

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei"

Corso di laurea in Ottica e Optometria

Tesi di Laurea

**"Percezione del colore e risoluzione temporale visiva: analisi
sperimentale sulla Critical Flicker Frequency"**

"Colour perception and visual temporal resolution: experimental analysis of the
Critical Flicker Frequency"

Relatore: Prof. Ruffato Gianluca

Correlatori: Prof.ssa Ortolan Dominga
Prof. Battaglini Luca

Laureanda: Demo Aljssia

Matricola: 1187678

Anno Accademico

2023/2024

INDICE

Abstract

Introduzione

1. Percezione del colore
 - 1.1 La luce
 - 1.2 Il colore
 - 1.3 Anatomia e fisiologia della visione dei colori
 - 1.4 Alterazioni della percezione cromatica

2. Risoluzione temporale visiva
 - 2.1 Risoluzione spaziale e temporale
 - 2.2 Ruolo di frequenza e intensità luminose
 - 2.3 Critical Flicker Frequency
 - 2.4 Applicazioni pratiche

3. Lo studio
 - 3.1 Metodologia operativa
 - 3.2 Il campione statistico
 - 3.3 Risultati e analisi

4. Discussione e conclusioni

5. Bibliografia

ABSTRACT

Obiettivo

Questo studio ha come obiettivo principale lo studio dei meccanismi sottostanti la risoluzione temporale visiva e l'analisi sperimentale della variazione della Critical Flicker Frequency (CFF) in funzione del colore e dell'intensità dello stimolo luminoso. La CFF è definita come la frequenza alla quale uno stimolo luminoso intermittente è percepito come una luce continua, e varia in base a diversi fattori fisiologici e ambientali.

Metodologia

L'indagine sperimentale prevede l'utilizzo di un setup realizzato ad hoc che comprende LED pilotati da un sistema Arduino. Lo studio ha coinvolto un campione di 22 partecipanti di sesso differente e di età compresa tra i 16 e i 60 anni, tutti con visione normale o corretta alla normalità. Gli esperimenti prevedevano un questionario iniziale per escludere eventuali patologie o condizioni di rischio e un test dei limiti ascendenti e discendenti della durata di circa un'ora per ciascun partecipante per ottenere una stima della CFF in diverse condizioni di illuminazione.

Risultati principali

I risultati hanno mostrato che la CFF varia con il colore e l'intensità dello stimolo luminoso.

All'aumentare della luminosità, deviazioni da un andamento lineare sono evidenti nella maggioranza dei soggetti: possiamo identificare un trend lineare iniziale e poi un plateau o un aumento più graduale della CFF per tutti i colori testati. In particolare, la CFF era più alta per gli stimoli tricromatici, indicando una maggiore sensibilità temporale per questa tipologia di stimoli.

Conclusioni

I risultati sono in linea con la teoria e confermano la dipendenza della Critical Flicker Frequency (CFF) dall'intensità luminosa. Le differenze osservate nella CFF per i diversi colori potrebbero essere correlate alle proprietà fisiologiche dei fotorecettori retinici. Questo dispositivo si propone come uno strumento promettente per lo screening e la diagnostica. La soglia CFF è un indicatore importante della funzione visiva e contribuisce alla comprensione dei meccanismi sottostanti la risoluzione temporale visiva. Sono comunque necessari ulteriori studi per comprenderne appieno le potenzialità e i limiti.

INTRODUZIONE

La percezione del colore e la risoluzione temporale sono temi di grande interesse nella ricerca neurovisiva. Tra i vari aspetti della visione, la capacità di percepire e interpretare stimoli luminosi intermittenti riveste un ruolo fondamentale nella nostra interazione con l'ambiente circostante. Questa tesi si propone di esplorare un fenomeno chiave in questo ambito: la Critical Flicker Frequency (CFF).

La CFF, definita come la frequenza alla quale uno stimolo luminoso intermittente viene percepito come una luce continua, rappresenta un importante indicatore della risoluzione temporale del sistema visivo umano. Questo parametro non è costante, ma varia in funzione di diversi fattori, tra cui il colore e l'intensità dello stimolo luminoso. Può inoltre differire da soggetto a soggetto, in funzione dell'età o delle capacità visive. La comprensione di queste variazioni può fornire preziose informazioni sui meccanismi sottostanti la percezione visiva e potrebbe avere importanti implicazioni sia in ambito clinico che tecnologico.

Nonostante l'importanza della CFF sia riconosciuta da tempo nella ricerca sulla visione, molti aspetti della sua variabilità in relazione a specifiche caratteristiche dello stimolo luminoso rimangono ancora da chiarire. In particolare, l'interazione tra colore, intensità luminosa e CFF rappresenta un'area di indagine promettente, che potrebbe contribuire a una comprensione più approfondita del funzionamento del sistema visivo umano.

Questa ricerca mira a mettere a punto e testare un dispositivo per quantificare e analizzare le variazioni della CFF in relazione a stimoli luminosi di diverso colore e intensità. L'approccio metodologico adottato combina lo sviluppo di uno strumento nuovo con un protocollo sperimentale ben strutturato, che permetterà di ottenere dati precisi e affidabili su un campione di partecipanti in salute.

I risultati di questo studio non solo contribuiranno ad ampliare le conoscenze teoriche nel campo della percezione visiva, ma potrebbero anche avere importanti ricadute pratiche. La comprensione dettagliata della relazione tra CFF, colore e intensità luminosa potrebbe infatti portare allo sviluppo di nuovi strumenti diagnostici per condizioni oftalmologiche e neurologiche, nonché influenzare la progettazione di dispositivi di visualizzazione e illuminazione più efficienti e confortevoli per l'occhio umano.

Nelle pagine che seguono, verranno presentati in dettaglio il contesto teorico, la metodologia sperimentale, i risultati ottenuti e le loro implicazioni.

1. PERCEZIONE DEL COLORE

1.1 LA LUCE

La luce è definita come il sottoinsieme delle radiazioni elettromagnetiche che stimolano la retina dell'occhio umano, costituendo così lo spettro visibile. Questo spettro comprende lunghezze d'onda che variano approssimativamente tra i 380 nm e i 780 nm, rappresentando solo una piccola porzione dello spettro elettromagnetico totale. [1] La percezione visiva umana è limitata a queste lunghezze d'onda, escludendo la maggior parte delle radiazioni infrarosse e ultraviolette.

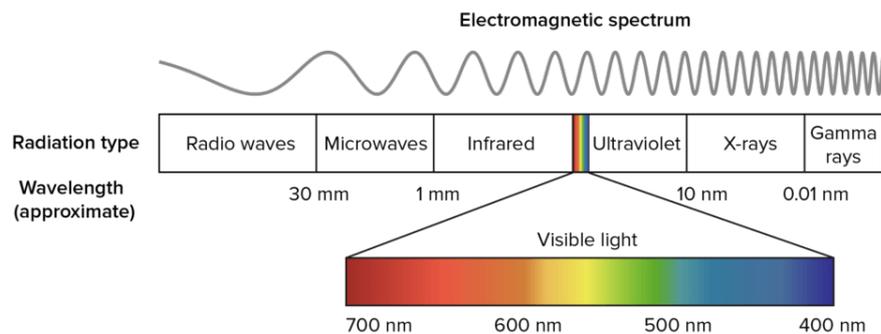


Figura 1: Spettro elettromagnetico totale e sottoinsieme di luce visibile (400 nm – 700 nm).

Fin dall'antichità, filosofi e scienziati hanno cercato di comprendere la vera natura della luce. Nell'antica Grecia coesistevano due teorie principali sulla visione: quella emissionista, sostenuta da filosofi e matematici come Pitagora ed Euclide, proponeva un processo attivo per cui l'occhio emettesse dei raggi visivi che "toccano" gli oggetti, permettendo così la percezione visiva; in contrasto, la teoria immissionista, supportata da pensatori come Democrito ed Epicuro,

sosteneva un'idea di visione come un processo passivo, in cui l'occhio riceveva informazioni dall'ambiente circostante sotto forma di particelle o "eidola" che si staccavano dagli oggetti. [2]

Tra seicento e settecento dibattito acceso tra scuola inglese di Newton e scuola europea rappresentata da Huygens, che sostenevano rispettivamente la natura corpuscolare o ondulatoria della luce. [3] Solo nei primi anni del 1800, in seguito ad esperimenti come quello sull'interferenza luminosa di Young, si sviluppò una comprensione scientifica più adeguata della luce, che cominciò a essere vista come un fenomeno ondulatorio. [4] Questo cambiamento di paradigma fu perfezionato in seguito dalle ricerche di Michael Faraday e James Clerk Maxwell, che dimostrarono l'unità dei fenomeni elettrici e magnetici, portando alla formalizzazione dell'elettromagnetismo. [2] La ricerca di Maxwell pose le basi per definire la luce visibile come un tipo specifico di onda elettromagnetica, differente da altre forme di radiazione come le onde radio o i raggi X. La luce visibile è caratterizzata dalla sua capacità di essere percepita dall'occhio umano, permettendo la distinzione tra vari colori in base alle lunghezze d'onda. [2]

Grazie ai contributi di fisici come Albert Einstein e Max Planck, si giunse agli inizi del secolo scorso a una teoria che concilia le due visioni precedenti: la luce può essere considerata sia una particella (fotone) sia un'onda. Questa dualità è descritta dalla teoria quantistica della luce, dove l'energia associata a un fotone di un'onda luminosa è proporzionale alla sua frequenza secondo la legge di Planck:

$$E = h \nu$$

dove h è la costante di Planck, che vale $6,62618 \cdot 10^{-34}$ J·s. [1]

Queste scoperte hanno chiarito due comportamenti fondamentali della luce: propagazione e assorbimento. La propagazione avviene come un'onda elettromagnetica mentre l'assorbimento viene spiegato attraverso la sua natura corpuscolare.

La comprensione della luce ha subito un'evoluzione significativa nel corso dei secoli, passando da interpretazioni filosofiche a una solida base scientifica che integra la dualità onda-particella e chiarisce i meccanismi attraverso cui percepiamo il mondo luminoso che ci circonda.

1.2 IL COLORE

Il colore non è una caratteristica intrinseca della materia, ma è profondamente legato alla presenza della luce, senza la quale non esisterebbe alcuna cromia. Quando la luce colpisce un oggetto, a seconda del suo colore, viene parzialmente assorbita e parzialmente riflessa. La luce riflessa è quella che viene percepita dai recettori cromatici nell'occhio umano, i quali trasformano queste informazioni in impulsi nervosi che vengono poi trasmessi e interpretati dal cervello, dando origine alla sensazione di colore. [5] Pertanto, dal punto di vista biologico, il colore si genera nell'occhio dell'osservatore e rappresenta un'impressione sensoriale.

Un aspetto interessante è il fenomeno della mescolanza cromatica, che si verifica grazie alla sovrapposizione di più onde luminose. Mescolando due o più colori, si può ottenere un colore completamente diverso. Questo processo può essere classificato come mescolanza additiva quando sorgenti luminose che emettono diverse lunghezze d'onda vengono combinate (aggiunte), e mescolanza sottrattiva quando le sostanze assorbono parte della luce, sottraendola

a quella riflessa. [3] I colori primari, rosso, verde e blu, possono combinarsi in vari modi per produrre una vasta gamma di colori.

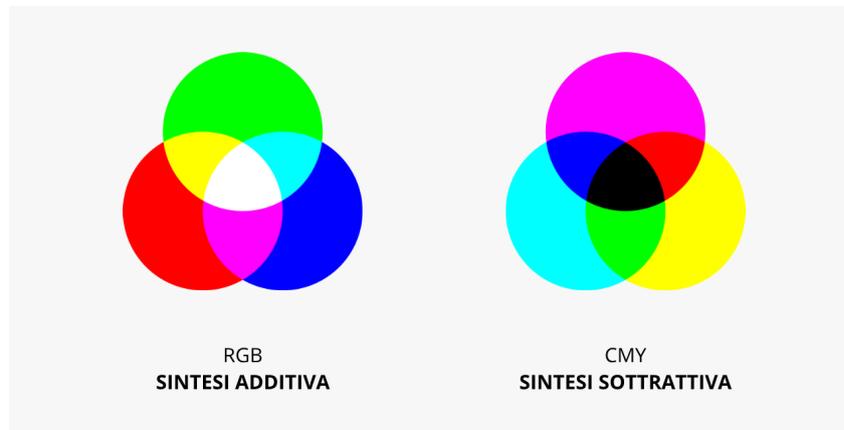


Figura 2: Rappresentazione cromatica dei principi di mescolanza additiva e mescolanza sottrattiva.

Due colori meritano particolare attenzione: il bianco e il nero. Questi non sono colori nel senso tradizionale; il bianco è generato dalla completa riflessione di tutte le lunghezze d'onda dello spettro visibile, mentre il nero deriva dal totale assorbimento di queste stesse lunghezze d'onda. Tuttavia, in natura, il bianco è un'entità teorica poiché non esiste materiale capace di riflettere il 100% delle frequenze comprese tra i 380 nm e i 780 nm.

È fondamentale considerare che la percezione del colore varia da individuo a individuo. Ogni persona "percepisce" il colore in modo differente, influenzata da fattori biologici e psicologici. Il colore, dunque, emerge come un fenomeno complesso che coinvolge interazioni tra luce e percezione umana. La comprensione della mescolanza cromatica e delle dinamiche della luce ci offre uno sguardo approfondito sulle sfumature del colore nella nostra vita quotidiana e nelle applicazioni scientifiche e artistiche.

Secondo Barry B. Lee, nel suo studio sull'evoluzione dei concetti di visione dei colori, la comprensione di come percepiamo i colori è strettamente legata alle teorie fisiche della luce. Inizialmente, sia i sostenitori della teoria corpuscolare che quelli della teoria ondulatoria consideravano lo spettro luminoso come un continuum. [3] Questo concetto si scontrava però con l'evidenza empirica che tutti i colori potessero essere riprodotti mescolando solo tre colori primari. [3] Alcuni scienziati, come Tobias Mayer, tentarono di conciliare queste osservazioni ipotizzando l'esistenza di soli tre tipi di raggi nello spettro. [3] Fu Thomas Young a risolvere questo apparente paradosso, intuendo che la corrispondenza tricromatica dei colori poteva essere spiegata postulando la presenza di tre soli tipi di recettori nell'occhio, pur in presenza di uno spettro luminoso continuo. [3]

La teoria tricromatica di Young ha rappresentato un importante punto di svolta, superando l'idea di una semplice corrispondenza uno a uno tra lunghezze d'onda e percezione del colore. Invece, ha mostrato come il sistema visivo umano sia in grado di ricostruire l'intera gamma di colori percepibili attraverso l'esistenza di tre tipi di coni retinici, sensibili rispettivamente alle lunghezze d'onda corrispondenti al rosso, al verde e al blu. [3]

La visione tricromatica è inoltre una caratteristica esclusiva dei primati tra i mammiferi, permettendo loro di rilevare dettagli e sfumature nei colori. Al contrario, altri mammiferi possiedono una capacità limitata di distinguere i colori, evidenziando l'evoluzione del sistema visivo nei primati come altamente sofisticato. Il legame tra i segnali retinici e la nomenclatura dei colori rimane poco definito, suggerendo che la percezione del colore è influenzata non solo da fattori fisiologici ma anche da aspetti psicologici e culturali. [3]

1.3 ANATOMIA E FISIOLOGIA DELLA VISIONE DEI COLORI

La visione è un processo complesso che coinvolge l'elaborazione della luce da parte del cervello, a partire dall'arrivo dei fotoni sulla retina. Questo meccanismo è fondamentale per interpretare il mondo circostante e richiede che tutte le strutture oculari siano sane e funzionanti.

La retina, la membrana più interna del bulbo oculare, è cruciale per la visione umana. Essa è composta da nove strati, con i fotorecettori (coni e bastoncelli) nello strato più esterno, prima dell'epitelio pigmentato. [6][7] I coni, circa sette milioni, sono concentrati nella fovea: in questa area, la densità dei coni raggiunge il suo picco massimo, con circa 150.000-180.000 coni per millimetro quadrato; mentre i bastoncelli sono praticamente assenti. Essi sono infatti più numerosi nella periferia: la loro densità massima si trova a circa 20 gradi di eccentricità dalla fovea, dove raggiunge circa 160.000-180.000 bastoncelli per millimetro quadrato; al contrario, la densità dei coni diminuisce rapidamente allontanandosi dalla fovea, circa 4.000-5.000 coni per millimetro quadrato. [8] Questa distribuzione differente dei fotorecettori spiega perché abbiamo una visione chiara e dettagliata al centro del nostro campo visivo e una visione meno definita alla periferia.

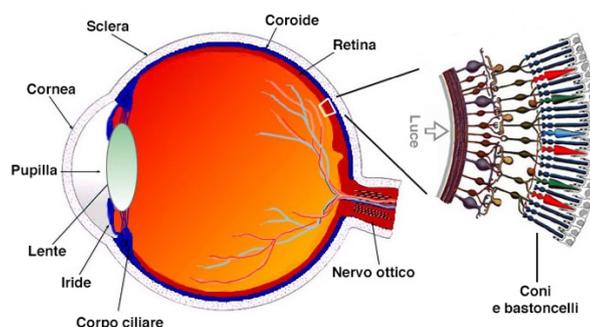


Figura 3: Struttura anatomica dell'occhio umano e localizzazione dei fotorecettori all'interno degli strati retinici.

I bastoncelli contengono rodopsina, un pigmento sensibile alla luce che consente la visione in condizioni di scarsa illuminazione. [6] Tuttavia, non sono in grado di percepire i colori, il che significa che la loro attivazione produce solo una visione in bianco e nero.

I coni, al contrario, sono responsabili della visione a colori e sono suddivisi in tre categorie, ognuna sensibile a diverse lunghezze d'onda:

- Coni S (short): Sensibili alle onde corte di luce (massimo assorbimento a 437 nm), noti anche come coni blu.
- Coni M (medium): Sensibili alle onde medie (picco di assorbimento a 533 nm), conosciuti come coni verdi.
- Coni L (long): Sensibili alle onde lunghe (massimo assorbimento a 564 nm), noti come coni rossi. [3]

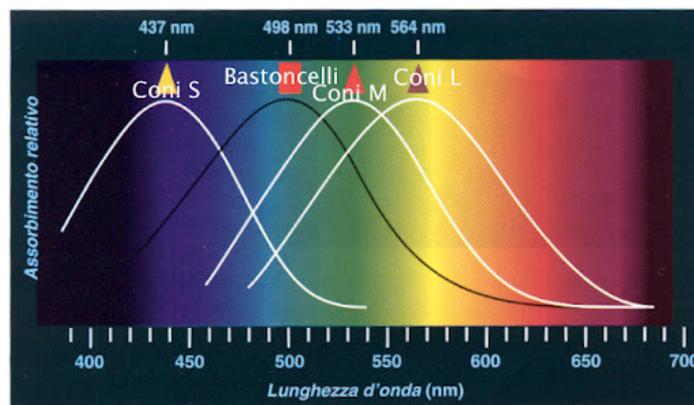


Figura 4: Rappresentazione della luce visibile e curve di assorbimento relative ai diversi tipi di coni (S, M e L).

La nostra percezione dei colori si basa sulle diverse attivazioni di questi coni, ad esempio:

- Rosso: Viene percepito quando i coni L sono più attivati rispetto ai coni M. Questo avviene quando la radiazione luminosa ha una lunghezza d'onda che stimola maggiormente i coni rossi (565 nm) rispetto ai verdi (530 nm).

- Giallo: Si percepisce quando i coni L ed M sono stimolati in modo simile.
- Verde: È percepito quando l'attivazione dei coni M supera quella dei coni L, e i coni S sono poco attivati.

Questa interazione tra i vari tipi di coni è descritta dalla teoria dell'opponenza dei canali, sviluppata da Ewald Hering nel XIX secolo e si basa sull'idea che la percezione del colore avviene attraverso tre coppie di canali opposti: rosso-verde, blu-giallo e bianco-nero (luminosità). [3]

Secondo questa teoria, i colori di ciascuna coppia si inibiscono a vicenda, creando un sistema di opposizione, dunque, quando il canale rosso-verde è stimolato in una direzione, percepiamo il rosso; quando è stimolato nella direzione opposta, percepiamo il verde. Analogamente, per il canale blu-giallo, la stimolazione in una direzione produce la percezione del blu, mentre nella direzione opposta produce il giallo. Il canale bianco-nero regola la percezione della luminosità, con il bianco a un estremo e il nero all'altro. [9]

La teoria dell'opponenza dei canali è supportata da diverse evidenze scientifiche:

1. Immagini residue: quando fissiamo un'immagine colorata per un certo periodo e poi guardiamo una superficie bianca, vediamo un'immagine residua nei colori complementari. Questo fenomeno si spiega con l'affaticamento dei canali opposti.
2. Discromatopsia: alcune forme di discromatopsia, come la difficoltà nel distinguere il rosso dal verde, supportano l'idea di canali di colore opposti. [10]
3. Studi neurofisiologici: ricerche sulle cellule gangliari della retina e sui neuroni del corpo genicolato laterale hanno confermato l'esistenza di cellule che rispondono in modo opposto a coppie di colori. [9].

La retina contiene anche diversi tipi di cellule neurali che elaborano i segnali visivi:

- Cellule orizzontali: Inibiscono l'attività dei fotorecettori e utilizzano il GABA come neurotrasmettitore.
- Cellule bipolari: Trasmettono segnali dai fotorecettori alle cellule gangliari.
- Cellule amacrine: Modulano che influenzano l'attività delle cellule bipolari e gangliari.
- Cellule gangliari: Raccolgono informazioni dai fotorecettori tramite le cellule bipolari e inviano segnali attraverso il nervo ottico al cervello. [6][11]

I segnali visivi raccolti dalla retina vengono trasmessi attraverso i nervi ottici. I due nervi ottici si incontrano nel chiasma ottico, dove gli assoni provenienti dalla metà destra delle retine si incrociano per formare il tratto ottico sinistro, mentre quelli della metà sinistra formano il tratto ottico destro. Questo incrocio significa che la metà sinistra del campo visivo è rappresentata nell'emisfero destro del cervello e viceversa. Dopo il chiasma, le fibre nervose si dirigono verso il corpo genicolato laterale, una struttura del talamo che svolge un ruolo fondamentale nell'analisi preliminare delle informazioni visive, inclusa l'analisi del colore e del contrasto. Una parte delle fibre, invece di andare al corpo genicolato laterale, si dirige verso il collicolo superiore, che è coinvolto nella localizzazione degli oggetti e nel controllo dei movimenti oculari. [6][7][12]

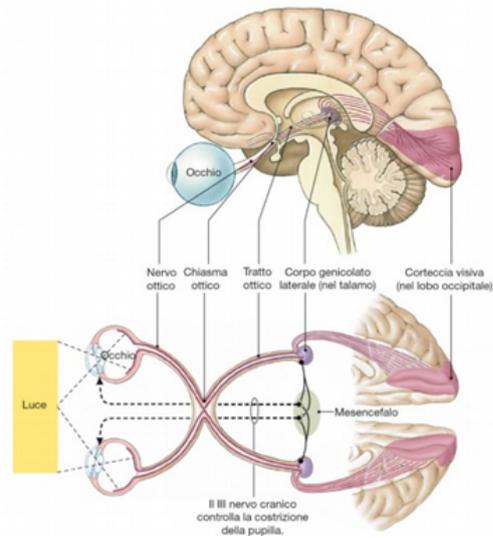


Figura 5: Anatomia delle vie ottiche.

Questa organizzazione stratificata delle cellule neurali nella retina e il loro interconnettersi attraverso circuiti complessi sono essenziali per la nostra capacità di percepire il mondo visivo in modo dettagliato ed efficace.

1.4 ALTERAZIONI DELLA PERCEZIONE CROMATICA

Le alterazioni della percezione cromatica possono essere classificate in due principali categorie:

- 1 **Discromatopsia:** è un'anomalia nella percezione dei colori dovuta a un disturbo funzionale dei coni retinici. In questo caso, la visione dei colori è presente ma risulta alterata.
Essa può manifestarsi in tre forme principali, ciascuna associata a un tipo specifico di coni retinici:

- Protanopia e protanomalia: questa forma di discromatopsia è legata ai coni sensibili alle lunghezze d'onda lunghe (rosso). Nella protanopia, i coni L sono completamente assenti, mentre nella protanomalia sono presenti ma in numero ridotto o con funzionalità alterata. Le persone affette da questa condizione hanno difficoltà a distinguere il rosso dal verde e possono percepire il rosso come più scuro del normale. [13]
- Deuteranopia e deuteranomalia: questa variante riguarda i coni sensibili alle lunghezze d'onda medie (verde). La deuteranopia si verifica quando i coni M sono del tutto assenti, mentre la deuteranomalia è caratterizzata da una riduzione del numero o dell'efficienza di questi coni. I soggetti con questa forma di discromatopsia faticano a distinguere il verde dal rosso, ma a differenza della protanopia, non percepiscono il rosso come più scuro. [13]
- Tritanopia e tritanomalia: questa rara forma di discromatopsia coinvolge i coni sensibili alle lunghezze d'onda corte (blu). Nella tritanopia, i coni S sono completamente assenti, mentre nella tritanomalia sono presenti in numero ridotto o con funzionalità compromessa. Le persone affette da questa condizione hanno difficoltà a distinguere il blu dal giallo e possono confondere il blu con il verde e il giallo con il viola. [13]

2 Acromatopsia: detta anche acromia o monocromatismo, è caratterizzata da una completa assenza della percezione del colore. Le sue caratteristiche principali sono:

- Assenza totale dei tre sistemi di coni recettori (S, M, L)
- Visione esclusivamente in bianco e nero (monocromatica)
- Cecità visiva per tutti e tre i colori primari (rosso, verde, blu)

- La curva di visibilità fotopica (visione diurna) risulta identica a quella scotopica (visione notturna)
- Assenza completa della percezione cromatica

La principale differenza tra le due condizioni è che nella discromatopsia la visione dei colori è presente ma alterata, mentre nell'acromatopsia è completamente assente. La discromatopsia comporta una percezione anomala di alcune tonalità, mentre l'acromatopsia implica una visione esclusivamente in scala di grigi.

Le discromatopsie possono essere congenite o acquisite. Le forme congenite sono generalmente ereditarie e presenti dalla nascita, e solitamente binoculari; mentre quelle acquisite insorgono in seguito a patologie oculari, neurologiche o sistemiche. Le discromatopsie congenite più comuni sono il daltonismo (deficit nella percezione del rosso-verde) e la tritanomalia (deficit nella percezione del blu-giallo).



Figura 6: Rappresentazione cromatica delle principali forme di discromatopsie e di acromatopsia, confrontati con la normale percezione dei colori.

Le forme acquisite possono essere anche monoculari e manifestarsi con vari gradi di severità, da una lieve riduzione della discriminazione cromatica fino alla completa acromatopsia. [14] Le cause più frequenti di discromatopsia acquisita includono patologie retiniche come la

retinopatia diabetica o la degenerazione maculare, neuropatie ottiche, glaucoma e alcuni farmaci neurotossici. La diagnosi si basa su specifici test come le tavole pseudoisocromatiche di Ishihara o il test di Farnsworth-Munsell. Sebbene non esistano cure definitive, in alcuni casi l'uso di filtri colorati selettivi può migliorare la percezione cromatica soggettiva e la qualità di vita dei pazienti affetti da discromatopsia. [15][16]

2. RISOLUZIONE TEMPORALE VISIVA

2.1 RISOLUZIONE SPAZIALE E TEMPORALE

La risoluzione spaziale e la risoluzione temporale sono concetti fondamentali nella percezione visiva, che si riferiscono alla capacità del sistema visivo di discriminare stimoli nello spazio e nel tempo, esse dunque lavorano insieme per permettere una percezione visiva fluida e coerente del mondo circostante.

La risoluzione spaziale riguarda la capacità di distinguere tra oggetti separati in uno spazio visivo. Essa dipende dalla densità dei recettori retinici e dalla loro disposizione. Per esempio, per percepire due luci distinte nello spazio, è necessaria una risposta adeguata da parte dei recettori retinici che devono essere sufficientemente distanziati. La discriminazione spaziale è influenzata anche da fattori come il contrasto e le dimensioni degli stimoli. [17]

La risoluzione temporale visiva si riferisce alla capacità del sistema visivo di percepire e discriminare stimoli luminosi che si presentano in rapida successione. Questo concetto è cruciale per comprendere come gli esseri umani percepiscono il movimento e la stabilità delle immagini nel loro ambiente. Il sistema visivo umano campiona continuamente le informazioni luminose proiettate sulla retina, integrando questi segnali in un processo che richiede un certo tempo. [17][18]

La somma temporale è un aspetto chiave di questo processo: si riferisce alla capacità dell'occhio di accumulare l'energia luminosa nel tempo, permettendo di percepire stimoli intermittenti come se fossero continui. Questo processo avviene in un intervallo di tempo finito, detto periodo o tempo critico. [17] Esiste quindi un limite alla velocità con cui il sistema può raccogliere ed elaborare segnali luminosi. Questo porta a definire la cosiddetta frequenza critica dello sfarfallio (Critical Flickering Frequency - CFF). Al di sotto di questa frequenza, gli stimoli luminosi appaiono separati nel tempo; al di sopra, vengono percepiti come una luce continua. [17][19]

I bastoncelli hanno un tempo critico di circa 150 millisecondi nella visione scotopica (in condizioni di scarsa luminosità). [17] Questa sommazione temporale prolungata consente loro di rilevare stimoli deboli in ambienti poco illuminati, ma limita la loro capacità di percepire cambiamenti rapidi o sfarfallii.

I coni hanno un tempo critico molto più breve, che può scendere fino a 10-15 millisecondi. In particolare, il loro funzionamento varia in base alle condizioni di illuminazione: in condizioni di scarsa luminosità, i coni rallentano, richiedendo tempi di integrazione più lunghi per raccogliere sufficiente luce e innescare lo stesso livello di trasduzione del segnale. [17]

Con l'aumento della luminosità, il sistema visivo può raggiungere lo stesso livello di rilevamento in meno tempo, grazie all'incremento dell'efficienza del processo di fototrasduzione. Di conseguenza, la durata critica, ovvero il tempo necessario al sistema per sommare la luce, si riduce. [17]

La diminuzione del tempo critico (o durata critica) dei coni all'aumentare della luminosità è dovuta a diversi fattori:

1. Processi di fototrasduzione più rapidi e robusti, grazie a un maggior numero di fotoni e un miglior rapporto segnale-rumore.
2. Recupero più efficiente della cascata di fototrasduzione.
3. Miglioramento dell'elaborazione neurale tra retina e corteccia visiva.
4. Meccanismi di adattamento più efficienti.

Questi fattori consentono al sistema visivo di adattarsi rapidamente a diverse condizioni di illuminazione, ottimizzando la percezione visiva in vari ambienti luminosi.

Ci sono altri fattori che possono influenzare la risoluzione temporale, tra cui:

- Dimensione dello stimolo: Stimoli più grandi tendono a migliorare la risoluzione temporale.
- Condizioni ambientali: La presenza di un fondo luminoso e altre condizioni visive possono alterare la soglia di percezione. [17]

2.2 RUOLO DI FREQUENZA E INTENSITA' LUMINOSE

La frequenza e l'intensità luminose sono due parametri fondamentali nella percezione visiva, che influenzano notevolmente come gli esseri umani percepiscono la luce e il movimento. Ci si riferisce in particolare alla frequenza di accensione e spegnimento di una sorgente (flickering) e non alla frequenza delle onde luminose prodotte.

L'intensità luminosa, d'altra parte, è una misura della quantità di energia luminosa emessa da una sorgente in un dato intervallo di tempo. [1] Essa gioca un ruolo cruciale nella percezione visiva, poiché influisce sulla soglia di rilevamento della luce e sulla capacità di discriminare dettagli e movimenti.

La legge di Bloch descrive come la soglia di percezione luminosa dipenda dal prodotto della luminanza (L) e della durata dello stimolo (t). Secondo questa legge, la soglia viene raggiunta quando $L \cdot t = k$, dove k è una costante. [17] Questo implica che, per stimoli con luminanza più bassa, è necessaria una durata maggiore per raggiungere la soglia percettiva, mentre per luminanze elevate è sufficiente un intervallo più breve. [17]

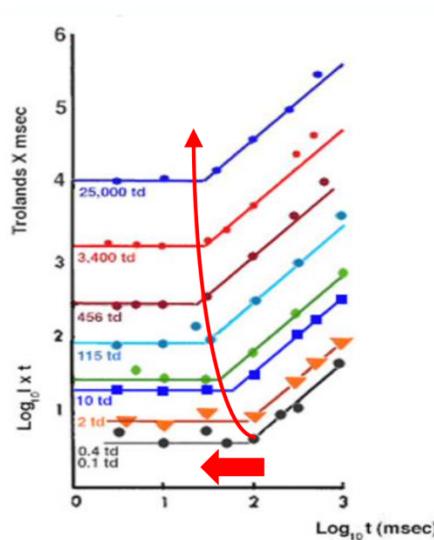


Figura 7: Curve di luminanza-durata in funzione del tempo. Rappresentazione grafica della legge di Bloch: con l'aumento della luminanza la durata dello stimolo diminuisce e si raggiunge prima la soglia percettiva.

La frequenza luminosa si riferisce al numero di eventi luminosi che si verificano in un dato intervallo di tempo ed è strettamente legata al concetto di frequenza critica dello sfarfallio (CFF). Questo parametro è fondamentale per comprendere come il sistema visivo umano

percepisce stimoli luminosi intermittenti e come questi vengano integrati nel tempo per formare un'immagine continua.

La relazione tra frequenza e intensità luminosa è complessa e interdipendente. A livelli elevati di luminanza, il sistema visivo diventa più sensibile ai cambiamenti rapidi nella luce, migliorando la risoluzione temporale. Tuttavia, a livelli scotopici (bassa luminosità), la sensibilità alla frequenza diminuisce notevolmente, richiedendo un contrasto maggiore per rilevare sfarfallii o variazioni.

2.3 CRITICAL FLICKER FREQUENCY

Un concetto chiave nella risoluzione temporale è la frequenza critica dello sfarfallio (CFF), che rappresenta la frequenza alla quale una luce intermittente viene percepita come continua dall'occhio umano, si tratta di un importante parametro utilizzato per valutare le funzioni visive e neurali. [17][19]

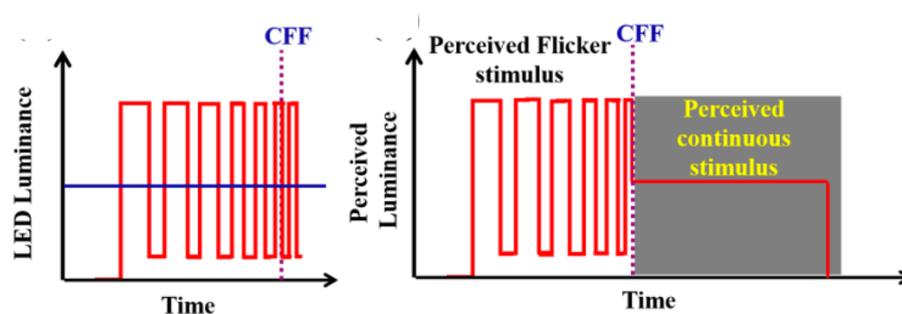


Figura 8: Rappresentazione grafica del concetto di CFF, la soglia in corrispondenza della quale uno stimolo intermittente viene percepito continuo.

Questa frequenza varia in base a diversi fattori, tra cui l'intensità luminosa e le dimensioni dello stimolo. La legge di Ferry-Porter stabilisce che la CFF è proporzionale al logaritmo della luminanza dello stimolo. [17] [19] La relazione può essere espressa come:

$$CFF = a \cdot \log L + b$$

dove a e b sono costanti. [17]

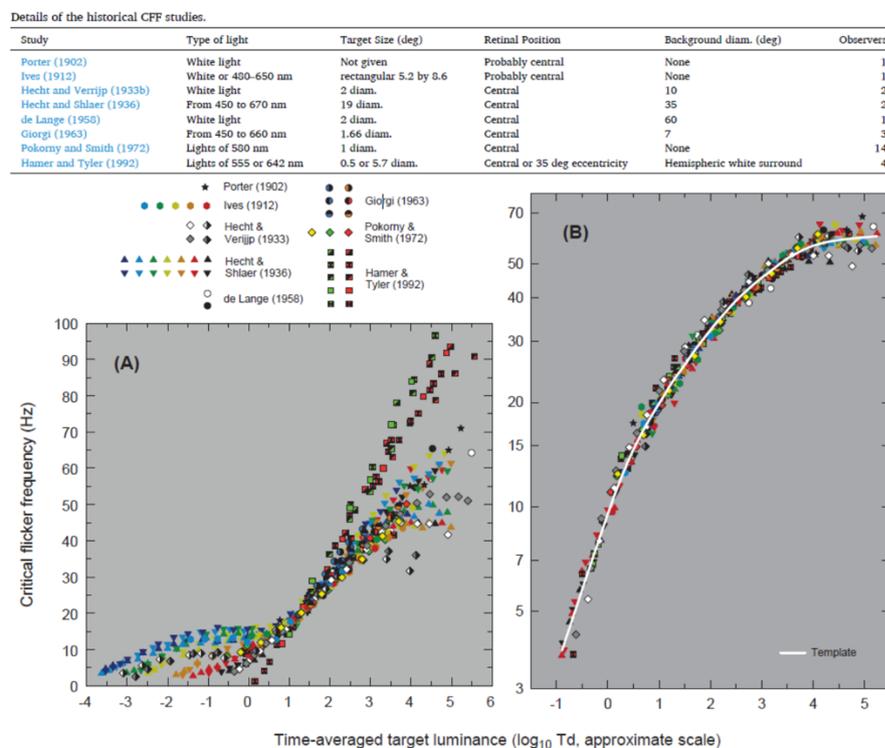


Figura 9: Grafici di studi precedenti sulla CFF con specifiche su tipo di luce, dimensioni del target, posizione retinica e background.

La risoluzione temporale visiva può essere misurata attraverso diversi metodi e parametri, che valutano la capacità del sistema visivo di percepire e discriminare stimoli luminosi che si presentano in rapida successione: la misura della CFF fornisce un'indicazione diretta della risoluzione temporale del sistema visivo. [20]

Diversi fattori influenzano la CFF:

- Luminanza dello stimolo: All'aumentare della luminanza, aumenta anche la CFF.
- Dimensioni dello stimolo: Stimoli più grandi tendono ad avere una CFF più alta.
- Posizione retinica: La CFF varia in base alla zona della retina stimolata.
- Adattamento alla luce: Lo stato di adattamento dell'occhio influenza la CFF.
- Età: La CFF tende a diminuire con l'età.

[17][19]

La misurazione della CFF può essere effettuata con diversi metodi psicofisici, come il metodo dei limiti, il metodo degli stimoli costanti o il metodo delle scale (staircase). Ciascun metodo ha vantaggi e svantaggi in termini di accuratezza, ripetibilità e durata del test. [20]

2.4 APPLICAZIONI PRATICHE

La risoluzione temporale visiva ha diverse applicazioni pratiche in vari campi, grazie alla sua importanza nella percezione del movimento e nella stabilità visiva.

Ecco alcune delle principali applicazioni:

- Tecnologia dei display: La comprensione della risoluzione temporale è fondamentale per progettare schermi e monitor. Ad esempio, la CFF deve essere considerata per evitare che gli utenti percepiscano sfarfallii fastidiosi, specialmente in ambienti con alta luminosità. Monitor con frequenze di aggiornamento elevate (come 120 Hz o 240 Hz) possono ridurre il rischio di affaticamento visivo e migliorare l'esperienza utente.

- **Screening e diagnostica:** Valutare la risoluzione temporale del sistema visivo può essere un utile strumento diagnostico. Deviazioni significative dai valori normali possono essere indicative di problemi e richiedere ulteriori indagini. Questo approccio può essere particolarmente utile per identificare precocemente disturbi neurologici o oculari e monitorare l'evoluzione di certe patologie
- **Neuroscienze e psicologia:** Lo studio dell'elaborazione visiva e della risoluzione temporale del sistema visivo è fondamentale per comprendere come il cervello interpreta le informazioni visive nel tempo. Queste ricerche forniscono preziose intuizioni sui meccanismi neurali sottostanti la percezione visiva e possono aiutare a sviluppare nuove terapie per disturbi visivi.
- **Progettazione dell'Illuminazione:** La comprensione della risoluzione temporale visiva è cruciale nel campo del design dell'illuminazione. In particolare, è essenziale per evitare lo sfarfallio (flicker) nelle sorgenti luminose, che può causare disagio visivo, e prevenire potenziali crisi epilettiche in individui sensibili.

3. LO STUDIO

3.1 METODOLOGIA OPERATIVA

La raccolta dati di questo studio è avvenuta tra giugno e agosto 2024: è stato presentato ad ogni soggetto un questionario iniziale, per poi procedere con il test vero e proprio.

L'anamnesi preliminare prevede una prima parte generale inerente a caratteristiche del soggetto quali età, sesso, dominanza o difetti visivi, per poi procedere con un'indagine sulle condizioni di salute, volta a escludere anomalie della percezione cromatica, alterazioni della trasparenza dei mezzi oculari, malattie oculari o neurologiche o condizioni quali cinetosi o epilessia. Lo studio ha avuto l'approvazione del comitato etico della ricerca psicologica (area 17) dell'Università degli Studi di Padova, codice del documento 703-b.

Il test svolto, della durata totale di circa 1 ora, prevede l'utilizzo di uno strumento realizzato ad hoc per questo studio e segue una procedura che comprende il metodo dei limiti per la misurazione della Critical Flicker Frequency.

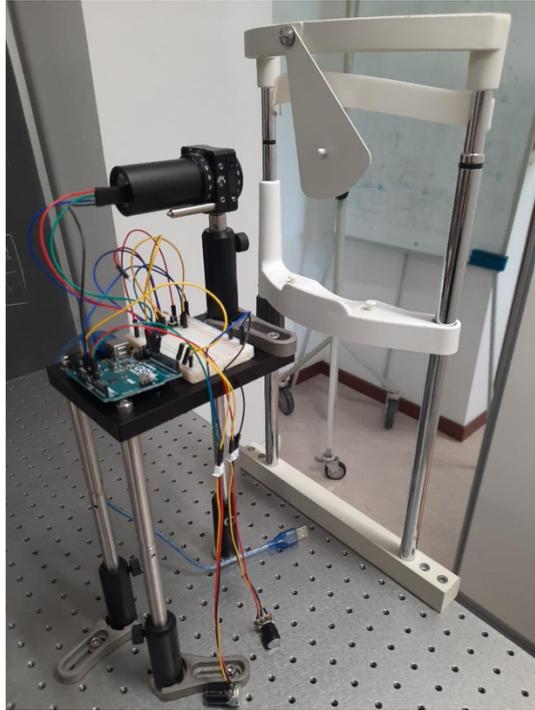


Figura 10: Setup sperimentale utilizzato per lo studio.

Il setup sperimentale si compone di una scheda Arduino UNO rev3 collegata a PC, dalla quale è possibile controllare colore e intensità di un LED RGB (RND 135-00193 – 5 mm, B 468 nm, G 520 nm, R 632 nm, T-1 3/4, RND Components); l'intensità del led viene regolata attraverso la Pulse-Width Modulation (PWM) e la rotazione di un filtro polarizzatore per estendere il range di valori. È presente, inoltre, un altro potenziometro che permette di regolare la Flicker Frequency del LED RGB.

Lo strumento è stato calibrato utilizzando un powermeter (PM100D, Thorlabs) con sonda nel visibile (S121C, Thorlabs). La sonda è stata posizionata circa alla stessa distanza dell'occhio del soggetto e l'area sensibile ha un diametro di 9 mm.

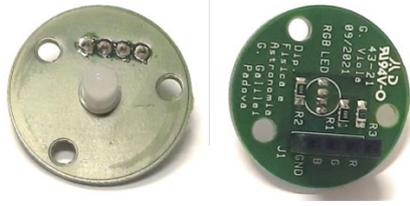


Figura 11: LED RGB

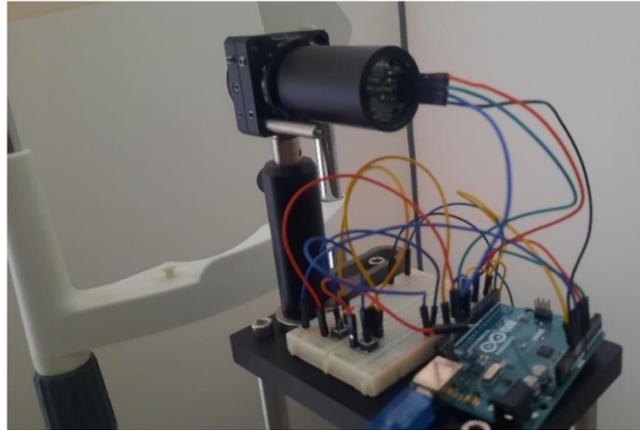


Figura 12: Scheda Arduino e circuito collegato.

Il soggetto si appoggia a una mentoniera dalla quale osserva il LED RGB monocolarmente, la cui intensità viene controllata dall'operatore, mentre la Flicker Frequency è controllata dal soggetto stesso.

Il test è ripetuto prendendo in considerazione 7 diversi colori: rosso, blu, verde, magenta (fusione di blu e rosso), giallo (fusione di verde e rosso), ciano (fusione di verde e blu) e bianco (fusione di rosso, blu e verde).

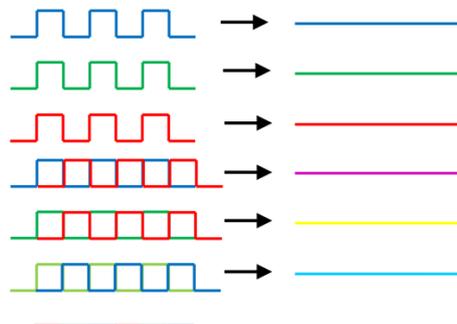


Figura 13: Rappresentazione degli stimoli cromatici singoli emessi dal LED RGB e relative combinazioni analizzate nello studio.

Questi colori vengono fatti osservare a 7 livelli di intensità luminosa. I valori di potenza per i colori rosso, verde e blu sono stati misurati direttamente attraverso un powermeter, mentre quelli per le diverse combinazioni di colori (magenta, giallo, ciano e bianco) sono stati valutati sfruttando la media delle potenze delle coppie di colori. Per il bianco è stata svolta la media dei valori di potenza relativi a rosso, verde e blu.

P red	P green	P blue
	(μ W)	
6,15	8,3	12,68
3,68	4,73	6,91
1,31	1,79	2,64
0,71	0,84	1,36
0,23	0,21	0,32
0,05	0,04	0,06
0,01	0,01	0,02

Tabella 1: 7 valori di potenza misurati per ciascun colore, le medie di potenza per le diverse combinazioni di colori sono state fatte utilizzando questi valori di partenza.

Per ogni livello di intensità, al soggetto è richiesto di modulare la Flicker Frequency attraverso l'apposito potenziometro fino a quando il LED viene percepito come fisso e non più intermittente (metodo dei limiti ascendente), per poi procedere con il procedimento inverso (metodo dei limiti discendenti). La soglia è quindi ottenuta dalla media dei due procedimenti.

3.2 IL CAMPIONE STATISTICO

Il campione statistico è composto da 22 soggetti in salute di cui 17 di sesso femminile (77,27%) e 5 di sesso maschile (22,73%).

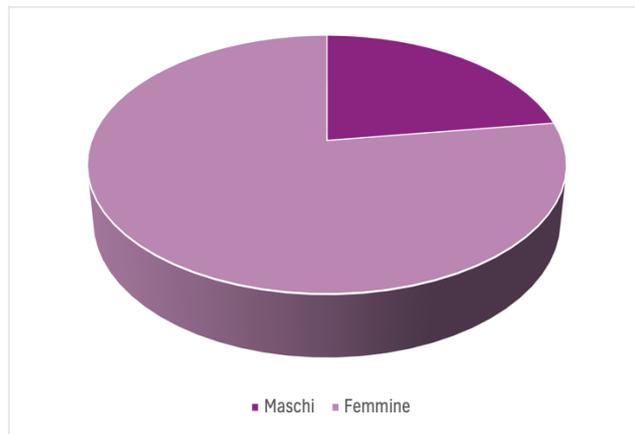


Grafico 1: Grafico a torta della composizione del campione.

L'età dei partecipanti è compresa tra i 16 e i 59 anni con una media di circa 29 anni.

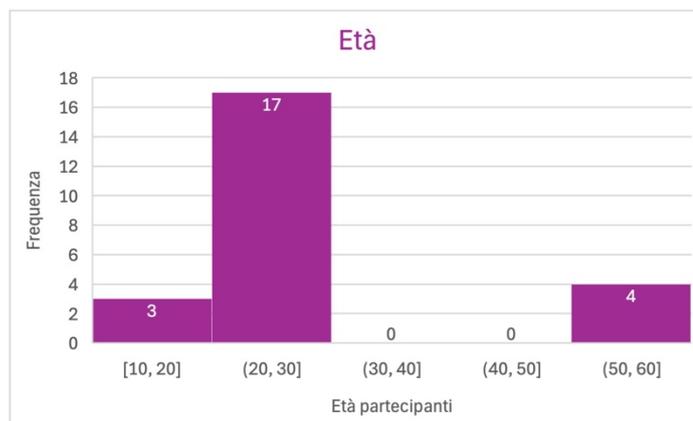


Grafico 2: Istogramma della distribuzione delle età che compongono il campione.

In seguito alla compilazione dell'anamnesi preliminare sono state escluse patologie (oculari e non) o condizioni di rischio (es. epilessia, cinetosi) che potessero compromettere la riuscita del test. Inoltre, nessuno dei partecipanti presenta disfunzioni cerebrali o cognitive che potessero alterare la valutazione della risoluzione temporale visiva.

3.3 RISULTATI E ANALISI

I dati raccolti presentano un andamento ricorrente nella maggior parte dei soggetti, che si compone generalmente di due parti: inizialmente i valori acquisiti seguono un trend lineare con il logaritmo della luminanza, per poi procedere con una crescita più graduale, riconducibile a un plateau.

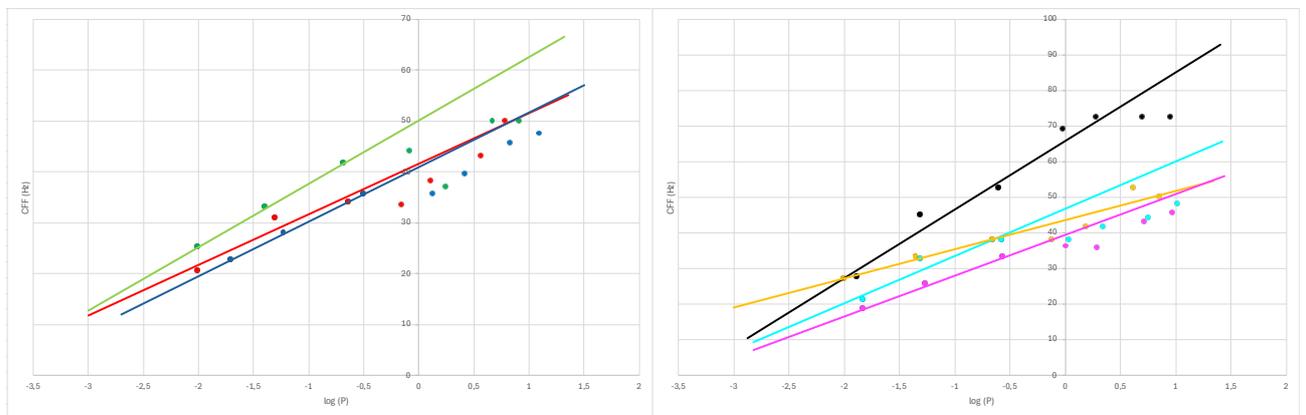


Grafico 3: Esempio di un soggetto di 24 anni in cui i dati seguono un andamento lineare con il logaritmo della luminanza, in questo caso risulta più difficile individuare una zona di plateau, in particolare per le combinazioni bicromatiche.

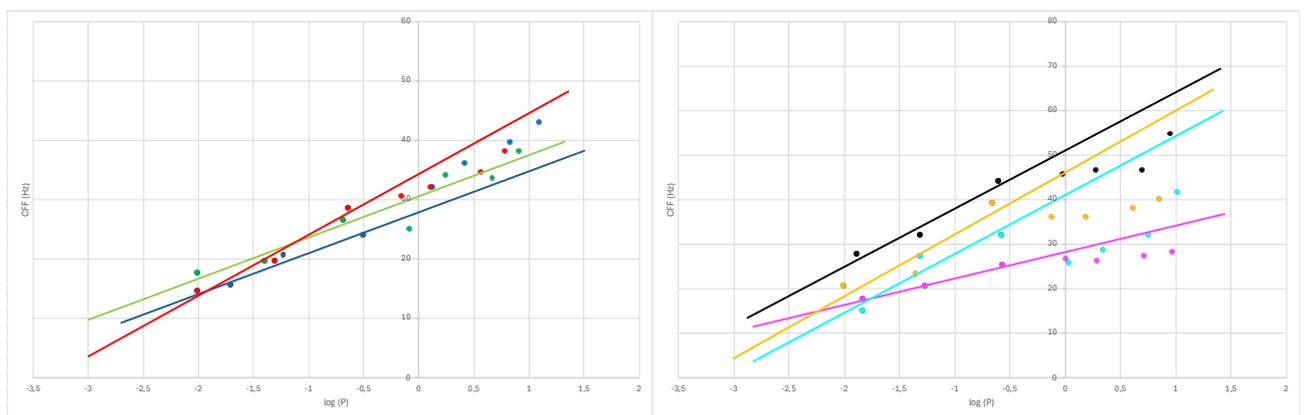


Grafico 4: Esempio di un soggetto di 52 anni i cui dati riproducono un buon trend lineare per i colori rosso, verde e blu; l'andamento a plateau è invece ben identificabile osservando i valori riferiti alle combinazioni bicromatiche e tricromatica.

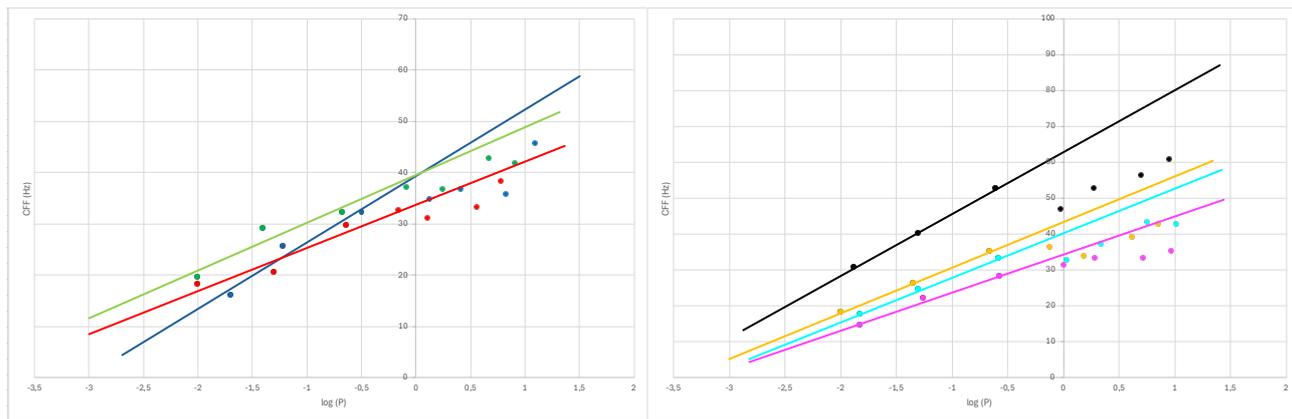


Grafico 5: Esempio di un soggetto di 21 anni in cui è possibile identificare in tutti i colori la divisione tra i due andamenti, ovvero trend lineare iniziale con successivo plateau.

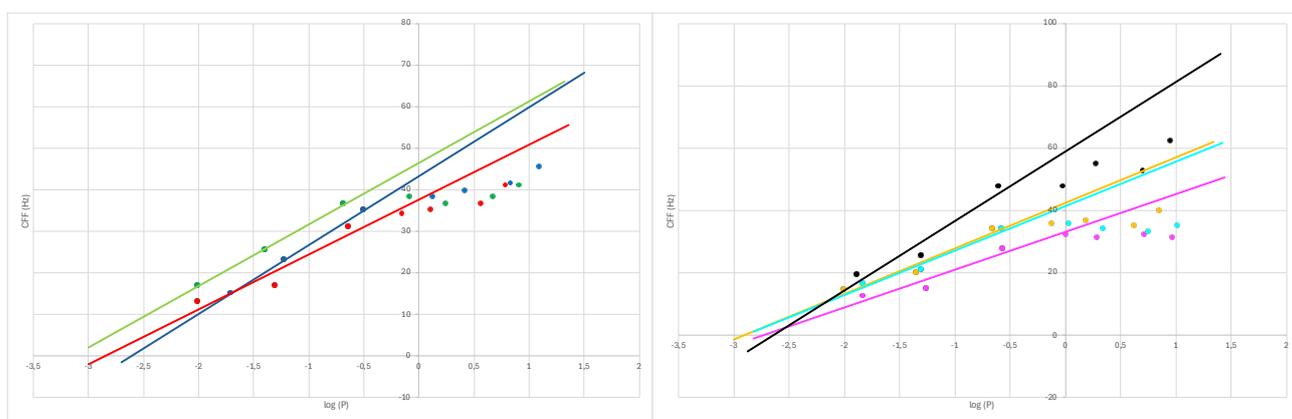


Grafico 6: Esempio di un soggetto di 29 anni i cui dati rispecchiano perfettamente in tutti i colori l'andamento previsto, come nel caso precedente.

Per stabilire che gli andamenti dei dati rilevati siano effettivamente ben rappresentati da una retta è utile osservare il coefficiente di correlazione lineare R^2 delle distribuzioni, se esso risulta molto vicino all'unità, allora ciò è confermato.

È stato riscontrato inoltre che i valori di CFF per i test monocromatici e bicromatici sono generalmente più bassi di quelli rilevati attraverso test tricromatici.

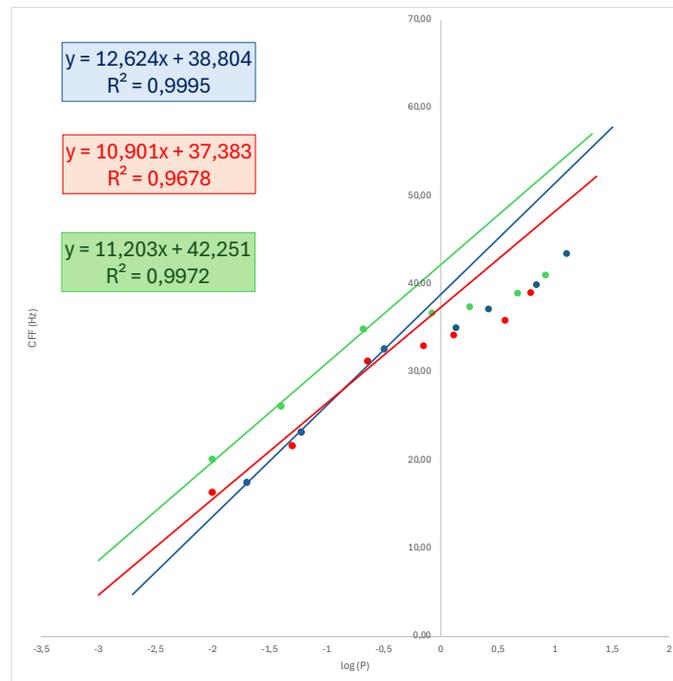


Grafico 7: Rappresentazione degli andamenti per le medie di tutti i soggetti per i colori rosso, verde e blu con relativi coefficienti angolari dei fit lineari e coefficienti di correlazione lineare.

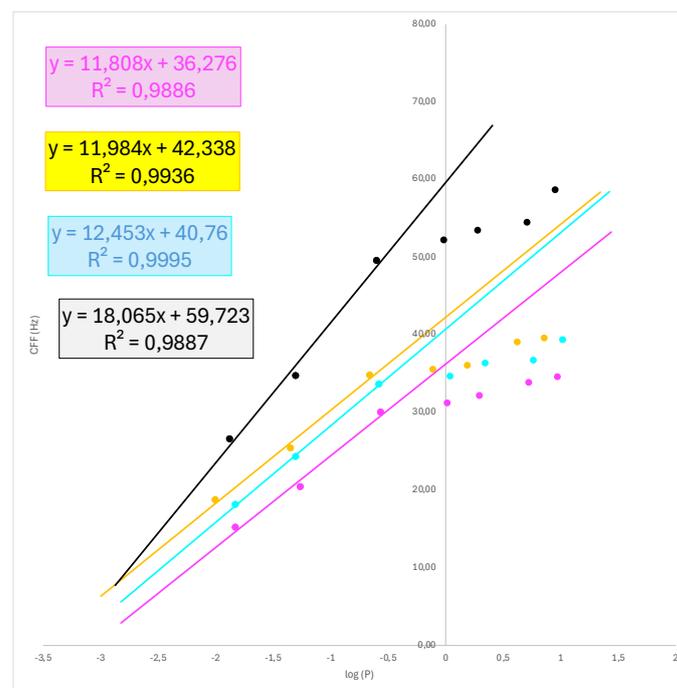


Grafico 8: Rappresentazione degli andamenti per le medie di tutti i soggetti per le combinazioni bicromatiche e tricromatica con relativi coefficienti angolari dei fit lineari e coefficienti di correlazione lineare.

È stato osservato anche che la correlazione tra Critical Flicker Frequency ed età è molto bassa.

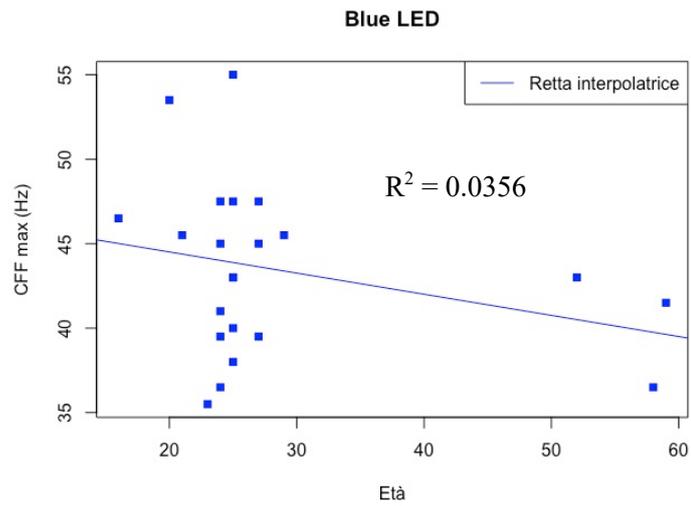


Grafico 9: Distribuzione riferiti al massimo livello di intensità luminosa dei dati di CFF in relazione all'età dei soggetti per il colore blu.

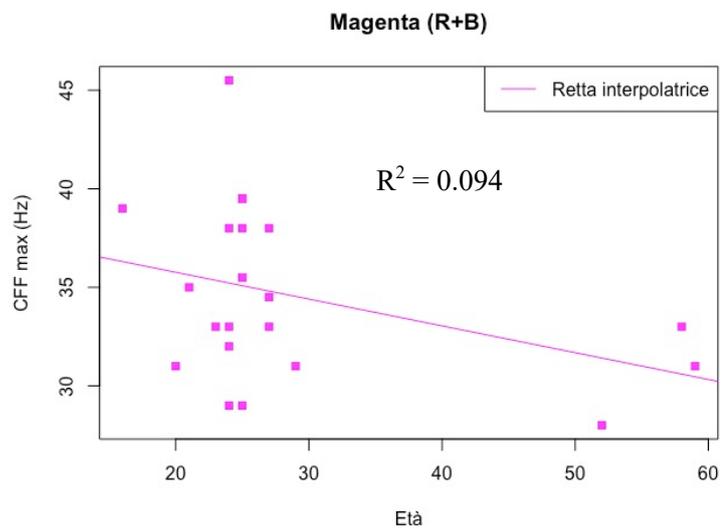


Grafico 10: Distribuzione riferiti al massimo livello di intensità luminosa dei dati di CFF in relazione all'età dei soggetti per il colore magenta.

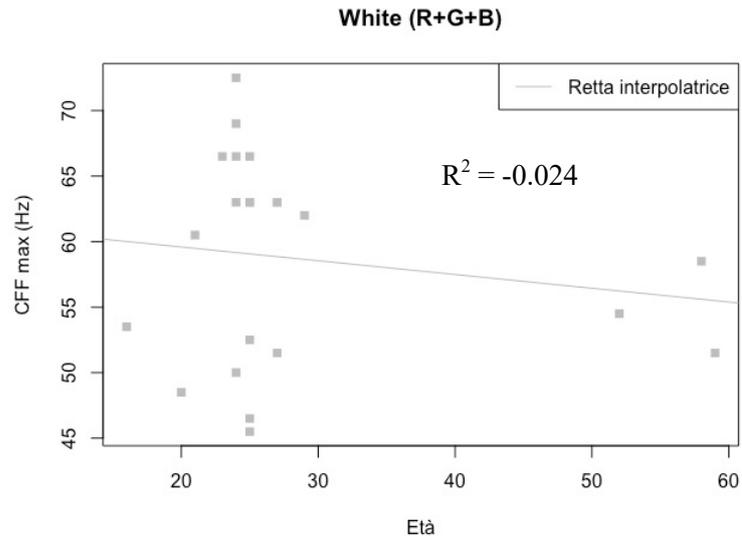


Grafico 11: Distribuzione riferiti al massimo livello di intensità luminosa dei dati di CFF in relazione all'età dei soggetti per il colore bianco.

Tuttavia, il campione di soggetti testati è composto principalmente da persone di età compresa tra i 20 e i 30 anni, sarebbe utile svolgere i test comprendendo ulteriori soggetti appartenenti a diverse fasce d'età per comprendere e analizzare in maniera più completa questo aspetto.

4. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Questo studio ha esaminato la relazione tra la percezione del colore e la risoluzione temporale visiva, concentrandosi in particolare sull'analisi della Critical Flicker Frequency (CFF) in funzione del colore e dell'intensità dello stimolo luminoso. I risultati ottenuti forniscono importanti spunti per la comprensione dei meccanismi sottostanti la percezione visiva e offrono potenziali applicazioni in ambito clinico e tecnologico.

L'analisi dei dati raccolti su un campione di 22 partecipanti ha rivelato pattern ricorrenti nella variazione della CFF in relazione ai diversi parametri dello stimolo luminoso. In particolare, è emerso che:

1. La CFF varia in modo significativo con il colore dello stimolo luminoso. Questo risultato conferma l'importanza dei diversi tipi di coni retinici (S, M e L) nella determinazione della risoluzione temporale visiva.
2. L'intensità luminosa ha un impatto sostanziale sulla CFF. All'aumentare della luminosità, si è osservato un iniziale andamento lineare con il logaritmo dell'intensità, seguito da un plateau o un aumento più graduale della CFF per tutti i colori testati. Questo fenomeno potrebbe essere spiegato dalla legge di Ferry-Porter, che stabilisce una relazione logaritmica tra CFF e luminanza dello stimolo.
3. Gli stimoli tricromatici (bianco) hanno generalmente prodotto valori di CFF più elevati rispetto agli stimoli monocromatici o bicromatici. Ciò suggerisce una maggiore sensibilità

temporale del sistema visivo quando tutti e tre i tipi di coni sono stimolati contemporaneamente.

Questi risultati sono in linea con le teorie esistenti sulla visione dei colori e la risoluzione temporale visiva, confermando il ruolo cruciale dei diversi tipi di fotorecettori retinici nella determinazione della nostra capacità di percepire stimoli luminosi intermittenti.

L'andamento non lineare della CFF all'aumentare dell'intensità luminosa, caratterizzato da un plateau o da un aumento più graduale ad alte intensità, potrebbe essere spiegato da diversi fattori fisiologici come la saturazione dei fotorecettori o dei limiti alla velocità di elaborazione degli stimoli visivi ad alte frequenze.

La maggiore sensibilità temporale osservata per gli stimoli tricromatici potrebbe essere dovuta ad un principio di sommazione dei segnali: l'attivazione simultanea di tutti e tre i tipi di coni potrebbe produrre un segnale più robusto e rapidamente elaborabile dal sistema visivo.

Le implicazioni di questi risultati sono molteplici e si estendono a diversi campi. La misurazione della CFF in funzione del colore e dell'intensità luminosa potrebbe diventare uno strumento diagnostico prezioso per rilevare precocemente alterazioni della funzione retinica o del nervo ottico. Variazioni anomale della CFF potrebbero indicare la presenza di patologie come la retinopatia diabetica, il glaucoma o neuropatie ottiche nelle loro fasi iniziali.

I risultati ottenuti da questo studio forniscono nuovi spunti per la comprensione dei meccanismi neurali coinvolti nell'elaborazione visiva temporale e cromatica. Potrebbero guidare future ricerche sull'interazione tra i diversi canali di elaborazione visiva nel cervello.

Inoltre, la conoscenza dettagliata della relazione tra CFF, colore e intensità luminosa potrebbe portare allo sviluppo di display più efficienti e confortevoli per l'occhio umano; nonché alla progettazione di sistemi di illuminazione, in particolare per ambienti che richiedono alta precisione visiva o per ridurre l'affaticamento visivo in condizioni di lavoro prolungato.

Nonostante i risultati promettenti, è importante riconoscere alcune limitazioni dello studio:

1. Dimensione del campione: Un campione più ampio e diversificato potrebbe fornire risultati più generalizzabili.
2. Variabili non controllate: Fattori come la fatica, lo stato di attenzione o piccole variazioni nelle condizioni ambientali potrebbero aver influenzato i risultati.

Per future ricerche in questo campo, si suggerisce di estendere lo studio a una popolazione più ampia e diversificata, includendo partecipanti di ulteriori fasce d'età e background; investigare la relazione tra CFF e specifiche condizioni patologiche, per valutare il potenziale diagnostico di questo approccio.

Potrebbe essere interessante esplorare l'interazione tra CFF e altri parametri visivi, come il contrasto o il campo visivo periferico.

In conclusione, questo studio ha fornito nuove intuizioni sulla complessa relazione tra percezione del colore e risoluzione temporale visiva. I risultati non solo contribuiscono alla nostra comprensione teorica del sistema visivo umano, ma offrono anche potenziali applicazioni pratiche in ambito clinico e tecnologico.

La CFF si conferma come un parametro prezioso per valutare la funzione visiva, e la sua dipendenza dal colore e dall'intensità luminosa apre nuove strade per la ricerca e lo sviluppo in oftalmologia, neuroscienze e tecnologia visiva.

5. BIBLIOGRAFIA

- 1) P. Mazzoldi, M. Nigro, C. Voci (2008).
- 2) Sliney, D H. "What is light? The visible spectrum and beyond." *Eye (London, England)* vol. 30,2 (2016): 222-9.
- 3) Lee, Barry B. "The evolution of concepts of color vision." *Neurociencias* vol. 4,4 (2008): 209-224.
- 4) T. Young (1773-1829).
- 5) Bedoni, Cristiana. "La luce ed il colore: percezione, messaggio e significato - fenomeni della percezione cromatica." (2013).
- 6) M. G. Bucci (1993).
- 7) Werblin, Frank S. and Botond M. Roska. "Parallel Visual Processing: a Tutorial of Retinal Function." *Int. J. Bifurc. Chaos* 14 (2004): 843-852.
- 8) Wells-Gray, E M et al. "Variation in rod and cone density from the fovea to the mid-periphery in healthy human retinas using adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy." *Eye (London, England)* vol. 30,8 (2016): 1135-43.
- 9) Wei, Hui et al. "Design and Implementation of a Primary Visual Cortex Pathway Model Based on Opponent-process Theory." *Proceedings of the 2024 ACM/SIGDA International Symposium on Field Programmable Gate Arrays* (2024).
- 10) Lu, Chenguang. "Explaining Color Evolution, Color Blindness, and Color Recognition by the Decoding Model of Color Vision." *Intelligent Information Processing* (2020).
- 11) "Retinal Ganglion Cell." *Definitions* (2020).

- 12) Sjöstrand, F S. "Structure determines function of the retina, a neural center. 2. The second, third and fourth circuits." *Journal of submicroscopic cytology and pathology* vol. 30,2 (1998): 193-206.
- 13) Beltramello, Laura. "La percezione cromatica e le discromatopsie Colour Perception and its Impairments: Dyschromatopsia." (2018).
- 14) Matthew P. Simunovic, MB BChir, PhD, FRANZCO. Acquired color vision deficiency (2015).
- 15) Avery, Steven W.. "Color Vision Deficiency." *Pointer* (1977).
- 16) A. Rossetti, P. Gheller, Manuale di optometria e contattologia, Seconda edizione, Zanichelli (2003).
- 17) Michael Kalloniatis, Charles Luu "Temporal Resolution".
- 18) Deodato M, Melcher D. Correlations between Visual Temporal Resolution and Individual Alpha Peak Frequency: Evidence that Internal and Measurement Noise Drive Null Findings. *J Cogn Neurosci.* (2024) Apr 1;36(4):590-601.
- 19) Mankowska ND, Marcinkowska AB, Waskow M, Sharma RI, Kot J, Winklewski PJ. Critical Flicker Fusion Frequency: A Narrative Review. *Medicina.* (2021); 57(10):1096.
- 20) Auria Eisen-Enosh, Nairouz Farah, Zvia Burgansky-Eliash, Uri Polat & Yossi Mandel. "Evaluation of Critical Flicker-Fusion Frequency Measurement Methods for the Investigation of Visual Temporal Resolution" (2017).
- 21) A. Rossetti, P. Gheller, Manuale di optometria e contattologia, Seconda edizione, Zanichelli (2003).