nel 1936 in Cina, in tenera età insieme alla sua famiglia si trasferisce negli Stati Uniti, dove inizialmente si stabilisce in Texas e ha la possibilità di imparare l'inglese. Alla fine degli anni '50 si laurea a Yale e consegue un dottorato di ricerca in ingegneria nucleare fisica presso l'Università del Minnesota intorno al 1962, durante i suoi studi non è particolarmente attratto dall'ottica geometrica. Negli anni '60 trova impiego al Lake Forest College, cerca di perseguire i suoi interessi originali ma questo si verifica complessivamente, di conseguenza ogni estate la trascorre in Tennessee all' Oak Ridge, con il ruolo di ricercatore, spesso costretto ad adempiere a turni notturni per gli esperimenti. Anche se capisce che la vita da ricercatore non è nei suoi interessi, ha l'opportunità di incontrare numerosi

spettroscopisti, entrando in diretto contatto con i laser e l'ottica moderna. Per la prima volta incontra la teoria degli ologrammi durante una ricerca di una materia in laboratorio per gli studenti universitari, legge gli articoli di Leith e Upatnieks. Dopo questo primo incontro con gli ologrammi, decide di chiamare Leith e successivamente va a fargli visita per una consulenza a riguardante il metodo da utilizzare per l'insegnamento accademico sulla teoria degli ologrammi. L'argomento lo affascinava tanto da definirlo «così visivo, tattile, abbastanza facile da fare»<sup>13</sup>.

Durante la sua carriera, diventa un divulgatore e insegnante di olografia molto conosciuto, con la continua ricerca di rendere maggiormente esaustivo il suo insegnamento concepisce un kit dimostrativo portatile durante il 1968 per Gaertner Scientific e dopo pochi anni commercializza la propria attrezzatura a studenti delle superiori o universitari. Lui e Albert Beaz che hanno una carriera nell'insegnamento molto simile, collaborano per la realizzazione di un film dalla durata di diciassette minuti per l'Enciclopedia Britannica all'inizio degli anni '70, sempre in questo periodo viene assunto al Lake Forest College per organizzare dei corsi dalla durata ridotta, la maggior parte dei suoi studenti non presenta una preparazione nel campo scientifico, la maggior parte sono attratti dall'aspetto estetico degli ologrammi. Jeong cerca di garantire delle attrezzature a basso costo, infatti si interessa al tavolo di sabbia e ad altre soluzioni che vengono portate avanti in occidente. Organizza una conferenza all'interno del Lake Forest College sempre con l'intento di alimentare discussioni costruttive nel campo olografico, favorendo il raduno di numerosi scienziati, imprenditori, olografi estetici e artigiani dal nome International Symposium, questo crea un luogo confortevole e familiare per tutte quelle persone che si occupano di olografia e sono isolate. Il suo intervento è fondamentale per ridefinire la comunità di olografi, nonostante i divari tra gli artisti e gli scienziati.

L'ologramma sopraccitato viene studiato dal fisico Tung Jeong che durante il lavoro con i suoi studenti al Lake Forest College in Illinois come Albert Beaz dieci anni prima, decide di fornire delle descrizioni con metodi semplici per permettere la registrazione degli ologrammi con una composizione di quattro lastre piatte e successivamente un'ulteriore geometria cilindrica, soprattutto per favorire la comprensione in ambito universitario per gli studenti. Di questo metodo vengono a conoscenza repentinamente gli ingegneri della Conductron Corporation che studiano questa nuova tipologia di composizione e uno dei maggiori ricercatori è Gary Cochran citato precedentemente. Producendo la variante di questi ologrammi a 360 gradi, ci si rende conto che non sono né

---

<sup>13</sup> Johnston. S, *"Holographic Visions: a history of new science"*, Oxford ; New York : Oxford University Press, 2006

commercialmente efficaci e c'è il problema ulteriore per l'esposizione alla luminosità, che compromette la loro resa.

Nel 1973 ha l'opportunità di vedere il lavoro di Cross che produce gli ologrammi prodotti dalla Multiplex Company e rimane affascinato dall'olografia Sandbox.

Dopo la nascita di numerose scuole, Jeong diventa professore di fisica presso Lake Forest College di Illinois, si inizia con un corso estivo che attrae circa ventiquattro studenti l'anno, che arrivano da numerosi paesi diversi. Iniziano a nascere i manuali d'istruzione che vengono e Jeong crea i diagrammi e le analogie anche se non sono matematici anche se non vengono diffusi. Inoltre vengono tenute sempre più conferenze dove si verifica sia l'esposizione del prodotto, ma anche a livello teorico c'è quella volontà di diffondere i principi dell'olografia, attraverso dei cataloghi o seminari. Uno dei primi che diffonde queste idee è proprio Jeong durante gli anni '80 del '90.

## **1.6 Olografia nell'Unione Sovietica e altri sviluppi scientifici in Europa**

L'Unione Sovietica al contrario degli Stati Uniti investe maggiormente sui laboratori finanziati dallo stato. L'olografia sovietica di questi anni non mira solamente a portare avanti il lavoro di Denisjuk ossia della ricerca scientifica astratta, ma si iniziano a concentrare maggiormente sull'aspetto pratico. Uno dei maggiori centri di ricerca è il NIKFI fondato nel 1929 e si tratta del Cinema and Photographic Research Institute, ossia l'Istituto Sovietico centrale per lo sviluppo della cinematografia e della fotografia, durante i primi anni '70, amplia la ricerca, sviluppando materiali olografici e tecnici di elaborazione chimica, metodi di registrazione, copia e ricostruzione. Al contrario l'occidente in quel periodo utilizza delle varianti di Leith-Upatnieks che si servono di una fonte di luce monocromatica per la visualizzazione. Questo tipo di ologrammi da visualizzazione viene progettato a scopo pubblicitario, come nei tentativi di Conductron e di McDonnell Douglas Missouri, che cerca di sfruttare questo tipo di prodotti per il mercato, ma il tentativo non va a buon fine.

### **1.6.1 Victor G. Komar**

All'inizio degli anni '70, Victor G. Komar è il capo del gruppo di stereocinematografia del centro di ricerca NIKFI, che sviluppa con il suo team un prototipo di sistema cinematografico olografico di carattere didattico. Si tratta di un laser pulsato, che illuminando dei soggetti, attraverso uno schermo olografico mette a fuoco l'immagine tridimensionale per quattro o cinque punti di vista nel pubblico, si tratta di una versione di dimensioni maggiori di ciò che gli ingegneri

Conductron in quel periodo sono alla ricerca, ma che ancora non raggiunge la precisione dell'obiettivo di Siegel.

Nel 1976 Komar crea un film olografico di 20 secondi su uno schermo ad un congresso a Mosca, l'olografia sovietica si concentra maggiormente sulle emulsioni fotografiche spesse e a grana fine per garantire la registrazione degli ologrammi di riflessione Denisjuk, infatti i maggiori prodotti che sviluppano sono rappresentazioni museali, ologrammi di visualizzazione, immagini di dimensione elevata e brevi filmati cinematografici.

### **1.6.2 Hamish Shearer e Larry Daniels**

Nel 1982 la produzione ad alto volume è molto importante da parte di Applied Holographics, si tratta di un'azienda fondata nel 1983, in quel periodo Hamish Shearer gestisce il negozio di ologrammi Parallax a Londra che si occupa della vendita di effetti di luce e novità ottiche, cerca inoltre di vendere un gran numero di copie per i clienti. Successivamente decide di aprire l'Applied Holographics per occuparsi dell'olografia a riflessione nelle applicazioni di visualizzazione, ma repentinamente si cambia lo scopo di produzione e si decide di dedicare la produzione a sistemi di sicurezza, dove questo prodotti sono riconosciuti dalle industrie di sicurezza, questo con il supporto del fisico Larry Daniels viene progettata una stampante olografica, che all'interno possiede un laser pulsato che si occupa di registrare gli ologrammi che vengono riflessi sulla pellicola di alogenuro d'argento, per quanto riguarda il supporto economico e gli investimenti si affidano all'imprenditore Simon Rogers e i tre avviano la realizzazione di questa nuova azienda, precisamente nell'Aprile del 1983, numerose aziende che si sviluppano in quel periodo riescono a trovare dei finanziamenti e sponsor governativi e privati, mentre nel caso dell'Applied Holographics riesce ad ottenere il sostegno finanziario da parte del pubblico. Questa azienda dalle dimensioni ancora minime, si trasferisce a Braxted Park. Nel 1984 si avvia una collaborazione molto importante con un'altra azienda dal nome Ilford per dare il via ad una produzione commerciale, una stampante automatica di ologrammi dal nome HoloCopier basata su una pellicola a grana fine prodotta da Ilford e i materiali di consumo associati per quattro anni, questa condivisione commerciale dura per due anni. Durante questi anni forniscono materiali per nuovi mercati, nonché ologrammi riflessi per un gioco di Dungeons and Dragons con i personaggi rappresentati attraverso i pannelli olografici, registrano almeno un milione di immagini su pellicola olografica, anche se si tratta di un processo soggetto alla produzione di materiale in quantità maggiori rispetto a quello necessario, poiché i prodotti chimici di lavorazione tendono ad

esaurirsi rapidamente, infatti si soffermano sulla produzione che segue il metodo di goffratura, sia in termini vantaggiosi sui costi di lamine termoplastiche su alogenuro d'argento ma anche per la compatibilità con i prodotti Hotfoil esistenti nell'industria della stampa che offrono una connessione con la goffratura superficiale. Quello che viene dimostrato nelle stampe attraverso l'HoloCopier è la difficoltà di conservare limpidamente le ottiche che ha priorità rispetto alla filtrazione del fascio sorgente. La polvere si accumula sugli specchi e questo causa grandi difficoltà, soprattutto nelle aree di energia del raggio, tali particelle creano dei danni permanenti.

L'HoloCopier e la sua macchina per creare l'elaborazione chimica viaggiano alla stessa velocità, questo genera ogni fotogramma elaborato dopo un uguale periodo di tempo latente. Dopodiché le applicazioni vengono adattate a vantaggio dell'olografia in rilievo subito dopo il 1984, quando ABNH rilascia la colomba Visa. Infatti grazie all'invenzione di questa stampa, si sviluppa sempre maggiormente la richiesta di produrre delle stampe di sicurezza.

Inoltre numerosi produttori alimentari utilizzano nelle confezioni gli ologrammi, nel 1982 Hershey Corp si serve della licenza ET, con ologramma 2D3D per le confezioni del cioccolato, Reese's Pieces.

### **1.6.3 Du Pont**

Per un po' di tempo si consolidano i metodi di applicazione della lamina a caldo come sistema di sicurezza per banconote, carte di credito e imballaggi, ma c'è la necessità di rendere maggiormente sicuri questi ologrammi riflettenti. Per questo motivo viene introdotto il fotopolimero Du Pont che successivamente viene chiamato Izon, che garantisce la registrazione degli ologrammi di volume a riflessione bianca e questo porta all'esclusione dell'utilizzo degli alogenuri d'argento che viene introdotta come soluzione negli anni '80 da Applied Holographics. In quel periodo l'azienda chimica Du Pont sta prendendo in esame un fotopolimero, che viene introdotto nel 1987, le bande di interferenze tendono ad attraversare l'assemblaggio del film e un modello di monete planari. Il movimento che genera sembra quasi contrario a quello effettuato dalle registrazioni di ologrammi fino a quel momento, in questo periodo il materiale è sensibile solamente alla luce blu e verde, per questo motivo richiede doppia cottura per stabilizzare e migliorare l'immagine. Il riflesso della luce laser dall'oggetto interferisce con la luce riflessa dall'ologramma di Lippmann che è in crescita dallo stesso oggetto, ogni miglioramento della microstruttura dell'ologramma va a rappresentare il cambiamento di fase della luce laser riflessa sulle monete reali. La crescita della microstruttura diffrattiva è responsabile di

frange visibili di interferenza che si muovono sulla superficie della pellicola durante il processo dell'imaging. La differenza tra l'alogenuro d'argento e il fotopolimero è che utilizzando il primo, si espongono delle informazioni fotografiche o olografiche in esposizioni in successione senza alcun effetto che si verifica solo quando il materiale viene immerso all'interno dello sviluppatore. Mentre per quanto riguarda il secondo, si verificano dei cambiamenti spontanei all'interno dello strato, dove si generano le zone di indice di rifrazione differenziale con la formazione diretta di un ologramma di fase. Inoltre c'è una notevole differenza di velocità tra i due, infatti i fotopolimeri vengono utilizzati da anni per la produzione di fotografie su stampa specializzata. I maggiori ricercatori di questo polimero ossia, Polaroid, Du Pont, Dai Nippon, Techsun Xetos e Polygrama hanno avuto la necessità di raggiungere una risoluzione sempre più definita, in modo da includere l'olografia del volume. Mentre il nuovo fotopolimero dal nome Bayer HX è di produzione Covestro ma cambia il materiale che è di poliuretano. La sensibilità di questi tende ad essere nella zona UV, la chimica moderna ne garantisce l'interconnessione con la luce visibile, infatti in quest'ultimo fotopolimero si può osservare la gamma completa di sensibilità spettrale e un maggiore livello di attività all'estremità rossa dello spettro.

#### **1.6.4 Landis & Gyr**

A seguito degli ologrammi 2D-3D vengono studiati altri tipi di tecnologie, l'invenzione si deve a Craig Newsinger nella metà degli anni '80 con la collaborazione di Nigel Abraham, i due sistemano un laboratorio con attrezzatura primitiva all'interno del Braxted Park per la progettazione dei master ologrammi digitali in fotoresist. Nel 1984 vengono brevettati da Landis e Gyr che generano una matrice di punti, dove l'ologramma è più difficile da distinguere, infatti queste immagini bidimensionali vengono generate da una moltitudine di punti e linee che a loro volta si compongono di microstrutture che diffrangono la luce, in questo sistema vengono a mancare quelli che sono i principi olografici, questi dispositivi di sicurezza diventano sempre più importanti durante gli anni 2000 e vengono classificati come dispositivi ad immagine variabile ottica diffrattiva con l'acronimo (DOVIDS) e diventano un grande business.

Questo nuovo dispositivo si chiama Kinegram, potrebbe essere il primo prodotto commerciale di tipologia digitale, non viene progettato come un prodotto per ridurre i costi, ma come metodo sofisticato per ridurre la contraffazione, soprattutto per applicazioni governative e bancarie. La spiegazione tecnica di

generazione di questa tecnologia non viene divulgata per motivi di sicurezza, infatti è oggetto di discussione di numerosi olografi, che si chiedono come Landis e Gyr abbiano creato questo sistema digitale che si basa sulla grafica vettoriale. Si tratta di un sistema ad alta risoluzione con una composizione ad interlinea superiore ad un numero di mille linee per millimetro, quindi una rete molto fitta e complessa. Questo sistema è utilizzato in tutto il mondo, comprese le banconote e le sovrimpressioni che si trovano nei passaporti. Dopo la scoperta i due rilasciano le proprietà della tecnologia a OVD Kinegram in Svizzera sotto la sorveglianza del tedesco Leonard Kurz, che raggiunge dei livelli molto apprezzati e riconosciuti. L'immagine del Kinegram si tratta di un sistema molto complesso dove cambiano delle minime parti, con delle piccole zone di reticoli diffrattivi in rilievo, ciascuna zona varia ed è caratterizzata da una variazione minima della direzione della struttura frangiata, l'occhio dello spettatore è attirato dalla variazione di colore che dipende dal tipo di illuminazione e dal movimento che si genera spostando l'oggetto che si osserva, per esempio una banconota, questo sistema concorda caratteristiche di alta risoluzione che producono microtesti vettoriali. Un dettaglio così minuzioso è complesso se non impossibile da ottenere con le tecniche laser degli ologrammi, proprio per questo motivi si è optato per il sistema della diffrazione della luce.

Viene utilizzato uno spessore metallico che memorizza una registrazione con una microstruttura diffrattiva in rilievo che viene impressa attraverso una goffatura attraverso un foglio di un materiale termoplastico, che è spesso rivestito con lacche che si utilizzano per la produzione di serie delle porte. Le vernici che si impiegano sono polimerizzate dopo la pressatura e questo processo avviene tramite l'esposizione ai raggi ultravioletti che sono eccellenti per la replicazione delle frange e migliorano il profilo originale del rilievo.

### **1.6.5 Craig Newschwanger**

I primi ologrammi a matrice di punti, vengono ideati da Craig Newschwanger nella metà degli anni '80 in collaborazione con Nigel Abraham, producono una strumentazione rudimentale all'interno del laboratorio a Braxted Park che si basa sulla creazione di un tavolo con all'interno un laser HeCd a minima potenza. Pur essendo a minima potenza, il primo campione fornisce un effetto tridimensionale considerevole. In quel periodo Landis, Gyr e CSIRO promuovono la tecnologia di olografia digitale infatti creano il brevetto per la matrice olografica. In questo periodo vengono create numerose immagini olografiche, come lo stereogramma di Michael Jackson o etichette con ologrammi in rilievo per profumi e di grandi

formati, ma al momento non possiede la licenza di conseguenza il lavoro non viene mai pubblicato.

### 1.7 L'evoluzione olografica dopo gli anni '80

Dopo gli anni '80 nasce sempre di più l'interesse per gli ologrammi, come citato precedentemente la rivista di National Geographic presenta ben tre riviste con gli ologrammi sulla copertina.

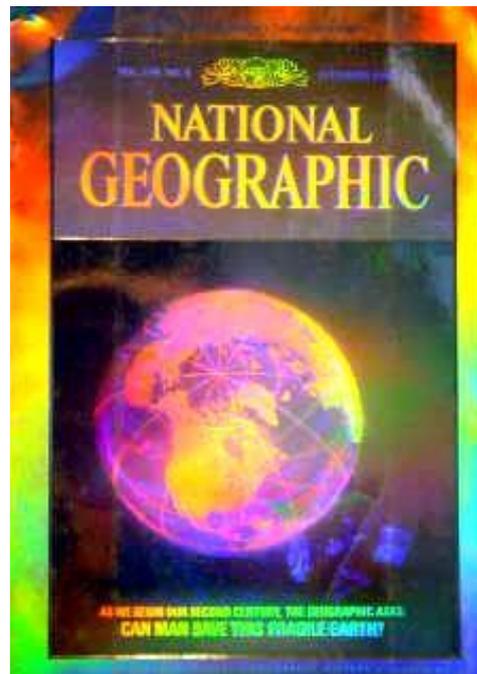
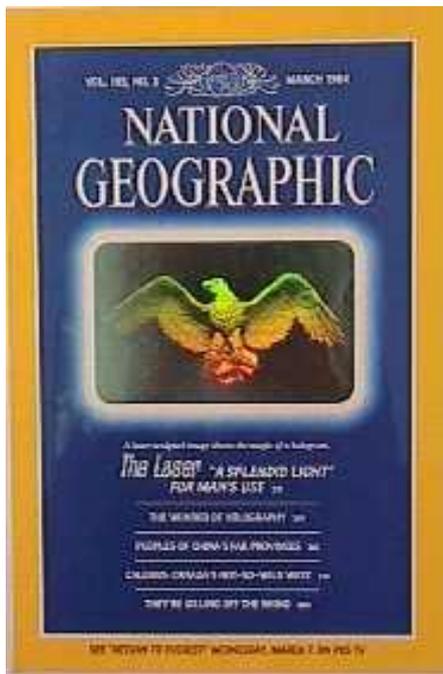


Figura 30\_ Rivista 1984 di National Geographic, ologramma in rilievo di un'aquila, (Holophile, <http://www.holophile.com/history.htm>)

Figura 31\_ Rivista 1984 di National Geographic, ologramma in rilievo della terra, (Holophile, <http://www.holophile.com/history.htm>)

---

Vengono inventati i sistemi per abbattere la contraffazione dei prodotti. Intorno alla metà degli anni '80 vengono utilizzati sui passaporti infatti il primo stato ad inserirli è l'Iraq o Glaxo che è la prima azienda farmaceutica che utilizza gli ologrammi per proteggere il marchio. Un evento cruciale della storia dell'olografia avviene nel 1992 con la chiusura del Museo di Olografia a New York dopo quindici anni di mostre importanti, con prodotti realizzati da differenti artisti e mezzo importantissimo di divulgazione delle nuove tecniche

olografiche. Che contiene la collezione più numerosa al mondo di ologrammi, nel 1993 vengono presi in custodia dal MIT Museum.

Nel 1994 si realizzano gli schermi LCD grazie alla scoperta di Rob Munday di Spatial Imaging, viene utilizzato questo schermo per registrare ologrammi digitali, servendosi di un processo in un'unica fase, che successivamente vengono prodotti dalla Polaroid Corp a colori che garantisce immagini bianche e luminose, dietro lo schermo LCD viene posizionato un ologramma a trasmissione e lo schermo riflette la luce ambientale al fine di produrre uno sfondo bianco.

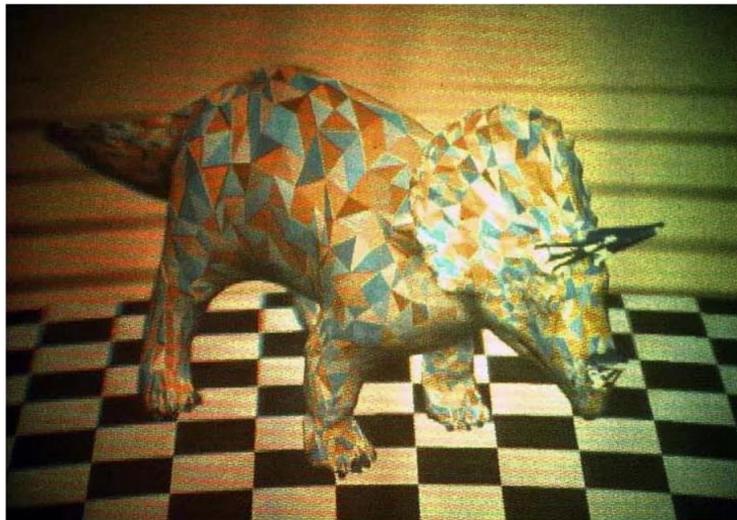


Figura 32\_ "Tricerotps" primo ologramma a riflessione prodotto digitalmente, (Rob Munday, <https://www.rob-munday.com/press-2/1992---munday-creates-first-digital-stereograms---holography-news>)

---

Nel 1996 Royal College of Arts, chiude i corsi sull'olografia e mette all'asta le attrezzature. Nel frattempo continuano ad affinare le tecniche di sicurezza e raccolta di dati, infatti si continua a produrre il denaro con sopra gli ologrammi, nel 2002 per esempio vengono prodotte le banconote euro con l'ologramma e altri prodotti commerciali come per esempio la confezione del dentifricio Aquafresh ricoperto di laminato olografico.

Nel 2005 viene pubblicata la terza edizione del libro sui sistemi di sicurezza di Rudolf van Renesse dal titolo Optical Document Security, che si occupa anche di citare altre tipologie di olografia.

Inoltre nel 2006 muore uno degli olografi più importanti al mondo Yuri Denisyuk. Mentre nel 2007 Patrick Flynn, Satyamoorthy Kabilan e Jonathan Wiltshire creano l'ologramma HD3D e producono la dimostrazione dell'ologramma attraverso la ricostruzione del cubo di Rubik. Questi vengono

presentati alla conferenza tenuta nel 2008 negli Stati Uniti, dove viene richiesta da numerose persone interessate i campioni. La sequenza delle immagini fotografate, attraverso la ripresa di numerose angolazioni, il colore reale costante del cubo, il visualizzatore si muove lateralmente, mentre il blocco centrale ruota e immagini Flickin vengono rappresentate agli estremi dell'inclinazione dell'ologramma.

Sempre nello stesso anno vengono contattati Mike Medora e Jeff Blyth per il National Maritime Museum a Greenwich che richiede l'intervento dell'olografia per quanto riguarda la conservazione archivistica dei reperti museali.

Inoltre nel 2013 iniziano a nascere i primi visori che permettono l'immersione completa all'interno di un mondo virtuale, una delle prime aziende che si occupa della produzione di queste tecnologie è Google, infatti il prodotto viene chiamato Google Glass.

Nel 2015 nasce l'azienda WiMi Hologram Cloud che fornisce nuove tecnologie di realtà aumentata e viene fondata a Pechino, raccogliendo un'importante somma di denaro grazie a numerosi finanziamenti.

Nel 2016 Microsoft progetta gli occhiali intelligenti e ne fornisce la pre-produzione, questi dispositivi RM vengono spesso definiti ologrammi e nella loro tecnologia viene utilizzata l'ottica diffrattiva. E sempre in quest'anno Hologica crea il display olografico digitale 3D che garantisce una scansione del cervello, tramite risonanza magnetica e apre la strada all'imaging medico e alla diagnostica.

Mentre nel 2018 per la prima volta viene prodotto un display olografico interattivo desktop per i contenuti 3D che non necessita di accessori per la realtà aumentata.

Nel 2019 Microsoft progetta HoloLens 2 e Light Field Labs, un Start-Up creata negli Stati Uniti, raccoglie un'importante somma di denaro per la costruzione di display olografici di grandi dimensioni, che producono ologrammi visibili senza alcun supporto di visori. Negli ultimi anni, soprattutto in oriente, questo tipo di tecnologie vengono sempre più utilizzate e si sta cercando di sfruttare anche in occidente.

## 2 Gli ologrammi dopo gli anni 2000: tipologie e potenzialità

### 2.1 Differenza tra Ologramma e fotografia

L'ologramma è un'immagine completa che al contrario di quella fotografica tradizionale, ha la capacità di fornire una visione accurata della profondità di un oggetto sia statico che dinamico attraverso le nuove tecnologie, creando un documento fotografico maggiormente completo come atto di eredità, banalmente non è altro che la trasformazione della luce in materia.

Ci sono stati alcuni studiosi in passato che si sono interrogati dal punto di vista della percezione umana e come si reagisce a questa nuova tecnologia. Uno di questi è Roland Barthes un critico letterario e saggista, che vive per tutto il 1900, che è in vita durante il periodo delle scoperte scientifiche sull'olografia e durante la stesura di un suo scritto dal nome Camera Lucida, definisce l'immagine fotografica come "morte piatta"<sup>14</sup>, poiché nega la profondità e le varie sfumature del soggetto rappresentato.

Al contrario prendendo in considerazione l'ologramma, si tratta di un'immagine bidimensionale, ma il nostro occhio la percepisce tridimensionale, questo grazie alla luce che gioca un ruolo fondamentale soprattutto per uno dei cinque sensi ossia la vista, infatti la visione di questi oggetti potenziati crea un "Sense of Wonder" che in inglese viene utilizzato per descrivere una sensazione di meraviglia, di conseguenza si tratta di una reazione emotiva, scatenata da immagini estremamente dettagliate che conferiscono al soggetto un aspetto realistico.

Gli ologrammi conservano e restituiscono delle caratteristiche fondamentali dell'oggetto preso in considerazione ossia la profondità, la parallasse e altre proprietà. Sono ideali per rendere maggiormente chiari dei concetti tecnici complessi e per presentare dei prodotti visivamente ammalianti che riescono a catturare positivamente l'interesse dello spettatore che ha l'opportunità di vedere questo tipo di rappresentazioni.

A seconda della prospettiva, l'immagine si percepisce da una differente angolazione e questo permette di coglierne a pieno ogni parte o di percepire ulteriori oggetti che appaiono in secondo piano, andando ad accentuare l'effetto di profondità. Questo dipende dalla tecnologia con cui viene creato, inoltre è una tecnica che genera delle immagini volumetriche prodotte dal fenomeno dell'interferenza e dalla diffrazione della luce, attraverso l'utilizzo di una luce monocromatica e coerente per rigenerare l'immagine, considerato che non

---

<sup>14</sup> Barthes. R. "Camera Lucida: Reflections on Photography", New York: Hill & Wang, 1981.

avviene nessuna messa a fuoco della luce estesamente riflessa dalla superficie di un oggetto, i raggi di luce derivanti da una porzione sulla superficie del soggetto possono prendere una moltitudine di percorsi differenti, al contrario nel caso della fotografia se venisse utilizzata una lente convessa questa condurrebbe i raggi verso un punto univoco. Pertanto per qualunque punto sulla lastra olografica che registra l'immagine dell'oggetto, la fonte di luce proveniente da differenti punti sulla superficie di quest'ultimo potrebbe essere convergente in quel punto, che potrebbe trovarsi nella porzione centrale della lastra olografica, in questo caso, riceverebbe dei raggi di luce da differenti punti sulla superficie dell'oggetto, anche punti molto distanti dal centro di quest'ultimo.

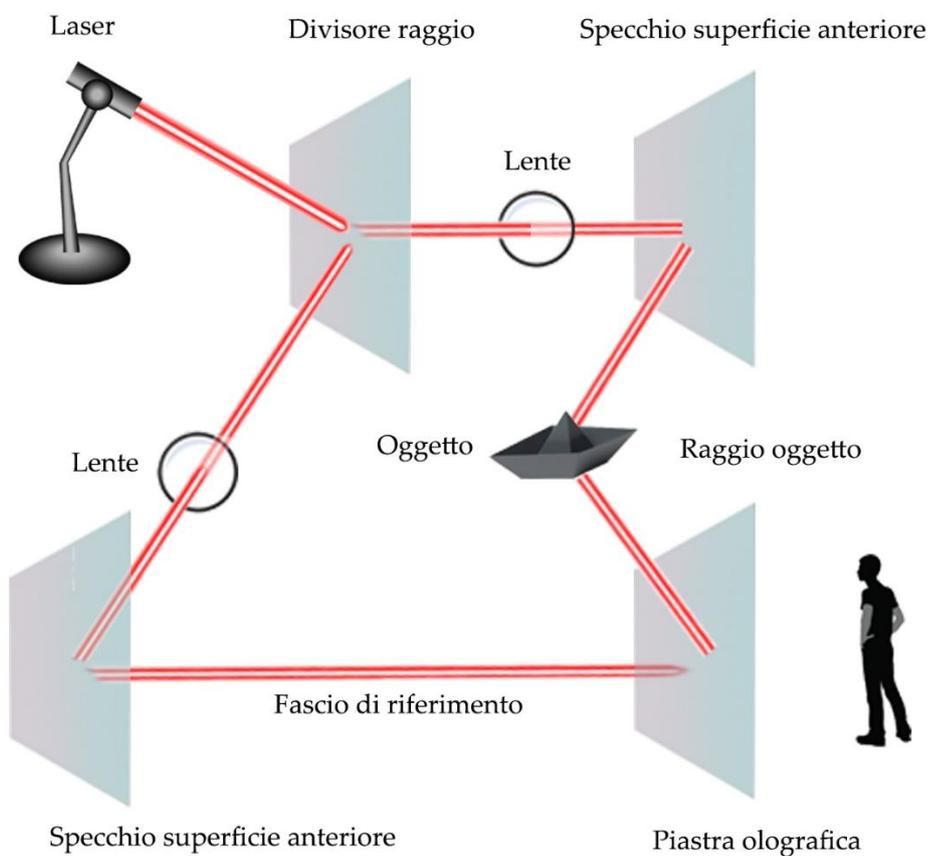


Figura 33\_ schema creazione e ricostruzione di un ologramma

Inoltre nonostante si verifichi la sovrapposizione di immagini, queste vengono rappresentate ad altissima risoluzione di conseguenza non appaiono sfocate, al

contrario della fotografia che riesce a mettere a fuoco solo un singolo oggetto nella scena, ossia quello più vicino all'obiettivo. Nel caso della fotografia l'immagine viene messa a fuoco da una lente convessa, un qualsiasi raggio di luce originario da un oggetto registrato che non naviga verso la lente convessa non può essere parte dell'immagine prodotta, considerando ciò qualsiasi porzione della superficie dell'oggetto preso in esame, da cui non vi è alcun tragitto che i raggi di luce possono percorrere per raggiungere l'obiettivo non verrà ripresa. In sostanza un'immagine fotografica di un oggetto non può, includere parti dell'estensione dell'oggetto rivolte nella traiettoria opposta alla lente convessa che genera l'immagine.

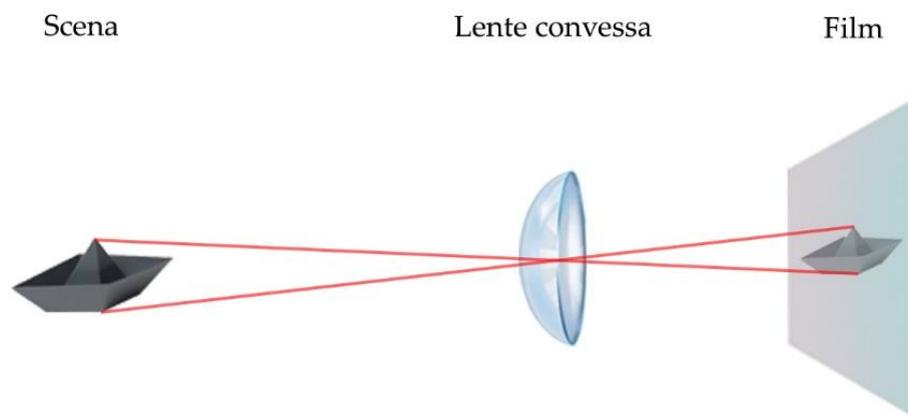


Figura 34\_ registrazione scena sul film fotografico

---

La differenza in campo fisico tra una fotografia e un ologramma, è che la prima se viene frantumata in tanti pezzi, ogni piccola parte risulta essere separata dal resto e rappresenta una piccola porzione dell'immagine, se si perde una parte di essa questo comporta una perdita irrimediabile, la sua creazione avviene per mezzo della luce riflessa dall'oggetto che viene proiettata nella pellicola fotografica dove avviene la reazione tramite il rivestimento chimico della pellicola, per far ciò necessita di una lente per mettere a fuoco l'oggetto e si possono utilizzare dei **filtri** per modificare le lunghezze d'onda sulla lastra fotografica e al contrario dell'ologramma non è necessaria nessuna fonte di luce. Nel caso dell'ologramma se viene portato avanti lo stesso processo di frantumazione, ogni parte contiene una versione più piccola anche se sfocata dell'intera immagine. Una differenza sostanziale tra le due è la generazione di informazioni, infatti l'olografia ne ha un'elevata capacità ed è possibile generare

una sovrapposizione di immagini, mentre nella fotografia non è fattibile la sovrapposizione di quest'ultime. La più antica è la fotografia che nasce in Francia nel 1826 grazie al fotografo Joseph Nicéphore Niépce.

Le differenze sostanziali tra le due tecniche sono:

Differenze	Olografia	Fotografia
Immagine	Vengono registrate sia la fase d'onda luminosa che l'intensità, questo permette la generazione di un'immagine tridimensionale	Viene registrata solamente l'intensità, questo causa la produzione di un'immagine bidimensionale
Fonte di luce	Fonte di luce monocromatica coerente, come per esempio il laser	Fonte di luce naturale, come quella di una normale lampadina o per esempio la luce del sole
Immagine di registrazione	Si registra direttamente quando la luce dell'oggetto viene diffusa sul supporto di registrazione	Per registrare l'immagine si ha bisogno di un obiettivo
Distruzione sul negativo	Se viene diviso in parti, ciascuna contiene le informazioni dell'intera immagine	Se viene spezzata, ogni parte va a comporre un pezzo del puzzle, con l'assenza di una questo comporta un danno irreparabile
Capacità	Più immagini possono essere registrate contemporaneamente	Non si possono registrare più immagini contemporaneamente sulla pellicola
Capacità di informazione	Alta percentuale di informazione	Bassa percentuale di informazione
Immagine multiple	Le immagini possono essere sovrapposte	Non è possibile la sovrapposizione
Modello	L'ologramma è un modello positivo	Sulla pellicola viene prodotto un modello con schema negativo

**Filtro**, in fotografia viene utilizzato per modificare in modo mirato le lunghezze d'onda delle componenti di misti luce (come per esempio il bianco) precedentemente all'incontro con il film. I materiali con cui vengono realizzati possono essere vetro colorato, plastica, gelatina o una soluzione liquida colorata all'interno di un contenitore in vetro, vengono posizionati davanti all'obiettivo o possono essere poggiati anche sopra la fonte luminosa e anche in questo caso si ottiene lo stesso effetto. Nel caso delle pellicole in bianco e nero, si utilizzano dei filtri colorati che modificano la luce e fanno percepire il soggetto nei toni di grigio, inoltre hanno la capacità di schiarire e scurire, ma anche di gestire il contrasto nei punti di esposizione. Mentre nella fotografia colorata hanno il compito di alterare la qualità del colore della luce. Mentre i filtri a densità neutra vanno a ridurre l'intensità della luce senza trasformare il colore e vengono utilizzati per intensità di luce troppo elevata, non consona all'esposizione, ed infine ci sono i filtri polarizzatori che migliorano la brillantezza dei colori riducendo la luminosità delle superfici riflettenti come acqua e vetro.

**Reticolo di diffrazione**, si tratta di un dispositivo ottico, caratterizzato da una superficie rigata con linee molto vicine, parallele che hanno il compito di risolvere il problema della luce in spettri, un reticolo è a diffrazione o a trasmissione se è trasparente o specchiato, ossia se viene rigato su vetro o su una pellicola metallica anch'essa posta su una lastra di vetro di supporto, sono anche classificati come aereo o concavo, il vantaggio di quest'ultimo è la capacità di produzione linee spettrali limpide senza l'aggiunta di ulteriori lenti. Viene utilizzato soprattutto nelle regioni di infrarosso e ultravioletto che altrimenti senza la loro presenza verrebbero assorbite durante il passaggio nella lente. Le righe vengono realizzate tramite una macchina che viene chiamata a motore dominante, che utilizza la punta di diamante per lavorare questa superficie e soprattutto per creare delle linee sottili e leggermente profonde. Il reticolo si occupa della dispersione di un fascio di varie lunghezze d'onda all'interno di uno spettro di righe che sono associate per mezzo del principio di diffrazione, si conservano solo quelle eccezionalmente di una determinata lunghezza d'onda, mentre le altre vengono disperse a causa dell'interferenza che si genera.

**Prisma**, si tratta di un elemento che viene utilizzato in ottica, che generalmente viene realizzato con un materiale trasparente e con le facce piane, viene impiegato per analizzare e riflettere la luce. Se prendiamo in considerazione un prisma triangolare riesce a separare la luce bianca nei colori costituenti conosciuti come a spettro. Ciascun colore o lunghezza d'onda che fa parte della luce bianca, viene deviato o rifratto in quantità differenti, le lunghezze d'onda di dimensioni ridotte verso la colorazione viola sono maggiormente piegate mentre quelle di

lunghezza maggiore al contrario presentano una piegatura ridotta. Vengono utilizzati nei spettroscopi, per analizzare la luce e l'identità della struttura dei vari materiali che emettono e assorbono fasci luminosi. Questo genere di elementi possono invertire la traiettoria della luce, questi prismi presentano anche delle forme differenti, possono essere assemblati, per creare degli effetti differenti.

## 2.2 Tipologie di Ologrammi

L'ologramma non è altro che una registrazione bidimensionale o tridimensionale che avviene attraverso il modello di interferenza generato da una luce puntiforme che viene individuato e conosciuto come raggio di riferimento, questa luce ha la caratteristica di avere una lunghezza d'onda fissa che incontra un'ulteriore luce della stessa lunghezza d'onda proveniente da un oggetto e questa viene chiamata raggio dell'oggetto. Quando l'ologramma viene illuminato unicamente dal raggio di riferimento, il modello di diffrazione ha il compito di ricreare i fronti d'onda della luce generati dall'oggetto originale e per questo motivo lo spettatore non percepisce la differenza tra immagine creata e oggetto originale. In sostanza, l'ologramma come quanto affermato precedentemente, permette la riproduzione di un'immagine che viene registrata. Questa fase di registrazione si verifica proprio nel momento in cui avviene la divisione del raggio laser in due raggi. Successivamente attraverso un gioco di specchi, la luce derivante dalla sorgente va a interferire con quella riflessa dall'oggetto, andando a dare vita a due linee sulla lastra che sono conosciute come "frange di interferenza". Queste contengono tutte le informazioni che permettono poi l'intera ricostruzione dell'immagine tridimensionale dell'oggetto in questione, che appare così come se fosse fisicamente presente.

Da quanto dichiarato sul Giornale di Inside Marketing da Rachele Cunsolo<sup>15</sup> la definizione tecnica corretta di olografia è la seguente:

«Nel mondo scientifico con olografia si intende la tecnologia ottica che permette di registrare e produrre immagini tridimensionali di oggetti reali. Il principio consiste nell'illuminare l'oggetto con un fascio di luce coerente generato da un laser e rinviare il campo di luce riflesso su una lastra di materiale sensibile; se in un secondo fascio di luce laser interferisce con il campo luce riflesso si generano dei pattern di onde elettromagnetiche conosciute anche come frange di interferenza che vengono catturati dalla lastra e che contengono tutte le caratteristiche del campo luce generato dall'oggetto, ossia la sua ampiezza e la sua fase.

---

<sup>15</sup> Rachele Cunsolo è l'Executive Management Assistant di Quintetto srl, un'azienda che si occupa di sistemi multimediali e interattivi per l'erogazione di percorsi didattici.

Illuminando la lastra con la stessa sorgente, la luce interferisce con se stessa per ricostruire il campo di luce originale e quindi a rappresentare l'immagine stereoscopica ossia l'ologramma dell'oggetto»<sup>16</sup>

Esistono tante tipologie di ologrammi, ma si possono classificare in tre grandi gruppi:

- Ologramma di Trasmissione
- Ologramma di Riflessione
- Ologramma Ibrido

### 2.2.1 Ologramma di Trasmissione

Si tratta di una registrazione che nel processo di ricostruzione è conosciuto anche come processo di visualizzazione, la fonte luminosa fa permeare la sua luce attraverso la pellicola o lastra di registrazione permettendo all'osservatore di vedere l'immagine dal lato opposto alla fonte di luce proiettata. Generalmente viene utilizzato un laser per la visualizzazione. Il fenomeno che si verifica è quello di perfezionamento del processo di registrazione, il formato di quest'ultima si può osservare dal lato opposto della sorgente luminosa per favorire la costruzione della struttura marginale più consona, in questo sistema sia l'oggetto che i raggi di riferimento provengono dallo stesso lato della lastra, al contrario degli ologrammi a riflessione.

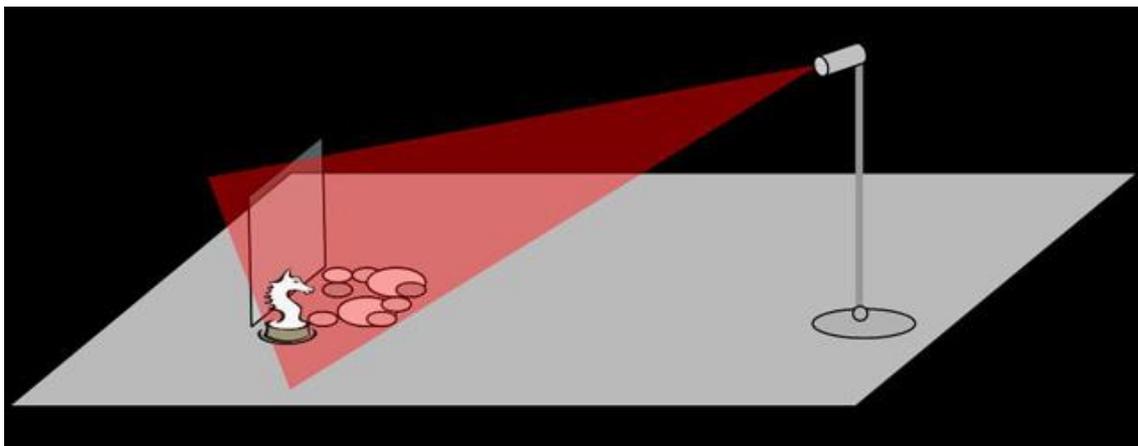


Figura 35\_ la realizzazione di ologrammi di trasmissione <sup>17</sup>, (Integraf, <https://www.integraf.com/resources/articles/a-how-to-make-transmission-holograms>)

<sup>16</sup> Cusolo. R, "Ologrammi e comunicazione: dalla definizione di 'ologramma' alla comunicazione del futuro", Inside Marketing, 2018.

<sup>17</sup> La realizzazione di ologrammi di trasmissione richiede che la piastra olografica sia posizionata dietro l'oggetto e il laser, o lateralmente con un angolo di 45 gradi circa. La luce laser riflessa dall'oggetto interferisce direttamente con la luce proveniente dal laser davanti alla piastra e viene registrata identica. In questo modo viene creato l'ologramma dalla "scena profonda".

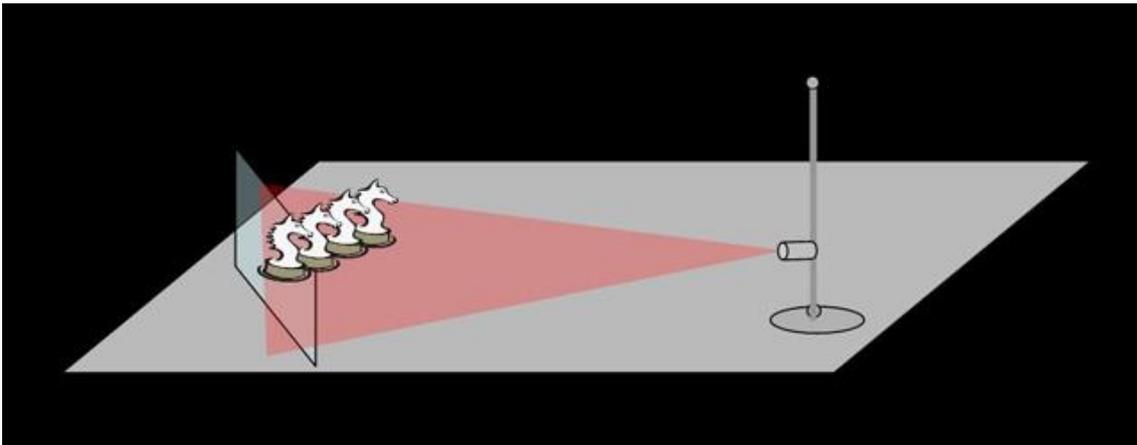


Figura 36\_ la realizzazione di ologrammi di trasmissione, a 45 gradi, (Integraf, <https://www.integraf.com/resources/articles/a-how-to-make-transmission-holograms>)

Il supporto di questa tipologia di ologramma varia di spessore, potrebbe essere sia sottile che spesso, questo è vincolato dal tipo di materiale che viene usato poiché possiedono differenti capacità di registrazione delle microstrutture superficiali o di volume.

L'ologramma a trasmissione si differenzia per le sue proprietà diffrattive, che hanno il compito di disperdere la luce bianca che incide nei colori componenti, molto simile al comportamento del prisma, anche se la disposizione dei colori è invertita. Negli anni iniziali questa soluzione non permette la visione della luce bianca, se non grazie all'invenzione molto importante che ha svolto la funzione di questo ologramma da parte del Dottor Stephen Benton che nel 1967 inventa per la prima volta l'ologramma arcobaleno e questo ha garantito lo sviluppo dei sistemi di sicurezza accennati nel precedente capitolo. Di conseguenza gli ologrammi che troviamo nelle carte di credito o nelle banconote sono degli ologrammi a trasmissione, come per esempio l'aquila sulla carta di credito VISA nonostante sembri generato da una luce riflessa, in realtà è un ologramma a trasmissione rispecchiato tramite uno strato sottile di alluminio sullo sfondo. Sono composti da uno strato trasmissivo che viene posizionato su un substrato di lamina metallica, dove è possibile osservare l'immagine che è visibile dallo stesso lato della sorgente luminosa. Questo tipo di sistema viene utilizzato anche per la creazione di immagini di grandi dimensioni, attraverso il montaggio di uno strato di ologramma di vetro o pellicola che viene posizionato su uno specchio, questa operazione viene effettuata precedentemente all'inquadratura dell'intero assieme. Attraverso questo sistema vengono create delle immagini

nitide e profonde, per una questione economica generalmente vengono spezzati in un più pezzi e grazie alle proprietà che contiene ogni singola parte è possibile conservare la scena registrata.

### 2.2.2 Ologramma di Riflessione

Nel caso degli ologrammi a riflessione al contrario di quelli a trasmissione, durante la fase di ricostruzione o riproduzione la fonte di luce bianca incandescente viene proiettata dallo stesso lato della lastra o della pellicola dove lo spettatore vede l'immagine, questa fonte luminosa viene posizionata ad angolo e ad una distanza specifica. Sono conosciuti sia come Volume Reflection o anche Ologrammi Lippmann, come nel caso dell'ologramma a trasmissione, la fase precedente alla registrazione della microstruttura è opposta alla configurazione di visualizzazione, di conseguenza l'oggetto di registrazione e i raggi di riferimento sono convergenti da lati opposti del supporto di registrazione, con l'esito che le frange tipicamente planari all'interno dello strato, hanno lo stesso comportamento di uno specchio, invece di avere l'effetto dispersivo prismatico degli ologrammi a trasmissione, infatti questa tendenza viene chiamata "specchio con una memoria"<sup>18</sup>. Questa tipologia di ologramma è molto costoso, poiché produce immagini ad altissima qualità. Si tratta di uno specchio monocromatico, che filtra la luce bianca poiché ciascuna lunghezza d'onda viene riflessa autonomamente, nel frattempo gli altri raggi delle lunghezze d'onda permeano attraverso lo strato. Questo poiché queste ultime coincidono con la frequenza selezionata dal reticolo planare, interagiscono in modo costruttivo secondo la Legge di Bragg con le successive interfacce di indice parallelo per generare la sommatoria riflessa della loro energia, mentre altre interferenze vengono scartate perché non rispettano i requisiti per le condizioni di interferenza costruttiva. È molto importante riconoscere che la Legge di Bragg segue il principio dell'interferenza costruttiva, mentre gli ologrammi sottili non seguono questo tipo di meccanismo, ma un processo completamente differente. L'ologramma a riflessione è quello che viene maggiormente esposto nelle gallerie di mostre, questa tipologia recentemente è stata prodotta con differenti tipi di colorazioni, infatti le immagini non si riescono a distinguere dagli oggetti reali, "Se uno specchio è l'oggetto, l'immagine olografica dello specchio riflette la luce

---

<sup>18</sup> Martin. R, "The Hologram: principles and techniques", Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, 2017.

bianca; se un diamante è l'oggetto, l'immagine olografica del diamante viene vista scintillare"<sup>19</sup>.

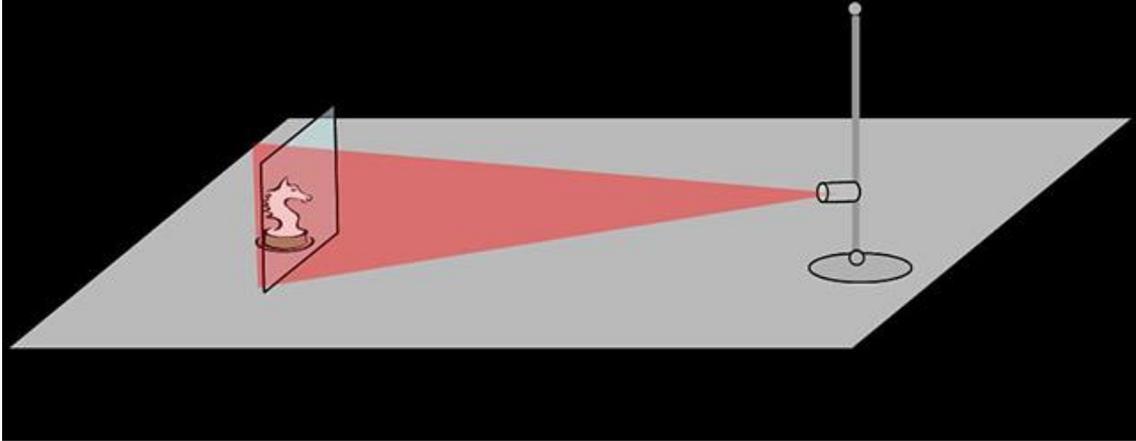


Figura 37\_ nella realizzazione di ologrammi a riflessione<sup>20</sup>, ((Integraf, <https://www.integraf.com/resources/articles/a-how-to-make-transmission-holograms>)

---

A fronte di quello che è stato detto, l'ologramma a riflessione ha la capacità di riflettere la luce precisamente selezionata di una certa lunghezza d'onda, ma che non è un'onda piana o di un oggetto complesso, ma il dispositivo potrebbe acquisire le sembianze di uno strato chiaro, quasi incolore, che rappresenta un'immagine in tre dimensioni o animata, di conseguenza lo strato di pellicola è ideale per i sistemi di sicurezza, in cui potrebbe essere realizzata una sovrapposizione grafica in modo da garantire la visione delle informazioni stampate su un documento, durante l'illuminazione "offBragg".

### 2.2.3 Ologramma ibrido

Durante gli anni con le varie ricerche in campo olografico, questo ha comportato la continua modifica delle varie applicazioni delle due tipologie di ologrammi ossia quelli a Trasmissione e quelli a Riflessione, con le differenti variazioni di questi ultimi sono nati gli ologrammi ibridi. Ne esistono tantissime tipologie che

---

<sup>19</sup> Ampo. A, "Hologram Types", EEWEB, Gennaio 2015.

<sup>20</sup> Nella realizzazione di ologrammi a riflessione, la piastra olografica viene posizionata tra la luce laser e l'oggetto nella seguente disposizione: oggetto - lastra olografica - laser

sono state sviluppate dopo gli anni '60 e tutt'oggi continuano a sperimentare, quelli maggiormente conosciuti sono:

- **Ologrammi in rilievo**, si tratta un ologramma a trasmissione arcobaleno che è impiegato soprattutto in quelle applicazioni per la sicurezza, come per esempio le carte VISA precedentemente citate, che sono dei modelli di interferenza bidimensionali che sono pressati su fogli sottili di polimeri. Esistono vari tipi differenti di ologrammi in rilievo: gli ologrammi in rilievo 2D che sono generati per mezzo di un'opera d'arte bidimensionale, con uno strato; gli ologrammi in rilievo 2D/3D sono costituiti da una moltitudine di opere d'arte bidimensionali per garantire la distanza consona per ogni strato dal piano della pellicola; gli ologrammi in rilievo 3D che hanno il fine di essere rappresentati tridimensionalmente; gli ologrammi in rilievo multiplex oltre ad essere costituiti da numerose opere d'arte hanno anche il supporto ulteriore di uno schermo LCD. La registrazione dell'ologramma madre la maggior parte delle volte viene realizzato con pellicole o lastre olografiche agli alogenuri d'argento, il primo viene nominato H1, si tratta di un ologramma a fessura che ha il compito di fornire la geometria per una copia di Rainbow, la fessura successivamente viene sfruttata per generare un ologramma a trasmissione Rainbow nominato H2 con un materiale estremamente fotosensibile che viene chiamato Photoresist. L'H2 a sua volta viene modificato con la soluzione ad incisione per far sì che le frange registrate si trasformino in un motivo in rilievo, infatti la peculiarità di questo ologramma è che è caratterizzato da scanalature a livello superficiale, poiché lo strato di nichel viene precedentemente poggiato sull'ologramma, ma successivamente staccato in questo modo sembra essere all'interno di uno spessore metallico. In questo modo il Resist viene argentato e conserva il motivo in rilievo elaborato precedentemente, ma permette alla superficie di essere elettricamente conduttiva. Durante il processo di generazione l'ologramma argentato viene posto all'interno di un serbatoio contenete elettroformatura e nichelato generando un Mother Shim, in questo modo lo strato madre viene staccato e rimesso nel serbatoio in modo che un altro strato si generi al di sopra e in questo modo diventa lo spessore figlio. Quest'ultimo viene inserito in una stampante olografica o in un macchinario che si occupa di goffratura. Come accennato precedentemente, dalla prima raffigurazione originale possono essere prodotti ulteriori ologrammi in serie, infatti lo spessore viene posizionato su un rullo, grazie all'alta temperatura e pressione, lo spessore comprime l'ologramma sul rotolo di materiale in termoplastica e in questo modo il motivo viene trasferito alla plastica, generandone un numero considerevole in un tempo ristretto. Poiché si tratta di un ologramma a trasmissione, deve essere posizionato un supporto

riflettente che viene realizzato generalmente con il materiale Mylar, per permettere il passaggio della luce attraverso l'ologramma, riflettere sul supporto e illuminare l'ologramma in rilievo dal retro. Per quanto riguarda il supporto può essere sia integrato nella plastica originale che passa nella stampante o nella macchina per la goffatura o in genere vengono utilizzati dei materiali plastici in serie.

- **Ologrammi integrali**, in questo caso potrebbe essere sia a trasmissione che riflessione, generato da una moltitudine di fotografie di un singolo oggetto, che viene fotografato in tutte le sue parti, potrebbe essere anche una persona, una scena all'aperto, una grafica computerizzate o un'immagine generata a raggi X. Nel processo di creazione generalmente l'oggetto che deve essere riprodotto viene scansionato da un'apposita telecamera e registra numerose viste. Ognuna di queste viene riprodotta su uno schermo LCD che a sua volta è illuminato da una luce laser e sfruttato come raggio dell'oggetto per la registrazione dell'ologramma in una lunga striscia di lastra olografica che è conosciuta come piastra olografica e questo processo viene ripetuto per generare tutte le altre viste. Quando si conclude questo procedimento, gli occhi umani percepiscono delle immagini da differenti ologrammi stretti e in questo modo si osserva un'**immagine stereoscopica**. Successivamente le videocamere vengono utilizzate per registrare la scena o il soggetto originale, questo metodo consente di manipolare le immagini direttamente attraverso il supporto di software per il computer.

**Immagine Stereoscopica**, è una scienza e tecnologia che tratta immagini e fotografie, deriva dal greco stereos che significa "solido" e skopeō ossia "guardare", di conseguenza significa guardare qualcosa di solido, fermo o tridimensionale, conosciuta anche come Imaging Stereoscopico è una tecnica che garantisce la visione di una scena o oggetto tridimensionale che genera nella visione umana un'illusione di profondità in un'immagine che realmente è bidimensionale, infatti il 3D viene riconosciuto anche con il nome di stereoscopico, in questo caso è una rappresentazione che viene soprattutto impiegata nell'ambito cinematografico. Nasce nel 1838 da Charles Wheatstone che costruisce uno stereoscopio, la parola deriva dal termine stereopsi che è nota come percezione della profondità, quando l'occhio umano capta le distanze differenziali tra i singoli oggetti nella propria linea di visuale si tratta di angolazioni leggermente differenti, questo viene percepito tramite dei segnali che aiutano a vedere i soggetti in questo particolare modo, infatti se c'è una sovrapposizione di oggetti l'osservatore riesce a capire quale sia l'elemento più vicino nella rappresentazione, infatti quelli che stanno dietro hanno delle dimensioni minori o vengono nascosti da quelli in primo piano e attraverso questa visione prospettica si genera un

effetto tridimensionale tramite la profondità, questo viene accentuato dalla visione degli oggetti in lontananza che appaiono maggiormente sfocati e con colorazioni meno intense, inoltre avviene lo spostamento verso l'estremità blu dello spettro.

Questa differenza prospettica viene percepita per mezzo della disparità binoculare e la stereopsi, anche nel caso dei film 3D come sopraccitati, vengono creati presentando due immagini separate che sono identiche, una per l'occhio sinistro e la rimanente per l'occhio destro, che vengono unite grazie al supporto di occhiali speciali, le riprese vengono portate avanti con una doppia lente, che simula i differenti punti di vista degli occhi umani, le due lenti sono posizionate alla stessa distanza della vista umana e le immagini vengono proiettate contemporaneamente da due proiettori sincronizzati, gli occhiali che vengono indossati presentano due lenti con due colorazioni differenti o sono polarizzati.

Il primo film è stato proiettato nel 1952 Bwana Devil, ma viene abbandonato molto presto a causa della scarsa resa delle riprese, la rinascita avviene negli anni '70. Ma ci sono ulteriori tecnologie che riescono a far percepire questo senso di tridimensionalità che non hanno necessità di occhiali speciali o altre strumentazioni. Ad oggi esistono due classi di display autostereoscopici, uno ha la funzionalità di tenere traccia dei vari spostamento del capo dello spettatore in modo che ogni occhio continui ad avere una vista differente, l'altra tipologia genera una moltitudine di prospettive per ogni fotogramma che viene presentato contemporaneamente, in modo che ogni occhio percepisce delle prospettive differenti. Nel caso dell'olografia gli occhi osservano due immagini ricostruite per mezzo di interferenze di luce, ed è come se vedessero l'oggetto ripreso normalmente, ma da due punti di vista leggermente differenti.

- **Interferometria olografica**, si tratta di un insieme di metodi per l'interpretazione di schemi di interferenza che sono creati da numerose onde, tra le quali almeno una singola di queste viene registrata tramite gli ologrammi. È una solida tecnica per la misurazione ottica coerente di analisi ad alta precisione delle deformazioni e sollecitazioni, ricostruzione del campione, determinazione di valori e indici di rifrazione, questa tecnica ha la peculiarità di favorire dei controlli non distruttivi. Sostanzialmente si possono misurare i cambiamenti che non si percepiscono a occhio nudo ossia quelli microscopici, sottoponendo l'oggetto che cambia a due esposizioni. Infatti questa tecnica viene applicata nelle misurazioni micro e nanometriche, spostamenti meccanici, indici di rifrazione, controllo di variazioni di vibrazione, per l'aumento di risoluzione delle immagini che vengono estrapolate dal microscopio, inoltre vengono impiegati anche per l'imaging

olografico tramite illuminazione incoerente, imaging di oggetti che non sono visibili a occhio nudo poiché occlusi, per lo studio soprattutto di oggetti, cellule e tessuti biologici trasparenti, si basa sulla registrazione tramite l'interferenza di due onde coerenti. Queste due immagini interagiscono tra loro e si possono osservare delle frange sull'oggetto che svelano lo spostamento del vettore.

Nel caso dell'interferometria olografica, trattandosi di un'immagine virtuale è sottoposta direttamente ad un confronto con l'oggetto reale. Anche gli oggetti invisibili grazie a questo metodo possono essere percepiti per esempio come il calore e le onde d'urto, infatti vengono impiegate numerose applicazioni ingegneristiche in ambito dell'olometria, ma anche mediche per differenti tipologie di esami di cellule per esempio. Nel caso della ricostruzione di oggetti trasparenti è necessario l'utilizzo di un algoritmo, come nel caso di un flusso di gas.

Prima della nascita dei dispositivi fotosensibili digitali, l'interferometria era molto diffusa e la registrazione avveniva all'interno di una lastra fotosensibile, che supera notevolmente le capacità di risoluzione spaziale di quelle digitali e non comporta l'interferometria olografica automatizzata. In particolare si è evoluta dopo l'invenzione di dispositivi di accoppiamento di carica CCD che lavorano con una matrice fotosensibile bidimensionale, questa garantisce la possibilità di utilizzare CCD per la registrazione digitale di schemi di interferenza ma soprattutto riportarli in forma di ologrammi, il tutto viene completato con il supporto di un computer che si occupa della ricostruzione numerica e questo metodo viene chiamato olografica digitale DH.

Esistono quattro metodi per lo sviluppo dell'interferometria olografica:

il primo metodo consiste come quello citato precedentemente ossia delle due esposizioni, che viene generato per mezzo della creazione di due ologrammi, l'oggetto che è soggetto allo studio prima dell'esposizione che potrebbe comprendere variazioni di temperatura, deformazione, sollecitazione dell'area locale e l'oggetto dopo la successiva esposizione. Al termine di ciò l'oggetto viene registrato sulla lastra fotosensibile mentre quando vengono utilizzati dei metodi digitali sulla matrice fotosensibile vengono registrati due array di intensità di interferenza che viene generata dalle onde di riferimento dell'oggetto in esame. Al fine di questo processo si possono osservare sulla lastra i risultati dell'interferenza che si è verificata in differenti punti temporali;

Il secondo metodo che è quello in tempo reale, l'onda diffusa causata dall'oggetto viene registrata nel suo stato originale, in questo caso non viene creato un ologramma secondario, ma quello rimanente viene ripristinato e

illuminato con un unico raggio di riferimento, così facendo i due fronti d'onda dispersi dall'oggetto entrano in contatto formando un'immagine in stato alterato e questa soluzione permette di osservare il processo di deformazione dell'oggetto;

Il terzo metodo che è quello della media temporale permette di sistemare e agire sui carichi periodici dell'oggetto, in questo caso per permettere questa sistemazione, l'esposizione dell'ologramma avviene per una durata molto elevata, in modo da garantire il controllo e il calcolo della media dell'effetto del caricamento periodico;

Il quarto metodo è quello strabogolografico che è molto simile al secondo, inizialmente avviene la registrazione dell'oggetto nello stato originale senza apportare variazioni, successivamente vengono effettuate delle fluttuazioni periodiche dell'oggetto in esame, durante ogni periodo di variazione, viene sottoposto ad illuminazione da un breve impulso luminoso, in questo modo si riesce a reperire informazioni sulla posizione e lo stato dell'oggetto nelle fasce di oscillazione arbitraria.

Ci sono ulteriori metodi, ma in un qualche modo sono legati a quelli precedentemente citati.

Anche la nascita e lo sviluppo delle tecnologie digitali ha incrementato l'evoluzione dell'interferometria, ma i metodi di registrazioni sono leggermente variati, il primo grande progresso recentemente portato avanti è quello dei nuovi algoritmi che favorisce lo sviluppo di immagini digitali e del deep learning che permette la generazione di ologrammi ad alta definizione. Ciascun sistema di interferometria viene creato con il supporto di alcuni componenti come una sorgente di radiazioni, un interferometro e un fotorilevatore con una matrice bidimensionale. A seguito della digitalizzazione le informazioni arrivano all'interno del computer che ha il compito di rielaborarle ulteriormente.

La tecnica di registrazione del fronte d'onda che nel 1964 viene proposta da Leith e Upatnieks, grazie a computer ad alta velocità è notevolmente migliorata, in questo modo si possono eseguire delle operazioni matematiche per mezzo di una matrice di dati discreti che descrivono il comportamento dell'interferenza di due onde, ossia un ologramma. Infatti si ha la possibilità di ripristinare l'oggetto iniziale in forma digitale e gli algoritmi vengono classificati come "intelligenza artificiale".

- **Ologrammi multicanale**, in questa tipologia di ologramma la caratteristica è quella di poter osservare scene completamente differenti, grazie alla variazione nell'angolo di luce nello stesso ologramma. È un sistema molto funzionale per enormi memorie di Computer Generated Holography (CGH), sono molto importanti per ottica moderna che ha attirato l'attenzione di

numerosi ingegneri e ricercatori per impiegarli nei sistemi elettronici e ottici. Sono ideali per l'archiviazione in cui è richiesta una grande quantità di elaborazione di dati. Questi metodi vengono conosciuti anche come multiplexing sono costituiti da due caratteristiche comuni: la prima è l'impiego di quattro parametri liberi;

la seconda è che sono generati per la creare la ricostruzione di immagini in direzioni ortogonali, con il fine di evitare delle sovrapposizioni tra le immagini che vengono recuperate. Ma allo stesso tempo la tecnologia multiplexing utilizza un determinato tipo di sovrapposizioni per innescare delle operazioni di elaborazione ottica durante la fase di recupero, infatti con questa determinata tecnica è possibile la realizzazione di quattro immagini codificate, dove viene introdotta la variazione per aumentare la quantità di oggetti codificati immagazzinati.

Si tratta di una tecnica multicanale per la divisione cellulare e il suo funzionamento avviene con l'area di base che è costituita da celle e presenta una suddivisione in segmenti verticali che compongono delle sottocelle. Ognuna di questa presenta i requisiti per funzionare come una cellula intera in questo modo viene utilizzata per la codifica intera di un unico oggetto. L'altezza di ogni sottocella è una costante e in questo modo non si genera nessun tipo di sovrapposizione orizzontale tra i segmenti verticali, in questo modo ognuno è indipendente e come citato prima ognuna lavora come una cella intera e ha i requisiti per memorizzare un oggetto intero, l'unico limite è il numero di queste, infatti si deve tenere conto di quest'ultimo poiché c'è una quantità massima di rettangoli graficabili che dipende soprattutto dal supporto tecnico disponibile. Un altro aspetto negativo è il problema del filtraggio per definire e selezionare solo gli oggetti desiderati, poiché la complessità sta nella richiesta di allineamento critico tra un filtro e l'ologramma, però fino ad oggi sono stati possibili solo degli ologrammi con due divisioni per cella.

- **Ologrammi generati dal computer**, si tratta sempre di una olografia che viene generata da computer CGH, ormai dopo numerosi anni di scoperte e ricerche si è studiato pienamente l'ambito matematico da applicare per la generazione di ologrammi, è appurato che ci sono tre elementi essenziali ossia, l'immagine, la luce e l'ologramma. Con questi elementi se due sono predeterminati, quello mancante può essere calcolato. Se abbiamo tutte le informazioni sul raggio di luce parallelo e della sua lunghezza d'onda e il sistema a "doppia fenditura" che sarebbe l'ologramma semplice, in queste determinate condizioni possiamo calcolare la figura di diffrazione. Anche nel caso in cui si hanno a disposizione le informazioni riguardanti il modello di diffrazione e il sistema a doppia fenditura, possiamo calcolare la lunghezza

d'onda della luce, in questo modo si ha la libertà di immaginare qualsiasi tipo di schema. A seguito della decisione sulle caratteristiche della lunghezza d'onda da utilizzare per l'osservazione, in questo caso si può far progettare l'ologramma dal pc. L'olografia generata dal computer è anche conosciuta come CGH, viene impiegato per la realizzazione di elementi ottici olografici (HOE) per la scansione, divisione, messa a fuoco e il controllo della luce laser che è processo generato in molti dispositivi ottici come per esempio un comune lettore CD. Le caratteristiche più importanti per la generazione di questo tipo di ologrammi include: la modellazione matematica, ossia l'ologramma viene generato dalla modellazione matematica dello schema di interferenza che si crea grazie all'interazione della luce con l'oggetto che viene ripreso, un altro aspetto importante è quello del campionamento, per la conversione del modello di interferenza in una rappresentazione discreta che si possa memorizzare digitalmente. Non è altro che una simulazione numerica della diffrazione, molto intensiva in termini computazionali. Una volta che avviene questa codifica l'ologramma viene trasformato in un formato che è adatto alla stampa o la visualizzazione, come un modello binario posto su un modulatore spaziale di luce chiamato SLM, per modulare l'intensità o la fase del raggio di luce, dopodiché avviene la ricostruzione, di conseguenza attraverso l'illuminazione dell'ologramma con una sorgente di luce coerente, l'immagine viene ricostruita per mezzo dell'interferenza del raggio di riferimento con l'ologramma. Successivamente a questa operazione la resa finale può essere affinata attraverso delle tecniche iterative, per esempio algoritmi di trasformata di Fourier in modo da migliorare la qualità dell'immagine. Tuttavia, gli ologrammi che sono presenti oggi purtroppo hanno un limite per quanto la qualità perché l'attuale tecnologia SLM consente di proiettare solo poche immagini a bassa risoluzione su piani sperati con bassa risoluzione di profondità.

Questo tipo di tecnologia non è recentissima, poiché viene sperimentata già nel 900, intorno agli anni '60, in quel periodo l'olografia è solamente un processo ottico generato dal semplice utilizzo della luce laser per creare schemi di interferenza registrati su pellicole fotografiche. Intorno agli anni '70 i ricercatori portano avanti numerose scoperte per quanto riguarda i computer per la generazione di ologrammi, per la creazione di immagini maggiormente complesse e definite. Nel 1966 viene creato il primo ologramma da Emmett Leith e Juris Upatnieks un vero e proprio computer digitale. Questo scatena un vero e proprio interesse nel portare avanti questo tipo di ricerche, infatti tra gli anni '70 e '80 i ricercatori cercano di perfezionare questa nuova tecnologia e utilizzano i progressi in campo informatico per la creazione di immagini olografiche ad alta risoluzione.

Successivamente durante gli anni '90 e 2000, questo tipo di olografia viene impiegata in particolare modo nel campo della sicurezza e di tutte le misure di anticontraffazione, soprattutto nell'imaging medico, l'archiviazione ottica e la stampa 3D, tutt'oggi sta continuando ad evolversi.

I vantaggi di questa tipologia di ologrammi generata dai computer soprattutto in campo ottico, riguardano:

la flessibilità, poiché possono essere facilmente trasformati, riprogrammati e aggiornati senza la necessità di ricreare un ulteriore ologramma fisico, infatti sono ideali per numerose applicazioni che hanno la necessità di attuare delle trasformazioni e modifiche in tempo reale.

Un altro fattore molto importante è la resa grafica di questa tipologia di ologrammi, che sono caratterizzati da un'alta risoluzione rispetto a quelli ottici, che sono fortemente limitati dal punto di vista dimensionale dovuto soprattutto alle dimensioni dei supporti disponibili, in questo modo quelli digitalizzati raggiungono dei livelli di precisione elevatissimi quando si tratta di immagini tridimensionali. Anche la strumentazione è ridotta rispetto all'olografia ottica che ha la necessità di utilizzare lenti, specchi e laser, al contrario gli CGH sono generati utilizzando semplicemente un computer e una configurazione ottica. Questo permette di produrre dei prodotti meno dispendiosi, anche il processo risulta essere più semplice nel processo di imaging olografico.

Un altro aspetto importante è la durabilità, poiché possono essere conservate le informazioni e questa ne garantisce la replica infinita senza la perdita di alcun dato, mentre nel caso degli ologrammi ottici sono fragili si possono danneggiare molto semplicemente o sono soggetti a degradazione dopo un certo periodo di tempo.

La possibilità di scalabilità è fondamentale poiché garantisce la riduzione o l'ingrandimento delle immagini verso l'alto o verso il basso per soddisfare più applicazioni possibili, dai progetti di ricerca su piccola scala ai prodotti commerciali su larga scala. I CGH vengono soprattutto utilizzati in campo medico per l'analisi attraverso l'imaging, nei display olografici, per i dispositivi di sicurezza e per l'archiviazione dei dati. In sostanza hanno sostituito tutti i processi che precedentemente si facevano manualmente, andando a garantire una maggiore produzione in serie e hanno ridotto i tempi.

Nel caso degli ologrammi digitali sono stati creati quelli con acronimo DH, che sono costituiti da matrici di numeri complessi generalmente scalari, dove attraverso una superficie avviene la loro mappatura nel momento in cui avviene la creazione e la ricostruzione, attraverso le configurazioni ottiche, servendosi di sensori di fotocamere su dispositivi ad accoppiamento di carica, o mediante calcoli numerici all'interno di un computer, ossia l'olografia CGH. Inoltre c'è la possibilità di ricreare una visualizzazione limitata o un rendering parziale in un

display 2D, nel caso di riproduzione di una scena 3D, la modulazione della luce viene organizzata da un DH che successivamente deve essere discretizzata e stampata o programmata all'interno di un dispositivo che ha il compito di modulare la luce spaziale aggiornabile ossia il modo longitudinale singolo, SLM. In questo processo una caratteristica molto importante per il consumo di scene 3D è quello di avere uno spazio elevato tramite la produzione della larghezza di banda SBP che viene creata dal dispositivo di modulazione. Non è altro che il prodotto dell'angolo di visualizzazione massimo e delle dimensioni massime della scena, ma se questo SBP è ridotto l'angolo di visualizzazione o le dimensioni della scena sono limitate.

Ci sono tre tipologie di utilizzo dei display, i primi sono quelli che vengono posizionati sulla testa che vanno a rendere più semplici i requisiti SBP con l'avvicinamento SLM agli occhi dello spettatore, essendoci a disposizione una piccola area per l'occhio in questo caso è più semplice coprire l'intera scatola oculare e gestire meglio i vari effetti, poiché devono occuparsi di un campo limitato ossia quello di raggio di movimento dell'occhio.

Uno degli esempi più conosciuto è HoloLens 1, creato da Microsoft nel 2016 viene spedita per lo sviluppo ufficiale negli Stati Uniti e in Canada la versione non ufficiale di pre-produzione degli occhiali intelligenti con display montato sulla testa, è un visore utilizzato per la realtà aumentata AR e la realtà mista MR, fa parte della produzione Development Edition. I dispositivi RM usano spesso il termine "ologramma" per descrivere la realtà visiva intensificata che forniscono e utilizzano l'ottica diffrattiva come guida d'onda nel visore.

Successivamente sono stati prodotti i display come citato precedentemente, con il rilevatore di tracciamento oculare, che è generato dalla combinazione di un SLM di SBP limitato con l'orientamento del raggio che viene semplificato dal tracciamento oculare e dall'ottica attiva per andare a creare un SLM di dimensioni importanti per uno o addirittura altri spettatori, un famoso esempio è quello di SeeReal Technologies un'azienda che si trova in Germania che si occupa dello sviluppo di questo potentissimo display monocromatico delle dimensioni di venti pollici che dà il via alla primordiale produzione di display e proiettori tridimensionali andando a sostituire completamente i display stereoscopici normalmente usati, ma che causano per esempio l'affaticamento degli occhi a causa della mancata corrispondenza tra la convergenza degli occhi e la messa a fuoco delle lenti degli occhi, che in gran parte viene risolta dalla tecnologia SeeReal.

Per far sì che avvenga la progettazione di un display con queste caratteristiche, l'approccio classico ossia l'olografia generata da computer CGH comporterebbe una richiesta di risoluzione esorbitante ossia 250000 volte maggiore alla capacità

televisiva odierna ad alta definizione HDTV. Inoltre l'elaborazione rapida dei dati richiede un computer molto potente per gestire solo un singolo display.

I primi che si sono occupati di ricercare una tecnologia di questo calibro sono stati il Massachusetts Institute of Technology MIT e il Cambridge, MA. Alla fine delle loro ricerche hanno sviluppato un prototipo di display che genera delle immagini olografiche elettroniche interattive e si tratta di una delle prime tecnologie di questo genere al mondo, anche in questo caso si sono serviti del CGH ad alta risoluzione, anche se limitato nella produzione contemporanea di ologrammi.

Successivamente l'azienda SeeReal decide di utilizzare una nuova tecnica che viene chiamata "tecnologia della finestra di visualizzazione" e dimostra il calcolo dell'ologramma in tempo reale sulla scheda grafica commerciale per la generazione di trenta fotogrammi al secondo.

Si sofferma sull'idea che siano utili solo le informazioni dirette alle pupille degli occhi dello spettatore che sono necessarie per sviluppare la scena dell'immagine. Funziona con l'intervallo di periodicità dove è possibile vedere la scena 3D, che viene generata dalla diffrazione dove il pixel pitch del display lo determina, questo intervallo viene chiamato finestra di visualizzazione VW, dove l'ologramma essendo codificato all'interno del display va a ricostruire la scena, infatti la generazione della finestra di visualizzazione avviene per mezzo delle interferenze delle onde luminose che emergono dall'ologramma e inoltre convergono all'interno dell'intervallo di periodicità. La percezione di questa scena che viene ricreata è quella della visione attraverso una finestra virtuale, ossia una finestra senza vetro. Questo piccolo intervallo non è sufficiente per la visione di una scena 3D con entrambi gli occhi, viene impiegata come VW per un singolo, mentre per l'altro è dotato della sua personale, utilizzando il multiplexing temporale. Infatti più spettatori si muovono in base alla posizione degli occhi dello spettatore, garantendo la visione di un'immagine completa.

Infatti la tecnologia è molto complessa rispetto ad un ologramma tradizionale, poiché vengono codificati tutti i punti della scena tramite dei sotto ologrammi che fanno riferimento ad ogni singolo punto. Questo permette di codificare le informazioni necessarie e visibili in qualsiasi momento all'interno della VW, in questo modo viene ridotto il calcolo computazionale, inoltre riduce il problema della gamma dinamica e inoltre aumenta notevolmente e garantisce l'alta qualità dell'immagine. Grazie a SeeReal si abbatte l'ostacolo dell'introduzione della video olografia utilizzando display a cristalli liquidi per riprodurre ologrammi. Mentre nel caso dei display a parallasse totale non viene ridotta l'SBP e in questo caso il campo visivo massimo supportato è destinato ad un numero illimitato di spettatori, di recente sono diventati accessibili tramite e i primi prototipi di DH per la metasuperficie.

In questo caso si deve tenere conto dell'Effetto Parallax, si tratta di un effetto che viene considerato dalla tecnologia di animazione e che utilizza gli effetti della percezione umana. Lo scopo è quello di far percepire la profondità di campo con l'aiuto di dispositivi di rappresentazione bidimensionale.

L'origine della parola parallax che deriva da *παράλλαξις* ossia *parállaksis* dal greco antico che significa per accavallamento, non è altro che la percezione di un oggetto osservato che sembra in movimento, di conseguenza cambia posizione nel campo visivo e questo dipende dal punto di vista dell'osservatore, un esempio pratico per capire a pieno l'effetto è il "salto del pollice" che avviene nel modo seguente:

per prima cosa si solleva il braccio teso con il pollice della mano che viene rivolto verso l'alto proprio davanti al viso e successivamente non rimane altro che aprire e chiudere alternandoli occhio sinistro e occhio destro. Tutto l'ambiente circostante attorno al pollice rimane immobile, ma al contrario il pollice sembra saltare da una parte all'altra, questo effetto è semplicemente dovuto alla rispettiva distanza tra i due bulbi oculari che in alternanza vengono aperti e chiusi e hanno una differente visuale prospettiva dell'oggetto osservato.

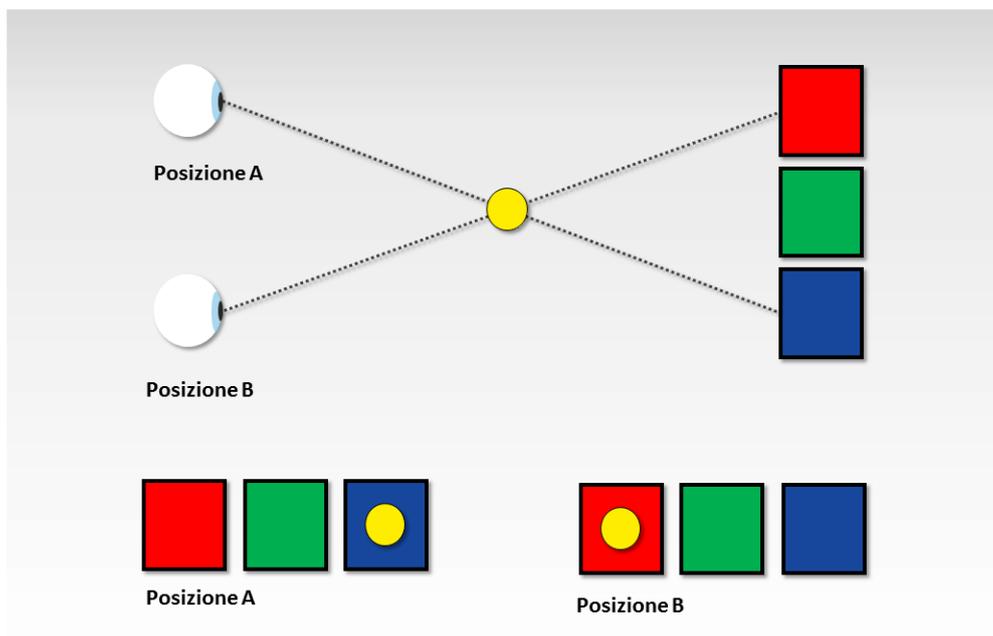


Figura 38\_ effetto parallax <sup>21</sup>, (Digital Guide IONOS, <https://www.ionos.it/digitalguide/siti-web/web-design/effetto-parallax-i-siti-web-che-si-sviluppano-in-profondita/>)

<sup>21</sup> Quando si osserva con l'occhio sinistro la posizione A, il punto giallo appare davanti allo sfondo blu scuro, se al contrario si guarda con l'occhio destro la posizione B, il punto giallo appare davanti allo sfondo rosso.

Nella vita quotidiana non siamo spesso soggetti a questo genere di effetti, o meglio sono poco percepibili, infatti gli oggetti che stanno maggiormente vicini al nostro campo visivo si muovono più rapidamente, mentre nel caso di quelli più lontani sono maggiormente lenti a tratti immobili, questo effetto viene percepito soprattutto durante i viaggi in treno e in macchina.

Per esempio nel caso dei cartelli stradali quando ci si muove in macchina e si ha la percezione che passino veloci, mentre gli oggetti lontani come per esempio le montagne o le colline sembrano immobili.

Questo tipo di effetto nasce già dagli anni '80 con lo sviluppo di videogiochi, dove hanno ricreato l'effetto del "side scrolling", in modo da creare un effetto tridimensionale sempre con il supporto di dispositivi bidimensionali. Nel caso dei videogiochi di Super Mario o Jungle Hunt, questo effetto viene sviluppato con la sovrapposizione di tre sfondi differenti posti a distanze uguali, che scorrono sullo schermo a differenti velocità, mentre il punto di vista del giocatore è concentrato lateralmente. Successivamente questo effetto viene impiegato anche per il web design già all'inizio degli anni 2000, con la consolidazione grazie al sito web [nikebetterworld.com](http://nikebetterworld.com) nel 2011 che ora non è più presente. Oltre a queste varie tecnologie citate esistono ulteriori varianti e combinazioni, infatti possono variare le geometrie, ossia possono essere piane, curve o cilindriche, questo può essere creato sia dal dispositivo di visualizzazione ma anche dalla forma coerente del fronte d'onda della sorgente di illuminazione, infatti un display a parallasse completo può avere le sembianze di una superficie come quella di un televisione ossia piatta o leggermente curvata o addirittura ci sono dei display da tavolo a trecentosessanta gradi, ma esistono anche alcune tecnologie che vengono dichiarate come olografiche, ma in realtà non soddisfano i requisiti richiesti, come per esempio il Fantasma di Pepper che viene citato nel primo capitolo e si tratta semplicemente di un'illusione ottica o delle piramidi olografiche, quello che generano non può essere ritenuto ologramma poiché non mostrano delle immagini 3D, ma allo stesso tempo non utilizzano nessun tipo di luce coerente che è fondamentale in campo fisico-tecnico per la generazione di ologrammi.

### **2.3 Lo stato dell'arte dei sistemi di olografia digitale**

Questi sistemi di imaging funzionano secondo la duplicazione fisica della distribuzione di luce, negli ultimi anni ci sono stati numerosi passi in avanti per questa tipologia di tecnologia, soprattutto nei cosiddetti display elettro-olografici.

Nel caso nei display olografici vengono impiegati dei dispositivi a cristalli liquidi generalmente su silicio, che vengono guidati otticamente e si basano su specchi olografici a dispersione polimerica e acusto-ottici, inoltre sono in commercio sistemi di visualizzazione elettro-olografici completi.

È stata fatta una stima dell'impatto dei display 3D, considerando un effetto importante nel futuro. Al contrario i display precedentemente esaminati che trattano il sistema della stereoscopia anche se vengono dichiarati disponibili per due decenni, non stanno raggiungendo il successo commerciale desiderato, a causa del disagio visivo che comportano. Anche se fino al 2010 si è continuato ad usare questo tipo di display, nonostante si siano sperimentate delle tecniche di eye-tracking.

Ci sono altri tipi di tecnologie emergenti dove non è necessario l'utilizzo di visori, ma è possibile percepire le proiezioni ad occhio nudo:

### 2.3.1 La cortina fumogena olografica

Questo proiettore olografico 3D proietta l'ologramma su uno strato di fumo che viene generato artificialmente che sostituisce lo schermo olografico. L'immagine che genera è simile a quella di un fantasma, infatti la percezione è quella di un ologramma traslucido, questo tipo di soluzione va a creare un effetto variabile in base ai fattori ambientali come vento e luci, la proiezione viene effettuata preferibilmente da dietro piuttosto che da sotto.



Figura 39\_ cortina fumogena, (Vetrina digitale, <https://vetrinadigitale.it/blog/cosa-e-proiettore-olografico-3d-tecnologia/>)

### 2.3.2 Proiezioni su schermi d'acqua

Sono conosciuti anche come water screen, ci sono differenti metodi di creazione delle immagini animate con vari media compresi il video, l'illuminazione ed i laser.

L'aspetto più importante è l'emozione iniziale che dona questo genere di spettacolo, con l'utilizzo di uno schermo d'acqua nel mezzo di una vasca d'acqua può sorprendere e incantare il pubblico.

Il Drop water screen ossia lo schermo ad acqua a cascata è particolarmente adatto per eventi interni, la struttura di questo schermo è costituita da una barra metallica che è composta da tanti ugelli da cui fuoriesce l'acqua con una determinata pressione, questi sono posizionati nella parte superiore, e l'acqua arriva attraverso tubi che pescano da una vasca sottostante.

Un'infrastruttura idraulica galleggiante viene generalmente creata su misura per l'evento, questo genere di proiezioni possono avvenire al di sopra di un canale, una piscina, un bacino idrico e lago, è chiaro che all'interno sono maggiormente controllabili, soprattutto la resa è migliore perché non si verificano dei fattori ambientali variabili, come per esempio il vento, di conseguenza sono delle proiezioni che in ogni caso possono essere proiettate sia all'esterno che all'interno. Questo dispositivo è composto da una raccolta con un sistema di pompe che vanno a spingere l'acqua come detto precedentemente con l'applicazione di ugelli, in questo modo garantiscono la generazione di più cascate che vanno a generare la superficie di proiezione. Le retroproiezioni di immagini o video, 2D o 3D, laser e giochi di luce provengono invece da proiettori professionali ad alta luminosità, che restituiscono immagini definite e vivide, l'unico limite di questo genere di animazioni è che devono essere messe in scena con il buio totale. È esistente un'ulteriore tipologia di proiezione che è caratterizzata da un meccanismo differente viene chiamata Fan Shape Water Screen o anche conosciuta come schermo d'acqua a ventaglio, è usualmente adatto a eventi, concerti e presentazioni all'aperto. L'acqua, attraverso una o più pompe e un ugello centrale, viene spruzzata dal basso verso l'alto creando un semicerchio, anche in questo caso sulla superficie che si genera è possibile proiettare delle immagini animate e per la resa migliore le proiezioni devono avvenire in un ambiente buio.



Figura 40\_ sistema schermo d'acqua ventaglio, (Spettacolo Laser Entertainment, <https://www.laserentertainment.com/waterscreen/>)

---

### 2.3.3 Reti olografiche

Le reti olografiche sono caratterizzate da una tenda quasi trasparente di luci LED che generano delle immagini con effetto olografico in una varietà di colori. Queste immagini 3D si occupano di ricreare questo genere di immagini in movimento. Vengono impiegate per una moltitudine di applicazioni, dai display di piccole dimensioni sulla copertura di edifici caratterizzati da immagini colorati e vengono sfruttate anche in ambito pubblicitario, attirando i possibili acquirenti attraverso la loro luminosità, ma non si tratta di un vero proiettore olografico.

### 2.3.4 Schermi Oled Semitrasparenti

Viene impiegato soprattutto per gli schermi 2D che sembrano essere tridimensionali, con la capacità di creare un ologramma sullo schermo, per ricreare questo genere di effetto deve essere utilizzato uno schermo della trasparenza del 40 %, ma questo non garantisce la visuale corretta degli sfondi a causa della troppa trasparenza.



Figura 41\_ schermi oled semitrasparenti, (Prodotto YoleGroup, <https://www.yolegroup.com/industry-news/lg-displays-transparent-oled-to-debut-at-general-elections/>)

---

### 2.3.5 Piramide olografica

Questo genere di piramide è costituita da due tipologie: la prima è quella fai da te, che è possibile realizzare con un foglio di acetato trasparente e ricavare quattro facce a forma di trapezio isoscele, una volta uniti i lati vano a generare un prisma, viene capovolto e questo permette la riflessione delle quattro immagini che vengono riprodotte da un semplice smartphone e tramite il principio di riflessione va a ricreare l'immagine tridimensionale animata all'interno di questa piramide, grazie al posizionamento a quarantacinque gradi dei lati della piramide;

La seconda tipologia è maggiormente professionale, dove l'ologramma viene realizzato per mezzo di cubi olografici professionali, dove all'interno è presente una piramide. Questo genere di soluzione sembra una riproduzione dell'effetto molto simile al Fantasma di Pepper (citato precedentemente), simulando l'impressione di un ologramma 3D che galleggia all'interno di questo prisma, ovviamente quest'ultima soluzione ha una qualità maggiore rispetto a quella precedente, infatti questo denota come ancora la tecnologia olografica si basi sull'illusione di una tecnica che veniva utilizzata nell'800 per rappresentazioni teatrali.

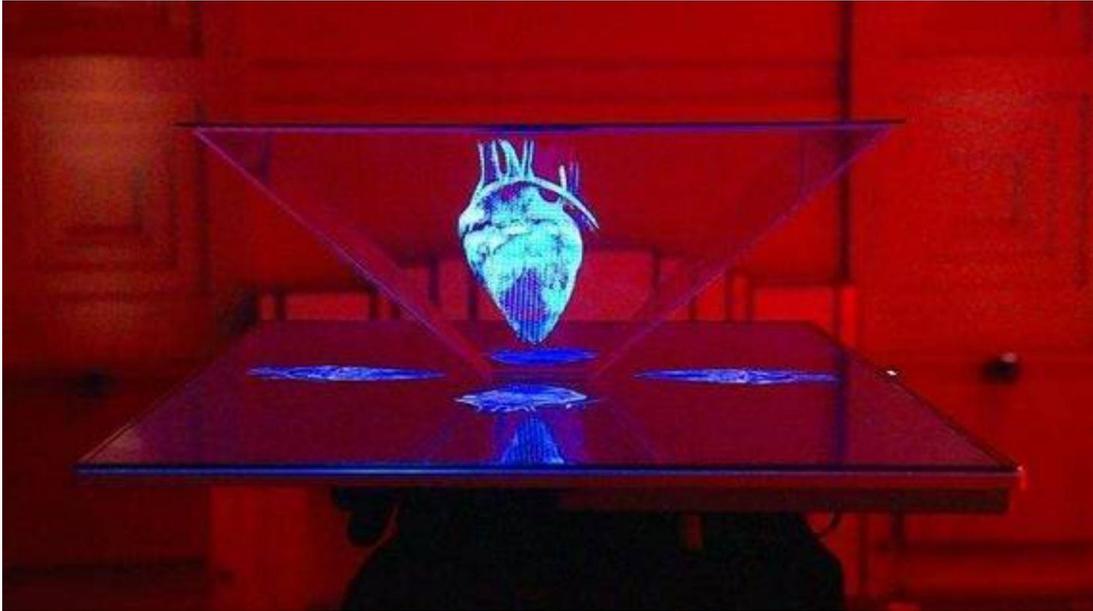


Figura 42\_ piramide 3D, ( Digital Day, Mero. G, 2016, <https://www.dday.it/redazione/21117/ologrammi-nella-tv-del-futuro-la-bbc-ci-crede>)

---

### **2.3.6 Pannelli LED trasparenti**

Una delle soluzioni olografiche più recenti è costituita dai display a LED trasparenti. Questo genere di dispositivi sono utilizzabili in un'ampia gamma di applicazioni come vetrine, aeroporti, musei, fiere, spettacoli, installazioni artistiche, centri commerciali, il prezzo dipende dalla distanza tra i pixel e la luminosità determinano la qualità e il prezzo di queste soluzioni. Si sono sviluppati molto velocemente e i display a LED trasparenti si prospettano sempre più interessanti sia dal punto di vista della resa grafica ma anche di potenza, di efficienza energetica e naturalmente di prezzo.



Figura 43\_ display LED trasparenti, (prodotto Live Design, <https://www.livedesignonline.com/news/ldi-new-products-muxwave-transparent-led-screen>)

---

### 2.3.7 Ventola olografica

Si tratta di un dispositivo che è costituito da un rotore con ancorate quattro pale, che per mezzo della rotazione e dell'accensione e spegnimento dei LED che si trovano su ciascuna di queste, generano delle immagini molto realistiche e brillanti che dall'occhio umano vengono percepite tridimensionalmente. Possono essere applicate in vari ambiti, come per esempio in ambito commerciale, medico ma anche per quanto riguarda l'istruzione.



Figura 44\_ wall di ventole olografiche, (Vetrina Digitale, <https://vetrinadigitale.it/blog/come-funziona-un-proiettore-olografico-3d/>)

---

### **3 Percezione visiva**

#### **3.1 Come il cervello umano rielabora le informazioni visive**

Come quanto trattato precedentemente tutti gli studi avviati per quanto riguarda la percezione visiva dell'ambiente che circonda l'essere umano è legata a tantissime discipline, soprattutto alle ricerche che sono state perseguite in ambito artistico per lo sviluppo di opere d'arte che hanno sempre avuto il fine di far percepire attraverso le rappresentazioni la realtà circostante con un livello di realismo molto elevato. Prendendo in considerazione la serie di Fibonacci, la proporzione aurea e il pi greco, sono alcuni esempi di come la natura faccia parte di una formula matematica, infatti tutti gli esseri viventi includendo piante, fiori, animali, musica e persone fanno tutti riferimento a dei precisi criteri.

Un aspetto molto importante è quello della percezione, che viene alimentato soprattutto dalla memoria. I processi percettivi soprattutto della vista e dell'udito sono fondamentali per cogliere tutte queste informazioni e potrebbero essere alimentati grazie agli ologrammi, ossia immagini tridimensionali virtuali, che rimangono inviolabili. Numerosi studiosi si sono occupati dello studio del cervello umano, soprattutto in merito allo sviluppo dell'olografia, poiché si aveva e ci si continua a chiedere come possa questa tecnologia interagire in modo positivo con l'apparato percettivo del corpo umano.

Uno dei ricercatori più importanti è Karl Pribram, si tratta di un neuroscienziato austriaco che è venuto a mancare di recente, le sue ricerche continuano a permettere il chiarimento di tanti dubbi che sono sorti in passato sull'attività cerebrale e la connessione psiche-soma. In passato si è sempre pensato che i ricordi fossero localizzati in precise aree del cervello, ma intorno al 900 vengono condotti degli studi che smentiscono questa ipotesi e dimostrano che nonostante l'asportazione di alcune parti di cervello la memoria rimane intatta. A fronte di queste teorie Pribram ipotizza che i ricordi sono sparsi e non hanno delle postazioni prestabilite, ossia trovano spazio in tutto il cervello, l'unico problema è che in quegli anni, non si hanno le competenze corrette per spiegare questo tipo di teorie, per questo motivo per un determinato periodo non si riesce a dare una risposta di questi fenomeni.

Solo a metà degli anni '60 viene costruito un ologramma e tutti questi dubbi vengono proprio chiariti da questa nuova invenzione, che innesca una serie di ragionamenti nel mondo dei ricercatori, come descritto nel primo capitolo l'olografia è un fenomeno che viene generato dall'interferenza di due onde, che molto banalmente si può spiegare quando vengono gettati due sassi sull'acqua e vengono generate da questi due oggetti due serie di onde che generano un'espansione concentrica e interagiscono passando l'una attraverso l'altra. Questo intricato fenomeno costituito da una distribuzione di creste e avvallamenti generate da queste collisioni viene dichiarato schema di interferenza, anche la luce può creare questo genere di fenomeno.



Figura 45\_ fenomeno interferenza onde sull'acqua, ( Borborigmi, 2023, Photo Bucket <https://www.borborigmi.org/>)

Infatti con la nascita del laser negli anni '60 del '900, si riesce a ricreare questo fenomeno perché si tratta di una fonte luminosa pura e coerente, che dà origine a questi schemi di interferenza. Per la creazione dell'ologramma, avviene la registrazione dello schema di interferenza che viene prodotto da un determinato oggetto che allo stesso tempo viene registrato come immagine sulla pellicola. Come spiegato precedentemente nella differenza tra la fotografia e l'ologramma è che ogni porzione della pellicola olografica contiene tutta l'informazione per creare un'immagine completa, di conseguenza questo aspetto spiega l'estensione totale dei ricordi in tutte le porzioni del cervello e in questo modo se ogni parte dell'ologramma contiene tutte le informazioni quindi non c'è il rischio di perderle, il cervello presenta le stesse peculiarità, ossia in ogni parte di quest'ultimo si può trovare un'informazione completa che può generare quel determinato ricordo.

Infatti all'interno della mente umana è insito un principio olografico, poiché l'informazione visiva che riceviamo viene elaborata dalla conformazione dei neuroni, che sono costituiti da piccoli alberi che vengono chiamate arborizzazioni dendritiche, quando un messaggio elettrico arriva sul fondo di questo ramo si estende con le sembianze di una ramificazione e funzionano come le onde generate dall'acqua che si incontrano e si incrociano l'una sull'altra.

A seguito di queste osservazioni lo stesso Pribram si accorge che i neuroni vanno a creare una rete caleidoscopica ricca di rami di interferenza e ipotizza in base a quanto revisionato che sarebbero potuti essere ciò che fornisce al cervello le proprietà olografiche.



Figura 46\_ come si comportano le arborizzazioni dendritiche, (Studio di medicina naturale e biofisica, Capasso. M, 2016, <http://www.marinacapasso.it/memoria-e-processi-percettivi-funzionano-tramite-ologrammi/>)

---

Nel 1966 Pribram pubblica la sua scoperta attraverso un articolo sulla natura olografica del cervello e presenta i concetti principali che sono rimasti identici fino alla sua morte nel 2015, lui stesso dichiara le seguenti parole «L’ologramma era sempre stato presente nel carattere di fronte d’onda della connettività delle cellule cerebrali, solo non avevamo avuto l’intuito per rendercene conto». <sup>22</sup>

Inoltre un laser con differente raggio di incidenza che colpisce illumina varie porzioni della pellicola olografica, questo permette la registrazione di più immagini, la mente dell’uomo è molto simile al puntare un raggio laser sulla pellicola per poter visualizzare un determinato ologramma.

Nel caso di una lastra olografica su cui viene registrata l’immagine, per poter essere visualizzata deve essere illuminata da un raggio di riferimento, la luce

---

<sup>22</sup> Capasso. M, “*Memoria e processi percettivi funzionano tramite ologrammi*”, Studio di Medicina Naturale e Biofisica, Gennaio 2016, <http://www.marinacapasso.it/memoria-e-processi-percettivi-funzionano-tramite-ologrammi/>.

viene captata dall'occhio dell'osservatore che mette a fuoco l'immagine per formarla in modo realistico sulla retina e le differenti porzioni dell'immagine vengono generate dall'interferenza delle onde luminose focalizzate su una parte della retina. Nel caso dell'ologramma arcobaleno citato nel capitolo precedente, la percezione cambia a seconda della posizione dell'osservatore e dall'interferenza prodotta dalle onde luminose, questo permette la totale esplorazione dell'oggetto in modo tridimensionale.

La visualizzazione olografica avviene in questo modo, ci sono dei fattori molto importanti, che portano alla produzione di tutti i segnali di profondità visiva naturale come per esempio:

### 3.1.1 Occlusione

conosciuta come interposizione o sovrapposizione, si occupa e garantisce attraverso lo sviluppo di informazioni la percezione della profondità di oggetti vicini e quelli maggiormente distanti, dove quelli lontani sono generalmente occlusi in parte dagli oggetti più vicini. L'altro effetto è quello del completamento amodale, completamento perché si ha la percezione che l'oggetto occluso stia cercando di completarsi e amodale perché l'oggetto che in parte viene nascosto è presente nella nostra esperienza ma non è percepibile nella modalità sensoriale.

### 3.1.2 Sistemazione oculare

Dipende dalla profondità generata dalla tensione del muscolo anulare che risiede attorno al cristallino ciliare dell'occhio umano. È la capacità di mettere a fuoco naturalmente gli oggetti vicini, si tratta della funzione oculare della lavorazione articolare attiva tra la lente. Si parla anche di Sistemazione Relativa, ossia l'accomodamento degli occhi che si concentrano entrambi su un oggetto, infatti l'uomo ha una visione binoculare.

### 3.1.3 Convergenza prospettica

è data dalla profondità dell'angolo di sguardo dei bulbi oculari, che tende a portarli verso l'interno, quindi si verifica un cambiamento nello spazio della loro posizione. Un'altra componente importante è la **stereopsi** che come accennato prima è generata dalla differenza di prospettiva che percepiscono i due occhi che sono posizionati a diversa distanza dall'oggetto che stanno osservando, infatti la differenza è dovuta alla distanza che viene chiamata interpupillare.

Tutti questi segnali di profondità possono essere restituiti alla vista umana, tramite la visione di immagini che vengono proiettate all'interno di display olografici che riescono a riprodurre una visione fedele della realtà che ci circonda, ricreando delle immagini 3D ad alta definizione e senza restrizioni di scena, come nel caso degli ologrammi ottici tradizionali dove l'immagine che viene creata non può essere cambiata o modificata. Queste caratteristiche così esclusive, distinguono l'olografia da altri metodi di imaging plenottico, ossia l'imaging stereoscopico o nel caso del campo chiaro per chi soffre del conflitto di accomodamento-vergenza, la causa è generata dall'assente corrispondenza tra la distanza focale statica dell'immagine virtuale che viene creata con il supporto di display e le distanze che vengono captate degli oggetti 3D che dipendono dalla scena renderizzata, nel caso dell'imaging non si verifica questo genere di conflitto, ma può solo produrre dei volumi di rendering finiti vincolati e c'è la necessità di trovare delle soluzioni alternative per l'occlusione.

La **Prospettiva Atmosferica** è conosciuta anche come prospettiva aerea, si tratta di una prospettiva che viene usata anche in olografia, ma risale alla tecnica visiva inventata da Leonardo da Vinci che utilizzava mentre dipingeva i suoi quadri, con il fine di generare un'illusione ottica andando a donare alla scena rappresentata la profondità in modo da farla sembra sempre più realistica, come nel caso dei paesaggi in lontananza. Tendenzialmente tra l'osservatore e l'oggetto c'è dell'aria che provoca una variazione cromatica, questo fenomeno viene osservato da Leonardo che trova una tecnica per creare per questo genere di velature che si trovano in natura, quando si osservano soprattutto nei paesaggi. Si tratta della tecnica dello sfumato, che consiste nella sovrapposizione alla stesura iniziale di pittura di delicati strati di pigmenti dalle colorazioni bianche, donando un effetto simile a quello naturale, in questo modo si realizzano i contorni degli oggetti in primo piano maggiormente sfumati, mentre quelli in secondo piano sono più o meno sfocati di conseguenza meno nitidi. A questo viene abbinata la percezione di una prospettiva aerea che è come se lo sguardo dell'osservatore sia ad un'altezza maggiore rispetto a quella dello sguardo stando in piedi e in questo modo si ha la percezione di una maggiore visione del luogo o dell'oggetto che si sta osservando, infatti come precedentemente detto generalmente con la prospettiva aerea vengono rappresentati i paesaggi.

### 3.1.4 Costanza Dimensionale

La dimensione degli oggetti dipende dalla distanza alla quale si trovano e come la retina riesce a percepirli, ma questo non dipende solo dall'oggetto che viene osservato, ma anche dall'ambiente in cui viene posizionato, da ulteriori figure e

oggetti che stanno all'interno della scena e sulle distanze assolute e relative. Il tutto viene captato dalla dinamica degli occhi, dove vengono inviate registrate le informazioni dai muscoli extraoculari nei movimenti di convergenza o divergenza e negli alloggi. Quando si guarda un punto lontano e ci sono degli oggetti che vengono messi in sequenza, questi devono essere rappresentati dal più grande al più piccolo, soprattutto per dare il senso di profondità, mentre se vengono realizzati della stessa misura si perde la percezione prospettica e tutti gli oggetti soprattutto quello più lontano sembra di dimensioni maggiori rispetto agli altri. In base a questo la vista umana è facilitata nella percezione di queste variazioni e punti di vista, grazie ai fattori cognitivi, infatti generalmente se nella scena si osservano degli oggetti che sono noti all'osservatore è più semplice mantenere la costanza dimensionale.

Un altro fenomeno visivo che porta alla maggiore percezione della tridimensionalità, ma soprattutto è strettamente legata al movimento e all'olografia, infatti alcuni proiettori olografici hanno preso ispirazione da questo sistema dell'apparato visivo umano, non è altro che la **Persistenza Retinica**.

### 3.1.5 Persistenza retinica

È un fenomeno ottico che genera delle immagini persistenti che vengono registrate dalla retina attraverso le cellule nella loro memoria un tempo di circa 1/18 di secondo. Tutto questo attraverso la composizione della retina che è costituita da numerosi fotorecettori che permettono di cogliere queste immagini, inoltre sono presenti cinque milioni di coni che sono utili per la visione diurna e per cogliere le colorazioni, inoltre centoventi milioni di bastoncelli per la visione notturna e per la visione del bianco e nero.



Figura 48\_ fonte di luce statica, (Alamy, <https://www.alamy.it/fotos-immagini/scia-di-stelle-scintillanti.html?sortBy=relevant>)



Figura 47\_ fonte di luce in movimento, (Alamy, <https://www.alamy.it/fotos-immagini/scia-di-stelle-scintillanti.html?sortBy=relevant>)

Esistono due tipologie di persistenza retinica:

- La persistenza positiva, ossia quando la vista umana percepisce un punto preciso all'interno di un'immagine, la retina in questo modo ne percepisce e ne registra il colore e questa viene conservata per circa cinquanta millesimi di secondo anche tenendo gli occhi chiusi.
- La persistenza negativa, si tratta di una forte esposizione della vista umana ad una fonte di luce molto intensa, in questo modo vengono danneggiati i bastoncelli e di conseguenza questa immagine che viene registrata rimane nella visione per alcuni secondi, infatti questa sensazione di prova quando avviene per un tempo prolungato la visione del sole.

La frequenza di fotogrammi è il numero di immagini fisse che vengono impiegate durante ogni genere di animazione e queste possono variare, ci sono due frequenze di ologrammi comuni che sono chiamate "on twos" o conosciute anche come "on ones", cambia la quantità di fotogrammi, nel primo caso vengono rappresentate dodici immagini al secondo per animazioni dove i personaggi appaiono in modo uniforme e fluido, mentre nella seconda soluzione 24 fotogrammi al secondo viene impiegata per animazioni caratterizzate da movimenti semplici, anche nei film viene sfruttata questa animazione. Inoltre è possibile velocizzare maggiormente i fotogrammi e di conseguenza è possibile lavorare anche "on threes" che viene impiegata per scene lente generalmente per i cartoni Anime, "on fours" e anche "on sixes", maggiore è il numero di fotogrammi e maggiore sarà il taglio dell'immagine.

Lo studio di questo tipo di visione viene studiata soprattutto nel ventesimo secolo con l'avvento del cinema che scatena numerosi dibattiti, infatti per numerosi anni si è pensato che la visione cinematografica potesse avvenire solamente attraverso questa capacità dell'occhio umano. Infatti da queste discussioni si è tratta la conclusione che i film sono generati da una sequenza di immagini fisse ossia di frame, in questo modo la retina ha la capacità di conservare per alcuni secondi delle immagini fisse nella sua memoria per alcuni millesecodi e unendo questa moltitudine di immagini fisse autonomamente va a generare una sensazione di movimento tra ogni immagine fissa. Di conseguenza molti ricercatori non si sono soffermati a questa prima analisi, trovando un'alternativa alla persistenza retinica, poiché il movimento viene percepito dall'occhio anche con una sola frequenza di cinque immagini al secondo, con una frequenza tale da quanto dichiarato precedentemente si dovrebbe vedere solamente una successione di immagini fisse poiché la retina ha la capacità di salvare solamente un'immagine per cinquanta millesimi di

secondo, in conclusione si può dichiarare che il cervello interpreta le immagini ma immagina anche il movimento e non si tratta solo di un meccanismo ottico. Esiste un altro fenomeno che genera all'interno del cervello l'illusione ottica del movimento e si chiama "Effetto Beta", che non è altro che un effetto ottico elementare che avviene tramite la successione di due quadri simili che vengono posizionati diversamente e in questo modo si ha la sensazione di movimento. Questo genere di effetti o principi che sono stati precedentemente spiegati sono fondamentali per la comprensione dal punto di vista percettivo dell'uomo quando ha l'opportunità di osservare delle proiezioni olografiche. Questa tecnica viene impiegata in numerosi ambiti e sta alla base della magia di tutti i tipi di animazione, perché le scene appaiono fluide e omogenee all'occhio umano poiché non riesce ad elaborare tutti i collegamenti tra le immagini statiche, in passato è stato motivo di ampi dibattiti in campo cinematografico allora si potrebbe seguire la stessa prassi in campo olografico, questo tipo di percezione è fondamentale per il funzionamento dei ventilatori olografici poiché è proprio la condizione ideale per la generazione di immagini 3D che sembrano fluttuare nell'aria, nell'era moderna infatti questo viene soprattutto percepito quando vengono proiettate delle immagini con le nuove tecnologie dei proiettori olografici che sono basati su questo principio di persistenza della visione, anche lo schermo led del televisore. Uno dei display olografici che si basa su questo principio ha la forma ad elica con le pale a LED che ruotano ad altissima velocità, infatti il moto rotatorio va a creare l'illusione ottica che va a presentare un'immagine nitida, fluida e dal movimento continuo.

### **3.2 Persistenza retinica attraverso ventola olografica 3D**

Il dispositivo che crea questo genere di percezione è il proiettore olografico, si tratta della tecnica di olografia a proiezione, questo dispositivo è conosciuto anche come ventola olografica o ventaglio olografico, a led rotanti che ha la capacità di ricreare delle immagini bidimensionali con differenti animazioni, che l'occhio umano percepisce tridimensionalmente, la caratteristica che lo differenzia da un proiettore normale è il fascio di luce che viene proiettato.

Questi tipi di dispositivi sono realizzati in differenti dimensioni, maggiore è l'immagine e migliore è la resa, infatti possono essere coordinati più proiettori sullo stesso wall.

Il funzionamento è molto semplice, il proiettore è composto da un rotore che permette a quattro pale di girare in senso circolare, in questi bracci sono posizionati dai cinquanta ai cento led RGB che si accendono e si spengono e cambiano colorazione ad altissima velocità, il tutto in contemporanea alla

rotazione delle pale che sono in grado di riprodurre dei video ad altissima risoluzione ma soprattutto una varietà di sedici milioni di colori. La resa finale è generata soprattutto dalla velocità di rotazione a 670 giri al minuto.

Le pale sono resistenti e snelle, quando ruotano diventano invisibili all'occhio umano, formando una superficie 2D che non si percepisce dove i led si accendono e spengono, in cui vengono proiettate le immagini e i video.

L'effetto della profondità che viene recepito dall'occhio umano è dato dalla trasparenza, infatti quando viene proiettata un'immagine o un video sembra che gli oggetti stiano fluttuando a mezz'aria, poiché è possibile vedere attraverso questi oggetti quello che sta dietro, infatti sembrano quasi materici.

Questa illusione crea generalmente notevole stupore agli osservatori che si trovano davanti a questo genere di spettacoli, andando a generare quel "Sense of Wonder" precedentemente citato, poiché possono essere ritenuti coinvolgenti e unici, è molto indicato per esporre dei brand, o per la proiezione di materiali per quanto riguarda la formazione, inoltre un'altra peculiarità è quella di poter percepire questo tipo di rappresentazioni con la luce naturale, garantendo una resa molto soddisfacente e rispetto agli altri tipi di dispositivi non c'è bisogno di visori, smartphone o device di altro genere, ma si possono vedere ad occhio nudo. Questa tecnologia crea la fantasia che si rispecchia con la realtà, dove vengono creati degli oggetti virtuali che prendono vita e si materializzano, andando a rendere possibile quella visione non più esclusiva solo del mondo cinematografico, come l'apparizione del Droide R2-D2 che proietta l'ologramma della Principessa Leila nel film di Star Wars del 1977, come successivamente in altre tipologie di film.

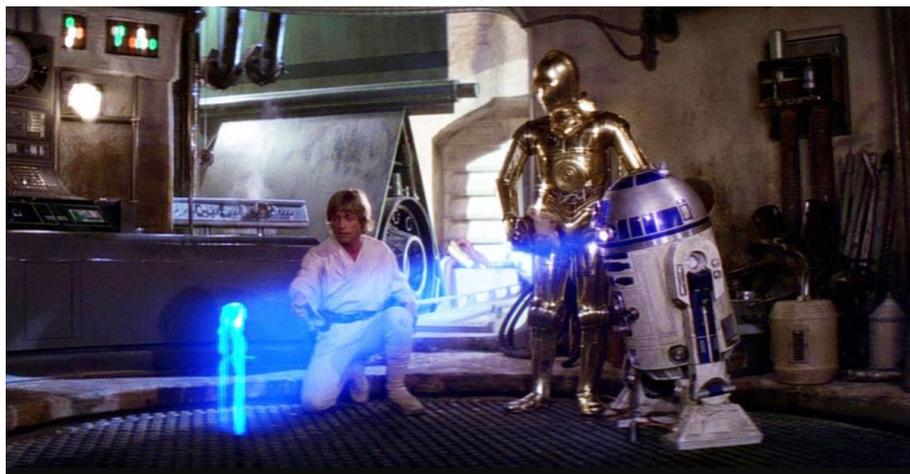


Figura 49\_ ologramma Principessa Leila Star Wars 1977, (NerdPool, <https://www.nerdpool.it/2022/06/14/obi-wan-kenobi-gli-impatti-sullologramma-di-leia-tutto-verra-spiegato-negli-ultimi-episodi/>)

Questo tipo di tecnologia viene frequentemente riproposta soprattutto nei film della Marvel per esempio in Iron Man, ad oggi si sta cercando di farla diventare una realtà tangibile e affascinante, infatti questo dei proiettori è un passo sempre più vicino all'integrazione di queste figure virtuali nella vita di tutti i giorni. Permettono l'immersione in parte in una differente realtà sensoriale, rendendo l'osservatore maggiormente interessato a ciò che guarda e questo è un affetto fondamentale, inoltre è un sistema che combina tecnologia, fisica e ingegneria al fine di creare questi contenuti stupefacenti.

Il sistema si compone da tre componenti:

- Un dispositivo per la visualizzazione delle immagini che vengono proiettate di qualità HD, questo display olografico è costituito da quattro pale che attraverso la rotazione generano un display invisibile all'occhio umano.
- Un software per la gestione dei contenuti prodotti
- Strumento di manipolazione grafica che in modo semplice permette agli utenti di andare a creare dei contenuti 3D senza avere delle specifiche competenze in modellazione 3D.



Figura 50\_ Componenti proiettore olografico, (Vetrina Digitale, <https://vetrinadigitale.it/blog/come-funziona-un-proiettore-olografico-3d/>)

---

Si possono proiettare ologrammi 3D con immagini della dimensione di cinquantasei o settantacinque centimetri, c'è la possibilità sia di utilizzare il proiettore autonomamente e individualmente, o come rete di dispositivi che sono

controllati a distanza. Inoltre si possono sincronizzare più dispositivi, che vanno a creare un wall che genera ologrammi di dimensioni importanti, potrebbe raggiungere le dimensioni di un elefante.



Figura 51\_ wall ventole olografiche Hypervision, (Vetrina Digitale, <https://vetrinadigitale.it/hypervsn/>)

### 3.3 Gli stadi della percezione

La percezione è l'elaborazione delle sensazioni elementari che vengono raccolte dagli organi di senso, durante la fase di elaborazione l'informazione inviata da qualsiasi senso, il cervello la codifica, la organizza, la riconosce e la interpreta. Questo processo viene suddiviso in stadi:

- Stadio primario, è quello dello stimolo visivo di cui ne vengono descritte e definite caratteristiche fisiche attraverso processi visivi primari, senza precisarne il significato, l'uso e la funzione, questo primo studio è stato approfondito dalla psicologia della Gestalt o Teoria della forma che si sofferma sulle esperienze definendole non caotiche o composte prodotto di una moltitudine di parti, ma sono ben strutturate, infatti la percezione non è costituita dalla somma di elementi sensoriali ma è una forma complessiva dello stimolo visivo;

- Stadio secondario, si tratta di uno stimolo strutturato grazie alle conoscenze che la persona raccoglie durante la sua vita, che vengono depositate all'interno della memoria e in questo modo favoriscono il riconoscimento di alcuni oggetti per esempio.

Le modalità di confronto sono conosciute come Bottom Up che si tratta dell'elaborazione dal basso verso l'alto e poi c'è Top Down che è l'elaborazione dall'alto verso il basso, sono due differenti modi di elaborazione dei dati sensoriali che vengono raccolti quando ne entriamo in contatto:

- Il Top Down si basa a livello cognitivo e vengono coinvolti attenzione e memoria, infatti il lavoro viene svolto soprattutto da quest'ultima;
- Bottom Up si basa sugli stimoli esterni e le caratteristiche percettive, di conseguenza lavora tramite dati, che partono a livello sensoriale, grazie a varie parti dello stimolo.

### **3.4 Come percepisce le immagini l'occhio umano**

Tutto ciò che ci circonda viene percepito dalla vista è il recettore sensoriale che viene utilizzato maggiormente e tutte le informazioni almeno per il 70 % vengono raccolte dal cervello, all'interno della mente cosciente. Dopo la raccolta delle informazioni il cervello avvia la costruzione del quadro complessivo, anche se è in costante aggiornamento.

La prima fase è quella dell'acquisizione da questa viene generata la percezione, che coincide con il tentativo del cervello di interpretazione, questo avviene tramite l'aggiunta, la sottrazione, la riorganizzazione e la codifica di tutte le informazioni sensoriali per poter interagire con il mondo esterno. Ogni parte del cervello capta ogni singola percezione, proprio per questo motivo ogni persona ha una visione differente del mondo, correlato alle qualità percettive come forma, movimento e visione del colore.

Per generare questo tipo di meccanismo è necessario partire dalla prima fase ossia quando i raggi luminosi raggiungono la cornea che è una superficie trasparente dalla forma convessa che potrebbe essere identificata come finestra dell'occhio, infatti questa parte ha un ruolo fondamentale per la rifrazione della luce, ossia il cambiamento di direzione, che indirizza i raggi luminosi verso un punto focale e successivamente raggiungono l'iride che è la parte colorata dell'occhio che ha la funzione di regolatore di apertura della pupilla per dosare l'ingresso di luce, questo meccanismo può essere paragonato all'apertura di una macchina fotografica, che adatta l'occhio alle differenti condizioni di luminosità dell'ambiente circostante che modifica le dimensioni a seconda dell'intensità in ambienti scuri si dilata mentre in ambienti di elevata luminosità si restringe,

successivamente questi raggi raggiungono il cristallino, che è una lente biconvessa flessibile che si trova nella parte retrostante dell'iride, la sua peculiarità è quella di riuscire ad adattare la forma per garantire la messa a fuoco degli oggetti a differenti distanze per mezzo della contrazione e il rilassamento dei muscoli ciliari che sono posizionati attorno al cristallino e il vitreo dove successivamente si forma un'immagine capovolta e da convergere sulla retina che è la parte retrostante dell'occhio sensibile alla luce, la peculiarità della retina è la composizione di differenti strati cellulari di cui fanno parte anche quelle gangliari che sono disposte con lo scopo di formare una zona priva di fotorecettori chiamata punto cieco, dove non vi è possibilità di percepire la luce e queste hanno il compito di raccogliere delle informazioni visive, in questo modo, vengono trasformati in impulsi elettrici e viaggiando attraverso le vie ottiche arrivano alla corteccia occipitale, avviene la conversione degli stimoli luminosi in informazioni neurali detti anche punti immagine, il cervello va a codificare le informazioni in entrata andando a ricostruire delle immagini che gli occhi hanno captato e successivamente le interpreta per ricostruire rappresentazioni del mondo che ci circonda, si tratta di un processo molto complesso che ci permette di vedere singoli oggetti, persone, volti e scritte. La retina è fondamentale e si può ritenere il primo passo per lo studio della luce, in cui si possono elencare tre piani funzionali, ossia un piano di percezione e due di trasmissione. Il piano di percezione è composto dai fotorecettori, si tratta di cellule fotosensibili alle radiazioni luminose, delineati da bastoncelli e coni che si trovano all'interno della retina.

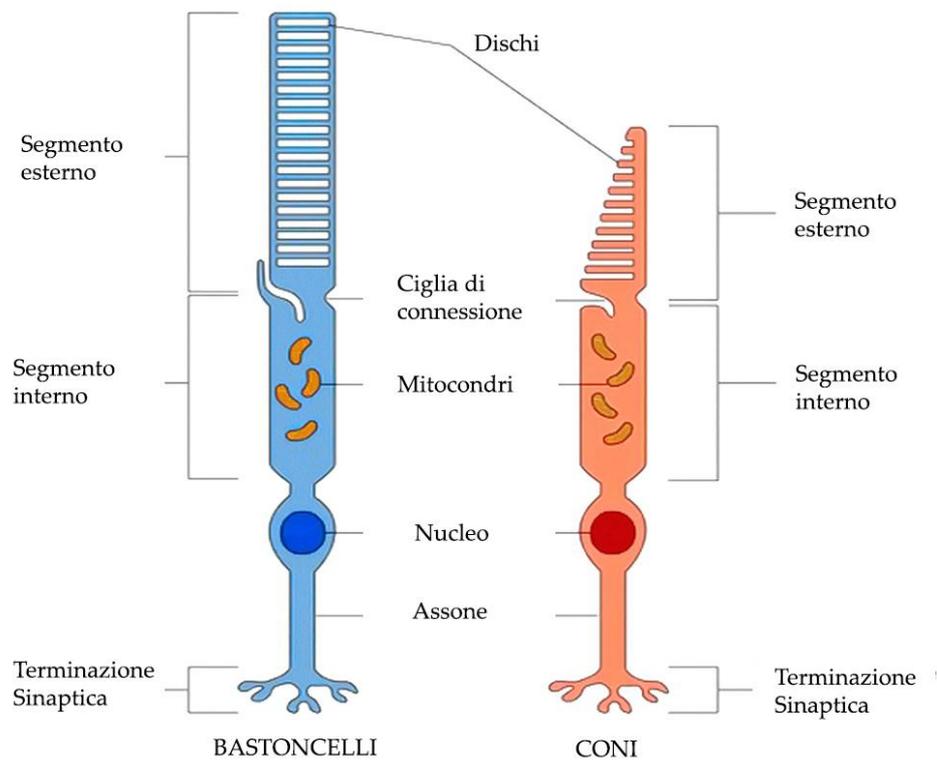


Figura 52\_ struttura bastoncelli e coni, (Medicina online, dott Loiacono, 2018, [https://medicinaonline.co/2018/01/28/fotorecettori-differenza-tra-coni-e-bastoncelli/#google\\_vignette](https://medicinaonline.co/2018/01/28/fotorecettori-differenza-tra-coni-e-bastoncelli/#google_vignette))

Nella fovea sono presenti solo i coni, mentre in periferia i bastoncelli sono maggiormente numerosi. La differenza tra i due è che i bastoncelli sono insensibili ai colori, infatti sono responsabili della visione notturna o anche conosciuta come visione scotopica, mentre i coni sono responsabili della visione a colori e molto sensibili all'illuminazione intensa conosciuta come visione fotopica, ma entrambi hanno eguale comportamento nella conversione dell'energia luminosa in mutamento del potenziale di membrana, quando la luce colpisce la retina i fotorecettori si iperpolarizzano a causa dell'assorbimento di radiazioni elettromagnetiche per conto del fotopigmento localizzato nella membrana del segmento esterno dei fotorecettori.

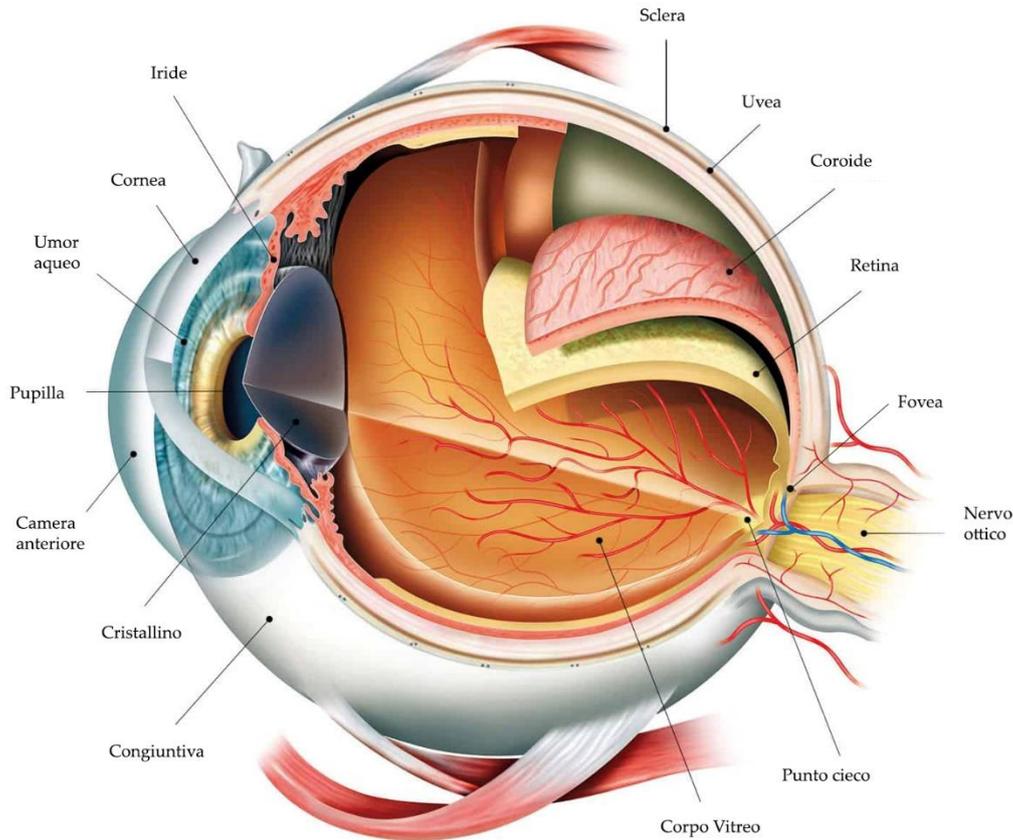


Figura 53\_ composizione occhio umano, (Dott Francesco Nizzola, <https://www.oculistanizzola.it/occhio/anatomia-occhio/>)

Questo meccanismo permette anche la percezione del colore, che è un processo molto complesso, che varia a seconda delle condizioni di cambiamento dell'illuminazione, che è strettamente correlata alle lunghezze d'onda poiché la luce che viene recepita dall'occhio umano è una forma di energia radiante che si compone di particelle energetiche di piccole dimensioni conosciute come Quanti o Fotoni che raggiungono l'occhio umano che successivamente vengono interpretate tramite il cervello come colore. Trattandosi di una vera e propria radiazione elettromagnetica è composta da onde di differenti lunghezze, frequenze e ampiezze, quando una lunghezza è compresa tra 400 e 700 nm, la luce rientra nello spettro delle radiazioni visibili e di conseguenza può essere osservata dall'occhio umano. In base alla lunghezza gli occhi percepiscono delle colorazioni differenti, intorno ai 400 nm si ha il blu, mentre magenta e verde fino al rosso quando la radiazione arriva ai 700 nm, questo perché la vista presenta solo tre ricettori, si parla di Metamerismo ossia il fenomeno che permette la

visione di tonalità differenti del colore degli oggetti che dipende dalla quantità di luce che illumina questi ultimi, si tratta di un meccanismo che è strettamente correlato alla visione umana che dipende dalla percezione del colore ma soprattutto è legato alla componente emotiva-psicologica del soggetto che osserva, di conseguenza anche la percezione dei colori è estremamente soggettiva, questo processo non si verifica quando l'occhio umano viene sottoposto alla visione di oggetti con una composizione cromatica prevalentemente nera, poiché è acromatico, ma riesce a stabilizzare il colore delle altre componenti cromatiche. È necessario tenere conto di due fattori, la luce riflessa dall'oggetto e l'illuminazione circostante, si tratta di una situazione incerta, poiché il cervello ha il compito di constatare se l'oggetto è così come appare oppure se è alterato dall'illuminazione circostante e in questo modo deve tenere in considerazione questa variabile e inserirla come parte di informazione, in modo da comprendere cosa si sta guardando. Non è tanto importante capire la tipologia di tonalità, ma di quale oggetto si tratta anche in condizioni di luminosità estremamente variabile. Poiché il cervello funziona per coerenza di colore, nonostante abbia difficoltà nella distinzione del colore vero e proprio di un oggetto. Come nel caso di una superficie bianca che viene illuminata con una luce dalla tonalità rossa in questo caso assumerà la colorazione rossastra, stessa situazione con un'altra colorazione, per il riconoscimento della superficie bianca, si deve indagare sul colore della fonte luminosa, proprio per questo motivo i colori degli oggetti sono alterati da ciò che li circonda.

Gli oggetti vengono riconosciuti completi e non come un insieme di parti, infatti questo è dovuto all'elaborazione di tutte le informazioni tramite il cervello, questo avviene tramite alcune regole:

- Regola della prossimità, ossia quando gli elementi più vicini vengono percepiti come parte di un insieme
- Regola della Somiglianza, ossia la tendenza a raccogliere elementi che sono simili o ripetuti
- Regola della Continuità, quando viene seguito l'allineamento generale degli elementi di una figura, ossia la tendenza, una volta che è avvenuta la percezione generale del disegno, infatti seconda la nuova interpretazione viene percepito in differente modo.
- Un altro fattore molto importante è l'organizzazione della figura sfondo, infatti quando viene osservata un'immagine si percepisce l'oggetto che è posizionato in primo piano, come figura principale e ciò che sta dietro viene percepita come sfondo. In questo caso gli indizi non sono chiari e per questo motivo il cervello generalmente ha delle difficoltà nel decidere quali forme sono figura e quali fanno parte dello sfondo.

Un aspetto molto importante è che il mondo che ci circonda è tridimensionale, ma la percezione che si ha sulla retina delle immagini è bidimensionale. Proprio per questo motivo tutti gli indizi che vanno ad indicarci come ricreare un mondo tridimensionale sono quelli elencati nel precedente sotto capitolo sulla percezione visiva, ossia: indici monoculari fisiologici che riguarda (accomodazione, ossia la variazione di curvatura del cristallino che garantisce la messa a fuoco di un oggetto) e cognitivi (interposizione, elevazione, ombreggiatura e prospettiva lineare), indici binoculari che includono (convergenza oculare, che riguarda la distanza di un oggetto dalla vista, infatti tanto più quest'ultimo è vicino e maggiore sarà la convergenza degli occhi per garantirne la visuale e disparità retinica è la tendenza della formazione delle immagini sulla retina che a causa della differenza di posizione dei due occhi viene percepita diversamente, da questa fusione si ha la percezione tridimensionale). Queste informazioni rafforzano il concetto che il meccanismo percettivo degli umani è estremamente complesso, soprattutto l'elaborazione da parte del cervello delle informazioni visive e sensoriali, ma è fondamentale per avere una percezione completa del mondo esterno e interagire con esso, infatti il processo di formazione delle immagini all'interno dell'occhio umano è estremamente affascinante, soprattutto poiché coinvolge numerose strutture e funzioni, la cornea, l'iride, il cristallino e la retina sono fondamentali per garantire alla luce di essere concentrata sulla retina e trasformata in segnali neurali elaborati successivamente dal cervello, che in una frazione di secondo elaborano l'immagine.

### **3.5 Comunicazione visiva**

Quando si parla di comunicazione visiva, ci si sta riferendo ad una tipologia di comunicazione che si basa su elementi visivi per garantire la comprensione di informazioni e idee. Generalmente viene utilizzata in differenti ambiti come per esempio quello dell'istruzione, con l'assistenza di ausili visivi con il fine di facilitare la comprensione e la memorizzazione degli argomenti trattati coinvolgendo maggiormente il pubblico. In questo modo si entra sempre più nel campo delle competenze trasversali, infatti sempre più frequentemente nella vita quotidiana si ha la necessità di ricorrere all'utilizzo di ausili e contenuti visivi per supportare lezioni, e-mail, documenti e presentazioni per riunioni, per garantire una comunicazione il più efficace possibile, inoltre si deve tenere conto di molteplici aspetti come per esempio gli elementi visivi da integrare e le buone

pratiche che sono fondamentali per la buona riuscita della comunicazione nei confronti nel pubblico che osserva e ascolta.

La comunicazione visiva efficace avviene tramite immagini, in questo modo si riesce ad ottenere un effetto comunicativo molto efficace in un tempo ridotto, grazie al potere del richiamo e alla repentina comprensione e la semplicità di memorizzazione. Inoltre un fattore molto importante è la semplicità dei contenuti, devono sintetizzare il contenuto in modo tale da essere informativi, convincenti e facilmente inclusivi alla comprensione di tutti.

Oggi è molto importante questo aspetto, poiché ci ritroviamo all'interno dell'era dell'informazione, i contenuti visuali hanno un ruolo estremamente importante nella nostra vita, infatti è stato constatato che almeno il 65% della popolazione apprende maggiormente attraverso le immagini fisse e in movimento sono state utilizzate come materiale di apprendimento per numerosi decenni, comprendendo le foto, illustrazioni, grafici, mappe, diagrammi e video stanno progressivamente avviando la sostituzione dei corsi che si basano tradizionalmente su testi scritti. In questo modo è possibile attraverso la teoria creare dei contenuti visuali immediati ed efficaci.

Come quanto affermato precedentemente le immagini sono maggiormente semplici da memorizzare e vengono comprese più delle parole, questo è strettamente legato al funzionamento del cervello e a come memorizza e comprende le informazioni visive, questa riflessione è legata allo studio effettuato da Allan Pavio che negli anni '70 afferma che il cervello ha la capacità di elaborare con due sistemi differenti, una è la modalità verbale, che si occupa del linguaggio e delle parole e la seconda è la modalità visiva supportata dalle immagini e rappresentazioni spaziali. Si tratta della teoria del doppio codice, dove si fonda l'idea che la formazione delle immagini mentali sia estremamente utile per l'apprendimento, si tratta di una teoria cognitiva che si basa sull'ipotesi di ampliare la conoscenza con il supporto di associazioni verbali accompagnate da immagini visive. È quello che si sta cercando di incrementare negli insegnamenti contemporanei, supportandoli non solo con le nuove immagini, ma anche con lo sviluppo di nuove tecnologie, soprattutto olografiche, che permettono la visione sia di immagini statiche, ma allo stesso tempo anche dinamiche che potrebbero essere impiegate anche nell'ambito della formazione, non solo primaria ma anche universitaria.

### **3.6 La facoltà cognitiva**

Quando parliamo di facoltà cognitiva si tratta di un sistema molto complesso che consente di gestire simultaneamente, la ricezione del linguaggio, degli oggetti e

di eventi non verbali. Secondo lo studio di codificazione di Allan Paivio il sistema del linguaggio contemporaneamente riceve ed elabora il linguaggio e si serve delle sole immagini simboliche per poter rispondere al comportamento e all'evento, in questo modo è costituito da una doppia funzione. Secondo le parole di Allan Paivio:

«La cognizione umana è unica perché specializzata nella gestione simultanea del linguaggio e degli oggetti ed eventi non verbali. Inoltre, il sistema del linguaggio è peculiare, visto che ha a che fare direttamente con la ricezione e la produzione linguistica (sotto forma di parola e scrittura) e al tempo stesso compie una funzione simbolica rispetto agli oggetti non verbali, a eventi e comportamenti. Qualsiasi teoria rappresentativa deve adattarsi a questa doppia funzionalità.»<sup>23</sup> Queste elaborazioni all'interno del cervello umano avvengono tramite dei canali differenti della mente umana, dando delle rappresentazioni differenti a seconda delle informazioni che vengono elaborate per ciascun canale.

Le informazioni vengono ricordate tramite codici visivi e verbali, infatti si cerca di codificare uno stimolo in due diversi modi e questo incrementa la possibilità di ricordare un elemento memorizzato.

Un tema molto importante è quello dell'effetto di "superiorità delle immagini" che va a dimostrare la capacità umana di ricordare meglio le immagini rispetto alle parole, infatti sono più riconoscibili e richiamabili delle parole, soprattutto quando presentano delle colorazioni, dettagli e un grado elevato di concretezza, sia per la teoria della codifica duale, ma soprattutto sono maggiormente elaborate e integrate nella memoria a lungo termine, inoltre le immagini sono strettamente correlate ad emozioni e ricordi. Un altro aspetto che non va trascurato è quello dell'elaborazione top-down e bottom-up di cui si è parlato precedentemente, si tratta di due processi distinti, la prima riguarda la percezione delle informazioni sensoriali e la seconda che riguarda l'influsso delle conoscenze e delle aspettative preesistenti correlate alla percezione. Infatti le immagini possono essere elaborate attraverso entrambi i processi e in questo modo facilitano la memorizzazione e la comprensione delle informazioni. L'elaborazione bottom-up nel caso delle immagini è legata alla percezione diretta delle informazioni visive, mentre l'elaborazione top-down riguarda l'interpretazione e l'integrazione di queste informazioni che derivano dalle conoscenze e dalle aspettative preesistenti. Sicuramente questo processo combinato rende le immagini più comprensibili rispetto alle parole che prevedono un processo più lento.

---

<sup>23</sup> Rodríguez. E. M, "La Teoria del Doppio Codice", La mente è meravigliosa, Febbraio 2023, <https://lamenteemeravigliosa.it/la-teoria-del-doppio-codice-di-allan-paivio/>

### 3.7 Come viene percepita dall'occhio umano l'immagine tridimensionale

La teoria della percezione di Marr pubblicata nel 1982, prende in considerazione un'elaborazione Bottom Up e un ulteriore livello maggiormente avanzato che si basa su processi Top Down, secondo questa teoria la percezione si avvia dalla fase dell'immagine retinica, dove attraverso dei procedimenti abbastanza elaborati, viene trasformata in una rappresentazione maggiormente sviluppata e complessa. Questi stadi sono costituiti da:

- Schizzo primario bidimensionale 2D, che proviene dallo stimolo visivo che va a colpire l'occhio, dove non entra ancora in campo la percezione cosciente, caratteristiche di forma e grandezza vengono posizionate all'interno di un grande insieme.
- Schizzo a due dimensioni e mezzo, che tiene conto a differenza del primo gli indizi di profondità e orientamento, nel secondo stadio lo stimolo inizia a delinearsi esclusivamente nelle parti visibili all'osservatore, la rappresentazione cambia quando viene spostato il punto di osservazione, infatti per questo motivo viene anche chiamata "percezione centrata sull'osservatore".
- Modello tridimensionale 3D, in questa fase si ottiene la rappresentazione tridimensionale sia dovuta allo stimolo che alle relazioni spaziali a seconda delle varie parti. Nel terzo stadio si crea la rappresentazione tridimensionale dell'oggetto, poiché tutte le informazioni vengono integrate a quelle che sono legate alle esperienze precedenti, ossia le conoscenze acquisite nel tempo. Addirittura Marr afferma che il modello di percezione visiva è altamente dettagliato da avere le caratteristiche per essere simulato nel computer, infatti la sua teoria è anche conosciuta come Teoria Computazionale della percezione. Secondo le sue affermazioni la mente elabora le informazioni attraverso un processo algoritmico, infatti secondo questa teoria la mente umana ha la capacità di elaborare, trasformare, codificare, archiviare, recuperare e servirsi di informazioni come un computer, infatti la mente e la coscienza sono una forma di calcolo, il cervello assorbe le informazioni dall'ambiente che vengono identificate come input, le elabora e le trasforma andando a creare una risposta che viene chiamata output attraverso un processo algoritmico. Di conseguenza il pensiero potrebbe essere identificato come un calcolo, secondo l'applicazione di determinate regole, simile alla macchina di Turing, i processi cognitivi vengono intesi come epifenomeno del cervello.

Questa teoria risale agli anni '40 del '900 dove Warren McCulloch e Walter Pitts per primi iniziano ad affermare che l'attività neurale è di natura computazionale, infatti i calcoli neurali vanno a spiegare la cognizione, ufficialmente viene

proposta da Hilary Putnam nel 1967 e dal 1960 fino al 1980 sviluppata da Jerry Fodor, filosofo e scienziato cognitivo.

## 4 L'ologramma: uno strumento per la didattica

### 4.1 Differenza tra Realtà Virtuale, Realtà Mista e Realtà Aumentata

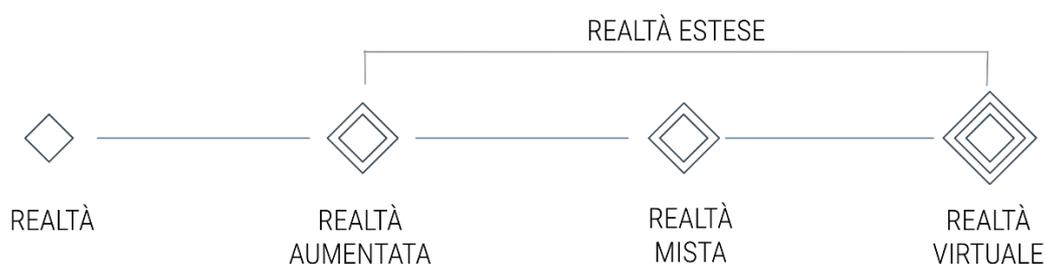


Figura 54\_ disposizione della realtà rispetto alle realtà estese, (Vincos Blog, <https://vincos.it/2022/03/19/realta-estese-aumentata-virtuale-mista/>)

Realtà e virtuale, verità e finzione portano avanti una stretta convivenza all'interno della nostra immaginazione, il mondo all'interno del quale l'uomo elabora delle informazioni è unico e soggettivo, varia a seconda della percezione di ogni soggetto, attraverso la genetica e la sensibilità ma anche grazie alle esperienze personali che costruiscono la visione della realtà.

L'uomo percepisce il mondo attraverso i sensi e l'immagine che viene ricavata deriva solamente da un'interpretazione personale, tra esperienza e interpretazione trova posto un intervallo dove è possibile modificare sia l'una che l'altra, questo è quello che viene fatto da queste tecnologie della nota Extended Reality XR.

Quando si parla dell'XR, si sta prendendo in esame qualsiasi tipo di tecnologia che va ad alterare la percezione della realtà da parte dell'osservatore che si trova davanti a questo tipo di fenomeni, che vanno ad aggiungere degli stimoli digitali all'ambiente fisico. Extended Reality è costituita da Augmented Reality AR, Mixed Reality MR e Virtual Reality VR, che vengono posizionate a seconda del livello di immersione sensoriale, il tutto può essere spiegato attraverso questo diagramma.

Nel livello più basso di immersione troviamo l'Augmented Reality AR, questa tecnologia consente la sovrapposizione immediata di informazioni digitali sul mondo fisico, attraverso dispositivi mobili e proiezioni visive, sta rivoluzionando nuovi ambiti, dai videogiochi, alla medicina, il design e anche l'architettura, come nel caso dello studio di architettura Shop che ha utilizzato un'applicazione di AR del loro progetto sulla Brooklyn Tower, per andare a visualizzare in modo ottimale il progetto all'interno dell'area di progetto e renderlo più realistico, in questo modo si sono sostituiti i documenti di progetto tradizionali e inoltre ha permesso una simulazione realistica e immediata.

Opposto a questo genere di realtà troviamo la Virtual Reality VR, che permette la creazione totale di un ambiente virtuale, in questo modo si perde totalmente la concezione del mondo esterno, poiché ci si immerge in un'altra dimensione, fatta di suoni e immagini, generalmente questo è possibile utilizzando dei visori, come quelli Microsoft HoloLens sopraccitati, che permettono una pura esperienza digitale, anche se per il momento è troppo limitante, poiché perdendo il proprio contesto mentre si indossa il visore, questo ne limita il campo solo ad un numero limitato di applicazioni.

Al centro di tutto invece si trova la Mixed Reality MR, che combina AR e VR, che permette di scansionare lo spazio fisico e i suoi oggetti trasferendo tutte le informazioni in tempo reale al mondo virtuale che ha il compito di rielaborarle e restituirle all'utente. A differenza della tecnologia prima citata la MR non permette all'utente di estraniarsi dal mondo che lo circonda, ma semplicemente permette un incessante scambio di informazioni tra i due mondi, quello fisico e quello virtuale.

Il confine tra il virtuale e il fisico è compreso tra i pochi centimetri che vanno a separare gli occhi umani dalle proiezioni olografiche dei dispositivi MR, infatti oggi distinguere finzione e realtà ad oggi sta diventando sempre più una questione molto complessa, anche se non è necessaria la distinzione poiché il virtuale è parte integrante della realtà che ci circonda. Queste tecnologie consentono al pubblico e gli utenti di andare oltre i confini della realtà bidimensionale che è stata presentata tramite degli schermi che garantivano solo la visione piatta.

#### **4.2 Impatto degli ologrammi all'interno della realtà che ci circonda**

La tecnologia olografica ogni giorno viene sperimentata maggiormente e sottoposta a rapidi miglioramenti, generando enormi effetti per una moltitudine di applicazioni, dall'istruzione alla formazione tecnica, infatti le persone che hanno l'opportunità di entrare in contatto con queste tecnologie emergenti,

hanno la possibilità di usarle per esempio in campo ingegneristico e nel design, questo va a creare una percezione dettagliata degli spazi e i progetti in tre dimensioni prima che avvenga la costruzione, nella fase della progettazione definitiva. Le applicazioni sono infinite come nel campo della medicina o anche del marketing, soprattutto vengono applicate nel campo della comunicazione.

La tecnologia sta modificando il modo di utilizzo delle informazioni, come si vivono determinati eventi e storie e inoltre l'interazione dell'uomo con il mondo e lentamente stanno influenzando e trasformando la società, stravolgendola poiché come dichiarato prima questo genere di dispositivi ogni giorno sta facendo dei passi in avanti e genera delle nuove opportunità positive per la comunicazione, l'istruzione, l'intrattenimento e altro, infatti gli ologrammi sono il futuro.

Questa sua crescita è sempre stata fin dalla sua prima comparsa negli anni '60 del '900, fonte di interesse soprattutto a livello aziendale ed economico, ad oggi si sta cercando da parte di varie compagnie di sviluppare il prodotto migliore rispetto alla concorrenza, questo ha sempre alimentato il suo sviluppo, trasformandola dalle sue origini Vittoriane dell'800 con l'illusione di Pepper's Ghost di base, in delle applicazioni molto avanzate, partendo dai visori e successivamente generando delle tecnologie senza supporto di ulteriori strumentazioni.

Inoltre secondo le parole di Rachele Cusolo, gli ologrammi hanno un impatto importante nella vita delle persone infatti parla in merito al nuovo sistema Q-Room per le teleconferenze che:

«attraverso le immagini olografiche, permette di avere una percezione visiva molto vicina alla presenza reale. Il modello di riferimenti è quello di una stazione di erogazione di servizi a distanza, da utilizzare in una molteplicità di ambienti e situazioni relazionali: ad esempio nelle agenzie bancarie, nei centri commerciali, nelle scuole, nelle aziende sanitarie e così via. Il sistema Q-Room permette all'utente di avere la percezione di colloquiare realmente con una persona fisica, mentre in realtà l'operatore si trova in un altro luogo e all'utente viene presentata la sua immagine reale; per l'utente la suggestione si realizza nel vedere l'operatore "teletrasportato" di fronte a lui, dall'altra parte di una scrivania. Questo permette un'interazione più umana e quindi più rilassante e produttiva, tra l'operatore e l'utente, ed allo stesso tempo consente di utilizzare al meglio gli operatori addetti all'erogazione dei servizi, indipendentemente dalla loro collocazione geografica, ottimizzandone inoltre la disponibilità temporale. In questo modo è possibile disporre di personale esperto a seconda

del servizio richiesto anche laddove non sia possibile, per motivi tecnico ed organizzativi, avere a disposizione un numero rilevante di operatori »<sup>24</sup>

### 4.3 Importanza e necessità della proiezione olografica

L'interesse per l'olografia nasce a metà 900, dopo qualche anno dalla sua invenzione e successivamente viene abbinata all'interesse virtuale. Oggi le tecnologie di visualizzazione tridimensionale sono sempre più all'avanguardia, in ambienti e tecnologie differenti soprattutto negli ambiti citati precedentemente. L'interesse e la popolarità sono dovuti a diversi fattori, non solamente a all'interesse economico, ma semplicemente perché la vita quotidiana è popolata da immagini sintetiche di grafica computerizzata sia per quanto riguarda la stampa che la televisione, inoltre le persone hanno la possibilità di generare delle immagini sui loro computer personali, molto frequentemente stiamo a contatto con ologrammi che sono stampati nelle banconote che utilizziamo tutti i giorni o sulle carte di credito o schermi lenticolari sulle scatole di cereali.

Nonostante questo genere di tecnologie siano a buon punto, ci sono alcuni aspetti negativi, quelle che permettono l'immersione totale in una realtà virtuale hanno delle attrezzature ingombranti, mentre anche per i display continua ad esserci la necessità di una vera esperienza di parallasse sia nel movimento verticale e orizzontale. Al momento l'unico ostacolo importante per l'utilizzo è il prezzo dei dispositivi, che non sono accessibili a tutti, soprattutto per le apparecchiature integrate di archiviazione, elaborazione e visualizzazione. Nei vari anni sono stati sviluppati dei test e si è scoperto che c'è la possibilità di riprodurre le persone mentre tengono un discorso, un ballo o una presentazione, infatti sono state impiegate anche per numerosi concerti riproducendo dei cantanti che ora non sono più in vita come nel caso di Michael Jackson, generalmente con grandi display olografici che hanno la caratteristica di riprodurre delle immagini di dimensioni molto importanti, poiché l'ingrandimento dipende dalle caratteristiche del proiettore, ma soprattutto dall'array della telecamera, in questo modo non ci sono limiti dimensionali.

L'ologramma e comunicazione è un tema che recentemente ha suscitato molto interesse anche in Italia con la Società Nostrana che da diversi anni lavora per lo sviluppo dell'olografia con l'Istituto Nazionale di Ottica del CNR per la telepresenza olografica, poiché vuole cambiare in maniera incisiva la modalità di

---

<sup>24</sup> Cusolo. R, "Ologrammi e comunicazione: dalla definizione di 'ologramma' alla comunicazione del futuro", Inside Marketing, 2018, <https://www.insidemarketing.it/ologrammi-e-comunicazione-definizione-futuro/>

videoconferenza. Questa tecnologia viene impiegata per proiettare immagini televisive su una lastra di vetro indipendente e in questo modo dà la percezione che l'immagine fluttui nell'aria, in futuro probabilmente si avrà la possibilità di proiettare immagini tridimensionali senza necessità di una superficie di proiezione. Questo genere di applicazioni potrebbe essere impiegata per grandi esposizioni e conferenze o nelle riunioni delle aziende, andando a vanificare quelli che sono i limiti della distanza e il raggiungimento delle varie parti del mondo infatti potrebbero garantire la presenza della stessa persona in differenti parti del mondo nello stesso arco di tempo, inoltre nel tempo potrebbe essere sfruttato anche nella propria casa, o un insegnante potrebbe tenere una lezione con più di cinquanta studenti, mostrandosi interamente ed esprimendosi con espressioni e linguaggio del corpo, infatti le soluzioni in futuro potrebbero essere svariate. Inoltre durante un'intervista viene affermato da Rachele Cusano che: «si ricorre oggi a tecnologie ottico-elettroniche che non permettono ancora la rappresentazione di veri ologrammi tridimensionali, ma consentono di realizzare ologrammi quasi 3D con una eccezionale resa visiva.»<sup>25</sup>

In ogni caso l'utilizzo degli ologrammi implica sia vantaggi che svantaggi:

<b>Vantaggi</b>	<b>Svantaggi</b>
Rappresentazione realistica	Angoli di visualizzazione limitati
Esperienza Interattiva	Gamma di colori limitata
Accattivante	Risoluzione Limitata
Versatile	Costo
Bassa Manutenzione	Consumo Energetico
Riduzione produzione di CO2 grazie alla Telepresenza 3D	Preoccupazione per la salute

Per quanto riguarda i vantaggi, gli ologrammi riescono a produrre una rappresentazione realistica di un qualsiasi oggetto, persona o scena, dove all'interno dell'ambientazione potrebbero essere rappresentati anche simultaneamente, più entità, permette una maggiore interattività rispetto ad immagini bidimensionali e questo potrebbe essere utile per l'utilizzo a scopo educativo, formativo ma soprattutto per l'intrattenimento, poiché la sua visione cattura l'attenzione delle persone che lo stanno osservando, inoltre si tratta di una tecnologia versatile poiché grazie alle nuove tecnologie è possibile proiettarli in differenti ambienti e adattarle a seconda delle dimensioni. L'ultimo vantaggio

<sup>25</sup> Cusolo. R., "Ologrammi e comunicazione: dalla definizione di 'ologramma' alla comunicazione del futuro", Inside Marketing, 2018, <https://www.insidemarketing.it/ologrammi-e-comunicazione-definizione-futuro/>

è quello della manutenzione, poiché non richiedono nessun tipo di illuminazioni o attrezzature speciali, rendendoli molto semplici da configurare e custodire, un aspetto positivo che potrebbero garantire sarebbe la riduzione del CO2 grazie alla telepresenza 3D, riducendo almeno in piccola percentuale gli spostamenti aerei.

Mentre se parliamo di svantaggi ancora non si sono sperimentati a pieno gli effetti sulla salute delle persone, ossia per quanto riguarda la vista, con l'esposizione prolungata di questo genere di immagini olografiche, inoltre c'è il problema degli angoli di visualizzazione, prendendo in esempio la ventola olografica il problema è che la percezione tridimensionale si ha con la visione frontale all'immagine, se ci si sposta si ha la percezione della bidimensionalità, inoltre non si riesce a sfruttare ancora a pieno tutta la gamma di colorazioni, anche se si è già arrivati ad una buona percentuale, stessa cosa per la risoluzione che è abbastanza limitata nonostante si siano raggiunti dei livelli elevati. Uno degli ostacoli maggiori come quanto detto prima è in termini di costo, possono essere addirittura proibitivi per alcuni tipi di applicazioni e inoltre c'è anche il tema del consumo di energia.

#### **4.4 Insegnare attraverso le immagini e la realtà aumentata**

L'utilizzo di sistemi di Realtà Aumentata viene studiato da vari settori dall'inizio degli anni '90 grazie al contributo di due grandi studiosi Richard Clark e Robert Kozma che hanno dato origine ad un dibattito per l'integrazione e l'importanza delle nuove tecnologie, già nel 1983 nell'articolo *Reconsidering research on learning from media*, Clark afferma che la migliore prova attuale è che i media sono semplici veicoli che contribuiscono a fornire istruzione, ma non influenzano il risultato degli studenti più del

camion che trasporta i nostri generi alimentari provoca cambiamenti nella nutrizione. A fronte di tutti i ragionamenti sulla percezione visiva e il funzionamento dell'occhio umano, sarebbe interessante capire come delle strumentazioni informatiche potrebbero essere integrate a livello didattico.

In passato gli studenti sono stati dei ricettori passivi delle informazioni fornite dagli insegnanti, ad oggi si sta cercando di incrementare il ruolo attivo ma soprattutto l'interazione tra studenti e docenti, il fine è quello di rendere maggiormente comprensibili i contenuti trattati durante le lezioni. L'integrazione di strumentazioni informatiche potrebbe contribuire alla facilitazione di questa impresa didattica, grazie alla creazione di contenuti digitali di immagini, colori e filmati si potrebbe superare la didattica tradizionale basata sulle lezioni frontali. Partire dalle immagini per poi arrivare al testo potrebbe essere un metodo di

apprendimento efficace soprattutto per le materie scientifiche. Tutto questo potrebbe essere reso possibile tramite il superamento di indecisione nell'accogliere questa visione all'interno di un contesto socio-culturale molto conservativo nei confronti delle tradizioni, nonostante già dal 1964 personaggi come McLuhan affermano che "qualsiasi supporto tecnologico non può fare altro che addizionarsi a ciò che noi già siamo".

Negli ultimi decenni c'è stato un incremento di applicazioni digitali soprattutto in ambito didattico, che ha stravolto il metodo di insegnamento e apprendimento sicuramente migliorandolo, si è partiti dall'utilizzo del computer, per poi passare all'utilizzo delle LIM, Smartphone e Tablet, questo genere di cambiamento garantisce un apprendimento realistico, che aumenta il coinvolgimento e la comprensione di contenuti scolastici ma anche accademici, questa soluzione potrebbe essere integrata ad ogni livello di studio. Questo genere di interesse in ambito didattico su possibili applicazioni di Realtà Aumentata nei processi di insegnamento e apprendimento nascono intorno al 2010 e ad oggi si sta ancora cercando di affinarne le tecniche, soprattutto in campo di realtà aumentata e le sue possibili integrazioni.

La realtà aumentata ha la possibilità di integrare all'interno dell'ambiente che ci circonda qualsiasi forma di dati e informazioni digitali in vari formati che possono essere visivi, grafici, testuali, audio, video e sovrapposizioni tattili, questo presenta una grandissima potenzialità nell'ambito educativo, ha la possibilità di produrre attraverso i computer dei materiali in tempo reale, arricchendo la percezione del mondo che viene osservata dall'utente, che risulta aumentata attraverso l'integrazione di contenuti digitali, in questo modo si incrementa la percezione dell'utente che non potrebbe cogliere tutte queste informazioni solo attraverso quelle visive. Tutte le ricerche che sono state svolte finora esaltano la possibilità di applicazione in differenti contesti educativi, dalla scuola dell'infanzia fino alla formazione post-laurea e soprattutto la possibilità di risolvere alcuni problemi legati al lavoro di gruppo, la valutazione critica e la comprensione di punti di vista differenti. Inoltre attraverso la realtà aumentata c'è la possibilità di includere vista, tatto e udito.

Inoltre la AR si colloca tra l'interamente reale e l'interamente virtuale, infatti è semplicemente un'integrazione della realtà e in questo modo non si corre il rischio di perdere la percezione del mondo esterno. Secondo lo studioso Ronald.

T. Azuma ci sono tre caratteristiche che definiscono la realtà aumentata:

- La combinazione tra il mondo reale e virtuale;
- La possibilità di interazione in tempo reale;
- La rappresentazione degli oggetti in 3D.

Inoltre definisce anche gli aspetti importanti di questa tecnologia:

- sovrapposizione ad una visione del mondo fisico di informazioni digitali;

- visualizzazione di informazioni come se fossero proprie del mondo fisico;
- dipendenza delle informazioni visualizzate dalla posizione nel mondo reale e dalla prospettiva fisica della persona;
- interattività dell'esperienza di realtà aumentata, una persona è in grado di rilevare le informazioni e modificarle, se lo desidera. Il livello di interattività può spaziare dal semplice cambiamento del punto di vista fisico, fino a creare nuove informazioni, questo garantisce anche il cambiamento di informazioni e dati in tempo reale.

Quando si parla di informazioni digitali, non sono altro che una copia della realtà che viene resa digitale e potrebbe essere riprodotta attraverso delle applicazioni come immagini statiche, per esempio come delle fotografie digitali, un modello grafico 3D, una registrazione digitale di un suono, poiché nella realtà aumentata tutti i sensi umani non vengono compromessi.

L'impatto che si ha grazie alla Realtà Aumentata sull'apprendimento è quella di riuscire a rendere in modello 3D tutto ciò che generalmente potrebbe essere difficilmente visualizzato all'interno di una classe, dal computer e dalla mente degli studenti. Di conseguenza il contenuto che viene presentato a lezione che potrebbe essere di difficile comprensione e astratto a causa delle lezioni frontali tradizionali, in questo modo diventerebbe visibile e interattivo.

La Realtà Aumentata offre un'interazione particolare che è di supporto per garantire delle esperienze di apprendimento migliori, in questa ricerca che viene portata avanti da anni, come quanto affermato precedentemente alcuni autori hanno individuato ulteriori vantaggi a favore di questo nuovo metodo della didattica integrata come per esempio:

- Annotazione del mondo reale, che includono la visualizzazione di testi e altri simboli su oggetti del mondo reale, come l'esperimento di Jerry e Aaron portato avanti nel 2010, che hanno collaborato e scritto un articolo dal titolo "L'impatto del software di realtà aumentata con l'apprendimento basato sull'indagine sull'apprendimento del grafico cinematico da parte degli studenti", che aveva il compito di indagare sull'apprendimento di una palla in movimento dove venivano annotati dei valori di velocità con annesso un grafico corrispondente, si tratta di uno studio sia qualitativo che quantitativo che va a indagare come l'impatto della tecnologia sulla T&L di un argomento di fisica progettato con una particolare pedagogia, sotto forma di Inquiry based Learning (IBL);
- Visualizzazione contestuale, il contenuto virtuale può essere visualizzato all'interno di contesto appropriato per facilitare la comprensione degli studenti andando ad innescare una rete di conoscenze maggiormente elaborata;

- Visualizzazione aptica, c'è la possibilità che le informazioni visive passano attivare i due sensi in contemporanea, sia il senso della vista, che quello del tatto.

Intorno al 2014 si iniziano a portare avanti dei ragionamenti per la migliore comprensione attraverso i contenuti da creare, infatti Santos individua alcune strategie per le esperienze di apprendimento che comprendono sia l'esplorazione dei contenuti, come per esempio nel caso precedente dell'esperimento della pallina, rendere possibile la visione di differenti fenomeni di collisione e capire se la collisione avverrebbe nel modo prefigurato dagli studenti, inoltre un altro aspetto per favorire lo stato attivo degli studenti potrebbe essere la collaborazione e lo scambio di idee e garantirne la stessa progettazione di materiale AR per aumentare il livello di concentrazione.

#### **4.5 La possibilità di introdurre AR in una moltitudine di discipline differenti**

Questa possibilità è dovuta alla creazione di differenti contenuti, come l'illustrazione di concetti spaziali e temporali, illustrare le relazioni contestuali tra oggetti reali e virtuali, inoltre fornire un'interazione intuitiva, con l'opportunità di visualizzare e interagire con degli oggetti tridimensionali, che fanno percepire immediatamente le texture e le forme, attraverso queste applicazioni viene garantito un elevato livello di definizione rendendo i materiali, gli oggetti e i colori estremamente realistici.

Le discipline dove viene maggiormente usata sono la medicina, nella geografia, nell'architettura, matematica, geometria, scienze naturali, fisica e oltre a queste discipline scientifiche viene applicata anche in campo umanistico per il patrimonio culturale soprattutto all'interno dei musei e per la ricostruzione di rilievi che non è possibile vedere a occhio nudo perché ostruiti e viene anche impiegato per l'apprendimento linguistico. L'aspetto interessante è che tutti i processi da quelli estremamente scientifici che non si possono riprodurre all'interno di un'aula fisica, possono essere ricostruiti e analizzati tramite 3D virtuali, come nel caso di fenomeni astronomici, ma allo stesso tempo esperimenti che potrebbero mettere in pericolo la sicurezza degli studenti, in questo modo si potrebbe fare esperienza attraverso la pratica anche di ciò che non è stato possibile dimostrare visivamente per anni all'interno delle aule.

In ambito scolastico le materie dove è maggiormente efficace spiegare determinati concetti astratti sono fisica, chimica, biologia, matematica, ecologia e scienze delle costruzioni, in questo caso generalmente trattandosi di argomenti astratti quando si devono fare delle dimostrazioni è più efficace mostrarli servendosi di tecnologie AR, infatti è possibile visualizzare dei comportamenti

che nel mondo reale non potrebbero essere percepiti, invece nel campo delle materie umanistiche viene utilizzato in modo sporadico. Infatti secondo una meta-analisi che si basa su sedici ricerche condotta nel 2018 da Ozdemir viene indicato che l'effetto di AR, per le scienze naturali è superiore a quella delle scienze sociali, però le dimensioni di effetto sono risultate positive per entrambe. Percentuali di applicazione nelle varie discipline

Discipline	%
Biologia	19,8
Ingegneria	12,8
Medicina	11,6
Fisica	7,0
Educazione Informale	7,0
Educazione Linguistica	5,8
Chimica	5,8
Matematica	5,8
Storia	2,3
Astronomia	2,3

#### 4.6 Aspetti cognitivi

Un tema in forte crescita negli ultimi anni è quello della letteratura che tratta il rapporto tra Realtà Aumentata e apprendimento, infatti negli studi portati avanti nel 2007 da Alan Craig che è direttore associato dell'Human-Computer Interaction Institute for Computing in Humanities, Arts and Social Science dell'università dell'Illinois si sperimenta come potrebbe essere utilizzata l'AR, per l'utilizzo associato ai libri di testo scientifico. Gli studi dimostrano che questi testi hanno un appeal maggiore rispetto ai libri tradizionali e aiutano la comprensione e la modellizzazione di concetti astratti e complessi, sarebbe utile avere una simulazione tridimensionale della crosta terrestre per poterla ispezionare mentre si apprende la teoria.

Per quanto riguarda l'aspetto cognitivo è stato riscontrato da Kaufmann e Schmalstieg che tutto ciò che si apprende con la Realtà Aumentata aiuta a sviluppare meglio le abilità spaziali e psicomotorie e questo viene maggiormente incrementato dalla combinazione dell'esperienza tattile e visiva, che aumentano la concentrazione e la comprensione del soggetto che si sta osservando, inoltre viene riconosciuto il supporto di questi scenari che si verificano per chiarire le relazioni tra i concetti e i principi teorici, di conseguenza questi mezzi sono così efficaci poiché si avvicinano e simulano in modo realistico la realtà e spronano gli studenti a partecipare attivamente al processo di apprendimento e non in

modalità passiva come succede nelle lezioni teoriche frontali, dove non si ha un riscontro con la realtà che ci circonda. C'è anche un lato negativo, ossia che attraverso questa metodologia si potrebbe verificare un sovraccarico cognitivo a causa della quantità di materiale.

La ricerca che si sta sviluppando afferma che tramite le applicazioni AR c'è un impatto positivo per quanto riguarda apprendimento e atteggiamento degli studenti, in particolare nel 2016 è stata avviata una meta-analisi da parte di Yilmaz e Batdi che riguardava l'esaminazione a livello dimensionale gli effetti della AR attraverso dodici ricerche internazionali.

Questo rende l'insegnamento meno complesso e maggiormente efficace, poiché gli insegnanti riescono a trasmettere più facilmente i concetti trattati durante la lezione, secondo alcune indagini gli insegnanti affermano che l'utilizzo delle nuove tecnologie AR permettono lo spostamento delle pratiche di insegnamento e apprendimento verso lo studente e potrebbe anche fornire una maggiore assistenza durante le lezioni laboratoriali. Incrementano la rendita scolastica, sono state fatte delle indagini per differenti livelli educativi, dall'istruzione secondaria e universitaria fino a quella primaria, infatti risultano maggiormente positivi i dati raccolti riguardante l'apprendimento all'interno delle università del 71,43% rispetto alle scuole secondarie e primarie anche se alcuni dati sono contrastanti.

#### **4.7 La motivazione con la Realtà Aumentata**

Alcune ricerche hanno indagato sugli effetti della motivazione degli studenti con l'uso di queste tecnologie, si può dedurre tramite la teoria dell'autodeterminazione che è stata portata avanti da Edward L. Deci e Richard M. Ryan, nasce intorno al 1980, il termine autodeterminazione deriva dalla psicologia, è la capacità di prendere delle decisioni e controllare la propria vita, questa teoria afferma che le persone sono motivate alla crescita personale e di conseguenza cercano di cambiare per bisogni psicologici innati e universali. Inoltre ha forte influenza la personalità, la motivazione umana e il funzionamento ottimale.

Esistono due tipi di motivazione che sono quella intrinseca ed estrinseca e queste hanno un forte impatto sulla nostra personalità e soprattutto sul nostro comportamento. La prima teoria è che le persone sono attività volte a crescita, infatti le persone sono motivate dal bisogno di crescere e ottenere soddisfazione, sono mosse dal desiderio di ricevere ricompense esterne, denaro, premi e riconoscimento sociale che fanno parte della motivazione estrinseca, ma questa teoria viene mobilitata soprattutto da parti interiori della psiche umana che

scatenano il senso di motivazione, come per esempio il desiderio di acquisire conoscenza o indipendenza che fanno parte della motivazione intrinseca. I bisogni psicologici citati precedentemente che contribuiscono alla crescita psicologica sono tre:

- Competenza, l'uomo ha bisogno di imparare dei lavori e di acquisire differenti abilità;
- Relazioni, come esseri umani non possiamo vivere in solitudine e abbiamo bisogno di sentire un senso di appartenenza e attaccamento ad altre persone;
- Autonomia, è necessario sentire di avere il controllo dei nostri comportamenti ma soprattutto della consapevolezza di poter raggiungere i nostri obiettivi.

Una volta che le persone possiedono questo senso di autodeterminazione allora si possono sentire motivate e cercare di raggiungere tutto ciò che desiderano. Questa crescita non avviene automaticamente, ma è un aspetto che viene maturato gradualmente, con l'aiuto delle interazioni con gli altri riusciamo a promuovere il benessere e la crescita personale o al contrario contrastarlo.

La motivazione estrinseca deriva da qualcosa di esterno come per esempio dei sistemi di valutazione altrui, mentre la motivazione intrinseca deriva all'interno, ossia ci sono degli impulsi che ci spronano a comportarci in un determinato modo, a questi si addizionano gli interessi, il senso personale della moralità.

Esistente la motivazione autonoma o controllata, la prima deriva sia da fonti interne che esterne ed è composta:

- Regolazione esterna, questa motivazione è guidata da influenze esterne di conseguenza ricompense o punizioni a causa del comportamento portato avanti dall'individuo;
- Regolazione interna, proviene da esperienze, attività e valori che sono state interiorizzate nel tempo e soprattutto anche dalla consapevolezza di ciò che si è, motivi per la quale evitare imbarazzo, cercando approvazione e proteggendo l'ego.

Quando un individuo è guidato da motivazione autonoma in questo caso si sente maggiormente indipendente, mentre quando l'individuo è spinto da una motivazione controllata, allora in quel caso sente la pressione dal mondo esterno che gli scatena poca autonomia anche nel prendere delle decisioni.

Tutto questo ragionamento potrebbe essere attuato all'interno dell'insegnamento, garantendo da parte dei docenti la collaborazione per tenere conto all'interno delle aule di queste esigenze.

Devono garantire l'opportunità di scelta e feedback diretto per sostenere la sensazione di autonomia e competenza da parte degli studenti. Grazie all'esperienza con le tecnologie di AR sembra che rispettino questo genere di

condizioni, inoltre sono molto importanti le esperienze sociali con la collaborazione che si crea con delle attività di gruppo.

Nel 2018 Buchner e Zumbach hanno studiato l'impatto di apprendimento della Realtà Aumentata sulla motivazione, incentrato sull'indagine riguardante l'esito dell'apprendimento e il carico cognitivo, con la partecipazione di alcuni studenti ad una lezione di storia di due ore, con l'utilizzo dei propri smartphone che prevedeva la trasformazione di immagini statiche trasformate in animazioni con AR. Per quanto riguarda gli esiti comprendevano la valutazione dell'interesse, la competenza percepita e la possibilità di scelta in modo da innescare la motivazione intrinseca, i risultati e i dati raccolti successivamente sono stati confrontati con quelli della didattica tradizionale sullo stesso argomento ma senza supporto di AR, si è raggiunta la conclusione che l'apprendimento AR promuove e garantisce la motivazione intrinseca e ha un impatto positivo sull'apprendimento della storia, il carico cognitivo non è stato rilevato come un problema all'interno del gruppo di lavoro, ha mostrato una motivazione superiore rispetto alla lezione tradizionale, maggiore interesse. Questa ricerca è servita a delineare che c'è un aumento della piacevolezza dell'esperienza di apprendimento che innalza il coinvolgimento degli studenti.

Anche il tema dell'inclusione di studenti con differenti livelli di abilità o disabilità è stata estremamente positiva e potrebbe andare ad abbattere tutti quegli ostacoli a causa di strumentazioni all'interno delle classi che vengono a mancare e che dovrebbero soddisfare le esigenze di tutti. Si tratta di un potente mezzo per Universal Design for Learning UDL che fornisce nuovi strumenti e metodologie per differenti stili di rappresentazione, azione, espressione e coinvolgimento, infatti questo potrebbe supportare gli educatori per la creazione di lezioni accessibili, coinvolgenti e potenti, poiché aderisce ai tre principi dell'UDL:

- Il primo principio riguarda il Multiple Means of Representation, ossia l'importanza dei metodi flessibili per garantire la visualizzazione di informazioni per rendere possibile a tutti gli studenti di usufruirne, senza differenziazioni;
- Il secondo principio riguarda il Multiple Means of Action ed Expression, ossia che riguarda le strategie per far comprendere al meglio i contenuti delle lezioni, ma soprattutto far dimostrare agli studenti le loro capacità e conoscenze, come organizzare il loro pensiero e interagire con i contenuti;
- Il terzo principio riguarda il Multiple Means of Engagement, che mira a creare più opzioni possibili per sedurre, far maturare interesse, persistenza ed entusiasmo per l'apprendimento e spiegare il motivo dell'apprendimento di quella tipologia di contenuto.

Ovviamente questi sistemi portano a dover affrontare anche alcune criticità, poiché si tratta di tecnologie emergenti che non sono ancora state affinate, uno

degli impedimenti principali è proprio la difficoltà di integrarli all'interno delle lezioni tradizionali, i costi delle strumentazioni sono molto elevati e anche per la manutenzione, inoltre molti insegnanti ancora non accettano questo genere di tecnologie a causa della mancanza di formazione al riguardo.

Ad oggi non ci sono degli approfondimenti tali per chiarire eventuali dubbi poiché è da pochissimi anni che si sta tentando l'applicazione di queste nuove metodologie nel campo della didattica, si potrebbe pensare alla coordinazione di ricerca da parte di ingegneri, ricercatori e insegnanti per rispondere in modo sempre più positivo alle esigenze degli studenti, di conseguenza si avrebbe necessità di una maggiore ricerca per migliorare l'efficacia didattica e il processo di insegnamento e apprendimento in un'ottica inclusiva.

Secondo le parole di Antoine de Saint-Exupéry "La tecnologia non tiene lontano l'uomo dai grandi problemi della natura, ma lo costringe a studiarli più approfonditamente", anche se tutt'oggi nonostante si sia immersi all'interno di un mondo che sfrutta il supporto della tecnologia, non tutti sono ancora pronti per integrarla al mondo reale, per paura che possa andare a restituirne una visione differente e deturpata, anche se il confine tra realtà e virtuale è sempre più labile.

È fondamentale il pensiero di David Kolb per quanto riguarda l'apprendimento esperienziale che fa capire meglio come sia possibile che teoria e prassi possano entrare in contatto e come sia possibile creare un apprendimento significativo dall'esperienza vissuta, lui propone un modello costituito da quattro fasi che vengono disposte su un piano circolare:

- Esperienza concreta
- Osservazione riflessiva
- Concettualizzazione astratta
- Sperimentazione attiva

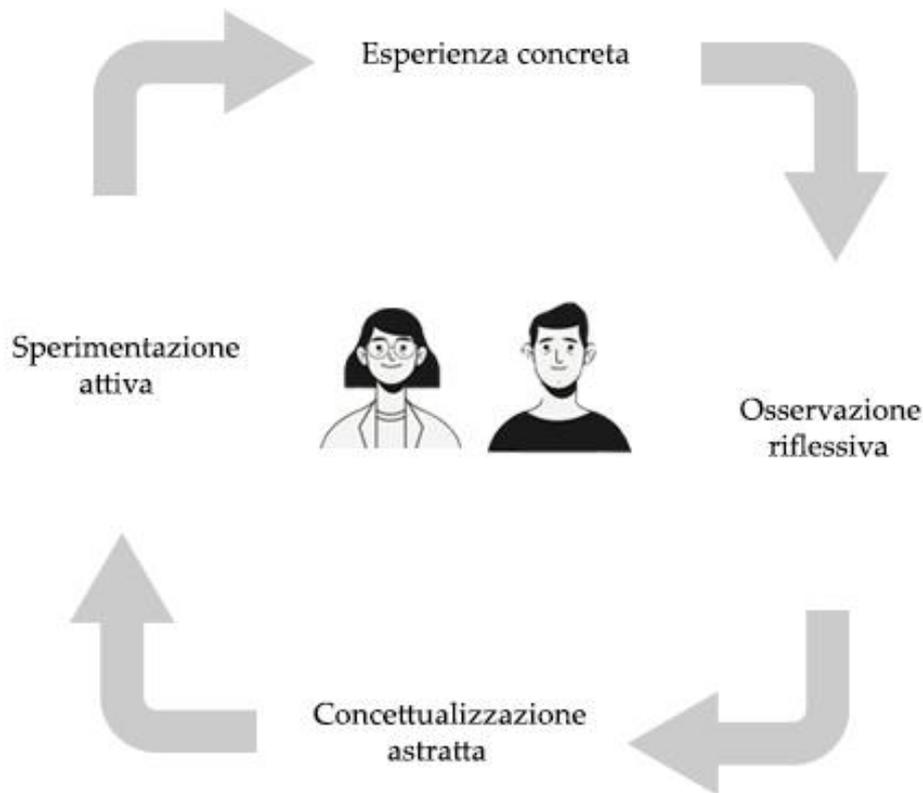


Figura 55\_ Ciclo di Kolb

L'esperienza vissuta per essere tale deve essere appoggiata da una riflessione che permetta il recupero e comprensione della conoscenza esperita. Questi livelli di lavoro sono collegati alle teorie di Kahneman che suggerisce due sistemi: il primo legato all'esperienza e all'intuizione mentre il secondo sistema viene basato sul ragionamento e la riflessione.

Schema

Sulla base di questo Alessandro Antonietti e Manuela Cantoia affermano: «i contesti significativi di apprendimento sono quelli che si avvicinano o emulano i contesti reali: si dovrebbe apprendere laddove l'apprendimento viene poi speso; l'apprendimento dovrebbe tradursi nell'elaborazione di prodotti socialmente apprezzabili; l'apprendimento richiede l'interazione genuina – non simulata – tra partner simmetrici in un quadro di distribuzione delle risorse e dei compiti»<sup>26</sup>

<sup>26</sup> Besana. S, "Realtà aumentata e processi di apprendimento: una prospettiva di ricerca", Social Learning Blog, Aprile 2017, <https://sociallearning.it/2017/04/19/realta-aumentata-e-processi-di-apprendimento-una-prospettiva-di-ricerca/>

In base a queste dichiarazioni si potrebbe pensare che l'AR è uno strumento che si fa carico di:

- Di garantire agli studenti gli stimoli e il compito da eseguire;
- Cercare di incrementare l'attenzione dello studente durante la fase di apprendimento sul compito da eseguire;
- Semplificare e rendere maggiormente accessibile il compito;
- Restringere la gamma di azioni che è possibile compiere a quelle che sono pertinenti e utili al fine del raggiungimento dello scopo desiderato per la risoluzione del compito;
- Mostrare ed esemplificare possibili soluzioni al compito.

Si tratta di uno strumento che riesce ad agire su più livelli di processo di apprendimento che arricchisce l'esperienza, ed è in grado di fornire le nozioni necessarie e le strategie per raggiungere determinati obiettivi.

Per il futuro è necessario variare le logiche classiche e cercare di far coesistere tradizione e innovazione per migliorare più scenari possibili. Infatti secondo una citazione di Donald Norman:

«la tecnologia ci pone di fronte a problemi fondamentali che non possono essere superati basandoci su quanto abbiamo fatto nel passato. Abbiamo bisogno di un approccio più tranquillo, più affidabile, più a misura d'uomo.»<sup>27</sup>

A fronte di quanto è stato detto si possono elencare notevoli vantaggi grazie all'utilizzo della Realtà Aumentata:

- Aumenta il successo del conseguimento di compiti in classe o esami;
- Rende semplice e maggiormente comprensibile l'apprendimento, poiché permette l'osservazione di contenuti tridimensionali che si integrano nel mondo reale, inoltre permette lo sviluppo dell'apprendimento permanente;
- Influisce positivamente sulla motivazione;
- Si riesce ad organizzare delle lezioni interessanti e coinvolgenti rispetto a quelle tradizionali che si tengono sulla base di libri di testo e solo con dimostrazioni alla lavagna, poco comprensibili;
- Si è riscontrato l'aumento di atteggiamenti positivi da parte degli studenti e inoltre diminuisce il carico cognitivo.

#### **4.8 Ologrammi per la didattica alcuni esempi su differenti applicazioni ed esperimenti**

Uno degli eventi più importanti dove sono stati trattati i temi dell'olografia strettamente legata a fini didattici è stata quella del Simposio Internazionale

---

<sup>27</sup> Besana, S, "Realtà aumentata e processi di apprendimento: una prospettiva di ricerca", Social Learning Blog, Aprile 2017, <https://sociallearning.it/2017/04/19/realta-aumentata-e-processi-di-apprendimento-una-prospettiva-di-ricerca/>

sull'olografia in mostra, che è stato creato nel 1982 al Lake Forest College dal professore Tung H. Jeong, che lo differenzia da altri convegni scientifici, durante la nona edizione ha occupato interamente un piano del Mit Media Lab per la durata di cinque giorni. Si tratta di un evento dove si cerca di comprendere lo stato di avanzamento delle tecniche olografiche in tutti i paesi del mondo, dove in quell'edizione sono state condotte una serie di presentazioni il cui tema comprendeva educazione e olografia. Nel poster dell'ISDH, viene presentato un gioco da tavolo tradizionale e una riflessione, ossia un ologramma con il fine di illustrare la rappresentazione tridimensionale in evoluzione ma soprattutto la tecnologia per il campo della didattica. Nel poster viene evidenziato che mettendo a confronto un gioco tradizionale e l'ologramma di un cervello riflesso questo potrebbe evidenziare gli effetti pedagogici delle immagini, con l'utilizzo di giochi e di sistemi tridimensionali per l'apprendimento delle scienze. Gli ologrammi riescono a sostituire gli oggetti reali, poiché ne forniscono una riproduzione dettagliata e realistica, possono essere riprodotti esseri umani, organi e personaggi animati, in vari ambienti di apprendimento che utilizzano sistemi di realtà diretta, emergente o aumentata, o che si servono di strumenti elettronici come nel caso di cellulari, computer, tablet e televisione.

L'olografia è l'unico mezzo che riesce a restituire un elemento tridimensionale che riproduca la realtà, poiché è in grado di registrare tutte le informazioni dell'oggetto che deve riprodurre ad alta definizione. Quando avviene l'interazione con gli ologrammi, studenti, medici, educatori e pazienti, attraverso dei compiti cognitivi e rappresentazioni mentali sviluppano abilità scientifiche, grazie alla capacità intellettuale per l'apprendimento in fasi sincronizzate. Grazie allo sviluppo delle immagini tridimensionali questo va a garantire una comprensione immediata degli argomenti mostrati, gli ologrammi semplificano la comprensione spontanea delle relazioni neuroanatomiche umane, che non è possibile apprendere tramite delle semplici immagini bidimensionali o diagrammi, questo segnala la strada per possibili applicazioni future sia in campo educativo che per altre discipline come elencato precedentemente, di questa tecnologia emergente.

Un esempio è quello dell'ologramma cerebrale pulsato, come materiale didattico in ambito di neurochirurgia, viene trattato per immagini sovrapposte, si tratta di un ologramma riflettente che si trova al centro di questo poster e rappresenta un'immagine tridimensionale del cervello, creato con il metodo della tecnica laser a onde pulsate, prodotto da un neurochirurgo Dr. Kathryn Ko che lo realizza tra il 1995 e il 1998 in collaborazione con Holographics, questo design ha il fine attraverso la dimensione tridimensionale di dimostrare in ambito scientifico delle informazioni scientifiche, semplici e complesse, infatti il processo che spinge le persone ad interagire con attività multimediali o multidimensionali con il design del poster, va a migliorare la loro conoscenza riguardante un determinato argomento, in questo caso per esempio l'anatomia umana. Infatti i soggetti mostrano delle abilità cognitive di base quando interagiscono con il

gioco tradizionale, mentre nel caso dell'interazione con l'ologramma si generano delle rappresentazioni mentali durante la sua analisi. Dopo questa scoperta le famiglie preferivano osservare il loro ologramma come mezzo educativo per la spiegazione delle varie procedure chirurgiche. Questo è stato sviluppato solamente vent'anni con il laser pulsato e oggi si è arrivati alla creazione di ologrammi virtuali 3D, l'olografia non può essere identificata solo come un salto nella tridimensionalità, ma una progressione di scoperte che hanno permesso una restituzione del mondo in modo più realistico possibile, per facilitarne il suo studio, si è passati dal disegno, alla fotografia, agli studi radiografici, alla TC e RM in due dimensioni e poi si è giunti alle tre dimensioni.

#### 4.8.1 Ricerca cognitiva ologrammi

“Dimmi e io dimentico, mostrami e io ricordo, coinvolgimi e io imparo”<sup>28</sup>. Queste parole sono state pronunciate da Benjamin Franklin un politico statunitense, nel settecento in merito alla relazione tra insegnamento e apprendimento.

Alcuni studi cognitivi mostrano che l'utilizzo degli ologrammi come agenti didattici, ossia immagini e sistemi tridimensionali saranno parte integrante del futuro, dove principianti ed esperti favorendo l'interazione con il mondo della scienza. Poiché la loro visione genera delle emozioni per chi li guarda e l'emozione contribuisce a fissare un determinato ricordo nella memoria. Queste ricerche sottolineano gli aspetti positivi di queste applicazioni, che riguardano la comprensione e forti benefici educativi per gli studenti quando all'istruzione vengono integrate le immagini tridimensionali, all'interno di contesti immersivi, poiché in ambito cognitivo lo studio non è mai passivo e la dinamica maggiormente efficace è quella dell'esperienza, che potrebbe essere di vari tipi cognitiva, emotiva e sensoriale, ma l'elemento più importante per poter garantire questa esperienza è il coinvolgimento. I risultati ottenuti vanno ad evidenziare che gli oggetti che sono dinamici o subiscono delle trasformazioni prospettive sono maggiormente informativi, ossia comunicano delle informazioni aggiuntive, rispetto agli oggetti che rimangono statici e dove non si possono percepire differenti prospettive dell'oggetto che rimane intrappolato in una visuale univoca.

Inoltre attraverso l'applicazione di segnali contestuali e non verbali questo garantisce una maggiore comprensione sia per bambini che per adulti, creando

---

<sup>28</sup> Studio Tangram, <https://www.studiotangram.com/ologrammi-e-apprendimento-lemozione-fissa-il-ricordo-nella-memoria/>

dei contenuti e comportamenti didattici in determinati contesti familiari, attraverso la riproduzione di figure umane, oggetti e immagini olografiche, riescono a rendere maggiormente significativi e coinvolgenti i contenuti e a motivare positivamente gli studenti, questo avviene tramite qualsiasi riproduzione tridimensionale dinamica, da un ologramma a riflessione ad uno digitale, questi permettono l'attivazione diretta dell'apprendimento. L'ologramma lavora tramite coinvolgimento emozionale e sensoriale, che va a scaturire la relazione con le flashbulb memories, si tratta di ricordi fissati nella memoria dopo l'apprendimento dovuto ad una forte carica emotiva, si tratta di adottare delle strategie per rendere la comunicazione sempre più accattivante e garantirne un maggiore interesse da parte di chi ascolta. Gli ologrammi hanno la capacità di trasmettere in modo incisivo informazioni e nozioni, le immagini tridimensionali forniscono una quantità di dettagli di un'immagine bidimensionale e favorisce la memorizzazione di particolari che quando vengono descritti su carta sono difficili da immaginare, mentre nell'altro caso si ha una visione diretta, che non rimane astratta.

Uno degli studi maggiormente affrontati a seguito di queste tematiche è proprio quella di neuroimaging, che va ad indicare degli effetti percettivi che comprendono sia la comprensione che il comportamento, quando il tutto è supportato dall'olografia.

Gli ologrammi saranno la chiave futura per il raggiungimento di determinate competenze e abilità all'interno degli ambienti di apprendimento tridimensionale che si baserà, sul mezzo variabile, ossia ologramma, agente o istruzione umana, sul tipo di sistema utilizzato ossia gioco, computer o avatar e un'analisi percettiva degli stimoli olografici come movimento statico o cinetico, al momento sono necessarie ulteriori ricerche, sia a livello di strumentazione per coordinare e favorire il movimento e l'interazione per garantire l'utilizzo a tutte le fasce d'età e soprattutto per indagare sugli effetti a breve e lungo termine degli ologrammi.

Nel caso nel design del poster, il tentativo si basa sul presupposto che l'esposizione degli studenti e strumenti didattici multidimensionali e multimediali possano la causa di differenti cambiamenti comportamentali e inoltre potrebbero favorire lo sviluppo di determinate abilità, strettamente legate all'apprendimento, comprensione e capacità di ragionamento.

#### **4.8.2 Esempi di tecnologie olografiche all'interno delle università per l'apprendimento integrato**

Il primo caso riguarda il progetto del Professor Hologram del 2018, con la collaborazione di Tecnológico de Monterrey (TEC) e Delft Technological University (TU DELFT), che consente agli studenti di poter interagire in tempo reale con un insegnante a grandezza naturale ma si tratta di un ologramma.

Grazie all'organizzazione di questo progetto nei Paesi Bassi è stata introdotta la prima classe intercontinentale che coinvolge la tecnologia Professor Hologram, per questa iniziativa sono stati coinvolti studenti e professori dei campus e studenti di TEC mentre la lezione veniva tenuta da Queretaro un professore ospite della TU DELFT.

La prima lezione prevedeva un dialogo tra il Dipartimento di Urbanistica della TU DELFT e la Scuola di Architettura, Arte e Design di TEC. Il progetto ha garantito una certa alleanza tra i due dipartimenti che ha permesso l'interazione di più persone di altri paesi e continenti. Dopo essere stata bloccata dalla pandemia, l'iniziativa del Professor Hologram è stata riattivata includendo la partecipazione di venti docenti provenienti da differenti unità formative di vari ambiti. Questa esperienza che garantisce una maggiore immersività rispetto alle videochiamate dove non è possibile percepire a pieno espressioni e gesti ed è maggiormente vicino a una lezione faccia a faccia. Questa iniziativa in seguito al successo ottenuto ha catturato l'interesse di consorzi di università di Germania, Irlanda e Italia.



Figura 56\_ Professor Hologram ospite a TU DELFT, (Avininterative Magazine, Campos. G, 2022, <https://www.avinteractive.com/news/projection/professor-hologram-teaches-first-intercontinental-uni-class-04-10-2022/>)

---

Sempre nel 2018 alcuni studenti universitari sono stati i primi a seguire delle lezioni tenute all'università grazie a delle proiezioni olografiche, la tecnologia utilizzata deriva dalla società di ologrammi AHRT Media che presenta la sede a Toronto mentre è stata adattata dall'Edtech Lab dell'Imperial College Business School, questa soluzione consente ai docenti e relatori ospiti di tenere la loro presentazione e inoltre è possibile interagire in tempo reale con il pubblico, da

studi che si trovano in città in vari stati del mondo come Stati Uniti, Canada e Singapore. L'ologramma è stato proiettato in formato tridimensionale a grandezza naturale all'interno delle aule dell'Imperial College. Anche in questo caso la tecnologia permette di non mostrarsi tramite un messaggio preregistrato o attraverso una semplice videochiamata, come generalmente è avvenuto durante il periodo della pandemia del Covid 19, ma grazie a questa soluzione la sensazione è quella di avere davanti una persona fisica che sta tenendo una conferenza anche se è dall'altra parte del mondo, che risponde in modo immediato alle domande del pubblico e reazioni, per mezzo del collegamento di una telecamera, questo tipo di interazione va a restituire ciò che avverrebbe nella realtà con delle persone fisiche, abbatte i limiti di spazio e tempo.

Il dottor Lefèvre che è il direttore dell'Edtech Lab che fa parte dell'Imperial College Business School afferma:

«L'introduzione della tecnologia dell'ologramma in classe abatterà i limiti dell'insegnamento tradizionale creando un'esperienza interattiva a vantaggio sia degli studenti che degli accademici».<sup>29</sup>

Questa soluzione permette di ospitare simultaneamente lezioni in più classi e luoghi, ma anche gruppi di discussione ed eventi di dibattito, andando a generare una combinazione di persone che sono virtuali e persone che si trovano fisicamente in quel contesto, infatti come quanto dichiarato nei precedenti capitoli, questo favorisce la riduzione delle emissioni di carbonio, con la riduzione di viaggi di lavoro, troppo frequenti e anche per risparmiare le spese di viaggio e tempo. la lezione potrebbe essere inoltre essere registrata e conservata all'interno di una libreria di contenuti e potrebbe essere usufruibile da altri studenti, docenti amministratori o ricercatori.

Inoltre Lefèvre dice: «Piuttosto che sostituire o ridurre le lezioni della vita reale, la tecnologia dell'ologramma fornirà una maggiore flessibilità agli accademici consentendo loro di continuare a insegnare durante i viaggi, garantendo coerenza e qualità agli studenti. La tecnologia amplierà inoltre la possibilità per Imperial di invitare leader globali e influencer del settore a tenere discorsi agli studenti, arricchendo così l'esperienza di apprendimento»<sup>30</sup>.

Il professore Francesco Veloso afferma: «Investire nelle nuove tecnologie è una parte vitale della nostra strategia per creare esperienze di apprendimento più flessibili e stimolanti per i nostri studenti. Facendo parte dell'Imperial College London, desideriamo aumentare la nostra visibilità digitale come business

---

<sup>29</sup> Singleton. L, "Imperial College Business School to offer live lectures via hologram", Imperial College London, November 2018, <https://www.imperial.ac.uk/news/188851/imperial-college-business-school-offer-live/>

<sup>30</sup> Ibidem

school e il nuovo ologramma rappresenta il lavoro pionieristico che il nostro Edtech Lab sta svolgendo in questo settore»<sup>31</sup>.

Nel caso di alcune università come per esempio l'University of Southern California (USC), gli ologrammi collegano gli studenti del campus a quelli remoti e riescono ad organizzare delle lezioni interattive e coinvolgenti grazie all'utilizzo delle ARTH CAPSULE dove gli studenti hanno la possibilità di interagire con i propri docenti, vedendo espressioni facciali, movimenti del corpo e gesti nei minimi dettagli. Questa esperienza ha dimostrato che la comunicazione olografica è maggiormente efficace per comprendere determinati contenuti che riguardano materie scientifiche estremamente complesse, inoltre rende migliore anche la preparazione dei contenuti delle lezioni per i docenti, che riescono a creare delle presentazioni 3D dinamiche e interattive, dove all'interno di teche vengono proiettate le figure umane tridimensionali supportate da materiali o oggetti che sono dinamici e hanno il compito di rendere la presentazione maggiormente comprensibile.

Un altro esempio di università che usa questo genere di tecnologia è IMD Business School, con ARTH Capsule e gli schermi ARTH a Losanna e Singapore, i docenti e gli ospiti di IMD hanno integrato questi sistemi nelle aule con lo scopo di migliorare il collegamento e la comunicazione tra differenti università.

Ed infine l'ultimo esempio che applica questa tecnologia è l'HEC Paris HEC Qatar, che utilizzano queste tecnologia come nel caso precedente per garantire una migliore possibilità di comunicazione e collegare maggiormente questi due campus, andando ad abbattere le barriere geografiche e permettendo di rimanere sempre connessi per una migliore collaborazione e condivisione delle conoscenze, che ha migliorato i risultati di apprendimento.

---

<sup>31</sup> Singleton. L, "Imperial College Business School to offer live lectures via hologram", Imperial College London, November 2018, <https://www.imperial.ac.uk/news/188851/imperial-college-business-school-offer-live/>



Figura 57\_ Esempi di tecnologie Arth Capsule, (Martech, Wood C, <https://martech.org/arht-rolls-out-retail-hologram-experiences/>)

---

Oltre a queste interazioni con i professori proiettati tramite ologrammi, soprattutto nelle università di medicina sempre più si stanno utilizzando queste nuove tecnologie per studiare pazienti che garantiscono delle simulazioni di svariati problemi clinici al fine di un migliore apprendimento da parte degli studenti, che si ritrovano a poter analizzare in dettaglio varie parti del corpo umano a seconda della patologia.

Come nel caso della partnership che comprende il Cambridge University Hospitals (CUH) e la Facoltà di Educazione dell'Università, che ha lo scopo di migliorare la formazione medica utilizzando le tecnologie di Realtà Mista, in questo modo cerca di garantire una formazione clinica congruente e più accessibile in tutto il mondo.

In questo caso l'applicazione di formazione è basata su scenari di pazienti olografici realizzata dal Cambridge University Hospital NHS Foundation Trust (CUH), che ha organizzato una collaborazione con l'università di Cambridge e la società GigXR.

Dall'intervista al Dottor Arun Gupta, anestesista e consulente del CUH e direttore della formazione post-laurea alla Cambridge University Health Partnership che ha il compito di condurre il progetto, si evince che la realtà mista è un metodo utile per poter portare avanti addestramenti e simulazioni, che in altro modo non sarebbero possibili nella realtà. Si tratta di gruppi di studenti che

attraverso il supporto di visori Microsoft HoloLens citati nei capitoli precedenti, riescono ad interagire con un paziente con un paziente olografico a più livelli e anche in maniera più accurata, queste crea una formazione unica che permette agli studenti di apprendere e praticare delle decisioni vitali in tempo reale, ma soprattutto delle scelte terapeutiche.

Attraverso delle cuffie sono in grado di modificare le risposte dei pazienti, introdurre delle complicazioni e inoltre registrare delle osservazioni e discussioni sia di persona ma anche con altre persone che stanno dall'altra parte del mondo, di conseguenza anche in questo caso è possibile garantire la presenza olografica di persone che in quel momento non si trovano in quello specifico ambiente.



Figura 58\_ collaborazione Cambridge University Hospital NHS Foundation Trust (CUH) e la società GigXR, (Business Wire, 2022, <https://www.businesswire.com/news/home/20220627005691/en/GigXR-and-University-of-Cambridge-and-Cambridge-University-Hospitals-CUH-NHS-Foundation-Announce-Availability-of-Holographic-Patient-Simulation>)

---

Un altro esempio è quello della tecnologia dell'ologramma che viene utilizzata sempre in ambito sanitario, ma con differenti tecnologie, infatti l'Università della Florida Centrale (UCF) utilizza gli ologrammi in aula, che sono live action e hanno la peculiarità di essere estremamente realistici, progettati per aiutare gli studenti che devono comprendere al meglio in ambito sanitario la sicurezza del paziente e l'assistenza generale, questo viene reso possibile tramite un equipaggiamento che viene chiamato PORTL, si tratta di una scatola di proiezione. Questa tecnologia come le precedenti garantisce la visione del corpo

umano in tutte le sue parti, ad alta definizione e la capacità di interagire in tempo reale, dopo la prima esperienza UCF ha previsto di utilizzare questa soluzione per una varietà di classi e livelli di laurea molto ampi, che comprende anche il periodo post-laurea, di conseguenza include un ampio campo di specializzazioni. Viene chiamato Dott. Hologram e si tratta di un paziente standardizzato, che contiene un numero vastissimo di moduli di simulazione. Quest'ultima può essere presentata nelle sembianze di un robot, tablet, ologramma o live streaming per la telemedicina.

## **5 Esperienza con gli ologrammi**

### **5.1 La Biennale di Tecnologia e l'esperienza laboratoriale**

Per il lavoro di tesi in relazione agli ologrammi, ho avuto l'opportunità di partecipare per la prima volta alla Biennale di Tecnologia del Politecnico di Torino nell'edizione 2022 intitolata "Principi – Costruire per le generazioni", dove i protagonisti sono stati i principi che si possono interpretare sia come nuovi inizi, ma anche cardini sul quale costruire il futuro. In questa manifestazione si affronta il tema della tecnologia e del suo impatto in tutti gli ambiti della vita umana, per estendere la visione sulle varie possibilità che potrebbe offrire, in quanto strumento umano che condiziona ogni giorno la vita di ciascuno di noi, ma soprattutto il futuro. È proprio alle nuove generazioni che la Biennale vuole motivare, infatti ogni anno che si celebra si cerca di coinvolgere un pubblico sempre più variegato che comprende tutta la comunità politecnica, le scuole, i media i decisori politici e la cittadinanza. Nel caso dell'evento tenutosi nelle date dal 10 al 13 novembre 2022 sono stati previsti 130 appuntamenti, che comprendevano lezioni, dialoghi, incontri, dibattiti, mostre, spettacoli all'interno delle sedi principali del Politecnico di Corso Duca degli Abruzzi e del Castello del Valentino, ma anche all'interno del Circolo dei lettori e delle Officine Grandi Riparazioni. Viene intitolata Tecnologia è Umanità, perché vuole avviare una riflessione profonda per poter dare qualche risposta e garantire lo sviluppo di un mondo migliore, corretto e democratico. Il programma si è articolato in tre filoni differenti che rappresentano un significato particolare della parola Principi, il filone iniziale è stato quello dei Fondamenti, che sono parte di qualsiasi disciplina, da quella tecnica, giuridica, economica o in altro campo, si tratta di conoscenze introduttive, dove si sono affrontati i temi della democrazia, diritti in merito alla tecnologia, al lavoro, la sanità e le infrastrutture. Per quanto riguarda il secondo filone si è parlato di Nuovi inizi, che descrivono la società che una comunità vorrebbe costruire all'interno della Dichiarazione dei Diritti e dei

principi digitali che vengono suggeriti dalla Commissione Europea nell'anno 2022, che cercano di trovare un punto di unione tra pensieri opposti, soprattutto sulle tematiche della sostenibilità, nuovi sistemi di sviluppo economico, tecnologie e politiche per garantire una politica innovativa, tutte questi temi avevano lo scopo di innescare una riflessione profonda sull'universo giovanile e la direzione che potrebbe seguire la società tecnologica in futuro. L'ultimo filone è quello dei Principi Attivi, questo conduce alla riflessione su tutte le tecnologie che promuovono azioni, comportamenti e pensieri innovativi che cercano di risolvere e curare le malattie della società e ne migliorano la qualità. Le tecnologie possono essere ritenute dei Principi attivi che agiscono all'interno della società per salvaguardarla da possibili malesseri, che hanno degli effetti positivi per la vita umana e per il pianeta come nel caso della transizione digitale, i materiali intelligenti, le tecnologie per l'energia, gli algoritmi, i robot ed infine l'intelligenza artificiale, potrebbero essere potenzialmente delle soluzioni per tutto ciò che non funziona all'interno della società.

Come quanto riportato precedentemente ho avuto l'opportunità di collaborare alla Biennale di Tecnologia all'interno dei due stands che presentavano le potenzialità dell'olografia tramite la riproduzione di animazioni e foto bidimensionali con il supporto di ventole olografiche, sotto la responsabilità del Professore Amedeo Domenico Bernardo Manuello Bertetto del Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica (DISEG), che ha collaborato sia con il Dipartimento di Intelligenza Artificiale del Politecnico di Torino che con la Fondazione Noesis che nasce nel 2002 grazie a Davide Vannoni, la Presidentessa Manuela Lamberti e Amalia Panno che attraverso la ricerca indagano i nuovi approcci disciplinari come per esempio la psicologia cognitivista e la semiotica strutturalista e in quale chiave potrebbero essere proposti nuovi linguaggi culturali. Avviando il progetto "Ritorno alla Nuova Itaca" che ha lo scopo di investigare sulla cultura del domani e trovare il senso del Nuovo Umanesimo dove si ci ritrova a doversi interfacciare sempre più con la tecnologia. Questa iniziativa è appoggiata dal progetto "Itaca: sperimentazioni digitali per un nuovo linguaggio teatrale", grazie al supporto della Fondazione della Cassa di Cuneo, da questo progetto è nata la rappresentazione teatrale dal titolo "Omicidi all'Autogrill", dove gli ologrammi facevano parte della scenografia.

La presentazione dei proiettori olografici e le loro potenzialità sono state organizzate in due stands differenti, il primo giorno della Biennale si è svolto lo Stand a carattere laboratoriale, per i ragazzi delle scuole superiori.

Il laboratorio tenutosi nel Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica (DISEG), comprendeva quattro step:

- Per il primo si è deciso di organizzare una parte di presentazione introduttiva sui principi fisici dell'olografia, la sua genesi, quante tipologie di ologrammi sono presenti, il tutto supportato da filmati per garantire una maggiore comprensione e illustrare a quale livello di olografia si potrebbe arrivare in un futuro.



Figura 59\_ prima parte introduttiva, del laboratorio della Biennale di Tecnologia

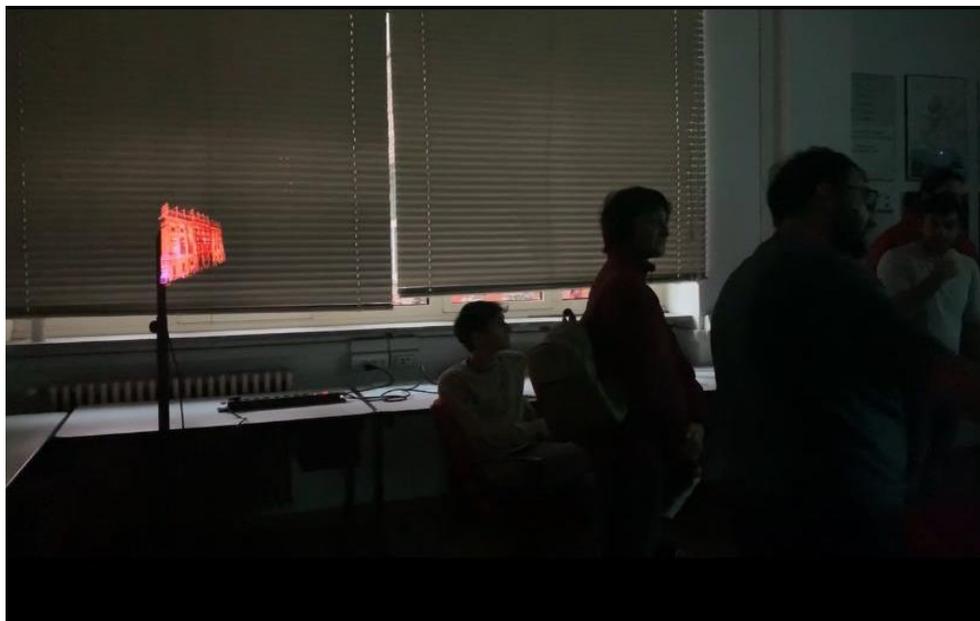


Figura 60\_ prima parte introduttiva, del laboratorio della Biennale di Tecnologia

- Dopo la fase teorica si è passati a quella pratica senza l'introduzione di tecnologie che ha previsto la realizzazione di una piramide olografica, per comprendere al meglio il principio fisico dell'ologramma a riflessione. Ad ogni studente è stato consegnato il materiale per realizzare la piramide ossia delle forbici, un pennarello indelebile, dei fogli di acetato trasparenti, righelli e scotch, per creare le quattro facce a forma di trapezio isoscele, con le dimensioni di base maggiore di 6 centimetri, base minore 1 centimetro, altezza di 3 centimetri e mezzo, dopodiché è stato creato il prisma unendo le quattro facce con lo scotch trasparente.

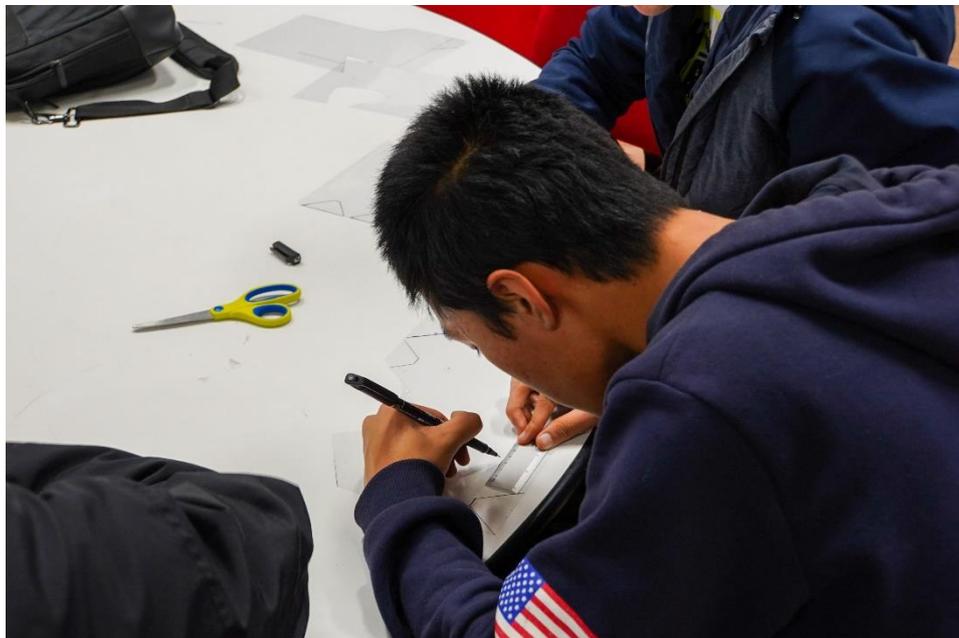


Figura 61\_ seconda parte, i ragazzi realizzano le piramidi olografiche

---



Figura 62\_ seconda parte, i ragazzi realizzano le piramidi olografiche

---

- Nelle terza parte si è condiviso con gli studenti il funzionamento della ventola olografica, dopo un'iniziale spiegazione di carattere tecnico sul proiettore, si è passati all'accensione della ventola olografica e la creazione di un elemento tramite un programma di modellazione come per esempio Blender (possibile utilizzare un qualsiasi programma che possa esportare i file in OBJ), di una qualsiasi figura geometrica tridimensionale da poter caricare all'interno del software integrato nel proiettore di nome CNS che consente di gestire in modo immediato il caricamento dei materiali per essere proiettati e permette di scegliere delle animazioni predefinite e possono essere caricati dei file in formato OBJ con o senza texture che possono essere scelti e campionati direttamente prima del loro caricamento per la proiezione, che può essere avviata tramite tablet o smartphone, le dimensioni delle immagini o dei video non possono superare i 1024 pixel di grandezza, il proiettore se viene rispettata quest'ultima riesce ad adattare qualsiasi tipo di contenuto. Sono stati utilizzati due proiettori olografici della Hypervision, per la riproduzione sia di immagini bidimensionali, che sono state estruse dal software garantendo una percezione e visione tridimensionale, ma anche degli elementi modellati tridimensionalmente.



Figura 63\_ terza parte: presentazione funzionamento del proiettore olografico



Figura 64\_ quarta parte: gli studenti creano il modello tridimensionale su Blender

- Alla fine della proiezione dell'elemento realizzato dagli studenti tramite un lavoro di gruppo, si è passati alla prova su ognuno dei loro smartphone della riproduzione degli ologrammi grazie alla piramide olografica realizzata precedentemente, tramite dei video che si trovano su YouTube che hanno la

peculiarità di avere quattro immagini specchiate che corrispondono ad ogni faccia del prisma inclinata a 45 gradi sullo schermo dello smartphone e tramite la riflessione della luce grazie al materiale trasparente e lucido, vanno a creare una figura 3D fluttuante.



Figura 65\_ effetto creato dalla piramide olografica realizzata in laboratorio

---

## 5.2 Conclusione dell'esperienza laboratoriale

Ciò che è emerso dall'esperienza laboratoriale è che sia la creazione della piramide che si trattava di un lavoro manuale, sia la modellazione tramite programma e poi la proiezione olografica ha scaturito molto interesse sia da parte dei professori che accompagnavano gli alunni, ma anche dagli stessi studenti che in piccola percentuale avevano ammesso di aver realizzato autonomamente delle piramidi olografiche.

Nei giorni successivi ci siamo occupati del secondo stand, che aveva il compito di presentare le potenzialità di questi proiettori e inoltre si ha avuto l'occasione

di parlare sia dei lavori portati avanti dalla Fondazione Noesis, soprattutto in campo teatrale come citato precedentemente, ma anche della nuova apertura del Corso di Scienze delle Costruzioni tenuta dal Professore Manuello Bertetto che prevedeva l'integrazione della tecnologia olografica a scopo didattico, dove la prima lezione si è tenuta durante la prima settimana di Marzo.

### **5.3 Produzione del materiale olografico per il nuovo Corso di Scienze delle Costruzioni**

Il lavoro per il nuovo corso è stato quello di estrapolare alcuni contenuti dalle slides attinenti a programma organizzato dal professore ossia di Scienze delle Costruzioni e ricreare dei video animati, da proiettare in aula con le ventole olografiche di supporto alla lezione frontale tradizionale.

Ho creato nove video che rappresentano i vincoli, delle mensole sollecitate secondo determinate forze, il doppio pendolo e una slide che rappresenta i vari step di spiegazione delle Formula di Jourawsky. Le mensole sono state realizzate con un programma di modellazione che si chiama Blender e attraverso l'animazione ricreata attraverso i fotogrammi con la cattura dello spostamento generato da modificatori o attraverso una composizione di armature all'interno del solido, dopodiché ho creato un materiale semiopaco per garantire la comprensione della deformazione rispetto all'asse neutro e delle frecce che ne facessero comprendere la deformazione. Una volta avviata l'animazione le mensole e i vincoli sono stati renderizzati e ho estrapolato i file FBX senza sfondo, che successivamente sono stati convertiti in file MP4 e importati all'interno di Photoshop nella sezione video per poter aggiungere le scritte, l'asse neutro e gli assi di riferimento. Le scritte sono state realizzate con il colore bianco, mentre l'asse neutro rosso e gli assi di riferimento gialli.

Per importarli all'interno del CNS si è utilizzato il formato MP4 e la dimensione 1024 per 1024 pixel, in questo caso l'inserimento della texture è avvenuto direttamente all'interno del programma di modellazione.

Mentre per il restante materiale è stato estrapolato da parti di video che sono stati creati dal Canale YouTube "The Efficient Engineer" (<https://www.youtube.com/@TheEfficientEngineer>) che sviluppano delle animazioni particolari per spiegare concetti di ingegneria complessa. Per estrapolare i video è stato utilizzato un convertitore online che trasformasse il file in MP4, successivamente i video sono stati importati sul programma After Effects di Adobe per poter creare dei video senza sfondo grazie allo strumento pennello a rotoscopio che permette di rilevare i pixel con la stessa colorazione e con questo

metodo è possibile selezionare velocemente lo sfondo da cancellare, per garantire una resa tridimensionale migliore. Successivamente dopo la creazione del video desiderato si apre la sezione composizione ed possibile attraverso l'opzione aggiungi a coda di rendering scegliere la cartella dove esportare il file e in quale formato, in questo caso è stato esportato in formato MOV che è stato convertito successivamente sul convertito MP4 di Adobe Express.

## 5.4 Video creati su Blender

### 5.4.1 Vincolo Cerniera

Nel caso del vincolo a cerniera può essere definito doppio poiché fornisce due gradi di vincolo per la traslazione negli assi di riferimento x e y e un grado di libertà per la rotazione. Nel video si può notare solo la rotazione della trave ossia l'unico movimento permesso dal vincolo.

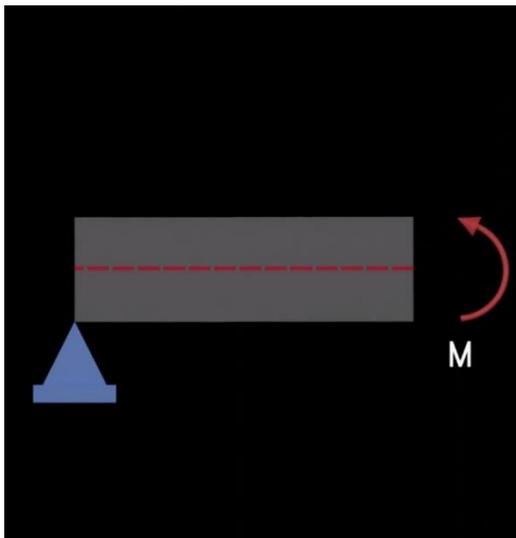


Figura 66\_ situazione iniziale trave

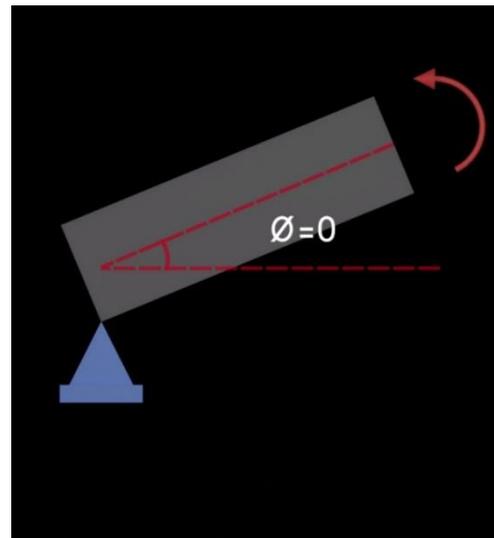


Figura 67\_ rotazione della trave

### 5.4.2 Vincolo Carrello

Per quanto riguarda il carrello si tratta di un vincolo che può essere considerato semplice o singolo, il corpo del carrello poggia tramite due o più rulli che hanno il compito di scaricare il carico e scorrere sul piano d'appoggio, il suo comportamento viene definito bilaterale come viene rappresentato nel video,

perché la reazione vincolare prodotta lungo l'asse del carrello potrebbe manifestarsi nei due versi indifferentemente, potrebbe essere sia verticale quindi permettere lo spostamento sia in alto che in basso, la stessa cosa potrebbe avvenire lateralmente, concede due gradi di libertà, nella prima parte di video viene rappresentata la prima che è di tipo "spostamento" lungo la direzione del piano di riferimento se è orizzontale  $x$  mentre se è verticale  $y$ , mentre nell'ultima parte del video viene rappresentato il secondo grado di libertà che viene che di tipo "rotazione" che avviene rispetto alla cuspide superiore propria del corpo del carrello.

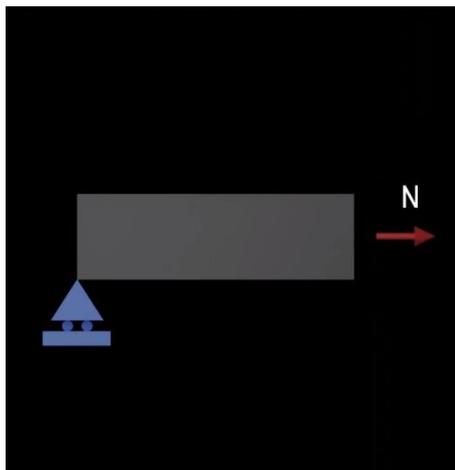


Figura 68\_ stato iniziale trave

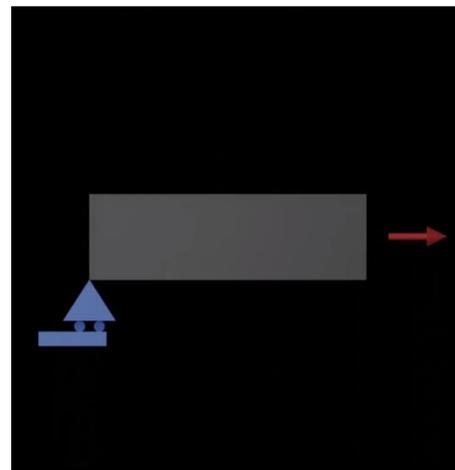


Figura 69\_ traslazione orizzontale

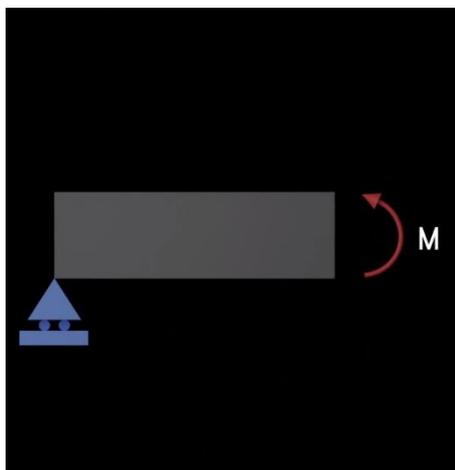


Figura 70\_ stato iniziale

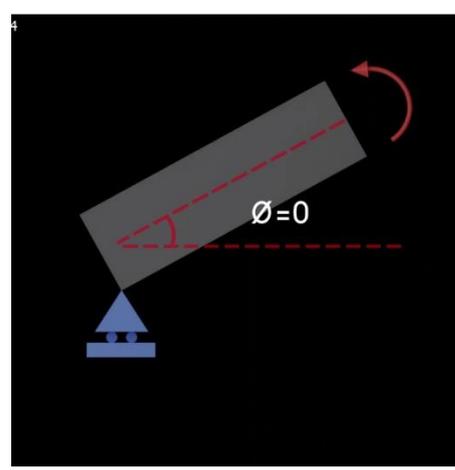


Figura 71\_ rotazione trave

### 5.4.3 Doppio pendolo

Si tratta di un vincolo semplice che impedisce un incremento di rotazione nella sezione retta ma consente un incremento di traslazione. La reazione è data da una coppia agente sul piano della trave che coincide con l'asse di rotazione che viene impedita, questo genere di vincolo viene rappresentato come un doppio doppio pendolo o anche conosciuto come pendolo improprio, che è costituito da due coppie di doppi pendoli che vengono connessi tramite un elemento rigido per permettere una variazione di spostamento contenuta.

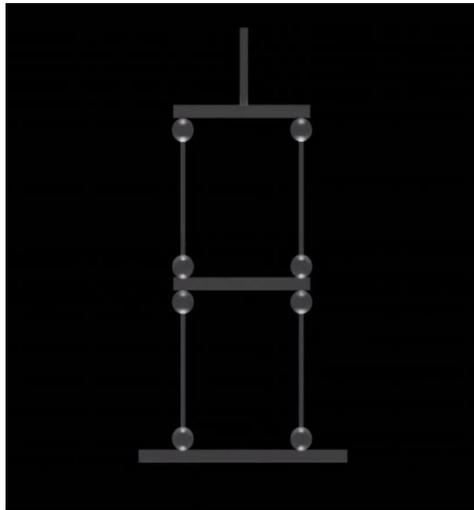
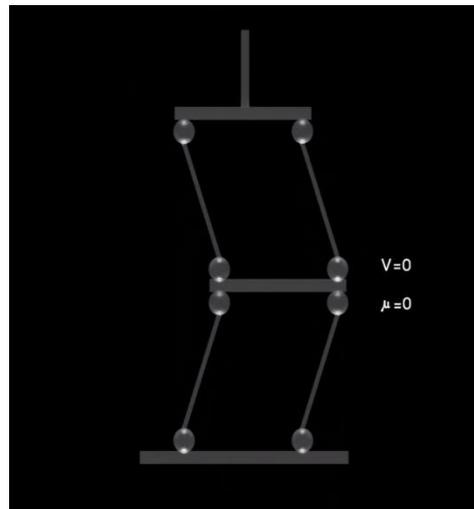


Figura 72\_ stato iniziale doppio pendolo  
Figura 73\_ spostamento laterale contenuto



### 5.4.4 Mensola spostamento verticale

Nel video viene riprodotta la deformazione della trave a sbalzo dato un determinato carico puntuale verticale che giace sul piano  $x,z$  e segue la direzione  $y$ , viene sottoposta a flessione che è caratterizzata da due fondamentali parametri, il primo è la rotazione dell'asse geometrico rispetto allo stato di indeformata non ancora sottoposto a carico, mentre il secondo parametro riguarda l'abbassamento asse geometrico della trave, che si può notare nell'ultima parte del video.

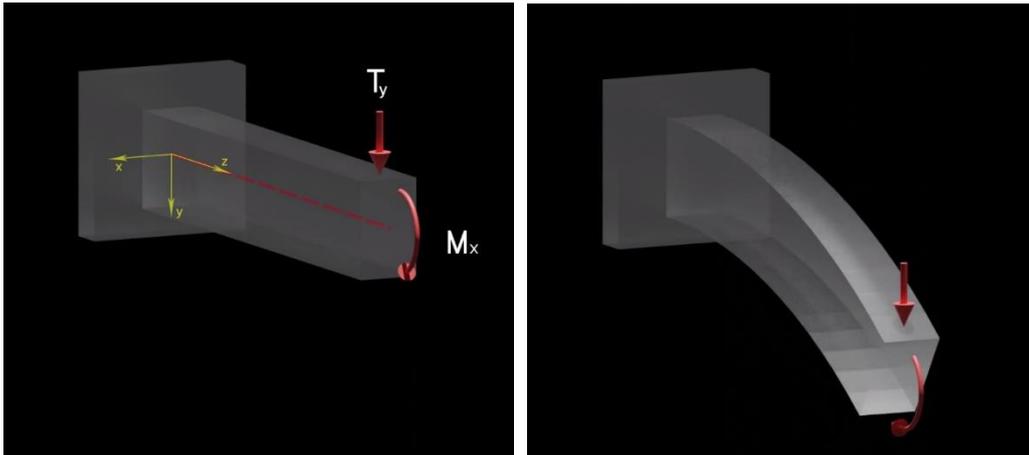


Figura 74\_ stato iniziale mensola  
 Figura 75\_ mensola sottoposta a carico

---

### 5.4.5 Mensola spostamento laterale

Per quanto riguarda la deformazione laterale della trave a sbalzo, può essere definita come la sollecitazione precedente, ma cambiano sia il piano di riferimento in questo caso il carico puntuale giace sul piano  $y,z$  e segue la direttrice  $x$ .

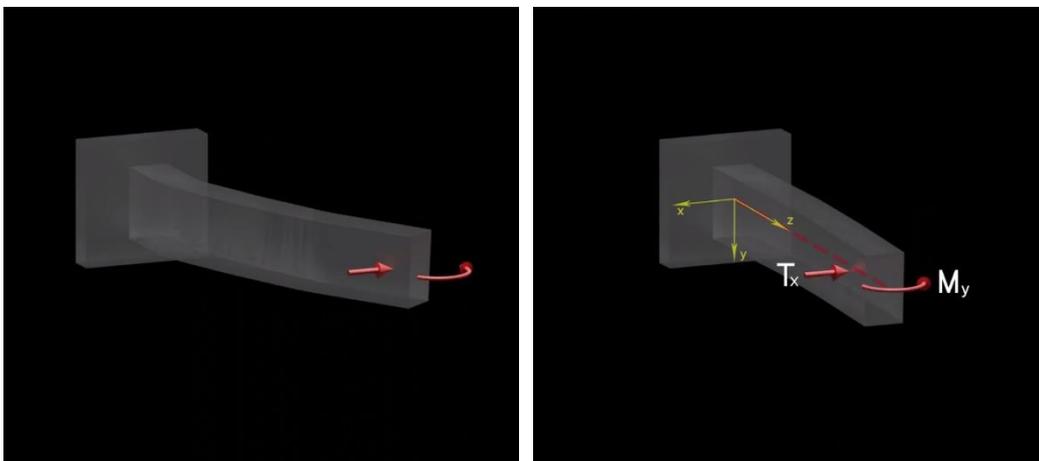


Figura 76\_ stato iniziale mensola  
 Figura 77\_ mensola sottoposta a carico laterale

---

### 5.4.6 Mensola a compressione

In questo video viene illustrato il comportamento di un qualsiasi corpo in questo caso un mensola a sbalzo che sottoposta ad una forza che giace sul piano  $x,y$

permette la variazione di dimensione lungo l'asse  $z$ , generalmente si allunga in una direzione e si accorcia nell'altra. La variazione di dimensione è strettamente proporzionale alla forza momento applicata, tramite il modulo di elasticità se non si supera il limite dello sforzo a rottura, una volta rilasciata la forza il corpo ritorna alla dimensione originaria, ma sul materiale rimane un allungamento residuo permanente che non è più recuperabile, in questo caso la forza a compressione è entrante, di conseguenza il corpo tende ad accorciarsi.

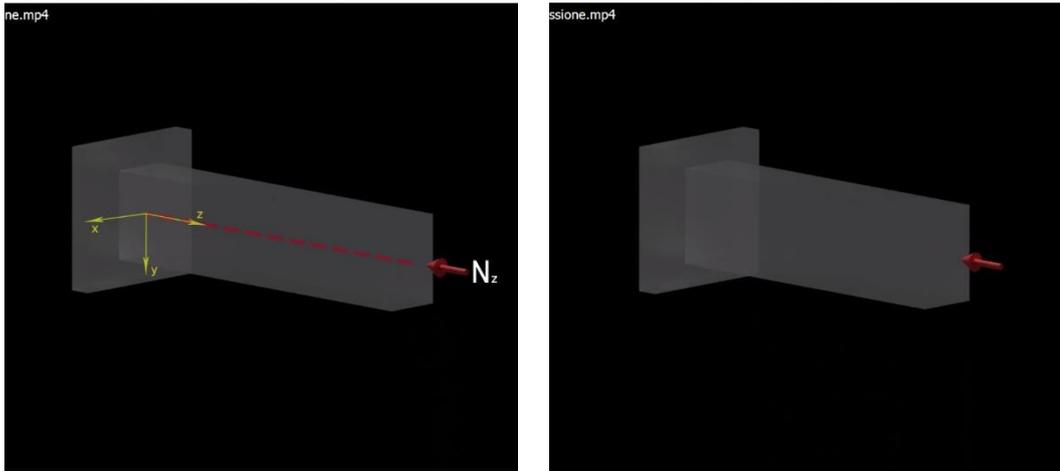


Figura 78\_ mensola stato iniziale  
 Figura 79\_ mensola sottoposta a compressione

#### 5.4.7 Mensola a trazione

Nel caso delle mensola sottoposta a trazione avviene lo stesso comportamento precedente, ma la forza in questo caso giace sul piano  $x,y$  e va in direzione  $z$  opposta a quella precedentemente spiegata e la forza momento applicata in questo caso è uscente, di conseguenza il corpo tende ad allungarsi.

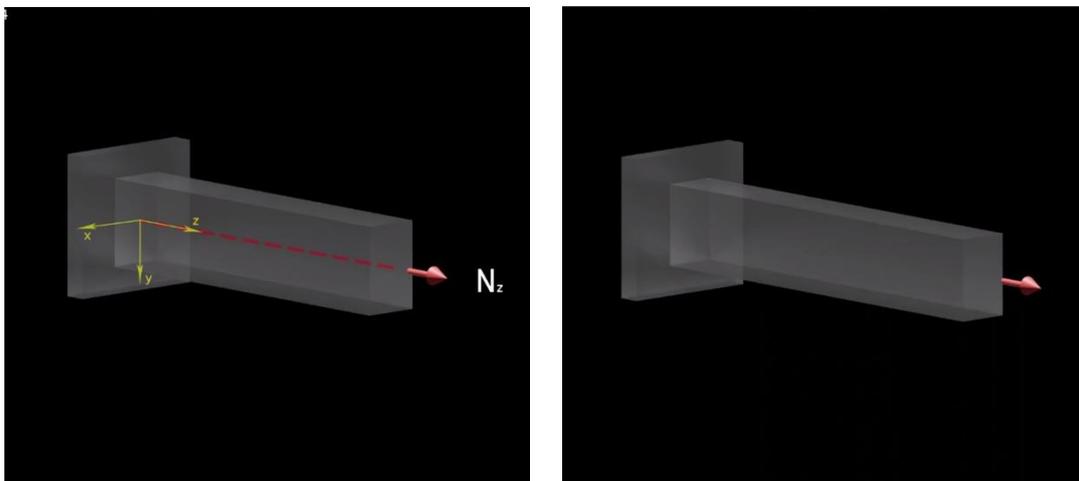


Figura 80\_ mensola stato iniziale  
 Figura 81\_ mensola sottoposta a trazione

### 5.4.8 Mensola a torsione

La torsione semplice si verifica quando la risultante delle forze esterne a prescindere dall'entità della sezione è nulla e le forze esterne si riducono ad una coppia giacente nel piano di riferimento, in questo caso  $x,y$  e hanno un momento rispetto all'asse stesso che viene definito come momento torcente.

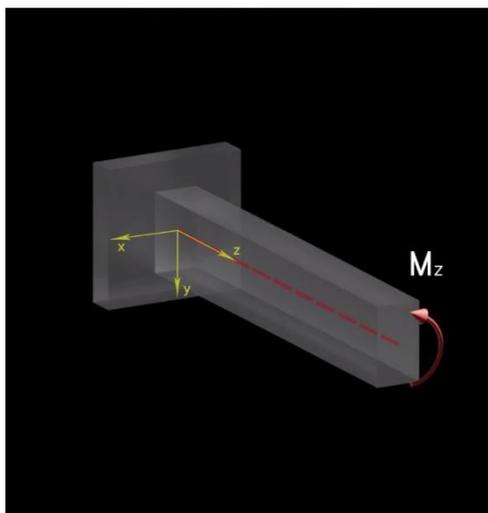


Figura 82\_ mensola stato iniziale

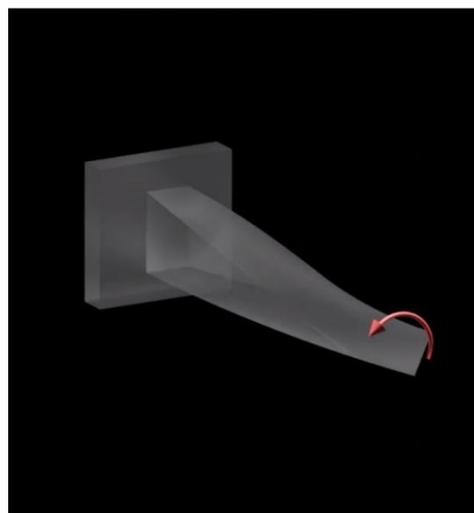


Figura 83\_ mensola sottoposta a torsione

---

### 5.4.9 Formula di Jourawsky

In questa slide animata si analizza il solido di De Saint Venant che viene sollecitato a taglio che è associato alla flessione. La descrizione della formula di Jourawsky viene calcolata per stimare le tensioni tangenziali e gli scorrimenti angolari, generalmente queste sono di entità modesta rispetto a quelle indotte. Nella prima parte del video, viene illustrato il solido di De Saint Venant che viene sollecitato alle basi, infatti la consideriamo con due forze di estremità uguali e opposte, la sollecitazione tagliante  $T_x$  è associata al momento flettente  $M_y$  mentre la sollecitazione tagliante  $T_y$  è associato ad un momento flettente  $M_x$ . Risulta essere sollecitata da un taglio  $T_y$  costante e da una flessione retta  $M_x$  che risulta variabile linearmente lungo l'asse. La tensione normale  $\sigma_z$  si calcola con la forma di Navier. Successivamente si prende la porzione centrale di solido, possiamo immaginare che a causa della sollecitazione tagliante, oltre alle tensioni normali possono essere presenti anche delle tensioni tangenziali in vari punti. Introducendo due assi  $r$  e  $s$  ortogonali, potranno essere presenti due componenti di tensione tangenziale  $\tau_{zr}$  e  $\tau_{zs}$ .

Questa formula così facendo permette di calcolare il valore medio delle componenti tensione tangenziale presenti in punti in una sezione trasversale allineati su una generica corda, se si ottengono valori positivi, allora la tensione tangenziale media è entrante nella porzione di sezione trasversale che è stata considerata per il calcolo del momento statico nella formula di Jourawsky.

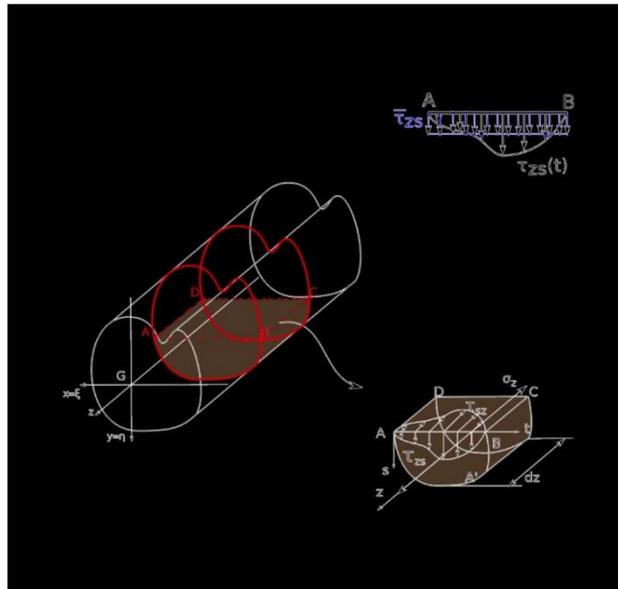


Figura 84\_ slide della Formula di Jourawsky

## 5.5 Video estrapolati dal canale Youtube "The Efficient Engineer"

Mentre i video estrapolati dalle animazioni generate da "The Efficient Engineer", sono stati selezionati in modo che potessero dare una sensazione di profondità, poiché alcuni risultavano estremamente bidimensionali. Sono stati selezionati sedici video dove alcuni di loro sono stati uniti, ossia:

### 5.5.1 Trave sezione piena rettangolare sottoposta a momento flettente

Al contrario dei casi precedenti, ossia della mensola vincolata da un lato, in questo caso il comportamento che si verifica ossia la trave che flette quando ha un momento flettente costante lungo la sua lunghezza, viene generato da un carico puntuale che generalmente si trova in mezzeria, si considera la trave come una composizione di numerose fibre che in questo caso nella parte superiore si accorciano e significa che sono sottoposte a compressione, mentre nella parte inferiore si allungano e di conseguenza sono sottoposte a tensione. Nella parte

superiore o inferiore potrebbe esserci una superficie contenente delle fibre rimangono inalterate, ossia della lunghezza originaria, questa viene chiamata superficie neutrale che passa per il baricentro della sezione trasversale, mentre quando osserviamo una trave bidimensionale generalmente è nota come asse neutro grazie a questo di può quantificare la sollecitazione di flessione che si sviluppa all'interno della trave per resistere al momento flettente. Questo può essere calcolato rispetto alla geometria della deformazione, infatti la linea che viene segnata con la lettera Y è la distanza dall'asse neutro. Nell'ultima parte di video vengono rappresentate le forze esterne che si verificano sia nella parte superiore che inferiore e queste devono essere uguali al momento flettente, nel caso di una trave a sezione piena rettangolare.

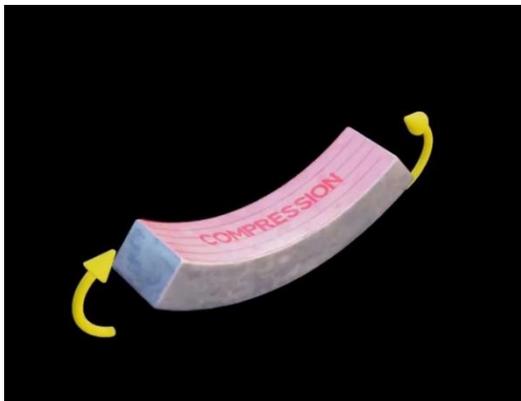


Figura 85\_ parte trave a compressione

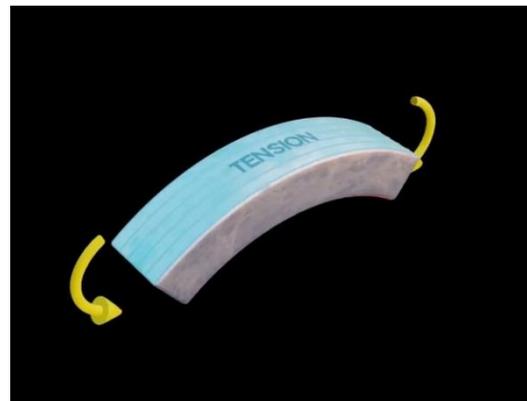


Figura 86\_ parte trave a trazione

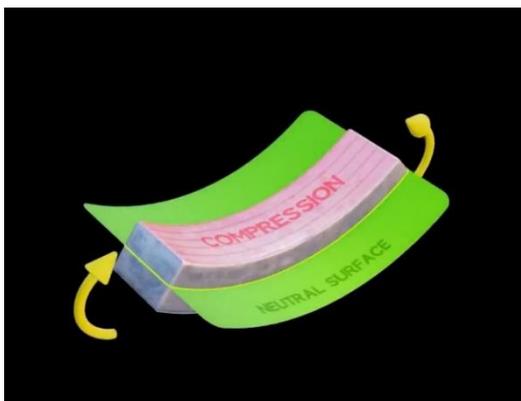


Figura 87\_ individuazione asse neutro

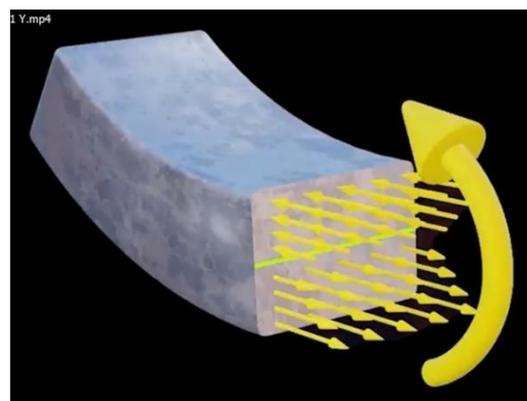


Figura 88\_ comportamento forze interne

### 5.5.2 Trave IPE sottoposta a momento flettente

Anche in questo caso si verifica lo stesso comportamento della trave spiegata precedentemente, l'unico fattore che varia è la sezione che è differente, si può notare nella parte del video dove la lastra taglia in mezzera la trave, andando ad evidenziare quali sono le parti a compressione e tensione e come lavorano le forze interne che anche in questo caso sono opposte.

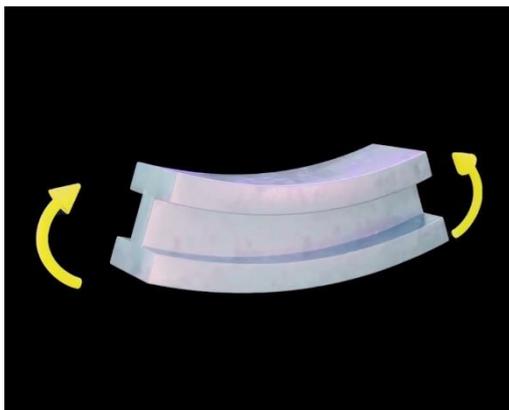


Figura 89\_ trave sottoposta a pressoflessione

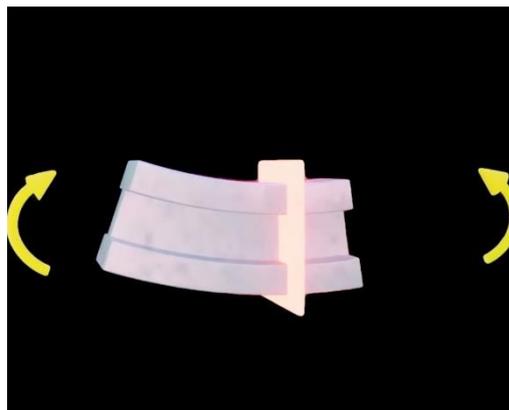


Figura 90\_ divisione trave

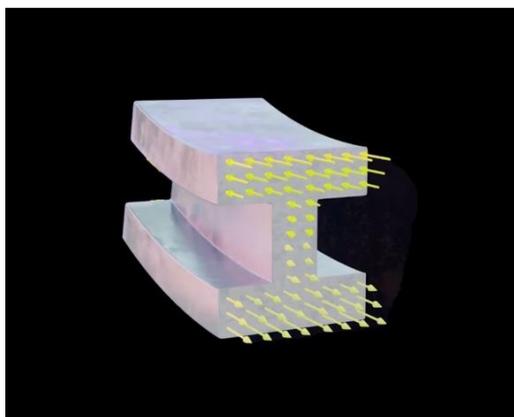


Figura 91\_ forze interne

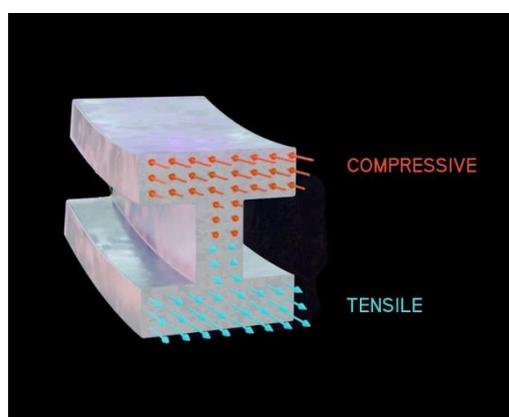


Figura 92\_ suddivisione delle reazioni interne a compressione e tensione

---

### 5.5.3 Trave IPE distribuzione delle sollecitazioni di flessione con diagramma a farfalla

Sempre considerando una trave IPE, possiamo osservare come sono distribuite le sollecitazioni di flessione sulla sezione trasversale, si crea un diagramma per il quale sono nulli in corrispondenza dell'asse neutro e raggiungono il massimo sulle superfici che sono esterne come nel caso delle flange. Mentre nel caso della

sezione di una trave a T l'asse neutro viene spostato verso l'alto e in questo caso varia la distribuzione delle sollecitazioni, infatti la parte inferiore è molto più sollecitata rispetto a quella superiore.

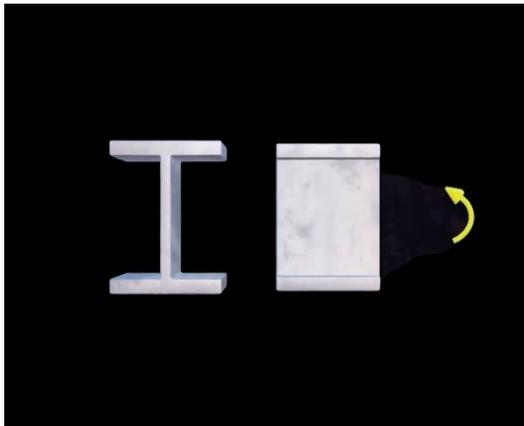


Figura 93\_ prospetti trave IPE

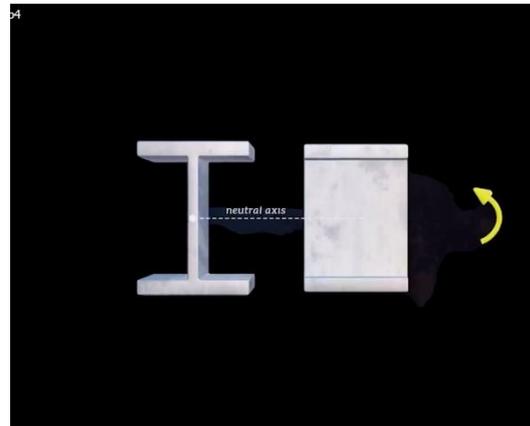


Figura 94\_ individuazione asse neutro

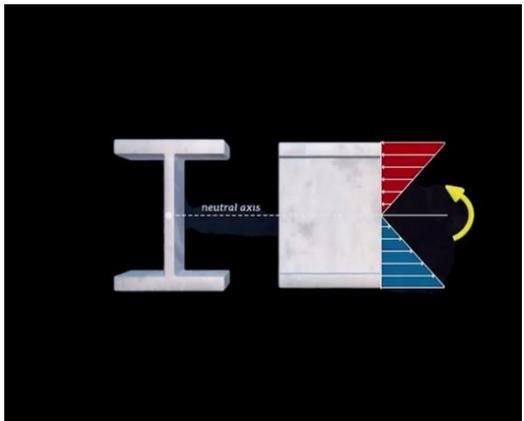


Figura 95\_ diagramma a farfalla delle forze interne

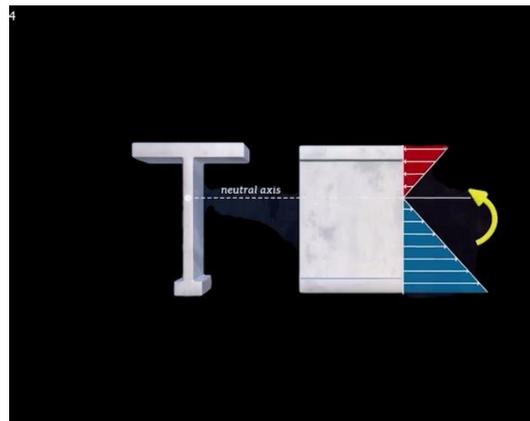


Figura 96\_ spostamento dell'asse neutro

### 5.5.4 Trave sezione piena rettangolare porzione interna

Nella trave a sezione rettangolare piena, risulta esserci sia un momento flettente che una forza a taglio che generalmente non influisce in modo significativo, la forza a taglio ossia la freccia verticale è la risultante delle forze a taglio che agiscono verticalmente, parallelamente alla sezione trasversale. Per mantenere l'equilibrio queste sollecitazioni di taglio verticale hanno anche un taglio orizzontale complementare, come si può notare dalla parte presa in considerazione all'interno della trave, queste tensioni agiscono in corrispondenza dei piani orizzontali della trave.

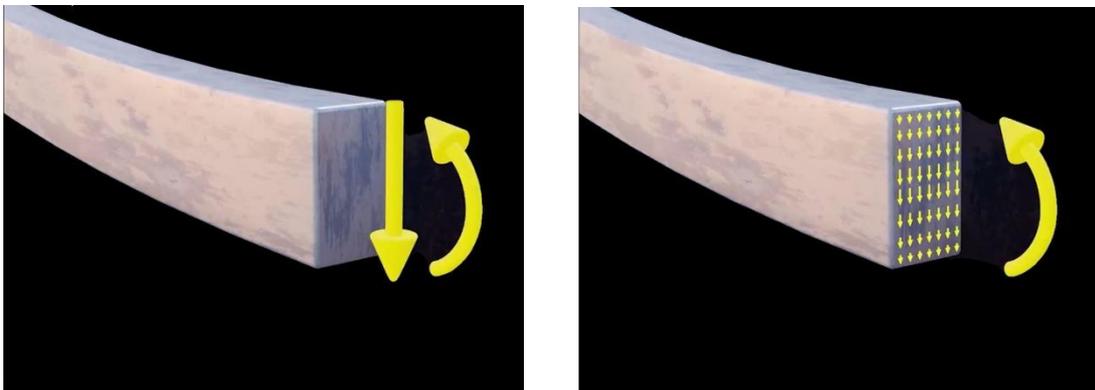


Figura 97\_ trave sottoposta a momento flettente e forza taglio

Figura 98\_ forze interne nella sezione trasversale

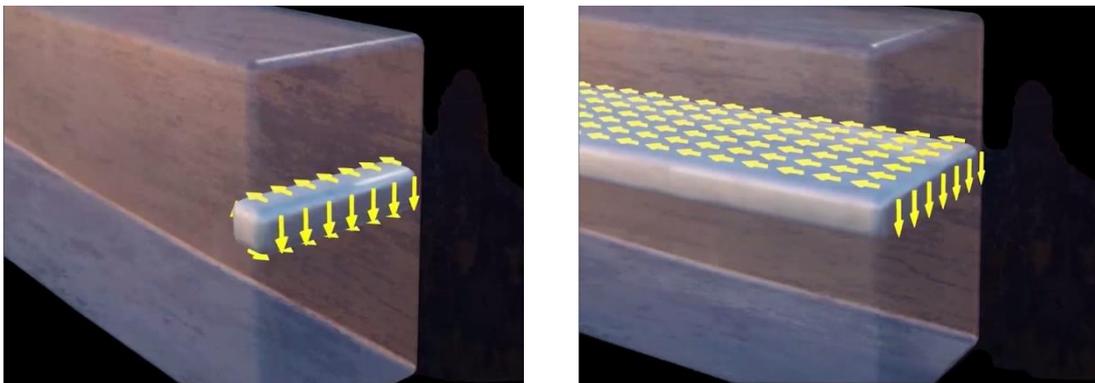


Figura 99\_ porzione minima dove si può osservare il taglio orizzontale

Figura 100\_ tensioni che agiscono in corrispondenza dei piani orizzontali

### 5.5.5 Mensola in legno sottoposta a momento flettente

Per poter osservare le tensioni orizzontali si potrebbe prendere in considerazione una trave realizzata con una sovrapposizione di lastre di legno che vengono successivamente unite con un materiale collante apposito. Se non sono unite, sottoposte ad una determinata forza le assi tendono a scivolare l'una rispetto all'altra. Mentre se vengono incollate come quanto detto precedentemente, le assi sottoposte ad un carico applicato non potendo scivolare si verificano delle tensioni orizzontali, in corrispondenza della loro unione. Se le sollecitazioni che si verificano sono maggiori della resistenza a taglio del legame adesivo, allora la colla impiegata si staccherà. La presenza delle sollecitazioni di taglio spiega perché spesso la trave di legno tendono a cedere e si verifica una separazione longitudinale, che avviene in prossimità dell'asse neutro.



Figura 101\_ trave sottoposta a carico verticale

Figura 102\_ assi di legno sottoposte ad una determinata forza, scivolano l'una rispetto all'altra

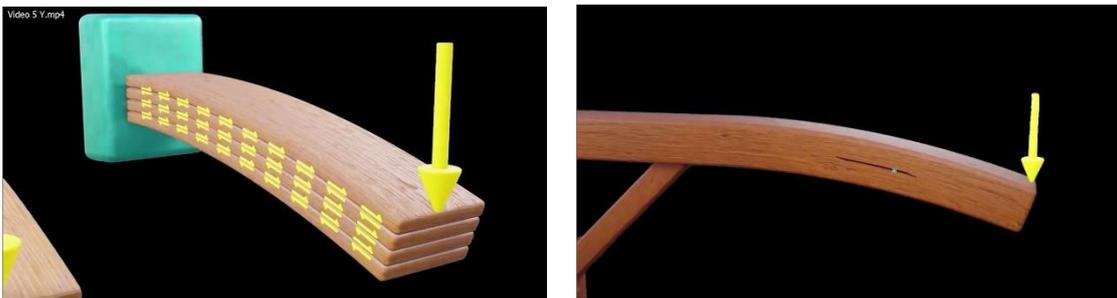


Figura 103\_ mensola con assi incollate

Figura 104\_ cedimento trave di legno, separazione longitudinale

### 5.5.6 Trave IPE sforzo a taglio verticale

Nel video si può notare la distribuzione dello sforzo di taglio verticale, l'anima ha il compito di sostenere la forza a taglio e le flange hanno il compito di resistere al momento flettente.

Secondo la campitura gialla che fuoriesce dall'anima, si può osservare che le sollecitazioni a taglio sono distribuite uniformemente sulla lunghezza dell'anima. Questo perché riescono le flange riescono a contrastare il momento, ma non riescono solo in parte a sopportare il taglio. Le frecce gialle opposte sulle flange ci indicano che ci sono delle sollecitazioni orizzontali che si annullano a vicenda, di conseguenza la forza taglio si verifica solamente verticalmente. La direzione delle sollecitazioni di taglio orizzontali si possono comprendere tramite la direzione delle tensioni di taglio immaginando lo scorrimento lungo la sezione trasversale.

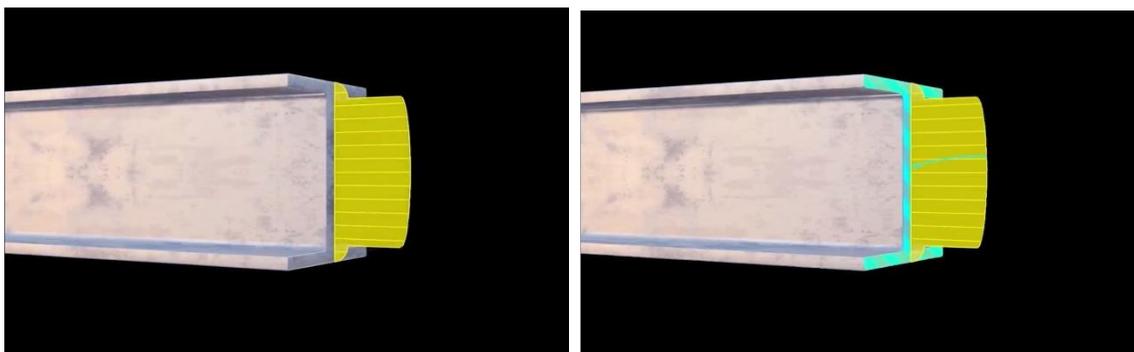


Figura 105\_ sollecitazioni a taglio distribuite uniformemente

Figura 106\_ parte resistente della trave

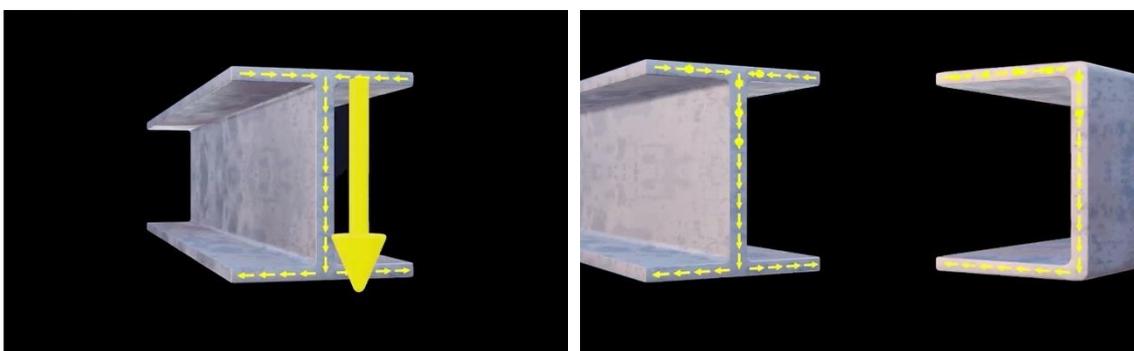


Figura 107\_ forza taglio verticale

Figura 108\_ direzione delle sollecitazioni del taglio

### 5.5.7 Torsione di differenti elementi con sezioni differenti

Quando si parla di torsione si tratta di un oggetto che viene sollecitato da un momento agente attorno all'asse longitudinale, un momento che genera una torsione generalmente viene chiamato coppia. Nel video possiamo notare cosa avviene se applichiamo una coppia ad un elemento con sezione circolare, ma anche ad una sezione quadrata. Nel primo caso sembra che l'oggetto non si deformi, questo semplicemente perché si tratta di una sezione trasversale assialsimmetrica.

Di conseguenza vengono messi a confronto due casi, il primo assialsimmetrico mentre il secondo non ha questa caratteristica, infatti la torsione causa la deformazione della sezione dell'oggetto. Vincolando l'elemento ad un'estremità come nel video e tracciando una linea retta dal punto A al punto B possiamo notare la variazione in base alla torsione, il momento fa ruotare l'estremità svincolata di un angolo. Successivamente al video creato da "The Efficient Engineer" è stato unito anche il video creato da me su Blender, con la mensola a sezione rettangolare vincolata ad un'estremità per rendere maggiormente comprensibile il comportamento anche nel caso di una sezione differente.

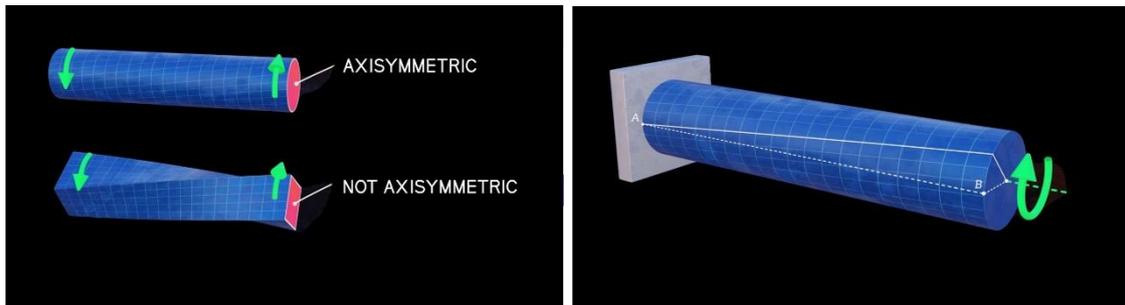


Figura 109\_ torsione simmetrica e asimmetrica  
Figura 110\_ torsione mensola a sezione circolare

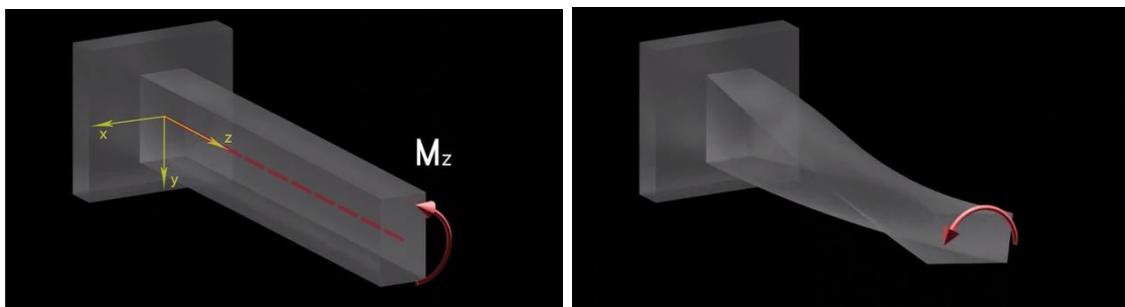


Figura 111\_ mensola a sezione rettangolare in stato iniziale  
Figura 112\_ mensola rettangolare sottoposta a torsione

### 5.5.8 Compressione e trazione di elementi a sezione circolare

Nel video viene illustrato cosa succede ad un elemento tubolare se sollecitato da due forze opposte ed uscenti rispetto alle estremità dell'oggetto, che vanno a causare una trazione che fa variare la lunghezza e anche il diametro. All'interno della barra si verificano delle forze interne per resistere a quelle applicate, infatti nel video l'elemento viene reso semitrasparente per permettere di osservare il comportamento delle forze interne, sia togliendo la parte sinistra che la parte destra il comportamento è uguale, semplicemente le forze sono opposte per poter raggiungere l'equilibrio. Nel caso superiore le forze interne agenti lungo la sezione trasversale, il taglio è uguale all'effetto della forza esterna applicata, anche se vengono rappresentate quattro forze, in realtà sono distribuite su tutta la superficie, il numero è irrilevante. È molto importante parlare di stress che è una quantità che descrive la distribuzione delle forze interne di un corpo sottoposto a sollecitazione. Lo stress normale può verificarsi a causa di trazione o compressione, nel primo caso che viene illustrato si verifica la trazione perché le forze stanno allungando la barra, mentre nel secondo esempio si tratta di compressione perché le forze applicate stanno cercando di ridurre la lunghezza della barra. Generalmente quando si parla di trazione si assume che il segno sia positivo, mentre per la compressione negativo.

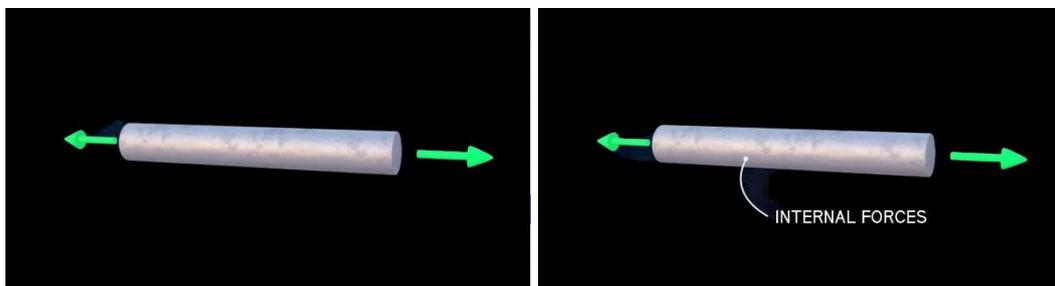


Figura 113\_ elemento a sezione circolare sottoposto a trazione

Figura 114\_ forze interne

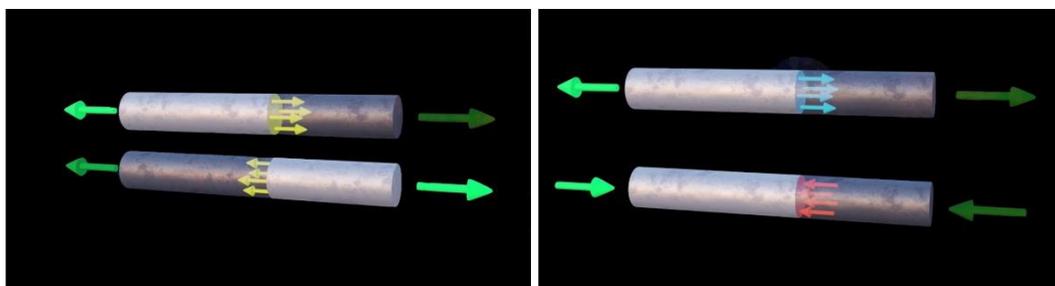


Figura 115\_ andamento forze interne

Figura 116\_ segno positivo trazione e segno negativo per la compressione

### 5.5.9 Trave reticolare

Nel video seguente viene illustrata una trave reticolare dove vengono distribuite le forze su ogni giunto presente nell'unione di ogni asta, in questo caso i vincoli che sono presenti alle estremità della trave sono una cerniera a sinistra e un carrello a destra. Viene disegnato un diagramma del corpo libero, dove sono mostrati tutti i carichi che vanno ad agire sulla capriata, questo è un metodo semplice per permettere il calcolo delle forze di reazione, per il calcolo dell'equilibrio ai nodi si prende in considerazione ogni asta e cosa succede ad ogni estremità a causa delle forze interne che si verificano, facendo così si possono risolvere le forze utilizzando le equazioni di equilibrio, poiché in tutti i nodi non si verificano dei momenti, di conseguenza si considera l'equilibrio delle forze orizzontali e verticali poiché si devono calcolare le forze che agiscono su ciascun giunto e non le forze interne. Se un'asta è in tensione viene chiamato "tirante" poiché le forze alle estremità cercano di allungare la lunghezza originaria, per ogni azione esiste una reazione uguale e contraria, il che significa che un'asta è in tensione e la forza cerca di agire lontano dal giunto. Mentre nel caso dell'asta che viene sottoposta a compressione viene chiamata "puntone", ci sono delle forze che cercano di diminuire la dimensione dell'asta e cercano di avvicinarsi in corrispondenza del punto.

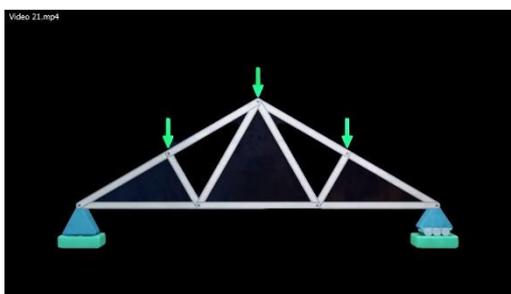


Figura 117\_ trave reticolare vincolata da cerniera e carrello

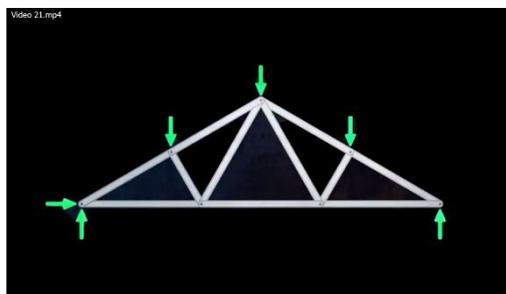


Figura 118\_ trave reticolare con forze agenti sui nodi

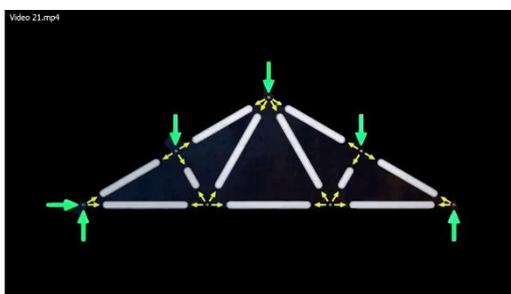


Figura 119\_ equilibrio nodi

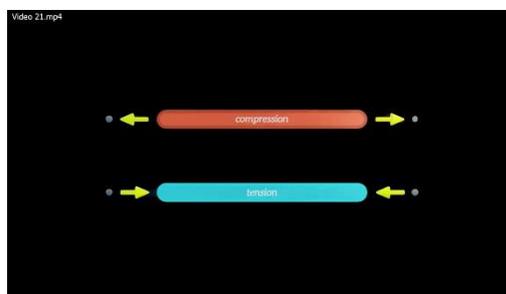


Figura 120\_ tiranti sottoposti a trazione e puntoni sottoposti a compressione

## Conclusioni

In conclusione ribadendo quello che era l'obiettivo iniziale della ricerca, ossia in che modo l'olografia possa incrementare una maggiore comprensione degli allievi architetti di argomenti trattati all'interno dei corsi di Scienza delle Costruzioni, per esempio il comportamento delle strutture sottoposte a sollecitazione a causa di forze agenti. A fronte di numerose ricerche è emerso che l'integrazione degli ologrammi a supporto del materiale didattico, potrebbe essere un aspetto positivo che andrebbe a rivoluzionare la didattica tradizionale, garantendo una maggiore qualità delle lezioni maggiormente interattive con l'integrazione di elementi virtuali dinamici. L'effetto sorpresa o "Sense of Wonder" come viene definito in inglese è uno degli aspetti fondamentali, dovuto sia agli effetti dinamici che vengono generati dai proiettori olografici, ma soprattutto alla resa grafica e l'alta qualità delle immagini e video che vengono proiettati tramite queste nuove tecnologie. Queste proprietà ed effetti particolari scatenano all'interno dell'osservatore una serie di emozioni che lo conducono ad una maggiore attenzione degli argomenti trattati coinvolgendolo attivamente e favorendone una maggiore interazione e una migliore comunicazione visiva efficace. In questo modo si riesce ad ottenere un effetto comunicativo esaustivo in un tempo ridotto, grazie al potere del richiamo e alla repentina comprensione e la semplicità di memorizzazione.

Uno degli esempi che maggiormente ha evidenziato queste caratteristiche è stato portato avanti nel 2018 da Buchner e Zumbach che hanno studiato l'impatto di apprendimento della Realtà Aumentata sulla motivazione, incentrato sull'indagine riguardante l'esito dell'apprendimento e il carico cognitivo, con la partecipazione di alcuni studenti ad una lezione di storia di due ore, con l'utilizzo dei propri smartphone che prevedeva la trasformazione di immagini statiche trasformate in animazioni con AR. I risultati e i dati raccolti successivamente sono stati confrontati con quelli della didattica tradizionale sullo stesso argomento ma senza supporto di AR, si è raggiunta la conclusione che l'apprendimento AR promuove e garantisce la motivazione intrinseca e ha un impatto positivo sull'apprendimento in questo caso della storia ma potrebbe essere efficace in qualsiasi tipo di insegnamento, ha evidenziato una maggiore motivazione rispetto alla lezione tradizionale e maggiore interesse. Questa ricerca è stata utile per aumentare a delineare che c'è un aumento della piacevolezza dell'esperienza di apprendimento che innalza il coinvolgimento degli studenti. Proprio per questo motivo gli ologrammi vengono utilizzati per sponsorizzare dei prodotti e catturare la curiosità di possibili acquirenti.

Un'altra peculiarità è quella della possibilità di poter osservare dei fenomeni che non potrebbero essere rappresentati all'interno delle aule, come per esempio la deformazione di una trave di qualsiasi materiale o il comportamento strutturale di un qualsiasi elemento sollecitato da forze agenti, perché non conformi a questo tipo di esperimenti o perché troppo pericolosi per essere effettuati in presenza di numerose persone.

Con queste applicazioni si ha la possibilità di rendere la spiegazione di determinati concetti il più esaustiva possibile e abbattere le barriere spazio-tempo.

Questa modalità di insegnamento si avvicina al concetto di David Kolb per quanto riguarda l'apprendimento esperienziale, anche se condotto tramite degli elementi virtuali si avvicina alla realtà creando un connubio particolare tra teoria e prassi.

Nell'era tecnologica in cui stiamo vivendo questo genere di applicazioni potrebbe apportare una svolta positiva in generale nella vita di tutti i giorni, ma soprattutto all'interno delle aule scolastiche e delle università, garantendo la formazione degli studenti a 360 gradi.

## Bibliografia

- Richardson. M. J & John D. Wiltshire J. D, "*The Hologram: Principles and Techniques*", John Wiley & Sons, Incorporated, 13 Novembre 2017.
- Johnston. S, "*Holographic visions: a history of new science*", Oxford ; New York : Oxford University Press, 2006.
- Rawicz A. H. & Holonyak. N. Jr, "*Theodore Harold Maiman*" ,Biographical Memoris, National Academy of Sciences 2014.
- Display Holography, 2006, file:///C:/Users/User/Downloads/2006-07.EmmettLeith-Earlyworkandinfluence--WalesProc.pdf
- Johnston. S. F, "*Yuri Denisyuk: An appreciation*", Proceedings of the 7th International Symposium on Display Holography, 2006  
file:///C:/Users/User/Downloads/2006-07.YuriDenisyuk-Anappreciation--WalesProc%20(1).pdf
- Johnston. S. F, "*Stephen Benton on Holography, Polaroid and MIT*", Optics & Photonics News, August 2004 file:///C:/Users/User/Downloads/2004-08.StephenBentononholographyPolaroidandMIT--OPN.pdf
- Youngblood. G, "*EXPANDED CINEMA*", P. Dutton & Co., Inc., New York 1970, [http://www.vasulka.org/Kitchen/PDF\\_ExpandedCinema/book.pdf](http://www.vasulka.org/Kitchen/PDF_ExpandedCinema/book.pdf)
- Rallison. R. D, "*The History of Dichromates*", Ralcon Development Lab, 1996, <https://wasatchphotonics.com/wp-content/uploads/The-History-of-Dichromates1.pdf>
- Johnston. S. F, "*Telling Tales: George Stroke and the Historiography of Holography*", History and Technology Vol. 20, No. 1, March 2004, pp. 29–51, <https://philpapers.org/archive/JOHTTG.pdf>
- Johnston. S. F, "*Explosion with a Slow-Burning Fuse: Origins of Holography in Ann Arbor, Michigan*", Proc. Of SPIE Vol. 6252 625201-15, file:///C:/Users/User/Downloads/2006-06.Explosionwithaslow-burningfuse-TheoriginsofholographyinAnnArbor--SPIEProc%20(1).pdf

- Philips, *"Luce, occhio e visione"*,  
[https://www.unirc.it/documentazione/materiale\\_didattico/597\\_2009\\_221\\_6520.pdf](https://www.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/597_2009_221_6520.pdf)
  
- Boccignone. G, *"La percezione dello spazio: visione stereoscopica"*,  
[https://boccignone.di.unimi.it/PMP\\_2013\\_files/LezPMPStereo.pdf](https://boccignone.di.unimi.it/PMP_2013_files/LezPMPStereo.pdf)
  
- SIRAKAYA. M, *"Trends in Educational Augmented Reality Studies: A Systematic Review"*, Malaysian Online Journal of Educational Technology, volume 6, 2018,  
<https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1174807.pdf>
  
- Bower. M, Howe. C, McCredie. N, Robinson. A, Grover. D, *"Augmented Reality in education – cases, places and potentials"*, Articolo Educational Media International, Marzo 2014,  
<file:///C:/Users/User/Downloads/AugmentedRealityineducationcasesplacesandpotentialsBower14.pdf>
  
- Walker. R. A, *"Holograms as Teaching Agents"*, 9th International Symposium on Display Holography, Conference Series 415, 2013,  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/415/1/012076/pdf>
  
- Bartham. A, *"When the Image Takes over the Real: Holography and Its Potential within Acts of Visual Documentation"*, 2020,  
<file:///C:/Users/User/Downloads/arts-09-00024.pdf>
  
- Jeong. T. H, *"Basic Principles and Applications of Holography"*, Fundamentals of Photonics,  
<http://www.academy.rbru.ac.th/uploadfiles/books/123-2018-01-09-12-39-53.pdf>
  
- Petrov. V, Pogoda. A, Sementin. V, Sevryugin A, Shalymov E, Venediktov. D, Venediktov. V, *"Advances in Digital Holographic Interferometry"*, 2022,  
<file:///C:/Users/User/Downloads/jimaging-08-00196-v2.pdf>
  
- Araiza. M, De la Rosa. J. I, De Leòn. G. M, *"Multichannel Holograms with some applications in image processing"*, 2005,  
[file:///C:/Users/User/Downloads/Araiza\\_VSimpOptIArt26.pdf](file:///C:/Users/User/Downloads/Araiza_VSimpOptIArt26.pdf)
  
- Blinder. D, Birnbaum. T, Ito. T, Shimobaba. T, *"The state-of-the-art in computer generated holography for 3D display"*, 2022,  
<file:///C:/Users/User/Downloads/The+state-of-the-art+in+computer+generated+holography+for+3D+display.pdf>

- Elmorshidy. A, "*Holographic Projection Technology: The World is Changing*", JOURNAL OF TELECOMMUNICATIONS, VOLUME 2, 2010, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1006/1006.0846.pdf>

## Sitografia

- BBVA, "*History of Holography*", The discovery of holograms went unnoticed until the 1960s, 22 Agosto 2017, <https://www.bbva.com/en/history-of-holography/>.
- OPTICA, "*In Memoriam Emmett Leith*", 23 Dicembre 2005, <https://www.optica.org/en-us/about/newsroom/obituaries/earlier/leith/>.
- Biedermann. K, "*Lippmann's and Gabor's revolutionary approach to imaging*", maggio 2005. <https://www.nobelprize.org/prizes/themes/lipmanns-and-gabors-revolutionary-approach-to-imaging/>.
- Nobel Lectures, "*Gabriel Lippmann*", Elsevier Publishing Company, Amsterdam, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1908/lippmann/lecture/>.
- Nobel Lectures, "*Aleksandr M. Prokhorov*", Elsevier Publishing Company, Amsterdam, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1964/prokhorov/biographical/>
- Academy of Achievement, "*Charles H. Townes*", <https://achievement.org/achiever/charles-h-townes-ph-d/>.
- Innovation Intelligence International, "*A Quantum Leap*", <https://www.innovation-intelligence.com/bios/aleksandr-mikhailovich-prokhorov>.
- Nobel prize, "*Nicolay G. Basov*", 24 Luglio 2023, <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1964/basov/facts/>.
- National MagLab, "*Theodore Maiman*" Funded by the National Science Foundation (DMR-2128556) and the State of Florida,

<https://nationalmaglab.org/magnet-academy/history-of-electricity-magnetism/pioneers/theodore-maiman/>.

- Johnston. S. F, "*Emmett Leith: Early work and influence*", Proceedings of the 7th International Symposium on OPTICA, "*Juris Upatnieks*", 17 Marzo 2020, [https://www.optica.org/en-us/history/biographies/bios/juris\\_upatnieks/](https://www.optica.org/en-us/history/biographies/bios/juris_upatnieks/).
- UM DOES BIG THINGS, "*Emmett Leith & Juris Upatnieks Co-Inventors of Holography*", [http://um2017.org/Emmett\\_Leith\\_and\\_Juris\\_Upatnieks.html](http://um2017.org/Emmett_Leith_and_Juris_Upatnieks.html).
- Massachusetts Institute of Technology, "*Stephen Benton Benton Hologram*", COMPUTING AND TELECOMMUNICATIONS, <https://lemelson.mit.edu/resources/stephen-benton>.
- OPTICA, "*Stephen A. Benton*", 17 Febbraio 2020, [https://www.optica.org/en-us/history/biographies/bios/stephen\\_a\\_benton/](https://www.optica.org/en-us/history/biographies/bios/stephen_a_benton/).
- Holowiki, "*Lloyd Cross*", 19 Agosto 2015, [https://holowiki.org/wiki/Cross,\\_Lloyd](https://holowiki.org/wiki/Cross,_Lloyd)
- Ventura. A, "*Reconstructing Reality with Lasers*", febbraio 2021, <https://www.artnews.com/art-in-america/features/holograms-utopian-history-1234582179/>.
- Pennington, K. S, "*ADVANCES IN HOLOGRAPHY*", Scientific American, a division of Nature America, Inc, : Scientific American , Vol. 218, No. 2 (February 1968), pp. 40-49, [https://www.jstor.org/stable/pdf/24925969.pdf?refreqid=excelsior%3A46515fbeb5d5a5272850143e1d10d40a&ab\\_segments=&origin=&initiator=&acceptTC=1](https://www.jstor.org/stable/pdf/24925969.pdf?refreqid=excelsior%3A46515fbeb5d5a5272850143e1d10d40a&ab_segments=&origin=&initiator=&acceptTC=1).
- Robert Powell and Karl Stetson  
Stetson. K. A." *50 Years of Holographic Interferometry*" <https://repository.aip.org/islandora/object/nbla%3A283402/datastream/PDF/view>.
- World's Worst Tourist," *Memories of Robert L. Powell by Karl Stetson*", Heroes of Holography, 2017, [http://www.worldsworsttourist.com/holography/heroes\\_KarlStetson.html](http://www.worldsworsttourist.com/holography/heroes_KarlStetson.html).

- Johnston. S, "*Larry Siebert*", 4 Settembre 2003, <https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/29299>.
- MACBA Collection. MACBA Foundation, "*Studies for Holograms*", 1970, <https://www.macba.cat/en/art-artists/artists/nauman-bruce/studies-holograms-e>.
- Duckor. A, "*Lighting with Lasers: Conservation uses lasers to Illuminate Bruce Nauman Holograms*", Associate Objects Conservator, 21 Agosto 2020, <https://unframed.lacma.org/2020/08/21/lighting-lasers-conservation-uses-lasers-illuminate-bruce-nauman-holograms>.
- Manchester. E, "*Studies for Holograms*", Agosto 2000, <https://www.tate.org.uk/art/artworks/nauman-a-p77629>.
- Buckman. D, "*Margaret Benyon*", Artists in Britain Since 1945, Art Dictionaries Ltd, part of Sansom & Company, <https://artuk.org/discover/artists/benyon-margaret-b-1940>.
- Journal. L. H, "*Richard D. Rallison*", 19 Settembre 2010, <https://www.legacy.com/us/obituaries/hjnews/name/richard-rallison-obituary?id=27482112>.
- Wesly. E, "*A Toast to Nick Phillips*", Leonardo, 1992, Vol. 25, No. 5, Archives of Holography: A Partial View of a Three-Dimensional World: Special Issue (1992), pp. 439-442, The MIT Press, [https://www.jstor.org/stable/pdf/1575751.pdf?refreqid=excelsior%3A58aa2e49a8d618dcfa1a173becf12bee&ab\\_segments=&origin=&initiator=&acceptTC=1](https://www.jstor.org/stable/pdf/1575751.pdf?refreqid=excelsior%3A58aa2e49a8d618dcfa1a173becf12bee&ab_segments=&origin=&initiator=&acceptTC=1).
- ETHW, "*Keeve M. Siegel*", 30 Luglio 2018, [https://ethw.org/Keeve\\_M.\\_Siegel](https://ethw.org/Keeve_M._Siegel)  
Hans I. Bjelkhagen. H. I, "*The Early Art Holograms of Carl Fredrik Reuterswård*", <https://nebula.wsimg.com/ba7b3cb0c0b930d6016d14143eec6593?AccessKeyId=35F2F777C356CDF4D97C&disposition=0&alloworigin=1>.
- ZKM – KARLSRUHE, "*Between and Beyond*", un sondaggio sulle opere di Dieter, redazione Digicult, 4 Febbraio 2019, <https://digicult.it/it/art/between-and-beyond-a-survey-of-dieter-jungs-body-of-work/>.
- Società Oftalmologica Italiana – SOI, "*Il meccanismo della visione, come e perchè vediamo*", <https://www.sedesoi.com/occhio-vista-meccanismo/>.

- Mingrone. C, *“Dagli occhi al cervello: l’elaborazione delle informazioni visive per l’interazione con il mondo circostante”*, Centro ricerche per la visione CRV, 2017, <https://www.crvisione.it/wordpress/dagli-occhi-al-cervello-lelaborazione-delle-informazioni-visive-per-linterazione-con-il-mondo-circostante/>.
- Skuola.net, *“Formazione delle immagini nell’occhio umano - un processo complesso e affascinante”*, <https://www.skuola.net/scienze-medie/formazione-immagini-occhio-umano.html>.
- Centro oculistico refrattivo bresciano, CORBS, *“Percezione dei colori: come funziona la vista umana”*, giugno 2019, <http://www.corbs.it/blog/curiosita/percezione-dei-colori-come-funziona-la-vista-umana>.
- Fielmann, *“Dalla A alla zeta – così funziona la visione!”*, <https://www.fielmann.it/it/informazioni-general/funzionamento-dell-occhio/#:~:text=Dalla%20luce%20alle%20immagini%20in%20cinque%20passi&text=I%20raggi%20riflessi%20colpiscono%20prima,%27estremi%C3%A0%20posteriore%20dell%27occhio>.
- Rodríguez. E. M, *“La teoria del doppio codice di Allan Paivio”*, La mente è meravigliosa, 2023 <https://lamenteemeravigliosa.it/la-teoria-del-doppio-codice-di-allan-paivio/https://data-storytelling.it/approfondimenti/percezione-visiva-e-memoria-perche-le-immagini-sono-piu-facili-da-ricordare-delle-parole/>
- Speciale. N, *“Percezione visiva e memoria: perché le immagini sono più facili da ricordare delle parole?”*, Data storytelling, 2023, <https://data-storytelling.it/approfondimenti/percezione-visiva-e-memoria-perche-le-immagini-sono-piu-facili-da-ricordare-delle-parole/>
- Morgado Cusati. M. A, *“Teoria computazionale della mente”*, La mente è meravigliosa, 2022, <https://lamenteemeravigliosa.it/teoria-computazionale-della-mente/>
- Dimaggio. G, *“L’elaborazione dell’informazione secondo i processi top down e bottom up, i risvolti sulla pratica psicoterapeutica”*, State of Mind, 2019, <https://www.stateofmind.it/2019/01/top-down-bottom-up-percezione/>

- Lavecchia. V, *“Cos’è la Realtà Aumentata (AR) e come funziona?”*, Informatica e ingegneria online, <https://vitolavecchia.altervista.org/cos-e-la-realta-aumentata-ar-e-come-funziona/>
- Rodriguez. E. M, *“La Teoria dell’autodeterminazione”*, La mente è meravigliosa, 2023 [https://lamenteemeravigliosa.it/la-teoria-dellautodeterminazione/#google\\_vignette](https://lamenteemeravigliosa.it/la-teoria-dellautodeterminazione/#google_vignette)
- Cai. S, Wang. X, Chiang. F. K, *“A case study of Augmented Reality simulation system application in a chemistry course”*, Articolo, Volume 37, 2014, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0747563214002271#f0005>
- Campos. G, *“Professor Hologram teaches first intercontinental uni class”*, Av Magazine, 2022, <https://www.avinteractive.com/news/projection/professor-hologram-teaches-first-intercontinental-uni-class-04-10-2022/>
- Singleton. L, *“Imperial College Business School to offer live lectures via hologram”*, Imperial London College, 2018, <https://www.imperial.ac.uk/news/188851/imperial-college-business-school-offer-live/>
- ARTH, *“Upping The Learning Curve: How Hologram Technology is Revolutionizing the Educational Landscape”*, 2023, <https://www.arht.tech/inspiration/blog/opinion-how-hologram-technology-is-revolutionizing-the-educational-landscape/>
- Making News, *“Healthy Simulation: UCF Installs Impressive Dr. Hologram Technology to Improve Healthcare Simulation Education”*, <https://www.drhologram.com/Healthy-Simulation--UCF-Installs-Impressive-Dr--Hologram-Technology-to-Improve-Healthcare-Simulation-Education-1-10972.html>
- Baily. L, *“UCF Installs Impressive Dr. Hologram Technology to Improve Healthcare Simulation Education”*, Healthy Simulation, 2021, <https://www.healthysimulation.com/33616/ucf-hologram-simulation-technology/>
- Jones. M, *“David Bohm and the Holographic Universe”*, Futurism, 2014, <https://futurism.com/david-bohm-and-the-holographic-universe>

- Neekhara. A, "Difference Between Holography and Photography", Geekforgeeks, 2019, <https://www.geeksforgeeks.org/difference-between-holography-and-photography/>
- Nagwa, "Question Video: Determining Difference between a Holograph and a Photograph", 2023, <https://www.nagwa.com/en/videos/146190941090/>
- TechTarget "Stereoscopy (Stereoscopic imaging)", <https://www.techtarget.com/whatis/definition/stereoscopy-stereoscopic-imaging>
- Notizie in vetrina, "Gli stereogrammi cosa sono e come vederli", 2019, <https://www.notizieinvetrina.it/gli-stereogrammi-cosa-sono-e-come-vederli/>
- Hypervsn, "Computer-generated Holograms and How They Work", 2023, <https://hypervsn.com/blog/i-computer-generated-holograms-and-how-they-work.html>
- Overton. G, "HOLOGRAPHY: SeeReal develops practical real-time holographic display", 2007, <https://www.laserfocusworld.com/detectors-imaging/article/16552688/holography-seereal-develops-practical-realtime-holographic-display>
- Andreozzi. S, "Che cos'è la prospettiva aerea di Leonardo da Vinci?", 2014, <https://zebrart.it/che-cose-la-prospettiva-aerea-di-leonardo-da-vinci/>
- Roger. V. C, "Percezione Visiva", 2019, <https://areaoftalmologica.com/it/blog/neuro-oftalmologia/percepcion-visual/#Constancia-del-tamano>
- Incerti. S. M, "Le neural network avvicinano l'avvento dell'olografia", Network Digital 360, 2021, <https://www.ai4business.it/intelligenza-artificiale/le-neural-network-avvicinano-lavvento-dellolografia/>
- Capasso. M, "Memoria e processi percettivi funzionano tramite ologrammi", Studio di medicina Naturale e Biofisica, 2016, <http://www.marinacapasso.it/memoria-e-processi-percettivi-funzionano-tramite-ologrammi/>

- Rispoli. A, *“Comunicazione visiva efficace: arrivano gli ologrammi”*, 2022, <https://dreams.news/articles/comunicazione-visiva-efficace-arrivano-gli-ologrammi>
  
- Baccini. F, Bottiglieri. M, *“Una realtà non basta più”*, La Sestina, 2005, <https://www.lasestina.unimi.it/project/una-realta-non-basta-piu/>
  
- Adobe, *“Guida alla Persistenza della memoria (POV)”*, <https://www.adobe.com/it/creativecloud/animation/discover/persistence-of-vision.html#01>
  
- Holusion, *“Retinal Persistence, the secret of Holographic Fans”*, <https://holusion.com/en/posts/2022-02-18-persistence-retinienne>
  
- Eos Ibérica, *“eDirectory Hologram: terminale interattivo di grande impatto visivo”*, Direct Industry, <https://trends.directindustry.it/grupo-eos-iberica/project-108127-1153220.html>
  
- Vetrina Digital, *“Come Funziona un Proiettore Olografico 3D”*, 2020, <https://vetrinadigitale.it/blog/come-funziona-un-proiettore-olografico-3d/>
  
- Ikin, *“Real Life Holograms: The Technology of Tomorrow, Today”*, <https://ikininc.com/real-life-holograms-the-technology-of-tomorrow-today/>
  
- Morandi. G, *“Ologrammi e Materialità. Mixed Reality e Architettura”*, Elle Decor 2023, <https://www.elledecor.com/it/tech/ricerca/a42532548/ologrammi-e-materialita-mixed-reality-e-architettura/>
  
- Meriano. P, *“Ologrammi e comunicazione: dalla definizione di 'ologramma' alla comunicazione del futuro”*, Inside Marketing, 2018, <https://www.insidemarketing.it/ologrammi-e-comunicazione-definizione-futuro/>
  
- Vision, *“What are the advantages and disadvantages of the 3D hologram?”*, 2023, <https://vision3d.in/blog/advantages-and-disadvantages-of-3d-hologram/>

## Indice delle figure

Figura 1_ metodo di riproduzione fotografica dei colori, (Mizsey. N, <a href="https://theclippingpathservice.com/when-did-color-photography-became-common/">https://theclippingpathservice.com/when-did-color-photography-became-common/</a> )	10
Figura 2_Primo ologramma e ricostruzione olografica 1948, (Open Mind, 2015, <a href="https://www.bbvaopenmind.com/en/science/leading-figures/dennis-gabor-father-of-holography/">https://www.bbvaopenmind.com/en/science/leading-figures/dennis-gabor-father-of-holography/</a> )	13
Figura 3_Poster conferenza di Gabor del 1948, ( Museo del MIT – Collezione di olografia del Museo di Olografia)	13
Figura 4_ esempio di laser , (Science et avenir, SUPERSTOCK/SUPERSTOCK/SIPA, <a href="https://www.sciencesetavenir.fr/fondamental/l-inventeur-du-laser-s-est-eteint_23234">https://www.sciencesetavenir.fr/fondamental/l-inventeur-du-laser-s-est-eteint_23234</a> )	19
Figura 5, Charles Townes che mostra per la prima volta il prototipo di Maser, (Open mind, 2015 <a href="https://www.bbvaopenmind.com/en/science/physics/the-beam-of-light-that-emerged-from-the-cold-war/">https://www.bbvaopenmind.com/en/science/physics/the-beam-of-light-that-emerged-from-the-cold-war/</a> )	20
Figura 6_ Componenti emissione laser rubino, (scienza in rete, 2018, <a href="https://www.scienzainrete.it/articolo/e-laser-fu/marco-taddia/2018-05-16">https://www.scienzainrete.it/articolo/e-laser-fu/marco-taddia/2018-05-16</a> )	25
Figura 7_ laser rubino di dimensioni ridotte progettato da Maiman, (World Magazine, 2022, <a href="https://www.worldmagazine.it/664956/">https://www.worldmagazine.it/664956/</a> )	26
Figura 8_ Ologramma che dimostra la coerenza periodica dei nuovi laser con cavità 60 cm, ( Niels Bohr Library & Archives, <a href="https://repository.aip.org/islandora/object/nbla%3A283488#page/1/mode/2up">https://repository.aip.org/islandora/object/nbla%3A283488#page/1/mode/2up</a> )	29
Figura 9_ Leith e Upatnieks riprendono un ologramma di trasmissione laser con la tecnica “fuori asse”, (Fritz Goro for Life Magazine, 1967, <a href="http://www.holophile.com/history.htm">http://www.holophile.com/history.htm</a> )	35
Figura 10_ “Train and Bird” primo ologramma realizzato con la tecnica “fuori asse”, ( Fritz Goro for Life Magazine, 1967, <a href="http://www.holophile.com/history.htm">http://www.holophile.com/history.htm</a> )	35
Figura 11_ Denisyuk con in mano il suo autoritratto olografico a riflessione	42
Figura 12_ Esempi di ologrammi riflessi, prodotti all’interno della Conductron ma successivamente di proprietà della McDonnell Douglas, (Hologram, <a href="https://hologram.se/historic-holograms-by-mcdonnell-douglas/">https://hologram.se/historic-holograms-by-mcdonnell-douglas/</a> )	46
Figura 13_ Cochran alla Conductron Corp, 1967, (Research Gate, <a href="https://www.researchgate.net/publication/235222632_Explosion_with_a_slow-burning_fuse_Origins_of_holography_in_Ann_Arbor_Michigan/figures?lo=1">https://www.researchgate.net/publication/235222632_Explosion_with_a_slow-burning_fuse_Origins_of_holography_in_Ann_Arbor_Michigan/figures?lo=1</a> )	49
Figura 14_ brevetto Polaroid ologramma arcobaleno, (Jonathan Ross, Hologram Collection, <a href="http://www.jrhologcollection.com/collection/benton.html">http://www.jrhologcollection.com/collection/benton.html</a> )	51
Figura 15_ sistema di sicurezza per carte di credito, (Radiant Vision Systems, <a href="https://www.radiantvisionsystems.com/blog/beam-me-scotty-new-developments-hologram-technology">https://www.radiantvisionsystems.com/blog/beam-me-scotty-new-developments-hologram-technology</a> )	51

Figura 16_ disegno "Scatola di Sabbia", (Journal of physics, <a href="https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/415/1/012070/pdf">https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/415/1/012070/pdf</a> )	54
Figura 17_ esempio di Scatola di Sabbia all'Evergreen State College Olympia Washington, USA, (Journal of physics, <a href="https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/415/1/012070/pdf">https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/415/1/012070/pdf</a> )	54
Figura 18_ ologramma realizzato da Lloyd Cross, commissionato da Salvador Dalì di Alice Cooper, ( <a href="https://www.youtube.com/watch?app=desktop&amp;v=XY5h_sGpGls">https://www.youtube.com/watch?app=desktop&amp;v=XY5h_sGpGls</a> )	55
Figura 19_ primo ologramma di Nauman, (Kooness, Rastelli. E, 2020, <a href="https://www.kooness.com/posts/magazine/new-body-perception-the-case-of-bruce-nauman">https://www.kooness.com/posts/magazine/new-body-perception-the-case-of-bruce-nauman</a> )	60
Figura 20_ studio del 1970 di cinque ologrammi, (Mutual Art, <a href="https://www.mutualart.com/Artwork/Studies-for-Holograms/1D22DD3651620416">https://www.mutualart.com/Artwork/Studies-for-Holograms/1D22DD3651620416</a> )	61
Figura 21_ Tigirl del 1985, ( <a href="https://www.guggenheim.org/blogs/checklist/holography-how-artists-sculpt-with-light-space-and-time">https://www.guggenheim.org/blogs/checklist/holography-how-artists-sculpt-with-light-space-and-time</a> )	63
Figura 22_ la prima esposizione Artistica di Benyond a Nottingham del 1970, (Research Gate, <a href="https://www.researchgate.net/publication/235222634_The_history_of_holography_multiple_visions/figures?lo=1">https://www.researchgate.net/publication/235222634_The_history_of_holography_multiple_visions/figures?lo=1</a> )	64
Figura 23_ Carl Fredrik Reuterswärd osserva l'ologramma "Whole Kilroy", 1977, (Moderna Museet, <a href="https://www.modernamuseet.se/stockholm/en/event/reutersward-hologram/">https://www.modernamuseet.se/stockholm/en/event/reutersward-hologram/</a> )	66
Figura 24_ ologrammi dell'opera Kilroy rappresentazione del cuore, (Hologram, <a href="https://hologram.se/moderna-museet-kilroysvit-cfr/">https://hologram.se/moderna-museet-kilroysvit-cfr/</a> )	67
Figura 25_ ologrammi dell'opera Kilroy rappresentazione della mano, (Hologram, <a href="https://hologram.se/moderna-museet-kilroysvit-cfr/">https://hologram.se/moderna-museet-kilroysvit-cfr/</a> )	67
Figura 26_ mostra d'arte "Between and Beyond", (ZKM, Karlsruhe, <a href="https://zkm.de/en/exhibition/2019/02/dieter-jung">https://zkm.de/en/exhibition/2019/02/dieter-jung</a> )	69
Figura 27_ reticolo di diffrazione olografica su disco LP, (Jonathan Ross Hologram Collection, <a href="http://www.jrholocollection.com/collection/foster.html">http://www.jrholocollection.com/collection/foster.html</a> )	71
Figura 28_ esempi di ologrammi riflettenti bicromati su vetro, gioielli, (Jonathan Ross Hologram Collection, <a href="http://www.jrholocollection.com/collection/electric.html">http://www.jrholocollection.com/collection/electric.html</a> )	74
Figura 29_ esempi di ologrammi riflettenti bicromati su vetro, vaso da farmacia olografico, (Jonathan Ross Hologram Collection, <a href="http://www.jrholocollection.com/collection/electric.html">http://www.jrholocollection.com/collection/electric.html</a> )	74
Figura 30_ Rivista 1984 di National Geographic, ologramma in rilievo di un'aquila, (Holophile, <a href="http://www.holophile.com/history.htm">http://www.holophile.com/history.htm</a> )	87
Figura 31_ Rivista 1984 di National Geographic, ologramma in rilievo della terra, (Holophile, <a href="http://www.holophile.com/history.htm">http://www.holophile.com/history.htm</a> )	87
Figura 32_ "Tricerotps" primo ologramma a riflessione prodotto digitalmente, (Rob Munday, <a href="https://www.rob-munday.com/press-2/1992---munday-creates-first-digital-stereograms---holography-news">https://www.rob-munday.com/press-2/1992---munday-creates-first-digital-stereograms---holography-news</a> )	88
Figura 33_ schema creazione e ricostruzione di un ologramma	91
Figura 34_ registrazione scena sul film fotografico	92

Figura 35_ la realizzazione di ologrammi di trasmissione , (Integraf, <a href="https://www.integraf.com/resources/articles/a-how-to-make-transmission-holograms">https://www.integraf.com/resources/articles/a-how-to-make-transmission-holograms</a> )	96
Figura 36_ la realizzazione di ologrammi di trasmissione, a 45 gradi, (Integraf, <a href="https://www.integraf.com/resources/articles/a-how-to-make-transmission-holograms">https://www.integraf.com/resources/articles/a-how-to-make-transmission-holograms</a> )	97
Figura 37_ nella realizzazione di ologrammi a riflessione, ((Integraf, <a href="https://www.integraf.com/resources/articles/a-how-to-make-transmission-holograms">https://www.integraf.com/resources/articles/a-how-to-make-transmission-holograms</a> )	99
Figura 38_ effetto parallax , (Digital Guide IONOS, <a href="https://www.ionos.it/digitalguide/siti-web/web-design/effetto-parallax-i-siti-web-che-si-sviluppano-in-profondita/">https://www.ionos.it/digitalguide/siti-web/web-design/effetto-parallax-i-siti-web-che-si-sviluppano-in-profondita/</a> )	110
Figura 39_ cortina fumogena, (Vetrina digitale, <a href="https://vetrinadigitale.it/blog/cosa-e-proiettore-olografico-3d-tecnologia/">https://vetrinadigitale.it/blog/cosa-e-proiettore-olografico-3d-tecnologia/</a> )	112
Figura 40_ sistema schermo d'acqua ventaglio, (Spettacolo Laser Entertainment, <a href="https://www.laserentertainment.com/waterscreen/">https://www.laserentertainment.com/waterscreen/</a> )	114
Figura 41_ schermi oled semitrasparenti, (Prodotto YoleGroup, <a href="https://www.yolegroup.com/industry-news/lg-displays-transparent-oled-to-debut-at-general-elections/">https://www.yolegroup.com/industry-news/lg-displays-transparent-oled-to-debut-at-general-elections/</a> )	115
Figura 42_ piramide 3D, ( Digital Day, Mero. G, 2016, <a href="https://www.dday.it/redazione/21117/ologrammi-nella-tv-del-futuro-la-bbc-ci-crede">https://www.dday.it/redazione/21117/ologrammi-nella-tv-del-futuro-la-bbc-ci-crede</a> )	116
Figura 43_ display LED trasparenti, (prodotto Live Design, <a href="https://www.livedesignonline.com/news/ldi-new-products-muxwave-transparent-led-screen">https://www.livedesignonline.com/news/ldi-new-products-muxwave-transparent-led-screen</a> )	117
Figura 44_ wall di ventole olografiche, (Vetrina Digitale, <a href="https://vetrinadigitale.it/blog/come-funziona-un-proiettore-olografico-3d/">https://vetrinadigitale.it/blog/come-funziona-un-proiettore-olografico-3d/</a> )	118
Figura 45_ fenomeno interferenza onde sull'acqua, ( Borborigmi, 2023, Photo Bucket <a href="https://www.borborigmi.org/">https://www.borborigmi.org/</a> )	119
Figura 46_ come si comportano le arborizzazioni dendritiche, (Studio di medicina naturale e biofisica, Capasso. M, 2016, <a href="http://www.marinacapasso.it/memoria-e-processi-percettivi-funzionano-tramite-ologrammi/">http://www.marinacapasso.it/memoria-e-processi-percettivi-funzionano-tramite-ologrammi/</a> )	121
Figura 47_ fonte di luce in movimento, (Alamy, <a href="https://www.alamy.it/fotos-immagini/scia-di-stelle-scintillanti.html?sortBy=relevant">https://www.alamy.it/fotos-immagini/scia-di-stelle-scintillanti.html?sortBy=relevant</a> )	124
Figura 48_ fonte di luce statica, (Alamy, <a href="https://www.alamy.it/fotos-immagini/scia-di-stelle-scintillanti.html?sortBy=relevant">https://www.alamy.it/fotos-immagini/scia-di-stelle-scintillanti.html?sortBy=relevant</a> )	124
Figura 49_ ologramma Principessa Leila Star Wars 1977, (NerdPool, <a href="https://www.nerdpool.it/2022/06/14/obi-wan-kenobi-gli-impatti-sulloologramma-di-leia-tutto-verra-spiegato-negli-ultimi-episodi/">https://www.nerdpool.it/2022/06/14/obi-wan-kenobi-gli-impatti-sulloologramma-di-leia-tutto-verra-spiegato-negli-ultimi-episodi/</a> )	127
Figura 50_ Componenti proiettore olografico, (Vetrina Digitale, <a href="https://vetrinadigitale.it/blog/come-funziona-un-proiettore-olografico-3d/">https://vetrinadigitale.it/blog/come-funziona-un-proiettore-olografico-3d/</a> )	128
Figura 51_ wall ventole olografiche Hypervision, (Vetrina Digitale, <a href="https://vetrinadigitale.it/hypervsn/">https://vetrinadigitale.it/hypervsn/</a> )	129
Figura 52_ struttura bastoncelli e coni, (Medicina online, dott Loiacono, 2018, <a href="https://medicinaonline.co/2018/01/28/fotorecettori-differenza-tra-coni-e-bastoncelli/#google_vignette">https://medicinaonline.co/2018/01/28/fotorecettori-differenza-tra-coni-e-bastoncelli/#google_vignette</a> )	132

Figura 53_ composizione occhio umano, (Dott Francesco Nizzola, <a href="https://www.oculistanizzola.it/occhio/anatomia-occhio/">https://www.oculistanizzola.it/occhio/anatomia-occhio/</a> )	133
Figura 54_ disposizione della realtà rispetto alle realtà estese, (Vincos Blog, <a href="https://vincos.it/2022/03/19/realta-estese-aumentata-virtuale-mista/">https://vincos.it/2022/03/19/realta-estese-aumentata-virtuale-mista/</a> )	139
Figura 55_ Ciclo di Kolb	153
Figura 56_ Professor Hologram ospite a TU DELFT, (Avininterative Magazine, Campos. G, 2022, <a href="https://www.avinteractive.com/news/projection/professor-hologram-teaches-first-intercontinental-uni-class-04-10-2022/">https://www.avinteractive.com/news/projection/professor-hologram-teaches-first-intercontinental-uni-class-04-10-2022/</a> )	158
Figura 57_ Esempi di tecnologie Arth Capsule, (Martech, Wood C, <a href="https://martech.org/arht-rolls-out-retail-hologram-experiences/">https://martech.org/arht-rolls-out-retail-hologram-experiences/</a> )	161
Figura 58_ collaborazione Cambridge University Hospital NHS Foundation Trust (CUH) e la società GigXR, (Business Wire, 2022, <a href="https://www.businesswire.com/news/home/20220627005691/en/GigXR-and-University-of-Cambridge-and-Cambridge-University-Hospitals-CUH-NHS-Foundation-Announce-Availability-of-Holographic-Patient-Simulation">https://www.businesswire.com/news/home/20220627005691/en/GigXR-and-University-of-Cambridge-and-Cambridge-University-Hospitals-CUH-NHS-Foundation-Announce-Availability-of-Holographic-Patient-Simulation</a> )	162
Figura 59_ prima parte introduttiva, del laboratorio della Biennale di Tecnologia	165
Figura 60_ prima parte introduttiva, del laboratorio della Biennale di Tecnologia	165
Figura 61_ seconda parte, i ragazzi realizzano le piramidi olografiche	166
Figura 62_ seconda parte, i ragazzi realizzano le piramidi olografiche	167
Figura 63_ terza parte: presentazione funzionamento del proiettore olografico	168
Figura 64_ quarta parte: gli studenti creano il modello tridimensionale su Blender	168
Figura 65_ effetto creato dalla piramide olografica realizzata in laboratorio	169
Figura 66_ situazione iniziale trave	171
Figura 67_ rotazione della trave	171
Figura 68_ stato iniziale trave	172
Figura 69_ traslazione orizzontale	172
Figura 70_ stato iniziale	172
Figura 71_ rotazione trave	172
Figura 72_ stato iniziale doppio pendolo	173
Figura 73_ spostamento laterale contenuto	173
Figura 74_ stato iniziale mensola	174
Figura 75_ mensola sottoposta a carico	174
Figura 76_ stato iniziale mensola	174
Figura 77_ mensola sottoposta a carico laterale	174
Figura 78_ mensola stato iniziale	175
Figura 79_ mensola sottoposta a compressione	175
Figura 80_ mensola stato iniziale	175
Figura 81_ mensola sottoposta a trazione	175
Figura 82_ mensola stato iniziale	176
Figura 83_ mensola sottoposta a torsione	176
Figura 84_ slide della Formula di Jourawsky	177
Figura 85_ parte trave a compressione	178
Figura 86_ parte trave a trazione	178

Figura 87_ individuazione asse neutro	178
Figura 88_ comportamento forze interne	178
Figura 89_ trave sottoposta a pressoflessione	179
Figura 90_ divisione trave	179
Figura 91_ forze interne	179
Figura 92_ suddivisione delle reazioni interne a compressione e tensione	179
Figura 93_ prospetti trave IPE	180
Figura 94_ individuazione asse neutro	180
Figura 95_ diagramma a farfalla delle forze interne	180
Figura 96_ spostamento dell'asse neutro	180
Figura 97_ trave sottoposta a momento flettente e forza taglio	181
Figura 98_ forze interne nella sezione trasversale	181
Figura 99_ porzione minima dove si può osservare il taglio orizzontale	181
Figura 100_ tensioni che agiscono in corrispondenza dei piani orizzontali	181
Figura 101_ trave sottoposta a carico verticale	182
Figura 102_ assi di legno sottoposte ad una determinata forza, scivolano l'una rispetto all'altra	182
Figura 103_ mensola con assi incollate	182
Figura 104_ cedimento trave di legno, separazione longitudinale	182
Figura 105_ sollecitazioni a taglio distribuite uniformemente	183
Figura 106_ parte resistente della trave	183
Figura 107_ forza taglio verticale	183
Figura 108_ direzione delle sollecitazioni del taglio	183
Figura 109_ torsione simmetrica e asimmetrica	184
Figura 110_ torsione mensola a sezione circolare	184
Figura 111_ mensola a sezione rettangolare in stato iniziale	184
Figura 112_ mensola rettangolare sottoposta a torsione	184
Figura 113_ elemento a sezione circolare sottoposto a trazione	185
Figura 114_ forze interne	185
Figura 115_ andamento forze interne	185
Figura 116_ segno positivo trazione e segno negativo per la compressione	185
Figura 117_ trave reticolare vincolata da cerniera e carrello	186
Figura 118_ trave reticolare con forze agenti sui nodi	186
Figura 119_ equilibrio nodi	186
Figura 120_ tiranti sottoposti a trazione e puntoni sottoposti a compressione	186

