

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**CORSO DI LAUREA IN OTTICA E OPTOMETRIA**

**Samuele Bettella**

***Luce blu e valutazione spettrometrica su un  
campione di lenti oftalmiche***

**TESI DI LAUREA**

**Relatore: Silvoni Federico**

**ANNO ACCADEMICO 2018-2019**



# INDICE:

|  |         |
|--|---------|
| <b>Introduzione</b>                                  | pag. 2  |
| <b>Capitolo I: La luce</b>                           | pag. 4  |
| <u>I.I La natura della luce</u>                      | pag. 4  |
| <u>I.II Come interagiscono la luce e la materia?</u> | pag. 7  |
| I.II.I Riflessione e rifrazione                      | pag. 8  |
| I.II.II Assorbimento                                 | pag. 12 |
| I.II.III Trasmissione                                | pag. 14 |
| I.II.IV Diffrazione                                  | pag. 17 |
| I.II.V Interferenza                                  | pag. 19 |
| <b>Capitolo II: Lo spettro elettromagnetico</b>      | pag. 22 |
| <u>II.I Suddivisione in bande</u>                    | pag. 24 |
| II.I.I Spettro ottico                                | pag. 25 |
| II.I.II Radiazione ultravioletta                     | pag. 26 |
| II.I.III Radiazione infrarossa                       | pag. 29 |
| <b>Capitolo III: Interazione tra luce e occhio</b>   | pag. 32 |
| <u>III.I Anatomia</u>                                | pag. 32 |
| <u>III.II Funzionamento</u>                          | pag. 35 |
| <u>III.III Dai fotorecettori alla retina</u>         | pag. 37 |
| <b>Capitolo IV: La luce blu</b>                      | pag. 40 |
| <u>IV.I Luce blu, cos'è?</u>                         | pag. 40 |
| <u>IV.II I LED</u>                                   | pag. 41 |
| <u>IV.III Assorbimento luce blu</u>                  | pag. 45 |
| <u>IV.IV Luce blu e biologia umana</u>               | pag. 46 |
| <u>IV.V Ciclo circadiano</u>                         | pag. 46 |

|  |         |
|--|---------|
| <u>IV.VI Strategie difensive</u>                                 | pag. 55 |
| <b>Capitolo V: Studio sperimentale</b>                           | pag. 58 |
| <u>V.I Campioni Analizzati</u>                                   | pag. 58 |
| <u>V.II Metodo di analisi</u>                                    | pag. 58 |
| <u>V.III Valutazione spettrometrica dei campioni e risultati</u> | pag. 60 |
| <u>V.IV Analisi dei risultati</u>                                | pag. 68 |
| <u>V.V Conclusioni</u>   | pag. 69 |
| <b>Bibliografia</b>  | pag. 71 |

# INTRODUZIONE

In questi ultimi secoli numerosi sono stati gli uomini di scienza che si sono prodigati a rispondere alle domande che l'uomo si è posto. Il loro obiettivo era quello di riuscire sperimentalmente a spiegare i fenomeni sconosciuti a cui l'uomo quotidianamente assisteva. Uno tra questi è la luce e i fenomeni a cui essa dava vita interagendo con la materia. Dopo studi, ipotesi ed esperimenti condotti da alcune tra le menti più brillanti della scienza ad oggi sappiamo che la natura della luce è conosciuta come duale: una componente ondulatoria e una particellare. La luce è dunque una radiazione elettromagnetica.

La luce è una forma di energia ed interagisce con l'uomo ogni giorno. Medici e fisiologi si sono interessati all'influenza che la luce ha sulla salute delle persone. In particolare modo, oftalmologi ed esperti della visione, ovvero gli optometristi, hanno studiato la relazione tra la radiazione elettromagnetica e la struttura oculare dell'uomo.

In questo elaborato vengono introdotte, inizialmente, un po' tutte le caratteristiche della luce come onda e come particella. Vengono poi spiegate le interazioni tra onde e tra onde, particelle e materia. Si danno spiegazioni scientifico-fisiche dei fenomeni di interazione. Viene poi identificata come fulcro dell'elaborato la radiazione ad alta energia o, meglio, la radiazione di lunghezza d'onda nel blu.

In seguito si espone una ricerca breve, ma approfondita della letteratura in ambito oftalmologico. Evidenziando quali conseguenze lo stile di vita e l'illuminazione dei giorni nostri comportano per il corpo umano. Si approfondiscono le conoscenze in ambito oftalmico ai fini di conoscere gli strumenti attualmente conosciuti e utilizzati per prevenire possibili danni alla salute causati dall'interazione con le radiazioni analizzate.

Si espone, in seguito, un'analisi dettagliata che si appoggia su dati sperimentalmente ottenuti riguardante i filtri sopraccitati e disponibili tuttora sul mercato.

La tesi si propone di analizzare e confrontare questi dati ottenuti per comprendere meglio come le aziende di prodotti oftalmici si pongono nei confronti del problema "luce blu" e come queste protezioni effettivamente funzionino. Inoltre si cerca tramite l'elaborato di rendere più consapevole ogni individuo dei possibili danni che le radiazioni di questa tipologia possono provocare e fornire informazioni sulle possibili strategie oftalmiche che ogni individuo può attuare per prevenirli.

# Capitolo I: La luce

## *1.1 La natura della luce*

**“LUCHE”:** “Radiazione elettromagnetica che comprende le lunghezze d'onda infrarosse, visibili, ultraviolette e i raggi X, la cui velocità, costante universale della fisica, è nel vuoto di 299.792 km/s.”<sup>(1)</sup>

Fino alla metà circa del 17° secolo si credeva che la luce consistesse in un flusso di corpuscoli che si propagassero dalla sorgente, che poteva essere il sole o una candela per esempio, verso l'esterno lungo linee rette. Questi raggi potevano attraversare i materiali trasparenti ed essere riflessi dalle superfici dei materiali opachi. Solo dopo che Isaac Newton idealizzò la prima teoria corpuscolare la luce divenne un aspetto di studio per la fisica. Se la validità di una teoria consiste nella capacità di descrivere fatti noti attraverso l'esperienza con il minor numero di ipotesi, dobbiamo ammettere che la teoria della natura corpuscolare della luce era eccellente. La teoria doveva spiegare perché la luce si propagasse in linea retta, perché venisse riflessa da una superficie piana, come uno specchio con angolo di incidenza e riflessione uguale e perché e come fosse rifratta da una superficie limitante due mezzi diversi come aria e acqua o aria e vetro. La teoria corpuscolare spiega in modo semplice tutti questi fenomeni considerando la luce come, appunto, insieme di corpuscoli in moto ad altissime velocità. Dalla metà del 17° secolo, mentre la maggior parte dei ricercatori nel campo dell'ottica accettava la teoria corpuscolare, alcuni avanzavano l'ipotesi che la luce fosse un moto ondulatorio. Christian Huyghens, nel 1670, dimostrò che le leggi della riflessione e della rifrazione potevano spiegarsi sulla base di una teoria ondulatoria e che tale teoria dimostrava il fenomeno della doppia rifrazione di recente scoperta.<sup>(2)</sup> Tutto questo con l'esposizione nel 1690 nel suo testo “*traitè de la lumiere*” La natura ondulatoria, però, non fu accettata immediatamente. Si obiettò, ad esempio, che se la luce fosse di natura ondulatoria la si dovrebbe vedere anche dietro agli spigoli di eventuali ostacoli incontrati dall'onda, poiché questa dovrebbe aggirarli.<sup>(3)</sup> Noi adesso sappiamo che le lunghezze d'onda della luce sono così corte che l'aggiramento, che pure avviene attraverso un fenomeno noto come diffrazione e dimostrato nel 1665 da Grimaldi, è così piccolo che non si può osservare. Solamente nel 1827 gli esperimenti di Thomas Young ed Augustin Fresnel sull'interferenza e quelli di Leon Foucault sulla determinazione della velocità della luce nei liquidi, eseguiti in epoca decisamente

successiva, mostrarono l'esistenza di fenomeni ottici che la teoria corpuscolare non poteva spiegare. Le esperienze di Young permisero di misurare la lunghezza d'onda della luce e Fresnel mostrò che la propagazione della luce in linea retta, come i fenomeni di diffrazione osservati da Grimaldi ed altri, potevano essere interpretati considerando il comportamento di onde aventi piccola lunghezza d'onda. L' esatta natura delle onde luminose e del mezzo che le trasmette rimaneva ancora un problema insoluto. L' "etere" postulato da Huyghens come mezzo di trasmissione e che si riteneva riempisse lo spazio vuoto e permeasse i pori dei materiali trasparenti doveva possedere proprietà notevolmente contrastanti. Se le onde luminose erano onde elastiche simili alle onde sonore, per tener conto dell'elevata velocità di propagazione, l'etere doveva essere molto rigido. Esso tuttavia non doveva opporsi al moto di un corpo in quanto i pianeti vi si muovono senza alcuna apprezzabile diminuzione di velocità. Il successivo passo in avanti nella teoria della luce si deve allo scozzese James Clerk Maxwell. Nel 1873 Maxwell dimostrò che un circuito elettrico oscillante poteva irradiare onde elettromagnetiche. Nel 1865, qualche anno prima di questa importante dimostrazione, Maxwell pubblicò un testo chiamato "*A dynamical theory of the electromagnetic field*" dove espose le equazioni che correlavano i campi elettrico e magnetico. Queste equazioni erano quattro e nascevano dai presupposti e dalle basi precedentemente poste da Gauss, Faraday e Ampère.<sup>(2)</sup> Le equazioni (esposte in differenziale in campo libero) sono:

$$\nabla \cdot E = 0$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \times B = \frac{1}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t}$$

Dove:

$\nabla \cdot$  = gradiente del ...

$\nabla \times$  = divergenza del ...

E = campo elettrico (N/C)

B = campo magnetico (T)

$c$  = velocità della luce (m/s)

$t$  = tempo (s)

Risolto l'insieme delle equazioni, Maxwell intelligentemente capì che luce ed onde elettromagnetiche erano correlate. Tutto ciò porterà al calcolo sperimentale della velocità di propagazione della luce nel vuoto. <sup>(4)</sup>

$$C = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

Era inevitabile, dopo queste scoperte e queste dimostrazioni, ammettere che la luce consistesse di onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda molto corta. Quindici anni dopo la scoperta di Maxwell, Heinrich Hertz, usando un circuito oscillante di piccole dimensioni, generò onde di piccola lunghezza d'onda (che oggi chiamiamo microonde) di origine indubbiamente elettromagnetica e dimostrò che possedevano tutte le caratteristiche e le proprietà delle onde luminose. La teoria elettromagnetica di Maxwell e la sua giustificazione sperimentale di Hertz costituirono uno dei trionfi della fisica. <sup>(2)</sup> Alla fine del 19° secolo ci si aspettava che nel futuro ci sarebbe stato ben poco da aggiungere alle conoscenze della natura della luce. Ma non fu così. La teoria elettromagnetica non spiegava l'emissione fotoelettrica, cioè l'emissione di fotoni da parte di un conduttore colpito da onde luminose. Mancava una constatazione sulla materia che compone la luce. Max Planck si rivelò essere una figura fondamentale per le scoperte che finirono col riuscire a spiegare questo effetto. Egli studiò il corpo nero identificando i quanti di energia tramite la formula:

$$E = h\nu$$

Dove:

$E$  = energia (J)

$h$  = costante di Planck =  $6,6 \times 10^{-34}$  J/s

$\nu$  = frequenza d'onda (hz = 1/s)

Con questa formula si identificò per la prima volta l'importantissima relazione tra energia e frequenza d'onda. <sup>(4)</sup> Nel 1905 Einstein, riprendendo questa ipotesi avanzata cinque anni prima da Planck, postulò che l'energia di una onda elettromagnetica invece di essere distribuita uniformemente nello spazio era concentrata in piccoli pacchetti o fotoni spiegando l'effetto fotoelettrico, il che gli valse il premio nobel per la fisica.



Identificando la luce come quanti di energia si sostiene la sua natura corpuscolare e si spiega la loro interazione con le particelle atomiche.<sup>(5)</sup>

$$\frac{1}{2} m v^2 = h\nu - \phi$$

Dove:

$$\frac{1}{2} m v^2 = \text{energia cinetica degli elettroni (J)}$$

$h$  = costante di Planck (Js)

$\nu$  = frequenza d'onda (hz = 1/s)

$\phi$  = energia di estrazione di un fotone (J)

Questa legge lega energia cinetica (data dal movimento delle particelle) con tutte le caratteristiche fisiche che la luce possiede come la velocità e la lunghezza d'onda per esempio.<sup>(6)</sup> La rappresentazione ondulatoria non fu del tutto abbandonata perché un fotone possedeva ancora una frequenza e la sua energia era proporzionale alla frequenza. Nell'effetto fotoelettrico un fotone cede la sua energia all'elettrone. Gli esperimenti eseguiti da Millikan dimostrarono che le energie cinetiche dei fotoelettroni erano in perfetto accordo con la formula fornita da Einstein. Altra conferma a suddetta teoria la si trova nell'effetto Compton. A. H. Compton nel 1921 studiò il moto di un fotone e di un elettrone prima e dopo un urto reciproco e mostrò che il loro comportamento era simile a quello derivante da un urto elastico tra particelle materiali con conservazione di energia cinetica e quantità di moto. L'effetto fotoelettrico e l'effetto Compton sembrano ridurre nuovamente ad una natura corpuscolare della luce. I fisici attualmente, poiché gli esperimenti sembrano contraddittori, ammettono una natura duale della luce. I fenomeni di propagazione sono descritti dalla teoria ondulatoria elettromagnetica, mentre i fenomeni di interazione della luce con la materia sono descritti dalla teoria corpuscolare.<sup>(2)</sup>

### ***1.II come interagiscono luce e materia?***

Nel paragrafo precedente abbiamo visto tutti gli esperimenti fatti negli anni per riuscire a dimostrare i diversi fenomeni di interazione della luce con la materia. Vediamo ora più nel dettaglio questi fenomeni. La luce interagisce con gli atomi della materia tramite fenomeni di:

- riflessione
- rifrazione
- assorbimento
- trasmissione
- diffrazione
- interferenza

Tutti questi importanti fenomeni sono studiati dall'ottica.

### **OTTICA:**

“Parte della fisica che studia i fenomeni luminosi e tutto ciò che è relativo alle radiazioni elettromagnetiche”

“Parte della fisica che studia i fenomeni relativi alla propagazione della luce (nel vuoto e nei mezzi materiali) e gli effetti della sua interazione con i corpi, nonché le proprietà e la costituzione degli strumenti atti a fornire, a diversi fini, immagini degli oggetti, o a emettere radiazione luminosa, oppure a misurarne le grandezze caratteristiche.”<sup>(7)</sup>

L'ottica si divide poi in sotto classi e abbiamo:

1. Ottica geometrica: “studia i fenomeni e le leggi relative alla propagazione rettilinea della luce”
2. Ottica fisica: studia i fenomeni associati alla natura ondulatoria della luce
3. Ottica fisiologica: studia l'anatomia e la fisiologia degli organi della vista
4. Ottica elettromagnetica: studia le interazioni tra fasci di elettroni e campi magnetici ed elettrici <sup>(8)</sup>

Ma vediamo ora più nel dettaglio i fenomeni prima elencati.

#### **I.II.I RIFLESSIONE e RIFRAZIONE:**

La riflessione e la rifrazione sono due fenomeni strettamente legati tra loro. Per il loro studio si è partiti da un problema osservato. Avendo un treno di onde piane elettromagnetiche propagantesi in un mezzo ed incidenti su una superficie piana limitante un secondo mezzo di diversa velocità di propagazione ci si potrebbe aspettare che, se entrambi i mezzi sono trasparenti, il treno d'onda incidente semplicemente

continui il suo percorso nel secondo mezzo, ma esperienze comuni dimostrano che non è così. Fenomeni quotidiani, infatti, come l'aspetto spezzato di un remo immerso nell'acqua o la deviazione dei raggi prodotta da un prisma mostrano generalmente come un treno d'onda cambi direzione quando incontra una superficie di discontinuità. Dopo diversi studi ora sappiamo che la riflessione e la rifrazione della luce si possono spiegare utilmente supponendo che la luce si propaghi sotto forma di raggi rettilinei. Quando un raggio di luce che viaggia in un mezzo materiale trasparente come, per esempio, l'aria incontra una superficie di separazione con un altro mezzo trasparente (per esempio, l'acqua) si divide normalmente in due raggi: uno viene riflesso dalla superficie e l'altro entra nel secondo mezzo variando la sua direzione di propagazione, cioè viene rifratto (vedi figura 1).<sup>(2)</sup>

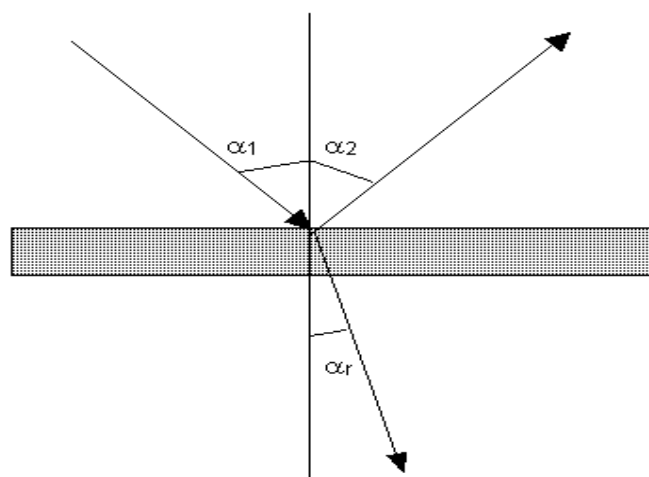


Figura 1: raggio incidente, riflesso e rifratto su superficie piana

Quando la superficie incontrata è perfettamente riflettente, non si ha rifrazione e la luce viene completamente riflessa. La riflessione di onde elettromagnetiche, come ogni fenomeno fisico è regolata da leggi fondamentali, due in particolare, ricavate dal principio di Fermat e dal principio di Huygens-Fresnel:<sup>(9)</sup>

- Il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale al piano nel punto di incidenza giacciono sullo stesso piano.

- L'angolo di incidenza e l'angolo di riflessione sono uguali.

Si ha poi che a seconda del tipo di superficie che il raggio luminoso va ad irradiare si avranno delle interazioni diverse:

### **Riflessione su uno specchio piano**

Quando una sorgente luminosa (o un corpo illuminato) viene posta di fronte a una superficie riflettente, detta specchio, sembra che in un punto all'interno dello specchio vi sia un'altra sorgente di luce. In realtà, all'interno dello specchio vi è solo un'immagine dell'oggetto, prodotta dalla riflessione della luce emessa dal corpo. Una superficie riflettente piana è detta specchio piano. Si immagini di osservare una sorgente luminosa puntiforme  $S$  di fronte a uno specchio piano: i raggi luminosi emessi dalla sorgente vengono riflessi dallo specchio, seguendo le leggi della riflessione (l'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione). Se si tracciano i prolungamenti dei raggi riflessi al di là dello specchio, essi convergono in un punto,  $S'$ , simmetrico rispetto a  $S$ , che sembra essere la sorgente dei raggi luminosi che colpiscono il nostro occhio.  $S'$  viene detta immagine virtuale di  $S$ , perché non esiste in realtà in  $S'$  una vera e propria sorgente di raggi luminosi ( $S'$  è solo il punto dove convergono i prolungamenti dei raggi che originano dall'oggetto reale).

Applicando la legge della riflessione a ogni singolo punto di un oggetto non puntiforme, è possibile costruirne l'immagine virtuale, avente le seguenti caratteristiche:

- ha le stesse dimensioni dell'oggetto reale
- si trova alla stessa distanza dallo specchio dell'oggetto reale
- è perfettamente simmetrica rispetto all'oggetto reale

L'immagine della mano destra restituita da uno specchio piano sarà quella della mano sinistra e viceversa. Analogamente, una parola riflessa in uno specchio piano appare simmetrica, scritta da destra verso sinistra anziché da sinistra verso destra. <sup>(2)(10)</sup>

### **Riflessione su specchi sferici**

Gli specchi sferici sono superfici riflettenti aventi la forma di calotte sferiche: possono essere concavi o convessi, a seconda che la riflessione avvenga sulla superficie concava (la parte interna della calotta sferica) o sulla superficie convessa (la parte esterna della calotta sferica) dello specchio. La costruzione di un'immagine su uno specchio sferico si

basa sulle seguenti regole: i raggi riflessi dai raggi incidenti paralleli all'asse ottico passano tutti per il fuoco e i raggi che passano per il fuoco vengono riflessi parallelamente all'asse ottico. Nel caso dello specchio concavo l'immagine che si forma può essere reale (ricavata dai raggi riflessi e non dai loro prolungamenti) o virtuale, rimpicciolita o ingrandita, diritta o capovolta, a seconda della posizione dell'oggetto rispetto ai punti caratteristici dello specchio:

l'oggetto sta tra  $C$  e l'infinito, l'immagine sarà reale, capovolta e rimpicciolita;

l'oggetto sta tra  $C$  e  $F$ , l'immagine sarà reale, capovolta e ingrandita;

l'oggetto sta in  $F$ , l'immagine sarà virtuale, diritta e ingrandita.

Se lo specchio concavo è grande, i raggi riflessi dai raggi paralleli all'asse ottico più lontani dall'asse stesso passano per un punto che non coincide con il fuoco, ma gli è solo vicino: di conseguenza l'immagine di una sorgente puntiforme è un disco, anziché un punto. Questo fenomeno è detto aberrazione sferica. Per avere specchi senza aberrazione sferica, per esempio per i grandi telescopi, dove si ha necessità di far convergere la luce delle stelle nel fuoco dello specchio, si costruiscono specchi parabolici, ellittici o iperbolici, che non presentano questo fenomeno. L'immagine su uno specchio convesso, costruita prolungando oltre lo specchio i raggi riflessi, è sempre virtuale, rimpicciolita e diritta. <sup>(2)(10)</sup>

### **La riflessione totale**

Quando, nel passaggio da un mezzo più denso a uno meno denso (per esempio dal vetro all'aria), la luce raggiunge la superficie di separazione con un angolo di incidenza superiore a un valore (caratteristico di ogni sostanza) detto angolo limite, si verifica il fenomeno della riflessione totale, nel quale il raggio viene completamente riflesso e non vi è rifrazione. Nel passare da un mezzo all'altro, la luce si allontana dalla perpendicolare alla superficie di separazione, quindi l'angolo di rifrazione è superiore all'angolo di incidenza: se l'angolo di incidenza è superiore al valore limite, il raggio non esce dal primo mezzo materiale, ma viene riflesso all'interno dello stesso mezzo. Per angoli esattamente pari all'angolo limite, l'angolo di rifrazione sarà di  $90^\circ$ , parallelo alla superficie di separazione. L'angolo limite per il vetro è di circa  $42^\circ$ . <sup>(2)(10)</sup>

### **Rifrazione**

La rifrazione, invece, è la deviazione che un raggio luminoso subisce nel passare da un mezzo trasparente a un altro, per la differenza della velocità di propagazione nei due

mezzi. Se il primo è meno denso del secondo (per esempio l'aria rispetto all'acqua), il raggio di luce devia avvicinandosi alla perpendicolare alla superficie di separazione, mentre se il primo mezzo è più denso del secondo (l'acqua rispetto all'aria) il raggio devia allontanandosi dalla perpendicolare. <sup>(11)</sup> Per capire meglio la rifrazione occorre introdurre una nuova grandezza che è: l'indice di rifrazione. Si definisce indice di rifrazione assoluto di una sostanza il rapporto,  $n$ , fra la velocità della luce nel vuoto e la velocità della luce in quella sostanza. Il cambio di direzione della luce avviene rispettando la legge di Snell:<sup>(12)</sup>

$$\frac{\sin(\vartheta_i)}{\sin(\vartheta_r)} = \frac{n_r}{n_i}$$

Dove:

$\vartheta_i$  = angolo di incidenza della luce che colpisce la superficie

$\vartheta_r$  = angolo di rifrazione della luce che colpisce la superficie

$n_i$  = indice di rifrazione del primo materiale di propagazione

$n_r$  = indice di rifrazione del materiale in cui la luce è rifratta

Dall'equazione ricavata da Snell si intuisce che la luce cambia direzione in modo proporzionale al seno dell'angolo di incidenza e al gradiente dell'indice di rifrazione dei due materiali.

La legge della rifrazione stabilisce che l'angolo di incidenza e l'angolo di rifrazione giacciono sullo stesso piano e sono legati tra loro dalla relazione:

$$n \sin i = n_r \sin r$$

dove  $n$  e  $n_r$  sono gli indici di rifrazione assoluti dei due mezzi. <sup>(2)</sup>

### I.II.II ASSORBIMENTO:

In fisica, l'assorbimento è la capacità propria di un materiale di assorbire l'energia associata alla radiazione elettromagnetica che si propaga all'interno di esso.<sup>(13)</sup> Vediamo ora più nel dettaglio questo fenomeno. Sappiamo, dalle conoscenze che ci derivano tramite la meccanica quantistica, che l'energia delle particelle che costituiscono la materia è quantizzata e assume solo valori discreti. Per semplicità, ora, consideriamo un elettrone. Sappiamo che queste particelle assorbono energia per passare dallo stato fondamentale ad uno eccitato. Quando un elettrone viene colpito da una radiazione

elettromagnetica, se l'energia dei fotoni è uguale alla differenza tra l'energia dello stato eccitato e quella dello stato fondamentale, la radiazione viene assorbita e la particella passa allo stato eccitato. L'energia del campo elettromagnetico si trasforma in questo modo in energia interna del materiale, come ad esempio la sua energia termica. Solitamente l'intensità dell'onda elettromagnetica non influisce sull'assorbimento (in caso contrario si parla di *assorbimento non lineare*), e la sua riduzione è anche detta attenuazione. L'assorbimento dipende sia dalla natura del materiale, sia dalla frequenza della radiazione. Un caso importante nell'assorbimento di radiazione è il corpo nero, in cui la radiazione incidente è completamente assorbita (e non vi è riflessione). Esistono diverse grandezze fisiche che vengono usate per quantificare l'assorbimento.<sup>(14)</sup>

Il coefficiente di assorbimento, che è una qualità del materiale che definisce il limite al quale questo assorbe energia (radiazione elettromagnetica) e altre grandezze strettamente legate ad esso, come la assorbività molare (assorbanza di una soluzione a concentrazione molare unitaria a una data lunghezza d'onda attraverso una cella di lunghezza ottica unitaria), il coefficiente di attenuazione di massa, l'estinzione (in astronomia) e la sezione d'urto di assorbimento.<sup>(15)</sup>

L'effetto pelle, che è la tendenza di una corrente elettrica alternata a distribuirsi dentro un conduttore in modo non uniforme: la sua densità è maggiore sulla superficie ed inferiore all'interno e la profondità di penetrazione della radiazione nel materiale.<sup>(16)</sup>

La costante di propagazione (modo in cui un'onda elettromagnetica su una linea di trasmissione si attenua e sfasa) e il numero d'onda (numero di oscillazioni per unità di lunghezza) complesso.<sup>(17)</sup>

L'indice di rifrazione (grandezza adimensionale che quantifica la diminuzione della velocità di propagazione dell'onda quando attraversa un materiale).<sup>(2)</sup>

La permittività elettrica (comportamento di un materiale dielettrico in presenza di un campo elettrico).

La resistività elettrica (attitudine di un materiale ad opporre resistenza al passaggio di cariche elettriche) e la conduttività elettrica (conduttanza elettrica specifica di un conduttore, misurata con il conducimetro).

L'assorbanza (opposto del logaritmo della trasmittanza).<sup>(18)</sup>

Fondamentale per descrivere questo fenomeno è stata la legge di Beer-Lambert, ricavata per le sostanze assorbenti in soluzione a bassa concentrazione:<sup>(19)</sup>

$$A = \varepsilon_{\lambda} l M$$

Dove:

A = assorbanza, quantità di luce assorbita dal materiale =  $-\log T$  dove T è la trasmittanza, ovvero la frazione di luce incidente con una data lunghezza d'onda

$$\varepsilon_{\lambda} = \text{coefficiente di assorbimento del materiale (proprietà del mezzo stesso)} \left( \frac{l}{mol} \text{cm}^{-1} \right)$$

l = cammino geometrico (cm)

M = molarità della soluzione  $\left( \frac{mol}{l} \right)$

Ogni sostanza, quindi, possiede, in base agli atomi che la compongono, un assorbimento specifico che da luogo ad uno spettro di assorbimento specifico. Pertanto, l'assorbimento di un materiale è spesso utilizzato per conoscere la natura del materiale stesso indicandoci le frequenze che vengono assorbite e consentendoci, in linea di massima, l'identificazione degli atomi e delle molecole che compongono il materiale in questione.<sup>(14)</sup>

### I.II.III TRASMISSIONE:

La trasmissione luminosa si esprime attraverso un fattore di trasmissione che consiste nella frazione di flusso luminoso trasmesso attraverso una superficie trasparente. Il valore del fattore di trasmissione è diverso dal valore del fattore solare perché mentre il primo tiene conto di tutto lo spettro elettromagnetico (che vedremo in seguito), il fattore solare analizza solo il flusso generato dalla componente visibile della luce. Per capire meglio, ad esempio, un vetro con trasmissione luminosa elevata e basso fattore solare garantisce buona illuminazione diurna e bassi carichi solari. Esistono alcuni materiali che sono in grado di selezionare (molto semplicisticamente) la direzione della luce che trasmettono. Questo fenomeno è spiegabile tramite la polarizzazione luminosa. In fisica la polarizzazione della radiazione elettromagnetica è una caratteristica delle onde elettromagnetiche ed indica la direzione dell'oscillazione del vettore campo elettrico durante la propagazione dell'onda nello spazio-tempo.



In un'onda elettromagnetica, il campo elettrico (indicato con  $E$  vettoriale) può oscillare (perpendicolarmente alla direzione del moto dell'onda) in molti modi diversi:

- se il campo elettrico oscilla sempre in un piano verticale, l'onda è polarizzata verticalmente.
- Se il campo elettrico oscilla sempre in un piano orizzontale, l'onda è polarizzata orizzontalmente.
- Se il campo elettrico ruota attorno alla direzione di propagazione, l'onda è polarizzata circolarmente.

Un'onda, dunque, è polarizzata quando il campo elettrico e magnetico propri dell'onda hanno caratteristiche ben definite. Nella luce naturale le onde luminose sono emesse in modo casuale da un gran numero di atomi, le direzioni del campo elettrico e magnetico, pur sempre perpendicolari alla direzione di propagazione, si distribuiscono in modo qualunque. Si tratta, quindi, di luce non polarizzata. In realtà ogni onda distribuita in modo casuale con una direzione di campi casuale si può esprimere come sovrapposizione di un'onda polarizzata orizzontalmente e un'onda polarizzata verticalmente.<sup>(2)(17)</sup>

### ***Filtri polarizzanti***

Esistono particolari filtri, detti polarizzatori, che permettono il passaggio soltanto di un determinato tipo di luce polarizzata. I filtri polarizzanti sono composti da lamelle spaziate tra loro dell'ordine della lunghezza d'onda della luce incidente. Le lamelle impediscono o smorzano l'oscillazione del campo elettrico lungo la direzione ad esse ortogonale selezionando la polarizzazione ad esse parallela. Se si fa incidere sul polarizzatore della luce naturale la luce uscente da esso ha irradiano perché, in media, metà delle onde con polarizzazione casuale che incidono sul polarizzatore sono eliminate. Un polarizzatore lineare può essere attraversato soltanto da luce polarizzata linearmente nella direzione dell'asse di trasmissione del polarizzatore. Esso contiene al suo interno delle fibre conduttrici allineate tra loro. Quando la luce incide sul filtro, il componente del campo elettrico parallelo alle fibre viene assorbito, perché è in grado di muovere i portatori di carica presenti nelle fibre e compie lavoro su di essi. Quindi passa soltanto la parte di radiazione il cui campo elettrico oscilla in direzione perpendicolare alle fibre e, così, la luce risulta polarizzata. Questa luce polarizzata è

trasmessa inalterata da un secondo polarizzatore con asse di trasmissione parallelo a quello del primo. Lo stesso polarizzatore, ruotato di  $90^\circ$ , farebbe passare soltanto luce polarizzata orizzontalmente e, quindi, blocca quella che proviene dal filtro verticale. Questo fenomeno è sfruttato negli schermi a cristalli liquidi. In essi sono utilizzati due filtri polarizzatori perpendicolari tra loro; i cristalli liquidi presenti tra i due filtri hanno la capacità di ruotare progressivamente il piano di polarizzazione della luce che li attraversa. Così la luce polarizzata verticalmente dal primo filtro giunge al secondo polarizzata orizzontalmente e passa attraverso di esso. Il punto sullo schermo è chiaro. Un campo elettrico cambia la forma dei cristalli liquidi; così la luce dal primo filtro non viene modificata e non attraversa il secondo. Il punto sullo schermo è scuro. La luce riflessa da superfici isolanti e quella diffusa dall'atmosfera terrestre risultano parzialmente polarizzate. È per questo che certi occhiali da sole hanno lenti che, oltre a essere oscurate, sono provviste di un filtro polarizzatore: esso consente di ridurre in modo efficace, per esempio, un fascio di luce che è riflesso, e quindi polarizzato, da una vetrina posta a fianco della strada e che potrebbe «accecare» un autista che lo riceve direttamente. <sup>(20)</sup>

### ***La legge di Malus***

L'onda, dunque, è definita polarizzata se è possibile esprimere tramite una legge (funzione) la variazione di direzione di  $\zeta$  (vettore funzione d'onda) nel piano ortogonale alla propagazione in funzione della coordinata spaziale di propagazione e in funzione del tempo. Questa espressione fu introdotta nel 1808 dal fisico francese Étienne-Louis Malus il quale riteneva che la luce fosse composta di particelle dotate di polo nord e polo sud e che nella luce polarizzata tutti i poli fossero orientati nella stessa direzione.

Questa teoria fu abbandonata poco tempo dopo, ma l'espressione di Malus è rimasta ed è la seguente:

$$I = I_0 \cos^2(\theta)$$

Dove:

- $I$  è l'intensità in uscita dal filtro
- $I_0$  è l'intensità in entrata

- $\theta$  è l'angolo tra l'asse di trasmissione e il piano di vibrazione del campo elettrico

Questa legge afferma, dunque, che l'intensità luminosa di un raggio di luce che esce da un filtro polarizzatore, il cui asse polarizzatore forma un angolo  $\theta$  con il piano di vibrazione dell'onda luminosa, corrisponde all'intensità luminosa in entrata del raggio stesso per il coseno al quadrato dell'angolo formato. <sup>(21)</sup>

#### I.II.IV DIFFRAZIONE:

*“Qualunque deviazione di un raggio di luce non imputabile a riflessione o rifrazione è chiamato diffrazione.”*

Questa è la classica definizione riscontrata nel trattato classico di Ottica di Arnold Sommerfeld. <sup>(22)</sup>

Anche la diffrazione, dunque, come tutti i fenomeni incontrati finora, è associata alla deviazione della traiettoria di propagazione delle onde dovuta ad un ostacolo. È caratteristica di qualsiasi tipo di onda, dall'onda sonora a quella generata dall'acqua, da quella elettromagnetica alle onde radio. Si verifica anche nelle situazioni più peculiari in cui la materia mostra proprietà ondulatorie, in accordo con la dualità onda-particella della luce. Gli effetti generati dalla diffrazione sono più rilevanti e maggiormente osservabili e apprezzabili quando la lunghezza d'onda dell'onda in questione è comparabile e in rapporto con la dimensione dell'ostacolo. Per esempio, per quanto riguarda la luce visibile, (descritta meglio in seguito) che ha una lunghezza d'onda caratteristica attorno a  $0,5 \mu\text{m}$ , si hanno fenomeni di diffrazione con ostacoli di dimensione sub-millimetrica. Per capire meglio di cosa stiamo esattamente parlando occorre dire che la diffrazione non è un fenomeno così astratto, bensì ci sono molte situazioni quotidiane in cui vi assistiamo. Le tracce incise sulla superficie di un CD o di un DVD, per esempio, agiscono come un reticolo di diffrazione, creando il familiare effetto arcobaleno; anche i piccoli ologrammi, ad esempio delle carte di credito, si basano sulla diffrazione. In natura, si possono osservare colori cangianti dovuti a diffrazioni interferenziali, come quelli delle piume del pavone, o della corazza di alcuni coleotteri, o delle ali di molte farfalle, che sono colorate grazie all'interferenza delle onde diffratte da parte di microscopiche scaglie disposte regolarmente.

La trattazione sulla diffrazione che verrà in seguito presentata si baserà sulle due condizioni di Fraunhofer, che implicano la possibilità di considerare l'onda incidente sulla fenditura e sullo schermo di osservazione come un'onda piana.<sup>(23) (24)</sup>

1. La prima consiste, nel caso di singola fenditura, nella relazione:

$$R > \frac{a^2}{\lambda}$$

dove:

- $a$  : spessore della fenditura
- $R$  : distanza tra la sorgente puntiforme di luce e la fenditura
- $\lambda$  : lunghezza d'onda della luce.

2. Mentre la seconda richiede che la distanza  $D$  tra la fenditura e lo schermo di osservazione sia :

$$D > \frac{a^2}{\lambda}$$

Queste sono le condizioni per cui sia sulla fenditura, sia sullo schermo di osservazione l'onda incidente può essere considerata un'onda piana.

### ***Spiegazione della diffrazione di un'onda piana:***

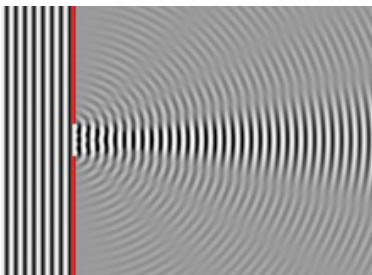


Figura2: Simulazione della diffrazione di un'onda piana attraverso una fenditura di ampiezza pari a quattro volte la lunghezza d'onda.

La diffrazione può venire *intuitivamente* "letta" come una richiesta di continuità da parte del fronte d'onda che subisce una discontinuità dal bordo (o dai bordi) di un ostacolo. La figura 2, soprastante, che simula la diffrazione di un'onda piana attraverso la fenditura, ricorda quanto osservato in un'onda alla superficie dell'acqua quando passa attraverso una fenditura. Oltre la fenditura il fronte d'onda incidente è "tagliato" dai due

bordi. La parte di fronte d'onda contigua a ciascun bordo piega attorno al bordo stesso fornendo così una perturbazione continua. Secondo la chiave di lettura della teoria dell'onda di bordo è come se l'ostacolo diventasse una sorgente (fittizia) di un'onda a simmetria cilindrica che si sovrappone tanto all'onda trasmessa secondo le leggi dell'ottica geometrica e, ovviamente, all'altra onda di bordo. Secondo la chiave di lettura del principio di Huygens, il fronte d'onda incidente è l'involuppo di onde elementari sferiche. Qui, le sorgenti (*fittizie*) di tali onde sono nei punti della fenditura. L'involuppo di tali onde sferiche in prossimità del bordo si propaga dando luogo a nuovi fronti d'onda successivi. Nonostante la diversità nella descrizione del fenomeno, sia il modello dell'onda di bordo che il modello basato sul principio di Huygens sono pienamente equivalenti. <sup>(2) (25)</sup>

Ora che abbiamo visto che cos'è la diffrazione e come si spiega vediamo più nel dettaglio le leggi che regolano questo fenomeno fisico: <sup>(2)</sup>

- la larghezza del massimo centrale della figura di diffrazione della fenditura singola è il doppio delle frange laterali.
- la larghezza è inversamente proporzionale all'ampiezza della fenditura: a fessure molto piccole corrispondono frange di diffrazione molto larghe e viceversa.
- gli angoli sotto cui le frange sono viste, non dipendono dalla scala dell'esperimento, ma solo dal rapporto tra la lunghezza d'onda e l'ampiezza della fenditura.
- in qualunque fenomeno di Fresnel, un ostacolo simmetrico presenta *sempre* luce al centro dell'ombra (è il tipico caso della “macchia di Poisson”).

#### I.II.V INTERFERENZA:

L'interferenza è l'ultimo fenomeno fisico di interazione che andremo ad analizzare. È dovuto, in generale, alla sovrapposizione, in un punto dello spazio, di due o più onde. Quello che si osserva è che l'intensità (o ampiezza) dell'onda risultante in quel punto può essere diversa rispetto alla somma delle intensità associate ad ogni singola onda di partenza; in particolare, essa può variare tra un minimo, in corrispondenza del quale non si osserva alcun fenomeno ondulatorio, ed un massimo che non coincide con la somma delle intensità delle due onde. In generale si dice che l'interferenza è costruttiva quando l'intensità risultante è maggiore rispetto a quella di ogni singola intensità

originaria, e distruttiva in caso contrario. Analizziamo meglio ora queste due situazioni.

(26)

***Interferenza costruttiva e distruttiva:***

Definita la differenza di fase  $\delta = 2 \frac{\pi}{\lambda} d \sin(\theta)$

con:

$d$  = distanza tra le sorgenti

$\lambda$  = lunghezza d'onda

l'interferenza è costruttiva se si verifica che  $\frac{\delta}{2} = m\pi$ , cioè  $d \sin(\theta) = 2m \frac{\lambda}{2}$  (un numero pari di volte mezza lunghezza d'onda), mentre è distruttiva se si verifica che

$\frac{\delta}{2} = (2m+1) \frac{\pi}{2}$  cioè  $d \sin(\theta) = (2m+1) \frac{\lambda}{2}$  (un numero dispari di volte mezza lunghezza d'onda).

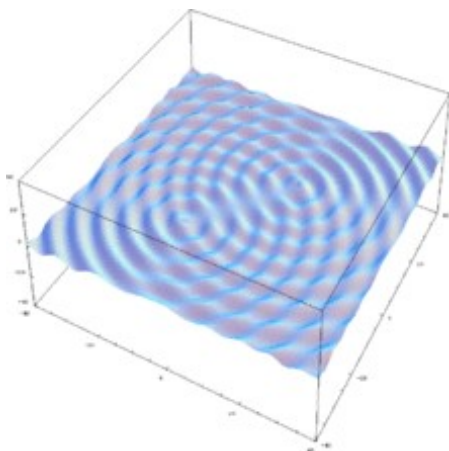


Figura 3: Interferenza di due onde sinusoidali sulla superficie di un liquido

Solitamente si usa il termine “interferenza” per indicare l'interazione tra due onde coerenti e provenienti, di norma, dalla stessa sorgente. Come per il caso della diffrazione e di tutti gli altri fenomeni fisici legati alla luce, fenomeni di interferenza si osservano quotidianamente e non riguardano necessariamente le onde elettromagnetiche. Possono essere, ad esempio quelli che riguardano le increspature formatesi su di uno specchio d'acqua (figura soprastante), oppure i battimenti tra onde sonore.

### **Descrizione:**

Due onde generate da sorgenti a frequenza differente non danno luogo ad interferenza, perché oscillazioni con periodo diverso sono disaccoppiate in potenza. Consideriamo allora il caso di due onde che si sovrappongono con la medesima lunghezza d'onda. I casi estremi sono due: nel primo, le onde sono in concordanza di fase, cioè si sovrappongono esattamente dando luogo ad un'onda di ampiezza pari alla somma delle singole ampiezze, mentre nel secondo sono in opposizione di fase e dunque si elidono esattamente. Si parla allora rispettivamente di interferenza totalmente costruttiva e di interferenza totalmente distruttiva, a seconda dello sfasamento (nullo nel primo, presente e pari a  $\pi$  nel secondo). In generale, si verifica facilmente che la sovrapposizione di due onde di ampiezza  $A$  e sfasate di  $\delta$  genera una nuova onda di ampiezza pari a  $2A \cos\left(\frac{\delta}{2}\right)$ . A seconda delle relazioni che intercorrono tra le onde che interferiscono, è comunque possibile che gli sfasamenti dipendano dalla coordinata spaziale. Dunque, si potranno osservare regioni in cui l'interferenza è totalmente costruttiva (dette *massimi di interferenza*, corrispondenti a frange luminose chiare) alternate ad altre in cui invece l'interferenza è totalmente distruttiva (dette *minimi di interferenza*, corrispondenti a frange non illuminate scure). L'ampiezza di queste regioni è legata sia alla disposizione geometrica delle sorgenti, sia alla lunghezza d'onda; si capisce abbastanza facilmente che, tanto più piccola è la lunghezza d'onda, tanto più piccole e cadenzate saranno queste frange. Questo è uno dei motivi per il quale non si riescono ad osservare quotidianamente fenomeni di interferenza luminosa, ma non è il solo; l'altro è legato alla decorrenza delle sorgenti. Infatti, le più comuni fonti di luce (il sole, le lampadine ad incandescenza e così via) emettono svariati pacchetti di radiazioni che si sovrappongono in maniera completamente casuale, a seconda dell'istante al quale vengono generati: in una situazione del genere quindi, la distribuzione delle frange varierà così rapidamente da non poter essere seguita dall'occhio umano (a causa del fenomeno di persistenza delle immagini sulla retina), che quindi osserverà solo una distribuzione regolare di luminosità. L'unico modo per poter osservare questi fenomeni è disporre di due o più sorgenti coerenti, ad esempio sfruttando il fenomeno della diffrazione come fece Young nel suo esperimento della doppia fenditura (vedi figura 4).

(27)

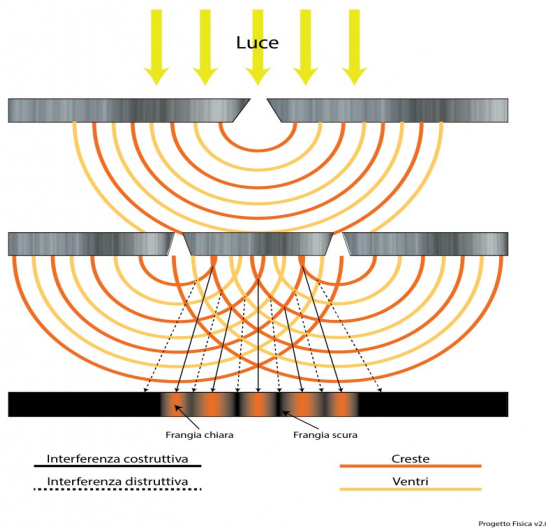


Figura 4: esperimento della doppia fenditura di Young

## Capitolo II: Lo spettro elettromagnetico

Per capire bene lo spettro elettromagnetico partiamo sempre da un'osservazione di vita quotidiana che a molti è capitata di vedere e che si basa sui fenomeni di interazione luce-materia fin'ora descritti. Il fenomeno in questione è la scomposizione della luce bianca attraverso un prisma.



Figura 5: scomposizione della luce attraverso un prisma

Come si nota nella figura 5 facendo passare un fascio di luce bianca (per esempio la luce solare) attraverso un prisma di vetro di forma triangolare, all'uscita del prisma la luce, raccolta su uno schermo, risulta scomposta nei colori fondamentali dello spettro luminoso. Questo fenomeno, detto dispersione della luce, viene spiegato attraverso la rifrazione. La velocità della luce in un mezzo materiale come il vetro risulta infatti



leggermente diversa a seconda della sua lunghezza d'onda. Poiché a differenti lunghezze d'onda la luce presenta diversi colori, e l'indice di rifrazione dipende dalla velocità della luce nel mezzo, all'uscita del prisma il raggio di luce avrà angoli di rifrazione leggermente diversi a seconda del colore: minore è la lunghezza d'onda, maggiore è l'angolo di rifrazione.<sup>(2)</sup>

Questo fenomeno fu studiato per la prima volta da Isaac Newton nel 1666. Noto soprattutto per le sue scoperte nel campo della meccanica, ma grande studioso di ottica, Newton dimostrò con questo esperimento che la luce bianca è in realtà formata da tutti i colori, secondo uno spettro che va dal rosso al violetto. A sostegno di questa asserzione, Newton fece passare un raggio di luce colorata, ottenuta dalla scomposizione, in un secondo prisma: in questo caso la luce non subiva ulteriore scomposizione. La scomposizione della luce è un fenomeno reversibile: se il ventaglio di luce colorata viene fatto passare attraverso un secondo prisma, capovolto rispetto al primo, la luce bianca riappare, perché il secondo prisma inverte la situazione stabilitasi con il primo. La scomposizione della luce nei colori dello spettro è all'origine del fenomeno dell'arcobaleno: passando attraverso le goccioline d'acqua presenti nell'atmosfera e attraverso quelle di pioggia, che fungono da minuscoli prismi, la luce del Sole si scompone nei colori dello spettro e forma l'arco colorato nel cielo.<sup>(28)</sup> In genere, lo spettro formato dalla luce bianca proveniente dal Sole è uno spettro continuo, nel senso che appare come una striscia continua composta dai vari colori. Si è dimostrato quindi che la luce bianca, che sembrava un'unica luce è in realtà composta da diverse radiazioni elettromagnetiche di differenti lunghezze d'onda. Si è quindi introdotta una sorta di scala dove si sono poste queste radiazioni con lunghezza d'onda crescente. Questo spettro è definito anche spettro elettromagnetico. In fisica lo spettro elettromagnetico (abbreviato spettro EM) indica l'insieme di tutte le possibili frequenze delle radiazioni elettromagnetiche. Pur essendo lo spettro continuo, è possibile una suddivisione puramente convenzionale ed indicativa in vari intervalli o bande di frequenza, dettata a partire dallo spettro ottico. Quantunque si distinguano varie zone nello spettro, non si può dire che esistano tra esse limiti netti. L'intero spettro è suddiviso nella parte di spettro visibile che dà vita alla luce e le parti di spettro non visibile a lunghezza d'onda maggiori e minori dello spettro visibile. Le onde di lunghezza nell'intervallo tra la luce visibile e le onde radio, a bassa intensità hanno poca energia e risultano scarsamente dannose, le radiazioni comprese tra l'ultravioletto e i

raggi gamma hanno più energia, sono ionizzanti e quindi possono danneggiare gli esseri viventi. <sup>(29)</sup>

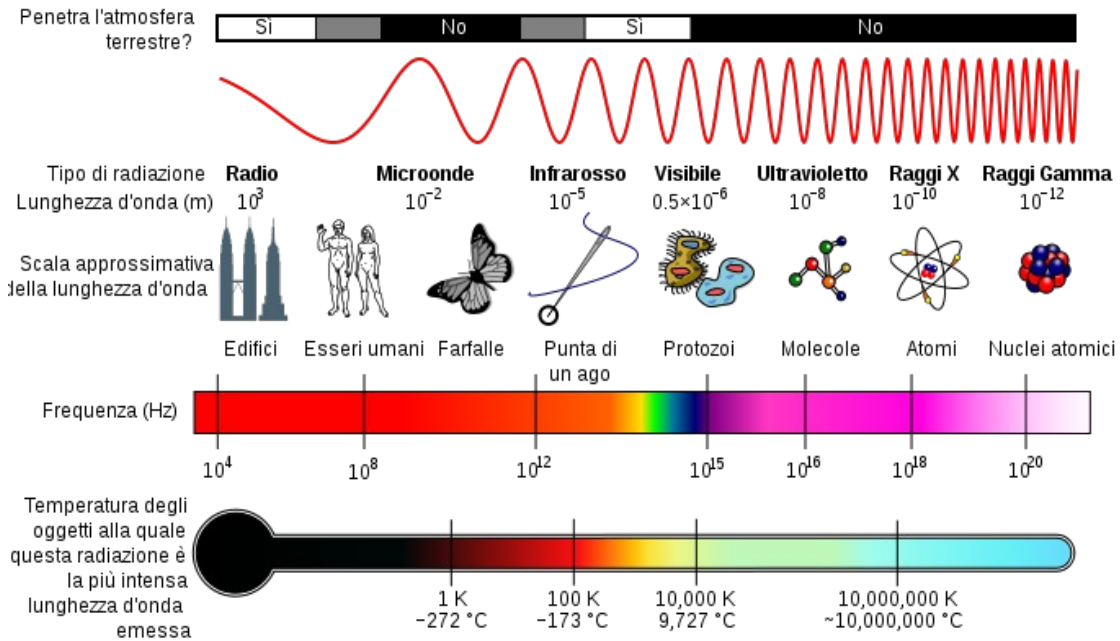


Figura 6: Spettro elettromagnetico

### II.1 Suddivisione in bande:

La radiazione elettromagnetica si espande come valori di lunghezza d'onda da lunghezze di anche diversi chilometri fino a lunghezze di alcuni pm (tabella I).

| Tipo di radiazione elettromagnetica | Frequenza         | Lunghezza d'onda |
|-------------------------------------|-------------------|------------------|
| Onde radio                          | $\leq 250$ MHz    | 10 km - 10 cm    |
| Microonde                           | 250 MHz - 300 GHz | 10 cm - 1 mm     |
| Infrarossi                          | 300 GHz - 428 THz | 1 mm - 700 nm    |
| Visibile                            | 428 THz - 749 THz | 700 nm - 400 nm  |
| Ultravioletto                       | 749 THz - 30 PHz  | 400 nm - 10 nm   |
| Raggi X                             | 30 PHz - 300 EHz  | 10 nm - 1 pm     |
| Raggi gamma                         | $\geq 300$ EHz    | $\leq 1$ pm      |

Tabella I: bande e relative frequenze e lunghezze d'onda

Come l'orecchio ha dei limiti nella percezione del suono, l'occhio umano ha dei limiti nella visione della luce. In entrambi i casi, vi sono limiti superiori e inferiori. Partiamo dall'analisi entro questi limiti.

## **II.I.I Spettro ottico:**

È interessante rilevare che solo una parte assai limitata dello spettro contiene radiazioni visibili all'occhio. L'occhio non può vedere la radiazione elettromagnetica oltre la zona violetta dello spettro e al di sotto della zona rossa. Anche se l'ultima lunghezza d'onda considerata nel campo visibile è di 0,4  $\mu\text{m}$ , alcune persone possono vedere la radiazione con una lunghezza d'onda anche di solo 0,3  $\mu\text{m}$ . Le lunghezze d'onda che vengono, invece, recepite dal nostro sistema visivo. Queste vanno a costituire lo spettro visibile. Lo spettro visibile è quella parte dello spettro elettromagnetico che cade tra il rosso e il violetto. La lunghezza d'onda della luce visibile nell'aria va indicativamente dai 390 ai 700 nm. <sup>(30)</sup> In termini di frequenze, lo spettro visibile varia tra i 770 ed i 430 THz. La massima sensibilità media dell'occhio umano probabilmente si ha ai 560 nm (540 THz) dello spettro elettromagnetico, più o meno in corrispondenza del colore giallo citrino. Le parti di luce visibile dello spettro sono emesse da corpi incandescenti, quali ad esempio il Sole o una lampadina. Vale la pena ricordare che, in base alla legge di Stefan-Boltzmann, ogni corpo a qualsiasi temperatura (purché superiore allo zero assoluto) emette radiazione elettromagnetica. Tuttavia i corpi che ci appaiono incandescenti sono appunto solo quelli che emettono un'apprezzabile quantità di radiazione nelle frequenze a cui il nostro occhio è sensibile. Lo spettro delle diverse lunghezze d'onda è stato poi suddiviso in piccole bande per un totale di sette colori: violetto, blu, ciano, verde, giallo, arancione, rosso (tabella II). <sup>(31)</sup>

| <u>Colore</u>           | <u>Frequenza</u> | <u>Lunghezza d'onda</u> |
|-------------------------|------------------|-------------------------|
| <b><u>Violetto</u></b>  | 668-789 THz      | 380–450 nm              |
| <b><u>Blu</u></b>       | 631-668 THz      | 450–475 nm              |
| <b><u>Ciano</u></b>     | 606-631 THz      | 476-495 nm              |
| <b><u>Verde</u></b>     | 526-606 THz      | 495–570 nm              |
| <b><u>Giallo</u></b>    | 508-526 THz      | 570–590 nm              |
| <b><u>Arancione</u></b> | 484-508 THz      | 590–620 nm              |
| <b><u>Rosso</u></b>     | 400-484 THz      | 620–750 nm              |

Tabella II: Bande nel visibile

Spingiamoci ora oltre i limiti dell'occhio umano. Quali radiazioni ci sono oltre il limite del viola e del rosso?

## **II.I.II Radiazione ultravioletta**

La radiazione con una lunghezza d'onda inferiore a 40 nm è denominata luce ultravioletta. Dal latino, infatti, *ultra*, “oltre” significa oltre il violetto. Questa zona scende fino a una lunghezza d'onda di circa 10 nm. Al di sotto di questa zona, si trova quella dei raggi X (vedi figura soprastante) e si stende fino a lunghezza d'onda di circa 0,006 nm. La parte inferiore ai raggi X dello spettro si compone di onde denominate raggi gamma.. Il campo di raggi gamma rappresenta il risultato della disintegrazione radioattiva. La radiazione ultravioletta costituisce circa il 10% di tutta la luce emessa dalla stella sole, ma viene anche prodotta da gas ionizzanti e lampade particolari (lampade di Wood). Come già detto in precedenza molte volte, i raggi ultravioletti e tutti i tipi di radiazioni che li seguono sulla scala sono invisibili all'uomo nella maggior parte dei casi. Tuttavia ci sono alcune rare eccezioni in cui bambini e ragazzi riescono a spingersi fino a 310 nm di percezione.<sup>(32) (33)</sup> Come mai? In generale questo tipo di radiazione non è visibile a causa della presenza fisiologica del cristallino all'interno del nostro occhio che provvede a filtrare le frequenze UVB o maggiori. Ecco che persone affette da patologie come l'afachia (assenza di cristallino) possono vedere anche nella banda UV. Insetti, alcune specie di mammiferi e uccelli,, vedono molto bene nelle lunghezze d'onda delle radiazioni UV.

### **Descrizione**

Come abbiamo visto in precedenza per la luce visibile, anche i raggi ultravioletti possono essere suddivisi in differenti bande, diversamente definite a seconda dei campi di studio. La suddivisione più immediata è:

- UV vicino o prossimo (380-200 nm) e UV estremo (200-10 nm).

Qualora si consideri l'effetto dei raggi UV sulla salute umana, la gamma delle lunghezze d'onda UV è in genere suddivisa in:

- UV-A (400-315 nm), UV-B (315-280 nm) e UV-C (280-100 nm).

### **Bande**

Abbiamo detto che le radiazioni ultraviolette possono essere divise all'interno in sotto gruppi o bande. Lo standard ISO sulla determinazione dell'irradiamento solare (ISO-21348) descrive i seguenti intervalli (tabella III):<sup>(34)</sup>

| Nome                          | Abbreviazione     | Intervalli di lunghezza d'onda (espressi in nanometri) | Energia per fotone (in elettronvolt) | Note / nomi alternativi   |
|-------------------------------|-------------------|--|--------------------------------------|---|
| <b>Ultravioletto</b>          | UV                | 100 – 400  | 3,10 – 12,4                          |   |
| Ultravioletto A               | UVA               | 315 – 400  | 3,10 – 3,94                          | Onde lunghe UV, luce nera o luce Wood   |
| Ultravioletto B               | UVB               | 280 – 315  | 3,94 – 4,43                          | Onde medie UV   |
| Ultravioletto C               | UVC               | 100 – 280  | 4,43 – 12,4                          | Onde corte UV, germicida  |
| Ultravioletto Vicino          | NUV               | 300 – 400  | 3,10 – 4,13                          | Intervallo spesso visibile a diverse specie di uccelli, insetti e pesci   |
| Ultravioletto Medio           | MUV               | 200 – 300  | 4,13 – 6,20                          |   |
| Ultravioletto Lontano         | FUV               | 122 – 200  | 6,20 – 10,16                         |   |
| Riga Lyman-alfa dell'idrogeno | H Lyman- $\alpha$ | 121 – 122  | 10,16 – 10,25                        | Linee spettrali a 121,6 nm, 10,20 eV. Radiazione ionizzante a lunghezze d'onda più corte                                    |
| Ultravioletto da vuoto        | VUV               | 10 – 200   | 6,20 – 124                           | Fortemente assorbita dall'ossigeno atmosferico, anche se le lunghezze d'onda tra 150–200 nm si propagano attraverso l'azoto |
| Ultravioletto Estremo         | EUV               | 10 – 121   | 10,25 – 124                          | Radiazione completamente ionizzata (secondo alcune definizioni); completamente assorbita dall'atmosfera                     |

Tabella III: Bande nell'ultravioletto

Abbiamo visto che una delle possibili sorgenti delle radiazioni UV era rappresentata dal sole. In generale, oggetti molto caldi, a causa dell'emissione di corpo nero, emettono radiazione UV. Il Sole emette radiazione ultravioletta a tutte le lunghezze d'onda, incluso l'ultravioletto da vuoto, ma arriva anche, come visto, a radiazioni inferiori ai 10 nm (raggi X). La grandezza fisica che esprime l'intensità di queste radiazioni è l'indice UV. Le stelle particolarmente calde emettono più UV del Sole. La luce solare nell'atmosfera terrestre più esterna è composta per circa il 50% di luce infrarossa, 40%

di luce visibile e 10% di luce ultravioletta, per una intensità totale di circa  $1400 \text{ W/m}^2$  nel vuoto <sup>(35)</sup>. Sulla superficie terrestre le percentuali della luce solare diventano: 44% luce visibile, 3% ultravioletto (con il Sole alla massima altezza nel cielo zenit) e il rimanente è rappresentato dall'infrarosso <sup>(36)</sup> <sup>(37)</sup>. Quindi, l'atmosfera blocca circa il 77% dei raggi UV del sole e quasi totalmente le lunghezze d'onda minori. Della radiazione ultravioletta che raggiunge la superficie terrestre, oltre il 95% è rappresentato dagli UVA con lunghezza d'onda maggiore, una piccola parte dagli UVB, che non viene assorbita dall'ozonosfera terrestre. Sostanzialmente non ci sono gli UVC.

### **Ma che cos'è questa ozonosfera?**

Le bande più corte degli UVC, così come la radiazione UV più energetica prodotta dal Sole, sono assorbite dall'ossigeno e generano ozono. Lo strato dell'atmosfera dove si concentra tale forma allotropica dell'ossigeno viene detta ozonosfera. Il meccanismo di produzione dell'ozono è causato dalla fotolisi mediante UV dell'ossigeno biatomico e la successiva reazione con molecole di ossigeno biatomico. L'ozonosfera ha una importanza fondamentale in quanto assorbe la maggior parte degli UVB e dei rimanenti UVC non assorbiti dall'ossigeno. La frazione che rimane degli UVB nella radiazione UV, dopo essere passata attraverso l'atmosfera, dipende dalle condizioni atmosferiche: nuvole dense bloccano efficientemente gli UVB; ma nei cieli parzialmente nuvolosi non tutti gli UVA e UVB sono bloccati, ma vengono diffusi in tutte le direzioni dell'atmosfera. <sup>(38)</sup> Tale effetto è prodotto dallo Scattering di Rayleigh, responsabile anche della colorazione blu del cielo.

## Ultravioletto solare

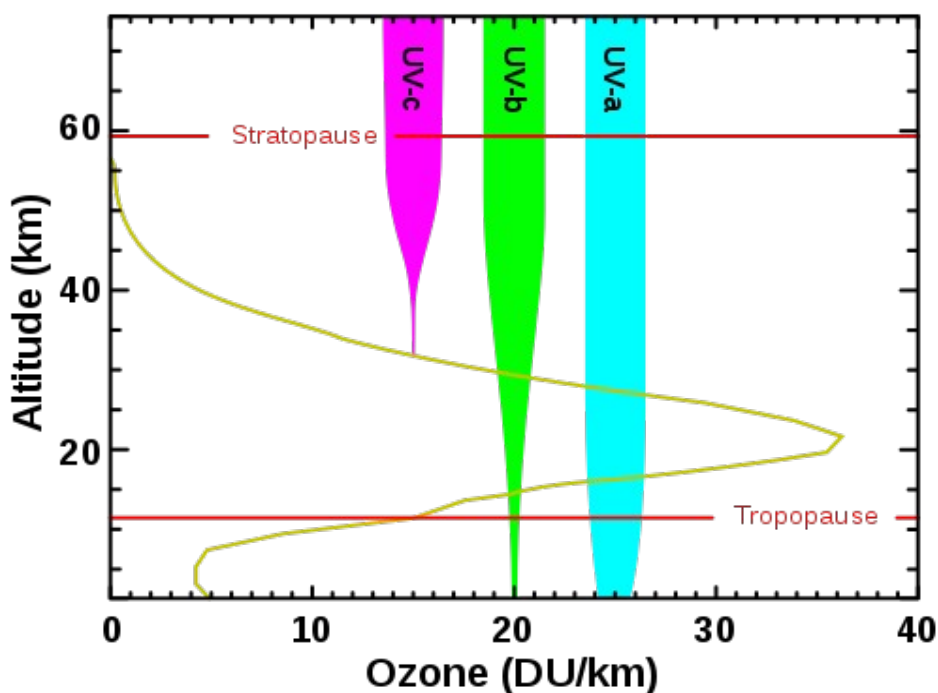


Figura 8: Livelli di ozono a varie altitudini e blocco di diverse bande di radiazione ultravioletta.

Sostanzialmente, come si vede dalla figura soprastante e come discusso in precedenza tutti i raggi UVC sono bloccati a circa 30 km di altitudine dall'ossigeno biatomico (100–200 nm) o dall'ozono (ossigeno triatomico) (200–280 nm) nell'atmosfera. Lo strato di ozono blocca per lo più i raggi UVB. Tuttavia, il passaggio dei raggi UVA non viene quasi per nulla influenzato dall'ozono, e molte di queste radiazioni raggiungono la superficie terrestre.

### **II.I.III Radiazione infrarossa**

Dalla parte dello spettro dove la luce ha lunghezza d'onda maggiore, cioè oltre il rosso, si trova la zona denominata infrarossa. La radiazione infrarossa è quella dello spettro elettromagnetico con frequenza inferiore a quella della luce visibile. Essa viene spesso associata con il concetto di calore e di radiazione termica per un motivo molto semplice. Ogni oggetto, infatti, possedente una temperatura maggiore dello zero assoluto, emette spontaneamente radiazione in questa banda. Più precisamente, seguendo le indicazioni della legge di Wien sappiamo che un oggetto più aumenta la sua temperatura più sposta il picco di emissione verso il visibile fino a che non diventa

incandescente.. La banda di questa radiazione va da 0,7  $\mu\text{m}$  a 0,4 mm. Si trova, dunque, al di sotto dell'intervallo visibile. Il termine , infatti, significa, “sotto il rosso” (dal latino *infra*, “sotto”). Quindi, viene la zona delle microonde, con lunghezze d'onda da 0,4 mm a 100 cm. Oltre a questa, vi sono tre campi di onde radio: onde corte da 1 m a 100 m; onde medie da 200 m a 600 m; onde lunghe superiori a 600 m. Le onde radio possono essere generate da scariche che producono onde elettro magnetiche. <sup>(39)</sup>

Come si sono scoperte queste radiazioni invisibili?

Nel 1800 il fisico William-Herschel pose un termometro a mercurio nello spettro prodotto da un prisma di vetro, per misurare il calore delle differenti bande di luce colorate. Scopri che il termometro continuava a salire anche dopo essersi mosso oltre il bordo rosso dello spettro, dove non c'era più luce visibile. Fu il primo esperimento che mostrò come il calore poteva trasmettersi grazie ad una forma invisibile di luce. Il limite inferiore dell'infrarosso veniva spesso definito come 1 mm poiché a questa lunghezza d'onda termina l'ultima delle bande radio classificate (EHF, 30–300 GHz). Ciononostante, la regione da circa 100  $\mu\text{m}$  a 1 mm era considerata una "terra di nessuno", difficilmente indagabile a causa della mancanza di sensori e soprattutto di sorgenti luminose adatte ad operare in questa banda. Dalla fine della prima decina degli anni 2000 queste limitazioni tecniche stanno cadendo, dando origine ad una intensa attività di ricerca su questa parte dello spettro elettromagnetico che si preferisce ormai definire regione della radiazione Tera-hertz, detta anche dei "raggi T".

### **Classificazioni**

Data la vastità dello spettro infrarosso e molteplicità di utilizzi delle radiazioni collocate in vari punti al suo interno, sono state sviluppate anche in questo tratto di spettro, come per gli ultravioletti e il visibile, diverse classificazioni in ulteriori sotto-regioni. Sfortunatamente non esiste un unico standard riconosciuto per queste bande, ma più convenzioni settoriali, nate in differenti campi di ricerca e dell'ingegneria per suddividere le regioni collegate a diverse classi di fenomeni nella branca di volta in volta interessata (tabella IV). <sup>(40)</sup>



| <b>Nome banda</b>                  | <b>Limite superiore</b>             | <b>Limite inferiore</b>                 |
|------------------------------------|-------------------------------------|---|
| <b>Standard DIN/CIE</b>            |                                     |   |
| IR-A                               | 0,7 $\mu\text{m}$ – 428 THz         | 1,4 $\mu\text{m}$ – 214 THz             |
| IR-B                               | 1,4 $\mu\text{m}$ – 214 THz         | 3 $\mu\text{m}$ – 100 THz               |
| IR-C                               | 3 $\mu\text{m}$ – 100 THz           | 1000 $\mu\text{m}$ (1 mm) – 300 GHz     |
| <b>Classificazione astronomica</b> |                                     |   |
| vicino                             | 0,7 – 1 $\mu\text{m}$ – 428-300 THz | 5 $\mu\text{m}$ – 60 THz                |
| medio                              | 5 $\mu\text{m}$ – 60 THz            | 25-40 $\mu\text{m}$ – 12-7,5 THz        |
| lontano                            | 25-40 $\mu\text{m}$ – 12-7,5 THz    | 250-350 $\mu\text{m}$ – 1,2 Thz-428 GHz |
| <b>Sistema ingegneristico</b>      |                                     |   |
| vicino ( <b>NIR</b> )              | 0,75 $\mu\text{m}$ – 400 THz        | 1,4 $\mu\text{m}$ – 214 THz             |
| onda corta ( <b>SWIR</b> )         | 1,4 $\mu\text{m}$ – 214 THz         | 3 $\mu\text{m}$ – 100 THz               |
| onda media ( <b>MWIR</b> )         | 3 $\mu\text{m}$ – 100 THz           | 8 $\mu\text{m}$ – 37,5 THz              |
| onda lunga ( <b>LWIR</b> )         | 8 $\mu\text{m}$ – 37,5 THz          | 15 $\mu\text{m}$ – 20 THz               |
| lontano ( <b>FIR</b> )             | 15 $\mu\text{m}$ – 20 THz           | 1000 $\mu\text{m}$ – 300 GHz            |

Tabella IV: suddivisione nomenclatura delle bande.

Nelle lunghezze d'onda adiacenti a quelle visibili fino ad un paio di micron, i fenomeni di interazione associati a questo tipo di radiazione sono essenzialmente assimilabili a quelli della luce, anche se la risposta dei materiali alla luce visibile non è per nulla indicativa di quella alla luce infrarossa. Oltre i 2  $\mu\text{m}$  ad esempio il normale vetro è opaco, così come molti gas, cosicché esistono finestre di assorbimento nelle quali l'aria è opaca e pertanto le frequenze che vi ricadono sono assenti dallo spettro solare osservato a terra. Una nuova finestra di trasmissione si apre fra 3 e 5  $\mu\text{m}$ , corrispondente al picco di emissione di corpi molto caldi (la banda utilizzata, ad esempio, dai missili a ricerca termica).

Al contrario, molti materiali che ai nostri occhi appaiono perfettamente opachi, sono più o meno trasparenti a queste lunghezze d'onda. Ad esempio silicio e germanio a queste lunghezze d'onda presentano opacità ridottissime, tanto che vengono usati per fabbricare lenti e fibre ottiche (attenuazioni nell'ordine di 0,2 dB/km per i 1550 nm). Pure molte materie plastiche sintetiche hanno una buona trasparenza a queste radiazioni. A lunghezze d'onda maggiori si hanno fenomeni via via più simili alle onde radio.

## **Utilizzi**

La radiazione infrarossa, seppur invisibile, è ampiamente usata ai giorni nostri in moltissimi oggetti anche di uso comune.

Viene impiegata, ad esempio:

- In apparecchi a visione notturna dove sensori ad infrarossi convertono la radiazione in un'immagine.
- Telecamere ad infrarosso
- Trasmissione dei dati: nei telecomandi dei televisori, tra computer portatili, tablet, palmari, cellulari, sensori di movimento.
- Spettroscopia ad infrarossi, usata nella caratterizzazione dei materiali.

## **Capitolo III: Interazione tra la luce e l'occhio**

Ora che abbiamo visto le lunghezze d'onda differenti che riempiono il vasto spettro luminoso, possiamo analizzare come ciascuna di esse interagisca con il sistema visivo umano.

### STRUTTURA OCULARE DI RICEZIONE

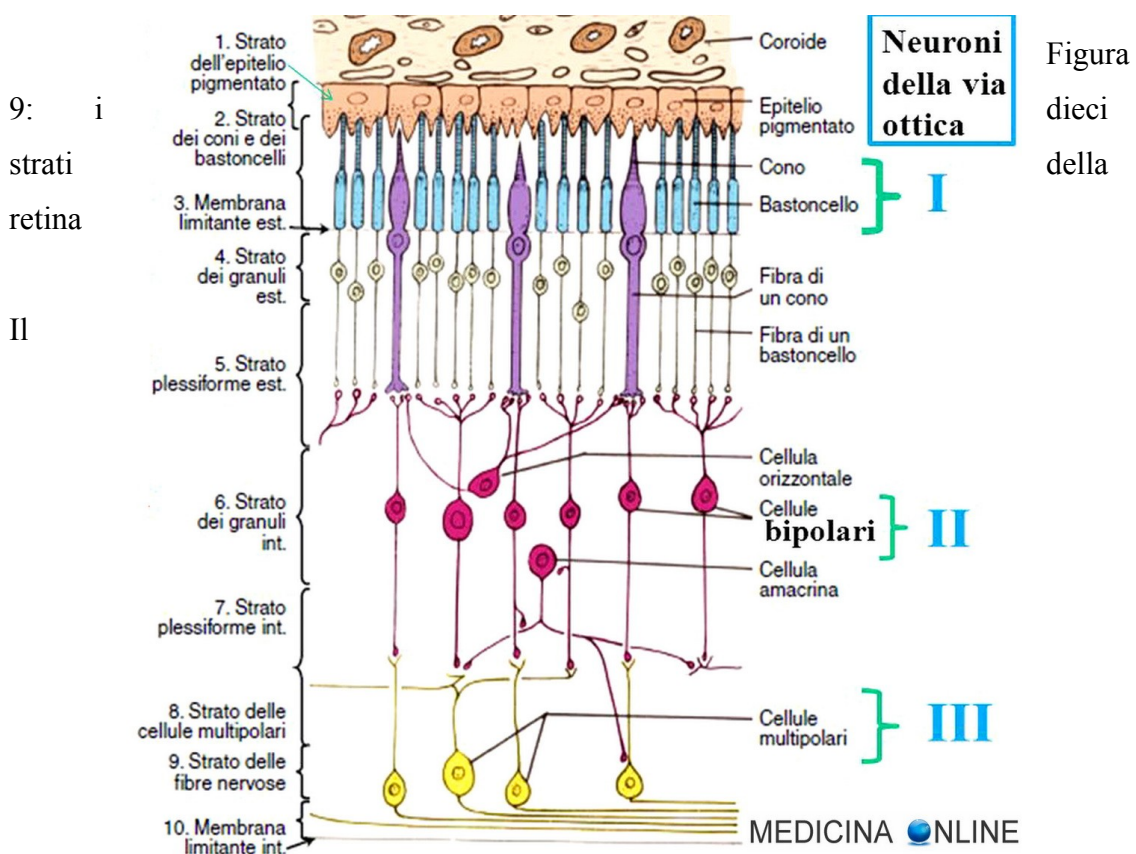
I processi che conducono alla percezione visiva prendono inizio nella retina e si svolgono in due stadi. La luce che penetra attraverso la cornea viene dapprima proiettata sul fondo dell'occhio, dove viene trasformata in segnali elettrici da un organo sensoriale specializzato che è la retina. Questi segnali vengono poi convogliati, attraverso il nervo ottico, verso centri cerebrali superiori dove vengono elaborati ulteriormente fino al livello percettivo. L'occhio può venire considerato come uno strumento ottico deputato a focalizzare sulla retina le immagini visive con la minima distorsione possibile. <sup>(41)</sup>

### ***III.1 Anatomia:***

La retina sta davanti all'epitelio pigmentato che ricopre la superficie posteriore dell'occhio. Le cellule che compongono questo epitelio contengono una grande quantità di pigmento nero, la melanina, che assorbe tutta la luce che non è stata trattenuta dalla

retina impedendo che venga riflessa nuovamente su di essa (il che porterebbe ad un deterioramento dell'immagine). La retina umana è composta da sei tipi di cellule neuronali: i fotorecettori (coni e bastoncelli), le cellule orizzontali, le cellule bipolari, le cellule amacrine, le cellule interplexiformi e le cellule ganglionari. Esse formano il I, II e III neurone e sono in stretto rapporto con le cellule gliali radiali di supporto, dette cellule di Müller.<sup>(41)</sup> Topograficamente la retina si divide in retina periferica e in retina centrale, entro le arcate vascolari principali, dove si distingue una formazione rotondeggiante, avascolare, la macula, il cui centro è detto foveola. La retina ha aderenze anatomiche con il sottostante epitelio pigmentato solo nell'estrema periferia retinica, all'ora serrata, e ad anello intorno al nervo ottico: per la restante estensione è mantenuta in sede dalla pressione del vitreo che esercita un effetto tampone. La retina presenta una diminuzione di spessore in corrispondenza della macula e della foveola. Le cellule retiniche e le loro derivazioni sono disposte su dieci strati che possono essere istologicamente identificati in: <sup>(42)</sup>

1. Epitelio pigmentato retinico
2. Strato dei fotorecettori, comprendente il segmento esterno e interno dei coni e dei bastoncelli
3. Membrana limitante esterna, una sottile area di aderenza fra fotorecettori e cellule di Müller
4. Strato nucleare esterno, formato dai corpi dei fotorecettori e dalle loro derivazioni
5. Strato plessiforme esterno, formato dalle sinapsi tra i fotorecettori, le cellule bipolari e le cellule orizzontali
6. Strato nucleare interno che contiene i corpi delle cellule bipolari, orizzontali e amacrine, le cellule interplexiformi e le loro fibre e i nuclei delle cellule di Müller
7. Strato plessiforme interno, formato dalle sinapsi tra le cellule bipolari, amacrine e gangliari
8. Strato delle cellule gangliari che contiene anche numerose cellule amacrine, localizzate al di fuori della loro sede principale, lo strato nucleare interno
9. Strato delle fibre nervose che contiene gli assoni delle cellule gangliari che confluiranno nel nervo ottico
10. Membrana limitante interna, formata dalle terminazioni delle cellule di Müller



**Neuroni della via ottica**

Figura dieci della

compito della retina, in particolare dei fotorecettori, è quello di trasformare la luce in segnali elettrici, processo chiamato foto trasduzione. I fotorecettori, coni e bastoncelli, sono cellule altamente specializzate: la loro parte esterna è adattata per catturare la luce mentre la parte interna per trasmetterla. I coni (da 5 a 7 milioni) sono responsabili della visione in luce viva e della visione dei colori, i circa 100-130 milioni di bastoncelli sono responsabili della visione in luce attenuata. Tutti i bastoncelli contengono lo stesso tipo di rodopsina (composta da una proteina, l'opsina e da un cromoforo, l'11-cis-retinal derivato dalla vitamina A), mentre i coni contengono tre differenti opsine i cui picchi di assorbimento sono a 420 nm (blu), 531 nm (verde) e 588 nm (rosso). Si ritiene che un 10-15% dei coni sia sensibile al blu, un 50-55% al verde e un 30-35% al rosso. I fotorecettori sono disposti in mosaici di forma approssimativamente esagonale: la maggior densità di coni per il rosso e per il verde si trova al polo posteriore dell'occhio nell'area maculare e nella foveola, i coni per il blu sono assenti nella foveola, ma sono sparsi per tutta la retina posteriore. La maggior concentrazione dei bastoncelli si trova a circa 15° dalla foveola e diminuisce nella periferia retinica. I coni extrafoveolari sono sempre circondati da un anello di bastoncelli. Il segmento esterno dei bastoncelli è formato da 650 a 1000 dischetti impilati l'uno sull'altro che contengono la rodopsina e tutte le molecole necessarie alla fototrasduzione. Nei coni il fotopigmento non è

contenuto in dischi ma in invaginazioni a pettine della membrana citoplasmatica: il segmento esterno è più corto di quello dei bastoncelli, il cromoforo è uguale, sono diverse le opsine. <sup>(41) (42)</sup>

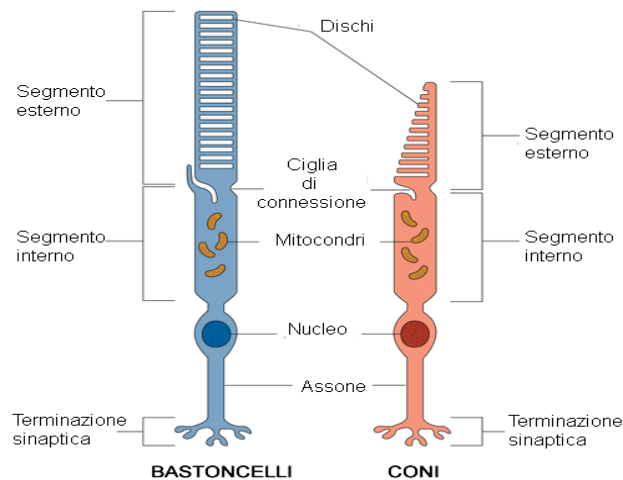


Figura 10: anatomia di coni e bastoncelli

### ***III.II Funzionamento:***

La luce, catturata dal segmento esterno del fotorecettore danneggia il sistema che deve essere continuamente ricostruito. Ogni mattina il segmento esterno dei bastoncelli si libera dei dischi più esterni che vengono degradati dalla fagocitosi dell'epitelio pigmentato retinico e nuovi dischi si formano alla base della pila al confine tra segmento esterno e interno della cellula. Anche i coni si rinnovano in continuazione, più alla sera che al mattino, ma il meccanismo non è del tutto noto. Ma come avviene il processo di captazione dell'energia luminosa?

L'assorbimento di luce da parte dei pigmenti visivi dà inizio a una cascata di eventi, che determina, in ultima analisi, una variazione dei flussi ionici ai capi della membrana delle cellule responsabili e una conseguente variazione del potenziale di membrana. La molecola chiave in questa sequenza di eventi è rappresentata dal nucleotide guanosin-monofosfato 3' 5' ciclico (GMPc). Nei bastoncelli la molecola del GMPc funge da secondo messaggero citoplasmatico in grado di convogliare l'informazione proveniente dai dischi, verso la membrana plasmatica della cellula. Il GMPc controlla i flussi ionici di membrana in quanto apre un canale ionico specializzato, che determina l'ingresso nella cellula di un flusso di corrente trasportato in gran parte da ioni sodio (Na). Al buio la concentrazione di GMPc è relativamente alta, i canali controllati da questa molecola

sono in gran parte aperti e la corrente che entra per questi canali mantiene i fotorecettori in uno stato di depolarizzazione. Il processo di fototrasduzione avviene in tre fasi: <sup>(41)</sup> <sup>(43)</sup>  
(44)

### 1. La luce attiva i pigmenti visivi:

Il pigmento visivo dei bastoncelli, come abbiamo visto è costituito da opsina e retinale. La parte del complesso addetta all'assorbimento è il retinale. Questo può assumere diverse forme isomere. Nella sua forma inattiva la rodopsina contiene il retinale 11-cis, che si adatta blandamente in un sito di legame dell'opsina. L'attivazione della rodopsina ha inizio con l'assorbimento della luce che fa sì che il retinale modifichi la sua conformazione passando da 11-cis a tutto-trans. Fra tutti i processi visivi, questo è l'unico che dipende dalla luce. In seguito a questa modifica di conformazione, il retinale non si adatta più nel suo sito di legame con l'opsina e ciò fa sì che l'opsina vada incontro, a sua volta, a una modificazione della propria conformazione, trasformandosi in un composto semi stabile, detto metarodopsina II, che dà inizio al secondo passaggio della fototrasduzione, che vedremo in seguito. La metarodopsina II è instabile e nel giro di qualche minuto si scinde in opsina e retinale tutto-trans. Il retinale tutto-trans viene trasportato dai bastoncelli verso l'epitelio pigmentato, dove viene ridotto a retinolo tutto-trans, precursore della sintesi del retinolo 11-cis. Per quanto riguarda i coni, anche in essi è presente rodopsina composta da opsina e retinale 11-cis. I tre pigmenti dei coni contengono forme diverse dell'opsina dei coni, ciascuna delle quali interagisce in modo diverso con il retinale rendendolo più sensibile ad una banda specifica dello spettro visibile.

### 2. I fotopigmenti stimolano una GMPC-fosfodiesterasi che riduce la concentrazione di GMPC:

L'attivazione delle molecole di pigmento da parte della luce determina una riduzione della concentrazione citoplasmatica del GMPC. La concentrazione di questa molecola viene controllata da due enzimi. Viene sintetizzato a partire da GTP dalla guanilil-ciclastasi e viene idrolizzato a 5'-GMP da una GMPC-fosfodiesterasi, che è una proteina adesa alla membrana dei dischi. Essendo la GMPC-fosfodiesterasi sotto il controllo dei pigmenti visivi la concentrazione del GMPC è controllata dalla luce. Nell'oscurità, l'attività della fosfodiesterasi è modesta e la concentrazione del GMPC è perciò elevata.

La fotoattivazione di una singola molecola di rodopsina può determinare l'idrolisi di più di  $10^5$  molecole di GMPc al secondo. Due meccanismi pongono termine alla risposta alla luce. La rodopsina si inattiva da sola idrolizzando il proprio GTP, oppure una volta attivata, la rodopsina diventa un substrato capace di venire fosforilato da una protein-chinasi specifica, la opsina-chinasi; la rodopsina fosforilata interagisce con una proteina regolatrice specifica, chiamata arrestina, che determina rapidamente la sua inattivazione.

### 3. La riduzione della concentrazione di GMPc fa chiudere i canali attivati dal GMPc stesso iperpolarizzando i fotorecettori:

Il GMPc controlla direttamente questi canali ionici legandosi alla faccia citoplasmatica dei canali stessi e l'attivazione del canale richiede almeno il legame cooperativo di tre molecole di GMPc. Al buio, i canali controllati dal GMPc fanno passare una corrente entrante che tende a depolarizzare i fotorecettori, come detto in precedenza. La chiusura di questi canali durante l'esposizione alla luce riduce l'entità di questa corrente e fa sì che la cellula si iperpolarizzi.

Abbiamo visto dunque come i fotorecettori sono influenzati dalla luce. Qual è il modo in cui la retina modifica ed elabora i segnali evocati dalla luce nei fotorecettori?

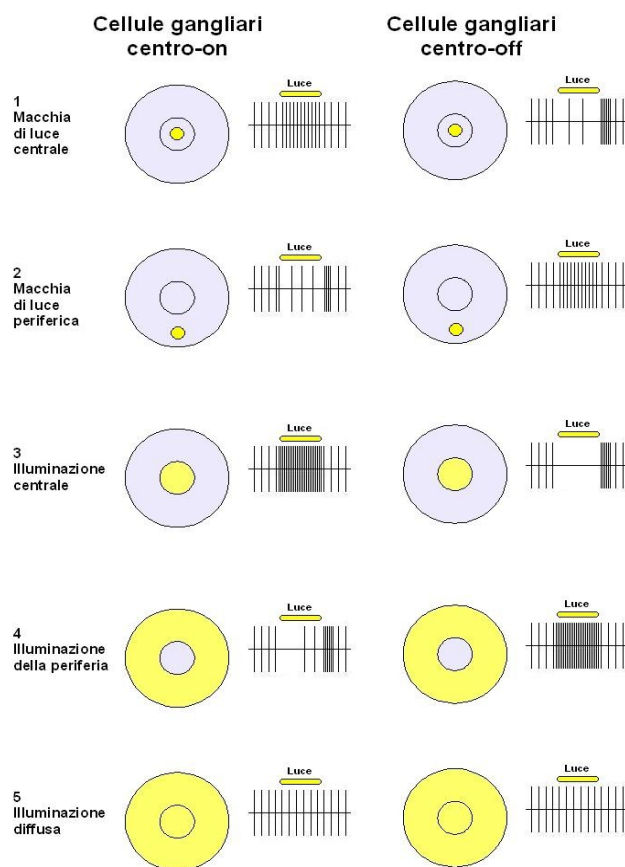
### ***III.III Dai fotorecettori alla retina:***

I neuroni d'uscita e della retina sono le cellule gangliari. Esse trasmettono le proprie informazioni sotto forma di scariche di potenziale d'azione. I loro assoni vanno a formare il nervo ottico che proietta al talamo, nel corpo genicolato laterale, al collicolo superiore, al pretetto e ad altri nuclei bersaglio. Fra i fotorecettori e le cellule gangliari sono interposte tre classi diverse di interneuroni: le cellule bipolari, le cellule orizzontali e le cellule amacrine. Queste cellule non si limitano a trasmettere i segnali che ricevono, ma li combinano tra loro in modo che le risposte elettriche che nascono dalle cellule gangliari dipendono in modo critico dalle caratteristiche spaziali e temporali degli stimoli luminosi che colpiscono la retina. Le cellule gangliari non sono mai del tutto inattive. Anche nel buio completo posseggono un'attività spontanea che viene modulata dalle afferenze provenienti dai diversi neuroni retinici. Le afferenze di

ogni cellula gangliare provengono da gruppi di fotorecettori circoscriviti, localizzati in una ristretta area di retina che costituisce il campo recettivo, della cellula gangliare. Questo campo recettivo è, quindi, l'area di retina sotto il controllo di una cellula gangliare. I campi recettivi possiedono due caratteristiche importanti:<sup>(42) (45)</sup>

- sono approssimativamente circolari
- si possono suddividere in due parti: una zona circolare al centro detta centro del campo recettivo, e un rimanente disco esterno detta periferia

All'interno delle cellule gangliari abbiamo cellule a centro-on e cellule a centro-off. Le cellule gangliari a centro-on vengono eccitate quando si proietta luce al centro del campo visivo, mentre luce nella periferia del campo visivo le inibisce. Le cosiddette cellule gangliari centro-off, viceversa, sono eccitate dalla luce in periferia e inibite dalla luce al centro del campo recettivo. Una illuminazione diffusa su tutto il campo recettivo è in grado di evocare soltanto una risposta molto debole in entrambi i tipi di cellule.



Il numero delle cellule gangliari centro-on e centro-off ( figura 11) è approssimativamente uguale ed ogni fotorecettore invia i propri segnali di uscita a cellule gangliari di entrambi i tipi. In tal modo le cellule gangliari vanno a costituire due vie in parallelo. Inoltre, le dimensioni dei campi recettivi delle cellule gangliari variano notevolmente da una regione della retina ad un'altra. Le cellule gangliari analizzano, dunque, le differenze di contrasto di luminosità presenti nello scenario visivo, da cui, peraltro,

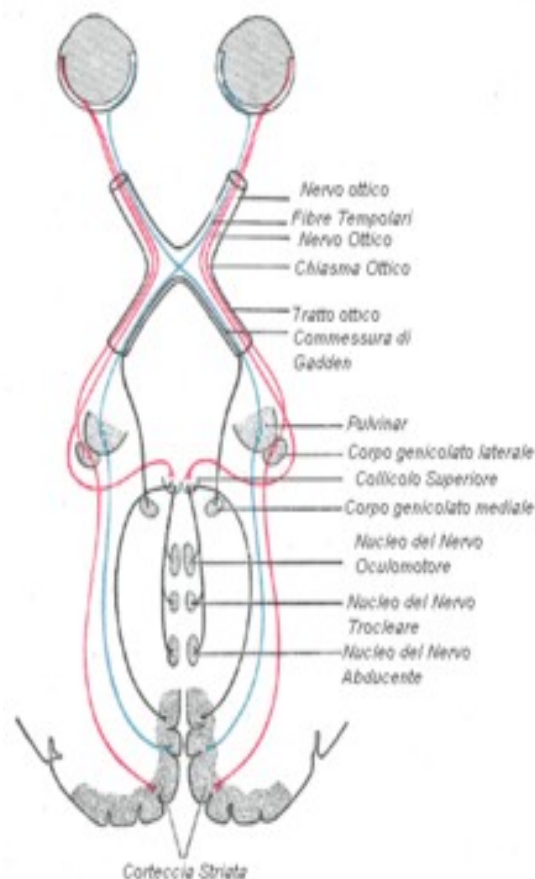
derivano la maggioranza delle informazioni.

Figura 11: cellule centro-on e centro-off e loro risposta alla luce



Queste trasformazioni dell'informazione visiva mettono i centri superiori in condizioni di mettere in evidenza piccole differenze e rapide variazioni di luminosità. Le cellule gangliari sono, inoltre, specializzate nell'elaborazione di altre caratteristiche delle immagini visive come il movimento, i particolari degli oggetti o il loro colore. Le diverse risposte delle cellule gangliari sono espressione dei differenti tipi di contatti sinaptici presenti nella retina. Fra i fotorecettori e le cellule gangliari vi sono interposti, come interneuroni, le cellule bipolari. Anch'esse si possono distinguere in centro-on e centro-off. Il neurotrasmettitore liberato dai coni eccita le cellule bipolari di un tipo, mentre inibisce quelle dell'altro tipo. Ciascun cono ha contatti sinaptici con cellule bipolari di entrambi i tipi. I coni localizzati al centro del campo recettivo di una cellula gangliare fanno sinapsi con cellule bipolari che entrano in diretto contatto con la cellula gangliare stessa. Gli stimoli provenienti dai coni localizzati alla periferia dei campi recettivi vengono invece convogliati lungo vie collaterali che passano attraverso le cellule orizzontali e le cellule amacrine (figura 12).

Figura 12: Vie visive



Dunque abbiamo visto come l'informazione passa dai fotorecettori alla retina . Da qui poi, come detto in precedenza, essa passa attraverso diverse postazioni, come il corpo

genicolato laterale e il collicolo superiore, fino ad arrivare in corteccia visiva dove viene elaborata e integrata con altre informazioni provenienti da altri sensi. <sup>(41) (42) (45)</sup>

## **Capitolo IV: La luce blu**

### ***IVI Cos'è la luce blu?***

Come visto in precedenza lo spettro della luce è molto complesso ed articolato. Per questa tesi ci soffermeremo solo ad analizzare più nel particolare la luce che si trova nella parte visibile e più precisamente nella lunghezza d'onda del blu e della così detta radiazione ad alta frequenza o HEV.

Il blu è uno dei colori dello spettro elettromagnetico nella radiazione visibile e quindi percepibile dal sistema visivo dell'uomo. È, assieme al verde e al rosso, uno dei tre colori primari. Nello spettro visibile si trova a lunghezze d'onda che vanno da 380 nm fino a 520 nm. <sup>(2)</sup>

La luce blu per la lunghezza d'onda e la frequenza che possiede rientra di diritto nella così detta radiazione ad alta energia HEV. L'intervallo della luce HEV è definito da diversi studi che danno risultati simili, ma leggermente differenti. Se, per esempio, si considera la caratteristica energetica la HEV varia tra i 380 e i 450 nm. Se, invece, si guarda alla definizione cromatica l'intervallo risultante è da 400 a 495 nm. <sup>(46)</sup>

Questo tipo di luce è diventata uno degli argomenti centrali di studio della comunità globale di ottici e optometristi solo recentemente.

Questo interesse recente appare molto strano perché, in realtà la luce ad alta energia visibile (HEV) è emessa sia da sorgenti artificiali, sia, soprattutto dal sole. Il sole, in quanto stella, emette luce HEV con energia circa 30 volte superiore a quella dei comuni sistemi artificiali<sup>(47)</sup>.

Da dove nasce questo interesse per la luce blu??

Nel 2009 viene pubblicato nella Gazzetta Ufficiale Europea del regolamento (CE) numero 244/2009, dalla commissione dell'Unione Europea, un articolo con il quale veniva promosso il bando graduale delle tradizionali lampadine ad incandescenza e altri tipi di lampadine ad alto consumo energetico. Questo graduale bando, a favore di una politica sempre più in appoggio e a favore dell'ambiente, ha portato nel 2012 all'abolizione totale della vendita delle lampadine<sup>(48)</sup>. Visto tale risultato la tecnologia ha dovuto supplire alla mancanza di certe fonti luminose e crearne delle altre. Si è quindi

creato il giusto presupposto per l'esplosione sul mercato delle luci led e a basso consumo. Andiamo ad analizzare queste nuove forme di illuminazione.

#### ***IV.11.1 LED***

LED sta per “ligh-emitting diode” ovvero diode ad emissione luminosa.

Diodo: “Tubo elettronico a due elettrodi impiegato o come raddrizzatore o come rivelatore, spec. nelle telecomunicazioni; *estens.*, elemento semiconduttore costituito essenzialmente da un cristallo (germanio, silicio) o da uno strato (detto *di sbarramento*) di particolare sostanza (ossido di rame, selenio), impiegato per gli stessi scopi.”<sup>(49)</sup>



Figura 13: Luci a LED

I LED (figura 13) lavorano proprio come altri diodi. Solitamente sono costituiti da arseniuro di Gallio (GaAs), fosfuro di gallio (GaP) o arseniuro di fosfuro di gallio (GaAsP). Questo tipo di semiconduttore ha la particolarità di poter essere assottigliato fino a 0,5 micron. Ecco che subito appare la convenienza di poter sfruttare oggetti molto piccoli.

I LED generalmente vengono considerati dei diodi a giunzione p-n. Un diodo a giunzione viene realizzato utilizzando prevalentemente cristalli di silicio drogati ad un'estremità (chiamata zona p) con atomi trivalenti (per es. Boro) ed all'altra (chiamata zona n) con atomi pentavalenti (per es. Fosforo). Tra la zona p e la zona n si crea una stretta zona di transizione in cui, a causa della variazione brusca nel tipo del drogaggio del semiconduttore (da cui il nome *giunzione p-n*), si crea una barriera di potenziale.<sup>(50)</sup> Per funzionare i LED devono essere alimentati da corrente polarizzata e costante. Per avere questo risultato in genere si utilizza un generatore di corrente o più

semplicemente una resistenza di adeguato valore da mettere in serie al LED. In questo modo si va a limitare la corrente per una data tensione di alimentazione.

### **Come funzionano i LED?:**

I LED sfruttano le proprietà ottiche di alcuni materiali semiconduttori (vedi sopracitati) per produrre fotoni. Per capire il funzionamento del diodo LED dobbiamo considerare che la luce è una forma di energia rilasciata da un atomo. In un LED ci sono diversi atomi con i loro elettroni che girano attorno al nucleo nelle loro orbite. Quando uno di questi elettroni passa da un'orbita superiore ad una inferiore andando a riempire una lacuna positiva perde un po' di energia sotto forma di fotoni. Più energia perde l'elettrone che si sposta, maggiore sarà la frequenza della luce emessa, e quindi con un certo colore. <sup>(2)</sup>

### ***Ma perché i LED hanno avuto, come detto in precedenza, l'interesse della comunità scientifica in questi ultimi anni?***

In una pubblicazione del *The international dark-sky association* realizzata nel 2010, emerge che la luce LED sta prendendo sempre più piede nella società moderna. <sup>(51)</sup> Ed emerge, cosa molto più importante, che i LED possono essere costruiti di quasi tutti i colori visibili, ma le formulazioni più efficienti sono ricche di luce blu, perché le lunghezze d'onda blu attivano i fosfori che servono a fornire gli altri colori necessari per ottenere una luce bianca di alta qualità, come si nota nella figura 14.

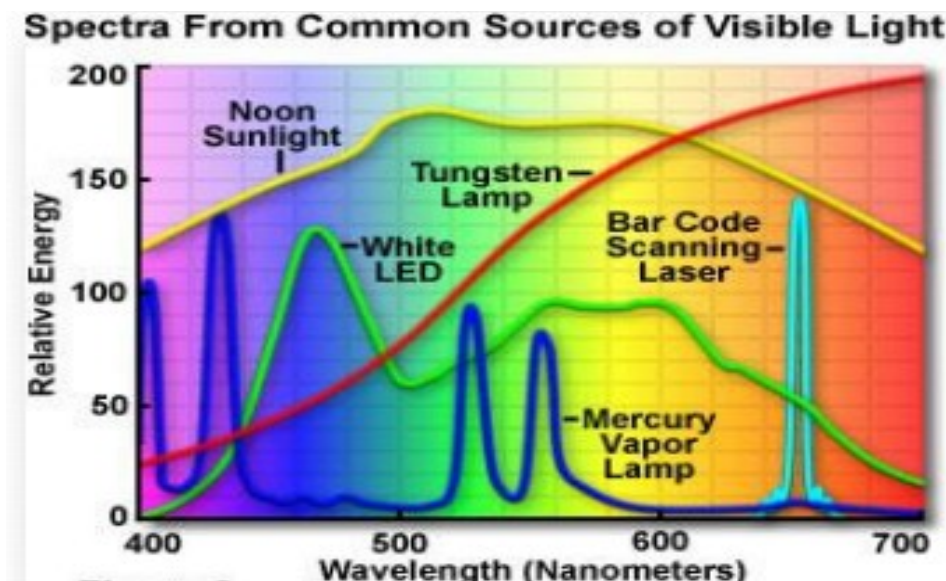


Figura 14: emissioni di luce relative ad oggetti di uso comune

Sempre nella stessa pubblicazione si è effettuato un confronto della luce emessa dai LED di colorazione blu e la curva di percezione scotopica. Solamente osservando il grafico della figura sottostante, si evince come il picco di emissione di tali LED si colloca nell'area caratterizzata dalla lunghezza d'onda di 460 nm (HEV). Comparando tale emissione con la curva di sensibilità fotopica dell'occhio umano, si evince un'eccessiva esposizione della radiazione emessa rispetto alla quantità di radiazione necessaria a creare la sensazione massima (figura 15) <sup>(51)</sup>.

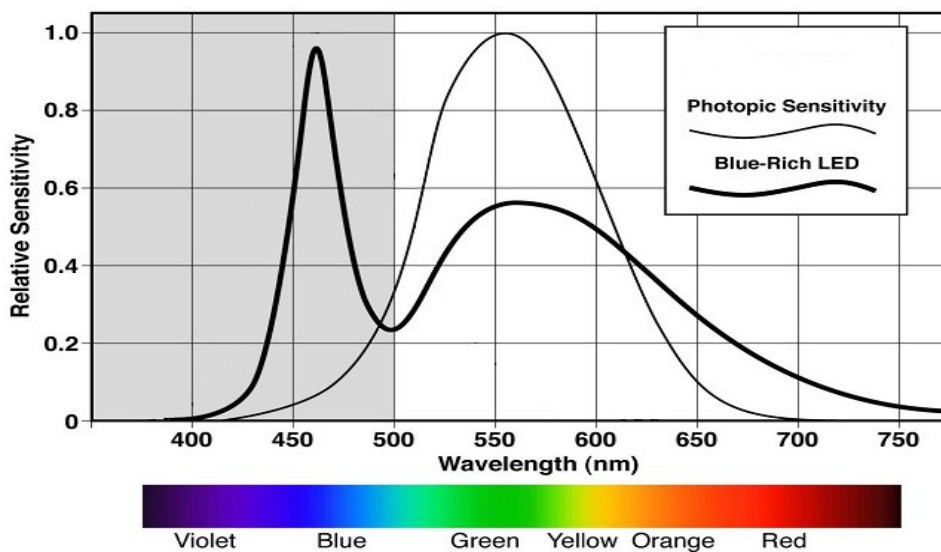


Figura 15: Curva di sensibilità fotopica rispetto alla luce emessa dai Blue-rich LED, fonte: IDA

I dispositivi LED, oramai, sono molto utilizzati in molti oggetti di uso comune e non solo per quanto riguarda il settore dell'illuminazione (lampadine e quant'altro), ma anche in:

- Cellulari

Tablet

Televisori LCD

Videogiochi

Computer

Illuminazione stradale

Fari delle auto

Si sa quanto oggetti tecnologici di questo tipo siano venduti ed usati al giorno nostro, sia in quantità di tempo che la strumentazione viene utilizzata, sia per numero di dispositivi utilizzati. Alcuni esempi:

- Il 70,9% delle aziende ha almeno 10 individui che utilizzano dispositivi elettronici regolarmente a lavoro per 8 ore <sup>(52)</sup>
- Circa 1 persona su 2 accede a internet ogni giorno tramite dispositivi: dato più elevato nelle persone tra i 15 e i 24 anni, ben il 92% di loro usa quotidianamente computer o cellulare <sup>(52)</sup>
- Il 74% di chi usa il cellulare utilizza più di 3 ore il dispositivo <sup>(53)</sup>
- In media un italiano rimane davanti alla televisione 4 ore e 40 minuti <sup>(54)</sup>

A questi dati, già di per se spaventosi se ne aggiungono altri ancora più strabilianti.

Recentemente, lunedì 15 Ottobre, Presa Diretta, un programma televisivo di approfondimento giornalistico, in onda su Rai tre ha affrontato proprio l'argomento del rapporto tra giovani e cellulari nella puntata: "*Iperconnessi*". In questa puntata sono stati forniti ulteriori dati, che uniti a quelli già forniti precedentemente possono darci ancora più un'idea di quanto questo fenomeno sia cresciuto.<sup>(55)</sup>

- Sul pianeta ci sono più schede sim che persone; 7,8 miliardi di schede contro i 7,5 miliardi di abitanti.
- In Italia siamo terzi nel mondo per diffusione di smartphone. Circa 8 persone su 10 ne possiedono uno.
- Secondo Apple nel 2016 un utente medio ha usato e sbloccato il cellulare circa 80 volte al giorno per un totale di 30000 volte all'anno.
- Altri studi dicono che in media, considerando i caratteri scritti, tocchiamo il cellulare 2617 volte.
- I ragazzi, ma non solo, anche gli adulti stanno in internet una media di 6 ore al giorno, che moltiplicato i 4 miliardi di persone con un connessione disponibile, vuol dire che nel 2018 staremo connessi alla rete circa un miliardo di anni.

Se ci si pensa davvero seriamente si può capire oltre alla portata del fenomeno, che l'effettivo tempo che un ragazzo passa davanti ad uno schermo a led è molto elevato.

Tutto ciò ci fa capire perché la comunità scientifica si sia preoccupata della cosa.

#### ***IV.III Assorbimento della luce blu:***

La luce blu facendo parte dello spettro visibile viene assorbita dall'occhio come anche la luce ultravioletta.

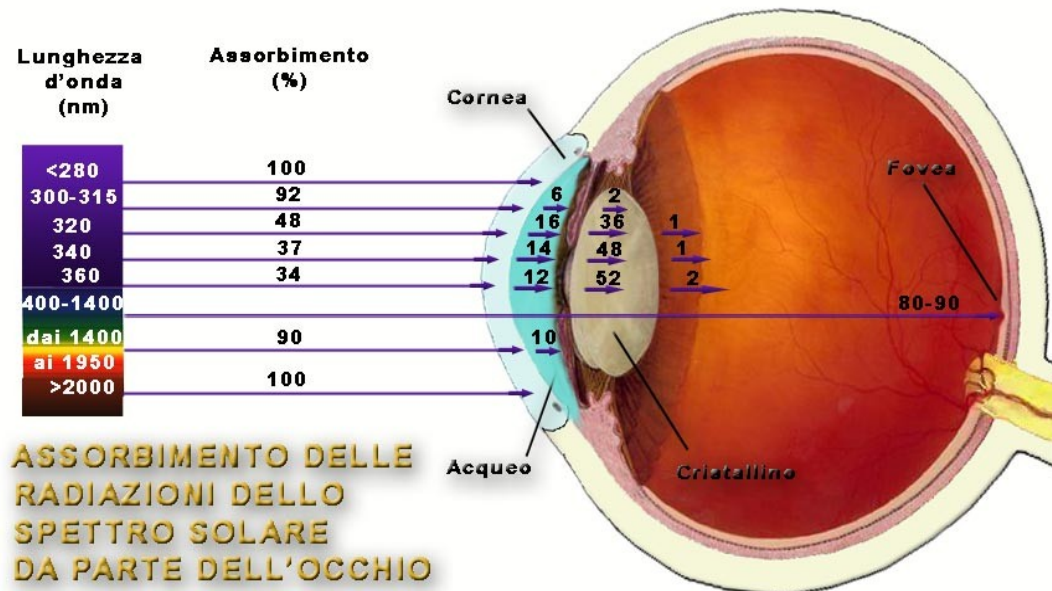


Figura 16: Percentuali di assorbimento della radiazione luminosa delle strutture oculari<sup>(56)</sup>

Come si può notare in figura 16 la lunghezza d'onda nel blu viene in parte assorbita dalla cornea e in parte dal cristallino.

Vediamo come la luce presente in una lunghezza d'onda compresa tra 280 nm e 360 nm venga quasi del tutto filtrata da cornea e cristallino. Per quanto riguarda, invece, la lunghezza d'onda della luce HEV che sta attorno ai 400 nm fino ai 1400 nm passa completamente arrivando fino alla fovea.

Visto questo mancato filtro oculare a questa lunghezza d'onda della luce e visto che proprio questa lunghezza d'onda si sta sviluppando e sta prendendo piede sempre di più nella società moderna e nel territorio urbano (illuminazione stradale), la comunità scientifica ha iniziato a studiare questo tipo di fenomeno per identificare gli effetti che un'esposizione prolungata a questo tipo di fonte luminosa può portare.

#### ***IV.IV Luce blu e biologia umana***

Ecco, dunque, che l'interesse della comunità scientifica si è rivolto verso questo fenomeno in cui la società si è trovata sempre più immersa un giorno dopo l'altro senza essere minimamente cosciente del fatto se possa indurre o meno problemi, danni o altro genere di conseguenze. Si è, quindi, iniziato a porsi delle domande. Questa eccessiva esposizione alla radiazione della luce Led, per esempio, ma più in generale della luce blu, per un tempo sempre maggiore, Provoca degli effetti? Quali E questi effetti sono dannosi?

I sintomi che coinvolgono occhio e funzione visiva sono discussi nella Computer Vision Syndrome (CVS) proposta dalla AOA, proprio per il fatto che spesso chi mostra segni o sintomi di problematiche legate alla luce blu è chi passa molto tempo a computer o a dispositivi mobili:

- Sintomi interni: come bruciore, irritazione, lacrimazione alterata, sensazione di occhio secco
- Sintomi esterni: affaticamento, mal di testa, dolore, diplopia, visione offuscata.

Molti sono causati da una riduzione del numero di ammiccamenti (occhio asciutto) oppure dalla ridotta illuminazione dei dispositivi o dell'ambiente in cui si svolge l'attività <sup>(57)</sup>.

La CVS è strettamente legata a soggetti che vengono identificati nel mondo del lavoro video-terminalisti: soggetti che in una settimana spendono più di 20 ore lavorative davanti a dispositivi video. Questa constatazione ha contribuito alla realizzazione di una serie di leggi che proteggono il gruppo di lavoratori videoterminali <sup>(58)</sup>.

#### **Studi sugli effetti della luce blu sull'organismo:**

Un primo tipo di studio è stato fatto in merito al crescente utilizzo di luci a LED per le illuminazioni stradali.<sup>(59)</sup> Le sorgenti di luce bianca ricca di blu (BRWL) sono molto usate, come citato in precedenza, come opzioni nelle installazioni luminose delle strade, come i lampioni. Da questo studio è emerso che questo tipo di illuminazione influenza diversi aspetti della visione e non solo. Aspetti che vengono riportati di seguito.



## **Abbagliamento:**

La riduzione dell'abbagliamento è un punto critico per la realizzazione di tutti i tipi di lampade anche quelle da esterno. Ovviamente la ricerca tende a studiare modelli di illuminazione che riducano, per quanto possibile, la sensazione di abbagliamento. Una ricerca fatta già nel 1955 indicava che le luci BRWL causavano più abbagliamento rispetto alle luci alogene. Con studi successivi è stato confermato che una lunghezza d'onda approssimativamente di 420 nm (sul blu) poteva essere correlata strettamente a un discomfort da abbagliamento. Si è osservato che i lampioni BRWL sono percepiti dagli automobilisti come più abbaglianti rispetto a quelli con lampada alogena convenzionale. Una fonte luminosa con uno spettro d'uscita aumentato fino a 500 nm incrementa la sensazione di abbagliamento, particolarmente per le persone anziane, ed ostacola di più la visione rispetto ad una fonte di luce convenzionale della stessa intensità. Questo discorso, limitato all'uso di LED per l'illuminazione stradale introduce già un primo problema indotto da questo tipo di illuminazione.

## **Adattamento e invecchiamento dell'occhio:**

Un secondo, ma non meno importante, problema legato ai LED appare da alcuni studi che indicano che la luce blu riduce l'ampiezza pupillare più degli altri tipi di luce, specialmente a bassi livelli di luminosità. Questo tipo di luce, inoltre, aumenta il tempo di adattamento dell'occhio all'oscurità, il che vuol dire che passando da un ambiente luminoso ad uno più scuro dopo essere stati esposti ad una luce con componente blu importante, l'occhio ci mette più tempo ad abituarsi alla luminosità più bassa. Dal momento che l'occhio invecchia come tutto il nostro corpo, questo comporta che occorra una maggiore luminosità e un maggior contrasto per vedere bene. Le lenti per occhiali, ad esempio, diventano gialle e meno trasparenti col tempo e una lente ingiallita assorbe maggior luce blu; allo stesso modo la retina delle persone anziane è raggiunta da minor quantità di luce blu, a causa dell'invecchiamento del cristallino che ingiallisce un po' come le lenti, specialmente quando vengono usate fonti BRWL. Inoltre le pupille delle persone anziane sono, in genere, più ristrette e contratte, ciò aumenta ulteriormente il tempo che serve per abituarsi alla differenza di luminosità tra due ambienti. Le luci BRWL contribuiscono a rallentare questo processo di adattamento. In generale con le nuove luci a LED si fa più fatica ad adattarsi ai cambiamenti di

luminosità in fretta, ciò soprattutto negli anziani. In un ambito di illuminazione stradale si può solo immaginare i danni che possono derivare da questo tipo di problema.

### **Dispersione atmosferica e bagliore del cielo:**

Un' altra osservazione non da trascurare e più legata all'inquinamento ambientale è l'aumento della diffusione luminosa creato dalle luci BRWL e più nel dettaglio il bagliore luminoso del cielo rilevabile dagli strumenti astronomici che da essa deriva: maggiore del 15% addirittura a volte fino anche al 20% rispetto al sodio ad alta (HPS) e bassa (LPS) pressione. In accordo con l'aumentata sensibilità dell'occhio rispetto alla luce blu a bassi livelli, la luminosità visiva del bagliore del cielo prodotta dalle luci BRWL può apparire dalle tre alle cinque volte più luminosa rispetto a come appare con HPS e circa quindici volte più luminosa di quella rilevata con LPS. Le BRWL contribuiscono al bagliore del cielo in una porzione dello spettro che attualmente non è così fortemente presente. Oltre a ciò nelle condizioni naturali la luminosità del cielo nella porzione blu dello spettro è molto più bassa. In altre parole, BRWL introducono un altro tipo di inquinamento luminoso, in una parte dello spettro che è relativamente scura e relativamente meno dannosa. Quindi, un uso diffuso di luci BRWL può sostanzialmente aumentare la degradazione dell'osservazione astronomica del cielo

### **Considerazioni ecologiche:**

La luce artificiale nell'ambiente deve essere considerata come un qualcosa che lo modifica perennemente. Ad ogni modo, esiste un'evidenza che questa luce modifica i comportamenti delle specie, la loro dieta, il movimento, mentre la relazione tra luce artificiale e fauna selvatica ha raramente raggiunto il livello di approfondimento che possa rispondere alla domanda circa lo spettro e la soglia di illuminazione. Poiché non sono state tratte conclusioni assolute precedenti, la ricerca suggerisce che BRWL aumenti la risposta in alcune specie. Le tartarughe marine hanno una probabilità dieci volte maggiore di essere attratte da luce a 450 nm fino a 600 nm, con quattro specie di tartarughe dell'Atlantico si è visto che questi animali mostrano un disorientamento spettrale in una simile lunghezza d'onda. Fonti luminose con una forte componente blu e ultravioletta sono particolarmente attrattive per gli insetti. I cambiamenti nel comportamento degli insetti spesso influenzano di riflesso il cambiamento delle

abitudini in specie che cacciano insetti, tra cui anfibi e pipistrelli. Inoltre, la risposta circadiana della fauna selvatica spesso assomiglia a quello della specie umana; quindi anche se una specie non mostra una risposta particolare comportamentale a BRWL, tale luce può comunque alterare i modelli di vita notturni e diurni della fauna selvatica. Le prove e le osservazioni non indicano che la luce di lunghezza d'onda corta altera il comportamento di tutte le specie. Alcuni uccelli hanno mostrato una forte attrazione per la luce rossa, mentre altri la evitano. È a causa di queste discrepanze e dell'imprevedibilità del comportamento delle specie animali che l'IDA sostiene studi completi per indagare lo spettro degli effetti che possono esserci prima di introdurre radicalmente diverse fonti luminose negli ecosistemi notturni.

Date queste osservazioni sorge naturalmente il paragone spontaneo con la specie umana. Viene da chiedersi se questi effetti di perturbazione dello stile di vita e del comportamento vengano a presentarsi anche nell'uomo quando viene esposto a questo tipo di illuminazione.

#### ***IV.V Ciclo circadiano:***

Il ciclo circadiano o ritmo circadiano, in cronobiologia e in cronopsicologia, è un ritmo caratterizzato da un periodo di circa 24 ore. Il termine "circadiano", coniato da Franz Halberg, viene dal latino "*circa diem*" e significa appunto "intorno al giorno". Il primo a intuire che i ritmi osservati potessero essere di origine endogena fu lo scienziato francese Jean-Jacques d'Ortous de Mairan che nel 1729 notò che i modelli di 24 ore nei movimenti delle piante continuavano anche quando queste venivano tenute in condizioni di buio costante.<sup>(60)</sup>

Esempi sono il ritmo veglia-sonno, il ritmo di secrezione del cortisolo e di varie altre sostanze biologiche, il ritmo di variazione della temperatura corporea e di altri parametri legati al sistema circolatorio. Oltre ai ritmi circadiani sono stati identificati e studiati vari ritmi circasettimanali, circamensili, circannuali.

Si pensa che i ritmi circadiani si siano originati nelle protocellule, con lo scopo di proteggere la replicazione del DNA dall'alta radiazione ultravioletta durante il giorno. Come risultato, la replicazione avveniva al buio. Il fungo *Neurospora*, che esiste ancora oggi, contiene questo meccanismo regolatore.

### **Descrizione e caratteristiche del ciclo:**

Ogni individuo dipende da un sistema circadiano endogeno, una sorta di complesso "orologio interno" all'organismo che si mantiene sincronizzato con il ciclo naturale del giorno e della notte mediante stimoli naturali come la luce solare e la temperatura ambientale, e anche stimoli di natura sociale (per esempio il pranzo in famiglia sempre alla stessa ora). In assenza di questi stimoli sincronizzatori (per esempio in esperimenti condotti dentro grotte o in appartamenti costruiti apposta) i ritmi continuano ad essere presenti, ma il loro periodo può assestarsi su valori diversi, per esempio il ciclo veglia-sonno tende ad allungarsi fino a 36 ore, mentre il ciclo di variazione della temperatura corporea diventa di circa 25 ore. <sup>(61)</sup> I ritmi circadiani sono importanti per determinare i modelli di sonno e veglia di tutti gli animali, inclusi gli esseri umani. Vi sono chiari modelli dell'attività cerebrale, di produzione di ormoni, di rigenerazione cellulare e altre attività biologiche collegate a questo ciclo giornaliero. Il ritmo è collegato al ciclo luce-buio. <sup>(62)</sup> Animali tenuti in totale oscurità per lunghi periodi funzionano con un ritmo che si "regola liberamente". Ogni giorno il loro ciclo di sonno avanza o regredisce a seconda che il loro periodo endogeno sia più lungo o più corto di 24 ore. Gli stimoli ambientali che ogni giorno resettano i ritmi sono chiamati *Zeitgebers* (tedesco, letteralmente significa: "donatori di tempo"). In esseri umani che si sono volontariamente isolati in grotte e senza stimoli esterni si è notato che il ritmo circadiano sonno-veglia tende progressivamente ad allungarsi, sino ad arrivare a "giornate" di 36 ore. Fondamentale come regolatore dell'orologio interno appare quindi il ruolo della luce solare. <sup>(63)</sup><sup>(64)</sup>

L'"orologio circadiano" nei mammiferi è collocato nel nucleo soprachiasmatico (SCN), un gruppo definito di cellule situato nell'ipotalamo. La distruzione dell'SCN causa la completa assenza di un regolare ritmo sonno/veglia. L'SCN riceve informazioni sull'illuminazione attraverso gli occhi. La retina degli occhi non contiene solo i "classici" fotorecettori, ma anche cellule gangliari retinali fotosensibili. Queste cellule, che contengono un pigmento chiamato melanopsina, seguono un tragitto chiamato tratto retinoipotalamico, che collega all'SCN.<sup>(65)</sup> È interessante notare che se le cellule provenienti dall'SCN sono rimosse e coltivate in laboratorio mantengono il loro ritmo in assenza di stimoli esterni. Sembra che l'SCN prenda le informazioni sulla durata del giorno dalla retina, le interpreti e le invii alla ghiandola pineale (una struttura delle dimensioni di un pisello situata nella parete posteriore del terzo ventricolo) la quale

secerne melatonina in risposta allo stimolo. Il picco di secrezione della melatonina si raggiunge durante la notte. <sup>(66)</sup>

### **La luce e l'orologio biologico**

L'abilità della luce di azzerare l'orologio biologico dipende dalla curva di risposta di fase (alla luce). Dipendentemente dalla fase del sonno, la luce può avanzare o ritardare il ritmo circadiano. L'illuminazione richiesta varia da specie a specie: nei roditori notturni, ad esempio, è sufficiente una diminuzione di luce molto inferiore rispetto all'uomo per l'azzeramento dell'orologio biologico.

Oltre all'intensità della luce, la lunghezza d'onda (o colore) della luce è un importante fattore per la determinazione del grado a cui l'orologio è azzerato. La melanopsina è eccitata più efficacemente dalla luce blu (420-440nm). <sup>(59) (60)</sup>

### **Perturbazione circadiana:**

La luce inibisce la secrezione dell'ormone melatonina. La luce blu compresa tra 430 e 510 nm dimostra la maggior denaturazione del ciclo circadiano e della secrezione di melatonina con un picco di sensibilità attorno ai 460 nm. <sup>(67)</sup> I livelli di melatonina, come sopra detto, dettano i cicli circadiani e giocano un ruolo chiave nella funzionalità del sistema immunitario animale e umano. Alcuni studi hanno effettivamente legato una bassa produzione di melatonina con la crescita di alcuni tipi umani di cancro, in particolare quello alla mammella. Tramite altri studi si è poi suggerito che la soglia di luminosità per la denaturazione della melatonina è abbastanza bassa, ma non si è riuscito a calcolare una quantità esatta. Tutti i potenziali fattori che regolano e compongono questo fenomeno non sono ancora stati studiati, e non è stata ancora pubblicata nessuna ricerca cruciale riguardo all'esposizione accidentale reale all'illuminazione esterna, così come sulle caratteristiche di questo tipo di illuminazione. Ad ogni modo gli effetti della luce blu nella produzione della melatonina, e gli effetti della melatonina nella generazione del cancro negli umani in alcuni esperimenti di laboratorio, sono certi. Purtroppo non si è ancora stabilito un legame certo tra la luce esterna e il cancro, anche se certamente la luce blu o meglio la componente blu della luce è un grande fattore di rischio. Meno di due settimane dopo la pubblicazione dell'IDA, il centro di ricerca sull'illuminazione del Rensselaer Polytechnic Institute ha pubblicato lo studio *“Il potenziale della luce esterna per la stimolazione del sistema umano circadiano”*. Questo studio si esprime sulla rivendicazione che la BRWL possa

influenzare il ritmo circadiano fino al punto di un serio rischio, e mostra che già l'esposizione ad una luce di 6500K CCT a livello di illuminazione stradale per solo un ora mostra un effetto misurabile sulla produzione di melatonina nell'uomo.

Da questo primo insieme di studi che valutano gli effetti prodotti dalla luce blu e da LED sull'ambiente, il territorio e sulle abitudini delle persone, emerge lampante come si stia seriamente sottovalutando la portata di questo fenomeno. <sup>(59)</sup>

### **Danni biologici e sistemici:**

Sulla stessa lunghezza d'onda è importante un altro studio condotto in Francia dal Centre de Recherches des Cordeliers in collaborazione con l'Université Paris Descartes e l'Université Pierre et Marie Curie. <sup>(68)</sup> I presupposti con cui è stato ideato e condotto questo studio sono gli stessi su cui si basano gli studi fin'ora riportati, ovvero, il rimpiazzo delle lampade ad incandescenza con dispositivi a luce ad emissione di diodi (LED). Lo scopo di questo studio, però, era quello di comparare i danni biologici creati da diversi tipi di luce commerciale, reperibili per illuminazione domestica in diversi tipi di animali, pigmentati e albini (ratti), con diversi scenari di esposizione. <sup>(64)(65)</sup> Cicli di 24 ore di esposizione ad alta luminosità sono stati comparati con cicli luce/buio a livelli di illuminazione domestica per tempi di una settimana prima e un mese successivamente. Si sono usati differenti LEDs (luce bianca fredda, blu, e verde), lampadine fluoro compatte (CFL) e lampade a tubi catodici fluorescenti fredde (CCFL). I risultati dello studio sono stati molto interessanti. Sicuramente ci sono stati molti studi che hanno analizzato gli effetti di un'elevata esposizione ad un'alta intensità di luce per decifrare il meccanismo che induce una tossicità retinica. Alcuni tra questi sono quello di Stone et al, del 1999; Wenzel et al., 2005; Chahory et al, 2010; Organisciak e Vaughan, 2010. <sup>(69) (70) (71) (72)</sup> Molti meno studi, invece, si trovano, che studino il rischio portato dalle nuove illuminazioni a LED in condizioni di illuminazione domestica. Recentemente lo stesso gruppo che ha condotto questo studio ha steso un'analisi estesa del meccanismo che induce tossicità retinica nei ratti albini, mostrando che inaspettatamente con la luce blu a LED in particolare, non si crea solo apoptosi, ma anche necrosi cellulare. <sup>(73)</sup> Questa necrosi innesca un'importante risposta infiammatoria che emerge negli esperimenti fatti. Lo studio a cui si accenna, dunque, si pone come scopo quello di definire la soglia di tossicità in diverse condizioni di esposizione domestica a diverse fonti luminose a LED. Dallo studio è emerso che, come ci si

aspettava, ad alte illuminazioni, (6000 lux) con pupilla dilatata, si sono osservati danni retinici fondamentalmente uguali con tutti i tipi di lampade, CCFL, CFL, e LED bianchi, tutte inducono una riduzione significativa dello spessore dei fotorecettori, reazione intensa della macroglia con proliferazione sotto retinica, perdita di coni e intensa attivazione della microglia e infiltrazione di macrofagi otto giorni dopo l'inizio dell'esposizione.<sup>(73)</sup> La cosa che, però, ha sorpreso maggiormente gli studiosi è che dopo 24h di esposizione continua dei ratti, sempre con pupilla dilatata, alla luce bianca fredda a LED a 500 lux (illuminazione domestica), si è rilevata una significativa riduzione dello spessore dello strato nucleare esterno non solo nei ratti albinici, ma anche, seppur in misura minore, nei ratti pigmentati. Ovviamente, si sa che in condizioni fisiologiche il naturale restringimento della pupilla dovuto all'esposizione alla luce, riduce efficientemente l'esposizione della retina proteggendola dalla tossicità e da eventuali danni.<sup>(74)</sup> L'importanza di questa osservazione durante l'esperimento è correlata anche al fatto che si è notato che nelle stesse condizioni la luce CFL non presenta nessun tipo di danno. La riduzione dello strato dei fotorecettori è correlato alla luce prodotta dalle lampade a luce bianca fredda a LED. Il ruolo delle radiazioni blu è ben riconosciuto ed è stato confermato usando LEDs blu nei ratti albinici, dove si è mostrata un'alta tossicità per i coni ad una luminosità di 200 lux.<sup>(75)</sup> La luce blu LED a 500 lux si è dimostrata dannosa dopo solo 24h di esposizione continua anche nei ratti pigmentati con pupilla ristretta, il che fa davvero pensare ai potenziali effetti della luce blu domestica per l'occhio umano. Altri studi sono stati fatti per verificare la dannosità della luce blu. Nel 2001, Dawson ha mostrato che l'esposizione diretta di una retina di scimmia al LED blu induceva un'lesione maculare simile a quella indotta da un laser ad argon (458 nm).<sup>(76)</sup> Lesioni simili sono state osservate anche in un'altra scimmia da Ueda et al. Dopo l'esposizione ad una luce a 465nm sempre a LED.<sup>(77)</sup> In conclusione si è evinto che alla stessa illuminazione e sotto le stesse condizioni i LED bianchi, verdi e blu provocano danni retinici, mentre la luce CFL no. In particolare emerge l'elevata tossicità della luce blu. Mettendoli assieme i dati raccolti da questo studio suggeriscono che i danni si presentano non solo ad elevate luminosità, come ci si sarebbe aspettato, ma anche a livelli di luminosità domestiche.<sup>(78) (79)</sup> Vero anche che nello studio si sono analizzate situazioni di esposizione acute e non si è presa in considerazione un'esposizione cronica.<sup>(80)</sup> Inoltre lo studio non ha utilizzato nessun tipo di marker per osservare lo stress retinico indotto dalla luce e dall'esposizione ad essa, che col tempo, potrebbe provocare dei danni come quelli osservati nella degenerazione maculare senile.<sup>(81)</sup>

Un a studio epidemiologico condotto da Fletcher A.E. et al., ha riscontrato un'associazione (ma non una causalità) significativa tra DMSL ed esposizione elevata alla luce blu. La ricerca prendeva in esame 4400 persone: 101 con DM neo-vascolare, 2187 con primi segni e sintomi di DM e 2117 come gruppo controllo. L'associazione tra i 2 fattori considerati è stata rilevata nel valore massimo della distribuzione di individui con DM neo-vascolare con bassi livelli di antiossidanti, fattore associato anche al gruppo di persone con segni di DM iniziale<sup>(82)(83)(84)</sup>.

Nel 2017 uno studio condotto da Yu-Man Shang et al. ha rilevato una relazione positiva tra danno retinico fotochimico e esposizione a luce LED di colore blu (450nm), con l'ausilio di cavie animali <sup>(85)</sup>.

Un articolo pubblicato di V. Algvere et al. riassume una serie di sperimentazioni sui danni che la luce blu provoca alla retina. Lo scritto espone come questa radiazione elettromagnetica HEV possa provocare un aumento dell'incidenza della degenerazione maculare senile e come la stessa tipologia di luce può peggiorare la situazione clinica di soggetti già affetti dalla patologia.

Sono stati presi in considerazione danni ossidativi e possibile cause dovute all'apoptosi dei fotorecettori, oltre ad analizzare svariate molecole essenziali nel processo di fototrasduzione quali la lipofuscina nell'interazione con la radiazione dai 400- ai 450-nm <sup>(86)</sup>.

La fotoretinite è una patologia di natura fotochimica. La situazione di insorgenza di questa patologia è dovuta a una esposizione a della luce di colore blu-viola. La fotoretinite da luce blu è l'instaurazione di una situazione in cui i fotorecettori non riescono più a compire attività di traduzione del segnale perché eccessivamente stimolati. Questo crea un danno progressivo proporzionale al tempo trascorso all'esposizione della radiazione. I sintomi sono visione offuscata o alterata, dovuti alla progressiva degenerazione dei fotorecettori, ma può insorgere ustione della retina con perdita totale della vista quando il danno è esteso e concentrato <sup>(87)</sup>.

Alla luce di questi studi e dei risultati questi esperimenti, appare lampante che questa nuova tipologia di luce procuri dei problemi a livello fisiologico, biologico e meccanico



nel nostro corpo e nel nostro comportamento. Alla luce del fatto che in questi ultimi anni è aumentato in maniera spropositata l'utilizzo di questo tipo di illuminazione nella nostra vita quotidiana e considerando l'uso continuativo che si fa della tecnologia che sfrutta per l'illuminazione degli schermi questo tipo di luce, sembra ovvio come non si possa lasciare che tutto ciò semplicemente avvenga. Non si può in assoluto sottovalutare il problema e affrontarlo senza essere informati degli effetti che provoca. Come si può, dunque, intervenire?

#### ***IV. VI Strategie difensive:***

Visto la portata del problema si è provato a pensare ad un modo per risolverlo o quantomeno per ridurlo.

Le soluzioni più ovvie sono due. Si può agire sul dispositivo da cui esce la luce o si può andare ad agire sul dispositivo che la riceve.

##### *1) Agire sul dispositivo:*

Per agire sul dispositivo le aziende tecnologiche hanno creato delle applicazioni o dei piccoli filtri integrati nel prodotto finale. Apple ha presentato da qualche anno gli Iphone SE e iPad Pro 9.7, entrambi equipaggiati con l'ultima versione del sistema operativo della mela, iOS 9.3. <sup>(88)</sup>Una delle più importanti novità introdotte da Apple con questo aggiornamento è la modalità *Night Shift*, che è possibile abilitare affinché la sera riduca automaticamente la quantità di luce blu emessa dal display, passando a tonalità più calde (è possibile regolare l'intensità del colore). Abilitare *Night Shift* è molto semplice: per farlo, basta andare su *Impostazioni > Schermo e luminosità > Night Shift* ed abilitare la spunta *Programmato*, che lo attiverà automaticamente nelle ore notturne. Inoltre, sempre da questa schermata, è possibile forzare l'attivazione a qualsiasi orario (che si disattiverà il giorno dopo) e regolare la temperatura dello schermo, perché passi su tonalità più o meno calde quando *Night Shift* è attivo. <sup>(89)</sup>

Un altro software molto famoso e molto usato, divenuto quasi uno standard per questo utilizzo, è *f.lux*. *F.lux* è disponibile per Windows, Linux e OS X e una volta installato non ha bisogno di troppe configurazioni: abilita automaticamente il filtro per la luce blu a seconda dell'ora del giorno e della posizione geografica. Se le impostazioni automatiche non vi piacciono, tramite un comodo pannello di impostazioni, è possibile

personalizzare le tonalità dello schermo per ognuna delle tre impostazioni disponibili, Daytime (giorno), Sunset (tramonto) e Bedtime (notte).<sup>(90)</sup>

Oltre a IOS anche l'altro colosso dei sistemi operativi, ANDROID, ha creato dei sistemi per ridurre questo problema. Alcuni smartphone Android integrano già in origine una modalità simile a Night Shift:<sup>(91)</sup>

- Gli smartphone con CyanogenOS (o CyanogenMod) hanno la funzione Live Display;
- ASUS ha l'opzione Filtro luce blu: si attiva dalla tendina delle notifiche e tenendo premuto si aprono le impostazioni relative
- Xiaomi ha la Modalità lettura: si attiva dalla tendina delle notifiche e tenendo premuto si aprono le impostazioni relative

Se il vostro smartphone Android non implementa nulla di simile, sono disponibili diverse alternative per filtrare la luce blu e, tramite una semplice ricerca su Play Store, troverete tante app che servono allo scopo.

Ovviamente anche sullo schermo del pc è possibile impostare una sorta di filtro tramite le Impostazioni.

Vedere come le grandi multinazionali si stiano prodigando per rendere più sicuri e meno dannosi gli schermi a luce LED forse ci fa capire bene come questo fenomeno sia di portata globale.

Tuttavia siamo in un campo in cui non possiamo mettere mano personalmente. Si tratta, infatti, di pacchetti pre confezionati che possiamo solo utilizzare come coadiuvanti.

Ciò su cui noi possiamo intervenire sono i filtri posti di fronte al sistema o dispositivo che riceve la luce blu; l'occhio.

## 2) Agire sull'occhio:

Per quanto riguarda l'agire sull'occhio si parla di filtri. Si è visto che il modo migliore per intervenire sul sistema visivo e, quindi, sull'apparato che riceve la luce dannosa piuttosto che sull'apparato che la produce è quello di anteporre ad esso dei filtri bloccanti la luce in questione.

Ora il modo migliore per farlo può essere applicare un filtro davanti, ma separato, dunque un occhiale, oppure, proprio nell'occhio e quindi una lente a contatto. Sicuramente il modo più fisiologico che meno va a modificare la condizione statica e

ottimale della fisiologia corneale è il filtro sull'occhiale. Ecco, quindi, che ogni azienda di lenti oftalmiche ha il suo trattamento che viene posto sulle lenti come una qualsiasi tipologia di antiriflesso e che va a bloccare, o a diminuire fortemente la quantità di luce blu che raggiunge la retina.

Questo trattamento di solito viene realizzato come altri trattamenti tramite l'aggiunta sulla lente di più strati protettivi. Questi strati rendono la lente più gialla e quindi più filtrante la luce blu. Come abbiamo visto precedentemente un occhio ha delle superfici refrattive trasparenti. Col passare degli anni queste superfici tendono ad ingiallire. Questo comporta una diminuzione della qualità della visione, ma un aumento dell'assorbimento della banda elettromagnetica nel blu. Per lo stesso motivo le lenti con trattamenti contro la luce blu tendono ad essere di una colorazione lievemente giallina.

Emerge, tuttavia un problema. La filtratura della luce blu deve essere compiuta in modo intelligente, preso in considerazione un fatto molto importante. La luce blu appartiene pur sempre allo spettro visibile e non deve essere eliminata completamente. Ciò potrebbe comportare un affaticamento visivo notevole oltre che una visione alterata della realtà, vista la mancanza di un colore e anche un'alterazione del ritmo circadiano, come visto in precedenza. Un filtro sbagliato potrebbe ridurre la luce visibile che arriverebbe sulla retina provocando midriasi e non tagliando l'ultravioletto. Paradossalmente tagliare la luce blu per lasciare l'ultravioletto provocherebbe una situazione più pericolosa per il nostro occhio. Semplificando molto ciò che è stato, in precedenza, detto sulla luce blu si può pensare alla porzione blu dello spettro come suddivisa in:

- banda del maggior danno fototossico, tra 415 e 455 nm con un picco attorno ai 435 nm.
- banda cronobiologica, compresa tra i 465 e i 495 nm. Essenziale per i ritmi circadiani: veglia/sonno, riflesso pupillare, ciclo ormonale, prestazioni cognitive, umore e altre funzioni.

Ecco che appare cristallino come sia difficile trovare un giusto compromesso di filtro che permetta di filtrare la porzione di banda dannosa per l'organismo senza però poter eliminare del tutto le lunghezze d'onda che presentano problematiche relative all'alterazione dei ritmi circadiani.

## Capitolo V: Studio sperimentale

### *V.I Campioni analizzati*

Per lo studio sono stati raccolti dieci campioni di lenti oftalmiche da sette aziende. Ogni campione consisteva in una lente di indice di rifrazione 1,6. Per un totale di dieci trattamenti alla luce blu differenti. Tutti i campioni sono stati analizzati allo stesso modo.

### *V.II Metodo di analisi*

L'analisi o meglio il metodo di analisi di questo elaborato ha come scopo quello di analizzare diversi campioni raccolti dalle diverse aziende per studiare l'effettivo funzionamento del trattamenti contro la luce blu. In particolare l'esperimento verrà condotto in questo modo. Si andrà a colpire i diversi campioni con una luce bianca, che contiene quindi tutte le lunghezze d'onda nel visibile. E si studia con uno spettrometro la luce in uscita dalla lente, al fine di esaminare se la lunghezza d'onda dannosa viene assorbita totalmente o parzialmente dal prodotto e, in caso l'assorbimento sia solo parziale, che intervallo va a coprire. Si tratta di un'analisi qualitativa del prodotto. Ai fini di preservare e tutelare le aziende i campioni saranno identificati con valori alfanumerici, in modo da non rivelare l'identità di un determinato prodotto a cui è affidato un valore di trasmissione studiato da me in modo personale e quindi al di fuori degli studi che ogni singola azienda già fa sul proprio prodotto.

L'analisi verrà svolta analizzando appunto i campioni con uno spettrometro.

### **Spettrometro:**

“**spettròmetro** Spettroscopio fornito dei dispositivi che consentono la misurazione delle grandezze spettrali. Se si avvale di tecniche fotometriche per rilevare lo spettro di emissione di una sorgente o lo spettro d'assorbimento di una sostanza, lo strumento prende comunemente il nome di spettrofotometro.” <sup>(106)</sup>

Il termine spettrometro si riferisce a qualsiasi strumento che permette di misurare lo spettro della radiazione elettromagnetica, ovvero le proprietà della luce in funzione della sua lunghezza d'onda. La maggior parte degli spettrometri sfrutta il principio

dell'interferenza per decomporre la radiazione luminosa nelle sue lunghezze d'onda e misurarne l'intensità con un fotodiodo. Gli spettrometri hanno una vastissima gamma di applicazioni che riflette la molteplicità di tipologie e caratteristiche di tali strumenti. Applicazioni vanno dalla cosmologia alla fisica dei materiali all'ingegneria. Normalmente gli spettrometri sono suddivisi a seconda del loro potere di risoluzione e della sezione dello spettro luminoso che possono misurare (visibile, UV, raggi-X, microonde, ecc.). Ovviamente, come spiegato in precedenza ci soffermeremo sull'analisi della porzione nel visibile.<sup>(107)</sup>

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.

### **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  $I_0$  e  $I_1$  sono rispettivamente l'irradianza luminosa incidente ed emergente dal campione attraversato. L'irradianza o illuminanza è il flusso della radiazione elettromagnetica, ovvero la densità di corrente termica trasmessa per irraggiamento. Si misura in  $\frac{W}{m^2}$ .

Il valore della trasmittanza è generalmente inferiore a uno. Spesso viene anche espressa come valore percentuale

La trasmittanza è legata all'assorbanza dalla seguente relazione :

$$A = -\ln(T) = \ln(I_0) - \ln(I_1)$$

L'andamento della trasmittanza in funzione della lunghezza d'onda per una data sostanza rappresenta lo *spettro* della sostanza stessa.

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.

Si riesce in modo ottimale, quindi, a fare un'analisi qualitativa dei campioni.

### ***V.III Valutazione spettrometrica dei campioni e risultati sperimentali***

#### **Campione 1:**

Nel grafico 1, qui di seguito riportato, si può notare come la lente funzione a diverse lunghezze d'onda come filtro

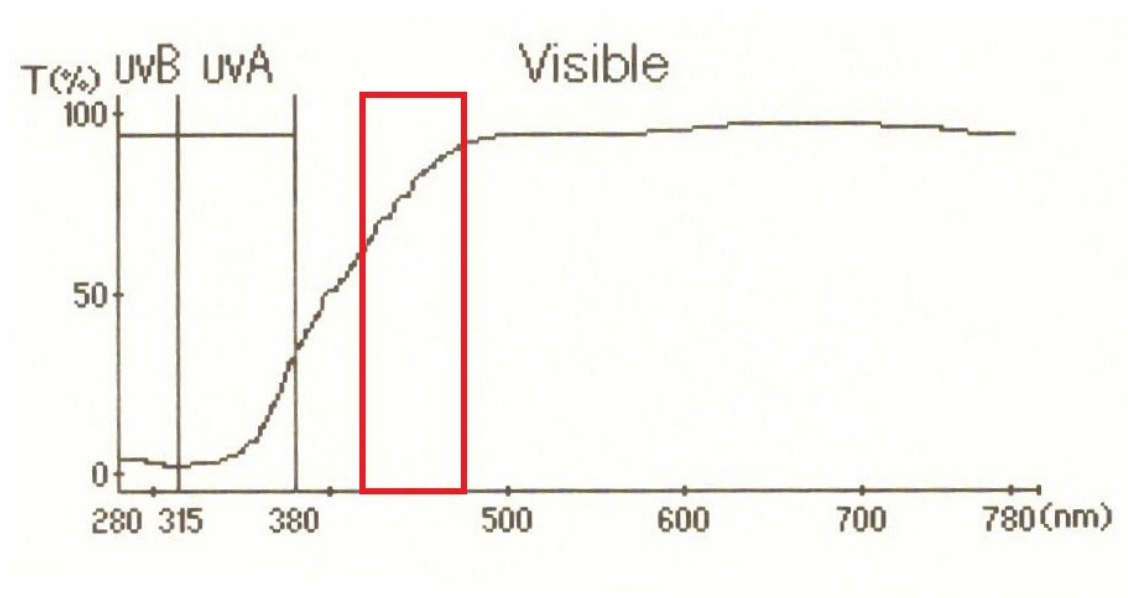


Grafico 1: analisi spettrofotometrica campione 1

Come detto in precedenza vediamo che all'aumentare della lunghezza d'onda nell'asse delle ascisse aumenta anche la trasmittanza sull'asse delle ordinate.

Più in particolare vediamo che:

Nella banda degli UV-B (280-315 nm secondo le norme ISO) la lente ha una trasmittanza del 2,50%. Passa, dunque, solamente il 2,50% delle radiazioni presenti su questa lunghezza d'onda.

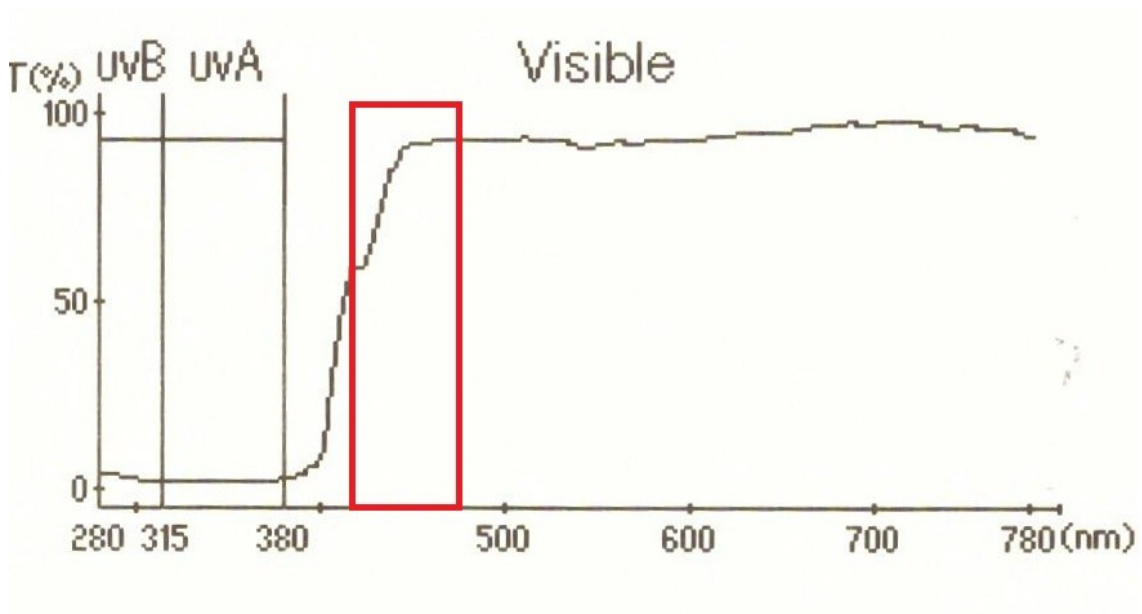
Nella banda degli UV-A (315-400 nm secondo le norme ISO), che è una zona che interessa di più al fine del nostro studio la trasmittanza è pari all'8,41%. Anche se verso i 400 nm effettivamente si aggira attorno al 30%.

La trasmittanza media della porzione del visibile è 94,31%

Attorno al picco di lunghezza d'onda della zona dannosa (435 nm) si ha una trasmittanza che va dal 65% al 75%.

Si ha infine, che per tutte le lunghezze d'onda che secondo gli studi in vitro regolano il ciclo circadiano (tra i 455 e i 500 nm con picco di sensibilità attorno ai 460) la trasmittanza è massima pari al 90%. Ciò sta a significare che non vi è quasi alcun filtro da parte della lente.

## Campione 2:



## Grafico 2: analisi spettrofotometrica campione 2

Anche per il campione due a grandi linee vale il discorso fatto in precedenza. Qui abbiamo:

Nella banda degli UV-B (280-315 nm) abbiamo una trasmittanza dell'1,87 %. Più bassa del primo campione.

Nella banda degli UV-A (315-400 nm) la trasmittanza sta a 2.04 %. Molto più bassa rispetto al campione 1. Per quanto riguarda la luce visibile la trasmittanza media si aggira attorno al valore del 92,83 %

Nella zona del picco dannoso (435 nm) la trasmittanza è più alta, attorno al 70 %.

Mentre, come per il campione 1 ad alte lunghezze d'onda nel blu la trasmittanza è massima e pari al 100%.

## Campione 3:

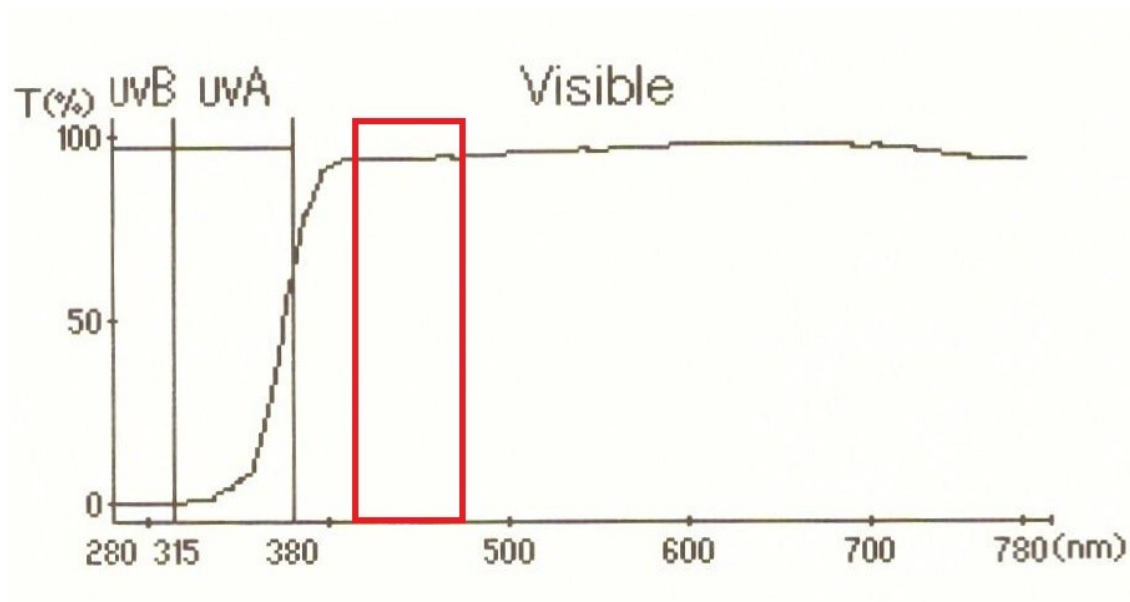




Grafico 3: analisi spettrofotometrica del campione 3

Nel grafico dell'analisi del terzo campione si nota subito una differenza sostanziale. Agisce, infatti, sempre molto bene per quanto riguarda basse frequenze d'onda ma già prima dei 400 nm la trasmittanza aumenta rapidamente.

I valori di questo campione sono:

Nella banda degli UV-B la trasmittanza vale 0,18%. Molto bassa quindi come ci si aspettava.

Nella banda degli UV-A ci aspettiamo che sia più alta rispetto al primo campione e, quindi, anche del secondo. Vale, infatti, 10.83 %.

Nel visibile si aggira attorno al 96,77 %. Vediamo però che attorno al picco dei 435 nm dannoso per l'occhio umano la trasmittanza è parecchio alta. Circa 100 %. Così come per tutti i valori più alti. Ciò denota non un'alta qualità di filtro alla luce blu.

#### **Campione 4:**

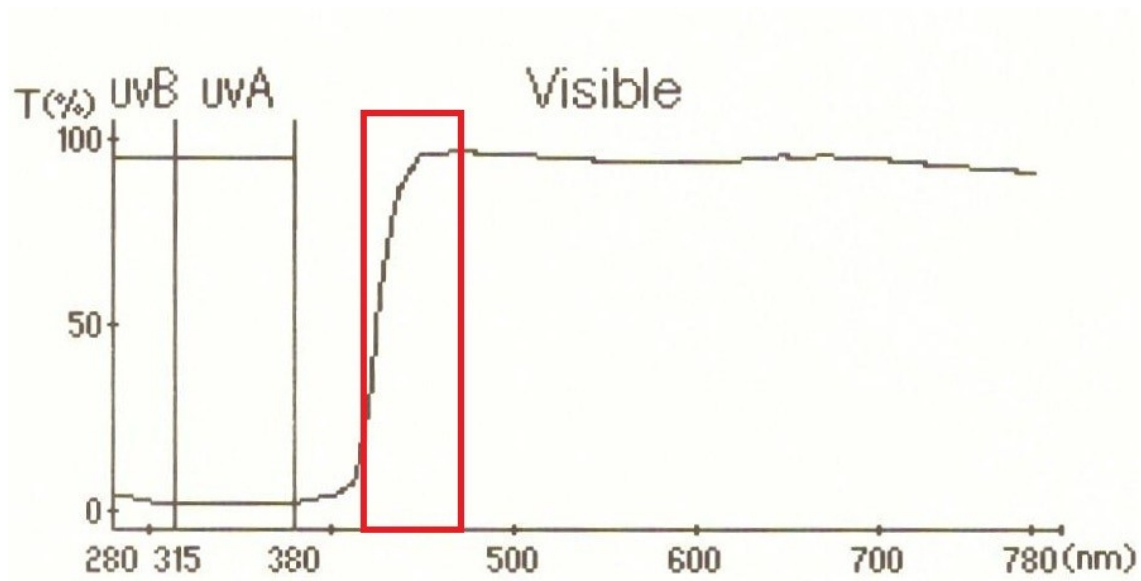


Grafico 4: analisi spettrofotometrica del quarto campione

Il quarto campione è molto simile al secondo.

Abbiamo, infatti, che la trasmittanza rimane molto bassa nelle bande dei raggi UV-A e UV-B fino a circa 410 nm poi aumenta molto rapidamente fino al 100 % a circa 450 nm.

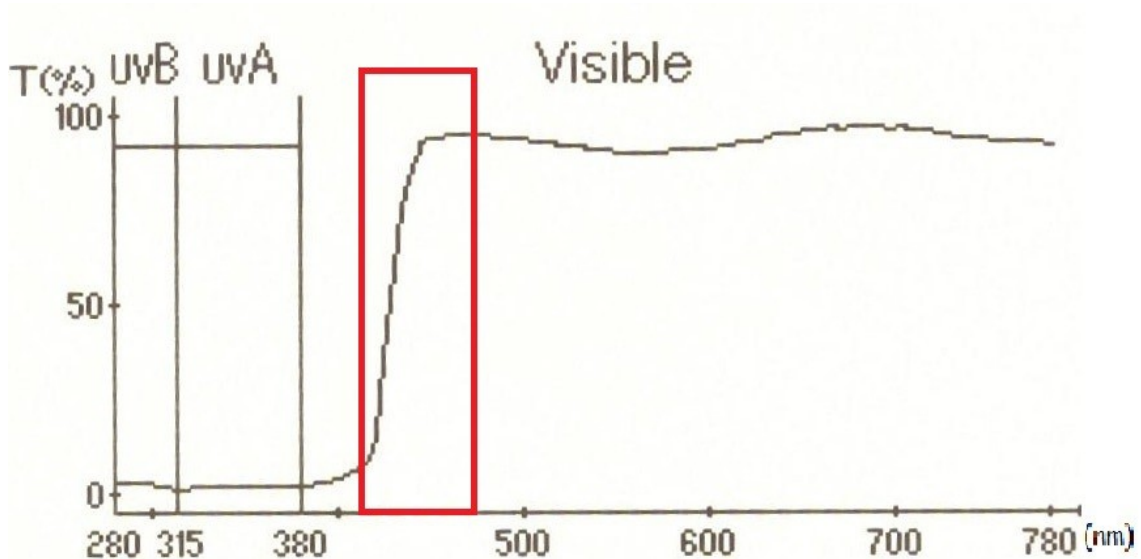
La trasmittanza negli UV-B è, infatti, 1,82 %.

La trasmittanza negli UV-A rimane quasi costante a 1,92 %.

Nella porzione visibile, come immaginato aumenta moltissimo fino al 94.64 %.

Attorno ai 435 nm raggiunge una trasmittanza del 25 % - 35 %. Abbastanza bassa, il che denota una buona qualità. Nuovamente, però, attorno al picco di sensibilità umana, nei confronti delle lunghezze d'onda che tendono a mutare il ciclo circadiano, (465 nm) la trasmittanza è al 95%.

### Campione 5:



### Grafico 5: analisi spettrofotometrica del campione 5

Anche il grafico 5, come i precedenti sembra funzionare molto bene a basse lunghezze d'onda.

La trasmittanza nelle bande degli UV-B è 1,76 %.

Nelle bande degli UV-A è 1,73 %.

La trasmittanza nel visibile è alta, ma minore dei campioni precedenti. 91,54 %.

Attorno al picco della zona di radiazioni nel blu più dannose all'occhio (435 nm) la trasmittanza raggiunge il valore di circa 50 %.

da 450 nm circa in poi a trasmittanza rimane più o meno costante a 90 %.

### **Campione 6:**

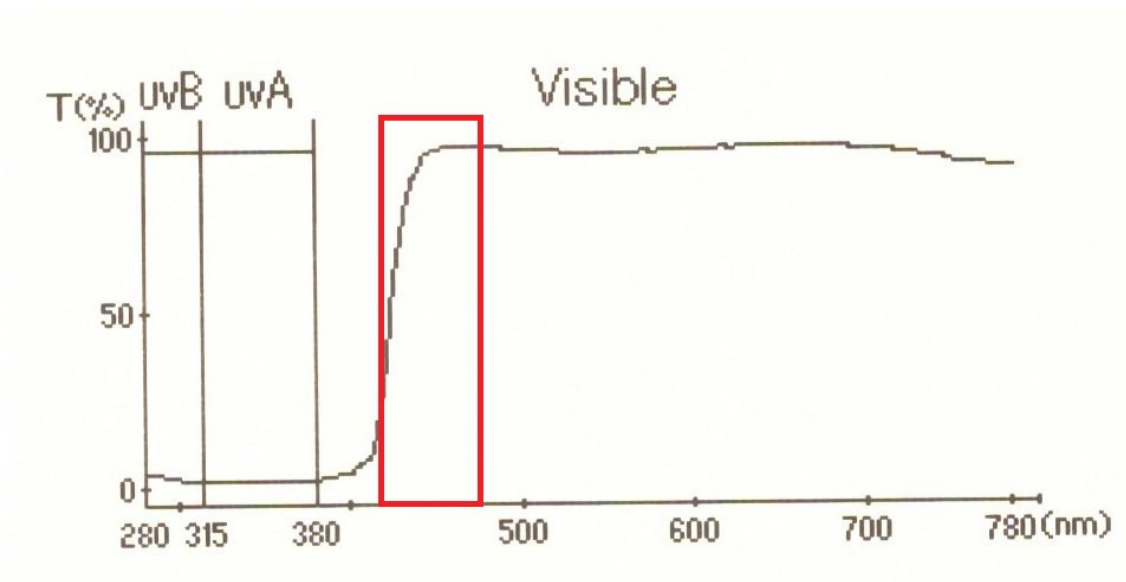


Grafico 6: analisi spettrofotometrica del campione numero 7

Anche per il sesto campione la capacità di filtro della lente si dimostra ottimo per le lunghezze d'onda nella banda degli UV-B e degli UV-A dove la trasmittanza è rispettivamente 1,82 % e 1,95 %.

Nella banda del visibile la trasmittanza è 95.64%. Si nota, infatti, molto bene come arrivati ad una banda di circa 410-420 nm la trasmittanza aumenta rapidamente fino a raggiungere il 50 %, fino ad arrivare al 95 % a circa 440 nm.

Anche in questo campione i picchi dannosi a 435 e 465 nm non sembrano adeguatamente coperti.

**Campione 7:**

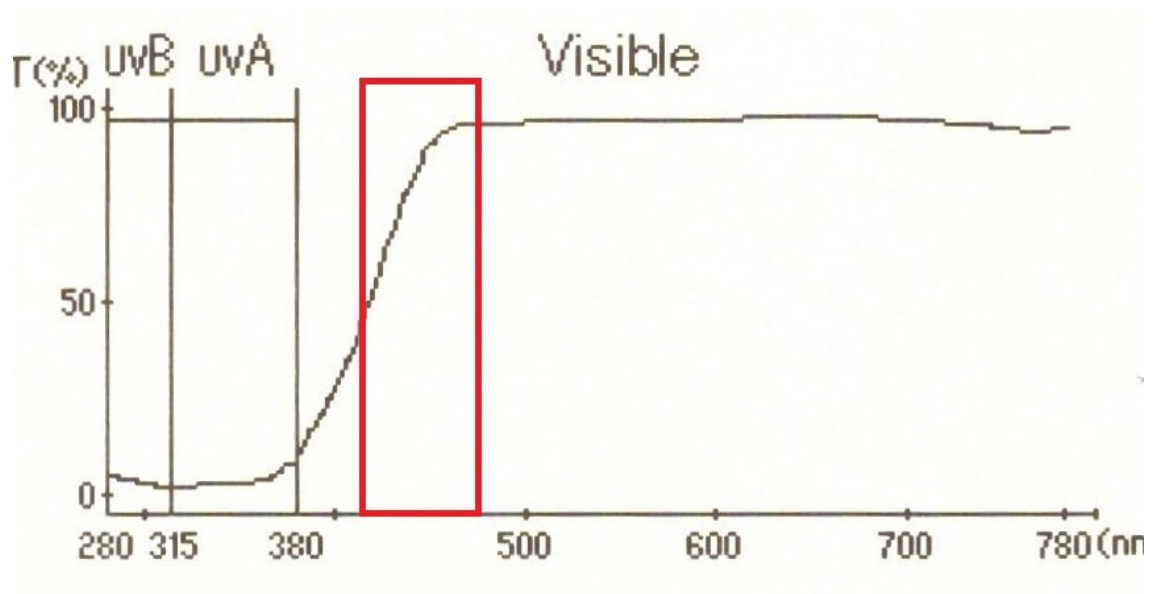


Grafico 7: analisi spettrofotometrica del settimo campione

Nel settimo grafico, sopra riportato abbiamo una situazione leggermente diversa dal precedente campione. Abbiamo una trasmittanza che sembra leggermente più alta nel settore dei raggi ultravioletti, ma presenta una progressione più lieve verso il 100 % di trasmittanza. Dati alla mano si nota che:

La trasmittanza nella sezione degli UV-B è al 2,48 %, mentre quella per gli UV-A è al 3,47 %. Qui la trasmittanza rimane comunque su uno standard basso. La trasmittanza nella luce visibile rimane, come in tutti gli altri campioni elevata, attorno al 96,94 %. Tuttavia, proprio per questo aumento lieve di trasmittanza, essa non raggiunge il 100 % se non dopo i 450 nm. Rimane coperta da una trasmittanza uguale o inferiore al 50 % la zona che va fino ai 430 nm.

### **Campione 8:**

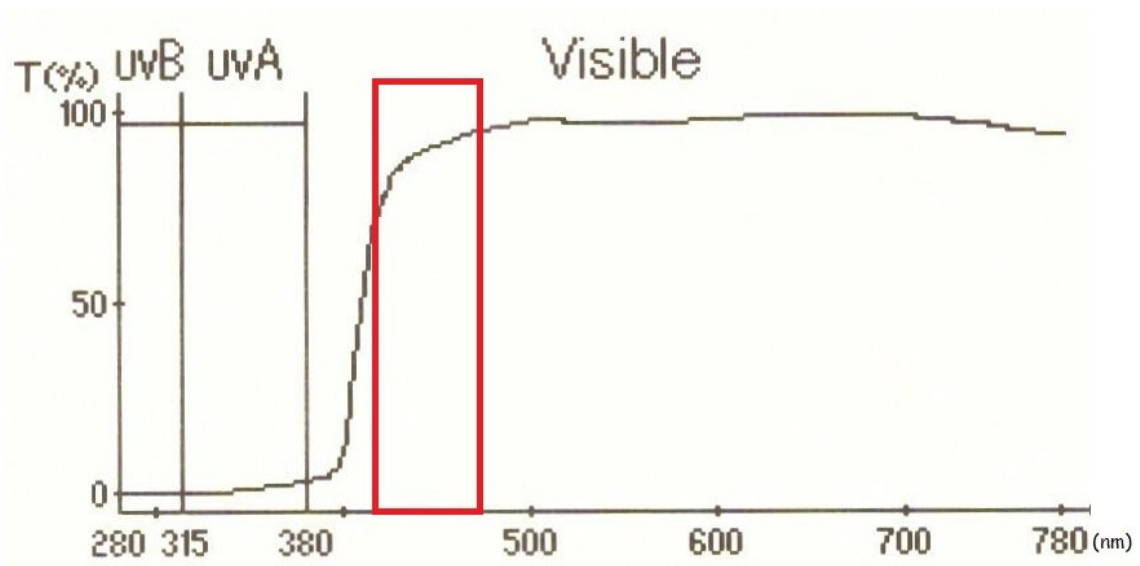


Grafico 8: analisi allo spettrofotometro del campione 8

In questo campione emerge una quasi perfetta funzione di filtro nelle bande dai 280 nm fino ai 400 nm circa. La trasmittanza è quasi allo 0%, per UV-B e UV-A rispettivamente si sofferma su 0,05 % e 0,87%. Poi aumenta rapidamente e nel visibile rimane stabile a 97,43 %.

A 435 nm la trasmittanza è circa 80%. A 465 nm, invece, è già al 100 %.

### Campione 9:

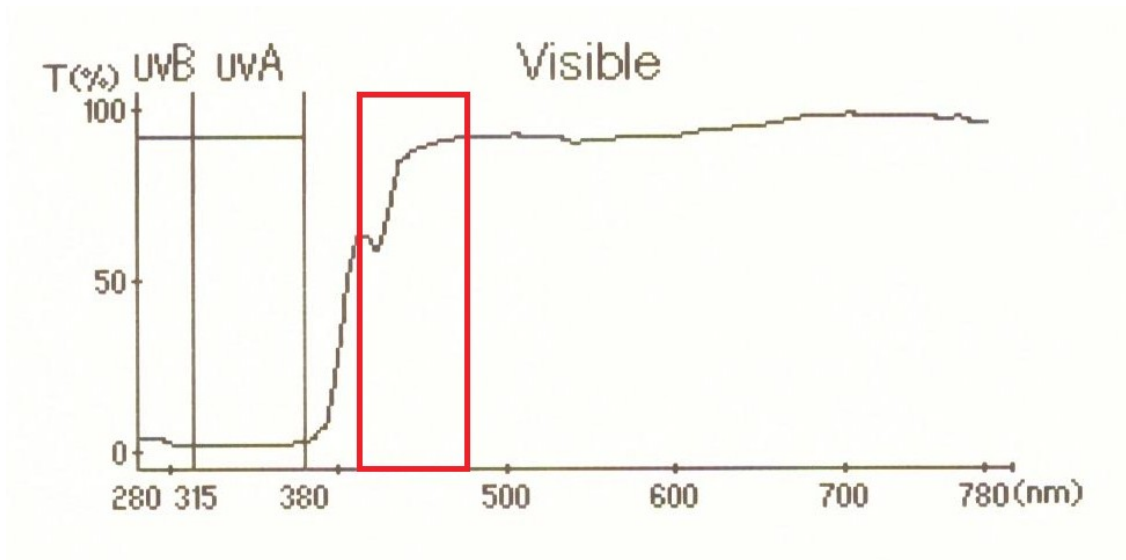


Grafico 9: analisi spettrofotometrica del campione 9

I dati del nono campione sono molto simili agli altri.

La trasmittanza nella banda degli UV-B è 1,84 %.

La trasmittanza nella banda degli UV-A è 2,14 %.



La trasmittanza nel visibile è 91.91 %.

Questo campione mostra una trasmittanza nel visibile più bassa rispetto ai precedenti. Tuttavia i picchi di 435 e 465 nm risultano ancora non opportunamente protetti e filtrati, poiché la trasmittanza in quella zona (identificata nel rettangolo rosso) varia dal 60 % al 90 %.

### Campione 10:

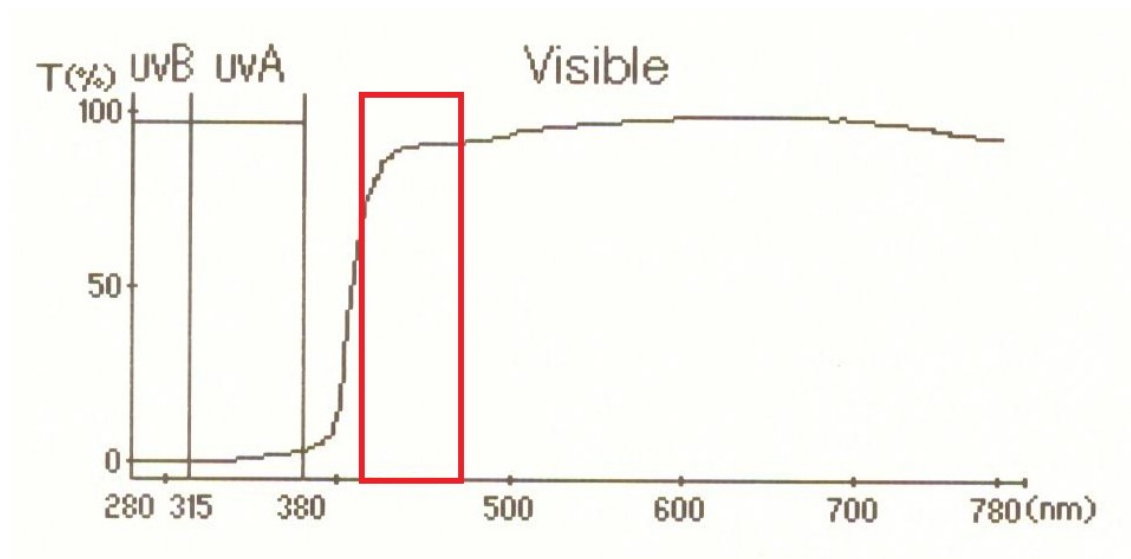


Grafico 10: analisi spettrofotometrica del campione numero dieci

Anche il campione numero dieci, come il campione numero otto mostra un ottimo filtraggio della luce nella lunghezza d'onda degli ultravioletti UV-B e UV-A con una trasmittanza dello 0,05 % e dello 0,88 %. Anche qui, tuttavia, il visibile si posiziona su valori piuttosto alti di trasmittanza, circa del 96,89 %.

Vediamo che nella zona delicata della radiazioni nel blu la trasmittanza cresce rapidamente e varia dal 60-70 % fino al 95 %.

### ***V.VI Analisi dei risultati***

Dal confronto fatto tramite l'utilizzo della tabella V, sottostante, emerge un dato molto interessante. Effettivamente nessuno dei campioni studiati presenta un filtro adeguato alla luce blu dannosa per l'occhio, che abbiamo visto presentarsi con lunghezze d'onda comprese all'incirca tra i 420 nm e i 470 nm. Nei grafici soprastanti questo intervallo di lunghezze d'onda è stato messo in risalto tramite un rettangolo rosso. Confrontando le diverse trasmittanze in questo intervallo il risultato è quello riportato in tabella V:

TABELLA RIASSUNTIVA:

| CAMPIONE | UV-B   | UV-A    | BLU (420-470 nm) |
|----------|--------|---------|------------------|
| 1        | 2,50 % | 8,41 %  | 65-90 %          |
| 2        | 1,87 % | 2,04 %  | 65-90 %          |
| 3        | 0,18 % | 10,83 % | 90-95 %          |
| 4        | 1,82 % | 1,92 %  | 25-95 %          |
| 5        | 1,76 % | 1,73 %  | 15-90 %          |

|    |        |        |         |
|----|--------|--------|---------|
| 6  | 1,82 % | 1,95 % | 30-95 % |
| 7  | 2,48 % | 3,47 % | 55-95 % |
| 8  | 0,05 % | 0,87 % | 70-95 % |
| 9  | 1,84 % | 2,14 % | 60-90 % |
| 10 | 0,05 % | 0,88 % | 70-90 % |

Tabella V: Trasmittanza espressa in percentuale di ogni campione per lunghezze d'onda diverse

Secondo questo studio allo spettrofotometro, sembra che i trattamenti che più rispettano i criteri di filtraggio e selezionamento della luce blu siano quelli dei campioni 4,5 e 6. Nonostante abbiano un range di trasmittanza ampio che va dal 20 % al 90 %, dimostrano, almeno per le lunghezze d'onda vicine ai 435 nm, (quelle più patologicamente dannose) di fungere da filtro dimezzando circa la quantità di luce dannosa. Altri campioni come 1,2,7 e 9 agiscono discretamente bene attorno ai 430 nm con una trasmittanza che si aggira circa sul 60-70 %. Altri ancora, infine, dimostrano un filtraggio insufficiente con una trasmittanza, a lunghezze d'onda considerate dannose, dell'80 %.

### ***V.V Conclusioni***

Dallo studio compiuto sono emersi dei risultati molto interessanti, che sicuramente pongono delle questioni che dovrebbero essere approfondite.

Innanzitutto bisognerebbe cercare di capire la ragione per cui i trattamenti alla luce blu non vengono compiuti in modo da proteggere effettivamente l'occhio dalle lunghezze d'onda più dannose per l'individuo.

Un altro aspetto interessante emerso dalla consultazione di ricerche e studi compiuti sull'argomento è che sono numerosi gli studi fatti per ricercare un legame tra l'esposizione alla luce blu e l'insorgenza di patologie retiniche o di scompensi circadiani. Nessuna di queste ricerche, però, è riuscita in modo scientifico a correlare con certezza i due fenomeni.

Si rendono, inoltre, necessari nuovi studi clinici che i valutino l'efficacia dei trattamenti utilizzati dalle ditte di lenti oftalmiche non solo in vitro, ma direttamente sui pazienti.

Mancano, in effetti, studi che evidenzino l'effettivo beneficio fisiologico a lungo termine di tali trattamenti difensivi sulla biologia umana.

I danni da esposizione a radiazioni blu (415-455nm) sono cumulativi ed indolori. Per i soggetti adulti ed anziani il filtraggio intelligente della luce blu nociva è auspicabile e necessario per una corretta prevenzione di patologie retiniche. Per quanto riguarda i giovani la cosa è più complessa: il crescente aumento dell'esposizione alla luce blu a causa di smartphone, tablet, pc, televisori LCD e quant'altro porta inevitabilmente ad una maggior probabilità di riscontrare tutte le problematiche patologiche riportate dagli studi al capitolo IV. Servirebbero ulteriori studi che vadano ad analizzare quanto l'esposizione esponenziale possa essere un rischio per la salute umana.

Altri studi molto interessanti che si potrebbero condurre potrebbero avere il fine di andare a studiare in modo più approfondito l'effettiva dannosità correlata all'uso sempre più frequente di luci LED nell'illuminazione degli ambienti chiusi.

## **Bibliografia e sitografia:**

1. Dogliotti M., Rosiello L., Zingarelli N., “*vocabolario della lingua italiana*”, dodicesima edizione, 1998, Zannichelli
2. Sears F.W., “*Ottica*”, ristampa del 2015, Casa Editrice Ambrosiana
3. C. Huygens, *Traité de la Lumière*, Leiden: Pieter van der Aa, 1690
4. J.D. Cutnell, K.W. Johnson; “*Elementi di fisica*”, Cap 9, Zanichelli 2010
5. D. Rebutti, Università di Pavia e INFN, “*L'effetto fotoelettrico*”, anno 2008/2009
6. A. Ravizza, “*Che cosa sono i fotoni?*”, 1 gennaio 2016, da [www.scienzaeconoscenza.it](http://www.scienzaeconoscenza.it), consultato 7 maggio 2018
7. Dizionario treccani, [www.treccani.it](http://www.treccani.it), consultato 7 maggio 2018
8. Chevalley C., “*Les fondements de l'optique moderne: Paralipomènes à vittellion*”, 1604, Parigi, 1980
9. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org), “*Riflessione (fisica)*”, consultato 18 ottobre 2018

10. [www.sapere.it](http://www.sapere.it), “*La riflessione e la rifrazione della luce*” consultato il 20 ottobre 2018
11. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org), “*Rifrazione*”, consultato 18 ottobre 2018
12. E. Modica, docente I.P.C.L. “Ninni Cassarà”, “*La rifrazione della luce*”, dispense disponibili su [www.galois.it](http://www.galois.it)
13. West W., “*Absorption of electromagnetic radiation*”, su *AccessScience*, McGraw-Hill. URL consultato l'8 aprile 2013.
14. Michelin R.A., Munari A., “*Fondamenti di chimica*”, II edizione, Cedam, 2011
15. International Union of Pure and Applied Chemistry, “*IUPAC Compendium of Chemical Terminology*”, IUPAC, URL consultato il 10 luglio 2018.
16. [www.etc.polimi.it](http://www.etc.polimi.it) approfondimento sulla teoria dell'effetto pelle politecnico di milano
17. Mazzoldi P., Nigro M., Voci C., “*Elementi di Fisica*”, II edizione, EdiSES, 2007
18. Turchetti E., Fasi R., “*Elementi di Fisica*”, I edizione, Zanichelli, 1998
19. S. Gelosa, “*Legge di Lambert e Beer*”, enciclopedia della Scienza e della Tecnica (2008)
20. Feynman R., “*La fisica di Feynman*”, Bologna, Zanichelli, 2001.: Vol I, cap.33: Polarizzazione
21. Lionel Lovitch e Sergio Rosati, “*Fisica generale*”, vol. 2, 3<sup>a</sup> ed., Casa Editrice Ambrosiana, 1996, cap. 20-3.
22. A. Sommerfeld, *Optics* (Academic press, New York,1954) p.179
23. G. A. Maggi, "Sulla Propagazione Libera e Perturbata delle Onde Luminose in un Mezzo Isotropo", *Ann. Matematica*, **16**, 21 - 47 (1888)
24. Kirchhoff, "Zur Theorie der Lichtstrahlen", *Wied. Ann.* **18**, 663 - 695 (1883)
25. Materiale didattico online sulla diffrazione disponibile in slides delle università di Torino e Roma

26. Oleari C., Peri A., “*Schede di ottica*”, 2006
27. [www.online.scuola.zanichelli.it](http://www.online.scuola.zanichelli.it), - interferenza e luce
28. [La Percezione Dei Colori](http://La Percezione Dei Colori) su [docenti.unicam.it](http://docenti.unicam.it).
29. Sears F.W., “*Ottica*”, ristampa del 2015, Casa Editrice Ambrosiana, pag 20-23
30. Cecie Starr, “*Biology: Concepts and Applications*”, Thomson Brooks/Cole, 2005
31. Thomas J. Bruno, Paris D. N. Svoronos. “*CRC Handbook of Fundamental Spectroscopic Correlation Charts*”, CRC Press, 2005.
32. David K. Lynch e William Charles Livingston, “*Color and Light in Nature*”, 2nd, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2001, p. 231
33. Madhab Chandra Dash e Satya Prakash Dash, *Fundamentals Of Ecology 3E*, Tata McGraw-Hill Education, 2009, p. 213
34. [ISO 21348](http://ISO_21348) “*Definitions of Solar Irradiance Spectral Categories*”, su [spacewx.com](http://spacewx.com)
35. “*Solar radiation*”, su [curry.eas.gatech.edu](http://curry.eas.gatech.edu).
36. “*Introduction to Solar Radiation*”, su [www.newport.com](http://www.newport.com)
37. “*Reference Solar Spectral Irradiance: Air Mass 1.5*”, su [rredc.nrel.gov](http://rredc.nrel.gov).  
URL consultato il 12 novembre 2009
38. [Focus.it/scienza/scienze/ozono-ozonosfera](http://Focus.it/scienza/scienze/ozono-ozonosfera), consultato il 23 ottobre 2018
39. [www.treccani.it/enciclopedia/infrarosso](http://www.treccani.it/enciclopedia/infrarosso), consultato il 25 ottobre 2018
40. [www.Wikipedia.org/wiki/radiazione\\_infrarossa](http://www.Wikipedia.org/wiki/radiazione_infrarossa), consultato il 25 ottobre 2018
41. Kandel E.R., Schwartz J.H., Jessel M.I., “*Principi di neuroscienze*”, terza edizione, Casa Editrice Ambrosiana
42. Stranding S., “*Anatomia del Gray*”, ed. 41, Edra, 2017
43. [www.boccignone.di.unimi/PMP-2013-files/LezPMP-fototraduzione.pdf](http://www.boccignone.di.unimi/PMP-2013-files/LezPMP-fototraduzione.pdf), consultato il 30 ottobre 2018
44. [www.carlocapelli.it/ftp/didattica/scienze\\_motorie/4.Visione\\_02.pdf](http://www.carlocapelli.it/ftp/didattica/scienze_motorie/4.Visione_02.pdf)

45. Frezzotti R., Guerra R., *“Oftalmologia essenziale”*, II edizione, Casa Editrice Ambrosiana
46. T. Höferová, *“Blue light and its influence on our eye and body”*, University in Prague CTU, 2017
47. P. Santucci, *“Luce blu: computer lampade e... web”*, ANMA Medico Competente Journal 1-2017, rubrica Ufficio e Salute
48. Gazzetta ufficiale dell’Unione europea, *“Regolamento delegato (UE) N. 874/2012 della commissione”*, 12 luglio 2012, pubblicato il 26 settembre 2012
49. Dizionario.corriere.it
50. [www.diee.unica.it/~martines/didattica/ElettronicaELT/DiodiELT.pdf](http://www.diee.unica.it/~martines/didattica/ElettronicaELT/DiodiELT.pdf)
51. International dark-sky association, *“Nightscape”*, Issue #80 anno 2010
52. ISTAT, *“Cittadini, imprese e ICT”*, statistiche e report Anno 2017, 21 dicembre 2017
53. Tina Lu, *“Almost Half of Smartphones Users Spend More Than 5 Hours A Day on Their Device”*, [www.counterpointresearch.com](http://www.counterpointresearch.com)
54. D. S. Sutton, *“Time Spent Watching TV Increased in Italy and France in 2015”*, HIS Markit Says, 26 Luglio 2016
55. <http://www.presadiretta.rai.it/dl/portali/site/puntata/ContentItem-60e66850-8f0b-4f3b-807a-9068b533638b.html>
56. C. Benedetti, *“Occhio e sole”*, 19 ottobre 2012, consultato su [www.carlobenedetti.it](http://www.carlobenedetti.it) 19 maggio 2018
57. American Optometric Association, *“Computer Vision Syndrome”*, [www.aoa.org](http://www.aoa.org), visualizzato 1 giugno 2018
58. INAIL, *“Videoterminalisti”*, [www.inail.it](http://www.inail.it), aggiornamento del 24 marzo 2016
59. Nightscape-a publication of the international Dark-sky association – ISSUE # 80/2010
60. Aschoff J (ed.) (1965) *Circadian Clocks*. North Holland Press, Amsterdam

61. Avivi A, Albrecht U, Oster H, Joel A, Beiles A, Nevo E. 2001. Biological clock in total darkness: the Clock/MOP3 circadian system of the blind subterranean mole rat. *Proc Natl Acad Sci USA* 98:13751- 13756
62. Avivi A, Oster H, Joel A, Beiles A, Albrecht U, Nevo E. 2002. Circadian genes in a blind subterranean mammal II: conservation and uniqueness of the three *Period* homologs in the blind subterranean mole rat, *Spalax ehrenbergi* superspecies. *Proc Natl Acad Sci USA* 99:11718-11723.
63. Dvornyk V, Vinogradova ON, Nevo E (2003) Origin and evolution of circadian clock genes in prokaryotes. *Proc Natl Acad Sci USA* 100:2495-2500
64. Koukkari WL, Sothorn RB (2006) *Introducing Biological Rhythms*. Springer, New Yo
65. Refinetti R (2006) *Circadian Physiology, 2nd ed*. CRC Press, Boca Raton
66. Takahashi JS, Zatz M (1982) Regulation of circadian rhythmicity. *Science* 217:1104–1111
67. Tomita J, Nakajima M, Kondo T, Iwasaki H (2005) No transcription–translation feedback in circadian rhythm of KaiC phosphorylation. *Science* 307: 251–254
68. A. Kriegel, M. Berdugo, E. Picard, R. Levy-Boukris, I. Jaadane, L. Jonet, M. Dernigoghossian, C. Andrieu-Soler, A. Torriglia, F. Beharchoen, “*Light induced retinal damage using different light sources, protocols and rat strains reveals LED phototoxicity inserm*”, U1138, Centre de Recherches des Cordeliers, Université Paris Descartes, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France.
69. Peng M-L, Tsai C-Y, Chien C-L, Hsiao JC-J, Huang S-Y, Lee C-J, Lin H-Y, Wen Y-C, Tseng K-W (2012) The influence of low-powered family LED lighting on eyes in mice experimental model. *Life Sci J* 9:477–482.
70. Shang YM, Wang GS, Sliney D, Yang CH, Lee LL (2014), “*White light-emitting diodes (LEDs) at domestic lighting levels and retinal injury in a rat model*”, *Environ Health Perspect* 122:269–276.



71. Stone J, Maslim J, Valter-Kocsi K, Mervin K, Bowers F, Chu Y, Barnett N, Provis J, Lewis G, Fisher SK, Bisti S, Gargini C, Cervetto L, Merin S, Peer J (1999) “*Mechanisms of photoreceptor death and survival in mammalian retina*”, Prog Retin Eye Res 18:689–735
72. Wenzel A, Grimm C, Samardzija M, Reme CE (2005), “*Molecular mechanisms of light-induced photoreceptor apoptosis and neuroprotection for retinal degeneration*”, Prog Retin Eye Res 24:275–306
73. Chahory S, Keller N, Martin E, Omri B, Crisanti P, Torriglia A (2010) , “*Light induced retinal degeneration activates a caspase- independent pathway involving cathepsin D*”, Neurochem Int 57:278–287.
74. Organisciak DT, Vaughan DK (2010), “*Retinal light damage: mechanisms and protection*”, Prog Retin Eye Res 29:113–134.
75. Jaadane I, Boulenguez P, Chahory S, Carre S, Savoldelli M, Jonet L, Behar-Cohen F, Martinsons C, Torriglia A (2015), “*Retinal damage induced by commercial light emitting diodes (LEDs)*”, Free Radic Biol Med 84:373–384.
76. Sliney DH (2005) “*Exposure geometry and spectral environment determine photobiological effects on the human eye*”, Photochem Photobiol 81:483–489.
77. Ortin-Martinez A, Valiente-Soriano FJ, Garcia-Ayuso D, Alarcon-Martinez L, Jimenez-Lopez M, Bernal-Garro JM, Nieto-Lopez L, Nadal-Nicolas FM, Villegas-Perez MP, Wheeler LA, Vidal-Sanz M (2014), “*A novel in vivo model of focal light emitting diode-induced cone-photoreceptor phototoxicity: neuroprotection afforded by brimonidine, BDNF, PEDF or bFGF*”, PLoS One 9:e113798.
78. Dawson W, Nakanishi-Ueda T, Armstrong D, Reitze D, Samuelson D, Hope M, Fukuda S, Matsuishi M, Ozawa T, Ueda T, Koide R (2001) “*Local fundus response to blue (LED and laser) and infrared (LED and laser) sources*”, Exp Eye Res 73:137–147.

79. Ueda T, Nakanishi-Ueda T, Yasuhara H, Koide R, “*Dawson WW (2009) Eye damage control by reduced blue illumination*”, *Exp Eye Res* 89:863–868
80. Behar-Cohen F, Martinsons C, Vienot F, Zissis G, Barlier-Salsi A, Cesarini JP, Enouf O, Garcia M, Picaud S, Attia D (2011), “*Light-emitting diodes (LED) for domestic lighting: any risks for the eye?* ” *Prog Retin Eye Res* 30:239–257
81. van Norren D, Gorgels TG (2011), “*The action spectrum of photochemical damage to the retina: a review of monochromatic threshold data*”, *Photochem Photobiol* 87:747–753.
82. Jarrett SG, Boulton ME (2012) “*Consequences of oxidative stress in age-related macular degeneration*”, *Mol Aspects Med* 33:399–417.
83. Marquioni-Ramella MD, Suburo AM (2015), “*Photo-damage, photo-protection and age-related macular degeneration*”, *Photochem Photobiol Sci* 14:1560–1577.
84. A.E. Fletcher, G.C. Bentham, M. Agnew et al., “*Sunlight exposure, antioxidants, and age-related macular degeneration*”, *Arch Ophthalmol*. 2008 Oct, 126(10):1396-403
85. Y.M. Shang, G.S. Wang, D.H. Sliney, C.H. Yang, L.L. Lee; “*Light-emitting-diode induced retinal damage and its wavelength dependency in vivo*”, *Int. J. Ophthalmol*, Vo 10-2 Feb 2018, 2017
86. V. Algvere, J. Marshall, S. Seregard; “*Age related maculopathy and the impact of blue light hazard*”, *Acta Ophthalmologica Scandinavica*, Vol 84, Issue 1, 23 Jan 2006
87. G. Tosini, I. Ferguson, K. Tsubota; “*Effect of blue light on the circadian system and eye physiology*”, *Molecular Vision* 2016; 22:61-72
88. <https://www.androidpit.it/come-attivare-modalita-notte-filtro-blu-android>
89. <https://www.mondomobileweb.it/90700-come-attivare-il-filtro-luce-blu-per-proteggere-i-nostri-occhi-su-smartphone-android-e-ios/>

90. [https://www.hwupgrade.it/news/apple/ios-93-e-la-modalita-night-shift-meno-luce-blu-per-non-compromettere-il-sonno\\_60233.html](https://www.hwupgrade.it/news/apple/ios-93-e-la-modalita-night-shift-meno-luce-blu-per-non-compromettere-il-sonno_60233.html)
91. <https://www.androidworld.it/2016/02/15/come-attivare-modalita-lettura-chrome-373305/>
92. <https://www.hoyavision.com/it/le-mie-esigenze/informazioni-su-hoya/storia/>
93. [https://it.wikipedia.org/wiki/Hoya\\_Corporation](https://it.wikipedia.org/wiki/Hoya_Corporation)
94. <https://www.itallenti.it/>
95. <http://www.platform-optic.it/ital-lenti-oltre-mezzo-secolo-di-innovazione-tecnologica/>
96. <https://it.wikipedia.org/wiki/Essilor>
97. [https://www.essiloritalia.it/about\\_essilor](https://www.essiloritalia.it/about_essilor)
98. [https://it.wikipedia.org/wiki/Nikon\\_Corporation](https://it.wikipedia.org/wiki/Nikon_Corporation)
99. <https://www.nikon-lenswear.it/>
100. [https://www.shamir-rx.it/index.php?option=com\\_k2&view=item&layout=item&id=412&Itemid=240](https://www.shamir-rx.it/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=412&Itemid=240)
101. <https://www.shamir.com/component/k2/itemlist/category/4-company-history>
102. [https://www.zeiss.it/vision-care/it\\_it/about-us/la-storia-della-societa-carl-zeiss.html](https://www.zeiss.it/vision-care/it_it/about-us/la-storia-della-societa-carl-zeiss.html)
103. [https://it.wikipedia.org/wiki/Carl\\_Zeiss\\_\(azienda\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Carl_Zeiss_(azienda))
104. [https://it.wikipedia.org/wiki/Rodenstock\\_GmbH](https://it.wikipedia.org/wiki/Rodenstock_GmbH)
105. <https://www.rodenstock.com/140Y/it/storia/>
106. <http://www.treccani.it/enciclopedia/spettrometro/>
107. <https://it.wikipedia.org/wiki/Spettrometro>
- 108.