



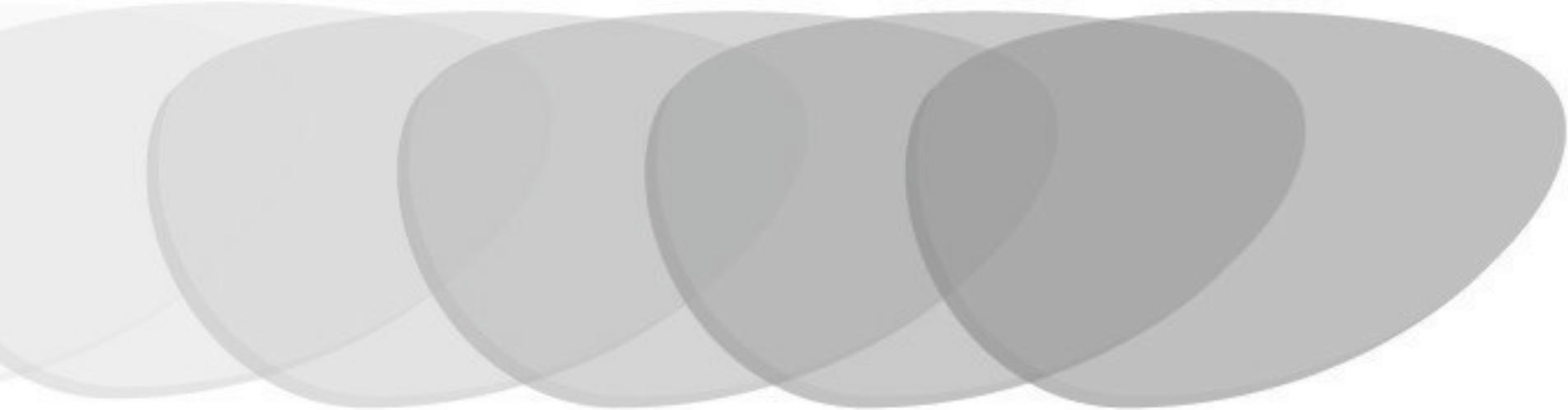
UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Dipartimento
di Fisica
e Astronomia
Galileo Galilei



Lenti fotocromatiche



Dr. Gianluca Ruffato

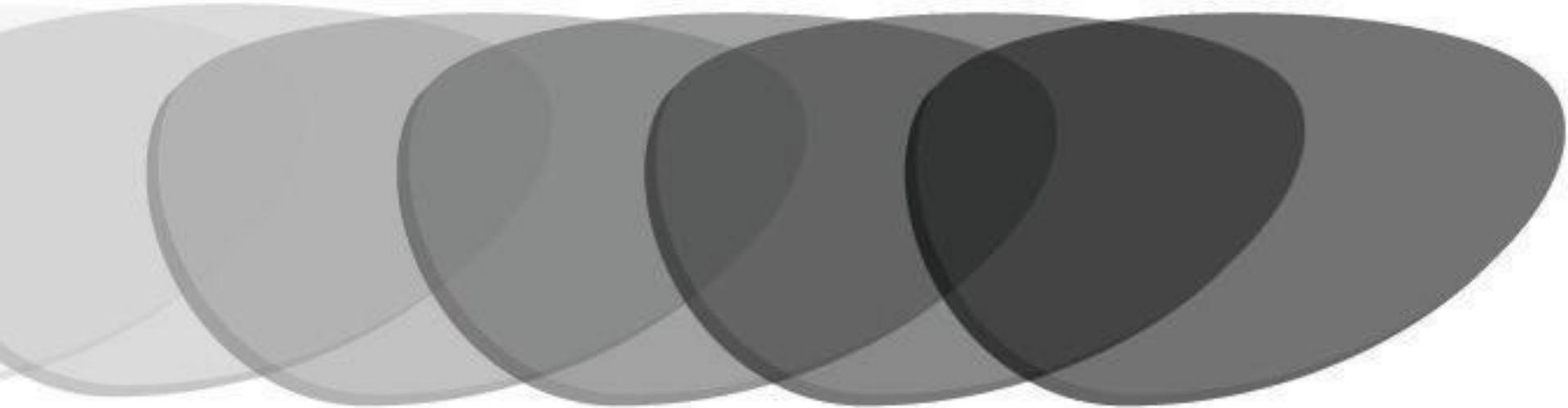
Dipartimento di Fisica e Astronomia “G. Galilei”, Università degli Studi di Padova
Quantum Technologies Research Center (Q-Tech), Università degli Studi di Padova



Lenti fotocromatiche



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

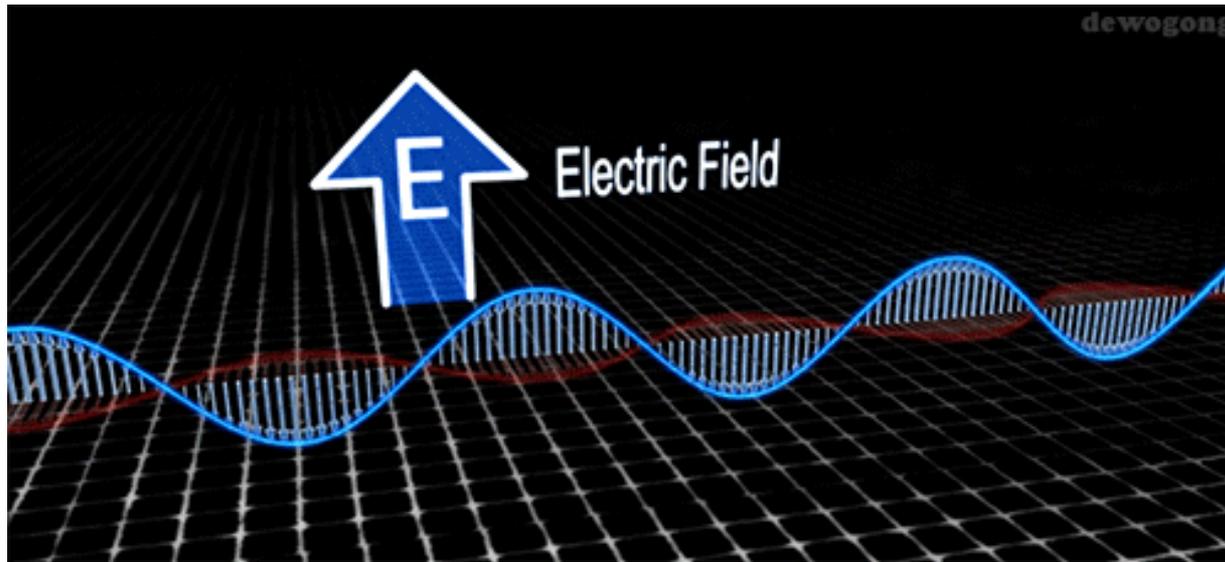


UV

- La luce: natura e proprietà
- Interazione tra luce e materia: indice di rifrazione e assorbimenti
- Strategie per filtrare lo spettro solare
- Il fotocromatismo: storia e definizioni
- Lenti fotocromatiche organiche
- Lenti fotocromatiche in vetro
- Lenti a contatto fotocromatiche
- Potenzialità e limitazioni
- Conclusioni

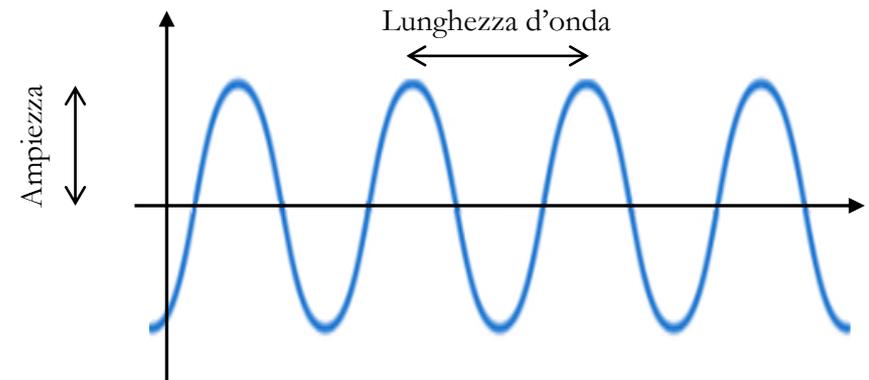
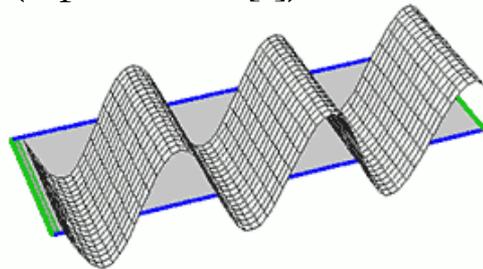


UV

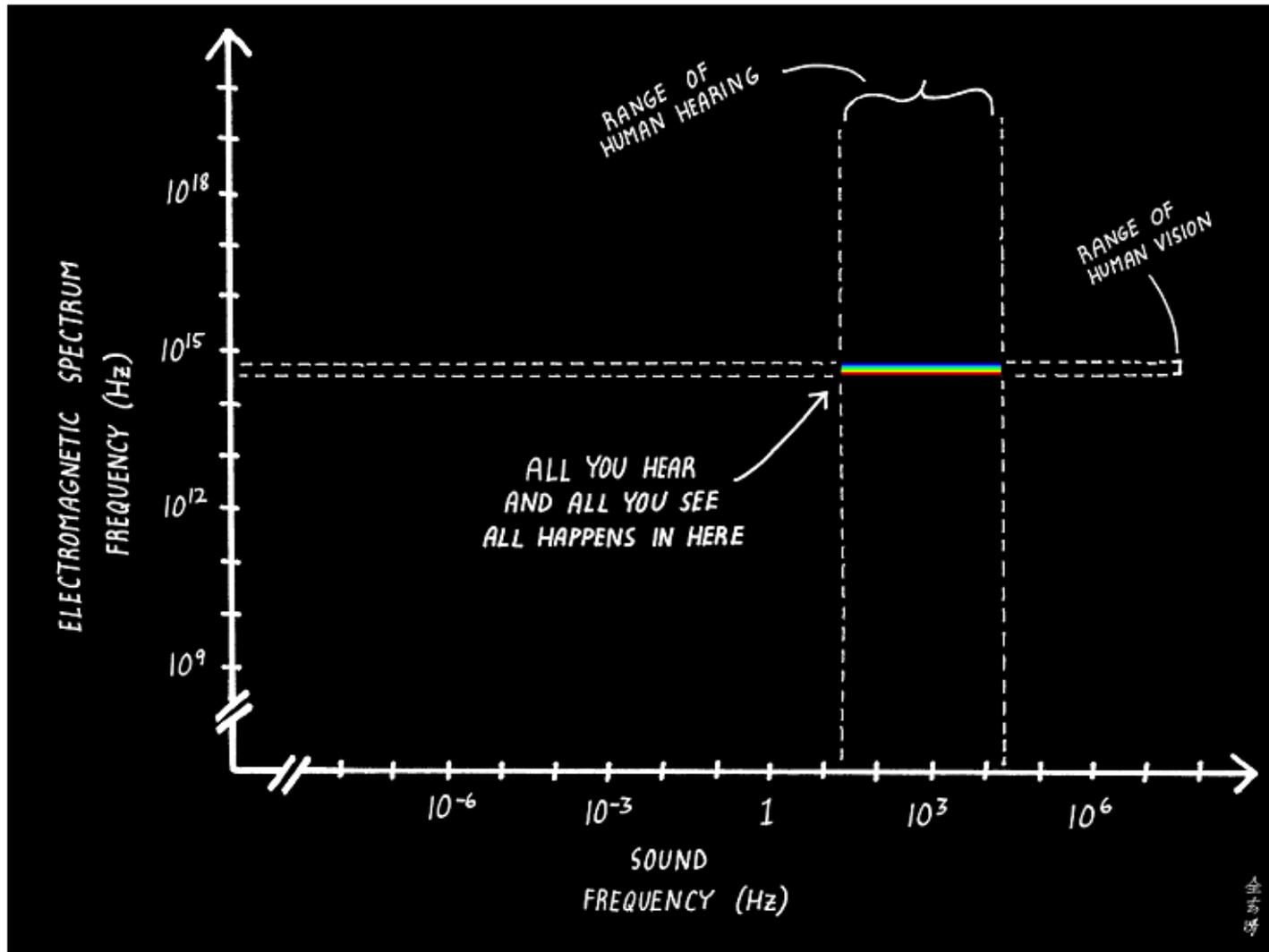


La luce è una oscillazione del campo elettromagnetico che si propaga in forma di onda, ovvero come un fenomeno periodico nello spazio e nel tempo, caratterizzato in particolare da:

- Lunghezza d'onda λ
- Ampiezza
- Frequenza f [Hz] (o periodo T [s])
- Fase
- Polarizzazione



Una finestra molto stretta sul mondo

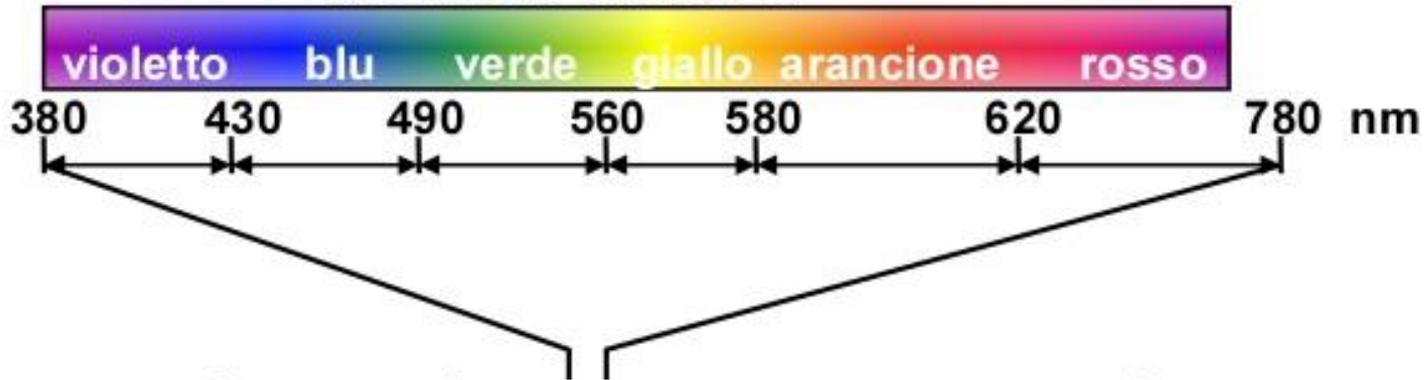


In the grand scheme of things,
we're all pretty much blind and deaf.

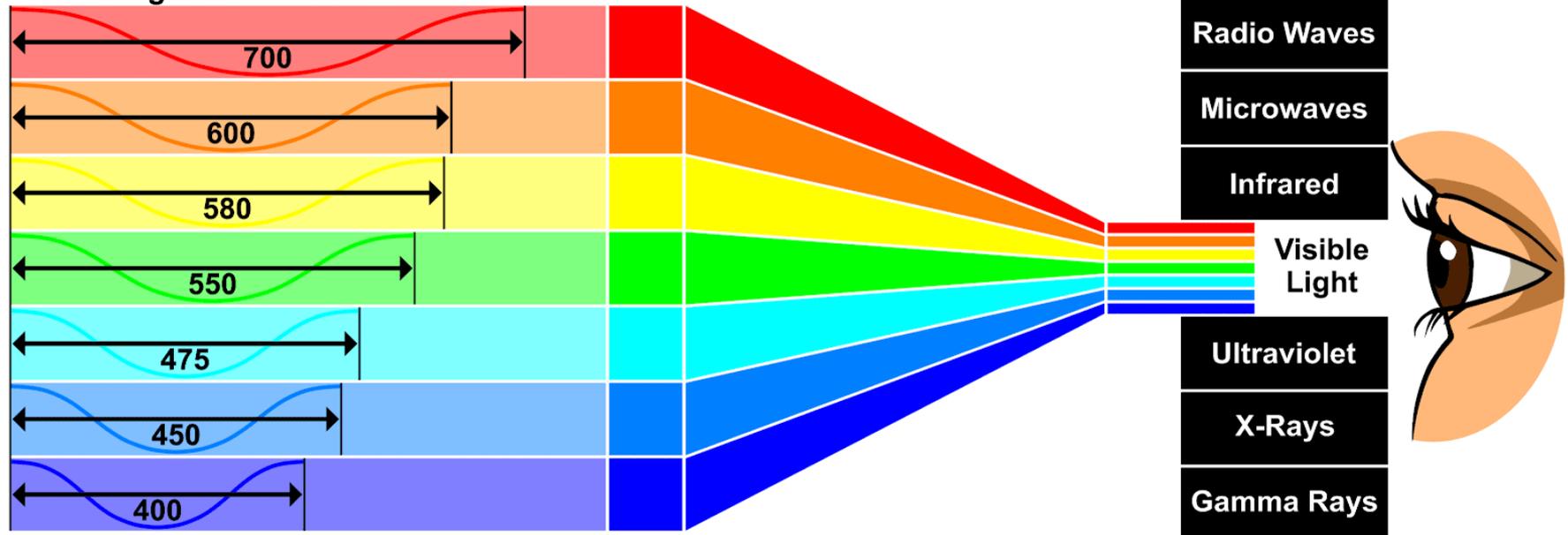
Lo spettro elettromagnetico



SPETTRO VISIBILE



Wave Length in Nanometer



Onde elettromagnetiche nel vuoto



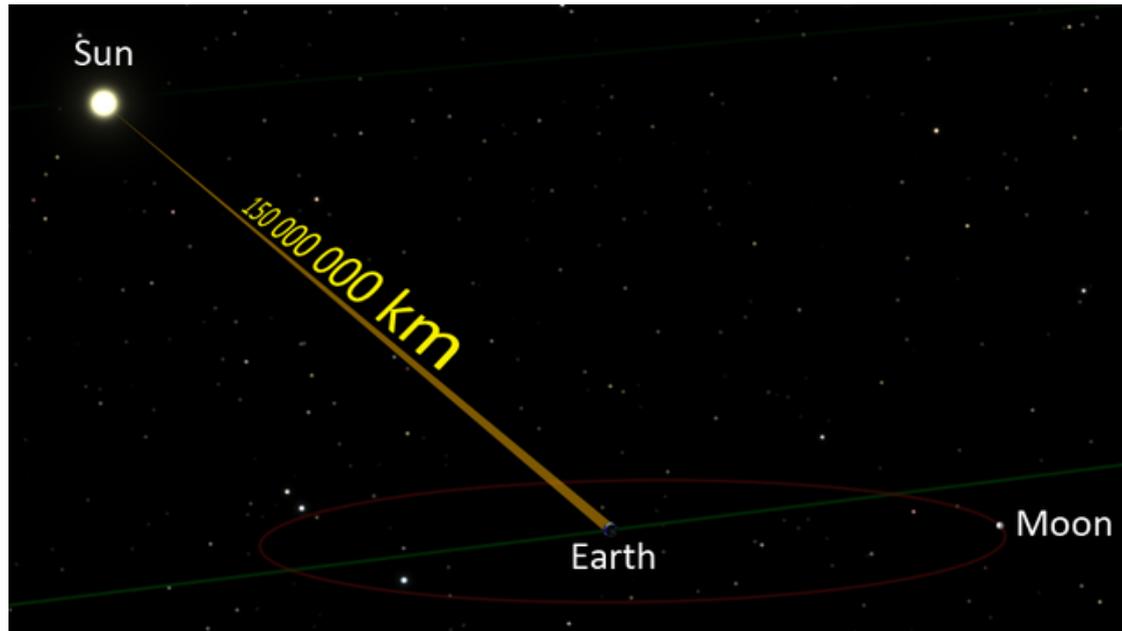
La luce non necessita di un mezzo per propagarsi, si propaga anche nel vuoto interstellare una volta prodotta dalle stelle.

Velocità nel vuoto:

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \cong 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{Nm}^2$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$$



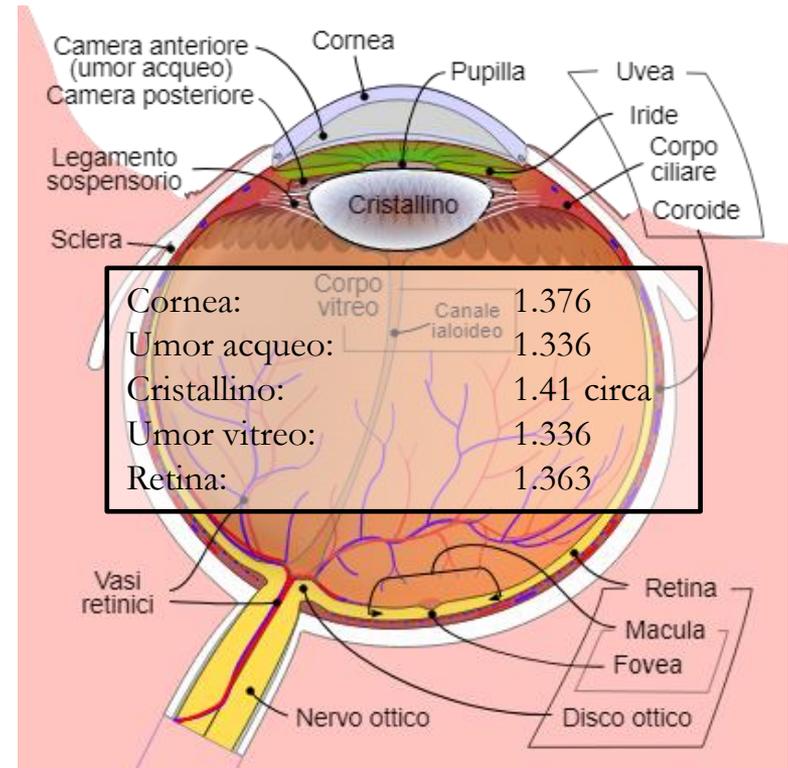
Cosa succede quando la luce attraversa un mezzo trasparente (ad esempio vetro)?

L'indice di rifrazione

Il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto e nel mezzo definisce l'indice di rifrazione n :

$$n = \frac{c_0}{c} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} = \sqrt{1 + \chi}$$

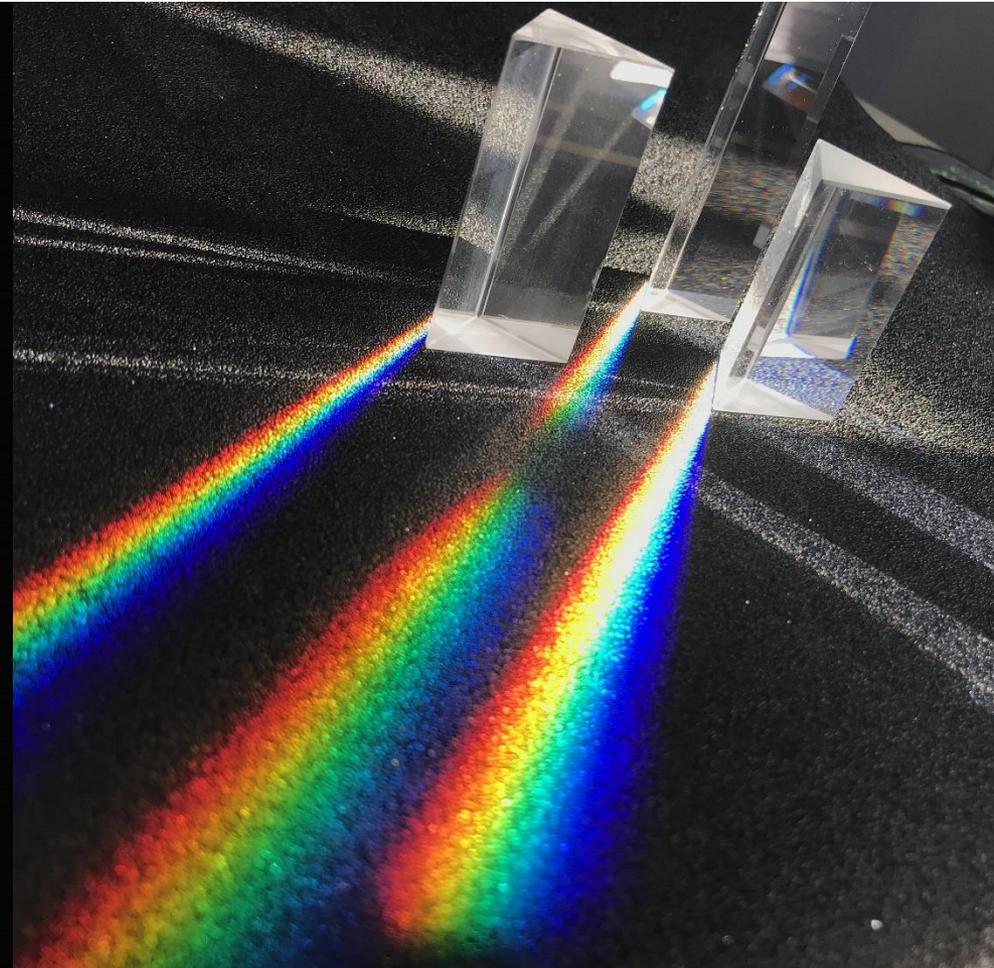
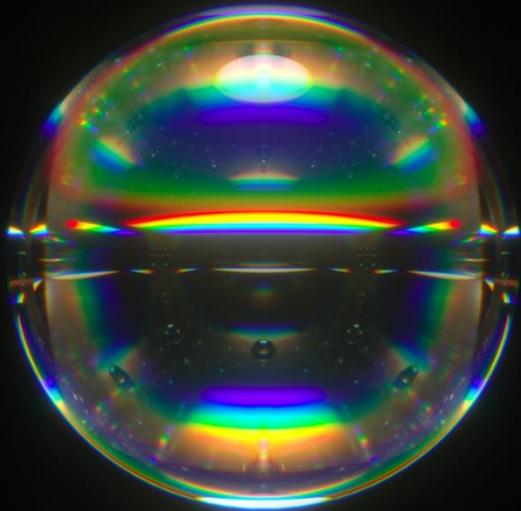
Mezzo o sostanza	Indice di rifrazione	Velocità di propagazione
vuoto	1	$3 \cdot 10^8$ m/s
aria	1,00029	$2,999 \cdot 10^8$ m/s
acqua	1,33	$2,26 \cdot 10^8$ m/s
ghiaccio	1,31	$2,29 \cdot 10^8$ m/s
sale	1,54	$1,95 \cdot 10^8$ m/s
alcool	1,36	$2,2 \cdot 10^8$ m/s
vetro (Crown)	1,5	$2 \cdot 10^8$ m/s
vetro (Flint)	1,65	$1,82 \cdot 10^8$ m/s
solfuro di carbonio	1,63	$1,84 \cdot 10^8$ m/s
sodio liquido	4,22	$0,7 \cdot 10^8$ m/s
arseniuro di gallio	3,6	$0,83 \cdot 10^8$ m/s
silicio	3,4	$0,88 \cdot 10^8$ m/s
diamante	2,417	$1,24 \cdot 10^8$ m/s
quarzo	1,51	$1,98 \cdot 10^8$ m/s



L'indice di rifrazione non è costante



Per un dato materiale, l'indice di rifrazione è una grandezza fisica dipendente dalla lunghezza d'onda. Le diverse componenti monocromatiche vengono quindi rifratte ad angoli diversi all'interfaccia tra due mezzi con indice di rifrazione differente (dispersione cromatica).

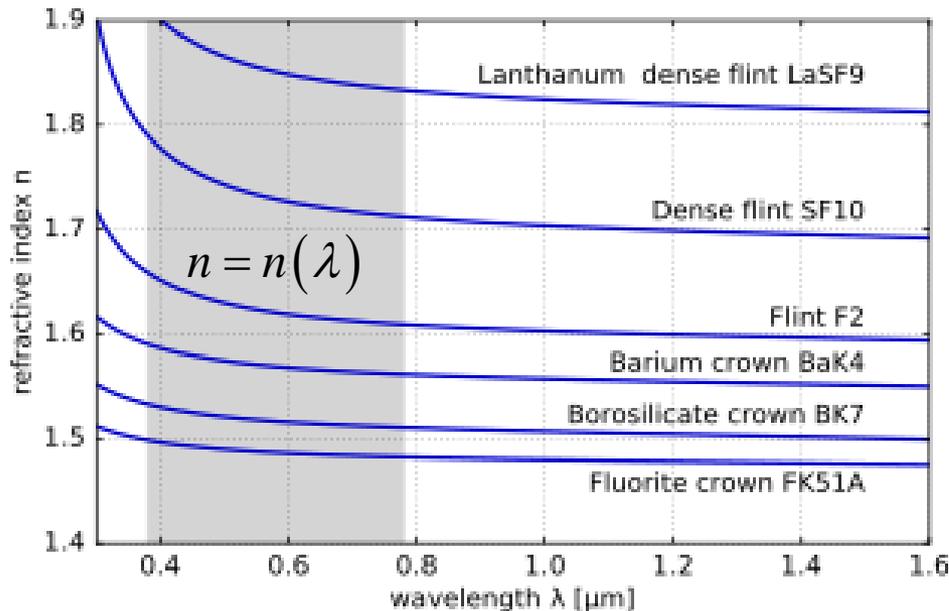


L'indice di rifrazione non è costante

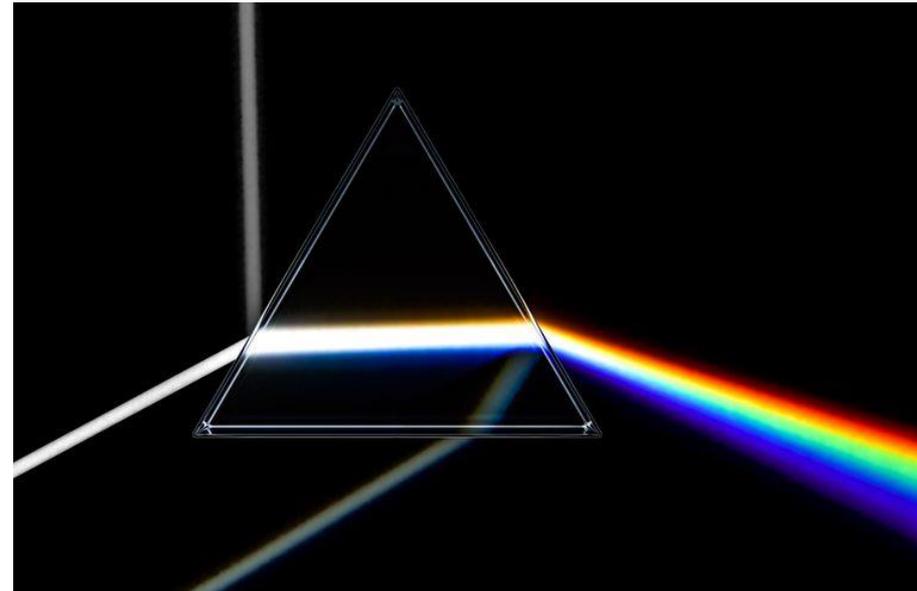


Per un dato materiale, l'indice di rifrazione è una grandezza fisica dipendente dalla lunghezza d'onda. Le diverse componenti monocromatiche vengono quindi rifratte ad angoli diversi all'interfaccia tra due mezzi con indice di rifrazione differente (dispersione cromatica).

Dispersione (cromatica)



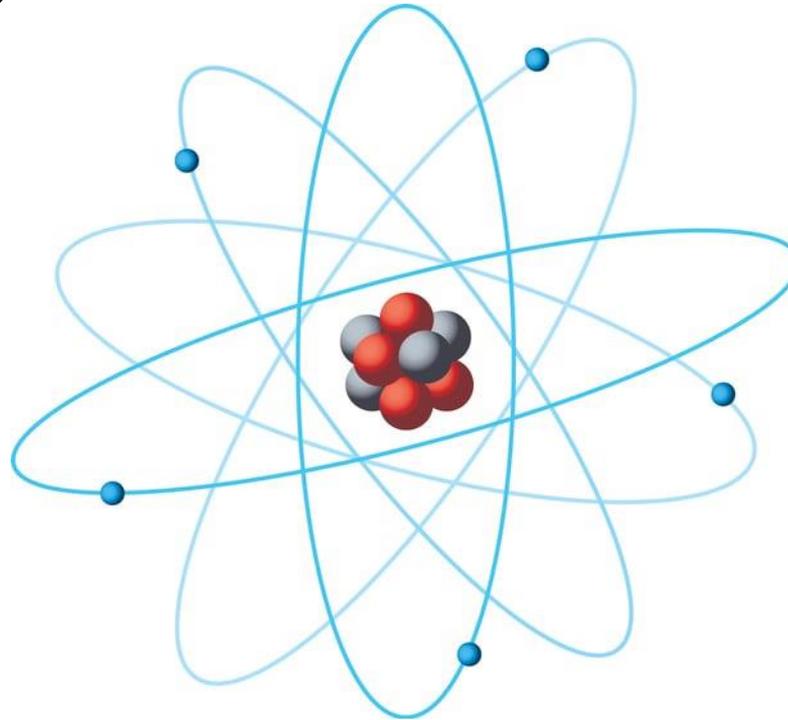
$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (\text{modello di Cauchy})$$



Legge di Snell

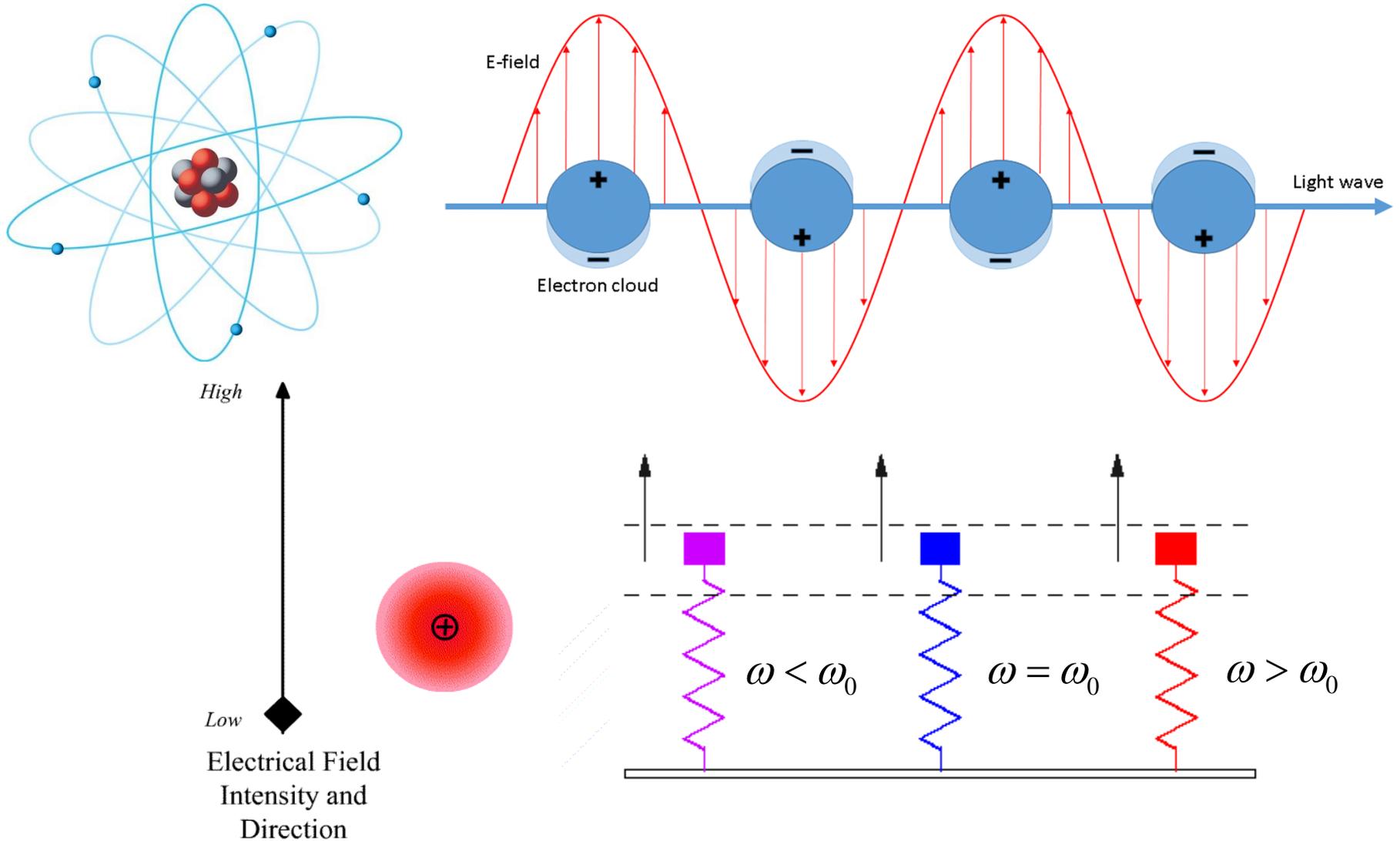
$$\sin \theta_1 \cdot n_1 = \sin \theta_2 \cdot n_2$$

La materia è composta di atomi. Ciascun atomo si può modellizzare come costituito di un nucleo, composto di neutroni (carica neutra) e protoni (carica positiva), circondato da una nube di elettroni (carica negativa).

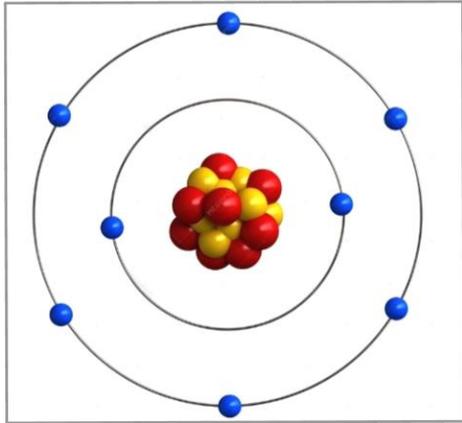


Elettroni e protoni risentono dell'azione di un eventuale campo elettrico esterno, quale ad esempio il campo elettrico variabile trasportato da un'onda luminosa.

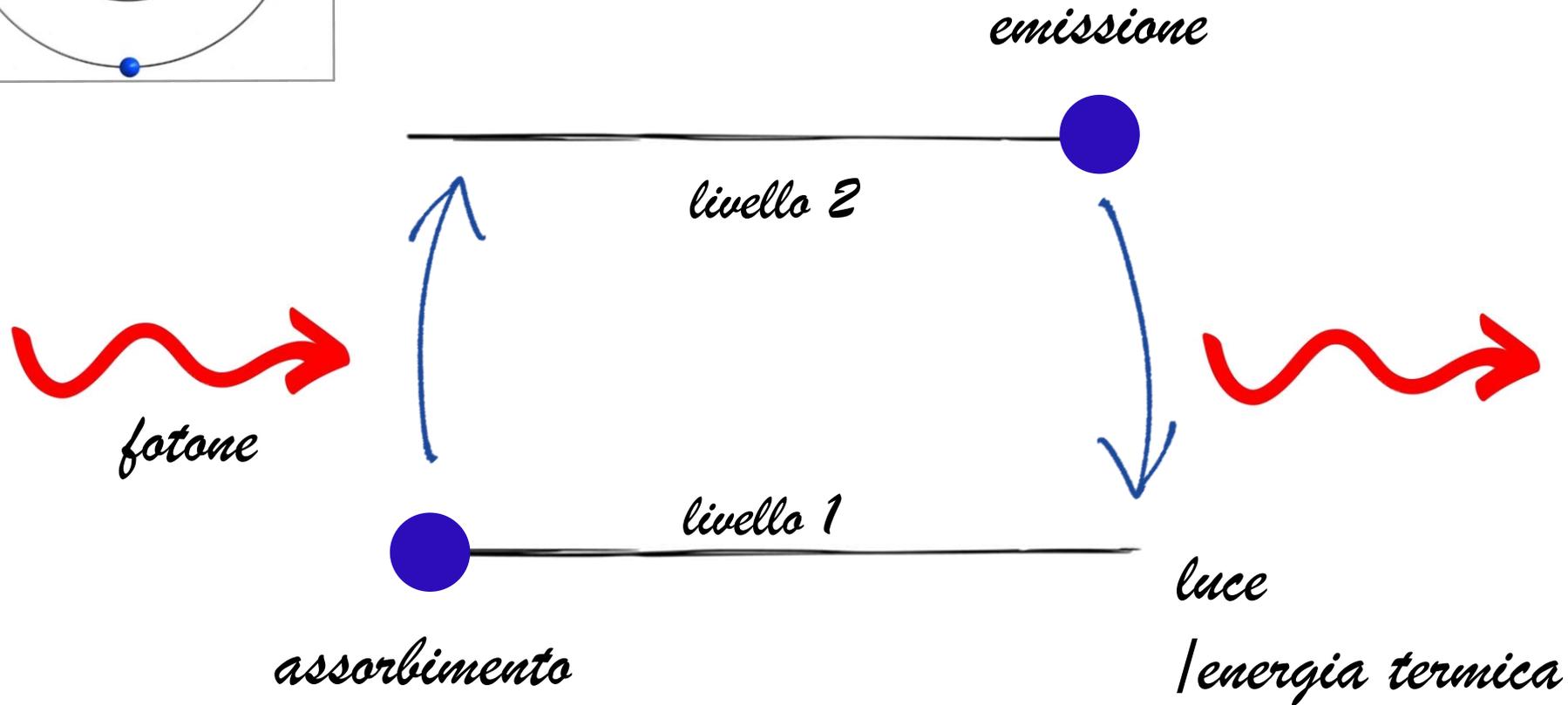
Interazione luce - materia



Modello semiclassico: analogia tra deformazione della nuvola di elettroni ed oscillatore forzato



Dal punto di vista quantistico, lo stato dell'elettrone è descritto mediante orbitali con livelli di energia ben definiti. L'assorbimento di luce (fotone) determina il passaggio ad un orbitale (atomico o molecolare) più energetico.



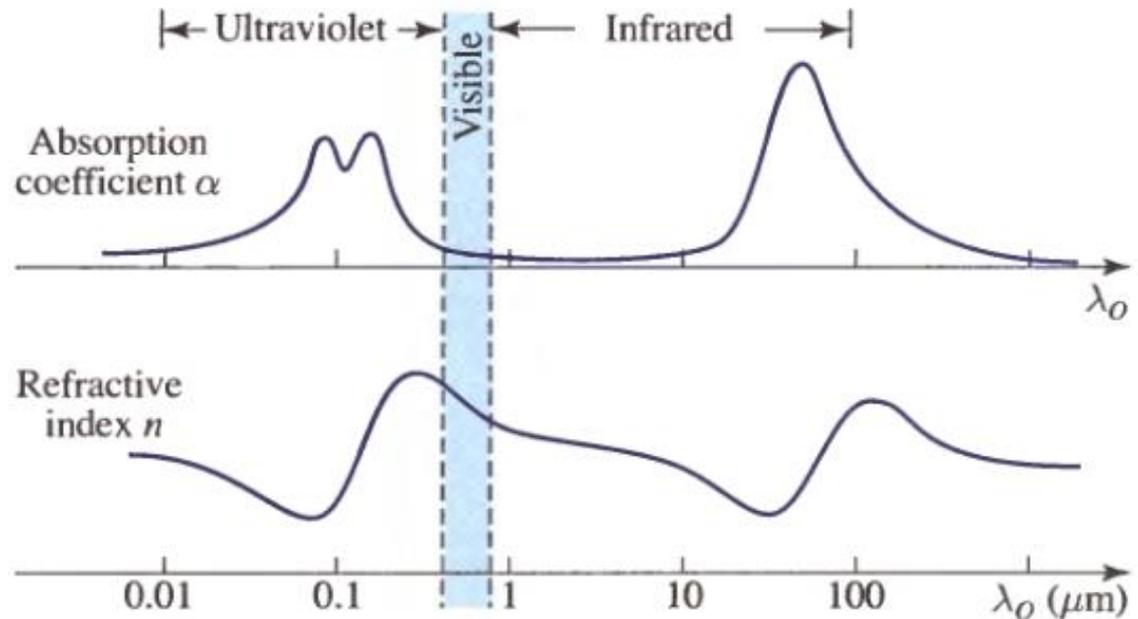
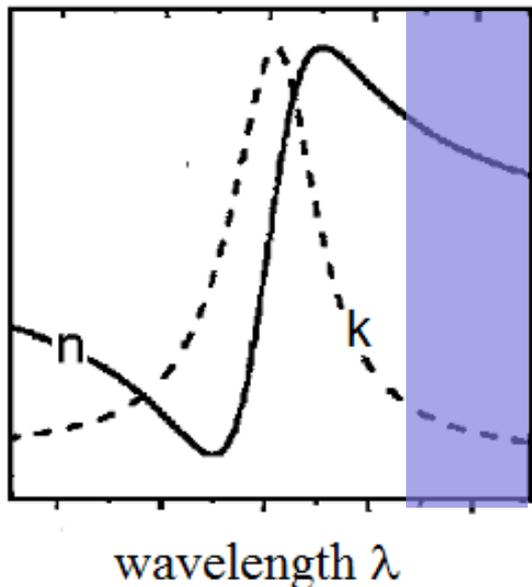
Assorbimento e dispersione



Assorbimento e dispersione sono due facce della stessa medaglia (indice di rifrazione complesso)

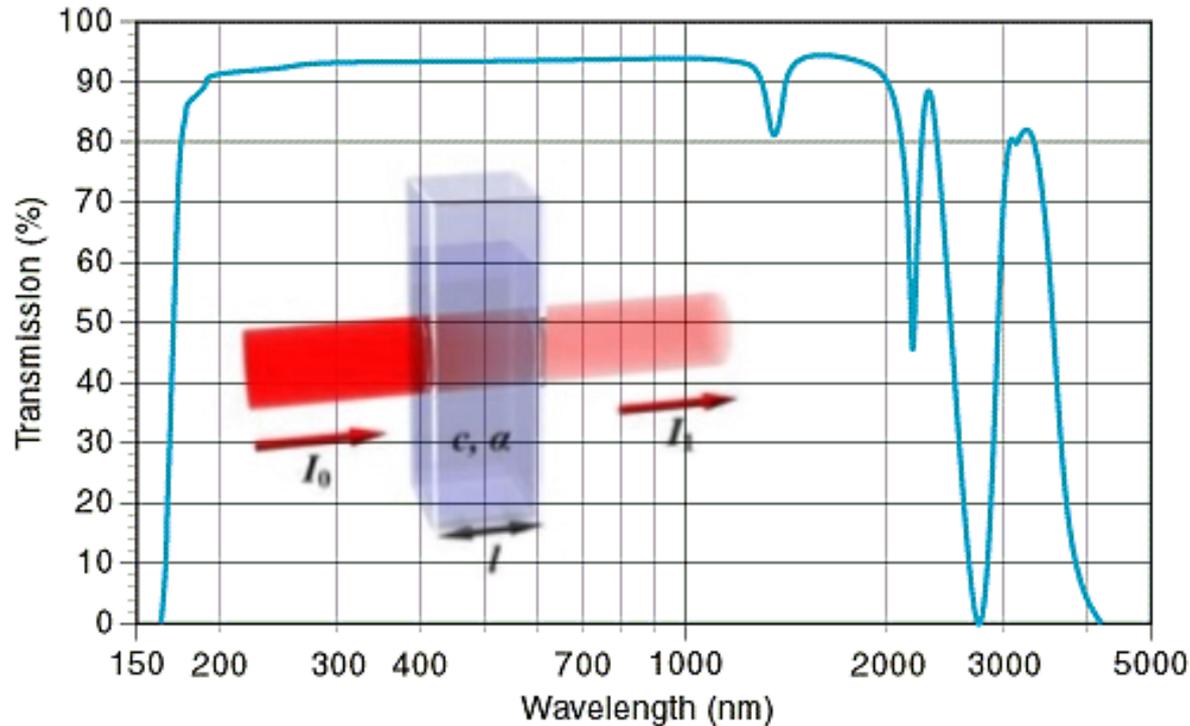
Un materiale il cui indice di rifrazione dipende dalla lunghezza d'onda deve essere assorbente e deve possedere un coefficiente di assorbimento che dipende anch'esso dalla lunghezza d'onda (**relazioni di Kramers-Kronig**)

In particolare, in un materiale vi sono diverse sorgenti di assorbimento:



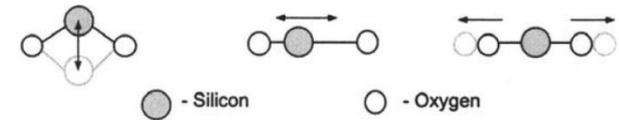
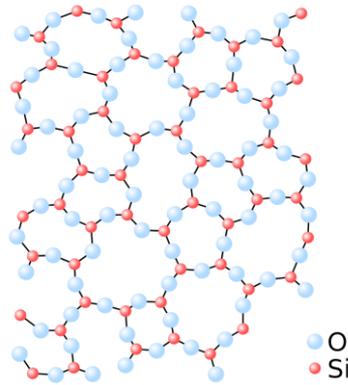
Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, "Fundamentals of photonics", John Wiley & Sons, Inc. (1991)

Assorbimento

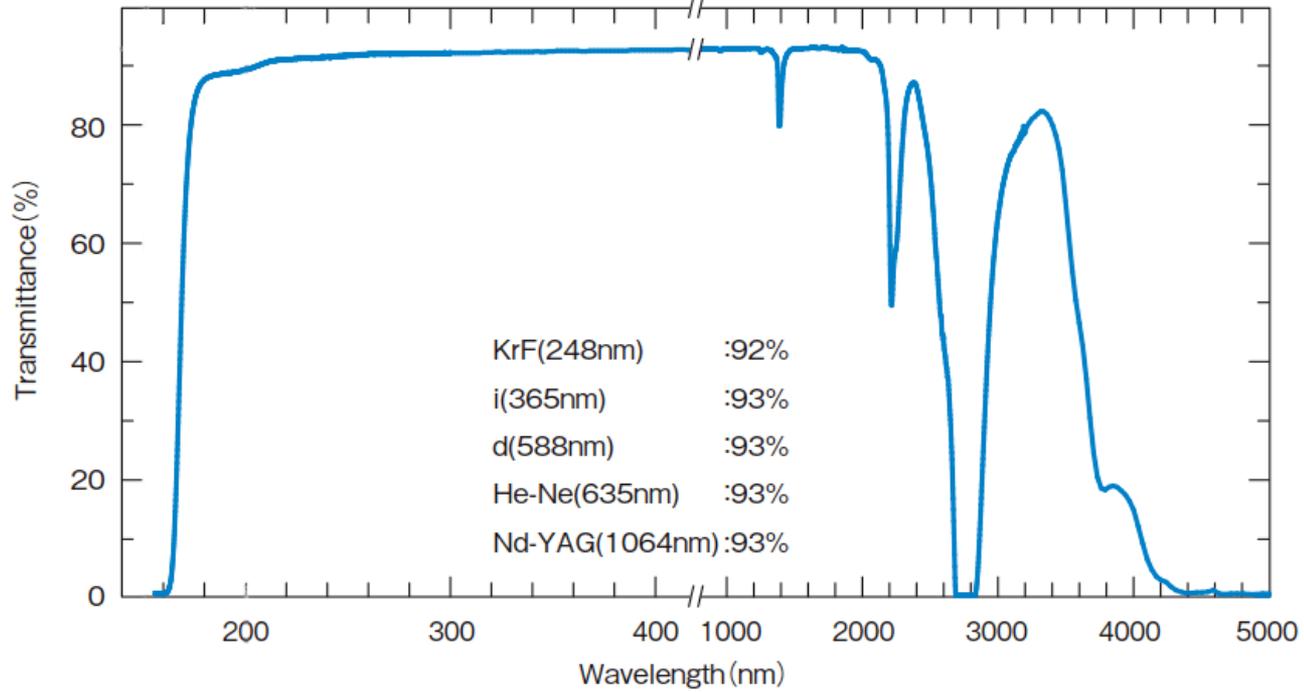
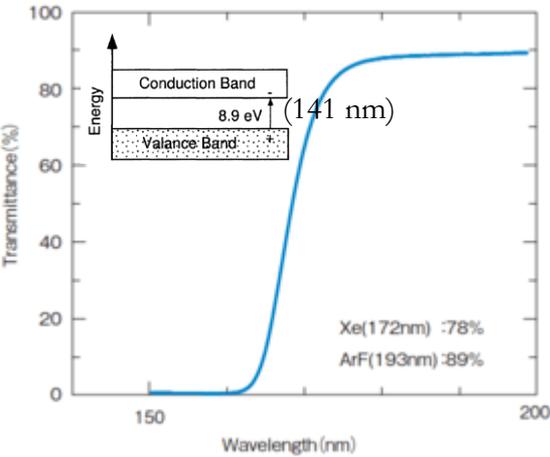


L'intensità luminosa in uscita è inferiore a quella in ingresso a causa dell'assorbimento da parte del mezzo attraversato. Possono esistere diverse sorgenti di assorbimento: transizioni elettroniche (UV, vicino-UV, VIS), transizioni tra stati vibrazionali molecolari (vicino-IR, IR).

Assorbimento (esempio: vetro)



Typical External Transmission (10mm path length)



Il vetro (biossido di silicio (SiO_2) amorfo) presenta un forte assorbimento nell'UV a causa delle transizioni elettroniche, e dei picchi di assorbimento nell'infrarosso a causa delle transizioni tra stati vibrazionali della molecola di biossido di silicio e delle impurità di ioni ossidrilici OH^- (water peak a 1400 nm).

Fundamental mode: 9 μm . Overtones: 4.4 μm , 3.8 μm , 3.2 μm . Water peak: fundamental mode 2.7 μm , overtones 1.39 μm , 1.25 μm , 0.95 μm .

Propagazione in un mezzo assorbente



Si consideri il campo elettrico di un'onda che si propaga in un mezzo con indice di assorbimento:

$$E(z) = E_0 \exp(-n_2 k_0 z)$$

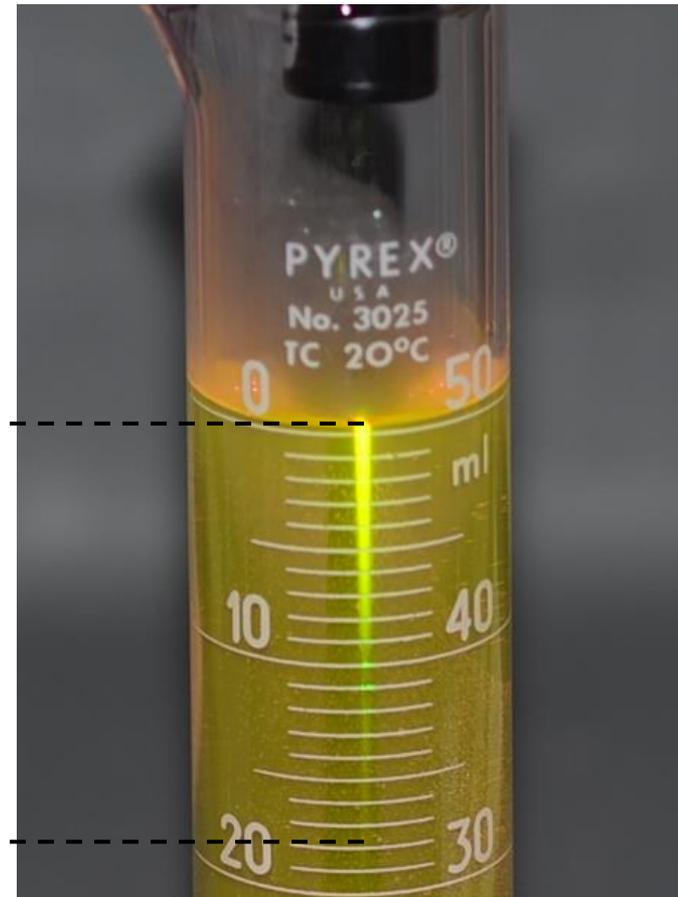
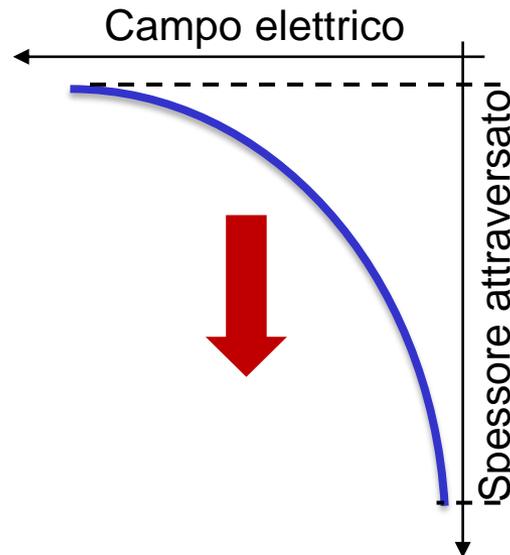
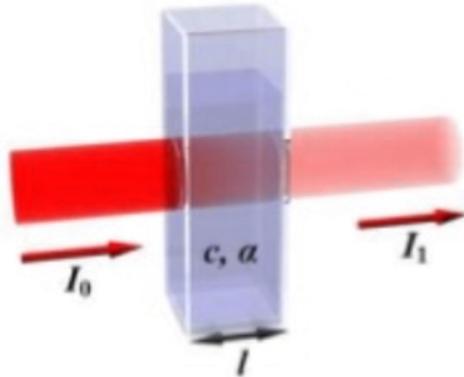
L'intensità del campo decade esponenzialmente (Legge di **Beer**):

$$I = |E|^2 \propto \exp(-\alpha z)$$

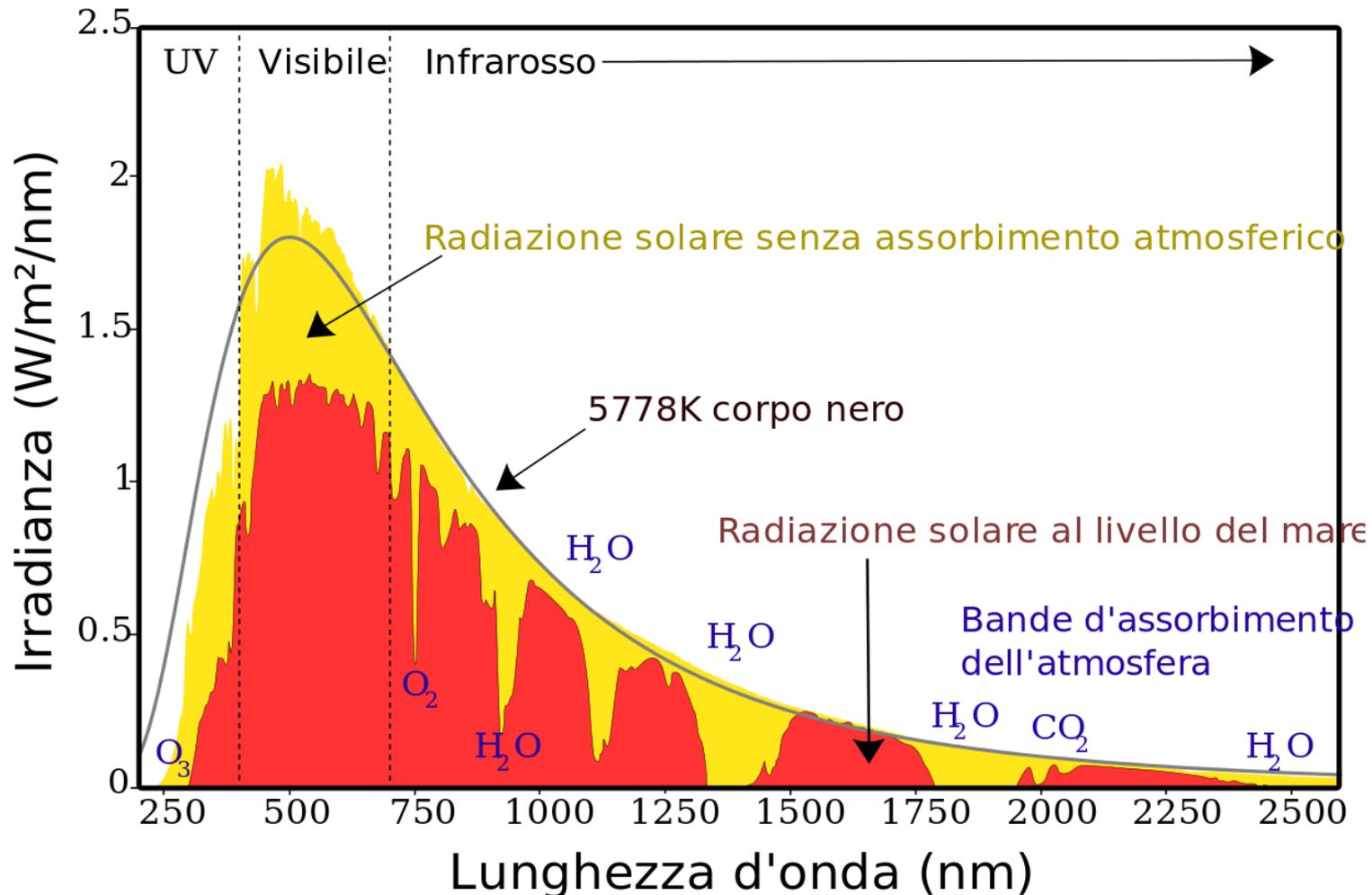
dove:

$$\alpha = 2n_2 k_0$$

è denominato **coefficiente di assorbimento**
(o di attenuazione).



Spettro della radiazione solare (Terra)



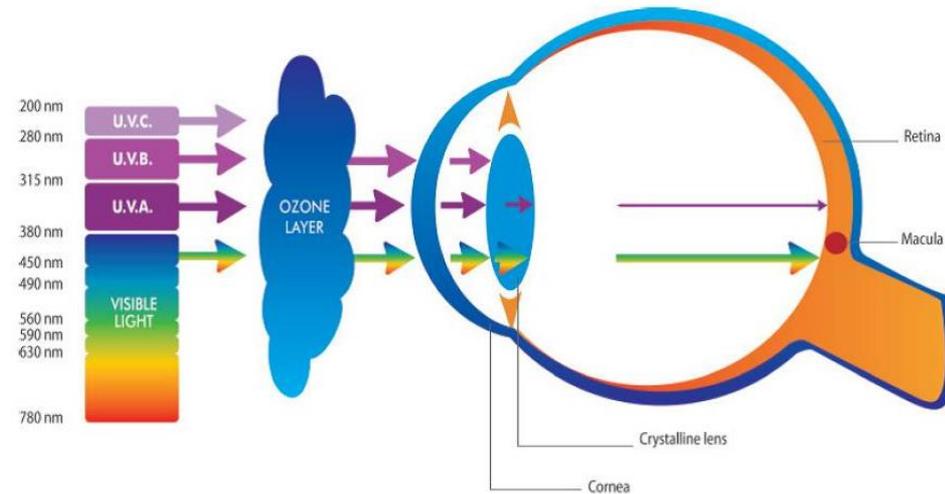
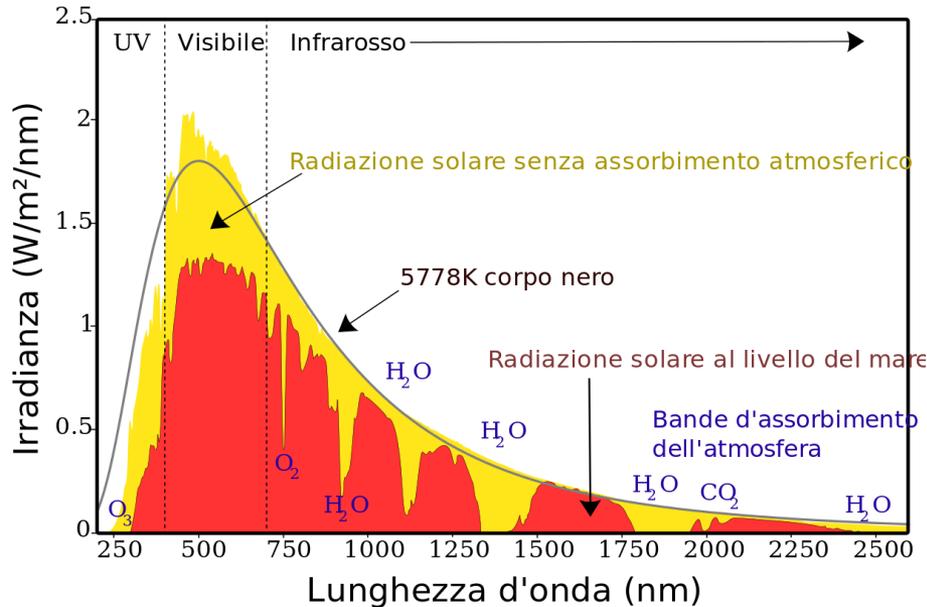
Gli occhiali da sole sono considerati dispositivi di protezione individuali di prima categoria, in base al decreto legislativo 475/1992 e successive modificazioni.

La normativa suddivide gli occhiali da sole in 5 categorie, a seconda del livello di riduzione della luminosità:

COLORE DELLALENTE	USO / TEMPO	TASSO DI TRASMISSIONE	CATEGORIA
 Chiara	 Comfort estetico	80-100%	0
 Leggermente colorata	 Bassa luminosità	43-80%	1
 Mediamente colorata	 Media luminosità	18-43%	2
 Scura	 Forte luminosità	8-18%	3
 Molto scura	 Luminosità eccezionale	3-8%	4

Obiettivo: ridurre l'abbagliamento. Gli abbagliamenti possono causare sensazioni di disturbo e compromettere la funzione visiva. Talvolta si generano immagini postume, e una luce accecante diretta o indiretta può impedire la percezione dell'ambiente circostante.

Spettro della radiazione solare (Terra)



Esposizione eccessiva a luce ultravioletta (UV)

- Pinguecola, Pterigio, disturbi alla congiuntiva
- Fotocheratite
- Cataratta
- Retinopatia solare

Lunghezza d'onda corta nel visibile (luce blu)

- Interferenza con il ciclo sonno-veglia (produzione di melanopsina a 480 nm)
- Affaticamento
- Degenerazione maculare senile (AMD)
- Retinopatia solare

Indossare filtri solari è vitale per la sicurezza del Sistema visivo!

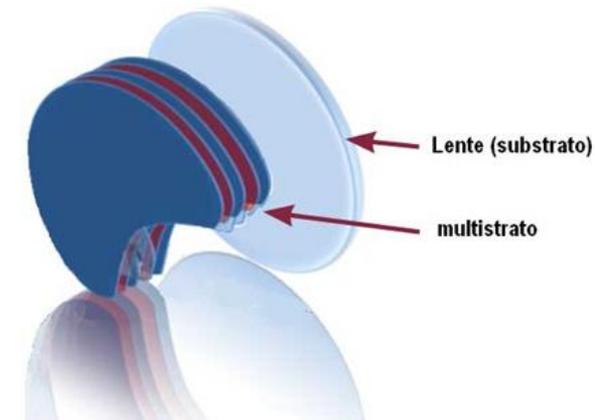
$$R + T + A = 100\%$$

Riflessioni Trasmissione Assorbimento

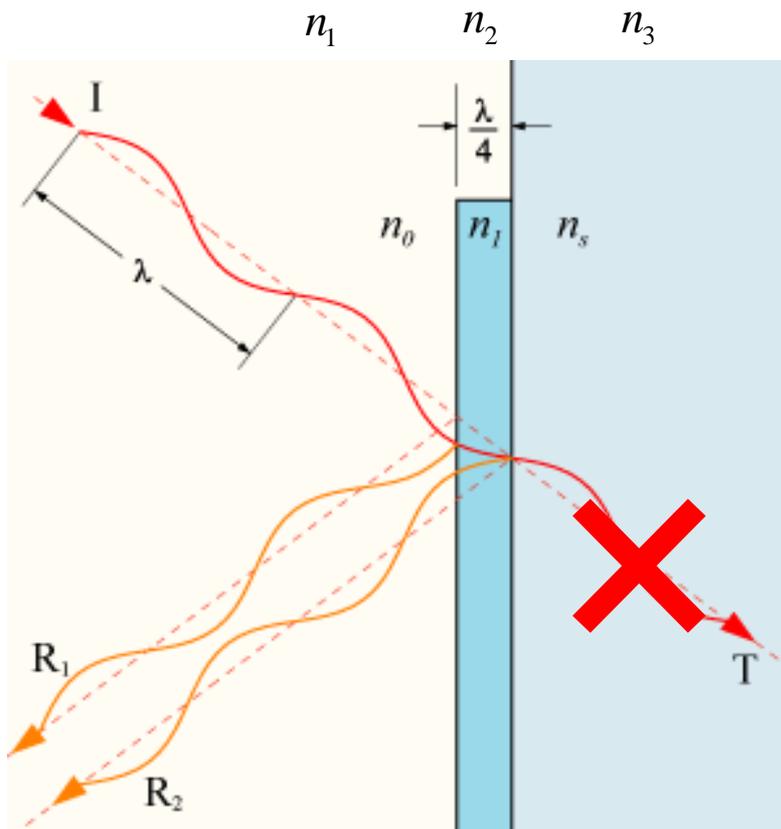
$$T = 100\% - R - A$$

Per ridurre la trasmissione diverse strategie:

- Aumentare la riflessione (strati superficiali)
- Aumentare l'assorbimento (ingegnerizzazione del materiale)



Un sottile film può essere interposto all'interfaccia tra due mezzi per diminuire la riflessione (e aumentare quindi la trasmissione)



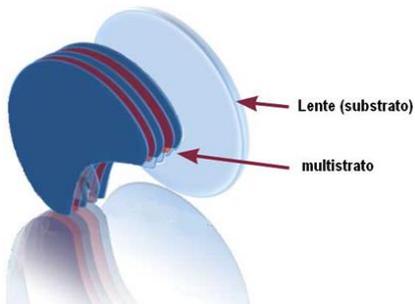
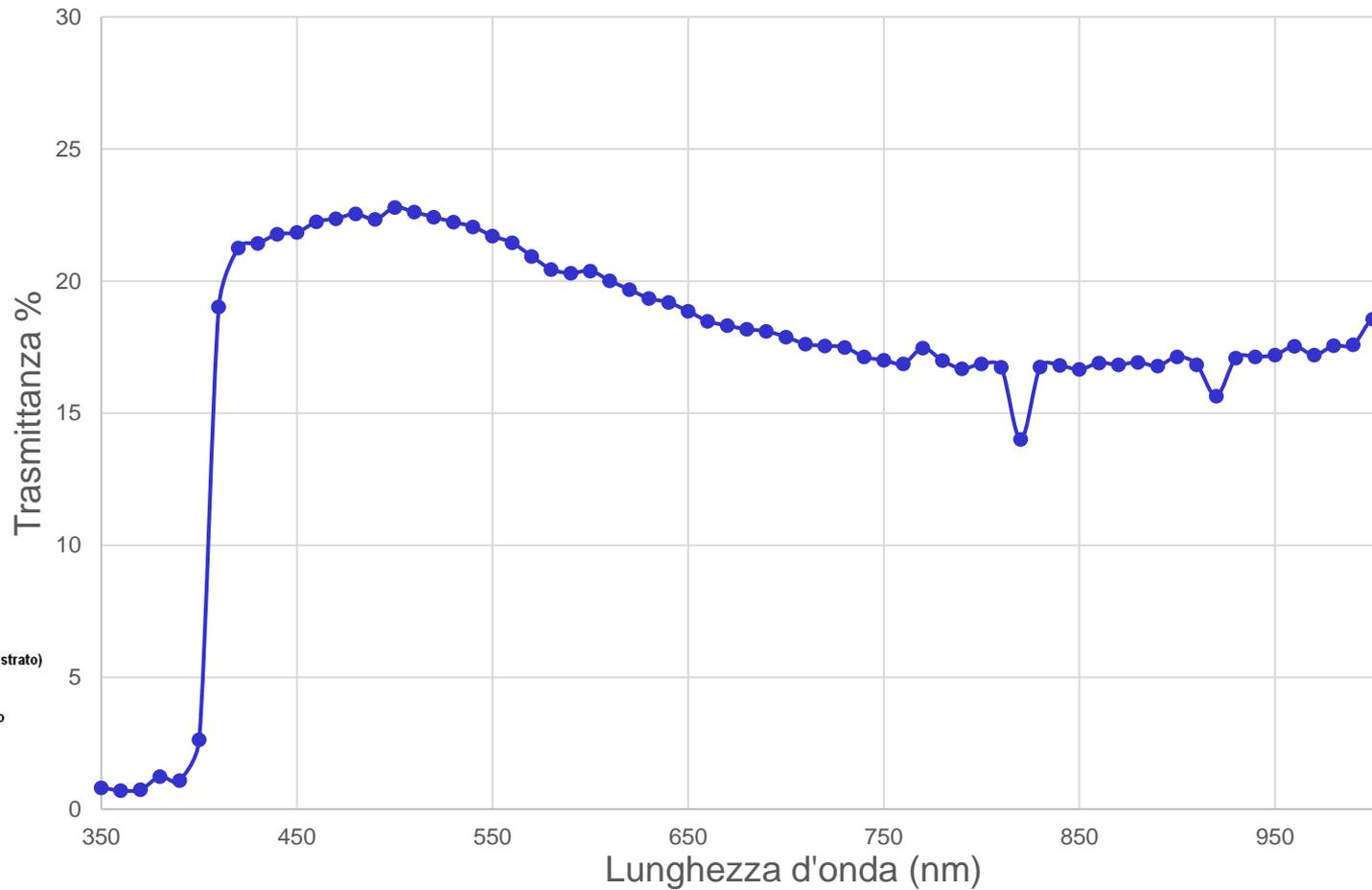
SPESSORE:
$$d = (2N + 1) \frac{\lambda}{4n_2}$$

INDICE DI RIFRAZIONE:
$$n_2 = \sqrt{n_1 n_3}$$

Il film deve essere spesso un quarto della lunghezza d'onda (o multipli dispari) e con indice dato dalla media geometrica degli indici di rifrazione dei due mezzi.

Utilizzando lo stesso principio, si può ottimizzare il film in modo da ridurre la trasmissione per quella specifica lunghezza d'onda o per una determinata banda.

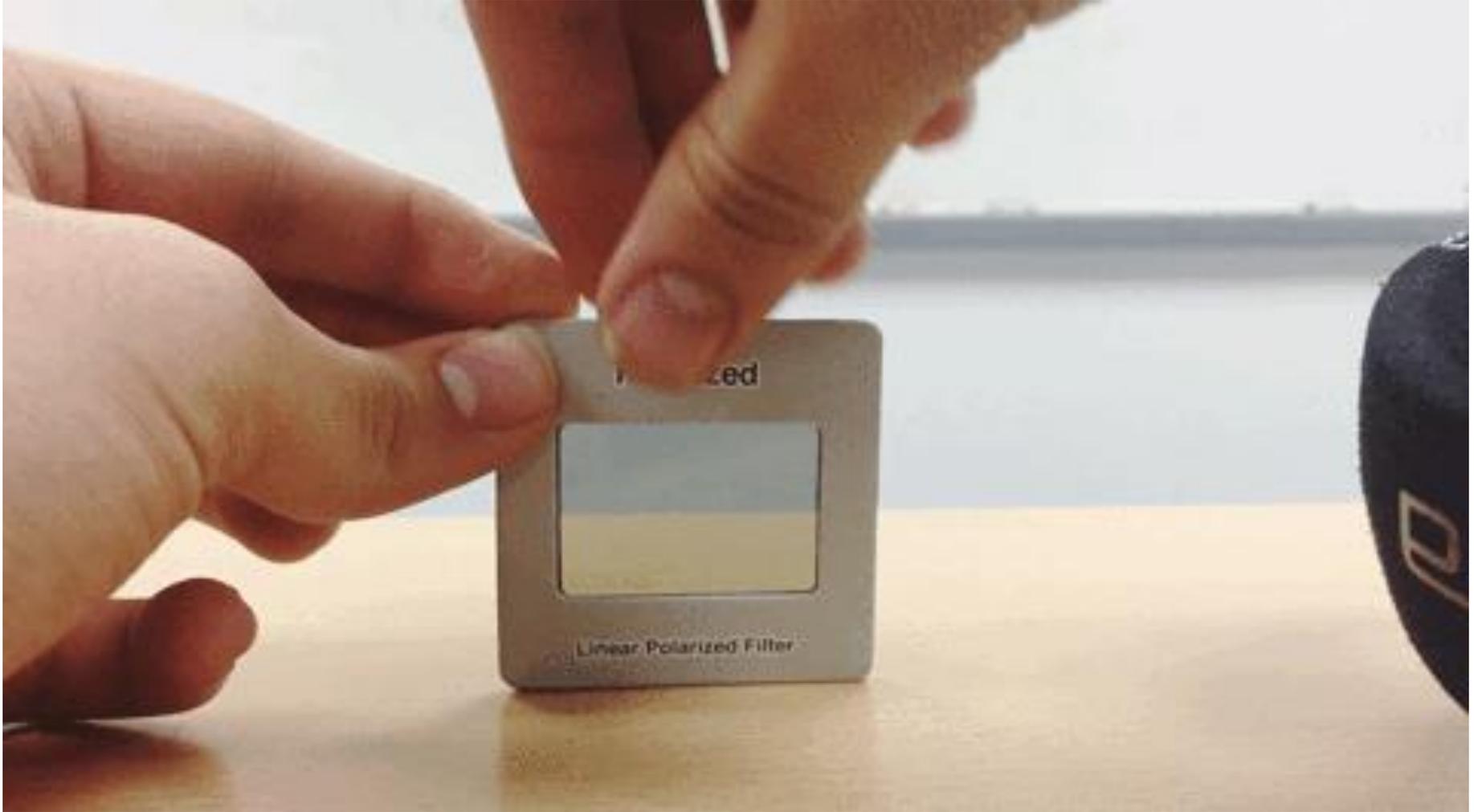
Trasmittanza filtro in vetro



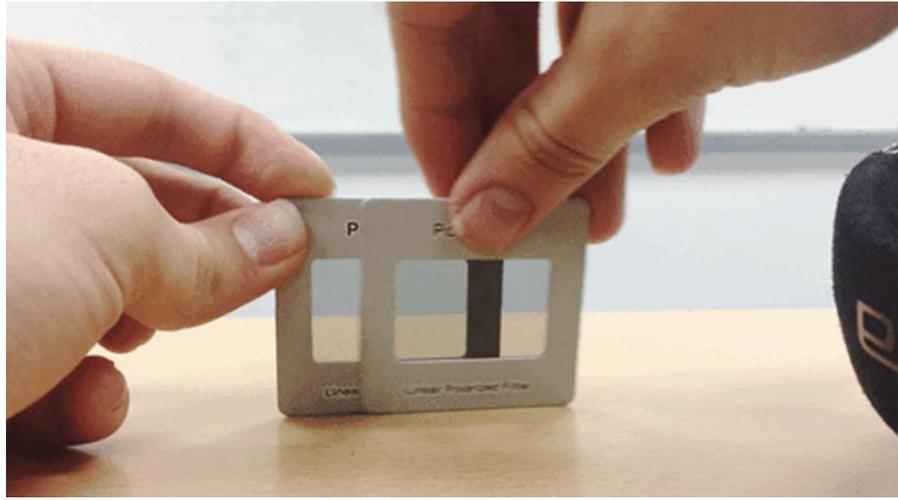
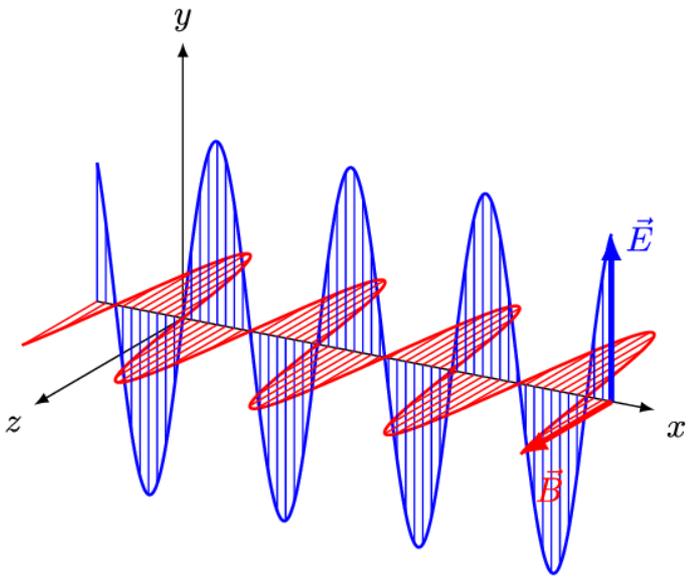
Trasmittanza misurata con ellissometro spettroscopico VASE (J.A.Woollam), risoluzione 0.3nm

V. Apriceno, "Radiazione infrarossa e aspetti oftalmici e visivi", A.A. 2022-23

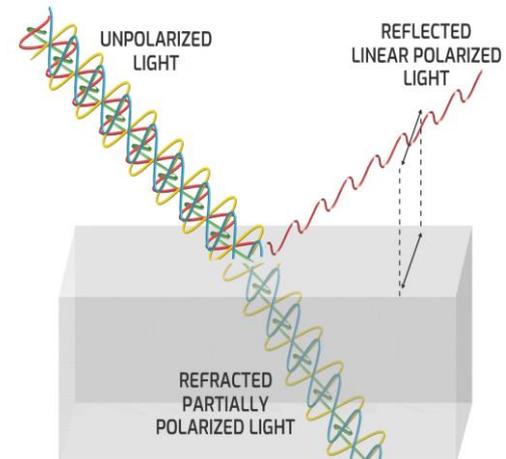
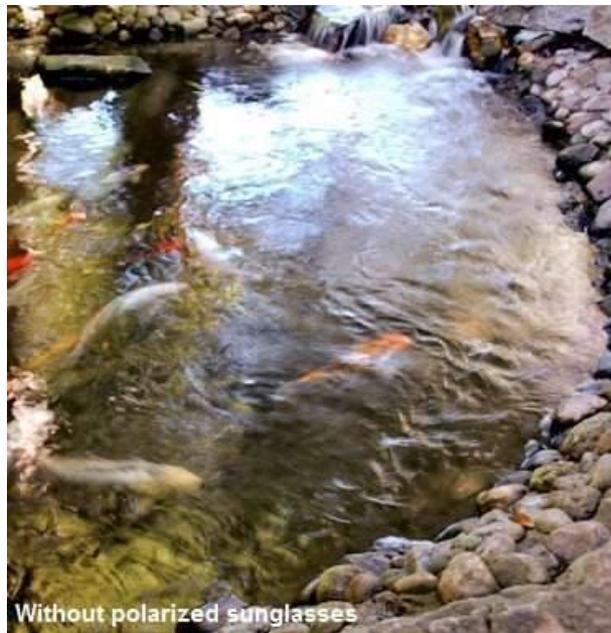
Filtri polarizzatori



Filtri polarizzatori

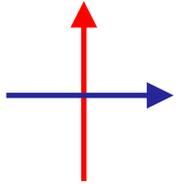


Filtri polarizzatori

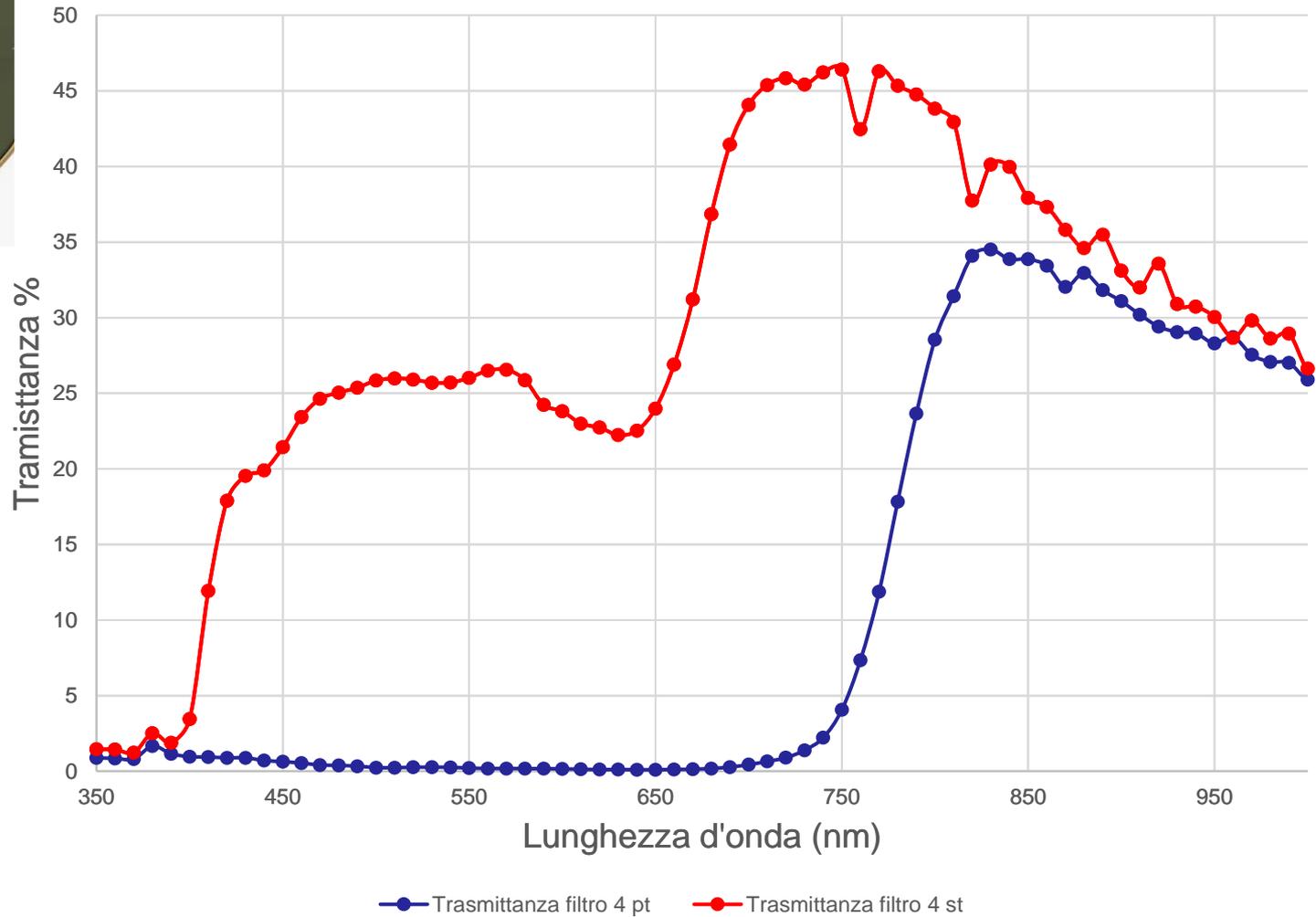


(angolo di Brewster)

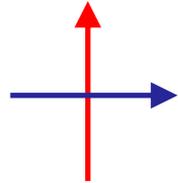
Lenti polarizzanti (in vetro)



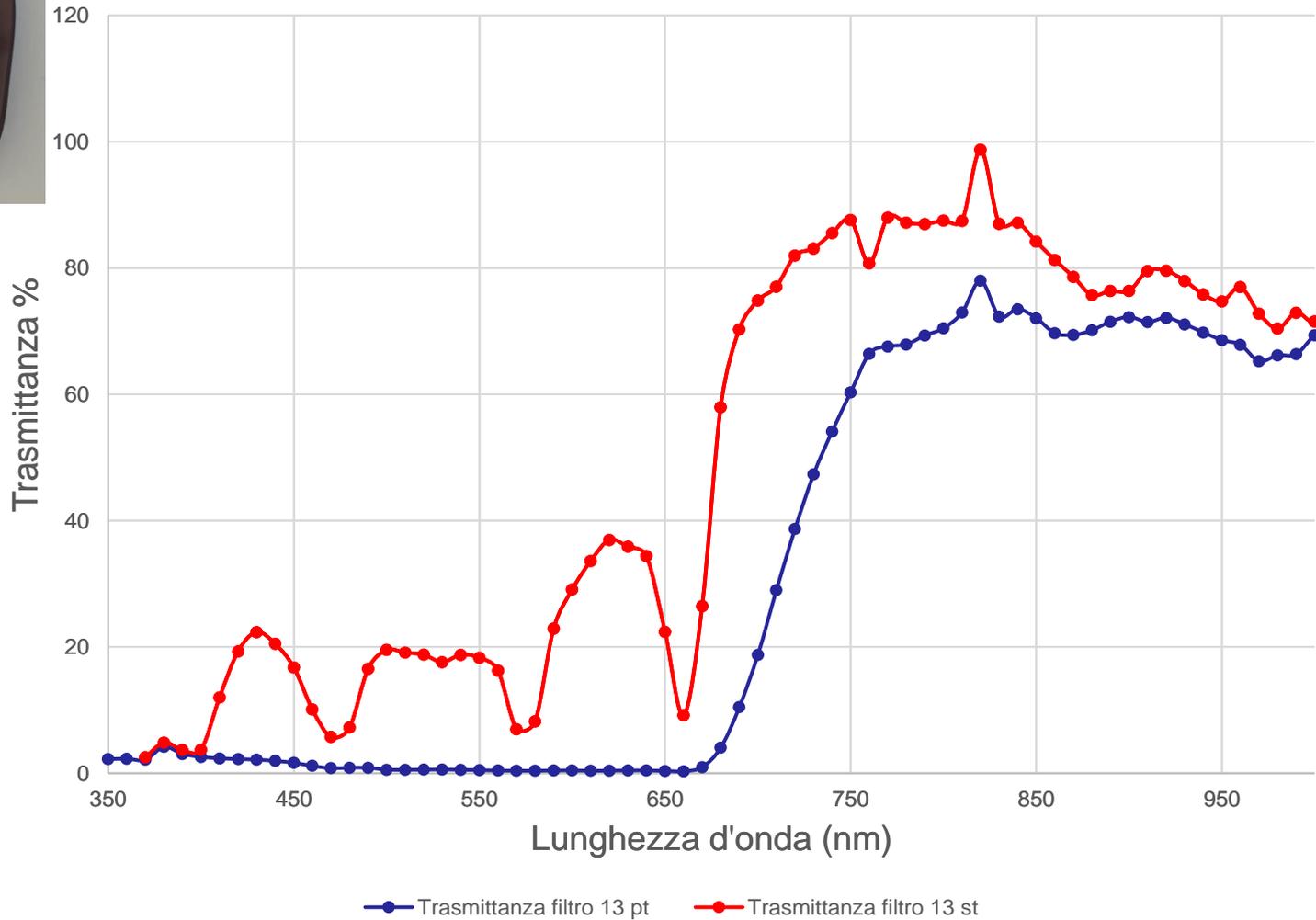
Trasmittanza filtro polarizzatore in vetro



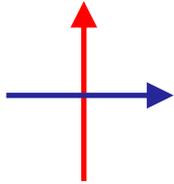
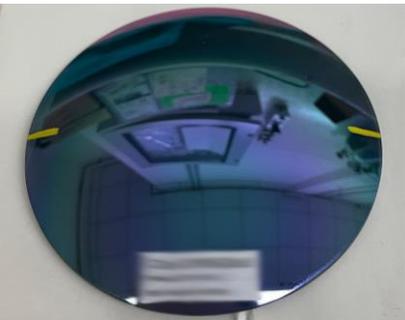
Lenti polarizzanti (in policarbonato)



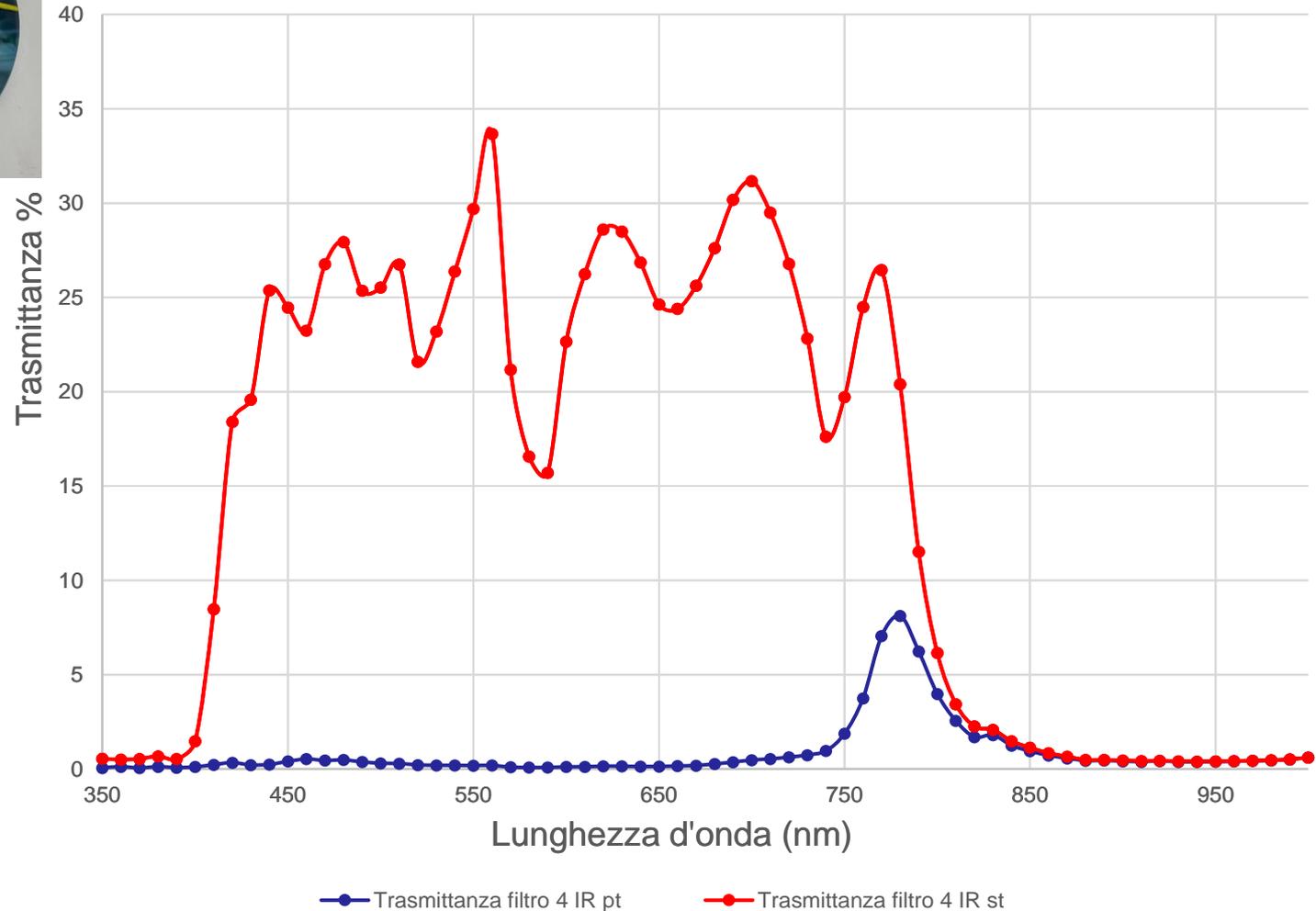
Trasmittanza filtro polarizzatore in policarbonato



Lenti polarizzanti (in vetro) + specchiato

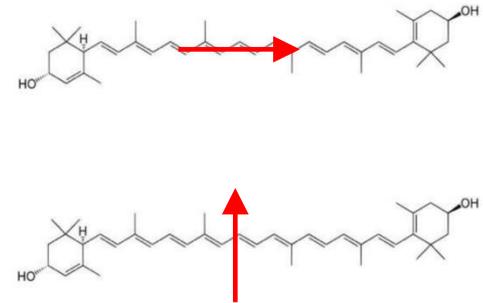
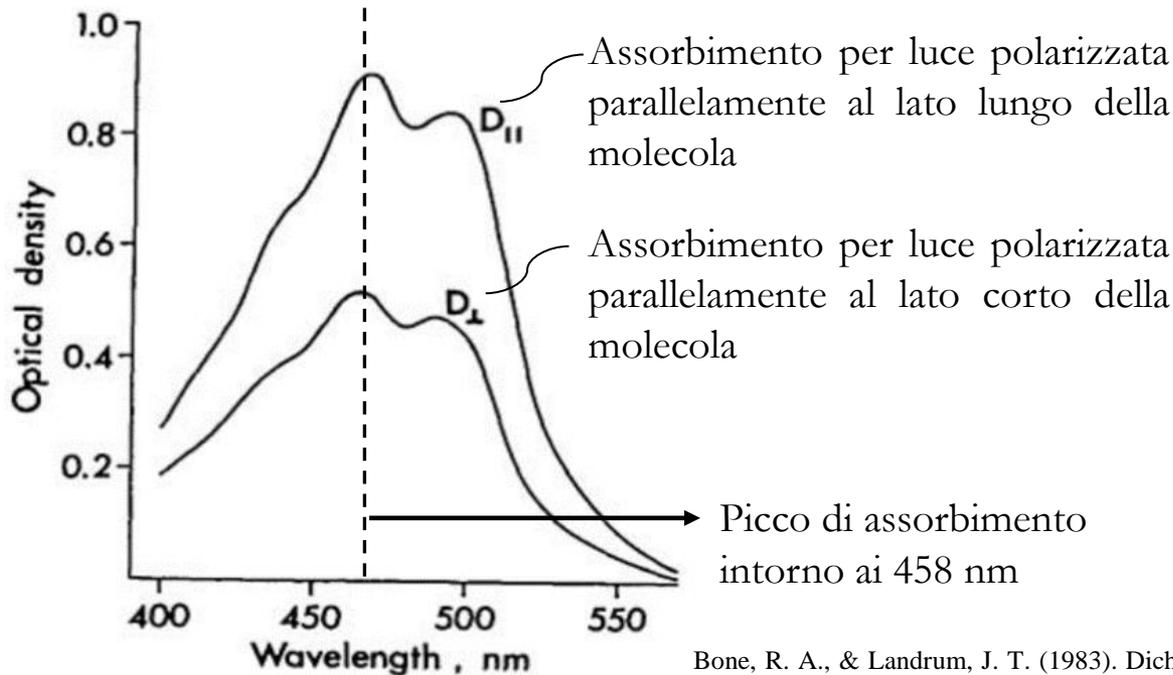
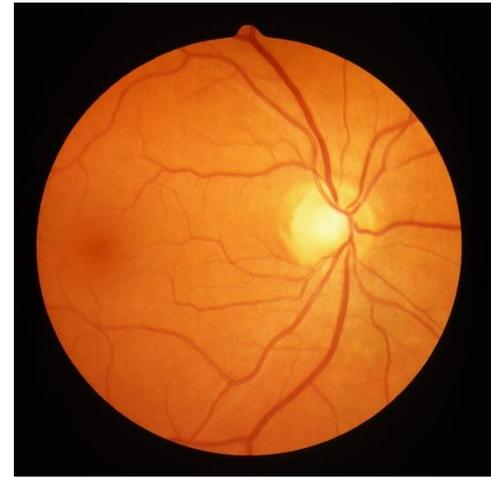


Trasmittanza filtro polarizzatore specchiato



Dicroismo dei pigmenti maculari

I pigmenti maculari sono carotenoidi di origine alimentare rappresentati dalle molecole lunghe di luteina, zeaxantina e meso-zeaxantina. Queste molecole, che conferiscono alla macula il caratteristico colore giallo (macula lutea), hanno la funzione di assorbire le lunghezze d'onda più piccole (luce blu) per proteggere i fotorecettori da danni fotochimici, svolgere funzione antiossidante, migliorare acuità visiva.



LUTEINA: catena polienica di 18 atomi di carbonio con anelli di cicloesene

Bone, R. A., & Landrum, J. T. (1983). Dichroism of lutein: a possible basis for Haidinger's brushes. *Appl. Opt.* **22**(6), 775-776.

Termocromismo

La proprietà di una sostanza di cambiare il proprio colore in conseguenza di una variazione di temperatura.



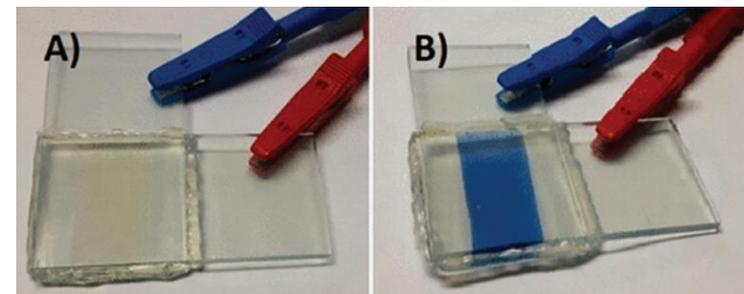
Solvatocromismo

è il fenomeno che si osserva quando il colore dovuto a un soluto è diverso se quel soluto è disciolto in solventi diversi



Elettrocromismo

è un fenomeno in cui un materiale mostra cambiamenti di colore o opacità in risposta a uno stimolo elettrico (ad es., viologeni)



Fotocromismo

Cambio di colore in seguito ad assorbimento di luce

Lenti fotocromatiche



$\lambda = 365 \text{ nm}$

Credits: YouTube channel «The Action Lab»



$\lambda = 405 \text{ nm}$

Credits: YouTube channel «The Action Lab»

Effetto reversibile

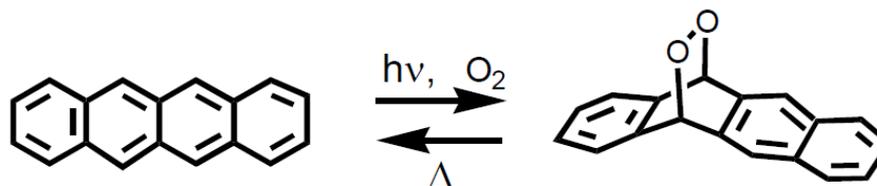


Credits: YouTube channel «The Action Lab»

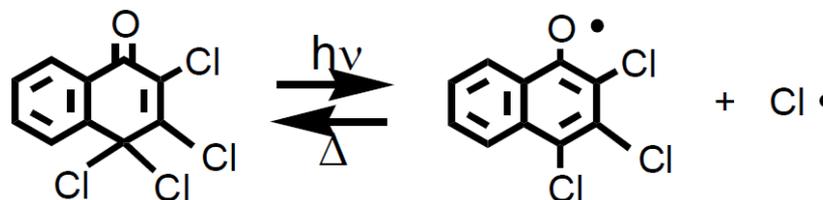
Gli inizi (seconda metà dell'ottocento)



1867. Fritzsche descrive la decolorazione (bleaching) di una soluzione colorata arancio di tetracene quando esposta alla luce e la rigenerazione del colore al buio. In seguito, nel 1876, **Meer** osserva una variazione nel colore di un sale di dinitroetano di potassio allo stato solido (giallo al buio; rosso alla luce del sole).



1889. Willy Markwald, chimico tedesco, studia il cambio reversibile di colore di 2,3,4,4-tetracloronaftalene allo stato solido. Ritiene che sia un fenomeno puramente fisico e lo definisce **fototropia**. Anche se in uso in quel periodo, il termine è chiaramente improprio e dovrebbe essere evitato per la confusione con il fototropismo in campo biologico.



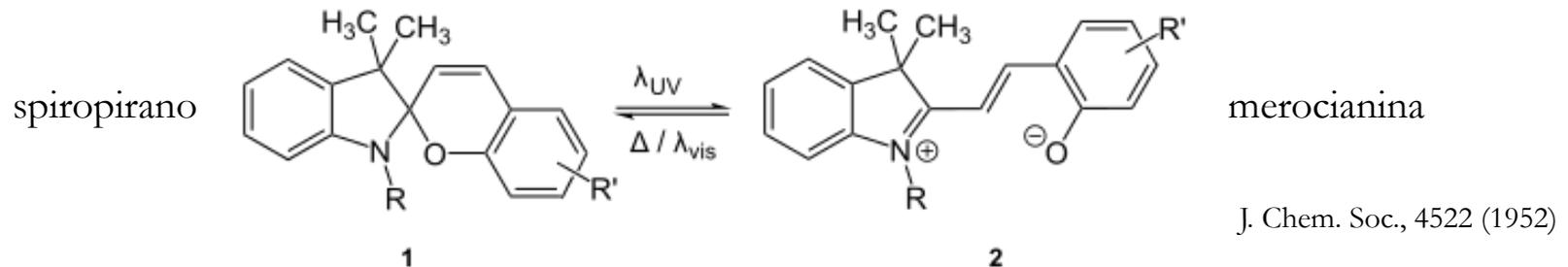
G. Scheibe et al. J. Phys. Chem. **66**, 2449 (1962)

1952: la prima definizione di fotocromismo



L'interesse per il fotocromismo fu continuo ma limitato fino al periodo 1940-1960, che vide un aumento degli studi in chimica organica, in particolare nei gruppi di ricerca di Hirshberg e Fischer in Israele

1952. Yehuda Hirshberg, Weizmann Institute of Science in Israele, suggerisce il termine **fotocromismo** [dalle parole greche: *phos* (luce) e *chroma* (colore)] per descrivere il cambiamento di colore di spiropirani in soluzione.



- L'irraggiamento di spiroirani con luce UV (250–380 nm) rompe il legame C-O
- Di conseguenza, la struttura molecolare evolve nell'isomero merocianina (MC), colorata
- Quando non più esposta a luce UV, la reazione opposta è favorita e la molecola di spiroirano di riforma, essendo termodinamicamente più stabile.

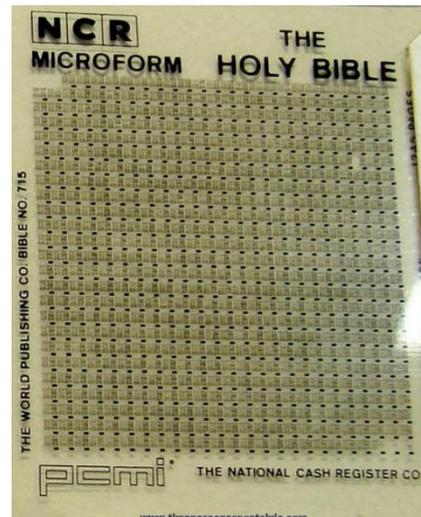
1950-1970: lenti inorganiche



Durante il anni '60, l'attività di ricerca nel settore si espande in parallelo allo sviluppo di metodi di indagine fisica (IR, NMR, X-ray, UV, time-resolved and flash spectroscopy) e di sintesi organica. **I primi vetri fotocromatici iniziano ad essere disponibili (ricerca presso l'azienda Corning, 1964)**

Applicazioni come il processo fotocromico di micro immagini (photochromic micro image - PCMI process), che ha mostrato ad esempio la possibilità di miniaturizzare una Bibbia di 1245 pagine su un'area di 6 cm², hanno attratto considerevole interesse (Spiropirani, NCR)

Tuttavia, il problema della **fotodegradazione** limita ancora significativamente le applicazioni dei composti organici noti sino ad allora (Lack of fatigue resistance).

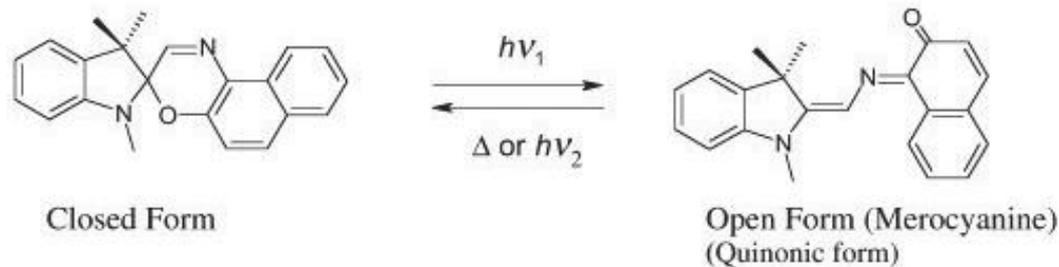


NCR THE NATIONAL CASH REGISTER COMPANY
ELECTRONICS DIVISION

The young lady above is holding a film chip containing an entire copy of the Bible. On this 2 inch by 2 inch frame are stored 1245 pages of text. The 2000 copies shown in the picture represent a document collection of 2,500,000 pages. This display dramatizes the storage and dissemination capabilities of NCR's new photochromic micro-image technology.

NCR MICRO-IMAGE BIBLE*
220:1 REDUCTION RATIO

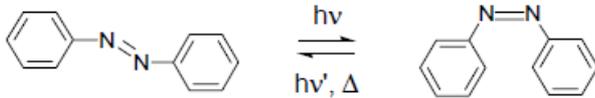
Un rifiorire delle attività è iniziato negli anni '80, essenzialmente grazie allo sviluppo della spiroossazina, resistente alla fotodegenerazione, e dei derivati del cromene. Questi composti hanno promosso la realizzazione, applicazione e commercializzazione di lenti oftalmiche fotocromatiche in materiale plastico:



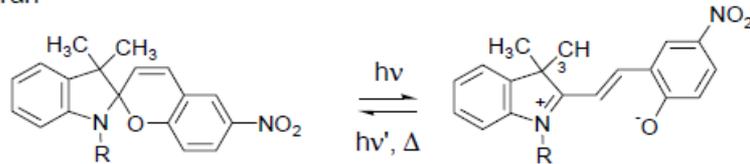
Applicazioni:

- Memorie ottiche
- Interruttori ottici
- Applicazioni all'ottica e alla fotonica
- Attività ludiche: giochi, vestiario, cosmetica
- Lenti oftalmiche filtranti (Corning 1964, Transitions anni '90, etc.)

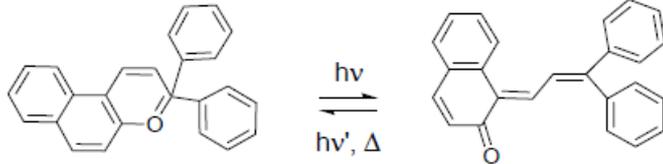
Azobenzene



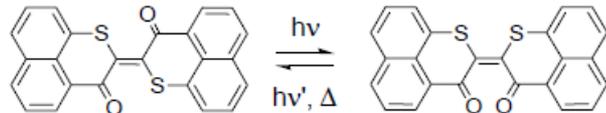
Spirobenzopyran



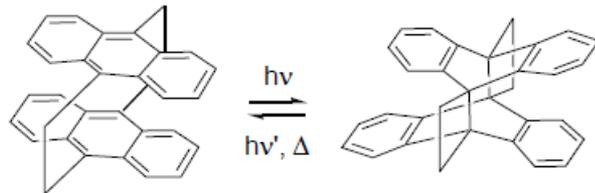
Naphthopyran



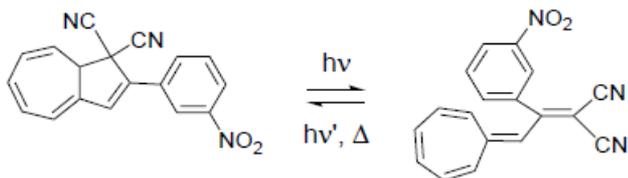
Thioindigo



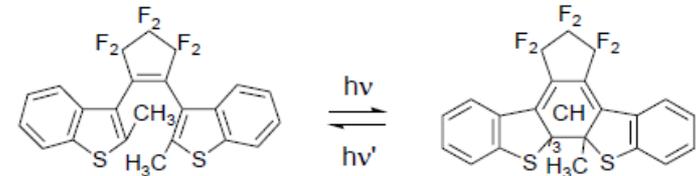
Anthracene Dimer



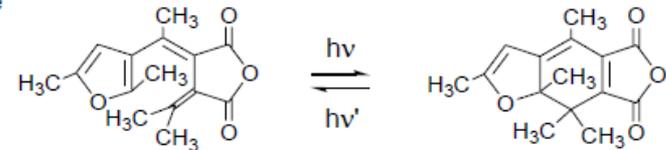
Dihydroazulene



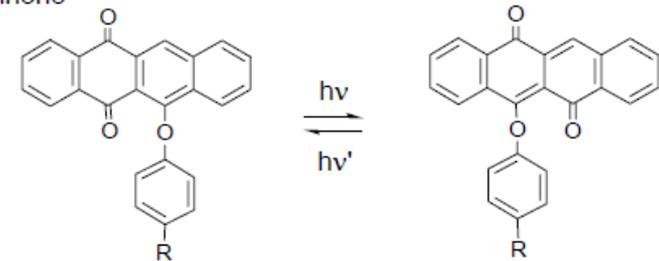
Diarylethene



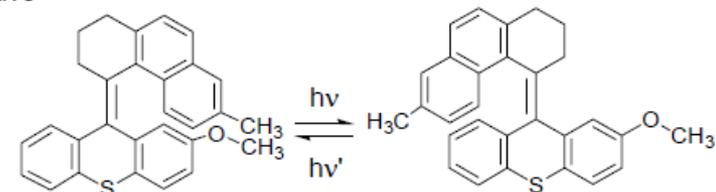
Furyl Fulgide



Naphthacene quinone

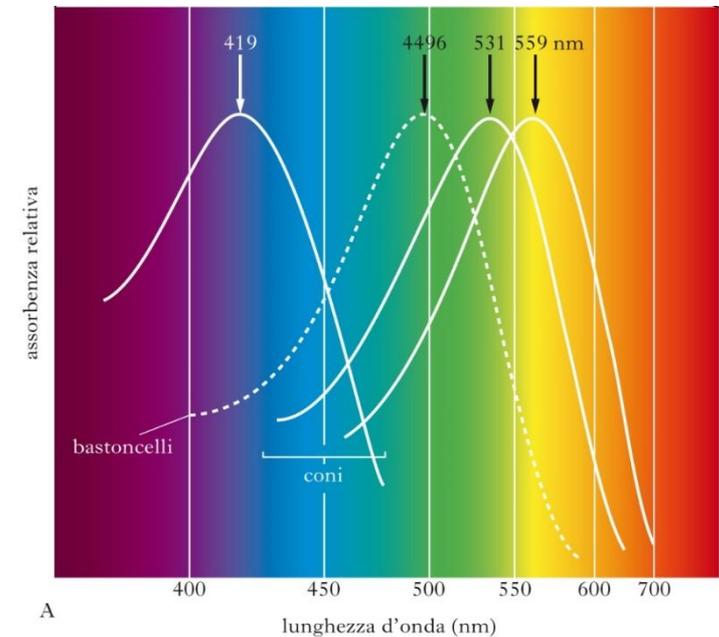
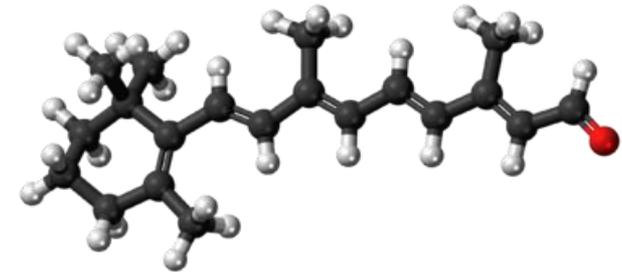
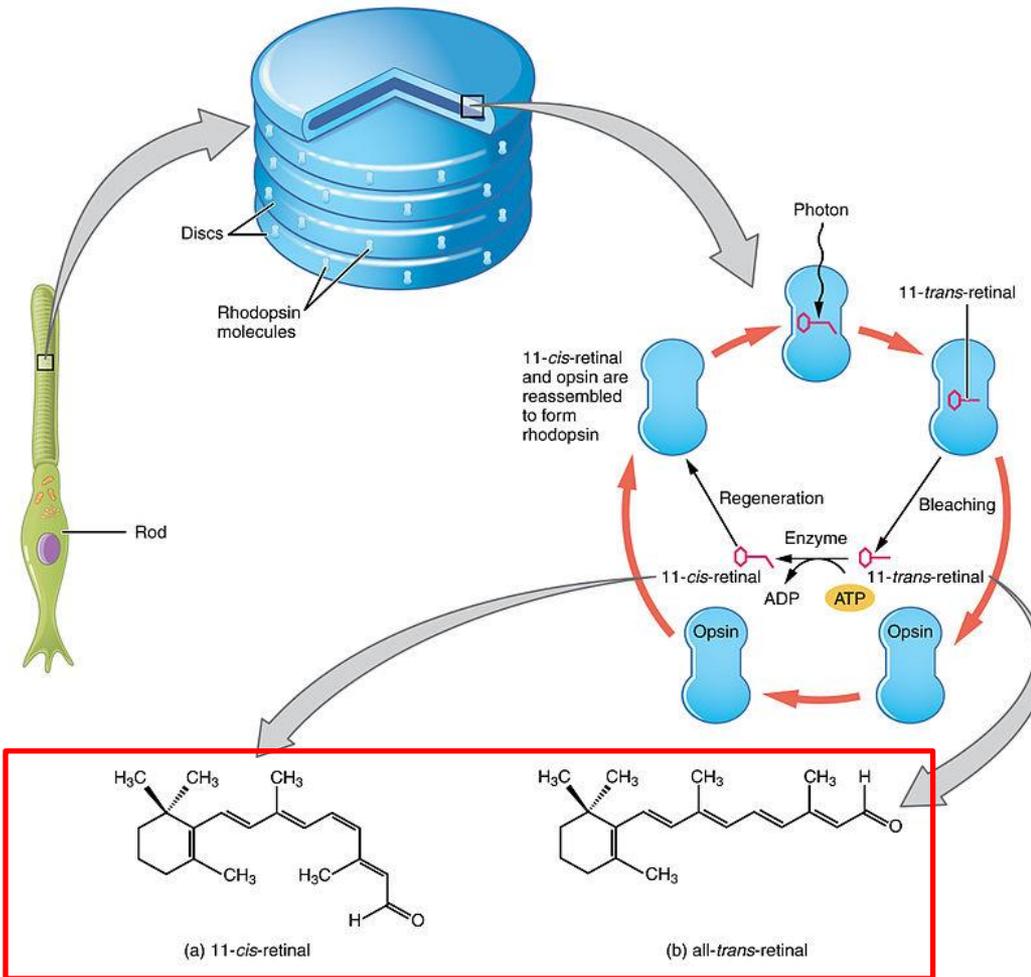


Stilbene Derivative



Isomerizzazione: il processo chimico nel quale una molecola è trasformato in un isomero con una diversa struttura chimica

Isomerizzazione e visione (cis/trans-retinale)

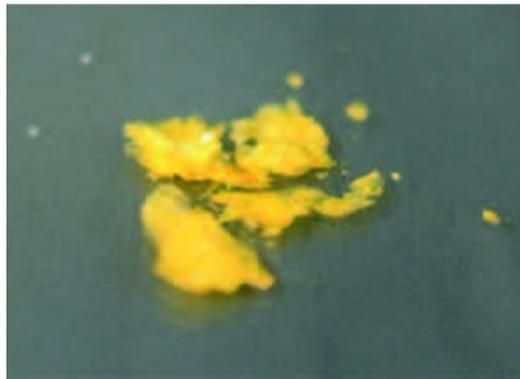
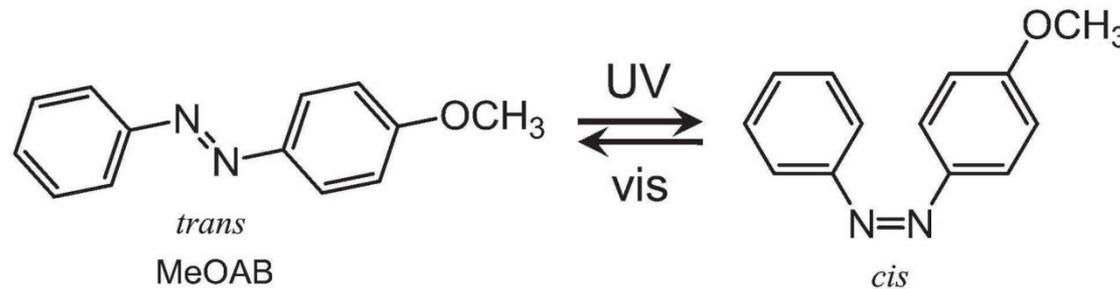


Lo spettro di assorbimento del retinale (derivato vitamina A) dipende dalle sue interazioni con la proteina opsina a cui è legato, in modo che diversi complessi retinale-opsina sono sensibili a fotoni di diverse lunghezze d'onda (3 diversi tipi di coni).

FOTOCROMATISMO =

(1) Fotoisomerizzazione + (2) cambiamento della risposta ottica percepibile ad occhio nudo (spettro visibile)

Azobenzene (isomerizzazione cis-trans)



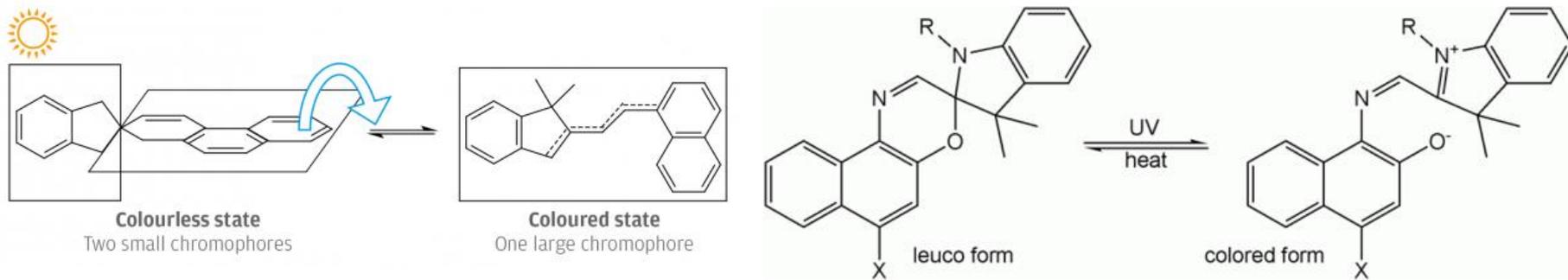
La fotoisomerizzazione del metossiazobenzene provoca un cambiamento di colore reversibile

Cos'è il fotocromatismo?

FOTOCROMATISMO =

(1) Fotoisomerizzazione + (2) cambiamento della risposta ottica percepibile ad occhio nudo (spettro visibile)

Spiropirani e spiroossazine (isomerizzazione strutturale):

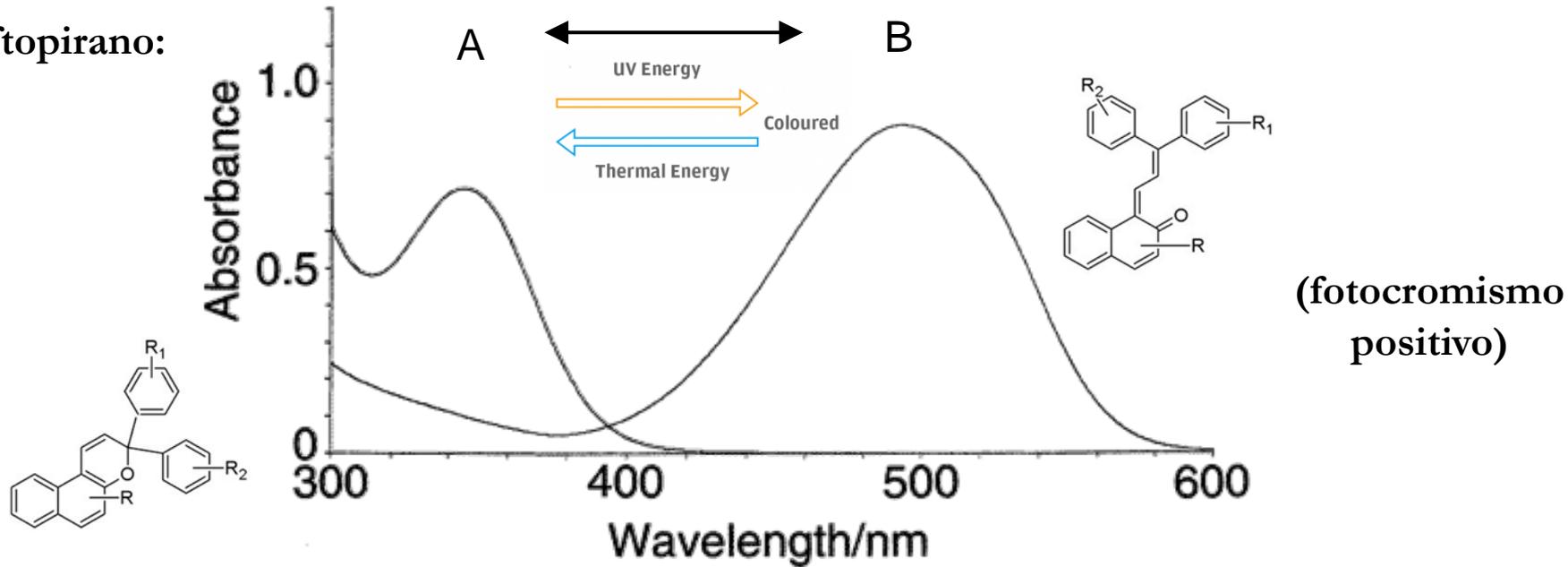


Il sistema coniugato dell'ossazina e di un'altra parte aromatica della molecola è separato da un carbonio "spiro" ibridato sp^3 . Dopo l'irradiazione con luce UV, il legame tra il carbonio spiro e l'ossazina si rompe, l'anello si apre, il carbonio spiro raggiunge l'ibridazione sp^2 e diventa planare, il gruppo aromatico ruota, allinea i suoi orbitali π con il resto della molecola e si forma un sistema coniugato con la capacità di assorbire fotoni di luce visibile, e quindi apparire colorato.

Cos'è il fotocromatismo?

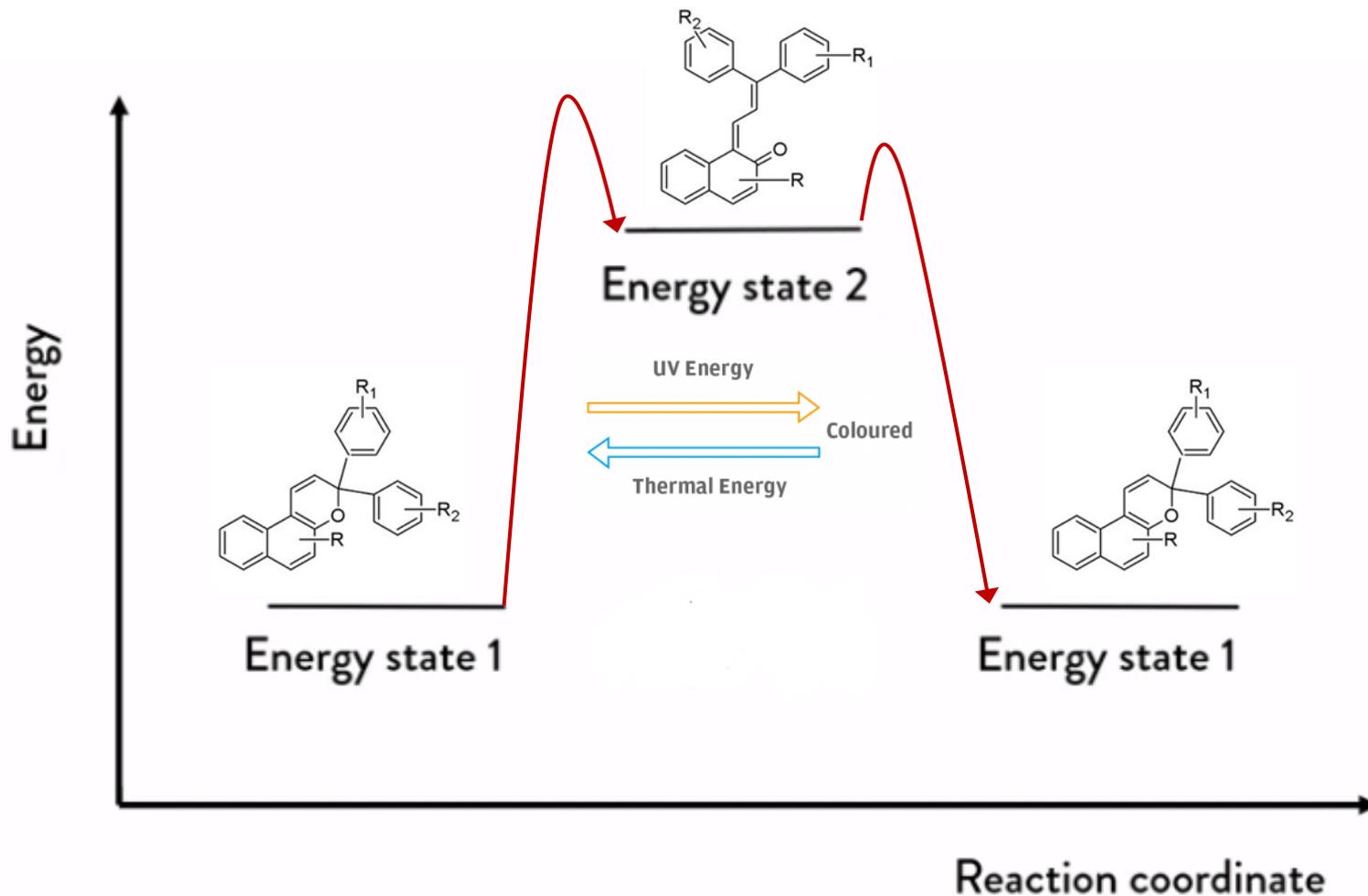
Il fotocromatismo è una trasformazione reversibile di una specie chimica indotta in una o entrambe le direzioni dall'assorbimento di radiazione elettromagnetica tra due forme, A e B, aventi spettri di assorbimento differenti:

Naftopirano:



(fotocromismo
positivo)

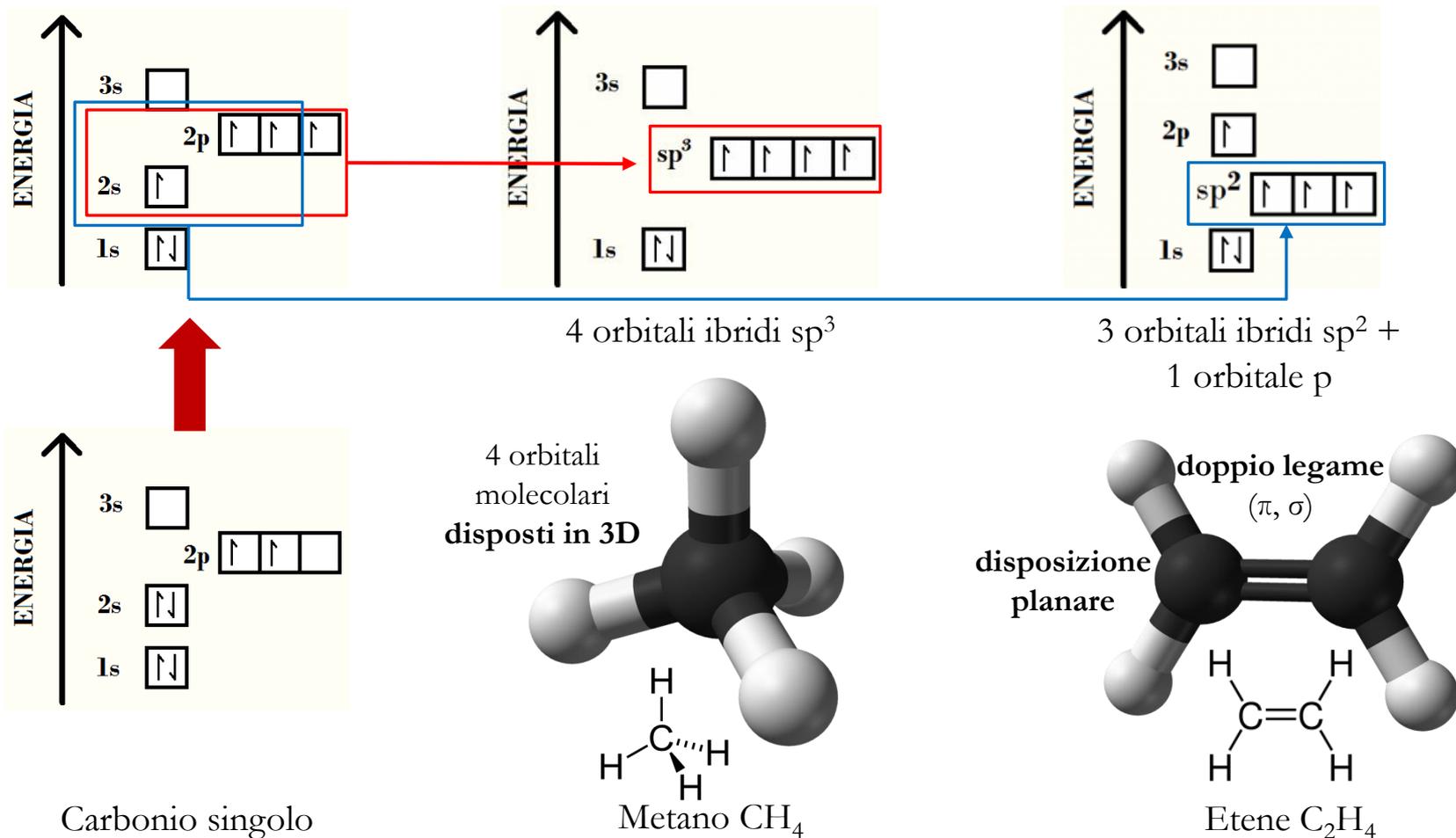
La forma termodinamicamente più stabile A è trasformata in seguito all'assorbimento di radiazione nella forma B. La reazione inversa può avvenire per via termica (*Fotocromismo di tipo T*) oppure ottica (*Fotocromismo di tipo P*).



L'isomero di partenza (trasparente) è termodinamicamente più stabile

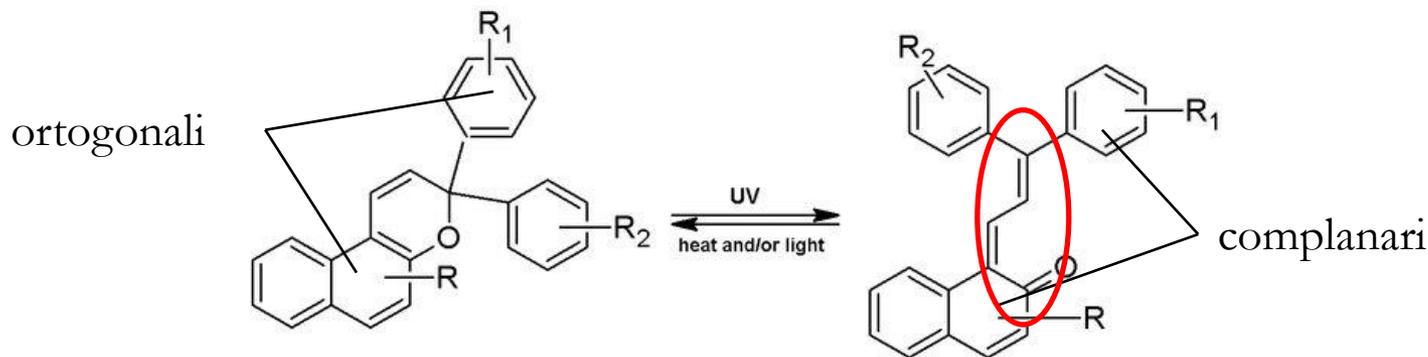
Il ruolo degli orbitali ibridi

Il singolo atomo di carbonio avrebbe solo 2 elettroni a disposizione per formare legami. In realtà può legare anche con 3 o 4 atomi, formando legami con configurazioni spaziali e caratteristiche energetiche diverse da quelli di partenza, in quanto sovrapposizione di orbitali s e p (orbitali ibridi)



Sistema coniugato: sequenza di legami singoli e doppi. In chimica teorica, un sistema coniugato è un sistema di orbitali p connessi con elettroni delocalizzati in una molecola, che in generale abbassa l'energia complessiva della molecola e aumenta la stabilità. È convenzionalmente rappresentato come avente **legami singoli e multipli alternati**.

In un sistema π coniugato, gli elettroni sono in grado di catturare determinati fotoni mentre gli elettroni risuonano lungo una certa distanza di orbitali p , in modo simile a come un'antenna radio rileva i fotoni lungo la sua lunghezza. Tipicamente, più è coniugato (più lungo) il sistema, maggiore è la lunghezza d'onda del fotone che può essere assorbita.

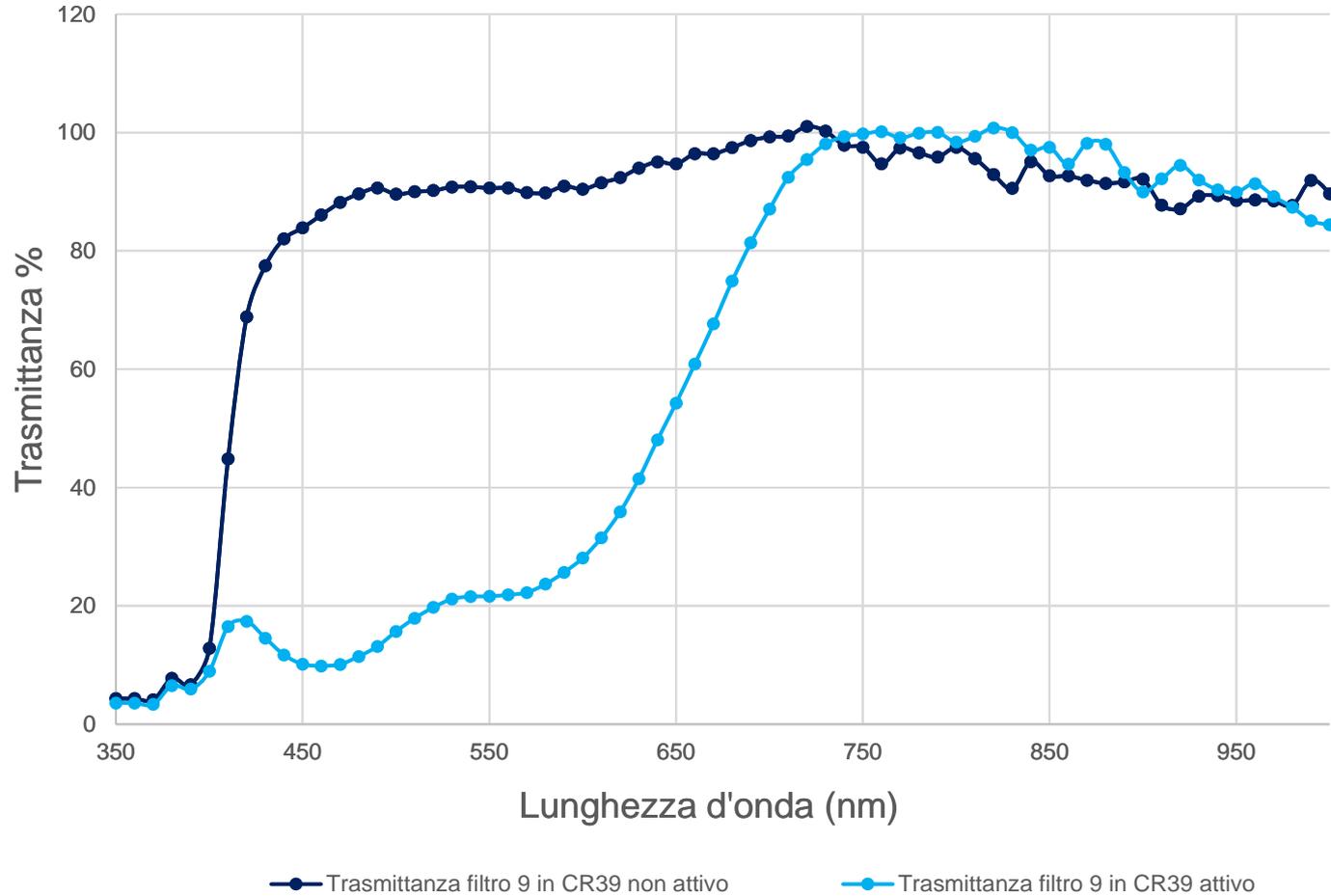
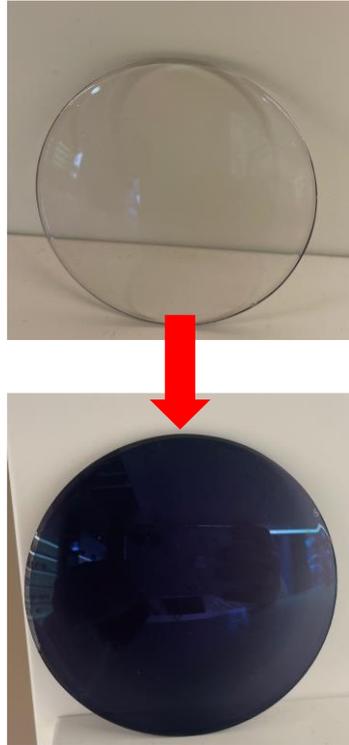


Maggiore è la lunghezza del sistema coniugato, maggiore è la lunghezza d'onda di assorbimento

Lenti fotocromatiche organiche

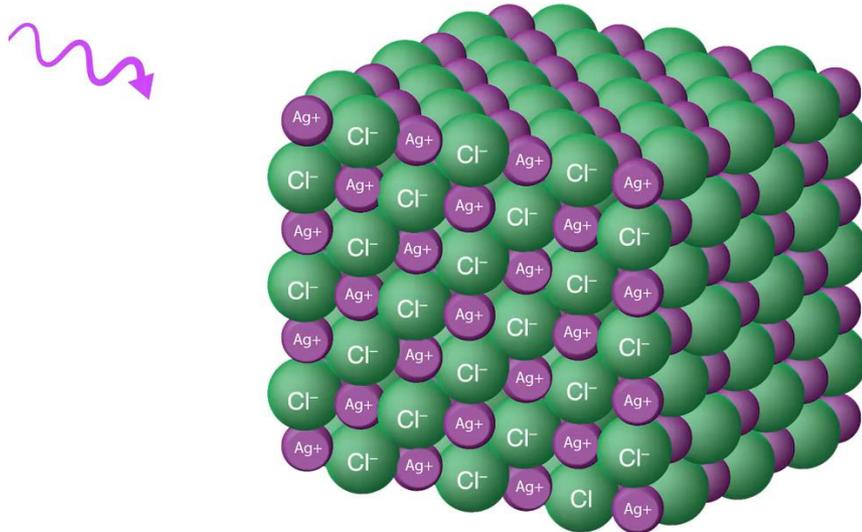


Trasmittanza filtro fotocromatico



Trasmittanza misurata con ellissometro spettroscopico VASE (J.A.Woollam), risoluzione 0.3nm

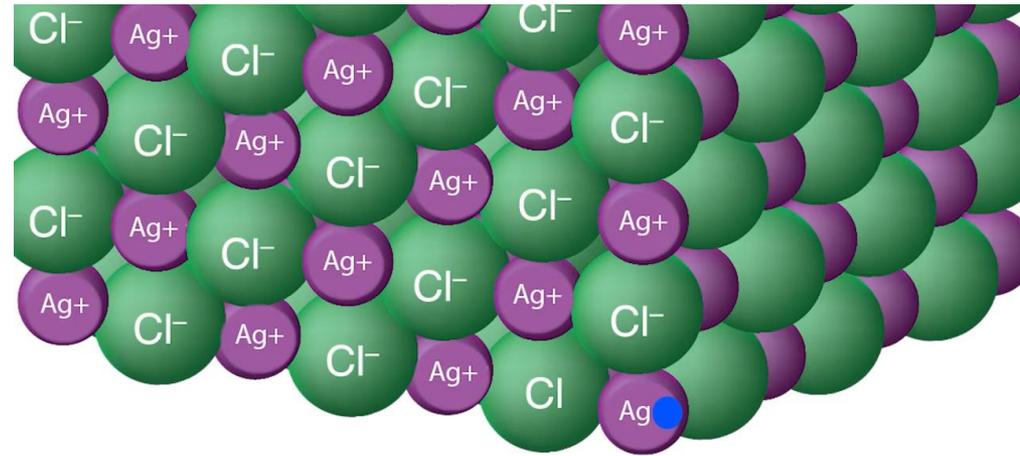
V. Apriceno, "Radiazione infrarossa e aspetti oftalmici e visivi", A.A. 2022-23



Le lenti in vetro si basano su un diverso meccanismo: contengono alogenuri di argento, ad esempio cloruro di argento.

In seguito all'assorbimento di luce, si formano atomi neutri di argento, che migrano sino a raggiungere i bordi del cristallo.

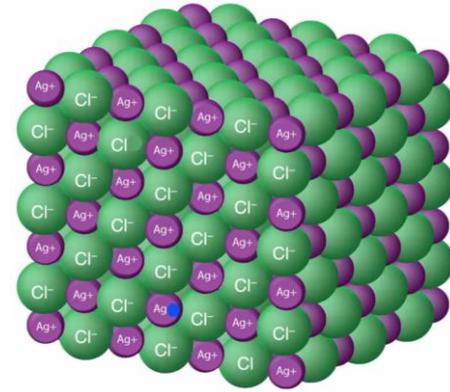
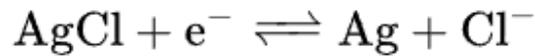
Qui si accumulano formando argento metallico, non trasparente, e le lenti di conseguenza si scuriscono.



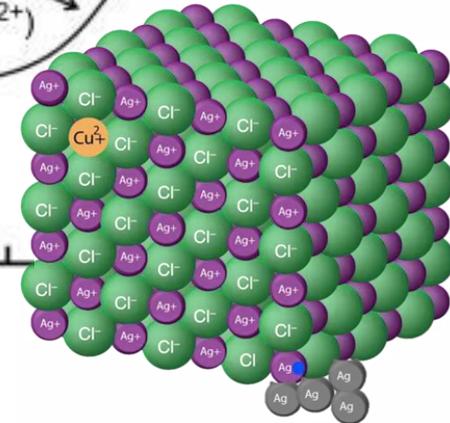
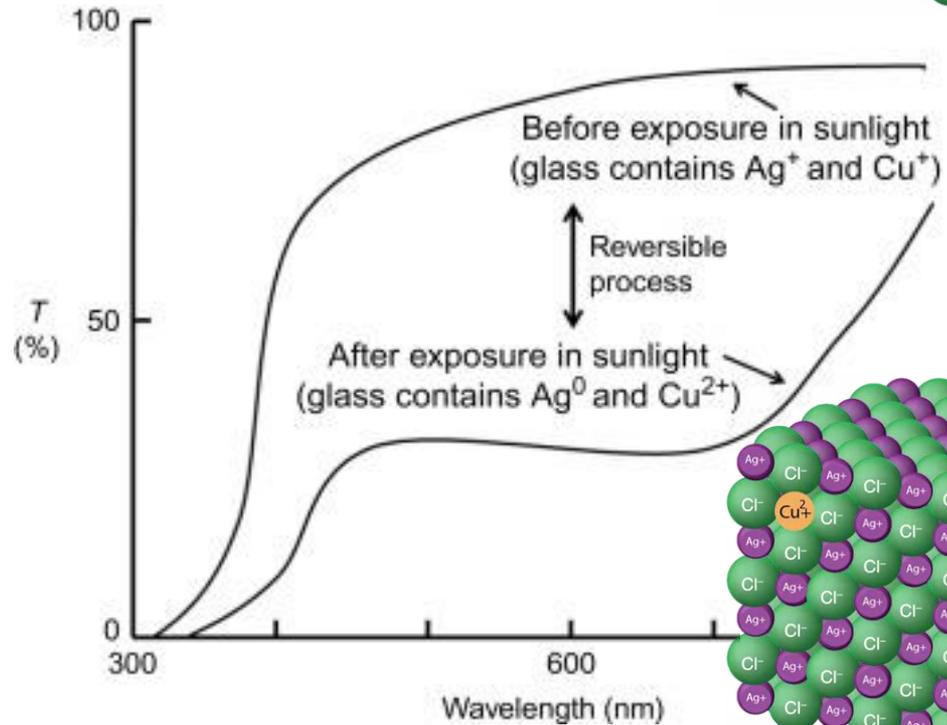
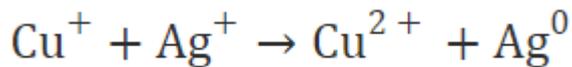
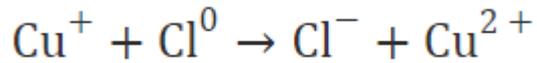
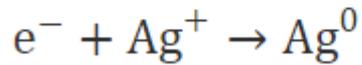
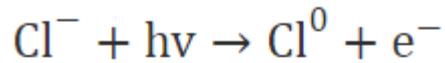
Credits: YouTube channel «The Action Lab»

Lenti fotocromatiche in vetro

Le lenti fotocromatiche in vetro ottengono contengono alogenuri d'argento microcristallini (ad es. cloruro d'argento). In presenza di luce UV-A (315 – 380 nm), elettroni dal vetro possono essere assorbiti dai cationi Ag^+ trasparenti e andare a formare argento metallico, rendendo la lente più scura:



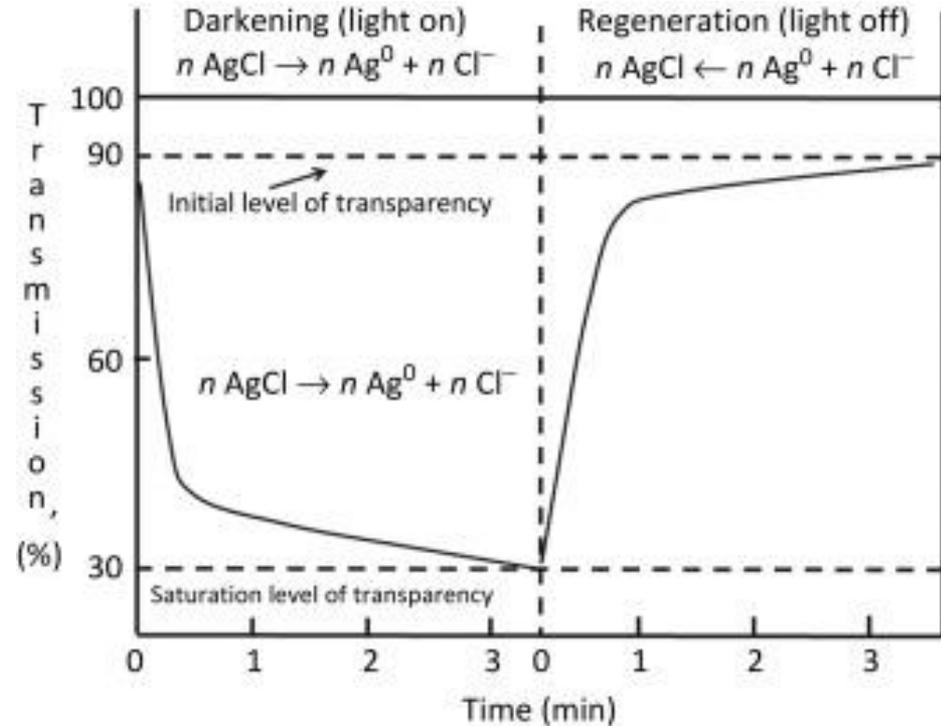
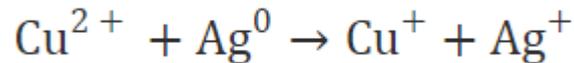
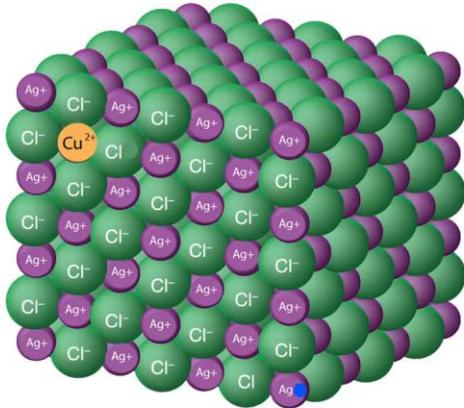
Ma non è l'unica reazione:



Lenti fotocromatiche in vetro

Quando non esposte a luce UV, la reazione inversa è favorita.

L'argento ritorna allo stato ionico originario, e la trasparenza della lente è ripristinata:



La velocità con cui la reazione fotocromatica avviene in risposta alla radiazione (velocità di scurimento) non dipende molto dalla temperatura; al contrario, la velocità di ripristino dipende significativamente dalla temperatura (mobilità degli ioni di rame).

La velocità di ripristino aumenta all'aumentare della temperatura.

“Functionality of Reversible Glass Nanocomposites and Their Applications”, B. Karmakar, in *Glass Nanocomposites*, 2016

Effetto della temperatura

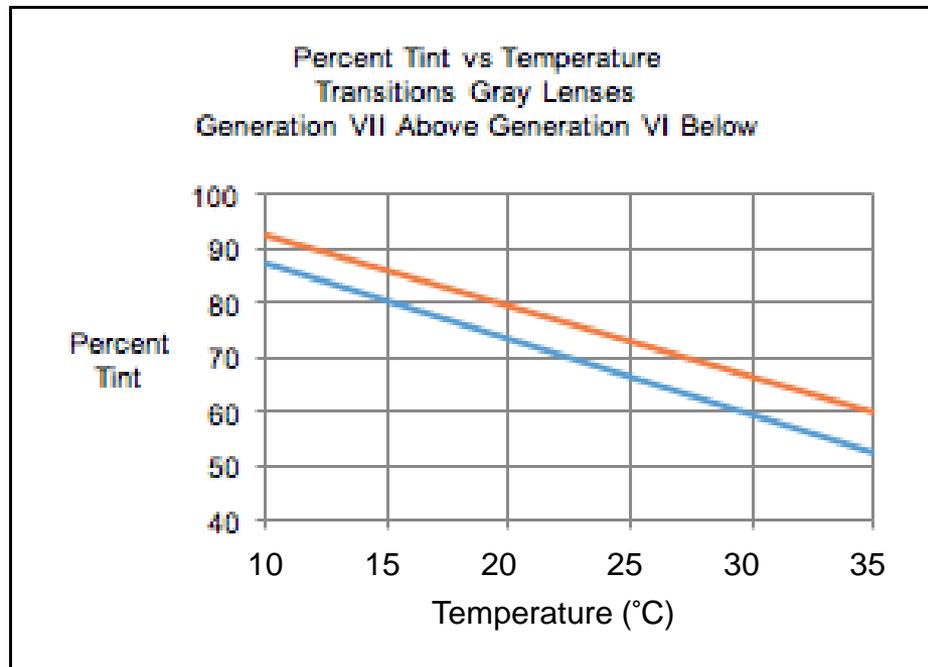
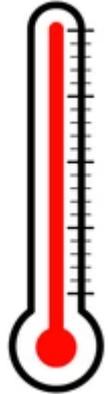


Credits: YouTube channel «The Action Lab»

Fattori che influenzano il fotocromatismo

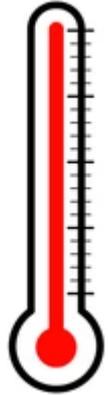


Dipendenza dalla temperatura. I composti fotocromatici ritornano allo stato trasparente mediante un processo termico: maggiore è la temperatura, meno scure saranno le lenti fotocromatiche. Questo effetto termico impedisce a questi dispositivi di raggiungere la vera oscurità degli occhiali da sole in climi molto caldi. Al contrario, le lenti fotocromatiche diventeranno molto scure in condizioni climatiche fredde. Tuttavia, una volta all'interno, le lenti fredde impiegano più tempo a tornare trasparenti rispetto alle lenti calde.



Credits: <https://uwaterloo.ca/chem13-news-magazine/may-2017/feature/photochromic-dyes-plastic-lenses-part-2>

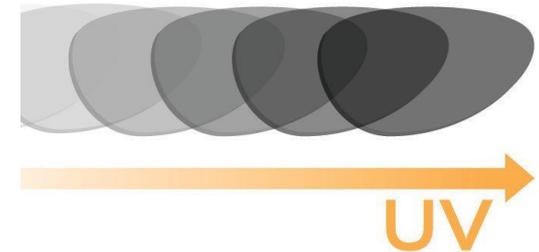
Dipendenza dalla temperatura. I composti fotocromatici ritornano allo stato trasparente mediante un processo termico: maggiore è la temperatura, meno scure saranno le lenti fotocromatiche. Questo effetto termico impedisce a questi dispositivi di raggiungere la vera oscurità degli occhiali da sole in climi molto caldi. Al contrario, le lenti fotocromatiche diventeranno molto scure in condizioni climatiche fredde. Tuttavia, una volta all'interno, le lenti fredde impiegano più tempo a tornare trasparenti rispetto alle lenti calde.



Spessore della lente. Con il materiale fotocromatico disperso nel substrato di vetro, il grado di oscuramento dipende dallo spessore del vetro, cosa che pone problemi con le lenti a spessore variabile negli occhiali da vista. Con le lenti in plastica, il materiale è tipicamente incorporato nello strato superficiale della plastica in uno spessore uniforme di circa 150 μm .

Richiedono radiazione UV-A per l'attivazione e quindi la risposta dipende da:

- Stagione e ora del giorno
- Altitudine e latitudine
- Orientazione della lente
- Presenza di superfici riflettenti circostanti
- Azione filtrante di schermi UV (non funzionano alla guida)



Effetto della radiazione



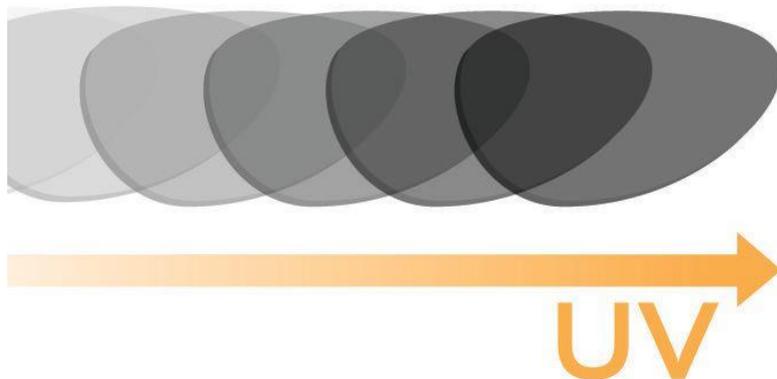
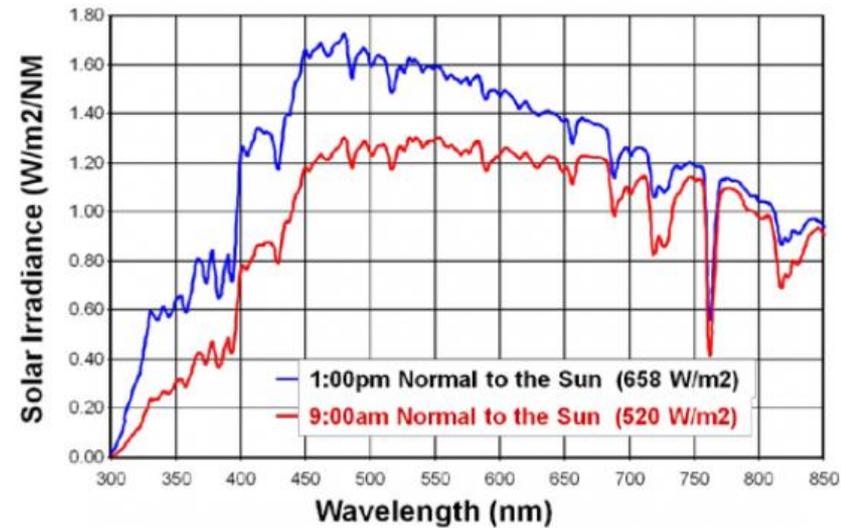
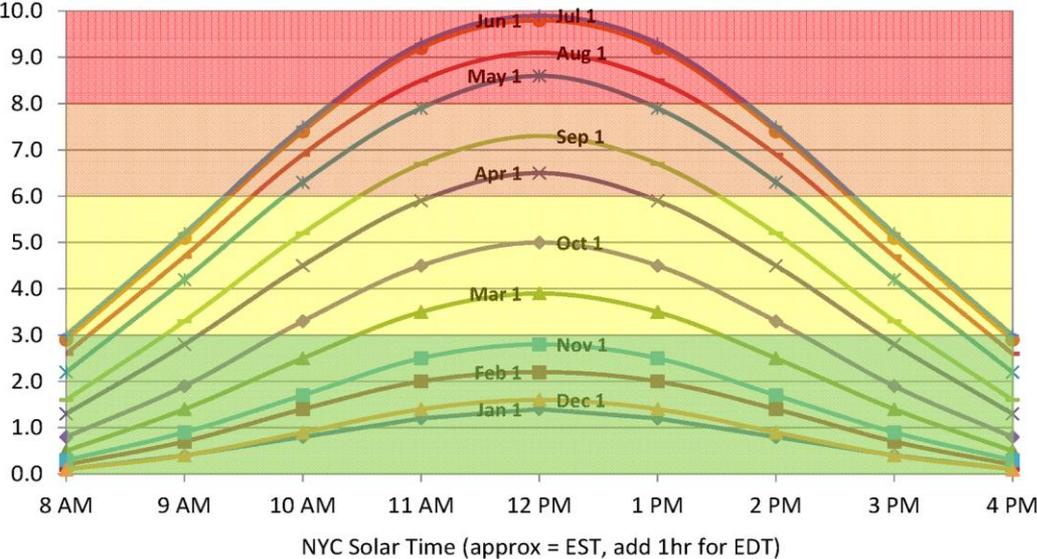
Credits: YouTube channel «The Action Lab»

Variabilità durante il giorno



WHO UV Index for New York City

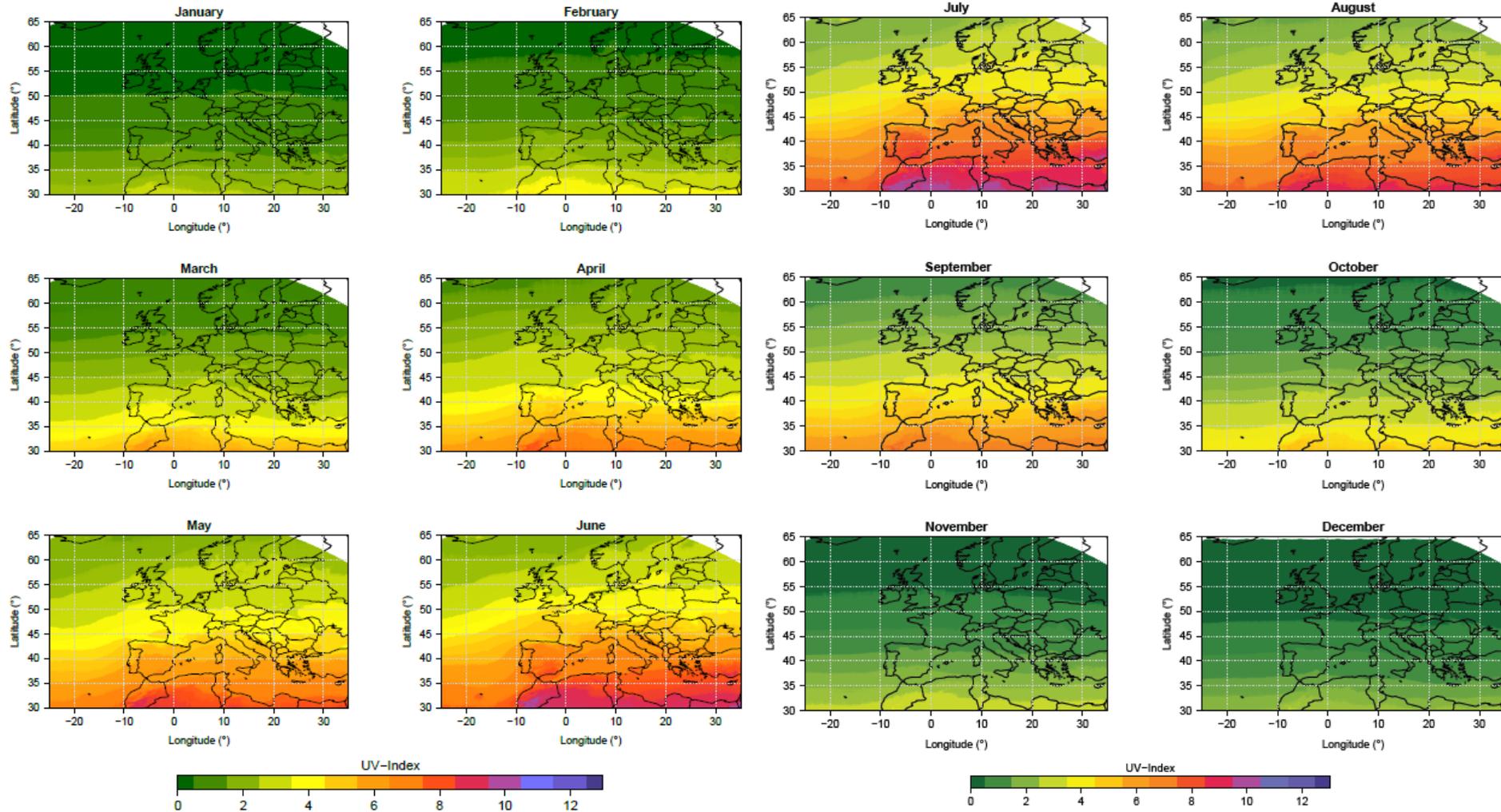
assuming clear sky, thinned ozone, horizontal surface, FastRT UV Calculator



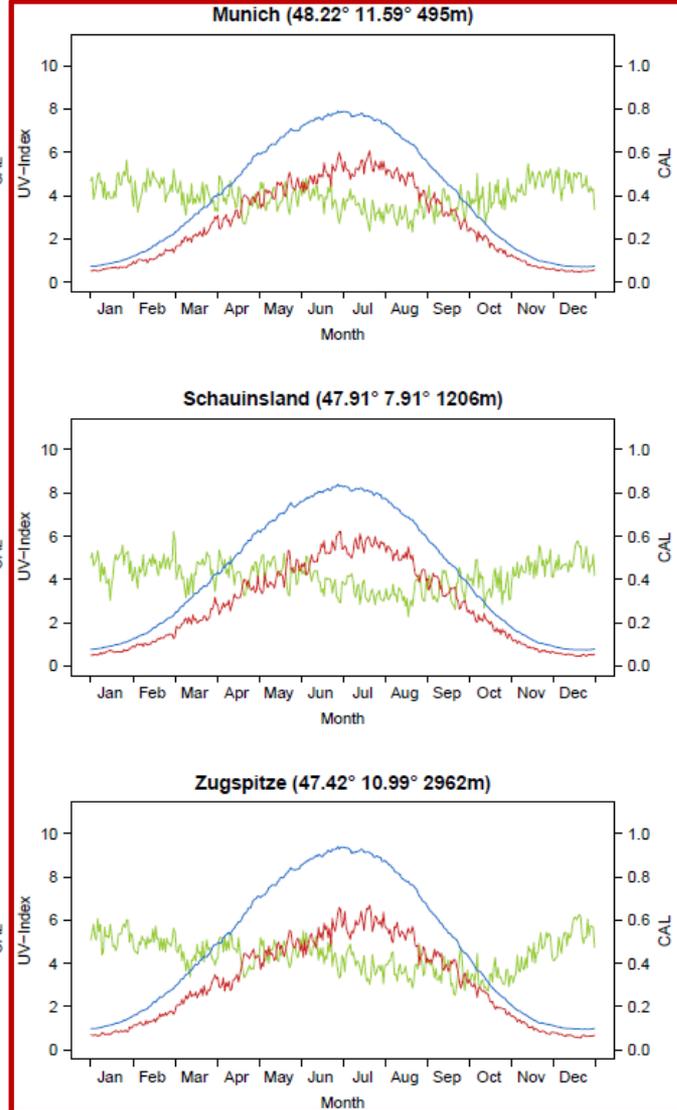
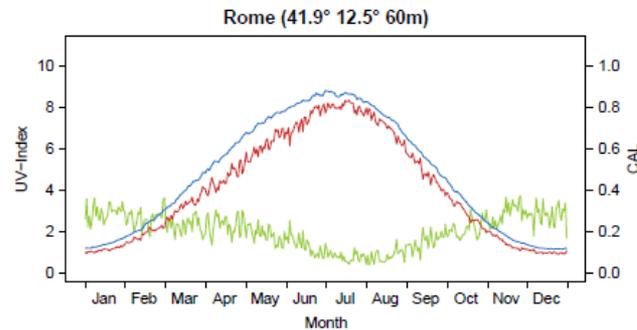
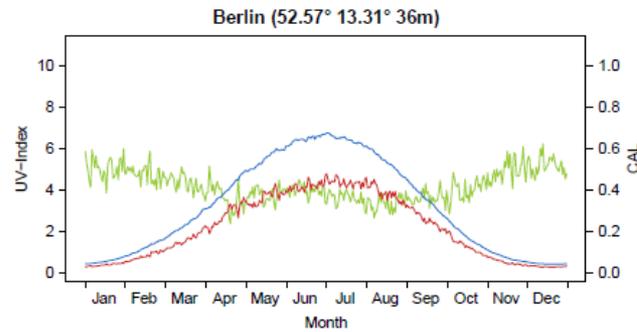
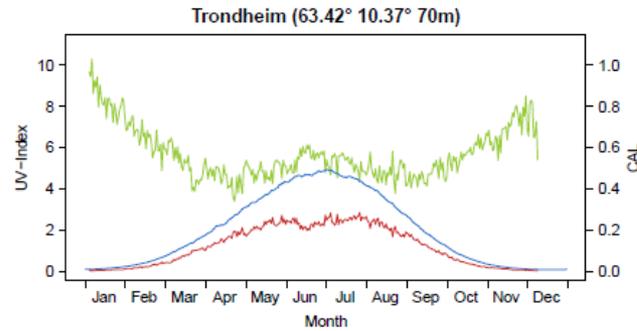
LOW	MODERATE	HIGH	VERY HIGH	EXTREME
 NO PROTECTION REQUIRED You can safely stay outside!	 PROTECTION REQUIRED Seek shade during midday hours! Slip on a shirt, slop on sunscreen and slap on a hat!	 EXTRA PROTECTION Avoid being outside during midday hours! Make sure you seek shade! Shirt, sunscreen and hat are a must!		

Engelsen, Ola & Kylling, Arve (April 2005). "Fast simulation tool for ultraviolet radiation at the earth's surface". *Optical Engineering*, 44 (4). 041012

Effetto della latitudine

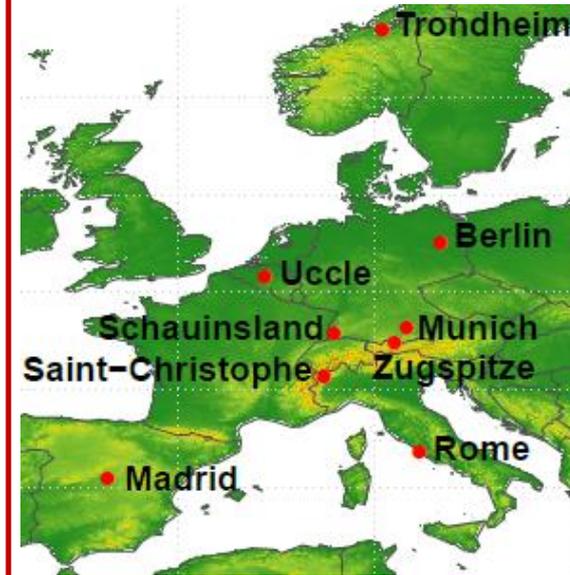


Effetto dell'altitudine



Altitudine.

Si riduce l'azione di filtraggio atmosferico. Aumento della radiazione UV del 5-15% per km, a seconda dell'orografia e del clima.



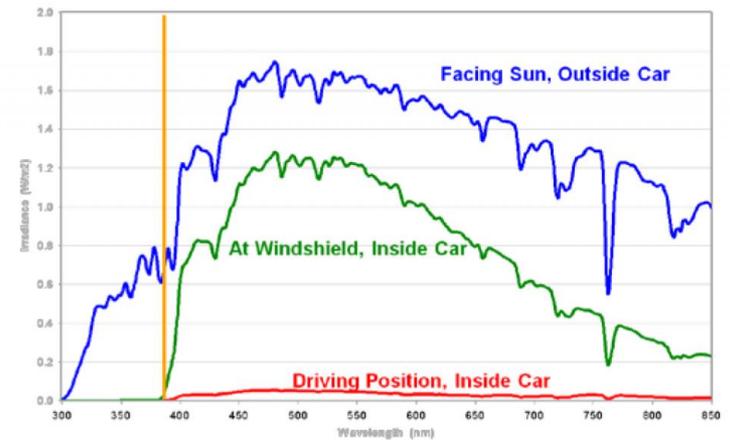
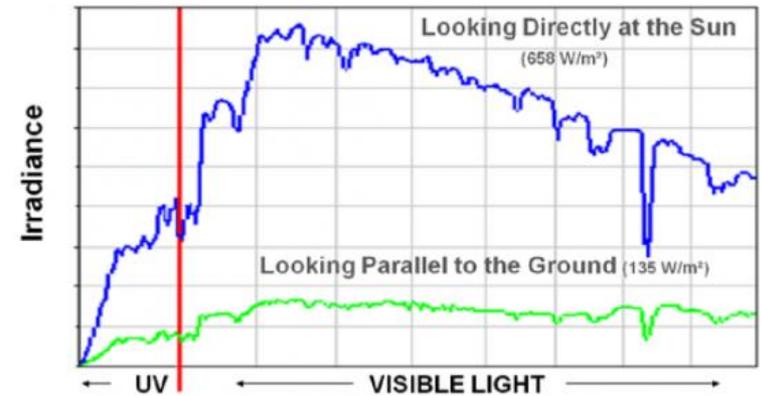
R. Vitt, *et al.*, *Atmosphere* **11**, 727 (2020)

Orientazione della lente e superfici circostanti.

Ad esempio, la neve riflette sostanzialmente più raggi UV rispetto all'erba. Una persona che indossa un cappello mentre gioca a golf potrebbe non sperimentare lo stesso oscuramento delle lenti di una persona che scia sulla neve.

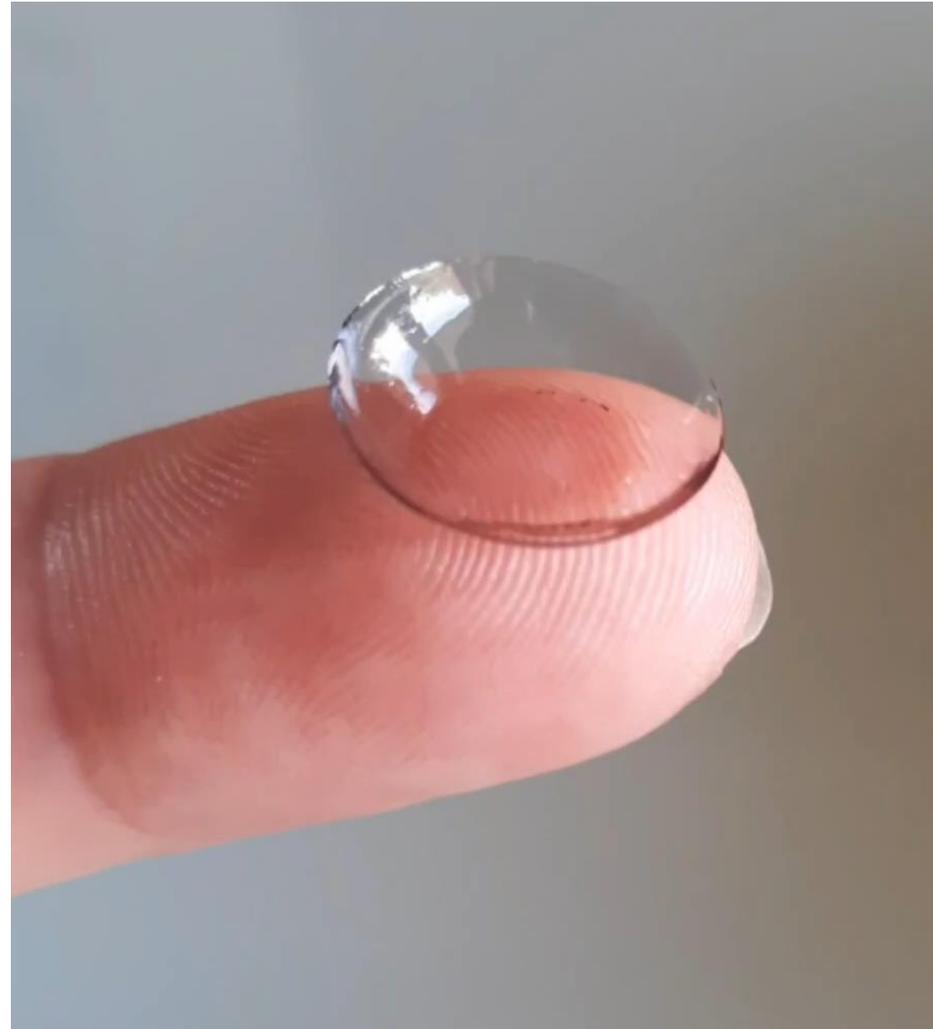
Combinazione con altri schermi filtranti. L'azione filtrante UV dei vetri (polivinilbutirale) impedisce l'attivazione mentre si è alla guida. **E' necessaria la dotazione di occhiali da sole standard.**

Età della lente. Il funzionamento è garantito per qualche migliaio di transizioni. Al passare del tempo, la velocità e il livello di oscuramento diminuiscono.



Contact Lenses That Adjust to Light

Acuvue Oasys with Transitions

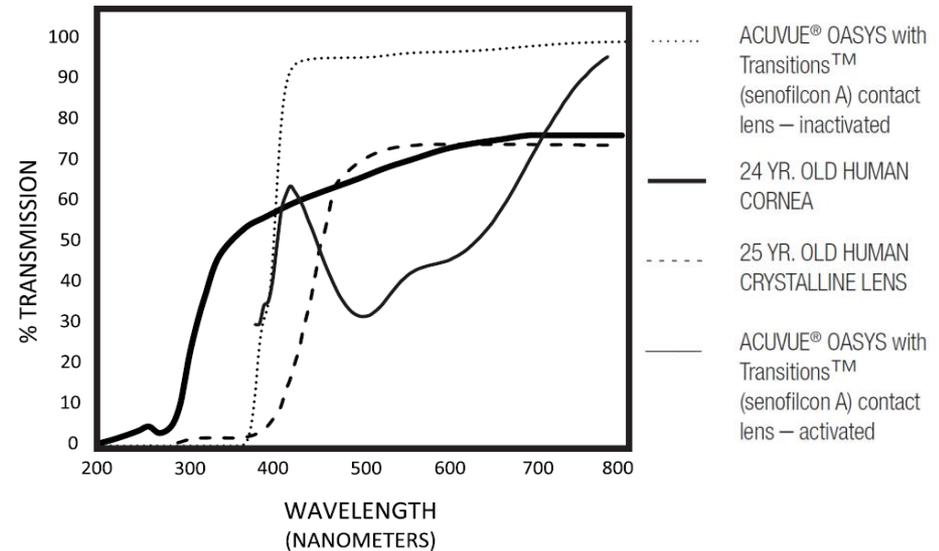


Lenti a contatto fotocromatiche (J&J)

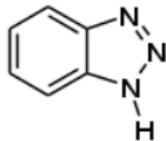


ACUVUE® OASYS with Transitions™

Lenti a contatto sferiche fatte di silicon hydrogel (senofilcon A) contenente un agente bagnante interno, e 2 differenti monomeri con assorbimento nell'UV:

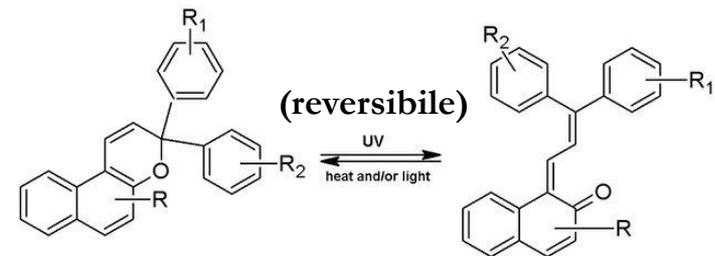


Benzotriazolo (filtrante UV)



Trasmette meno dell'1% nell'UVB (da 280 nm a 315 nm) e meno del 10% nell'intervallo UVA (da 316 nm a 380 nm)

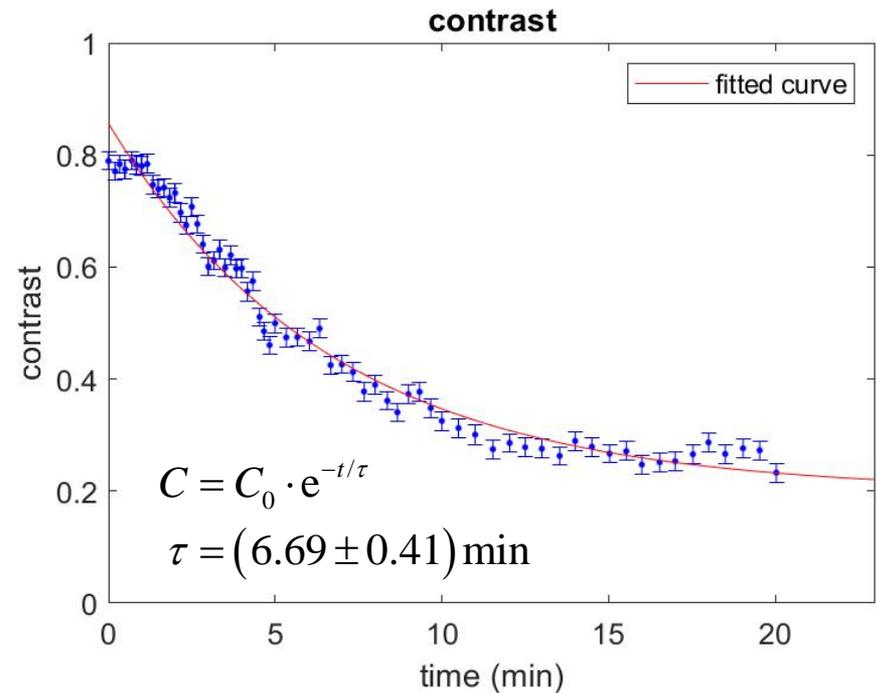
Naftopirano (additivo fotocromatico)



forma chiusa:
assorbe luce UV

forma aperta:
assorbe luce UV e
visibile

time:20.0 min



- Quando non è più esposta alla luce UV, la lente si disattiva con un tempo caratteristico di circa 7 min
- Il grado di attivazione dipende dal livello di radiazione UV (illuminazione interna/esterna, soleggiato/nuvoloso, periodo dell'anno, latitudine, altitudine, temperatura, ecc.)

Attivazione massima (artificiale)



Attivazione massima (realistica)



Giornata di sole a mezzogiorno

Attivazione intermedia



Giornata di sole al mattino/tardo pom

Attivazione molto bassa

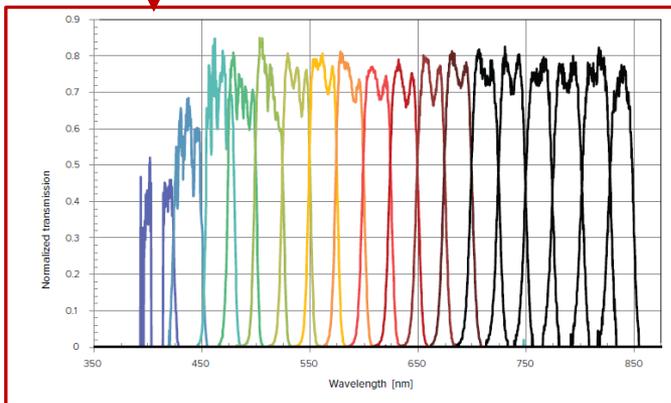
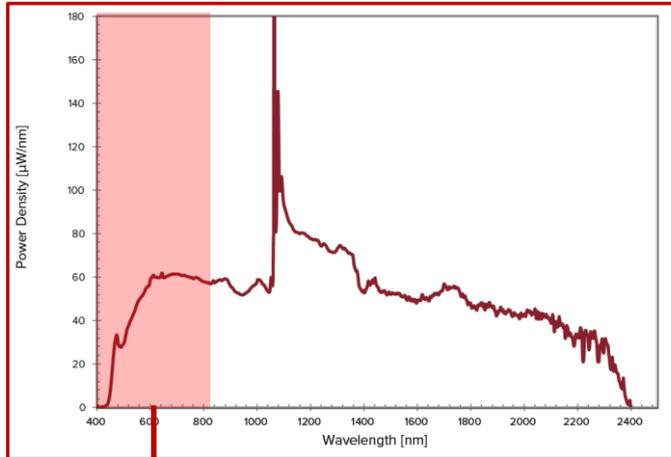


All'interno

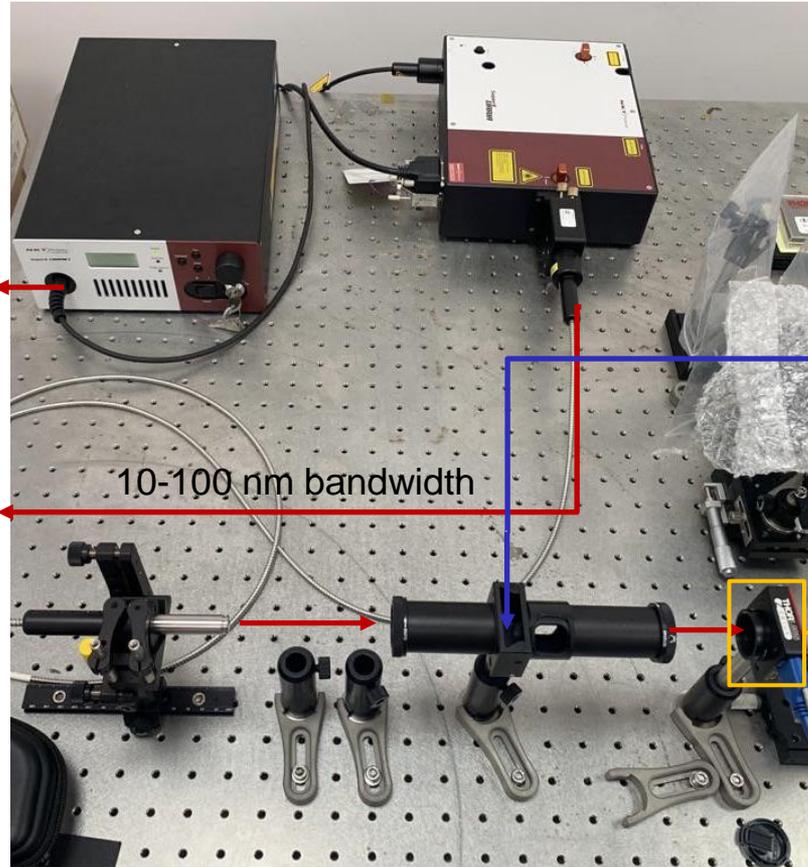
Setup sperimentale @UNIPD



Laser supercontinuum
SuperK Compact (NKT Photonics)



Monochromator 400-840 nm
SuperK VARIA (NKT Photonics)



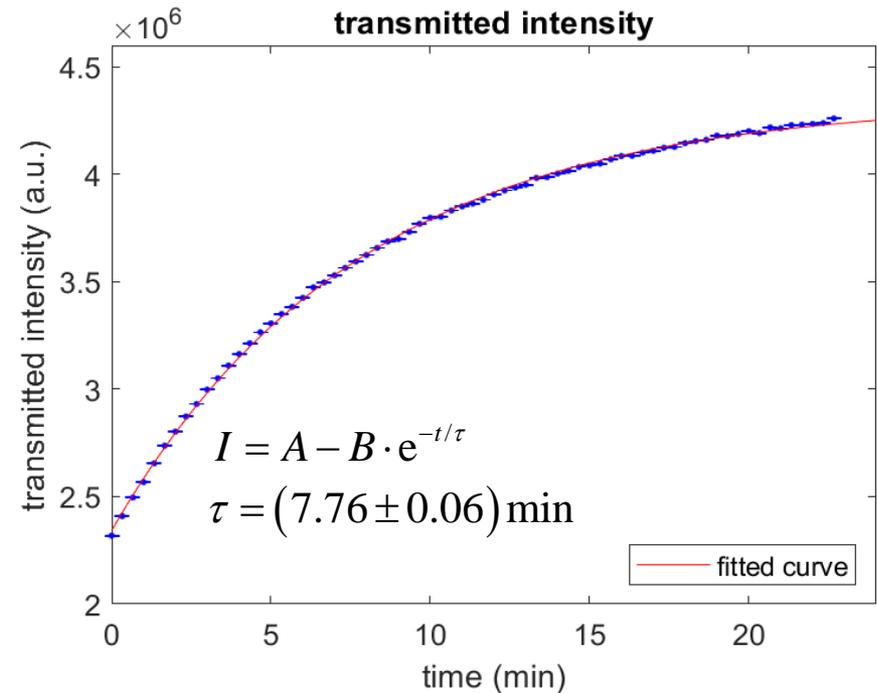
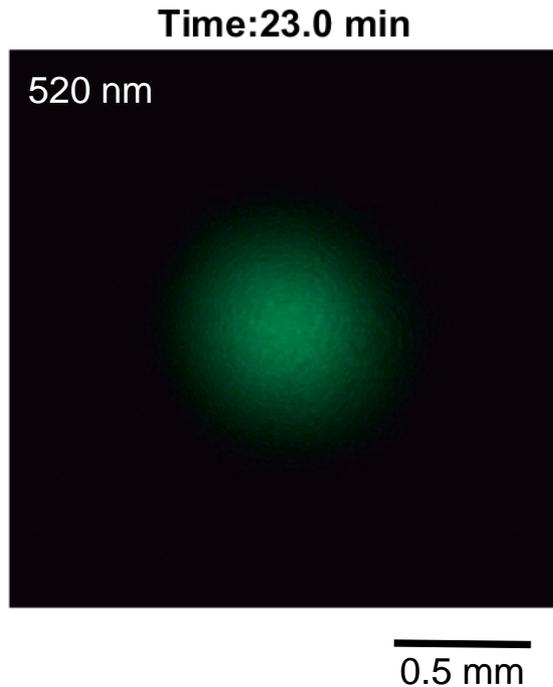
10-100 nm bandwidth

Lens holder

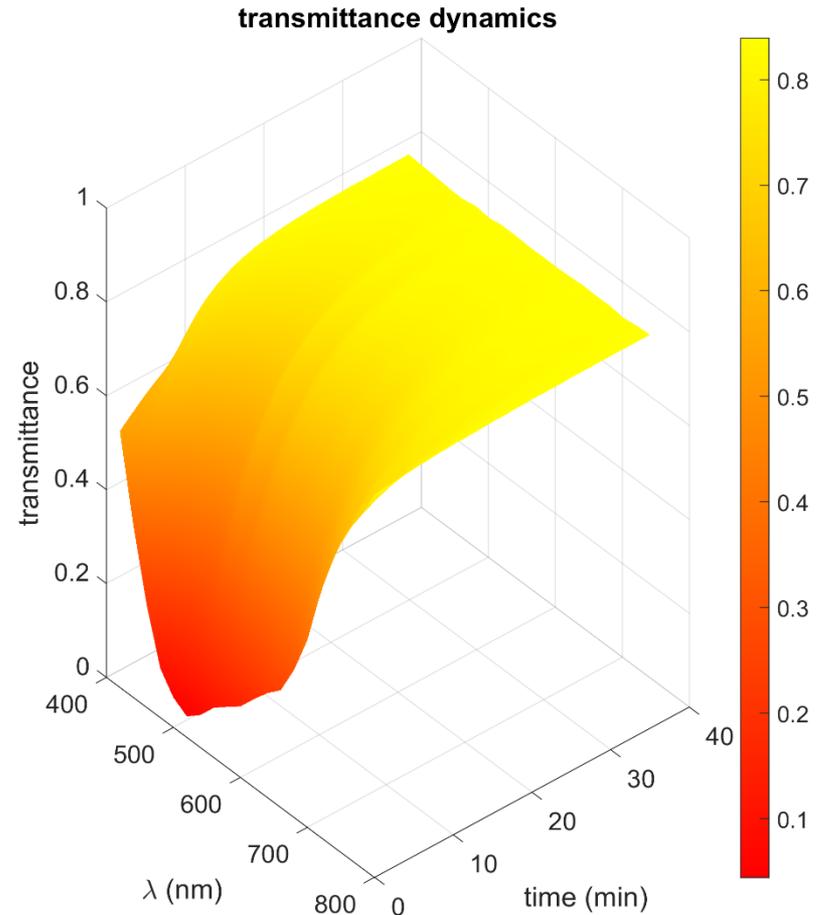
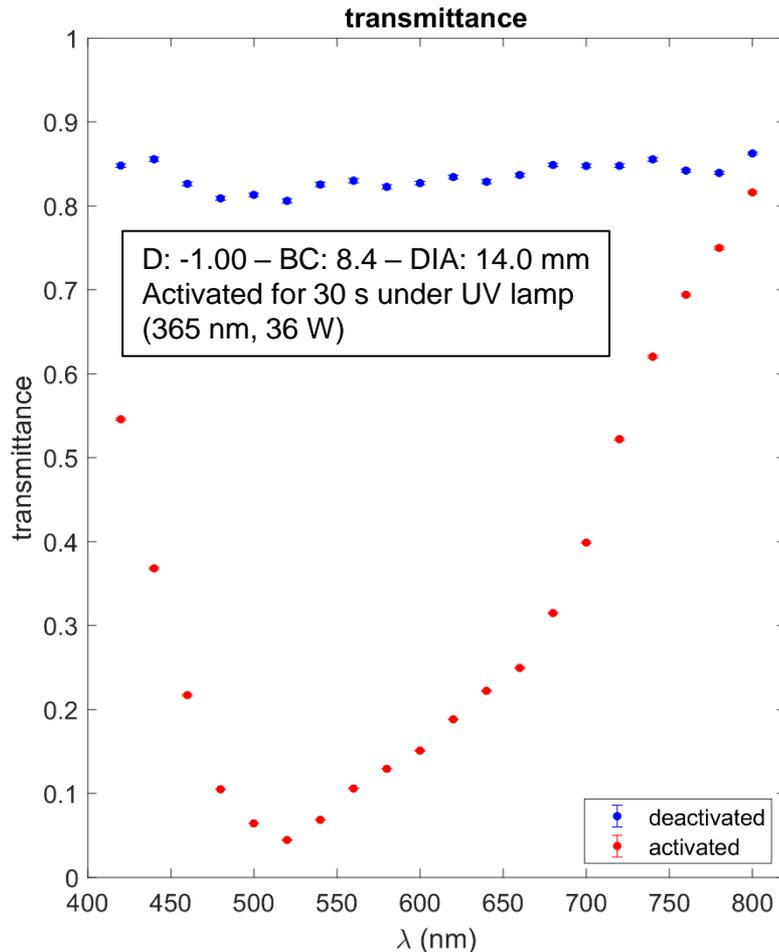


Zelux CMOS camera
1080 x 1440 pixels
3.45 μm , 10 bit

Durante la deattivazione, l'intensità trasmessa aumenta in funzione del tempo in quanto l'assorbimento si spegne progressivamente:

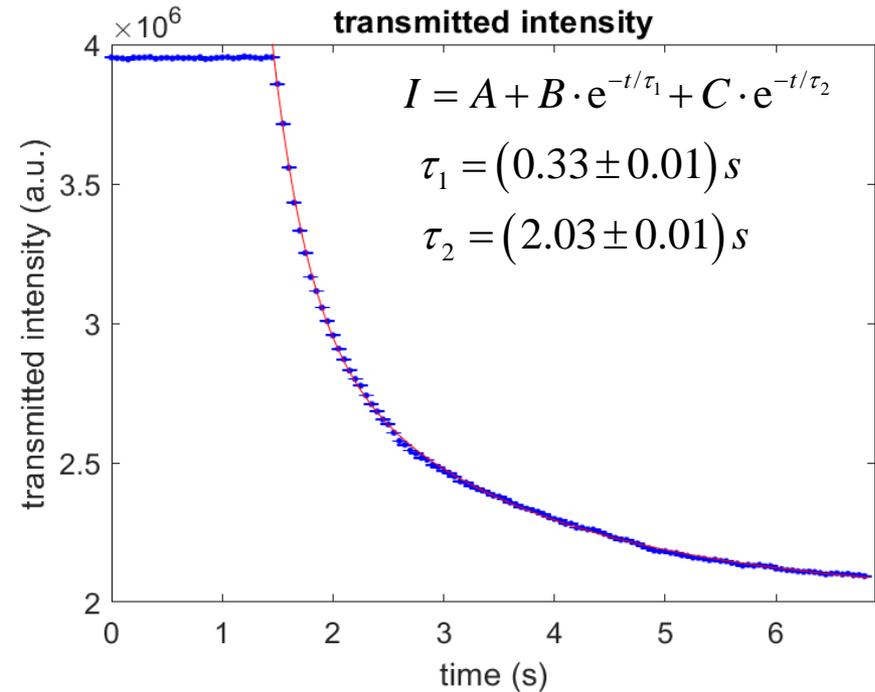
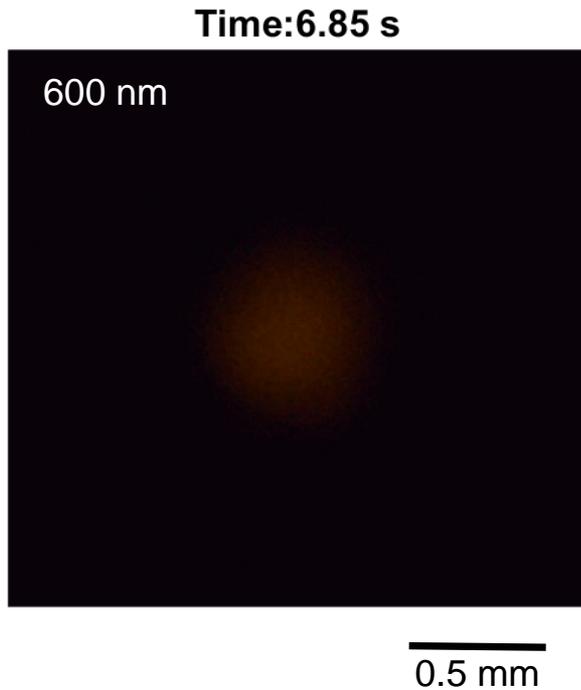


Una volta attivata e non più esposta alla luce UV, la lente si disattiva e l'intensità trasmessa aumenta con un tempo caratteristico medio intorno a $(7.17 \pm 0.02) \text{ min}$



Una volta attivata e non più esposta alla luce UV, la lente si disattiva e l'intensità trasmessa aumenta con un tempo caratteristico medio intorno a (7.17 ± 0.02) min

Durante l'attivazione, l'intensità trasmessa cala velocemente a causa dell'assorbimento, come atteso:



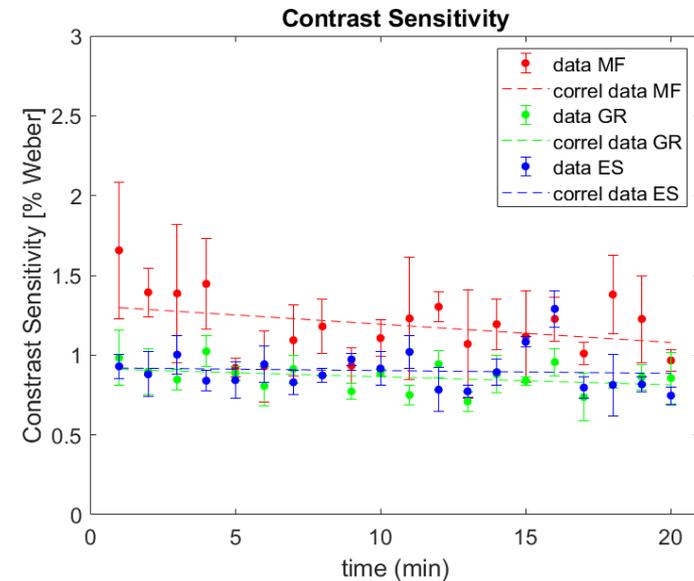
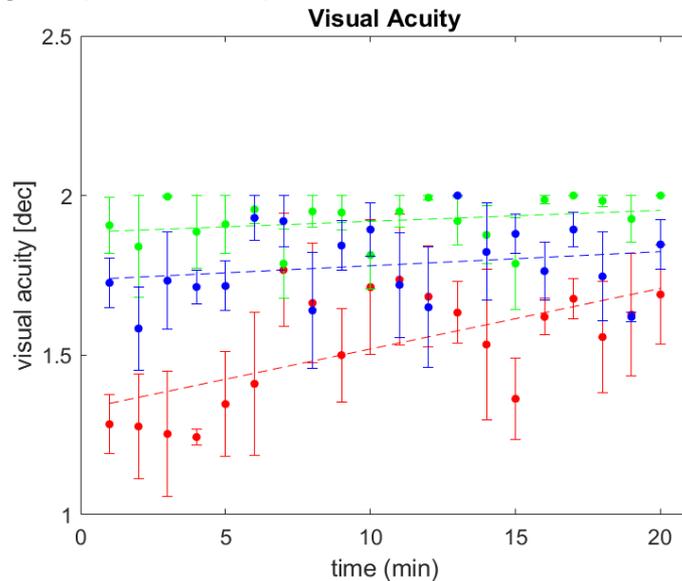
Una volta esposta alla luce UV, la lente si attiva rapidamente e l'intensità trasmessa diminuisce bruscamente con un tempo caratteristico iniziale inferiore a 0.5 s per tutte le lunghezze d'onda.

Test visive all'interno (deattivazione)



- 10 soggetti (5 M, 5 F), età 22-57. 20 test, 1 al minuto, ripetuto 3 volte
- Software FrACT3.10.5 su laptop, schermo 15.6", distanza 3 m, 15 tentativi per test:
 - **Acuità visiva(VA):** ottotipi di Sloan (C, D, H, K, N, O, R, S, V, Z)
 - **Sensibilità al contrasto (CS):** tumbling Landolt 'C' (4 orientazioni)

e.g., 3 soggetti (MF, GR, ES):



CORRELATION	GM	MF	M	MM	GR	ES	FK	LK	DT	AF
$r(AV)$ [dec]	0,21	0,63	0,48	0,21	0,29	0,23	0,14	0,45	0,42	0,34
$r(CS)$ [%Weber]	-0,19	-0,34	-0,24	-0,27	-0,37	-0,08	-0,28	-0,38	-0,22	-0,09

weak
 average
 strong

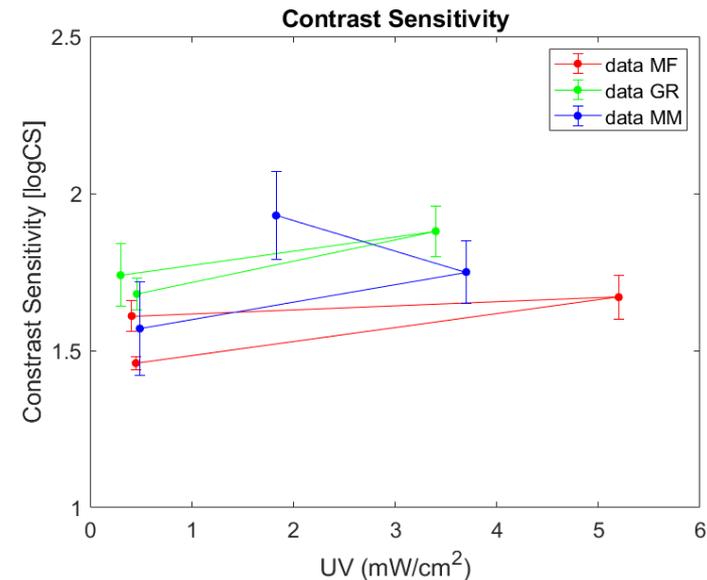
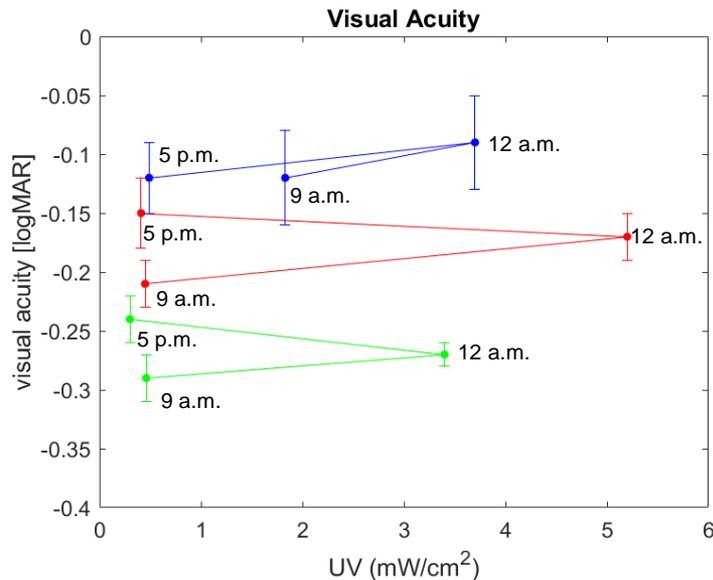
Buona stabilità delle prestazioni visive nel tempo. In generale, debole correlazione con il tempo durante la disattivazione della lente: lieve miglioramento sia di VA che di CS.

Test visivi all'esterno (attivazione)



- Identico Gruppo di soggetti e stessi test per VA e CS (15 trials per test)
- Test per l'attivazione all'esterno: 3 test (9 a.m., 12 a.m., 5 p.m.), 3 volte, giornate di sole a metà luglio (latitudine di Padova)
- Sensore UV (GY/ML8511 + Arduino) per misurare l'intensità UV (280-390nm) [mW/cm^2]

e.g., 3 soggetti (MF, GR, EMM):

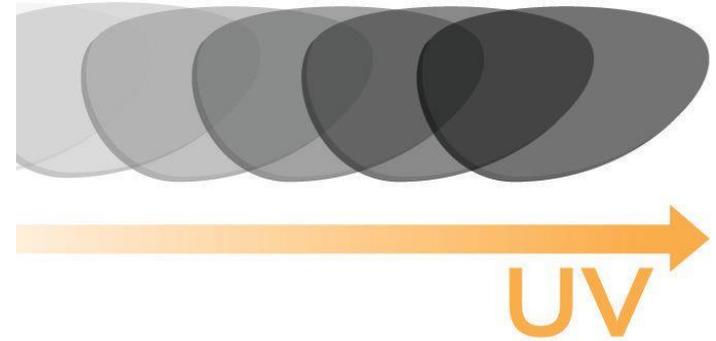


I test preliminari non suggeriscono una forte influenza sulle prestazioni visive per tutti i soggetti. L'attivazione della lente si adatta al livello UV, come previsto.

- Le lenti si adattano al livello di raggi UV per filtrare lo spettro visibile, fornendo elevata protezione dai raggi UVA e dalle lunghezze d'onda visibili più corte (luce blu).
- Le lenti si attivano in pochi secondi. La disattivazione è piuttosto lunga, con un tempo medio caratteristico di circa 7 minuti.
- Debole influenza sull'acuità visiva e sulla sensibilità al contrasto
- Considerazioni pratiche ed estetiche:
 - "Le lenti a contatto che assorbono i raggi UV NON sostituiscono gli occhiali protettivi che assorbono i raggi UV, [...] perché non coprono completamente l'occhio e l'area circostante" (dichiarato dal produttore)
 - Qualcuno dei soggetti sottoposti a test riferisce la necessità di indossare anche gli occhiali da sole, soprattutto a mezzogiorno, oltre alle lenti a contatto fotocromatiche.
 - Rispetto ad una lente oftalmica, la lente a contatto è meno esposta, in quanto protetta dall'incavo dell'orbita oculare e dalle ciglia, quindi il grado di esposizione alle luce UV è minore.
 - Poiché in contatto col corpo, è attesa una minor dipendenza dalla temperatura esterna
 - Aspetto estetico: quando fortemente attivata, la lente a contatto copre l'iride dando l'impressione di una pupilla eccezionalmente dilatata.

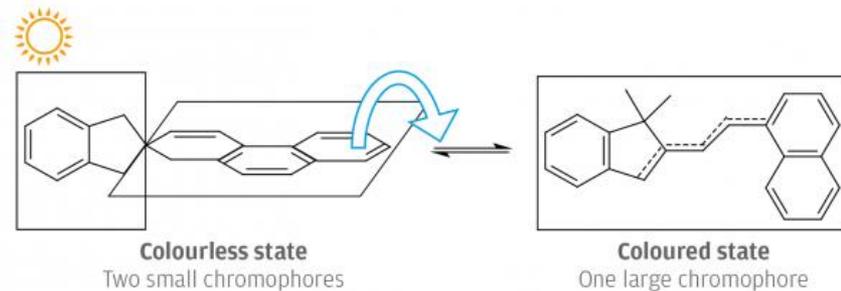
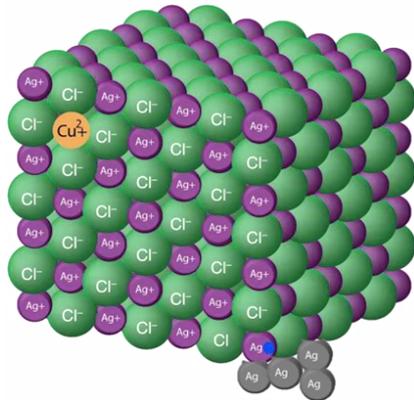
➤ Il fotocromismo offre una protezione dinamica e reversibile che si adatta alla quantità di luce solare utilizzando la componente UV come attivatore. Questo permette di integrare le 2 funzionalità:

- Filtro solare (all'esterno)
- Correzione trasparente (all'interno)



➤ Diverse tipologie a seconda del materiale costitutivo (vetro/polimero)

- Alogenuri di argento in matrice di vetro (formazione di argento metallico)
- Composti organici in matrice di polimero (fotoisomerizzazione)



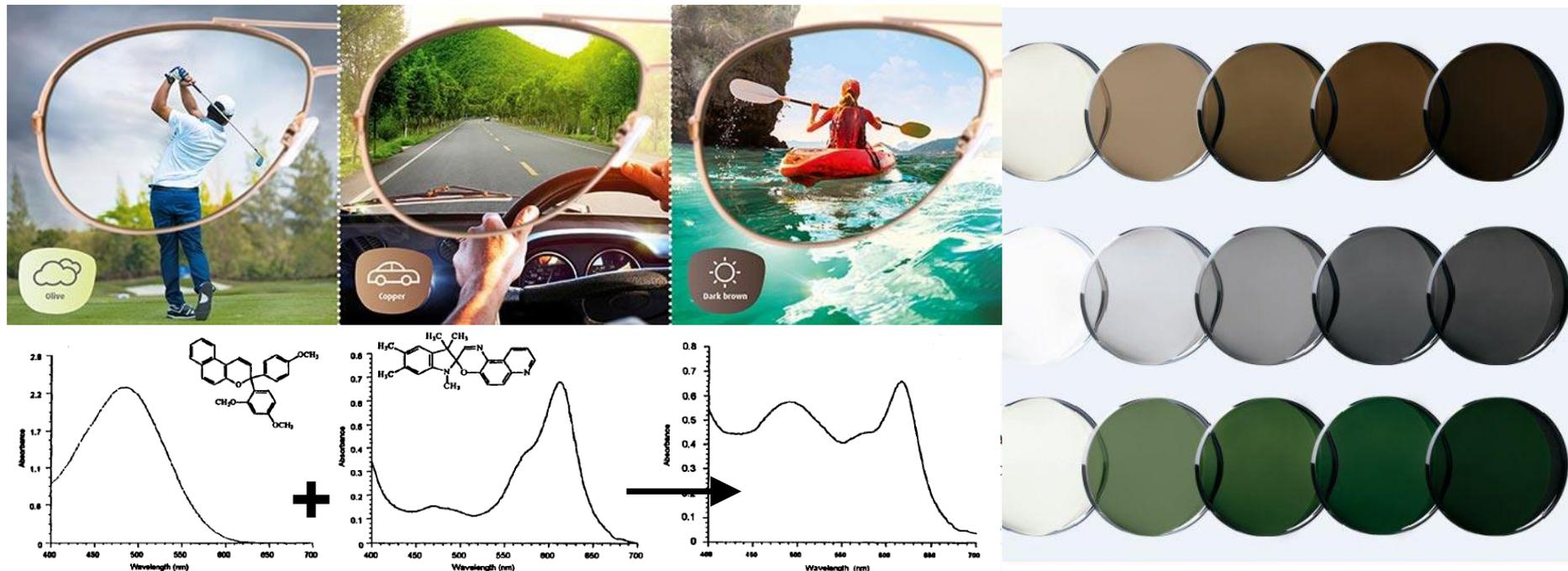
➤ PRO:

- Integrazione di più funzionalità
- Possibilità di combinazione con altre tecnologie filtranti (lenti polarizzanti, strati antiriflesso, lenti colorate)
- Attivazione rapida in seguito ad esposizione UV (< 10 s)
- Adattamento alle condizioni di luminosità

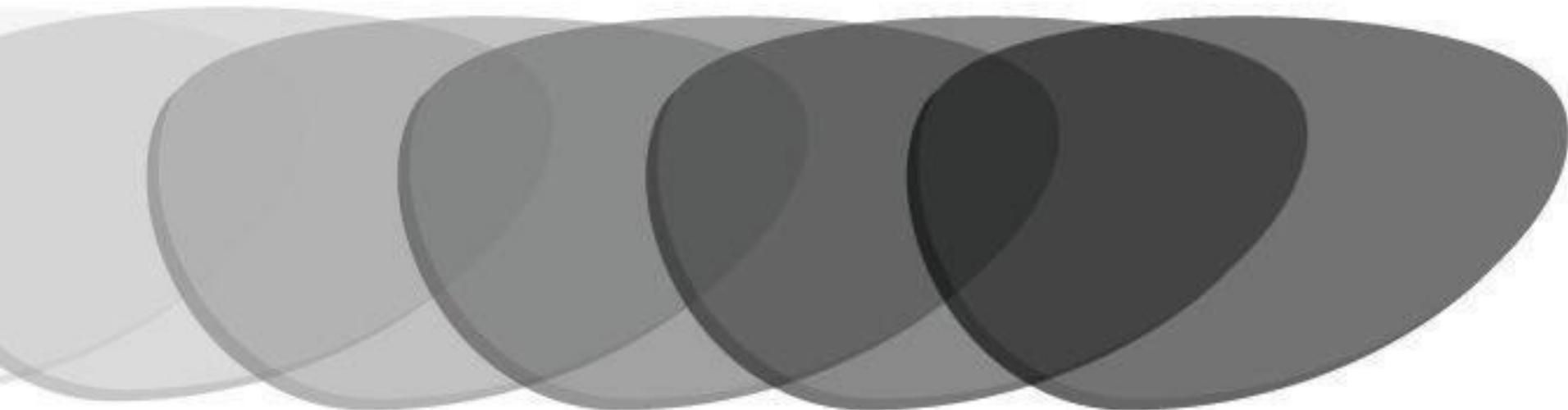
➤ CONTRO:

- Radiazione UV necessaria per l'attivazione (non funzionano alla guida)
- La velocità di deattivazione dipende dalla temperatura (inibita a basse temperature)
- Il grado di attivazione dipende dalla temperatura (inibito ad alte temperature)
- Il grado di oscuramento dipende da latitudine, altitudine, ora del giorno, momento dell'anno
- Tempo di deattivazione lungo (dell'ordine dei 5 min)
- Data di scadenza: fotodegenerazione dei cromofori dopo qualche migliaio di cicli (lenti in vetro durano di più)

- Ingegnerizzazione delle molecole organiche (ad esempio gruppi funzionali) per:
 - Aumento efficienza di attivazione: rapidità maggiore, alto oscuramento
 - Aumento della velocità di deattivazione (utile per passaggio da esterno a interno)
 - Attivazione anche luce visibile: nuove lenti fotocromatiche che funzionano in auto
 - Controllo del colore di oscuramento, ad esempio grigio, marrone, verde (miscele di più cromofori: naftopirani + indolino-spironaftossazine)



Grazie per l'attenzione!



Contatto:
gianluca.ruffato@unipd.it

UVV