

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA**

Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei"  
Corso di Laurea Triennale in Ottica e Optometria

Valutazione sull'efficacia della protezione dalla luce blu, attraverso indagine  
spettroscopica, in 10 tipologie di lenti oftalmiche commerciali

**RELATORE:** Paolo Facchin

**LAURENANDO:** Nikola Rosic  
**MATRICOLA:** 2010015

**ANNO ACCADEMICO** 2022/2023



# INDICE

<b>ABSTRACT</b> .....	3
<b>INTRODUZIONE</b> .....	5
<b>CAPITOLO I – LA LUCE</b> .....	7
1.1 RIFLESSIONE DELLA LUCE .....	7
1.2 RIFRAZIONE DELLA LUCE .....	7
1.3 INTERFERENZA DELLA LUCE .....	8
1.4 DIFFRAZIONE DELLA LUCE .....	9
1.5 LO SPETTRO ELETTRROMAGNETICO .....	9
1.6 LA LUCE BLU .....	10
<b>CAPITOLO II- LA RETINA E I SUOI STRATI</b> .....	13
2.1 ANATOMIA DELLA RETINA .....	13
2.2 VASCOLARIZZAZIONE DELL’EPITELIO PIGMENTATO E DELLA RETINA .....	14
2.3 GLI STRATI DELLA RETINA.....	15
2.4 FOTORECEZIONE .....	17
2.5 LA LUTEINA .....	18
2.6 EFFETTI DELLA LUCE BLU SUGLI OCCHI .....	21
<b>CAPITOLO III – LA SPETTROMETRIA</b> .....	25
3.2 SPETTROSCOPIA .....	25
3.1 TRASMITTANZA.....	25
<b>METODO</b> .....	27
<b>RISULTATI</b> .....	29
TABELLA RIASSUNTIVA.....	41
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	44



## **ABSTRACT**

**SCOPO:** Lo scopo della tesi è quello di analizzare nel dettaglio tramite un'immagine spettrometrica dieci campioni di lenti con trattamenti diversi, cercando di capire qual è la lente più protettiva per l'occhio dalla luce nociva. Per luce nociva si intende la luce "blu-viola" che è la banda dello spettro visibile che contiene più energia, e da ciò deriva il suo nome HEV ("Luce visibile ad alta energia").

**INTRODUZIONE:** Le nuove tecnologie, come ad esempio smartphone e pc, hanno acceso dibattiti che nell'ultimo decennio hanno portato a costanti studi e ricerche per quanto riguarda i danni creati dalla luce blu emanata da questi strumenti retroilluminati. Ho deciso pertanto di analizzare nel modo più preciso possibile la tonaca nervosa dell'occhio, ovvero la sede dove ha inizio la fotorecezione della luce. Ho quindi cercato di segnalare quali sono gli effettivi danni a livello oculare causati dalla luce blu.

**METODO:** Per quanto riguarda la parte introduttiva della tesi mi sono affidato al motore di ricerca scientifico "Pubmed". Utilizzando parole chiave come "Blue Light", "eye effect blue light", "damage of blue light" ho deciso di selezionare un totale di nove articoli pubblicati non prima dell'anno 2020. Per l'analisi spettrometrica invece è stato utilizzato lo spettrofotometro Tokai TL-100.

**RISULTATI:** Ad oggi non esistono studi fatti sull'uomo per cercare di capire i possibili danni creati dalla luce blu. Pertanto, non abbiamo prove certe sui possibili danni a livello retinico. Invece, a livello del cristallino, si è notato che l'assorbimento della luce blu a lungo andare porta gradualmente all'oscuramento e all'ingiallimento del cristallino, portando alla cataratta. L'analisi spettrometrica ha chiaramente portato a risultati diversi in base ai diversi trattamenti delle lenti. Partendo con l'analisi delle lenti bianche, nel complesso la lente che filtra di meno i raggi che fanno parte dell'intervallo di nostro interesse è la lente con il trattamento antiriflesso. Dopodiché abbiamo la lente con il trattamento per la protezione dalla luce blu che è in grado di assorbire totalmente i raggi fino a 400nm. Infine, l'unica lente che assorbe tutti i raggi fino a 410nm circa, è la lente alla lutina. Per quanto riguarda le lenti colorate, sono tutte lenti in grado di proteggere l'occhio dalla luce blu nociva in maniera ottimale. Sicuramente l'immagine spettrometrica migliore viene data dalla lente polarizzata, dalla lente fotocromatica con il trattamento attivo e dalla lente con la tonalità del colore al 95%.

**CONCLUSIONI:** Credo che lo studio, riguardante la luce nociva ed i danni che possa creare, debba essere in continuo aggiornamento. Anche se finora sembrerebbe che non ci siano prove del tutto affidabili sui danni che può creare la luce blu, lo stesso SCHEER ha sollecitato la necessità di monitorare i potenziali rischi per la salute legati all'uso dei dispositivi di nuova generazione. Le nuove tecnologie ci hanno portato ad essere dipendenti, a lavoro e a casa, dall'uso di smartphone e pc. Un passo importante che possiamo fare è sicuramente quello di limitare, o quanto meno ridurre, l'utilizzo di questi dispositivi garantendo meno stress a livello retinico. Dall'altra parte possiamo e dobbiamo

proteggere i nostri occhi tramite, per esempio, l'utilizzo di lenti oftalmiche. Tra le lenti bianche che ho esaminato, la più protettiva sembrerebbe essere la lente alla Lutina. Per quanto riguarda le lenti colorate, le due soluzioni migliori potrebbero essere una lente colorata polarizzata ed una lente con la tonalità del colore al 95%.

## INTRODUZIONE

Con l'avvento delle nuove tecnologie (smartphone, pc, tablet) si sente parlare sempre di più della luce blu e delle conseguenze che crea all'occhio. Ma cos'è effettivamente la luce blu e quali sono gli effettivi problemi che può creare?

È giusto porsi queste domande in quanto trascorriamo, sempre di più, il tempo in ambienti chiusi dove sono presenti lampadine a LED e dove, soprattutto, tendiamo a stare davanti a schermi retroilluminati per svariate ore di fila. Uno studio americano ha dimostrato che circa il 60% della popolazione ha dichiarato di trascorrere più di 5 ore al giorno davanti a dispositivi digitali [1]. L'utilizzo elevato di display riguarda tutte le fasce d'età. [2]

La luce blu è una radiazione elettromagnetica che emette energia di varia portata e intensità. Minore è la lunghezza d'onda e maggiore è l'energia emessa. La luce blu è la banda di energia più alta dello spettro visibile (da 380nm a 500 nm) e può essere suddivisa in due categorie principali: blu-viola e blu-turchese. La porzione blu-viola (da 380nm a 450nm) è anche nota come luce visibile ad alta energia (HEV). La luce blu oltre ad essere prodotta da sorgenti artificiali, è ottenuta anche da fonti naturali. Il sole è il primo produttore di luce blu naturale; le altre fonti naturali sono le fiamme [3].

Sebbene vi sia sempre una crescente preoccupazione che l'esposizione alla luce blu artificiale possa interrompere i modelli di sonno, accelerare l'invecchiamento della retina e causare disturbi maculari, c'è ancora molto dibattito sul fatto che la luce artificiale possa rappresentare un vero e proprio pericolo. Nel 2019 la Commissione internazionale per l'illuminazione (CIE) ha rilasciato una presa di posizione sul pericolo della luce blu. Questa dichiarazione ha concluso che gli attuali limiti di esposizione accettati a livello internazionale non vengono superati in condizioni ragionevolmente prevedibili, anche se, sempre nel 2019, l'Agenzia francese per l'alimentazione ha sollevato preoccupazioni sulla crescente esposizione alla luce blu artificiale. Inoltre, ha raccomandato di limitare l'uso di dispositivi elettronici, soprattutto per i bambini. Nel tentativo di affrontare le preoccupazioni sulla luce blu emessa da un'ampia gamma di dispositivi elettronici, i produttori di alcuni di questi dispositivi offrono la possibilità di diminuire la quantità di luce blu emessa dai loro prodotti. [4][5][6][7][8]

Alcuni studi su sperimentazione animale, sembrerebbero suggerire che l'esposizione alla luce blu può interrompere il sonno e danneggiare la retina. Il danno si verifica perché le lunghezze d'onda blu della luce non sono bloccate dalla cornea, dall'umor acqueo, dal cristallino o dall'umor vitreo. Viene trasmessa direttamente attraverso il mezzo oculare e assorbita dai pigmenti della retina. [6][7][8][9][10][11]

I grandi produttori affermano che i loro prodotti forniscono "protezione contro la dannosa luce blu", riuscendo a filtrare gran parte delle lunghezze d'onda comprese tra 380 e 420nm. [12] Non avendo trovato studi a riguardo che confermano le capacità delle diverse lenti oftalmiche disponibili in commercio, mi è sorto spontaneo chiedermi quanto siano veritiere queste informazioni. Ho deciso

quindi di esaminare dieci lenti oftalmiche con trattamenti diversi tramite l'utilizzo di uno spettrometro ottico. Mi concentrerò nel range compreso tra i 380nm e 420nm cercando di capire qual è, al giorno d'oggi, la soluzione migliore per la protezione dalla luce blu.

Prima di arrivare allo studio delle immagini spettrometriche, andrò a spiegare brevemente le diverse caratteristiche e proprietà della luce. Dopodiché parlerò della retina e di tutti i suoi strati. In particolare mi soffermerò sulla luteina, uno dei pochi carotenoidi che si trova in alta concentrazione nella macula. Grazie alla sua struttura la luteina possiede diverse proprietà che aiutano il mantenimento della funzione retinica e la prevenzione di numerose malattie oculari [13]. Infatti, risulta essere il miglior filtro della luce blu. Il problema della luteina è che non si rigenera e quindi a lungo andare tende a svanire, di conseguenza deve essere ottenuta dalla dieta. Spiegherò quali sono le fonti più ricche di luteina e in che modo viene distribuita nel nostro organismo. Infine, andrò ad indicare quelli che potrebbero essere i danni all'occhio che si creano a causa della luce blu.



## CAPITOLO I – LA LUCE

Attualmente, l'ipotesi che la luce abbia una duplice natura (ovvero onda e corpuscolo) è generalmente accettata. Cercherò, in questo capitolo, di mettere in rilievo le proprietà principali della luce. Partendo dalla riflessione e rifrazione della luce, per poi passare ai concetti di interferenza e diffrazione. Tutto questo per arrivare allo spettro delle onde elettromagnetiche che ci servirà per capire più avanti che cos'è la luce blu.

### 1.1 RIFLESSIONE DELLA LUCE

Quando un raggio di luce passa da un mezzo all'altro, per esempio dall'aria al vetro, sulla superficie di separazione dei due mezzi avvengono i fenomeni della riflessione e della rifrazione.

Facendo incidere il raggio di luce per valori differenti dell'angolo  $i$ , si trova che i raggi riflessi obbediscono alle due leggi della riflessione:

1. Il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale alla superficie giacciono in uno stesso punto
2. L'angolo di incidenza  $i$  è uguale all'angolo di riflessione  $r$ .

### 1.2 RIFRAZIONE DELLA LUCE

Oltre ad essere riflesso, un raggio di luce può essere rifratto, ovvero subisce una variazione della traiettoria originale. Va sottolineato che la riflessione e la rifrazione avvengono entrambe quando la luce incide sulla superficie di separazione tra due mezzi. Quindi parte della superficie viene riflessa e parte viene rifratta. [14]

Esistono due possibili scenari:

Se  $n_1 > n_2$ , ovvero se il raggio d'incidenza passa da un mezzo meno denso ad uno più denso (come, per esempio, da aria a vetro), allora il raggio rifratto forma un angolo  $r$  sempre minore di  $i$ .

Se, al contrario,  $n_1 < n_2$ , ovvero se il raggio di incidenza passa da un mezzo più denso ad uno meno denso, il raggio rifratto forma un angolo  $r$  sempre maggiore di  $i$ .

La legge di Snell è quella legge che appunto descrive quantitativamente il fenomeno della rifrazione.

Ne segue la formula:

$$n_1 \cdot \sin i = n_2 \cdot \sin r \quad \text{o come} \quad \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}$$

Si deve ad Isaac Newton una prima trattazione delle principali leggi dell'ottica. Lo sforzo compiuto dallo scienziato inglese per spiegare il fenomeno della rifrazione lo portò a concepire la luce come composta da corpuscoli materiali piccolissimi aventi le seguenti proprietà:

- Si propagano in modo rettilineo
- Subiscono la riflessione incidendo su corpi opachi

La teoria corpuscolare di Newton riusciva quindi a spiegare perfettamente i fenomeni della riflessione e della rifrazione ma non era in grado di spiegare in modo soddisfacente alcuni fenomeni di interferenza e diffrazione.

Sarà la teoria ondulatoria della luce, con sostenitore principale Christiaan Huygens, a spiegare questi fenomeni. Alla base della teoria ondulatoria stava il concetto di luce come propagazione di onde elettromagnetiche longitudinali (più avanti si capì che si trattava di una propagazione trasversale). [15]

Un'onda elettromagnetica è generata da oscillazioni di campi elettrici e magnetici accoppiati che si propagano nel vuoto alla velocità di  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  (velocità della luce nel vuoto). Le radiazioni essendo onde sono caratterizzate da una lunghezza d'onda e da una frequenza e poiché queste due sono inversamente proporzionali, tanto minore sarà la lunghezza d'onda, tanto maggiore sarà la frequenza e quindi l'energia. Con la vista riusciamo a percepire lunghezze d'onda comprese tra i 400 e i 700 nanometri (nm) a cui diamo il nome di luce visibile. Lunghezze d'onda minori corrispondono ai raggi ultravioletti, ai raggi X ed ai raggi gamma che hanno tutti quindi frequenza superiore alla luce visibile e perciò maggiore energia (analizzeremo più avanti lo spettro elettromagnetico).

### 1.3 INTERFERENZA DELLA LUCE

Parliamo di interferenza quando due o più onde della stessa frequenza si sovrappongono in uno o più punti dello spazio in cui si propagano. Assumiamo per semplicità che le onde sono armoniche (descritte cioè da una funzione sinusoidale) e che la propagazione avviene nella stessa fase. L'onda risultante è data da: [16]

$$E_y = 2E \cos \frac{\delta}{2} \sin \left[ \frac{2\pi}{T} \left( t - \frac{x_1 + x_2}{2v} \right) + \frac{\varphi}{2} \right].$$

Dove:

- $E_y$  è il campo elettrico oscillante
- $E$  l'ampiezza dell'onda
- $T$  è il periodo delle oscillazioni
- $\varphi$  È la differenza di fase tra le due onde

L'interferenza viene detta costruttiva quando l'onda risultante è data dalla sovrapposizione di due onde elettromagnetiche che si propagano nella stessa direzione.

L'interferenza, invece, viene detta distruttiva quando le due onde sovrapposte sono in opposizione di fase.

#### 1.4 DIFFRAZIONE DELLA LUCE

Il fenomeno della diffrazione è, come quello dell'interferenza, una caratteristica tipica della propagazione delle onde. Consiste nella propagazione non rettilinea del fronte d'onda quando incontra nel suo cammino fori, fenditure o in genere ostacoli, le cui dimensioni siano confrontabili con la sua lunghezza d'onda.

La diffrazione è la capacità tipica delle onde (e non dei corpuscoli) di propagarsi dietro ostacoli e fenditure di dimensioni comparabili o minori di quelle della lunghezza d'onda.

Dopo che la luce ha attraversato una fenditura, ogni punto della fenditura si comporta come se fosse a sua volta una sorgente di onde circolari e queste onde interagiscono tra loro mediante il fenomeno dell'interferenza.

#### 1.5 LO SPETTRO ELETTROMAGNETICO

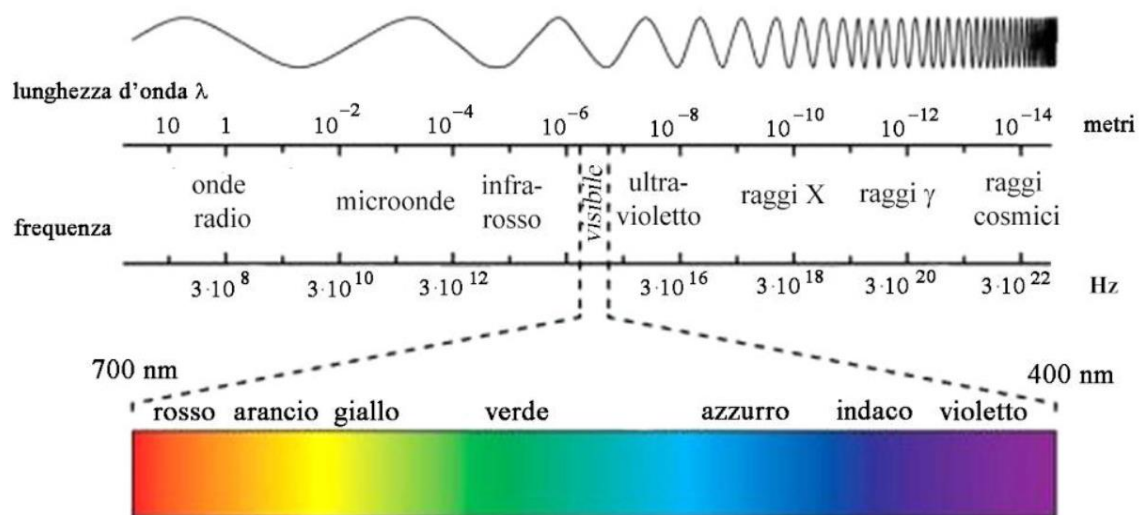
Lo spettro elettromagnetico è l'insieme di tutte le lunghezze d'onda e frequenze delle radiazioni elettromagnetiche

Le principali onde nello spettro elettromagnetico sono le seguenti:

- Onde radio. Le onde radio hanno una lunghezza d'onda compresa tra 10 chilometri e 10 centimetri. Sono usate nelle telecomunicazioni. La sorgente è solitamente un'antenna.
- Microonde. Le microonde hanno una lunghezza d'onda compresa tra 10 cm e 1 millimetro. Le microonde sono utilizzate per le comunicazioni verso i satelliti in orbita. Sono anche usate nei sistemi di rilevamento radar e nei forni a microonde.
- Infrarosso. Le radiazioni infrarosse hanno una lunghezza d'onda compresa dai millimetri ai micron. Sono generate dai corpi caldi.
- Luce visibile. La luce visibile ha una lunghezza d'onda compresa tra circa 380 e 790 nanometri. Chiamata appunto luce visibile perché è sensibile per l'occhio. Quindi noi riusciamo a vedere solo le onde comprese tra questo range. Ogni frequenza costituisce, per l'occhio umano, un diverso colore.

Fu Newton a dimostrare la scomposizione dei sette colori dello spettro visibile. Infatti, fece passare un raggio di luce attraverso un cristallo a forma di prisma. In questo modo poté osservare che la luce si scomponesse nei sette colori dell'arcobaleno o (dal rosso, che è il colore che viene deviato di meno, al violetto, che è quello che viene deviato di più, passando per i colori arancione-giallo-verdeazzurro-indaco).

- Ultravioletto. Le radiazioni ultraviolette hanno una lunghezza d'onda compresa tra 400 e 10 nanometri. Queste radiazioni elettromagnetiche influiscono sulle reazioni chimiche degli organismi viventi.
- Raggi X. I raggi X hanno una lunghezza d'onda inferiore a 1 nanometro.
- Raggi Gamma I raggi gamma hanno una lunghezza d'onda inferiore a un picometro. [17]



## 1.6 LA LUCE BLU

La luce blu è una radiazione elettromagnetica che emette energia di varia portata e intensità. Minore è la lunghezza d'onda e maggiore è l'energia emessa. La luce blu è la banda di energia più alta dello spettro visibile (da 380nm a 500 nm) e può essere suddivisa in due categorie principali: blu-turchese e blu-viola, che va dai 380 nm ai 450nm. Quest'ultima è anche nota come luce visibile ad alta energia (HEV). [4] Il sole è il produttore principale di luce blu naturale; le altre fonti artificiali sono tutti i dispositivi di ultima generazione con schermi retroilluminati, accompagnati dalle lampadine LED [4][5]. La luce blu è prodotta anche da sorgenti artificiali, la principale sono le lampadine a LED. Negli anni '90 i LED si producevano solo in rosso o verde e venivano utilizzati come indicatori luminosi in apparecchiature elettroniche come telecomandi o sveglie. Con l'invenzione della luce LED blu è stato possibile creare una luce bianca abbastanza intensa da poterla utilizzare nell'illuminazione. Da allora le nuove tecnologie sono tutte alla base della luce LED blu, come ad esempio: illuminazione domestica e

pubblica, fari di veicoli).[6] Nel 2019 è stato stimato che quasi il 50% di tutte le sorgenti luminose artificiali nel mondo fossero LED. Le previsioni per il 2030 sono che questo dato arriverà all'87%. La luce blu, inoltre, è utilizzata anche in una vasta gamma di dispositivi per schermi digitali (pc, smartphone, tablet, televisori).[18][19]



## CAPITOLO II- LA RETINA E I SUOI STRATI

### 2.1 ANATOMIA DELLA RETINA

La retina è la più interna delle tre tuniche (chiamata tonaca nervosa) che costituiscono la parete del bulbo oculare (le altre due sono la tonaca fibrosa e la tonaca vascolare). Il compito principale della retina è quello di, una volta ricevuti gli stimoli luminosi, trasformarli in segnali nervosi e alla trasmissione degli stessi alle strutture cerebrali. Viene suddivisa in due foglietti:

- L'epitelio pigmentato (foglietto esterno)
- La retina sensoriale (foglietto interno)

### EPITELIO PIGMENTATO

Embriologicamente deriva dallo strato ectodermico esterno della vescicola ottica. Si estende dal margine della papilla ottica fino all'ora serrata dove si continua con l'epitelio pigmentato della pars plana.

È formato da un unico strato di cellule di forma poliedrica. La porzione esterna delle cellule è adiacente alla membrana di Bruch, mentre quella interna è a diretto contatto con gli articoli esterni dei fotorecettori (coni e bastoncelli). Tra la zona apicale delle cellule e gli articoli dei fotorecettori è presente in abbondanza una sostanza mucopolissaccaridica che appunto contribuisce all'adesione tra il foglietto esterno e quello interno. Queste cellule sono unite tra loro da complessi giunzionali di tipo zonula adherens (che garantiscono una forte adesione tra le cellule) e zonula occludens (che permettono una strettissima adesione tra le membrane di cellule vicine).

Questa particolare struttura di giunzione impedisce il passaggio di macromolecole come ioni e acqua dalla coroide verso la retina; proprio per questo motivo l'epitelio pigmentato viene anche chiamato "barriera emato-retinica esterna".

Inoltre, svolge un ruolo attivo nel mantenimento dell'adesione retinica attraverso un meccanismo osmotico di pompa.

L'epitelio pigmentato svolge anche numerose funzioni nel processo della visione. Le sue cellule, infatti sono costituite da un pigmento di colore scuro detto fuscina. Questi elementi hanno quindi il compito di assorbire la luce, impedendone la diffusione. Da qui inizia il ciclo della fotoricezione.

## RETINA SENSORIALE

La retina è una membrana sottile e trasparente che si estende dal nervo ottico fino all'ora serrata dove si continua nell'epitelio ciliare. Assume maggior spessore nella zona maculare (0.23mm) per poi assottigliarsi in periferia (0.14mm). La presenza dei fotorecettori, oltre che ad un'importante concentrazione di melanina, granuli di lipofuscina e di pigmento xantofillico, è la spiegazione del perché la retina è più spessorata a livello della macula.

La retina sensoriale presenta aderenze tenaci a livello del nervo ottico e dell'ora serrata; invece, nelle altre regioni questa adesione tra retina ed epitelio pigmentato è più tenue.

Nella retina vengono differenziate fibre nervose a decorso verticale e fibre nervose a decorso orizzontale. Le prima sono deputate alla trasmissione dell'impulso luminoso ai centri visivi corticali. Le fibre orizzontali hanno invece il ruolo connettere e assimilare le informazioni neurosensoriali tra i diversi strati retinici.

La retina è costituita da nove strati che dall'esterno all'interno sono: strato dei coni e dei bastoncelli, membrana limitante esterna, strato nucleare esterno, strato plessiforme esterno, strato nucleare interno, strato plessiforme interno, strato delle cellule gangliari, strato delle fibre nervose e membrana limitante interna.

Cercherò, in questo capitolo, di spiegare nel dettaglio i diversi strati della retina e della macula. Mi focalizzerò anche sul pigmento xantofillico (il principale è la luteina) il quale appunto si concentra nella macula, andando a spiegare la sua composizione e quelle che sono le sue funzioni principali. Prima però farò un accenno sulla vascolarizzazione della tonaca nervosa.

### 2.2 VASCOLARIZZAZIONE DELL'EPITELIO PIGMENTATO E DELLA RETINA

La tonaca nervosa è irrorata da un duplice sistema vascolare: retinico e ciliare.

L'epitelio pigmentato e i primi tre strati della retina sono irrorati dalla circolazione coroideale. Le cellule dell'epitelio pigmentato, come già sottolineato in precedenza, sono strettamente connesse tra di loro e questo non permette il passaggio di liquidi e molecole. Di conseguenza la nutrizione dei tre strati retinici più esterni è garantita da un processo di trasporto attivo da parte delle cellule del foglietto esterno. Gli strati che vanno invece dallo strato plessiforme esterno alla membrana limitante interna sono nutriti dalla circolazione retinica che prende origine dall'arteria centrale della retina.

A livello retinico sono presenti due reti capillari, una è localizzata a livello dello strato delle fibre nervose e l'altra a livello dello strato plessiforme esterno. In sede maculare, tranne che nella parte



centrale della fovea che è avascolare, sono presenti tre tre reti capillari. Nella periferia retinica, infine, è presente un unico strato di capillari.

## 2.3 GLI STRATI DELLA RETINA

### STRATO DEI CONI E DEI BASTONCELLI

I coni ed i bastoncelli, i due fotorecettori della retina, sono gli elementi nervosi deputati alla trasformazione dello stimolo luminoso in un impulso elettrico.

Sono presenti circa 7 milioni di coni con una concentrazione massima nella fovea. Essi sono deputati alla visione centrale e dei colori.

I bastoncelli sono circa 120 milioni e raggiungono la maggior densità a 20 gradi dalla fovea. Sono specializzati nella visione periferica e a bassa luminanza.

Entrambi i fotorecettori sono formati da un elemento recettoriale. Questo è suddiviso in un articolo esterno e uno interno, oltre che ad una fibra che presenta il nucleo centrale lungo il suo decorso.

La differenza tra i due recettori sta appunto nella loro forma. I bastoncelli hanno un articolo esterno di forma cilindrica costituito da dischi lamellari lipoproteici sovrapposti uno sull'altro e circondati da una membrana cellulare. L'articolo interno è invece costituito dall'ellissoide, contenente un gran numero di mitocondri che compete nella respirazione dei fotorecettori, e dal mioide che contiene glicogeno e organuli citoplasmatici caratterizzati dal fatto che si contraggono sotto l'azione luminosa.

L'articolo esterno ed interno dei coni è pressoché uguali a quelli dei bastoncelli, con la differenza che i dischi lamellari sono di dimensioni minori. La forma dei coni è diversa secondo la loro localizzazione; sono infatti corti e tozzi con una forma conica in periferia, mentre a livello foveale sono molto sottili e allungati.

Per quanto riguarda il nucleo dei fotorecettori, nei bastoncelli appare come un rigonfiamento a livello della fibra nervosa ed è collegato con i dendriti delle cellule bipolari e degli assoni delle cellule orizzontali. Nei coni, il nucleo è a ridosso del segmento esterno e la fibra nervosa termina con una ramificazione che entra anch'esso in contatto con i dendriti delle cellule bipolari e delle cellule orizzontali.

### MEMBRANA LIMITANTE ESTERNA

Si trova all'esterno dei nuclei dei fotorecettori a livello della base dell'articolo interno. A dire il vero non è una vera e propria membrana basale ma è costituita da una serie di aderenze tra le membrane plasmatiche dei fotorecettori e delle cellule di Muller.

## STRATO NUCLEARE ESTERNO

Questo strato è composto dai nuclei dei fotorecettori. I nuclei dei coni sono a ridosso del segmento esterno e la loro fibra nervosa termina con una ramificazione che entra in contatto con i dendriti delle cellule bipolari e delle cellule orizzontali. Essi generalmente sono disposti in un unico strato e presentano dimensioni maggiori ai nuclei dei bastoncelli. Quest'ultimi appaiono come un rigonfiamento a livello della fibra nervosa che è collegata con i dendriti delle cellule bipolari e degli assoni delle cellule orizzontali. Sono disposti in più strati e sono distribuiti dalla regione parafoveale fino all'estrema periferia.

## STRATO PLESSIFORME ESTERNO

Lo strato plessiforme esterno è costituito dalle sinapsi tra i fotorecettori ed i dendriti delle cellule bipolari e orizzontali. Le fibre dei fotorecettori terminano con un'espansione denominata rispettivamente sferula per i bastoncelli e peduncolo per i coni. Tipicamente un solo cono prende contatto con una sola cellula bipolare (rapporto 1 a 1), mentre più bastoncelli si uniscono con una sola cellula bipolare.

## STRATO NUCLEARE INTERNO

Lo strato nucleare interno contiene i corpi cellulari di diversi tipi di cellule:

- Cellule bipolari, le più numerose. Sono considerate il primo neurone afferente delle vie ottiche e sono deputate a condurre lo stimolo visivo dai fotorecettori alle cellule gangliari
- Cellule orizzontali, situate nella porzione più esterna dello strato nucleare interno. I loro dendriti contraggono rapporti con le sferule e con i peduncoli. Svolgono una funzione associativa in quanto creano numerose interconnessioni orizzontali tra i fotorecettori e le cellule bipolari.
- Cellule amacrine, situate nella parte più interna dello strato nucleare interno. Svolge una funzione associativa tra i fotorecettori e le cellule bipolari
- Cellule di Muller, i quali processi citoplasmatici attraversano tutti gli strati retinici e contribuiscono alla formazione della membrana limitante esterna

## STRATO PLESSIFORME INTERNO

Contiene le sinapsi tra le cellule bipolari e le cellule gangliari oltre che alle terminazioni delle cellule amacrine. Quest'ultime hanno una funzione associativa tra le cellule bipolari e le cellule gangliari che decorrono parallelamente alla superficie retinica andando a creare il nervo ottico

## STRATO DELLE CELLULE GANGLIARI

Formato appunto dai corpi cellulari delle cellule gangliari

## STRATO DELLE FIBRE NERVOSE

Questo strato è costituito dagli assoni delle cellule gangliari che si preparano a sfociare nel nervo ottico

## MEMBRANA LIMITANTE INTERNA

La membrana limitante interna è costituita dalla dilatazione terminale dei processi citoplasmatici delle cellule di Muller. A questo livello vi sono rapporti con la ialoide del corpo vitreo.

## 2.4 FOTORECEZIONE

Lo stimolo luminoso viene trasformato a livello dei fotorecettori in stimolo nervoso. Viene quindi trasmesso attraverso le fibre del nervo ottico fino al corpo genicolato laterale. Ma vediamo più nel dettaglio i singoli passaggi.

La conversione della luce in impulso elettrico avviene grazie alla degradazione dei bastoncelli e dei coni. I bastoncelli contengono la rodopsina che è costituita da una glicoproteina, l'opsina, e dall'aldeide della vitamina A, il retinale. La vitamina A è un costituente essenziale dei pigmenti visivi. Viene assorbita nell'intestino sotto forma di retinolo (alcol della vitamina A) ed immagazzinato nel fegato. Il trasporto ematico avviene per mezzo di una proteina legante il retinolo. Recettori specifici a livello delle cellule dell'epitelio pigmentato si legano con la proteina legante il retinolo e permettono il trasporto della vitamina A attraverso il citoplasma cellulare fino agli articoli esterni dei fotorecettori. L'aldeide della vitamina A, quando è legata all'opsina si trova nella forma isomerica 11 cis. Se un fotone incidente colpisce la rodopsina si ha la trasformazione dell'isomero 11 cis in trans. Ciò causa un grande rilascio di energia che porta alla modificazione della permeabilità della membrana cellulare. Si assiste

al passaggio di ioni sodio all'interno ed alla eliminazione di ioni potassio all'esterno (depolarizzazione). Inizia così un flusso di cariche elettriche (chiamato potenziale d'azione) che raggiungono le cellule bipolari, quindi le cellule gangliari, e attraverso il nervo ottico e i tratti ottici, il corpo genicolato laterale. Il massimo assorbimento della rodopsina si ha per le bande luminose con lunghezza d'onda di circa 500 nanometri. La luce di questa lunghezza d'onda (colore verde scuro) è quella che degrada maggiormente i pigmenti dei bastoncelli ed a cui l'occhio è più sensibile in condizioni di bassa luminanza (visione scotopica). I pigmenti dei coni sono di tre tipi diversi ed hanno il massimo di assorbimento a 470, 540 e 570 nm. Sono denominati rispettivamente pigmento cianolabile, clorolabile ed eritrolabile.

## 2.5 LA LUTEINA

Sebbene, ad oggi, ci siano circa 850 tipi di carotenoidi in natura, pochissimi di essi sono presenti nei tessuti umani. Tra questi, la luteina e i suoi stereoisomeri zeaxantina e meso zeaxantina, che fanno parte della categoria chiamata xantofilla, sono gli unici carotenoidi presenti nella retina umana. [21][22]

I carotenoidi non vengono prodotti nell'uomo, ma sono per lo più sintetizzati nelle piante e nei microrganismi. Di conseguenza, la luteina deve essere ottenuta dalla dieta. Le verdure verdi come cavolo, spinaci, broccoli, piselli e lattuga, oltre che al tuorlo d'uovo, sono le fonti più preziose di xantofille. Nella tabella sottostante ho inserito gli alimenti che contengono il maggior numero di luteina per grammo di peso fresco. [23][24]

<b>Prodotti alimentari</b>	<b>Luteina (µg/g di peso fresco)</b>
Basilico	70,5
Cavolo	48,0-114,7
Porro	36,8
Prezzemolo	64,0-106,5
Tuorlo d'uovo	3,8-13,2
Mais	21,9
Farro	7,4

Prima di esercitare i loro effetti nutrizionali, i carotenoidi devono prima essere assorbiti e trasportati nel circolo. Bisogna dire che i carotenoidi sono idrofobici, il che vuol dire che non sono solubili nel mezzo acquoso ma, bensì nei grassi del sistema digestivo umano.

La biodisponibilità nel tessuto oculare della luteina e dei suoi stereoisomeri dipende da molteplici fattori, tra i quali:

- La natura della matrice alimentare
- La quantità in grammi degli alimenti assunti
- La natura dei grassi negli alimenti assunti

Rispetto agli alimenti a base vegetale, per esempio, è stato osservato che i tuorli d'uovo sono considerati una migliore fonte di luteina perché l'alto contenuto di grassi delle uova aumenta la biodisponibilità dei carotenoidi. Infatti, diete ricche di grassi generalmente facilitano l'assorbimento dei carotenoidi alimentari. [25][26]

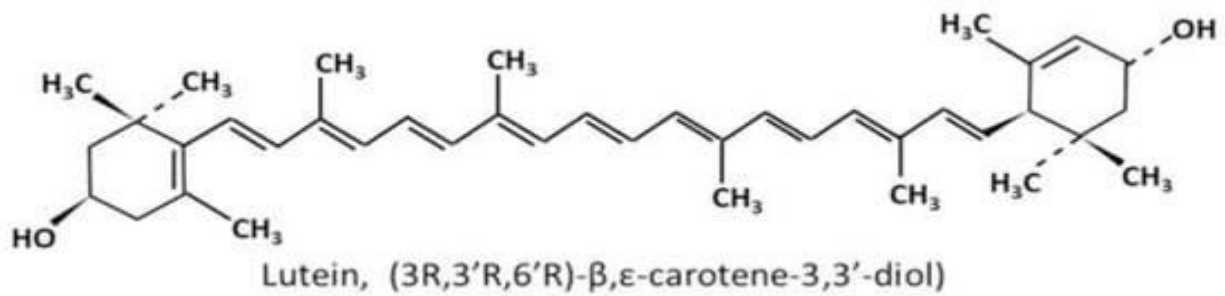
Dopo il consumo, i carotenoidi alimentari vengono dispersi nel succo gastrico e incorporati in goccioline lipidiche, che successivamente vengono distribuiti in micelle miste contenenti sali biliari, fosfolipidi biliari e lipidi. A questo punto i carotenoidi disciolti entrano nel flusso sanguigno per il loro trasporto. Una caratteristica importante della luteina è che può essere trattenuta nella retina umana per un lungo periodo di tempo. [27]

Per quanto riguarda la distribuzione, nello specifico della luteina, non è uniforme tra i diversi tessuti del corpo. Presenta la sua massima quantità a livello della macula periferica. La zeaxantina invece è massima nella media periferia e la meso-zeaxantina nell'epicentro (della macula). [28]

La luteina si trova anche a livello del cristallino, proteggendolo dalle malattie degli occhi legate all'età come la cataratta. Inoltre, recenti studi, hanno sottolineato la presenza della luteina anche nel tessuto adiposo, portando ad una riduzione di luteina nella retina nelle persone obese (che sono più predisposte a varie malattie degli occhi). [29] [30]

La struttura della luteina è stata studiata in dettaglio di recente. [31] Essendo un carotenoide ha uno scheletro di 40 atomi di carbonio formati da due precursori di 20 atomi di carbonio, geranilgeranil pirofosfato (GGPP), che si uniscono testa a testa.

Il lungo scheletro di carbonio porta doppi legami coniugati con alternative lineari e cicliche, che consentono diversità strutturali, cioè configurazione *cis* o *trans*. I carotenoidi costituiti da almeno un atomo di ossigeno nella loro catena polienica sono raggruppati come xantofilla. La luteina, come già ripetuto, appartiene a quest'ultimo sottogruppo, con due gruppi idrossilici attaccati agli anelli iononici terminali su entrambi i lati.



Grazie a questa sua struttura, la luteina possiede diverse proprietà che aiutano il mantenimento della funzione retinica e la prevenzione di numerose malattie oculari. I due gruppi ossidrilici la rendono idrofila permettendo di reagire meglio con l'ossigeno e di agire come antiossidante eliminando le specie reattive dell'ossigeno. [32] A causa, invece, dell'orientamento della membrana lisosomiale risulta essere il miglior filtro della luce blu con la massima efficacia rispetto agli altri due carotenoidi.[33]

I nostri occhi sono, sempre di più, esposti alla luce blu potenzialmente tossica che quindi può indurre stress ossidativo agli occhi, con conseguente aumento del rischio di malattie maculari e cataratta.[34] Dato che la lunghezza d'onda di picco dell'assorbimento della luteina è di circa 460nm (che rientra nel range della luce blu), essa può ridurre efficacemente il danno indotto dalla luce assorbendo da 40% a 90% della luce blu a seconda della sua concentrazione. [35] Siccome la luteina ha la massima concentrazione a livello della fovea, dove tra l'altro c'è anche la maggior densità di fotorecettori, quest'ultimi sono protetti dai danni foto-ossidativi della luce blu. [36]

Studi in vitro hanno indicato che la luteina possiede anche proprietà antiinfiammatorie; di fatti può inibire molecole pro-infiammatorie come la cicloossigenasi-2 (COX-2), la sintetasi inducibile dell'ossido nitrico (iNOS) ed il fattore di trascrizione nucleare presente in tutte le cellule (NF-kB). [37]

Ci sono anche prove che dimostrano che la luteina ha altre capacità. Tra queste la capacità di migliorare l'acuità visiva e la sensibilità al contrasto [38], così come il suo effetto neuroprotettivo nel ridurre la perdita cellulare e l'apoptosi cellulare dopo un danno a livello retinico. [39]

Tuttavia, vale la pena notare che sebbene i risultati promettenti di una serie di studi in vitro e su animali indichino molteplici benefici della luteina nella salute della retina, resta da stabilire la prova relativa alla capacità della luteina di svolgere queste funzioni nell'uomo.

## 2.6 EFFETTI DELLA LUCE BLU SUGLI OCCHI

L'intero spettro della luce visibile, che sia di natura naturale o artificiale, viene ricevuto dall'occhio e assorbito o trasmesso dai tessuti oculari (cornea, cristallino, umor acqueo, umor vitreo) prima di raggiungere la retina. Come già detto in precedenza, la luce che attraversa questi tessuti e che si focalizzano sulla retina va ad attivare le proteine fotosensibili (rodopsina nei bastoncelli, opsina nei coni) dando inizio alla fototrasduzione e all'attivazione di un impulso nervoso che raggiungerà il cervello per costruire un'immagine.

La superficie esterna oculare è la prima barriera contro l'energia irradiata ed è vulnerabile al rischio luminoso, che può potenzialmente danneggiare la superficie oculare e intensificare i sintomi dell'occhio secco [40]. Quasi tutta l'energia radiante sotto i 295 nm (tutti gli UVC e la maggior parte degli UVB) viene assorbita dalla cornea.

Le lunghezze d'onda corte degli UVB (295–315 nm), tutte le lunghezze d'onda degli UVA (315–390 nm) e una parte delle lunghezze d'onda del vicino infrarosso vengono assorbite dal cristallino. Con l'età, l'assorbimento della luce blu da parte del cristallino cambia, con lunghezze d'onda più corte nelle regioni blu e viola dello spettro visibile maggiormente colpite [41][42]. L'esposizione ai raggi UV a lungo termine è un fattore di rischio riconosciuto per la cataratta [43]. La luce blu può indurre anche danni fotodinamici nelle lenti che invecchiano. L'assorbimento della luce blu nel cristallino è prodotto dalle proteine strutturali, dai metaboliti proteici e dagli enzimi che assorbono i pigmenti gialli che producono luce blu, in particolare attraverso la produzione di specie reattive dell'ossigeno (ROS) nei mitocondri delle cellule epiteliali del cristallino. Ciò porta gradualmente all'oscuramento e all'ingiallimento del cristallino, portando alla cataratta. [44]

La luce blu svolge, tra gli altri, un importante ruolo per la regolazione e la sincronizzazione delle nostre funzioni biologiche, come ad esempio il ritmo cardiaco.

La luce blu-turchese (450–500 nm) è cruciale per sincronizzare il nostro ritmo circadiano ed essenziale per mantenere una buona salute e benessere. La mancanza di luce blu o un'esposizione inappropriata alla luce blu provoca la desincronizzazione del ritmo circadiano e quindi può portare a disturbi del sonno e della vigilanza, disturbi affettivi stagionali, nonché alterazioni della memoria e delle prestazioni cognitive.[45]

L'esposizione a lungo termine alla luce blu può alterare la superficie oculare attraverso tre meccanismi principali: [46][47][48]

- Danno da stress ossidativo
- Infiammazione della superficie oculare
- Apoptosi cellulare

Le lunghezze d'onda che raggiungono la retina sono limitate dalla parte visibile dello spettro elettromagnetico (380-780 nm) e a una parte delle lunghezze d'onda del vicino infrarosso (780-1400 nm). Tre meccanismi sono coinvolti nel danno indotto dalla luce sulla retina: danno fotomeccanico, danno fototermico e danno fotochimico. A causa della sua elevata energia, la luce blu induce ad accelerare le reazioni fotochimiche e il danno cellulare attraverso la produzione di specie reattive dell'ossigeno (ROS), contribuendo alla perdita dei fotorecettori, alla perossidazione lipidica e all'apoptosi cellulare.

Esistono due tipi di danno a livello retinico dovuto alla fototossicità a seconda della dose totale ricevuta, della durata e del tipo di cellule colpite.[49]

- I primi tipi di danno sono dovuti a lunghi periodi di esposizione (si intende giorni o settimane) con bassa irradiazione. Il danno è a livello dei fotorecettori [50]
- I secondi tipi di danno sono dovuti a breve esposizione (minuti o ore) con intensità di luce elevata. Il danno è a livello dell'epitelio pigmentato retinico [51]

Un elevato numero di studi su animali o su cellule retiniche umane ha riportato un grave danno fotochimico della retina indotto da un'eccessiva esposizione alla luce blu con lunghezza d'onda compresa tra 400 e 500 nm. Infatti, una lunghezza d'onda della luce blu nello spettro blu-viola con esposizione di lunga durata produce ROS nella retina, che reagiscono con componenti del DNA o con le membrane cellulari, portando a disfunzione cellulare o apoptosi cellulare.

In pratica, nei bastoncelli, l'assorbimento di un fotone da parte della rodopsina induce l'isomerizzazione e il rilascio di 11- *cis* -retinale a tutto trans-retinico. Il tutto trans retinico libero non è solo tossico come aldeide reattiva, ma mostra anche un'elevata sensibilità alla luce blu. [52] In condizioni di esposizione alla luce moderata, il tutto trans-retinico viene continuamente riciclato in 11- *cis*-retinico dalle cellule RPE e non è pericoloso per le cellule. Quando l'esposizione alla luce è più lunga o più intensa, si accumula tutto il trans retinico e la sua attivazione da parte della luce blu può causare stress ossidativo che danneggia i componenti cellulari del segmento esterno dei fotorecettori. Questo stress ossidativo è solitamente neutralizzato dalla presenza di vari antiossidanti nella retina. Tuttavia, con l'età e con alcuni fattori genetici e ambientali (come il fumo o una dieta povera di antiossidanti), le difese antiossidanti si riducono e non sono più in grado di contrastare lo stress indotto da un'esposizione prolungata o intensa alla luce blu [53].



Tuttavia, risulta complicato valutare gli effetti che si creano a lungo termine dall'esposizione alla luce blu, principalmente a causa delle difficoltà di misurare con accuratezza tale esposizione.

Per valutare meglio la sensibilità della retina a lunghezze d'onda precise, è stata eseguita una ricerca sulle cellule dell'epitelio pigmentato retinico negli occhi di maiale. [54][55] Hanno riferito che le lunghezze d'onda più dannose erano circa comprese nell'intervallo compreso fra i 390nm (fine UV-A) ed i 455 nm (lunghezze d'onda blu-viola) [54]

I coni sono molto probabilmente l'obiettivo principale della degenerazione maculare legata all'età (AMD) indotta dalla luce. Questo studio rafforza l'importanza di un filtraggio della luce blu-viola molto preciso per prevenire patologie coniche come appunto l'AMD. Tuttavia, in questi studi, le cellule sono state esposte alla luce blu-viola per 15-18 ore consecutive alla volta. Pertanto, l'esposizione intermittente a queste luci intense non dovrebbe indurre tossicità, ma l'accumulo di questa esposizione potrebbe innescare questi processi neurodegenerativi.

Gli esseri umani sono attualmente sovraesposti alla luce artificiale ricca di blu come i LED, specialmente di notte. Studi in vitro e su animali hanno mostrato un aumento della mortalità dei fotorecettori in seguito all'esposizione a LED bianchi disponibili in commercio. [56][57] Questi studi dimostrano che la componente blu dei LED bianchi provoca tossicità retinica con la normale illuminazione domestica, non solo in condizioni sperimentali estreme. Tuttavia, questi studi sono stati condotti a breve termine (fino a 1 mese). Inoltre, la sperimentazione sugli animali è impegnativa. La maggior parte di questi esperimenti non è completamente in grado di prevedere ciò che accade agli occhi delle persone viventi. I risultati degli esperimenti sugli animali sono difficili da estrapolare alla retina umana, soprattutto nei topi e nei ratti, perché questi animali sono privi di macula e quindi non possono imitare le caratteristiche della retina umana. [58]

Per prevenire danni fotochimici alla retina indotti alla luce l'ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) ha proposto dei valori limite di esposizione. In relazione al tempo massimo accettabile di esposizione ininterrotta dell'occhio alla luce, sono stati classificati in quattro gruppi di rischio le sorgenti di radiazione ottiche: [59]

- GR0, gruppo di rischio 0: nessun rischio al di sotto di un tempo di osservazione di 10000 secondi ad una distanza di 20 cm
- GR1, gruppo di rischio 1 (rischio basso): tempo massimo di esposizione di 100 secondi ad una distanza di 20 cm
- GR2, gruppo di rischio 2 (rischio moderato): tempo massimo di esposizione di 0.25 secondi ad una distanza di 20 cm
- GR3, gruppo di rischio 3 (rischio elevato): potenziali lesioni che compaiono durante l'osservazione per una durata inferiore a 0,25 secondi ad una distanza di 20 cm

Le sorgenti di luce artificiale commercializzate devono rispondere a determinati requisiti. Uno di questi è la valutazione del potenziale rischio per la retina. Pertanto, quando le aziende introducono lampade o nuovi apparecchi di illuminazione, sono tenuti a valutare i loro prodotti secondo le norme in vigore e a classificarli in uno dei quattro gruppi sopracitati. Nel caso delle lampadine a LED, esse possono far parte o del gruppo 0 o del gruppo 1. Quindi, per quanto riguarda i LED, l'INCNIRP ha dichiarato che non ci sono prove di rischio in normali condizioni d'uso. È la dose che sarebbe pericolosa. Il tempo consecutivo trascorso davanti agli schermi sarebbe il principale fattore determinante.

Inoltre, lo SCHEER (Comitato Scientifico per la Salute, l'Ambiente e i Rischi Emergenti) ha sottolineato che “la luce blu emessa dai LED può avere un effetto significativo sull'orologio biologico, che regola molte delle funzioni del nostro corpo come l'appetito, la vigilanza e la temperatura corporea”. Dichiarando anche che “non ci sono prove di effettivi danni negativi diretti sulla salute derivanti dall'emissione di LED durante il normale utilizzo da parte della popolazione sana in generale”. Tuttavia, non hanno escluso un potenziale rischio per la popolazione vulnerabile e suscettibile come i bambini, adolescenti e persone più anziane. [60]

Quindi, sebbene la letteratura scientifica non abbia ancora fornito prove del tutto affidabili sui danni effettivi a lungo termine dalle emissioni di LED, LO SCHEER ha sollecitato la necessità di monitorare questi potenziali rischi per la salute legati all'uso a lungo termine.

## CAPITOLO III – LA SPETTROMETRIA

### 3.2 SPETTROSCOPIA

La spettroscopia è la scienza che misura l'intensità della luce a diverse lunghezze d'onda. Le rappresentazioni grafiche di queste misurazioni sono chiamate spettri.

Lo strumento, invece, che permette di misurare lo spettro visibile delle radiazioni elettromagnetiche viene chiamato spettrofotometro. La maggior parte degli spettrofotometri sfrutta il principio dell'interferenza per decomporre la radiazione luminosa nelle sue lunghezze d'onda e misurarne l'intensità con un fotodiode.

### 3.1 TRASMITTANZA

In ottica e in spettroscopia, la trasmittanza è rappresentata dal rapporto percentuale tra l'intensità della luce che attraversa un campione e quella della luce che ne emerge. In altre parole, è la frazione di luce incidente ad una data lunghezza d'onda che attraversa un campione.

Viene espressa dalla formula:

$$T = \frac{I_1}{I_0}$$

Dove  $I_1$  e  $I_0$  sono rispettivamente l'irradianza luminosa incidente ed emergente dal campione attraversato.



## **METODO**

Per quanto riguarda la prima parte compilativa, ho effettuato una ricerca bibliografica nel mese di Luglio del 2023, tramite il motore di ricerca scientifico Pubmed. Ho inserito il filtro per quanto riguarda la data di pubblicazione degli articoli; infatti, non ho considerato articoli pubblicati prima del 2020. Tra le parole chiave ho utilizzato:

- "Blue light" con un totale di 3170 risultati
- "eye effect blue light" con un totale di 90 risultati
- "damage of blue light" con un totale di 184 risultati
- "luteina" con un totale di 395 risultati
- "luteina blue light" con un totale di 17 risultati
- "optic spectrometry" con un totale di 2427 risultati

Ho quindi selezionato 9 articoli che ho ritenuto i più pertinenti per quanto riguarda l'oggetto della tesi.

L'esame spettrometrico invece è stato fatto su 10 lenti oftalmiche in CR39 (quindi con stesso indice di rifrazione, ovvero 1,50, ma con trattamenti diversi) di case produttrici diverse, utilizzando lo spettrofotometro Tokai TL-100. Non citerò i nomi in quanto ci tengo a sottolineare che non ho nessun interesse personale economico o rapporti di proprietà sui prodotti trattati in questa relazione. L'obbiettivo sarà quello di trovare la lente oftalmica che filtra maggiormente la luce visibile ad ampia energia (HEV).

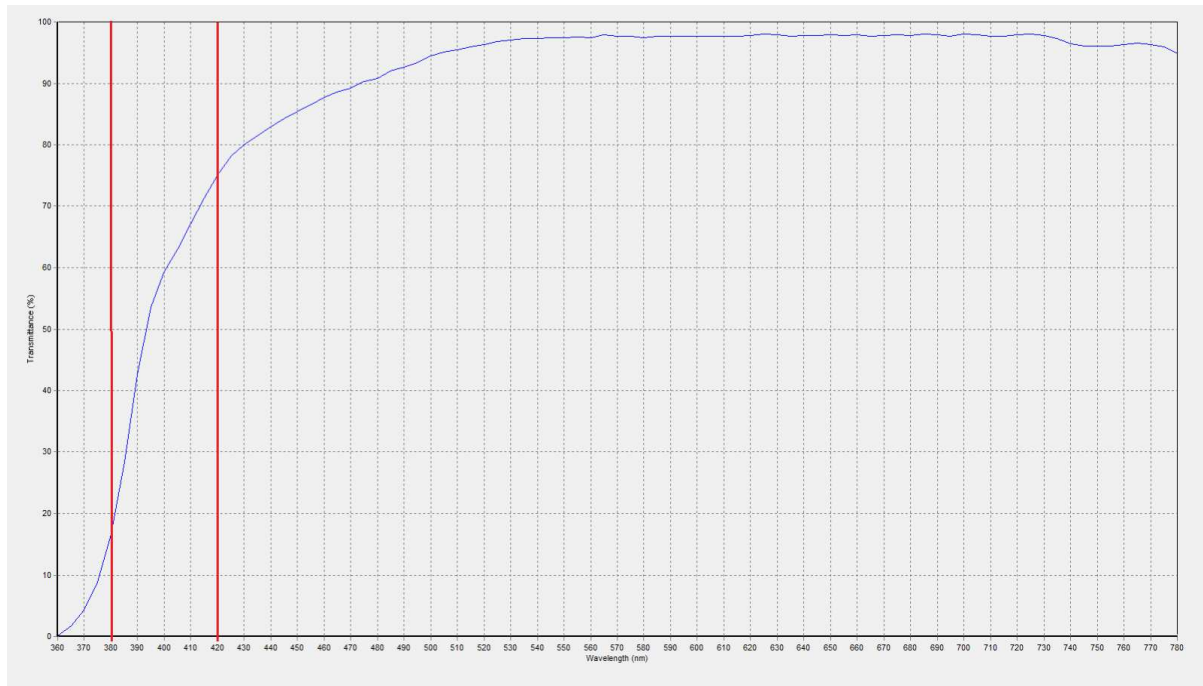
Una volta esaminati i diversi campioni con questo strumento e raccolti tutti i dati necessari allo studio si procederà con l'analisi dei grafici risultanti. Nell'asse delle ordinate sarà presente la lunghezza d'onda espressa in nanometri (nm), mentre nell'asse delle ascisse si troverà la Trasmittanza (T) espressa in percentuale.

Ecco che tramite lo studio approfondito della trasmittanza dei campioni si può effettivamente andare ad analizzare rispetto alla quantità di luce blu entrante quanta ne viene assorbita dal trattamento e quanta, invece, ne esce e verrà poi assorbita dall'occhio. Io mi focalizzerò principalmente nell'intervallo compreso tra i 380nm e i 420nm.



## RISULTATI

### CAMPIONE 1: ANTIRIFLESSO VERDE AZIENDA X



#### CARATTERISTICHE DELLALENTE:

La prima lente che è stata analizzata è una lente bianca con il trattamento antiriflesso. Trattamento che va inserito sulla faccia esterna della lente (possiamo immaginarcelo come una sorta di “smalto”). Questo trattamento ha il compito di eliminare il raggio riflesso attraverso l’applicazione di strati adeguati, per spessore e indice, che portano a raggi in opposizione di fase.

L’intervallo che è di nostro interesse è quello compreso fra 380 ai 420nm (LUCE NOCIVA). Possiamo quindi notare che a 380 nm abbiamo un valore di trasmittanza di circa 18%, arrivando ad un valore del 75% nei 420nm.

## CAMPIONE 2: ANTIRIFLESSO VERDE AZIENZA Y

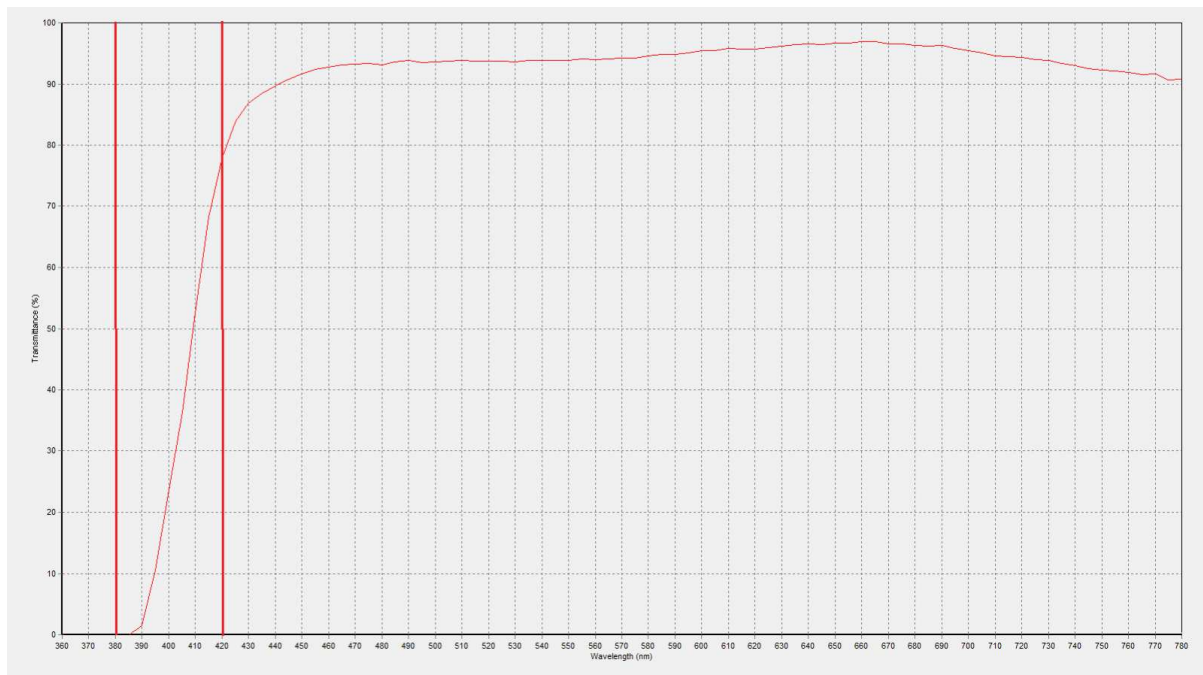


### CARATTERISTICHE DELLALENTE:

Il secondo campione ha le stesse caratteristiche della lente precedente, trattasi solo di un'altra azienda. Si nota da subito che nell'intervallo di misura strumentale, fino a 380nm il valore è pari a zero. Il che vuol dire che la lente è in grado di filtrare totalmente tutti i raggi che arrivano ad una lunghezza d'onda di 380nm. A 390nm quindi abbiamo un valore di T del 2%, arrivando al 83% nei 420nm.



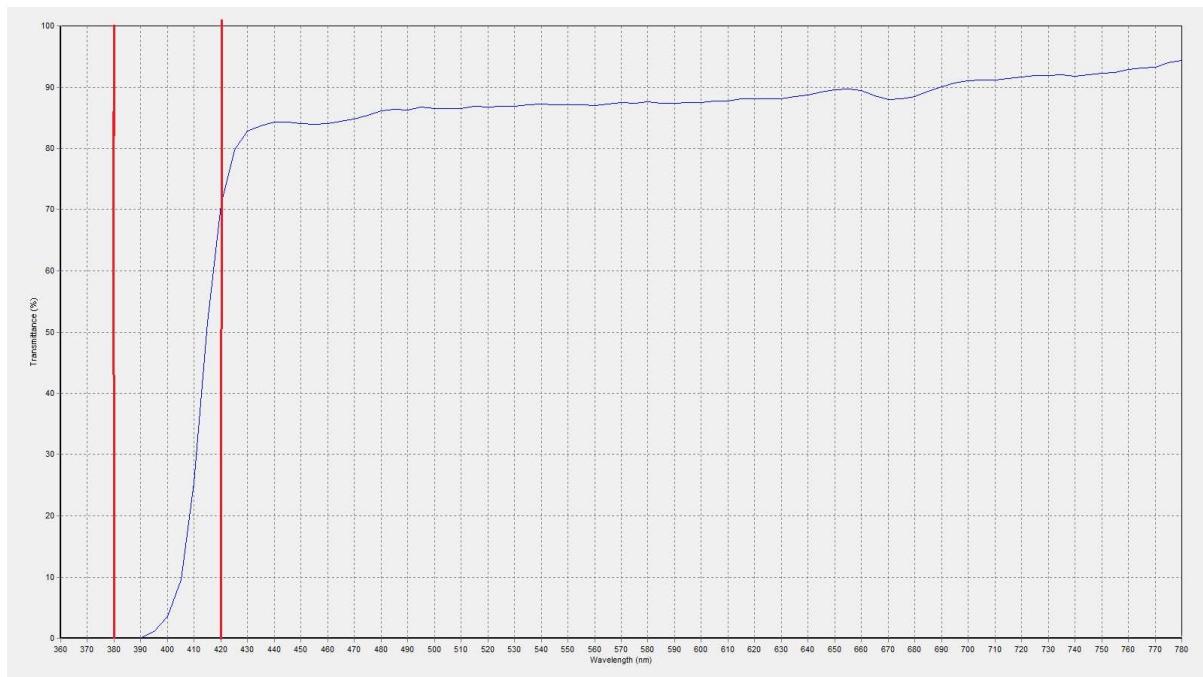
### CAMPIONE 3: FILTRO LUCE BLU AZIENDA X



#### CARATTERISTICHE DELLA LENTE:

Il terzo campione è una lente con il trattamento specifico per la protezione dalla luce blu. Anche questo trattamento, come l'antiriflesso, è una sorta di pellicola che va depositata sulla superficie esterna della lente. Per essere efficace deve assorbire la luce nel campo blu. Analizzando il grafico vediamo che fino a 390nm abbiamo un valore di trasmittanza pari a 0%, mentre a 420 nm arriviamo ad un valore del 75% circa.

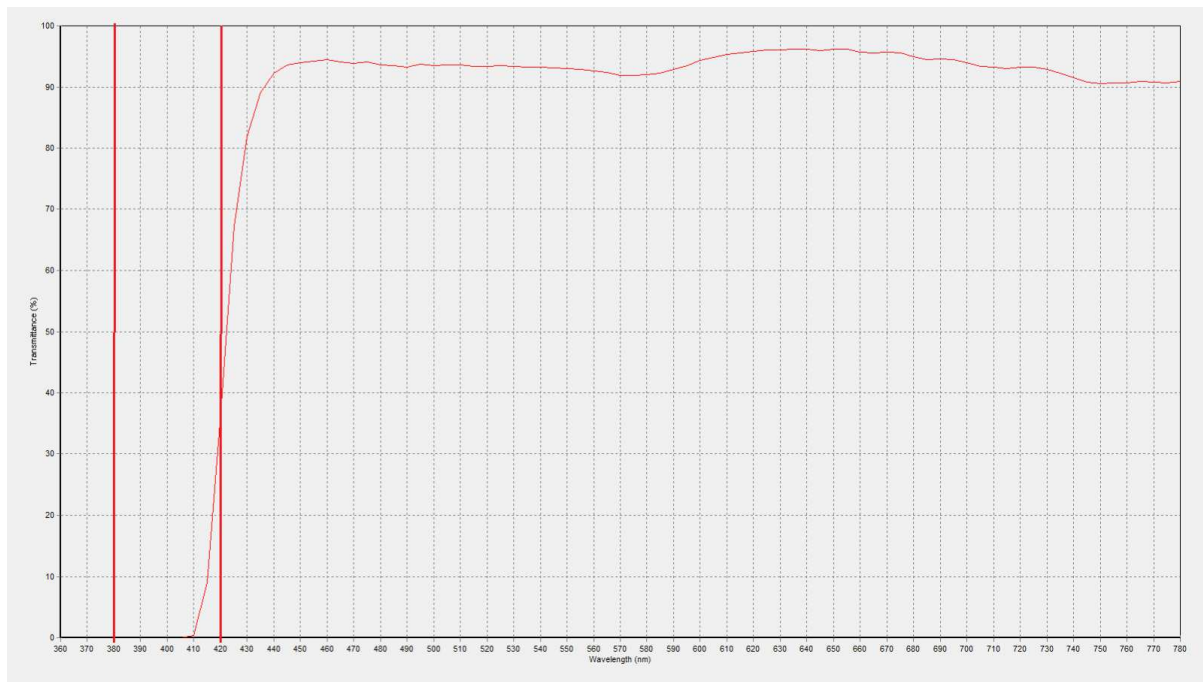
#### CAMPIONE 4: FILTRO LUCE BLU AZIENDA Y



#### CARATTERISTICHE DELLA LENTE:

La lente numero 4 ha le caratteristiche simili della lente precedente. In questo caso però abbiamo una protezione totale dei raggi fino ad una lunghezza d'onda di circa 390nm. A 400 si ha un valore di T di 4% circa fino ad arrivare a 70% di trasmittanza per le lunghezze d'onda di 420nm.

## CAMPIONE 5: LENTE LUTINA

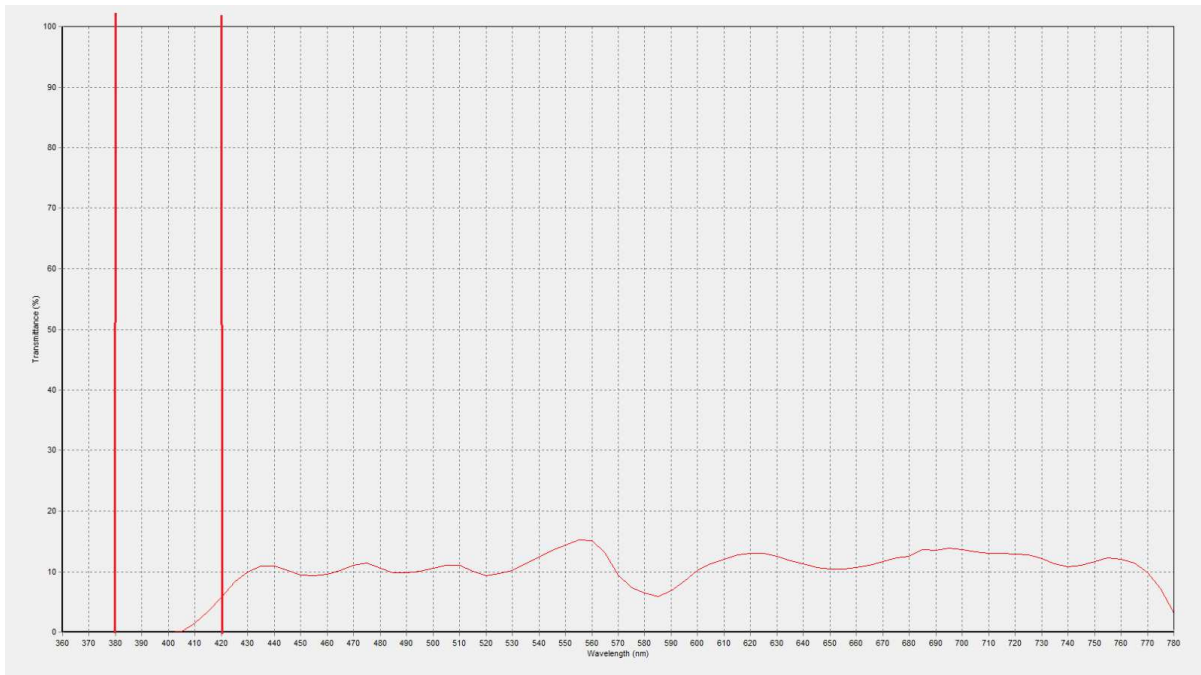


### CARATTERISTICHE DELLA LENTE:

Il campione numero 5 è una lente con un nuovissimo materiale: La Lutina.

A differenza delle lenti finora citate, la lutina non è un trattamento ma un vero e proprio materiale organico trasparente. Il che vuol dire che non viene applicato esternamente come un antiriflesso, ma fa proprio parte della matrice della lente. Guardando il grafico, vediamo che a 420nm abbiamo un valore di T di soli 35% circa.

## CAMPIONE 6: LENTE POLARIZZATA



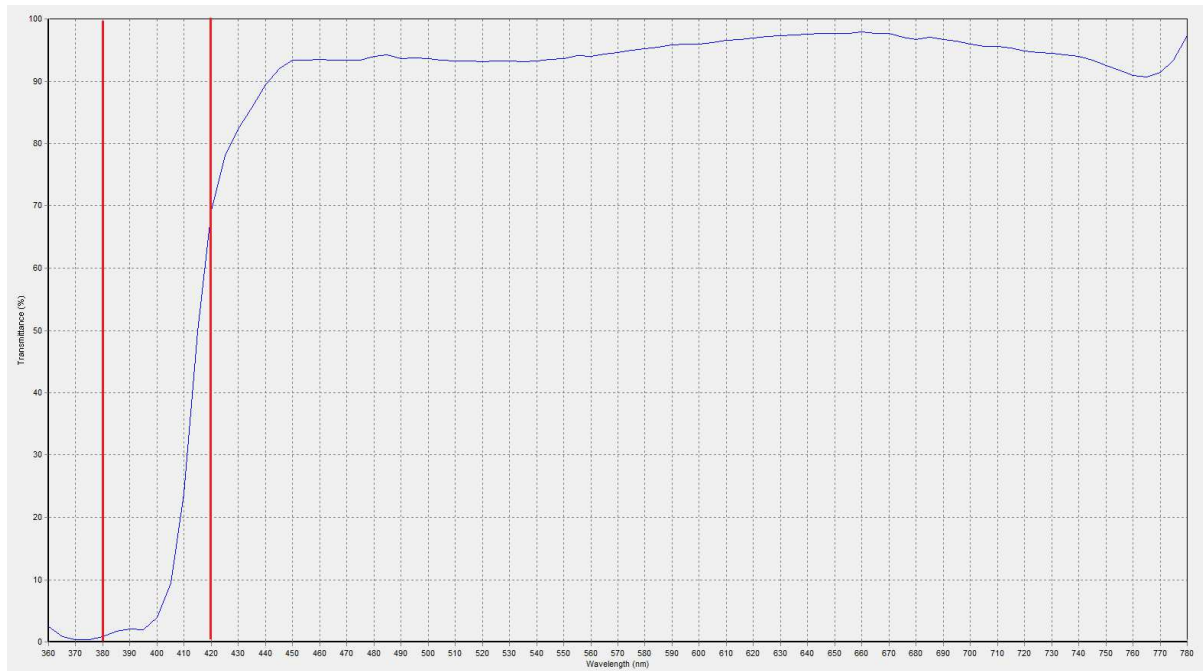
### CARATTERISTICHE DELLA LENTE:

Il campione 6 è una lente polarizzata di color grigio. Rispetto alle lenti non polarizzate, le lenti polarizzate si distinguono in quanto viene applicato un film nel processo di fabbricazione con una particolare struttura molecolare che blocca la radiazione elettromagnetica a seconda della sua polarizzazione. In pratica il film polarizzante è una struttura a micro-rete con un orientamento verticale in grado di fermare i raggi provenienti da altre direzioni riflesse e permettere, grazie alla sua struttura reticolare, il passaggio della luce lineare.

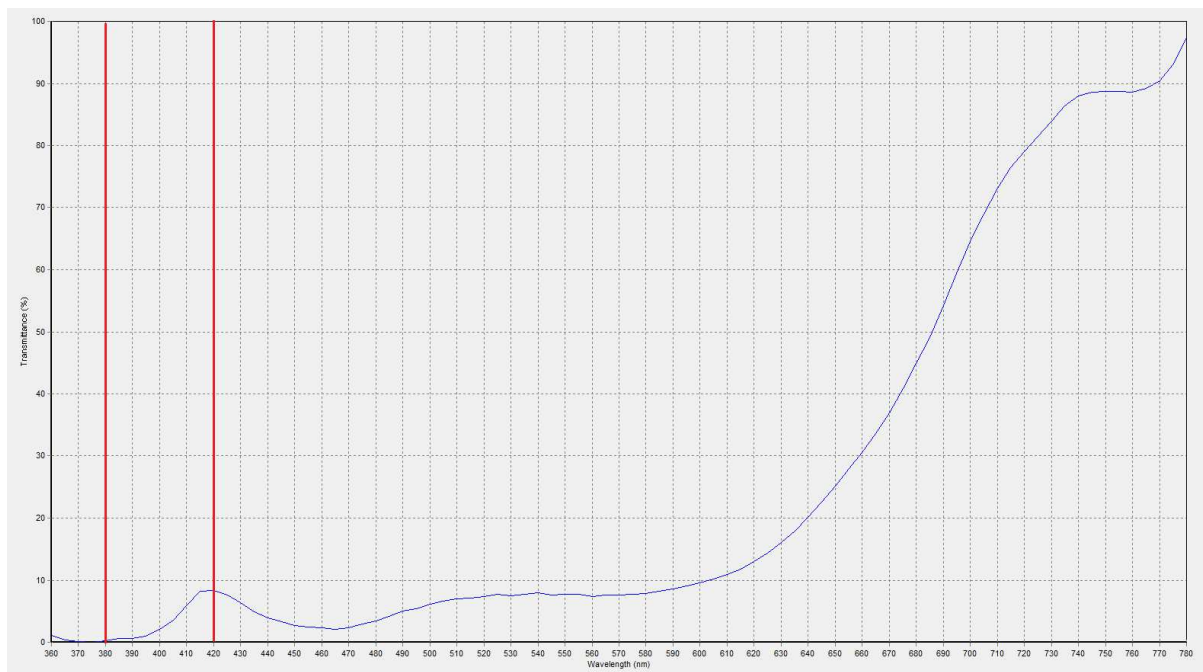
In questo modo le immagini sono messe a fuoco dai nostri occhi in modo più nitido e definito, con un contrasto e una percezione dei colori notevolmente migliorata. Quindi anche in questo caso viene inserito all'interno della lente. Si osserva un assorbimento totale fino a circa 405nm. Mentre notiamo che a 420nm abbiamo un valore di trasmittanza molto basso, circa il 5%.

## CAMPIONE 7:LENTE FOTOCROMATICA

TRATTAMENTO NON ATTIVO:



TRATTAMENTO ATTIVO:



## CARATTERISTICHE DELLALENTE:

La lente numero 7 è una lente fotocromatica.

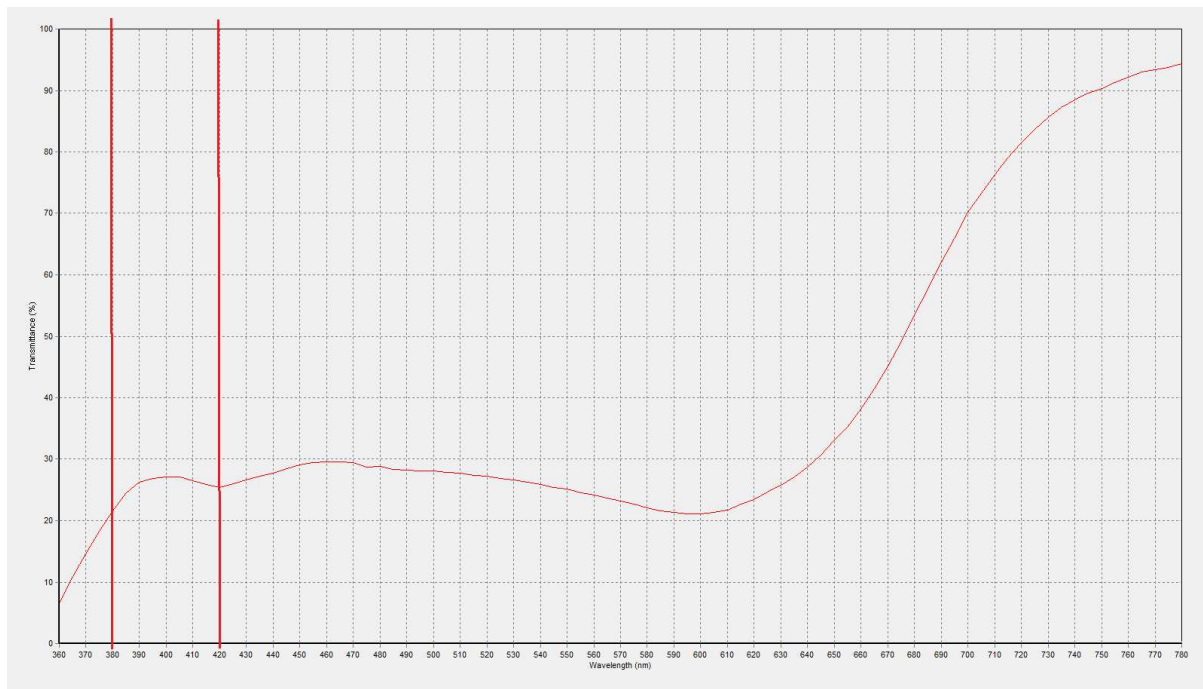
Le lenti con questo trattamento sono in grado di cambiare la tonalità del colore della lente in funzione all'intensità della radiazione luminosa incidente. Quando la luce è più intensa le lenti fotocromatiche si scuriscono, mentre quando poi si riduce l'intensità luminosa la lente torna allo stato originale (ovvero torna bianca). Tale proprietà si basa sul modo in cui gli atomi di argento reagiscono alla luce sotto l'azione della luce a bassa lunghezza d'onda, come gli UVA. [61]

Osserviamo che le due immagini non sono uguali, infatti la situazione cambia quando il trattamento fotocromatico è attivo rispetto a quando non lo è.

Per quanto riguarda il trattamento non attivo, a 400nm abbiamo un valore di trasmittanza di circa 5%, arrivando a 70% a 420nm.

Quando il trattamento è attivo, invece, abbiamo un costante aumento di T dai 380nm ai 420nm che però, diversamente dal trattamento non attivo, non arriva mai a superare il 10%.

## CAMPIONE 8: LENTE DA SOLE COLORE NERO 75%

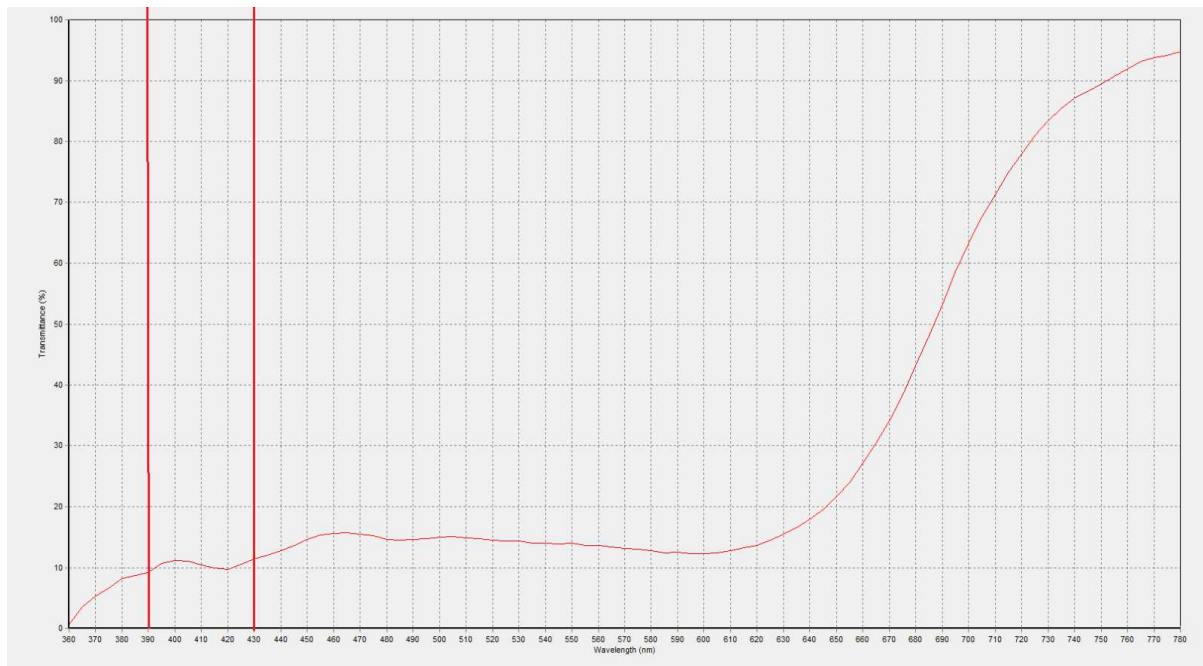


### CARATTERISTICHE DELLA LENTE:

La Lente numero 8 (come la 9 e la 10) sono lenti da sole, ovvero lenti colorate. Per questo esperimento ho scelto di analizzare tre lenti dello stesso colore (nero) ma con una tonalità diversa.

In questo caso abbiamo una lente nera al 75% e notiamo che nell'intervallo che va dai 380 ai 420nm abbiamo un valore di trasmittanza che oscilla dal 20 al 30% circa.

## CAMPIONE 9: LENTE DA SOLE COLORE NERO 85%

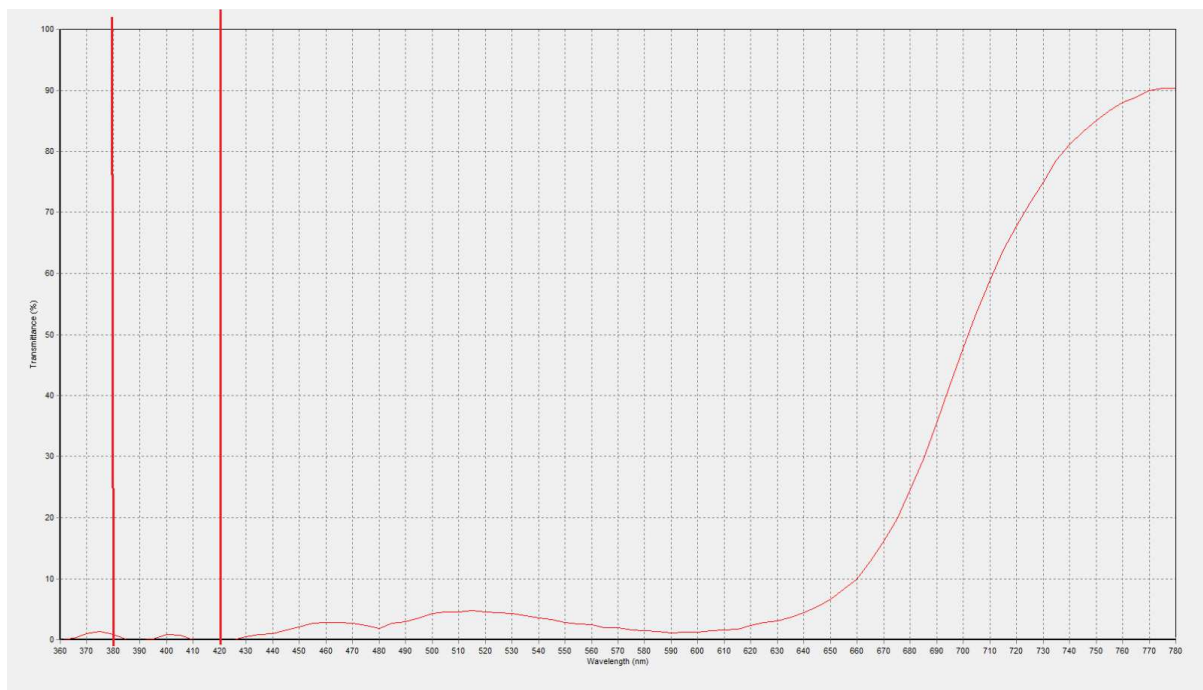


### CARATTERISTICHE DELLA LENTE:

Il campione numero 9 è una lente di colore nero 85%. Osserviamo che nel range che va dai 380 ai 420nm abbiamo un valore approssimativamente costante di T, che è circa 10%.



## CAMPIONE 10: LENTE DA SOLE COLORE NERO 95%



### CARATTERISTICHE DELLALENTE:

Il campione numero 10 è una lente di colore nero 95%. Osserviamo che nel range che va dai 380 ai 420nm abbiamo un valore costante di T che è circa prossimo allo zero.



## TABELLA RIASSUNTIVA

LENTE	380nm	390nm	400nm	410nm	420nm
Campione 1 Antiriflesso	18%	42%	60%	68%	75%
Campione 2 Antiriflesso	0%	2%	5%	25%	83%
Campione 3 Filtro luce blu	18%	41%	60%	68%	74%
Campione 4 Filtro luce blu	0%	0%	4%	26%	70%
Campione 5 Lutina	0%	0%	0%	0.5%	34%
Campione 6 Polarizzata	0%	0%	0%	1%	6%
Campione 7 Fotocromatica (NON ATTIVA)	2%	4%	5%	25%	70%
Fotocromatica (ATTIVA)	0%	1%	2%	6%	8%
Campione 8 Nero 75%	22%	26%	27%	26%	25%
Campione 9 Nero 85%	9%	12%	11%	10%	13%
Campione 10 Nero 95%	2%	0%	2%	0%	0%
	TRASMITTANZA IN %				

## CONCLUSIONI

L'obbiettivo di questa tesi, oltre a capire quali sono gli effettivi danni che la luce blu crea all'occhio umano, era quello di trovare la lente più protettiva a livello oculare dai raggi dannosi. Lo SCHEER non ha mai escluso che ci possa essere un potenziale rischio dovuto dalla luce blu per i gruppi di persone più fragili. Nonostante ciò, al momento non ci sono prove concrete dei reali danni causati dalla luce nociva. Quindi lo SCHEER ha sollecitato la necessità di monitorare questi potenziali rischi per la salute tramite continue ricerche.

In base alle ricerche che ho fatto ho capito che non sono solo i dispositivi retroilluminati ad emanare in quantità elevate la luce blu. Infatti, la principale sorgente di luce è il Sole. Pertanto, ho selezionato 5 lenti oftalmiche bianche e 5 lenti oftalmiche colorate (anche se non del tutto corretto, considero la lente fotocromatica una lente colorata in quanto, una volta attivo il trattamento, la lente è in grado di filtrare maggiormente la luce che rientra nell'intervallo di interesse della ricerca).

Per quanto riguarda le lenti bianche, oltre a fare un paragone tra trattamenti diversi ho voluto fare un paragone anche degli stessi trattamenti ma di case produttrici diverse. Ho notato quindi che per lo stesso trattamento possiamo avere risultati migliori e risultati peggiori. Per esempio, parlando della lente con il trattamento per la luce blu, guardando le due immagini, vediamo che il campione numero 4 ci dà una prestazione migliore rispetto al campione numero 3. In base a questo direi che non tutte le lenti in commercio hanno la stessa qualità. Non sorge però nessun dubbio sulla qualità protettiva migliore tra le cinque lenti bianche che ho esaminato. Infatti, la lente che dà la miglior prestazione nell'intervallo di nostro interesse è la lente alla Lutina. A differenza delle altre quattro lenti, la lente alla Lutina è l'unica con un assorbimento totale fino a circa 410nm.

Parlando invece di lenti colorate la miglior soluzione sarebbe la lente da sole con una tonalità del colore al 95%. Il limite di questa lente (che viene segnalato da tutte le aziende) è che utilizzandola non si può guidare durante il giorno. Perciò una lente che garantisce una protezione quasi uguale è la lente polarizzata. Va comunque detto che se dobbiamo fare un paragone tra lenti bianche e lenti colorate, le seconde sono in grado di proteggere l'occhio dalla luce blu nociva in maniera migliore. Infatti, il valore di T nell'intervallo considerato è molto più basso nelle lenti colorate.

Il mio parere, in accordo con lo SCHEER, è che bisogna tenere d'occhio lo studio sulla luce blu. Viviamo oramai in una società dipendente da tutti i dispositivi elettronici, dove tutte le esigenze quotidiane hanno alla loro base la richiesta di una connessione ad Internet. Pertanto, è del tutto comprensibile che siamo diventati "vittime" delle nuove tecnologie. Chiaro è che possiamo cercare di ridurre il tempo trascorso davanti allo smartphone o al pc e, piuttosto, dedicarci ad attività all'aperto. Sarebbe un ottimo cambiamento che farebbe del bene all'intero organismo oltre che all'occhio nello specifico. Parlando della lente maggiormente protettiva, la mia è stata una selezione ridotta in confronto a tutte le lenti che esistono in commercio. Ho cercato di analizzare i trattamenti più conosciuti ma mi rendo conto che la mia ricerca può essere ampliata notevolmente. Non avendo la possibilità di ricercare tutte le lenti, questa mia tesi potrebbe essere un umile invito, proprio alle case produttrici, nel trovare la lente maggiormente protettiva dalla luce blu.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] The Vision Council. Eyes overexposed: The digital device dilemma: digital eye strain report 2016
- [2] The Vision Council. Eyes overexposed: The digital device dilemma: digital eye strain report 2018 [https://ofcom.org.uk/\\_data/assets/pdf\\_file/0024/134907/Children-and-Parents-Media-Use-and-Attitudes-2018.pdf](https://ofcom.org.uk/_data/assets/pdf_file/0024/134907/Children-and-Parents-Media-Use-and-Attitudes-2018.pdf)
- [3] Behar-Cohen F, Martinsons C, Viénot F, Zisis G, Barlier-Salsi A, Cesarini JP, et al. Light-emitting diodes (LED) for domestic lighting: any risks for the eye? *Prog Retin Eye Res.* 2011;30(4):239–257.
- [4] Effets sur la santé humaine et sur l'environnement (faune et flore) des diodes électroluminescentes (LED), ANSES, April 2019. <https://www.anses.fr/fr/content/effets-sur-la-sant%C3%A9-humaine-et-sur-l%E2%80%99environnement-des-syst%C3%A8mes-utilisant-des-led-expertise>
- [5] Press Kit: Effects of systems using LEDs on human health and the environment ANSES 2019 expert assessment, French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES), 2019. <https://www.anses.fr/en/system/files/PRES2019DPA01EN.pdf>
- [6] N. Theruveethi, B.V. Bui, M.B. Joshi, M. Valiathan, S.B. Ganeshrao, S. Gopalakrishnan, S.P. Kabekkodu, S.S. Bhat, S. Surendran Blue light-induced retinal neuronal injury and amelioration by commercially available blue light-blocking lenses, *Life (Basel)*, (2022)
- [7] J. Moon, J. Yun , YD Yoon , SI Park, YJ Seo , WS Park, HY Chu, KH Park, MY Lee, CW Lee, SJ Oh, YS Kwak , YP Jang, JS Kang. Blue light effect on retinal pigment epithelial cells by display devices, *Integrative Biology*, Volume 9, Issue 5, May 2017, Pages 436–443.
- [8] Night Shift: How blue light impacts sleep, and what companies like Apple can do about it, 2016. <https://www.extremetech.com/extreme/226127-night-shift-how-blue-light-impacts-sleep-and-what-companies-like-apple-can-do-about-it>
- [9] N. Nagai , M. Ayaki , T. Yanagawa, A. Hattori , K. Negishi , T. Mori, TJ Nakamura, K. Tsubota. Suppression of Blue Light at Night Ameliorates Metabolic Abnormalities by Controlling Circadian Rhythms, *Investigative Ophthalmology & Visual Science* September 2019, Vol.60
- [10] G. Tosini, I. Ferguson, K. Tsubota. Effects of blue light on the circadian system and on the physiology of the eye
- [11] J. Vicente-Tejedor, M. Marchena, L. Ramirez, D. Garcia-Ayuso, V. Gomez-Vicente, C. Sanchez-Ramos, P. de la Villa, F. Germain. Removal of the blue component of light significantly decreases retinal damage after high intensity exposure, March 15, 2018 [10.1371/journal.pone.0194218](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194218)
- [12] Mainster MA, Turner PL. Blue-blocking IOLs decrease photoreception without providing significant photoprotection *Surv Ophthalmol* 2010; pp 272–89.
- [13] Krinsky NI, Johnson EJ Carotenoid actions and their relation to health and disease *Mol aspects Med.* 2005 Dec; pp 459–516.
- [14] Angelo Quartoldo, *Elementi di Ottica*, Luigi Pellegrini Editore, 2014, pp 43-65
- [15] Angelo Quartoldo, *Elementi di Ottica*, Luigi Pellegrini Editore, 2014, pp 230-236

- [16] Angelo Quartoldo, *Elementi di Ottica*, Luigi Pellegrini Editore, 2014, pp 255
- [17] Hatori M, Gronfier C, Van Gelder RN, Bernstein PS, Carreras J, Panda S, et al. Global rise of potential health hazards caused by blue light-induced circadian disruption in modern aging societies
- [18] LED Lighting in the USA: Statistics and Facts. Published by Statista Research Department, February 23, 2021.
- [19] Chen HW, Lee JH, Lin BY, Chen S, Wu ST. Liquid crystal display and organic light-emitting diode display: present status and future perspectives. *Light Sci Appl*. 2018.
- [20] Massimo G. Bucci, *Oftalmologia*, Cap. 13, Società Editrice Universo, 1993
- [21] Maoka T. Carotenoids as natural functional pigments. *J. Nat. Med.* 2020 pp 1-16
- [22] Bone R.A., Landrum J.T., Tarsis S.L. Preliminary identification of the human macular pigment. *Vis. Res.* 1985 pp1531-1535
- [23] Perry A., Rasmussen H., Johnson E. Xanthophyll (lutein, zeaxanthin) content in fruits, vegetables and corn and egg products. *J. Food Compos. Anal.* 2009 pp 9-15
- [24] Mangels A.R., Holden J.M., Beecher G.R., Forman M.R., Lanza E. Carotenoid content of fruits and vegetables: An evaluation of analytic data. *J. Am. Diet. Assoc.* 1993 pp 284-296
- [25] Bohn T. Bioavailability of non-provitamin A carotenoids. *Curr. Nutr. Food Sci.* 2008 pp 240-258
- [26] van Het Hof K.H., West C.E., Weststrate J.A., Hautvast J.G. Dietary factors that affect the bioavailability of carotenoids. *J. Nutr.* 2000 pp 503-506
- [27] Nagao A. Absorption and metabolism of dietary carotenoids. *Biofactors*. 2011 pp 83-87
- [28] Bernstein P.S., Li B., Vachali P.P., Gorusupudi A., Shyam R., Henriksen B.S., Nolan J.M. Lutein, zeaxanthin, and meso-zeaxanthin: The basic and clinical science underlying carotenoid-based nutritional interventions against ocular disease. *Prog. Retin. Eye Res.* 2016 pp 34-66
- [29] Manayi A., Abdollahi M., Raman T., Nabavi S.F., Habtemariam S., Daglia M., Nabavi S.M. Lutein and cataract: From bench to bedside. *Crit. Rev. Biotechnol.* 2016; pp829-839.
- [30] Broekmans W.M., Berendschot T.T., Klöpping-Ketelaars I.A., de Vries A.J., Goldbohm R.A., Tijburg L.B., Kardinaal A.F., van Poppel G. Macular pigment density in relation to serum and adipose tissue concentrations of lutein and serum concentrations of zeaxanthin. *Am. J. Clin. Nutr.* 2002; pp595-603
- [31] Arunkumar R., Gorusupudi A., Bernstein P.S. The macular carotenoids: A biochemical overview. *Biochim. Biophys. Acta Mol. Cell Biol. Lipids.* 2020
- [32] Krinsky N.I., Johnson E.J. Carotenoid actions and their relation to health and disease. *Mol. Asp. Med.* 2005; pp 459-516.
- [33] Junghans A., Sies H., Stahl W. Macular pigments lutein and zeaxanthin as blue light filters studied in liposomes. *Arch. Biochem. Biophys.* 2001; pp 160-164
- [34] Krinsky N.I., Yeum K.J. Carotenoid-radical interactions. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 2003; pp 754-760.
- [35] Landrum J.T., Bone R.A., Krinsky N.I., Mayne S.T., Sies H. *Carotenoids in Health and Disease*. Marcel Dekker; New York, NY, USA: 2004. pp. 445-472.
- [36] Snodderly D.M., Auran J.D., Delori F.C. The macular pigment. II. Spatial distribution in primate retinas. *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.* 1984; pp 674-685.
- [37] Kijlstra A., Tian Y., Kelly E.R., Berendschot T.T. Lutein: More than just a filter for blue light. *Prog. Retin. Eye Res.* 2012; pp 303-315.
- [38] Zhang P.C., Wu C.R., Wang Z.L., Wang L.Y., Han Y., Sun S.L., Li Q.S., Ma L. Effect of lutein supplementation on visual function in nonproliferative diabetic retinopathy. *Asia Pac. J. Clin. Nutr.* 2017; pp 406-411
- [39] Li S.Y., Fu Z.J., Ma H., Jang W.C., So K.F., Wong D., Lo A.C. Effect of lutein on retinal neurons and oxidative stress in a model of acute retinal ischemia/reperfusion. *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2009; pp 836-843

- [40] Behar-Cohen F, Martinsons C, Viénot F, Zisis G, Barlier-Salsi A, Cesarini JP, et al. Light-emitting diodes (LED) for domestic lighting: any risks for the eye? *Prog Retin Eye Res.* 2011; pp 239-257.
- [41] Bron A, Vrensen G, Koretz J, Maraini G, Harding J. The ageing lens. *Ophthalmologica.* 2000; pp 86–104.
- [42] Kessel L, Lundeman JH, Herbst K, Andersen TV, Larsen M. Age-related changes in the transmission properties of the human lens and their relevance to circadian entrainment. *J Cataract Refract Surg.* 2010, pp 308–312.
- [43] Liu YC, Wilkins M, Kim T, Malyugin B, Mehta JS. Cataracts. *Lancet.* 2017; pp 600–612.
- [44] Zhao ZC, Zhou Y, Tan G, Li J. Research progress about the effect and prevention of blue light on eyes. *Int J Ophthalmol.* 2018.
- [45] Mure LS. Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells of the human retina. *Front Neurol.* 2021
- [46] Marshall J. Thermal and mechanical mechanisms in laser damage to the retina. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 1970; pp 97–115
- [47] Singh AD. Ocular phototherapy. *Eye (Lond)* 2013; pp 190–198
- [48] Organisciak DT, Vaughan DK. Retinal light damage: mechanisms and protection. *Prog Retin Eye Res.* 2010; pp 113–134.
- [49] Ouyang X, Yang J, Hong Z, Wu Y, Xie Y, Wang G. Mechanisms of blue light-induced eye hazard and protective measures: a review. *Biomed Pharmacother,* 2020.
- [50] West SK, Rosenthal FS, Bressler NM, Bressler SB, Munoz B, Fine SL, et al. Exposure to sunlight and other risk factors for age-related macular degeneration. *Arch Ophthalmol.* 1989; pp 875–879.
- [51] Ham WT., Jr Ocular hazards of light sources: review of current knowledge. *J Occup Med.* 1983; pp 101–103.
- [52] Maeda T, Golczak M, Maeda A. Retinal photodamage mediated by all-trans-retinal. *Photochem Photobiol.* 2012; pp 1309–1319
- [53] Kaya S, Weigert G, Pemp B, Sacu S, Werkmeister RM, Dragostinoff N, et al. Comparison of macular pigment in patients with age-related macular degeneration and healthy control subjects—a study using spectral fundus reflectance. *Acta Ophthalmol.* 2012; pp 399–403
- [54] Arnault E, Barrau C, Nanteau C, Gondouin P, Bigot K, Viénot F, et al. Phototoxic action spectrum on a retinal pigment epithelium model of age-related macular degeneration exposed to sunlight normalized conditions. *PLoS ONE.* 2013
- [55] Marie M, Forster V, Fouquet S, Berto P, Barrau C, Ehrismann C, et al. Phototoxic damage to cone photoreceptors can be independent of the visual pigment: the porphyrin hypothesis. *Cell Death Dis.* 2020
- [56] Chamorro E, Bonnin-Arias C, Pérez-Carrasco MJ, Muñoz de Luna J, Vázquez D, Sánchez-Ramos C. Effects of light-emitting diode radiations on human retinal pigment epithelial cells in vitro. *Photochem Photobiol.* 2013; pp 468–473.
- [57] Kuse Y, Ogawa K, Tsuruma K, Shimazawa M, Hara H. Damage of photoreceptor-derived cells in culture induced by light emitting diode-derived blue light. *Sci Rep.* 2014; pp 1–12
- [58] Ratnayake K, Payton JL, Lakmal OH, Karunaratne A. Blue light excited retinal intercepts cellular signaling. *Sci Rep.* 2018



[59] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) Guidelines on Limits of Exposure to Laser Radiation of Wavelengths between 180 nm and 1,000  $\mu\text{m}$ . International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. *Health Phys.* 2013; pp 271–295

[60] Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks (SCHEER). Opinion on Potential risks to human health of Light Emitting Diodes (LEDs). 5–6 June 2018: SCHEER; 2018. [https://ec.europa.eu/health/sites/health/files/scientific\\_committees/scheer/docs/scheer\\_o\\_011.pdf](https://ec.europa.eu/health/sites/health/files/scientific_committees/scheer/docs/scheer_o_011.pdf)

[61] Ferdinando Catalano, *Ottica Applicata E Strumenti*, Zanichelli editore, 2001, pp 12-13.