

LEZIONI DI TECNOLOGIA CERAMICA

ITS NATTA Direttore Prof. I. Amboni  
Via Europa, 15 - Bergamo  
Tel. 035/798106

Dott. Giuseppe Pagliara  
g.pagliara@pagliara.it

# *24. FOTONICA e NANOFOTONICA*



**PAGLIARA PRODOTTI CHIMICI SPA**

Via Don Comotti, 7 - 24050 LURANO (BG) ITALIA

Tel. +39 035 800050 r.a. - Fax. +39 035 800288-800133

Capitale Sociale Deliberato € 2.000.000,00 Versato € 1.600.000,00

C.F. P.IVA IT 01245920168 REA Bg N.185771 Registro Imprese Bg01245920168

[www.pagliara.it](http://www.pagliara.it) - [pagliara@pagliara.it](mailto:pagliara@pagliara.it) - [pagliaraprodottichimici@registerpec.it](mailto:pagliaraprodottichimici@registerpec.it)

# MECCANICA QUANTISTICA

Quando la materia si trova alle dimensioni atomiche e subatomiche le leggi della fisica classica<sup>(1)</sup> non sono più applicabili e bisogna rivolgersi alla fisica quantistica che capovolge alcune asserzioni base:

	FISICA CLASSICA	FISICA QUANTISTICA
ELETTRONE	ELEMENTO PARTICELLARE	ELEMENTO ONDULATORIO
FOTONE DI LUCE	ELEMENTO ONDULATORIO	ELEMENTO PARTICELLARE
QUANTO DI ENERGIA	FENOMENO CONTINUO	ELEMENTO PARTICELLARE
QUANTO DI AZIONE	FENOMENO CONTINUO	ELEMENTO PARTICELLARE

<sup>(1)</sup> Per esempio le leggi della gravità, dell'inerzia, ecc.

# ECCITAZIONE ATOMICA

Nella fisica quantistica si definisce eccitazione la transizione di un elettrone dalla sua orbita fondamentale ad una superiore a seguito dell'assorbimento di energia eccitante che può essere fotonica, termica, elettrica, meccanica, sonora, chimica ecc. Il ritorno dell'elettrone al suo stato fondamentale avviene con l'emissione dell'energia assorbita generalmente in una forma diversa e per esempio sotto forma di radiazione elettromagnetica UV, IR, luminosa, come energia termica o come differenza di potenziale ecc.

Quando il quanto di energia incidente supera quella di legame dell'elettrone con il nucleo, l'elettrone abbandona l'atomo che rimane ionizzato.

# FOTONE

Il fotone è il quanto di luce della radiazione elettromagnetica luminosa che notoriamente si propaga nella materia e nel vuoto seguendo una dinamica ondulatoria discreta. In altri termini l'energia della radiazione luminosa è particellare. La minima particella è appunto il fotone che ha massa nulla ed è privo di carica elettrica. Si propaga alla velocità della luce ( $C = 300.000 \text{ Kms}^{-1}$ ) con caratteristiche ondulatorie distinte da una sua frequenza di vibrazione e una sua lunghezza d'onda che ne caratterizzano la tipologia e il colore.

Il prodotto  $f$  (frequenza) per  $\lambda$  (lunghezza d'onda) è pari alla velocità della luce  $C = \lambda f$ .

$$\text{per esempio se } f = 600 \text{ THz, } \lambda = \frac{C}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}}{600 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}} = 5 \times 10^{-7} \text{ m} = 500 \text{ nm}$$

Ogni fotone trasporta un'energia  $E = hf = h \frac{C}{\lambda}$  ove  $h$  è la costante di PLANCK ed è pari a

$6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$  e rappresenta il quanto di azione con le dimensioni di un'energia per un tempo.

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} = 4,135 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s} = 1,582 \times 10^{-37} \text{ KCal}\cdot\text{s}$$

# FOTONICA

**La fotonica studia le interazioni delle radiazioni elettromagnetiche e in particolare della luce con la materia. In altri termini la fotonica studia il modo di controllare la propagazione dei singoli fotoni nella materia ed i fenomeni ottici che ne scaturiscono. Se la materia si trova allo stato nanometrico si sviluppano fenomeni ottici straordinari utilizzabili per nuove tecnologie e per nuove apparecchiature.**

# NANOFOTONICA

La nanofotonica o nanottica studia i fenomeni di interazione della luce con le nanostrutture, nella microscopia ottica ad alta risoluzione, nell'immagazzinamento ottico dei dati, nelle comunicazioni ottiche, nell'ottica non lineare e nei sistemi di nano-posizionamento

Si adoperano film sottili nanostrutturati di vetri, cristalli, silice, vetri elettrocromici e vetri nanoporosi oltre che di ITO (90%  $\text{In}_2\text{O}_3$  + 10%  $\text{SnO}_2$ ).

Il film di ITO è trasparente, incolore e altamente conduttivo e trova ampio utilizzo in elettronica.

La deposizione dei film di ITO avviene per SOL-GEL o PVD. Si adopera per vetro di lampade ai vapori di sodio e specchi per IR fino a 1400°C (fonde a 1600°C).

Per il costo elevato l'ITO è sempre più spesso sostituito da rivestimenti di grafene e fullerene.

# ARGOMENTI TRATTATI

- EFFETTO TYNDALL
- COLORE
- FOTOCATALISI
- EFFETTO FOTOCONDUTTIVO E FOTOVOLTAICO
- LASER
- LED (EFFETTO ELETTROLUMINESCENTE)
- FIBRE OTTICHE
- LUMINESCENZA
- CRISTALLI FOTONICI

# EFFETTO TYNDALL

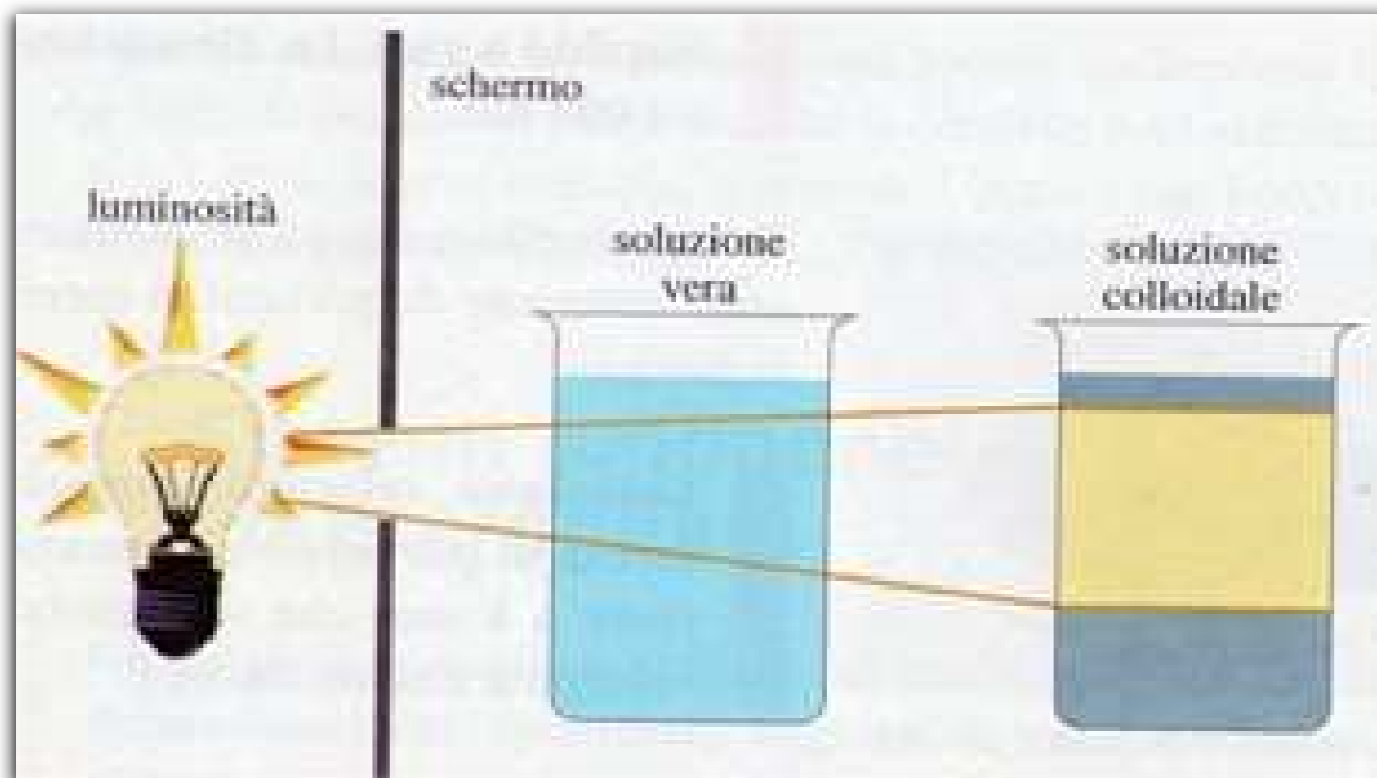
**È un fenomeno di diffusione della luce dovuto alla presenza di particelle sospese nel mezzo attraversato, che rifrangono la luce e la diffondono in tutte le direzioni, come avviene per la nebbia.**

**Il fenomeno TYNDALL si ha quando le particelle hanno dimensioni paragonabili alle lunghezze d'onda della luce (400-700 nm). Il fenomeno di diffusione luminosa è proporzionale alla concentrazione delle particelle sospese ed al cubo delle loro dimensioni. È stato quindi possibile elaborare metodi di determinazione delle dimensioni delle particelle dalla luminosità dell'effetto TYNDALL.**



# EFFETTO TYNDALL

	$\emptyset$ PARTICELLE	TYNDALL
SOLUZIONI	< 10 nm	NO
COLLOIDI	10 nm ÷ 1 $\mu$ m	SI
SOSPENSIONI	> 1 $\mu$ m	NO



## EFFETTO TYNDALL

# SEDIMENTAZIONE IN ACQUA

Dimensione delle particelle	Tipo	Velocità di sedimentazione (m/s)	Tempo di sedimentazione per la caduta di 1 m
1 cm	Ghiaia	1	1 secondo
1 mm	Sabbia grossa	$1 \cdot 10^{-1}$	10 secondi
0,5 mm		$5,3 \cdot 10^{-2}$	19 secondi
40 $\mu\text{m}$		$2,1 \cdot 10^{-3}$	8 minuti
10 $\mu\text{m}$	Sabbia fine	$1,5 \cdot 10^{-4}$	2 ore
1 $\mu\text{m}$	Batteri	$1,5 \cdot 10^{-6}$	8 giorni
0,1 $\mu\text{m}$	Argilla	$1,5 \cdot 10^{-8}$	2 anni
0,01 $\mu\text{m}$	Sostanze colloidali	$1,5 \cdot 10^{-10}$	200 anni

# LEGGE DI STOCKES

## per particelle sferiche

$$V = \frac{2 (d_p - d_f)}{9 \mu} g r^2$$

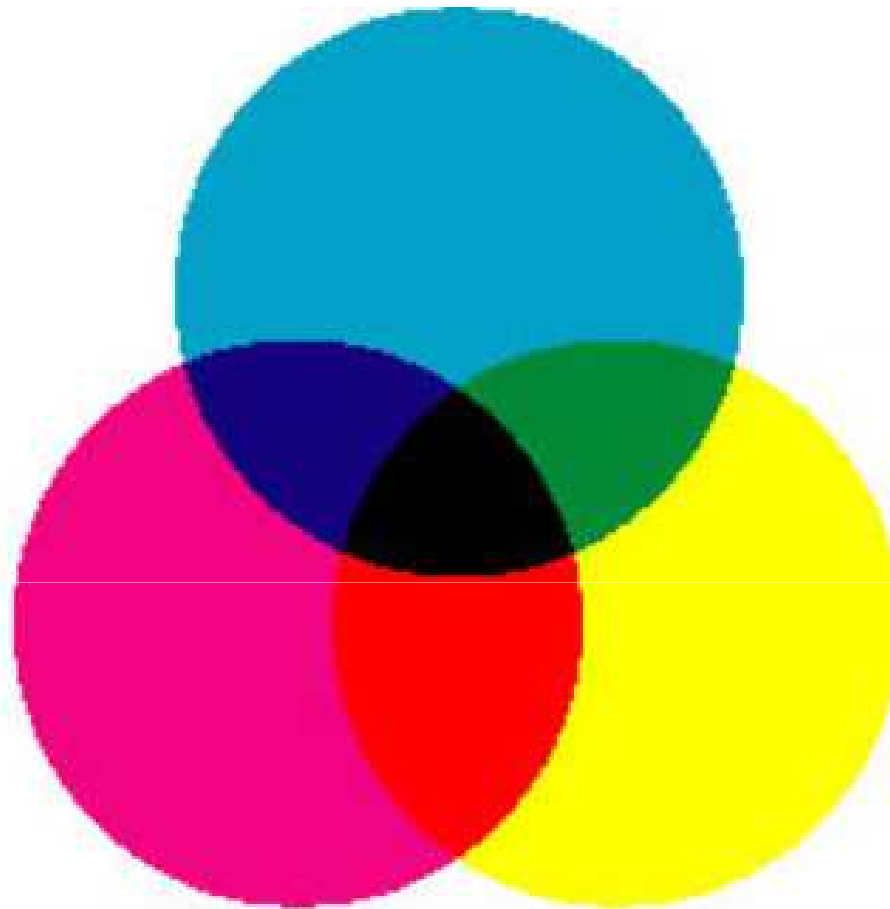
- V** = velocità di sedimentazione  
**d<sub>p</sub>** = densità delle particelle  
**d<sub>f</sub>** = densità del fluido (per l'acqua d<sub>f</sub> = 1)  
**μ** = viscosità del fluido  
**g** = accelerazione di gravità  
**r** = raggio della sfera

# COLORI

# IL COLORE

**Concetto prevalente della fotonica è che il colore è una caratteristica della radiazione luminosa e non della materia come invece siamo portati a considerare per i pigmenti e i coloranti. La luce è bianca in quanto somma di tutte le frequenze dello spettro visibile. A ciascuna frequenza è associato un determinato colore. Ogni pigmento è colorato perché assorbe tutte le radiazioni tranne quella corrispondente alla frequenza riflessa che viene percepita come colore del pigmento. Il colore bianco indica la riflessione di tutte le frequenze visibili e il nero invece l'assorbimento totale.**

**Si considerano colori primari il ciano (blu-verde) il magenta (rosso bluastro) e il giallo che insieme al nero costituiscono il sistema di stampa a quattro colori detto quadricromia.**



## COLORI DI QUADRICROMIA

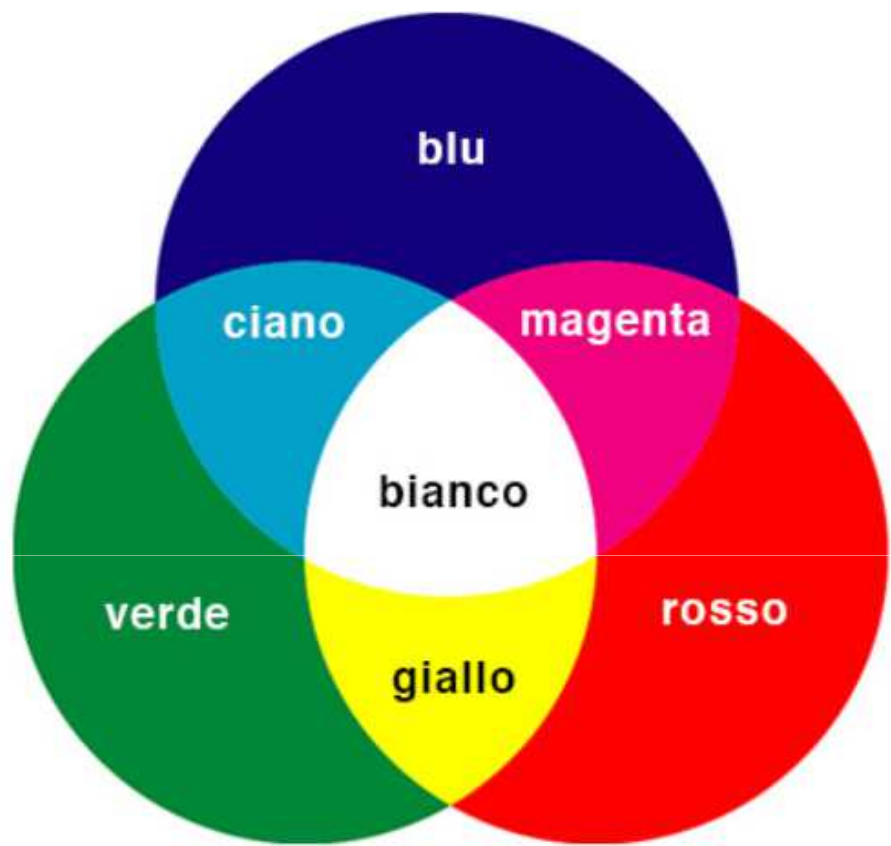
Y = Giallo

C = Ciano

M = Magenta



Sono i colori primari sottrattivi



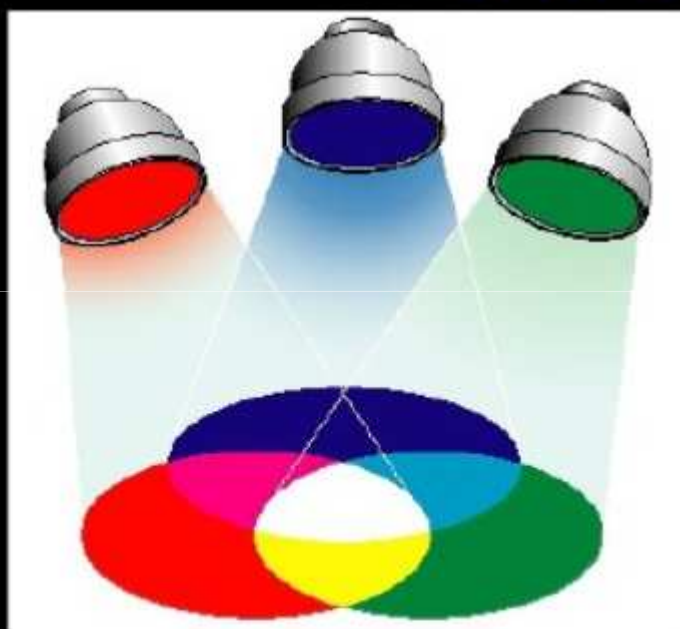
**sintesi additiva**



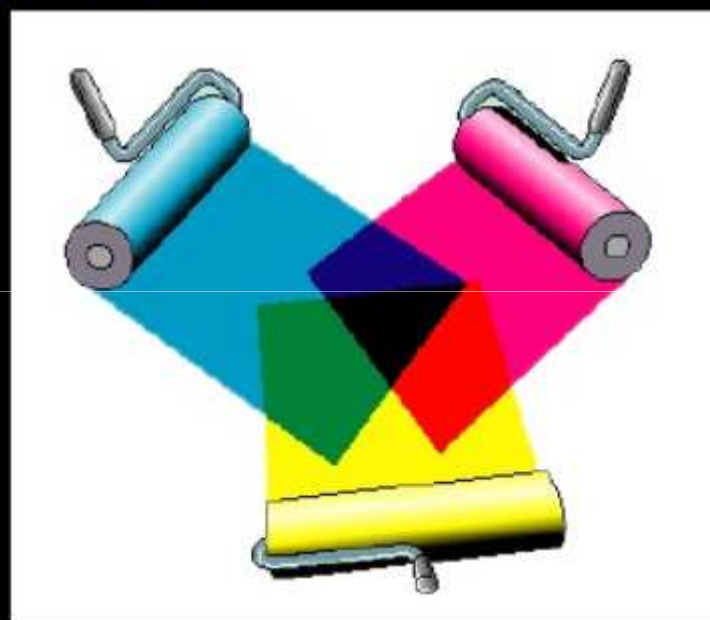
**sintesi sottrattiva**



# Le sintesi del colore

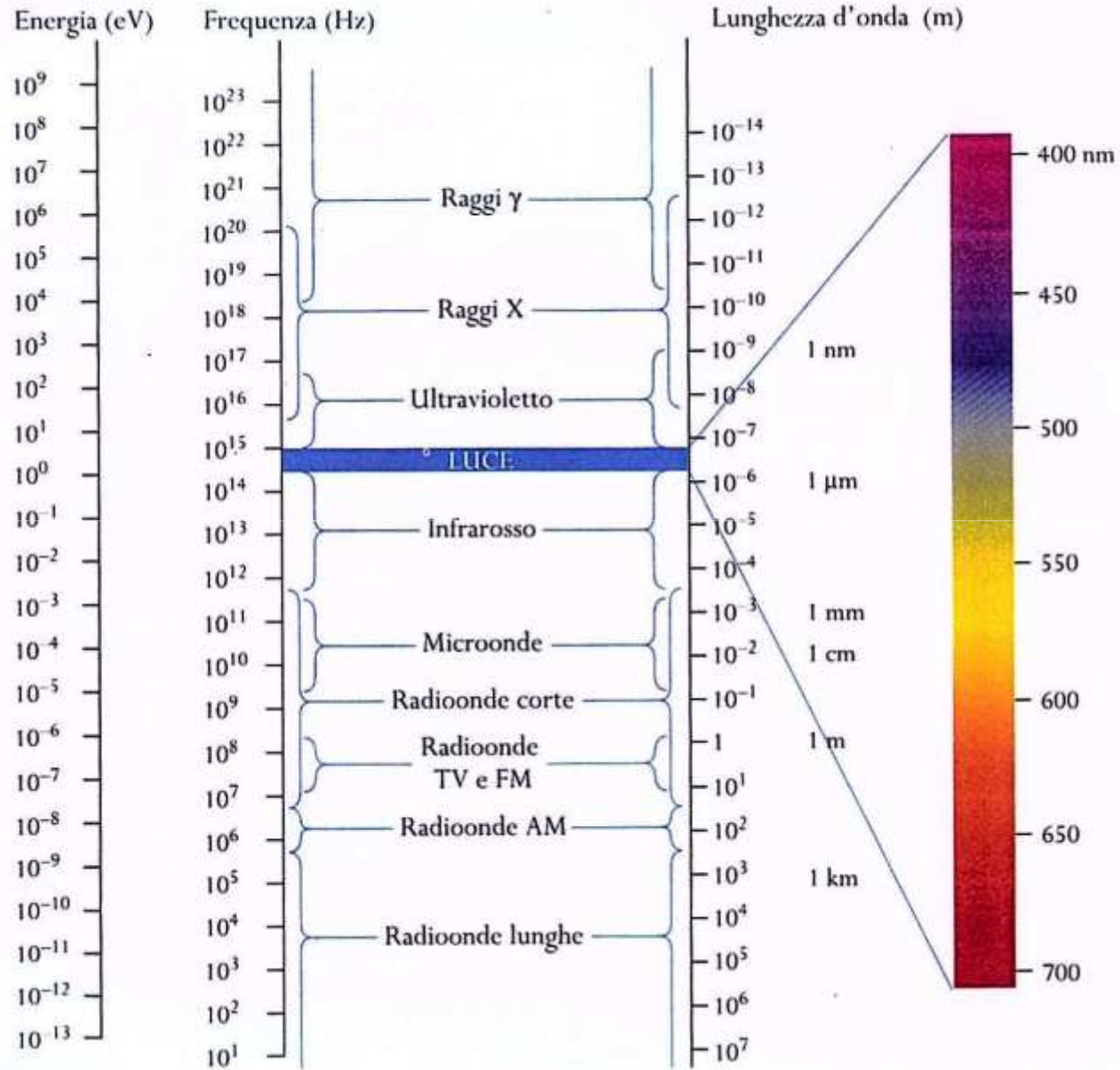


Sintesi Additiva

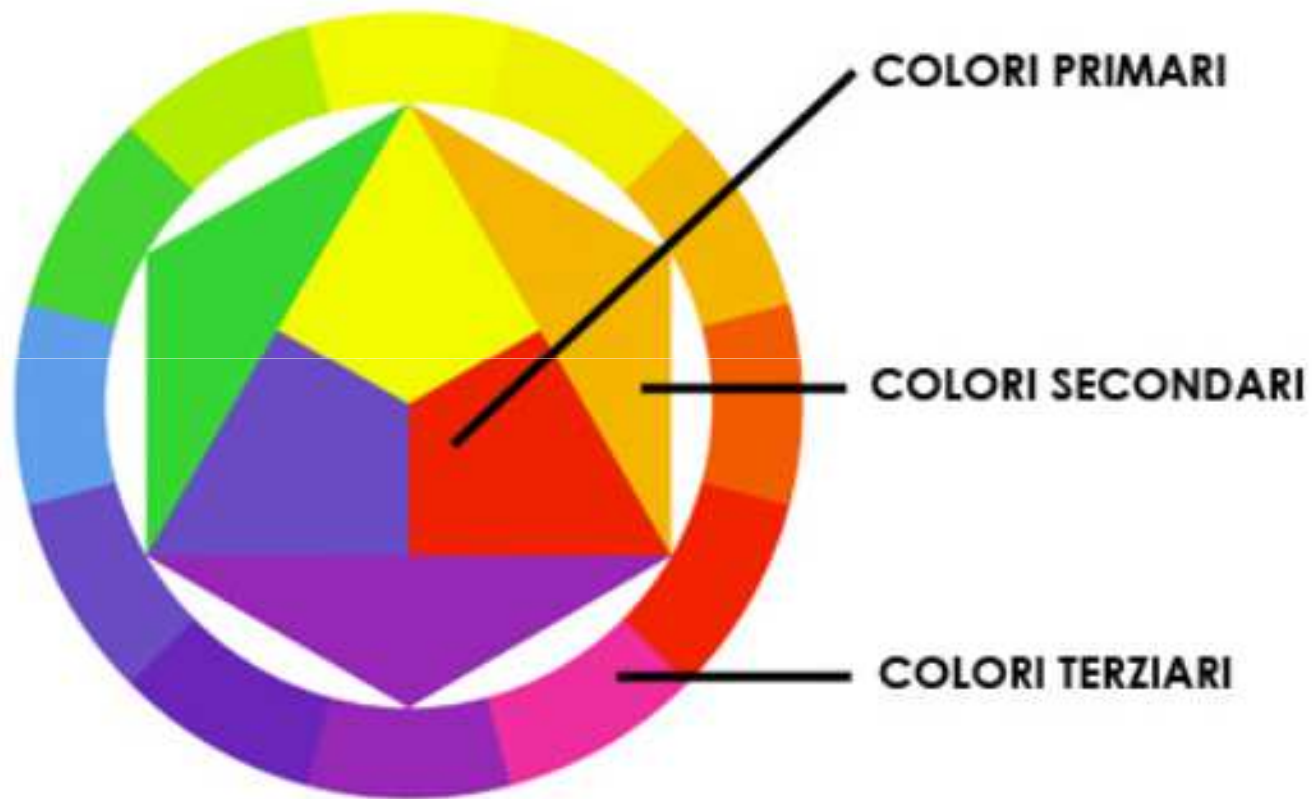


Sintesi Sottrattiva

# LO SPETTRO ELETTRROMAGNETICO



# CERCHIO DI ITTEN



# COLORI COMPLEMENTARI

Due colori si dicono complementari quando emessi insieme (sintesi additiva) ricompongono il bianco. Nella ruota dei colori si trovano in posizione opposta. È quindi possibile utilizzare i coloranti azzurranti per diminuire l'eventuale grado di giallo del bianco dell'industria tessile, cartacea e dei p.v.



*La ruota dei colori complementari: in base al colore assorbito è possibile prevedere quello riflesso e viceversa*

# COLORE DELLE NANOPARTICELLE

I pigmenti bianchi, allo stato nanometrico (1–100 nm) sono trasparenti alla luce perché vengono scavalcati dalla radiazione luminosa che avendo lunghezza d'onda molto maggiore (400-700 nm) non può subire alcun fenomeno di riflessione o rifrazione.

I pigmenti colorati allo stato nanometrico aggiungono al colore originario altri colori derivanti da interferenze connesse con la granulometria. Così l'oro che è giallo, in fase colloidale a dimensioni nanometriche assume diverse colorazioni rosso-violacee in funzione della granulometria.

In particolare all'aumentare delle dimensioni delle nanoparticelle, la lunghezza d'onda della radiazione assorbita aumenta, cioè si sposta verso il rosso. Quella di emissione (colore percepito) verso il blu.

LA COLORAZIONE DELL'ORO COLLOIDALE, A SECONDA DELLE  
DIMENSIONI DELLE PARTICELLE DELL'ORO – by DMS nano tecnologia.



3-4      12      9-11      7-8      5-6      13-15      16-20      22-26      55-65      90      150 [nm]



LA DIMENSIONE DELLE PARTICELLE È  
ILLUSTRATA DAI CERCHIETTI GIALLI.

ORO COLLOIDALE OTTENUTO PER MEZZO DI NANO TECNOLOGIA PUÒ ESSERE DI COLORI DIVERSI,  
CIÒ È DOVUTO DALLE DIVERSE FORME DELLE PARTICELLE (ROTONDO, CILINDRICI, SCHEGGE, ECC.).

# ORO COLLOIDALE IN VETRERIA E CERAMICA

L'oro colloidale viene utilizzato per colorare il vetro con un bellissimo rosso<sup>(I)</sup>. Ciò avviene già dall'epoca romana come dimostra la famosa Coppa di Licurgo (Re dei Traci) che risale al 400 d.C. prodotta a Roma e conservata al British Museum di Londra.

Così pure sin dal 1650 in Cina si colora in rosa la porcellana con l'aggiunta di cloruro di oro<sup>(II)</sup> (AuCl<sub>3</sub>) addizionato a cloruro di stagno (SnCl<sub>2</sub>) che agendo da riducente porta alla formazione di oro metallico allo stato di nanoparticelle colloidali (Ciclo della Famiglia Rosa)



<sup>(I)</sup> Porpora di Cassio

<sup>(II)</sup> Da acqua regia su oro

# COPPA DI LICURGO (400 d.C.)

## Illuminata frontalmente o posteriormente







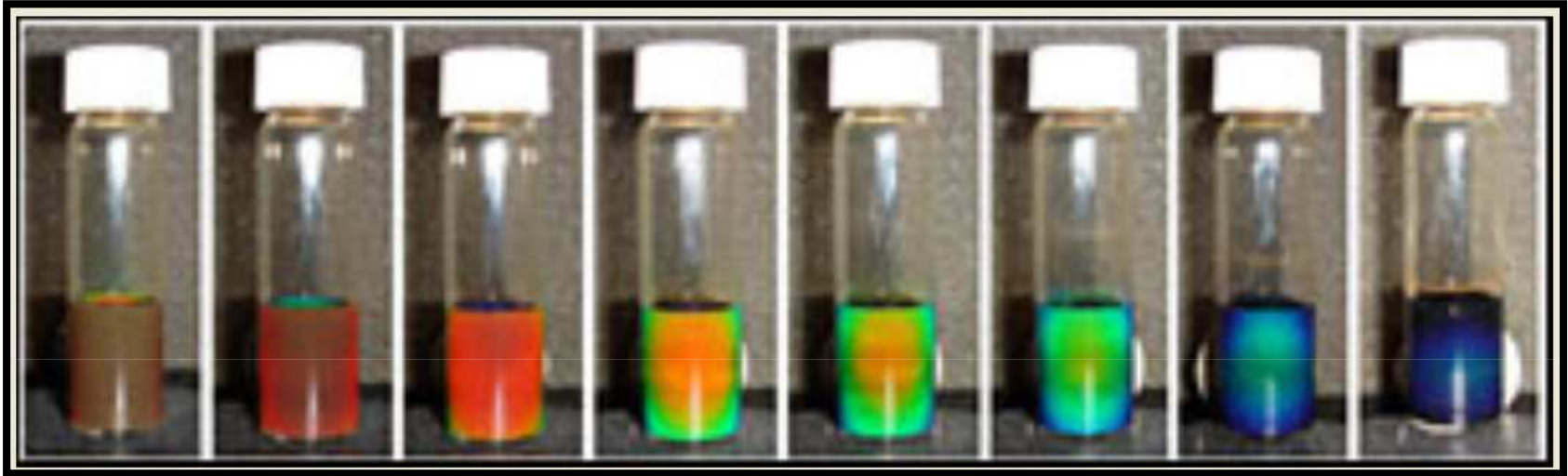
**Cina, dinastia QING. Piatto Era Yongzheng (1723-35)  
Porcellana dipinta – ciclo della Famiglia Rosa  
Conservata nel museo villa Floridiana - Napoli**

# COLORE SOTTO CAMPO MAGNETICO

**Altri fattori possono ancora influenzare il colore delle nanoparticelle. Le particelle di ossido di ferro  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  bruno sono paramagnetiche, ossia si magnetizzano in un campo magnetico non in modo permanente.**

**Le rispettive nanoparticelle in sospensione acquosa mostrano colori differenti in funzione dell'intensità del campo magnetico a cui sono sottoposte.**

**Questo fenomeno trova impiego in informatica e nelle telecomunicazioni su fibra ottica.**



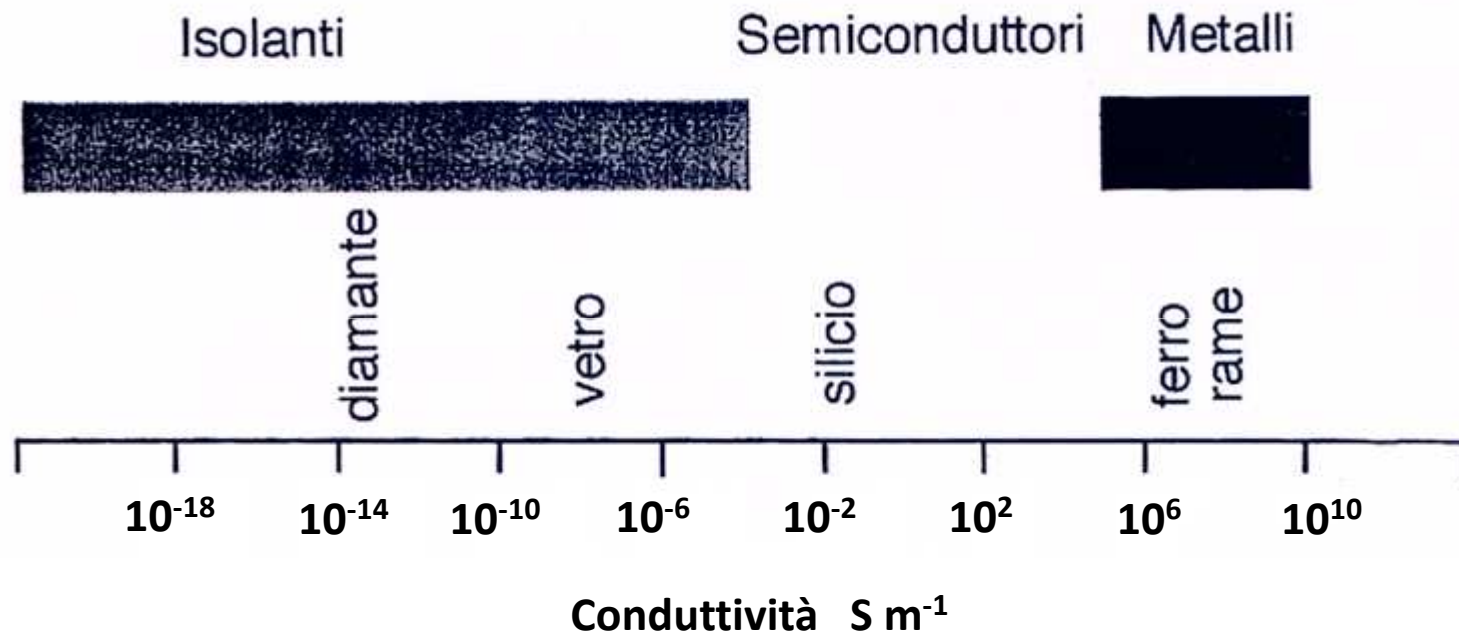
**Sospensioni di acqua e ossido di ferro a colorazioni differenti; l'intensità del campo magnetico cresce da sinistra verso destra**

# FOTOCATALISI

# FOTOCATALISI E FOTOCHIMICA

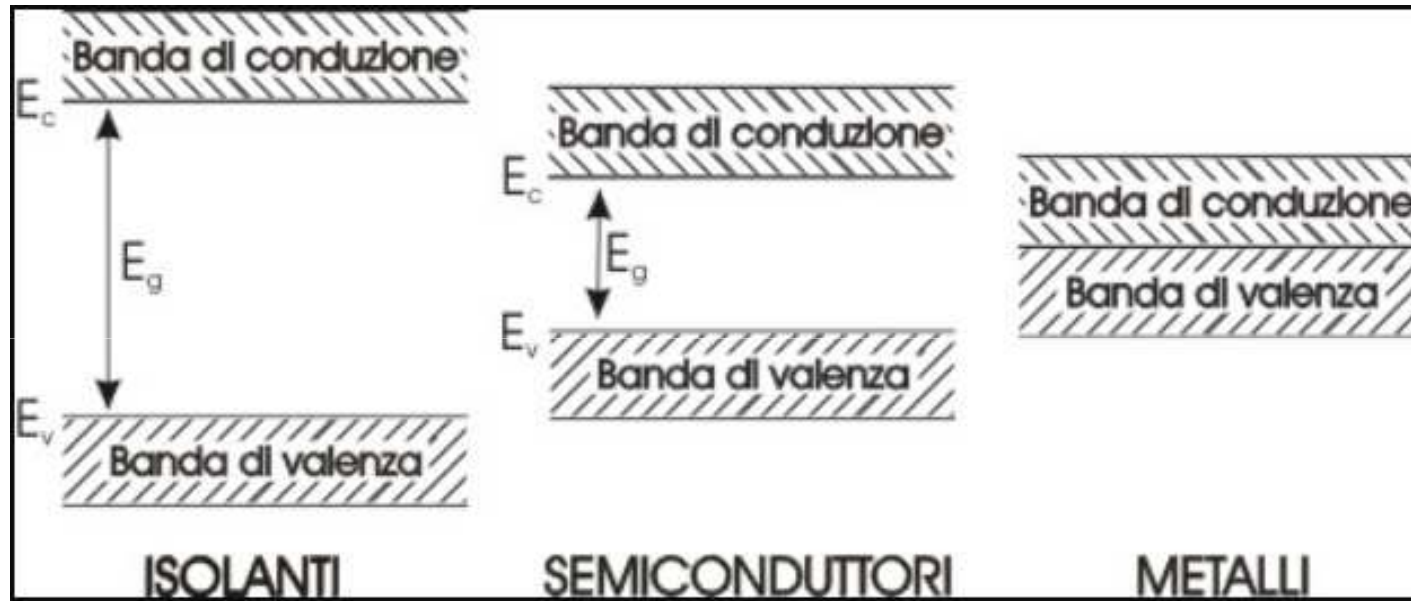
La fotochimica si occupa delle reazioni chimiche indotte dall'energia fotonica che spesso vengono promosse o condotte con l'ausilio di fotocatalizzatori, che esplicano la loro azione sotto radiazioni di opportuna lunghezza d'onda. Il più efficace è il  $\text{TiO}_2$ -Anatase con attività crescente con il diminuire della granulometria fino alle dimensioni nanometriche. Una certa attività fotocatalitica mostrano anche  $\text{ZnO}$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{CdS}$ ,  $\text{ZnS}$ , oltre al  $\text{TiO}_2$  – Rubino.

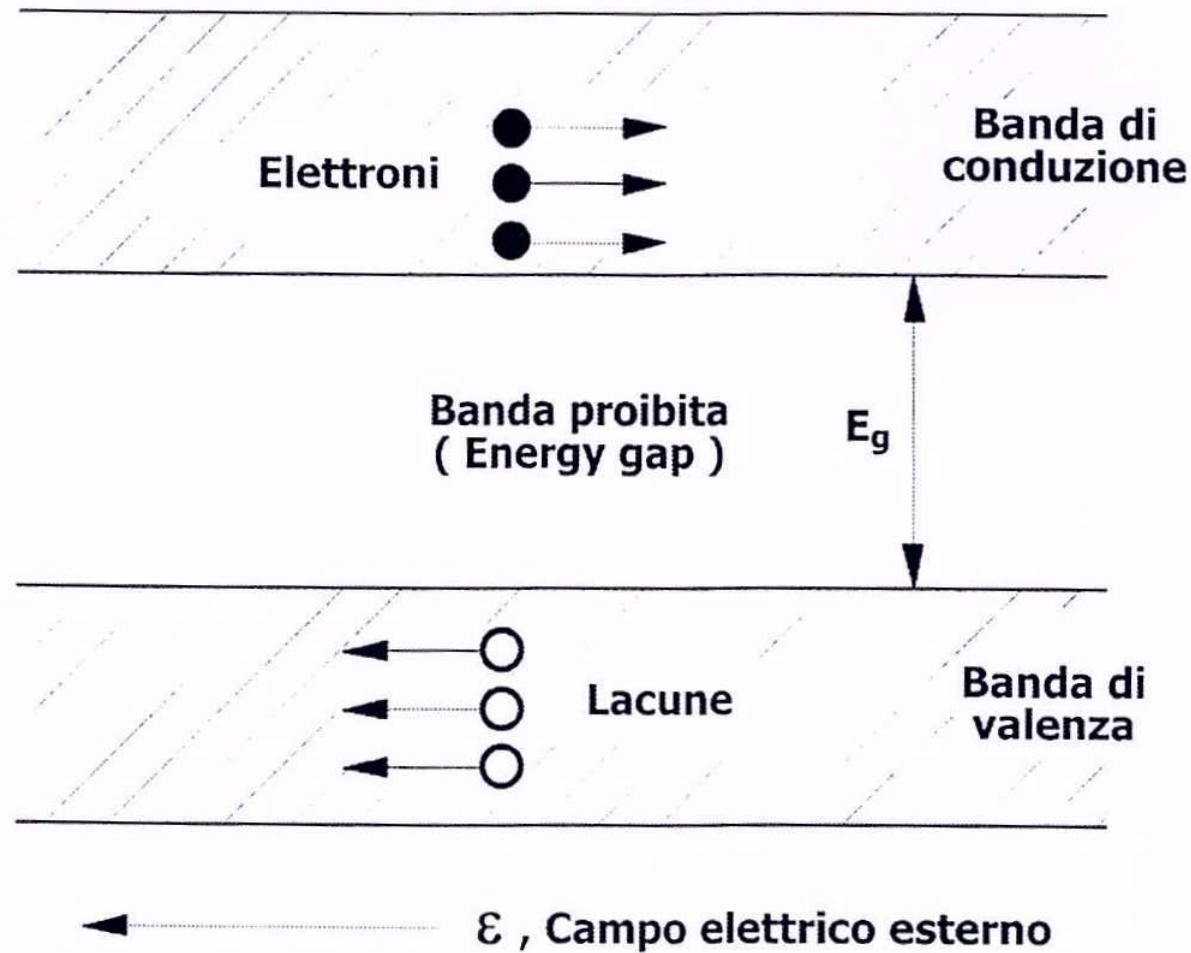
# CONDUTTIVITÀ



S = Siemens

# TEORIA DELLE BANDE

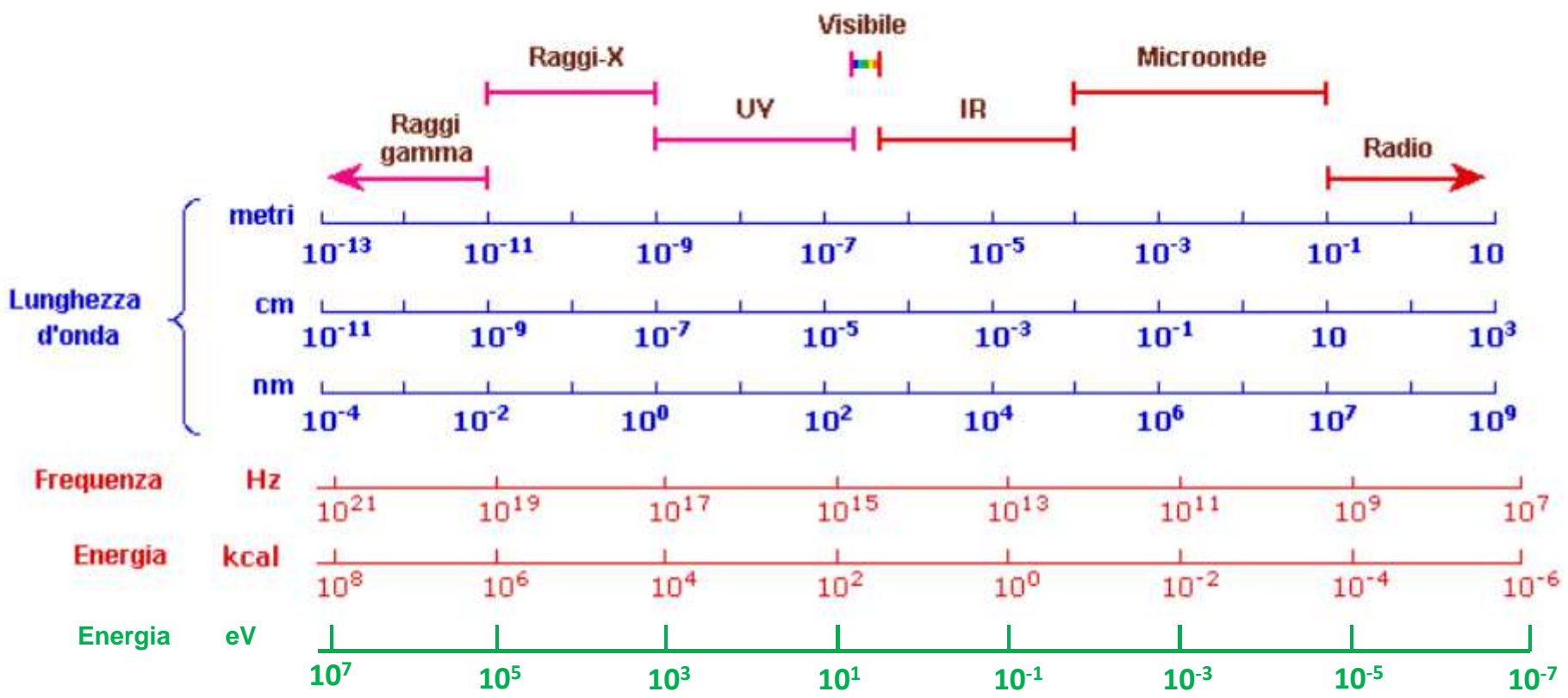




– Rappresentazione schematica della struttura a bande di energia



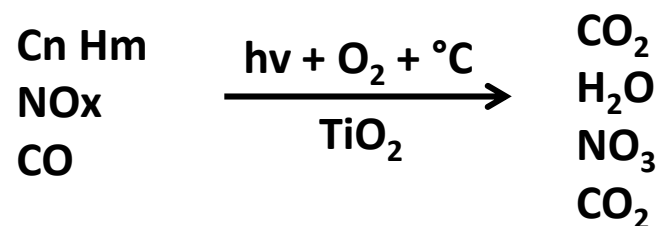
# LO SPETTRO ELETTRMAGNETICO



# EFFETTO FOTOCATALITICO DEL TiO<sub>2</sub> ANATASE

Il TiO<sub>2</sub> è un semiconduttore che quando l'energia fotonica è sufficientemente elevata, può trasferire degli elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione superando il gap della banda proibita e lasciando una lacuna nella banda di valenza.

Gli elettroni e le lacune così generate possono reagire con molecole sia accettori che donatori di elettroni. Il TiO<sub>2</sub> possiede una band gap (= Energy gap) intorno a 3,2 eV, che corrisponde alla lunghezza d'onda di 388 nm. Ciò significa che solo per le lunghezze d'onda inferiori a maggiore contenuto energetico, si riscontra l'effetto fotocatalitico. In questo caso l'energia viene restituita come radiazione gamma che è energeticamente 10<sup>3</sup>-10<sup>4</sup> volte più elevata, tale cioè da attivare la degradazione ossidativa delle sostanze organiche inquinanti e non: coloranti, odoriferi, batteri, virus ecc. secondo la reazione:



$$1 \text{ eV} = 3,829 \cdot 10^{-23} \text{ kcal} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

# FREQUENZA E LUNGHEZZA D'ONDA DI SOGLIA

Un fotone riesce ad eccitare un elettrone della banda di valenza, se ha una energia superiore alla "Energy gap". Poiché l'energia di una radiazione cresce con la frequenza, dal valore dell'energy gap si può calcolare la frequenza minima  $f_0$ , detta di soglia, necessaria per avere l'estrazione di un elettrone e di conseguenza anche la lunghezza d'onda  $\lambda_0$  massima. Facciamo l'esempio per il  $\text{TiO}_2$  che ha  $E_0 = 3,2$  e V.

$$\text{allora } f_0 = \frac{E_0}{h} = \frac{3,2 \text{ eV}}{4,135 \cdot 10^{-15} \text{ eV.s}} = 7,73 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{essendo } \lambda_0 = \frac{c}{f_0} \text{ si ha } \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{7,73 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 0,388 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 388 \text{ nm (settore UV)}$$

SEMICONDUTTORE	ENERGY GAP $E_0$	FREQUENZA DI SOGLIA $f_0$	LUNGHEZZA D'ONDA DI SOGLIA $\lambda_0$	SETTORE
GERMANIO – Ge	0,67 eV	$1,62 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$	1851 nm	IR
SILICIO – Si	1,14 eV	$2,75 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$	1090 nm	IR
FOSFURO DI INDIO - InP	1,25 eV	$3,02 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$	993 nm	IR
ARSENIURO DI GALLIO – GaAs	1,40 eV	$3,38 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$	887 nm	IR
TELLURIO DI CADMIO – CdTe	1,45 eV	$3,50 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$	857 nm	IR
FOSFURO DI INDIO – InP	2,25 eV	$5,44 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$	551 nm	GIALLO
SOLFURO DI CADMIO – CdS	2,40 eV	$5,80 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$	517 nm	VERDE
BIOSSIDO DI TITANIO – TiO <sub>2</sub>	3,20 eV	$7,73 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$	388 nm	UV

**ENERGY GAP, FREQUENZA DI SOGLIA, LUNGHEZZA D'ONDA DI SOGLIA E SETTORE  
PER DIVERSI SEMICONDUTTORI**

***Maggiormente utilizzati per l'effetto fotovoltaico sono quelli a più basso valore  $E_0$  e cioè GERMANIO, SILICIO e ARSENIURO di GALLIO.***

# ATTIVITÀ FOTOCATALITICA DEL $\text{TiO}_2$ ANATASE

Il  $\text{TiO}_2$  esiste in tre diverse strutture cristalline: rutilo, anatase (tetragonali) e la meno diffusa brookite (ortorombica). L'anatase è la forma più attiva come fotocatalisi che diventa massima alla dimensioni nanometriche sviluppando alla luce solare o di lampade UV le seguenti proprietà:

- Autopulente di superfici inorganiche in ambito domestico e professionale.
- Antibatterica in ambito medico, ospedaliero, ambulatori, laboratori farmaceutici.
- Igienizzante di aule scolastiche, cinema, teatri, sale da ballo.
- Antinquinamento per facciate di abitazioni, strade cittadine, gallerie autostradali, parcheggi coperti, specialmente se sotterranei.

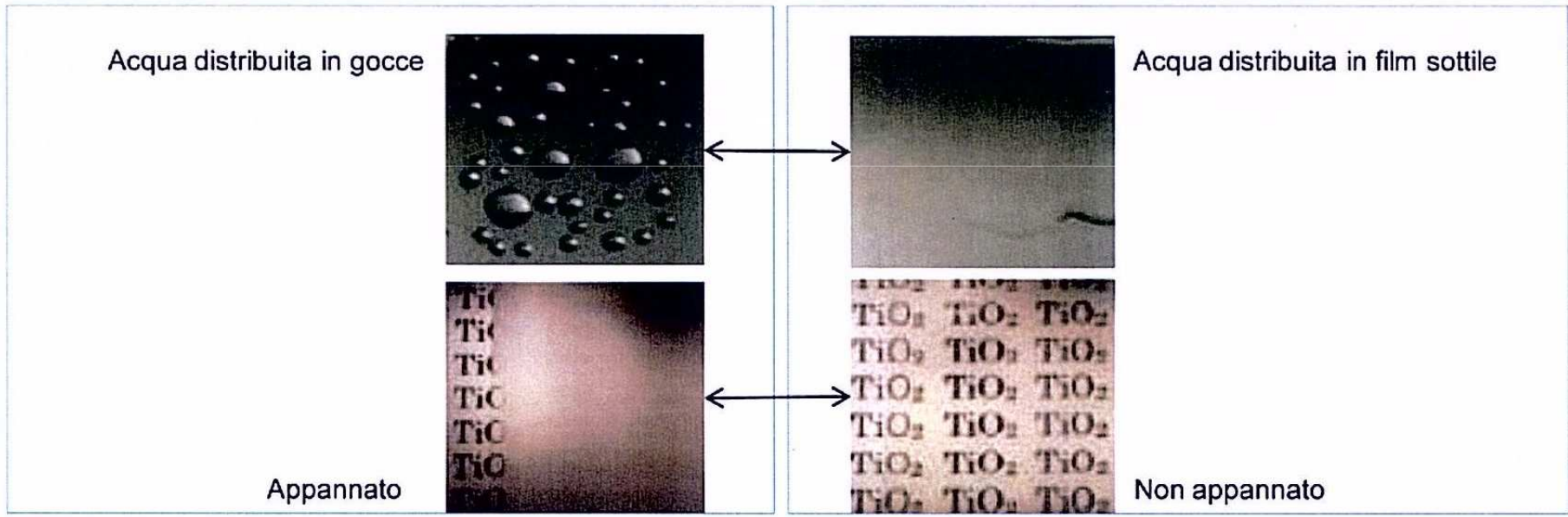
# SUPER IDROFILICITÀ DEL $\text{TiO}_2$

**Abbiamo visto come un fotone UV riesca ad estrarre un elettrone dalla banda di valenza del  $\text{TiO}_2$  trasferendolo alla banda di conduzione. Quindi nella banda di valenza rimane una lacuna che può essere occupata dall'elettrone dell'idrogeno dell'acqua. Si forma così un legame a idrogeno che porta alla formazione di gruppi OH superficiali chimicamente adsorbiti. Tutta la superficie del  $\text{TiO}_2$  viene quindi rivestita da molecole di acqua diventando fortemente idrofila sotto la luce e idrofoba al buio quando questo meccanismo non può avvenire per la mancanza di fotoni.**

**Alla luce la superficie contenente  $\text{TiO}_2$  per la sua idrofilia è antiappannante e autopulente.**

FILM SUPERIDROFOBICI:

FILM SUPERIDROFILICI:



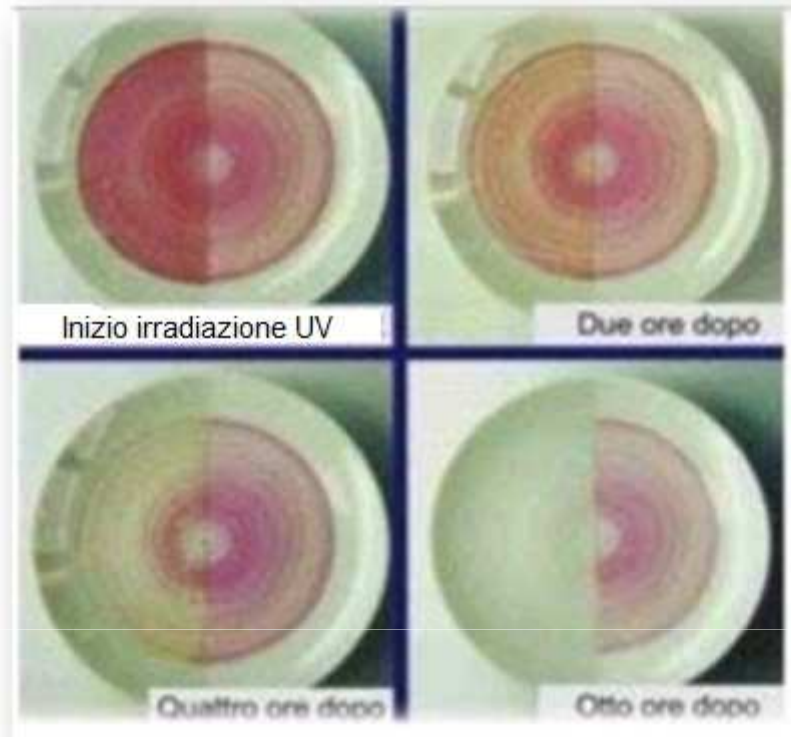
# EFFETTI FOTOCATALITICI



## Applicazione del $\text{TiO}_2$ sul marmo

La figura mostra l'azione del fotocatalizzatore liquido posto sul marmo in presenza di coloranti. Dopo un'ora di esposizione al sole sia l'inchiostro rosso che il bludimetilene sono stati rimossi quasi completamente dalla superficie del marmo stesso.





### Azione del $\text{TiO}_2$ sui coloranti

In figura è mostrato un piatto per metà rivestito di materiale fotocatalitico e per metà no, sul quale è stato applicato del colorante. Si nota che dopo otto ore di esposizione alla luce solare il colorante è stato completamente rimosso dalla parte rivestita.



**Palazzo semirivestito con  $\text{TiO}_2$  fotocatalitico autopulente**

# FIORI FOTOCATALITICI



Fiori con  $\text{TiO}_2$

Fiori fotocatalitici preparati con strati fotocatalitici o rivestimenti liquidi applicati su fiori artificiali sono impiegati per eliminare odori sgradevoli nell'aria e rendere innocue le sorgenti di inquinamento nella stanza.

# DOVE E PERCHÈ

## *IN CASA*



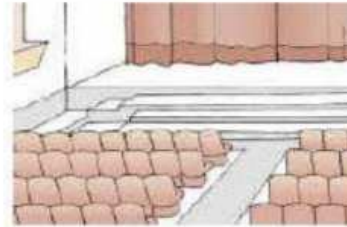
Niente più pareti annerite sopra i caloriferi, o pareti sporche dai grassi di cottura, o monossidi di carbonio derivanti dalla combustione dei fornelli.

## *SALE OPERATORIE E OSPEDALI*



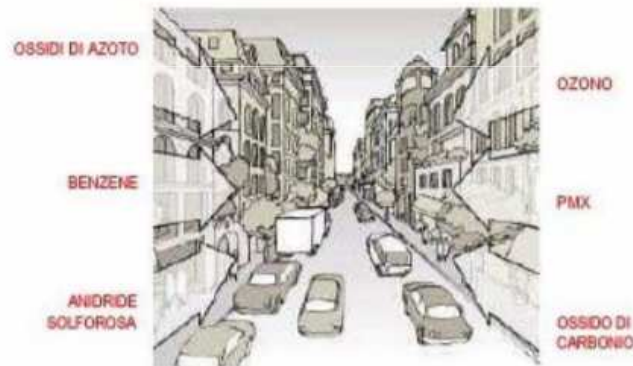
Per le loro proprietà antibatteriche i materiali fotocatalitici sono in grado di ridurre germi, microbi, batteri nelle sale operatorie o negli ospedali, e in qualunque sala a stretto controllo batterico.

## SCUOLE E LOCALI PUBBLICI



Un'aria più pulita sia in classe sia nei parchi gioco o dove si raccoglie molta gente, per l'aumento della possibilità di circolazione di germi e microbi.

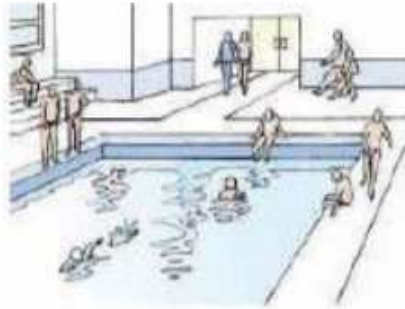
## IN CITTA'



Un enorme contributo per la città dove le sostanze inquinanti raggiungono livelli insostenibili e dove l'unica parziale soluzione risulta essere il blocco del traffico.

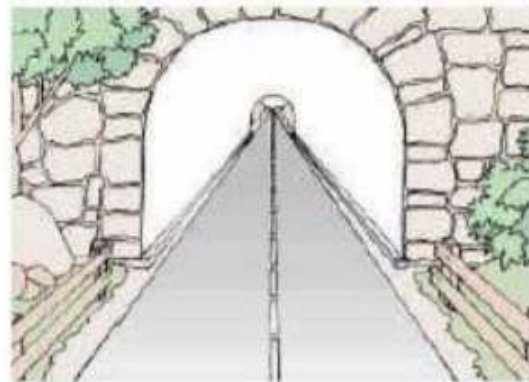
Per palazzi e monumenti che sono protetti dall'attacco dello smog.

## *PISCINE E CAMPI SPORTIVI*



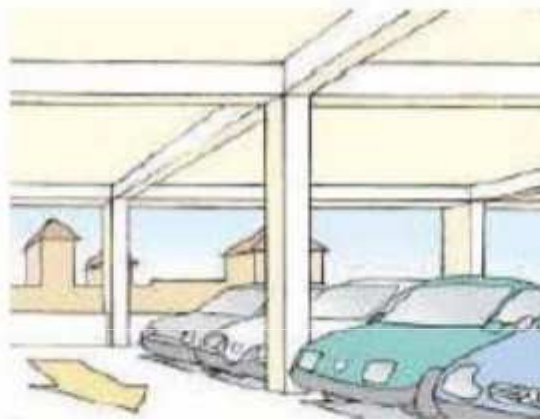
Un'aria più salubre dove si pratica sport, superfici pulite e asettiche. Pavimenti sanificati contro sporco e funghi.

## *GALLERIE E INFRASTRUTTURE*



I materiali fotocatalitici sono decisivi per la sicurezza stradale nelle gallerie, che subiscono gli attacchi delle sostanze inquinanti, diventando scure e pericolose per la circolazione.

## *PARCHEGGI E AREE DI SOSTA*



Nei luoghi di altissima concentrazione di emissioni di inquinanti da auto, come i parcheggi sotterranei e nelle aree in cui si accumulano colonne d'auto per l'intenso traffico.

# **EFFETTO FOTOCONDUTTIVO E FOTOVOLTAICO**



# EFFETTO FOTOCONDUTTIVO

I semiconduttori con lunghezza d'onda di soglia nel visibile sono fotoconduttori. Al buio non conducono mentre se vengono esposti alla luce diventano conduttivi perché gli elettroni si eccitano e passano nella banda di conduzione. Si comportano in questo modo Se,  $As_2Se_3$  ma anche Silicio, Germanio, Arseniuro di gallio, solfuro di piombo.

L'effetto fotoconduttivo viene utilizzato nei sensori crepuscolari, e fotocellule utilizzate in molte discipline sportive.

# EFFETTO FOTOVOLTAICO

**Esponendo dei diodi da semiconduttore drogato n/p alla luce, la conseguente eccitazione atomica determina un accumulo di elettroni nella zona drogata n (= negativa) ed un accumulo di lacuna nella zona drogata p (= positiva). Ne nasce una differenza di potenziale che realizza una corrente elettrica attraverso la giunzione n/p. I pannelli fotovoltaici utilizzano le celle fotovoltaiche così descritte per la produzione di energia elettrica generata dalla energia fotonica.**

**Come semiconduttore si utilizzano principalmente il silicio drogato n con fosforo e drogato p con boro.**

**Se quantità sufficienti di elementi droganti sono di un atomo ogni  $10^9$  atomi di silicio quindi estremamente basse.**

# LASER

# LASER

## (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

**Il LASER è un fascio di luce monocromatica coerente (radiazioni in accordo di fase) e collimata (radiazioni parallele) ottenuto con un gioco di specchi che orientano i fotoni emessi da un materiale attivo (gas, liquido o solido), super eccitati da un pompaggio energetico ottico o elettrico.**

**L'elevato valore di eccitazione dei fotoni determina un alto grado di radianza del raggio LASER, ossia dell'energia per unità di frequenza. Ciò ha permesso importanti applicazioni tecnologiche in molti campi industriali, medicali, estetici, fisioterapici, militari e delle comunicazioni ottiche.**

# MECCANISMI PIÙ UTILIZZATI PER POMPARE IL MATERIALE ATTIVO

- Pompaggio mediante scarica elettrica (pompaggio elettrico)
- Pompaggio mediante lampade flash o da altro laser (pompaggio ottico)
- Pompaggio a diodi (pompaggio ottico)

POMPARE = ECCITARE

**Il pompaggio descritto eccita gli atomi del materiale attivo, ciò significa il passaggio degli elettroni nella banda di conduzione. Il ritorno degli elettroni nella banda di valenza produce l'emissione della radiazione a una frequenza caratteristica del materiale in esame ( Fig. 1 della pagina seguente).**

**Se gli atomi sono numerosi si ha l'emissione stimolata concatenata come mostrato in Fig. 2. La luce emessa viene così enormemente amplificata ed avviene nella stessa direzione della luce stimolante ed è con essa coerente.**

**Rimbalzando tra gli specchi il valore energetico cresce finché la radiazione esce attraverso lo specchio semiriflettente (Fig. 3).**

**Nella Fig. 4 è rappresentato lo schema generale di un laser.**

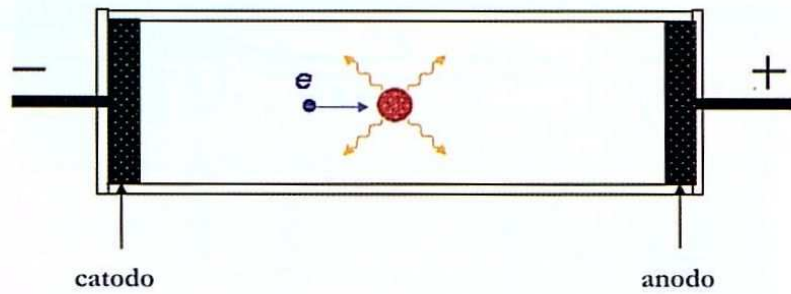


Figura 1 - Principio di emissione di una lampada a gas. La luce emessa è dovuta alla emissione spontanea degli atomi.

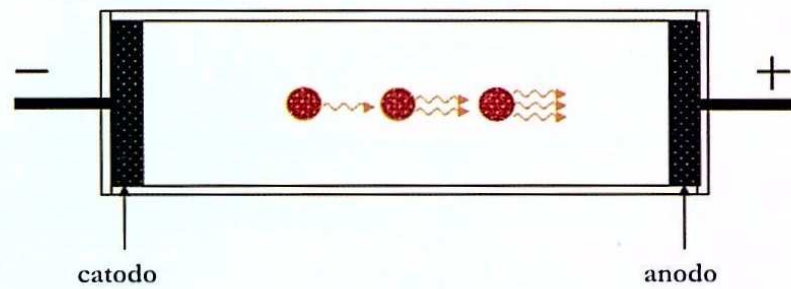


Figura 2 - Principio dell'emissione stimolata.

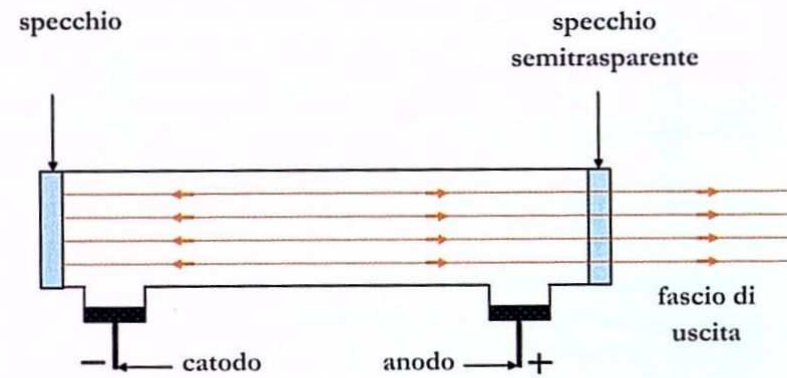


Figura 3 - Principio di un laser.

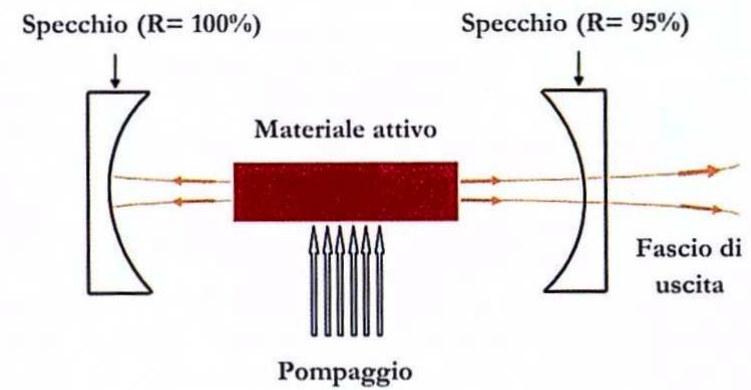


Figura 4 - Schema generale di un laser.

# CLASSIFICAZIONE DEI LASER

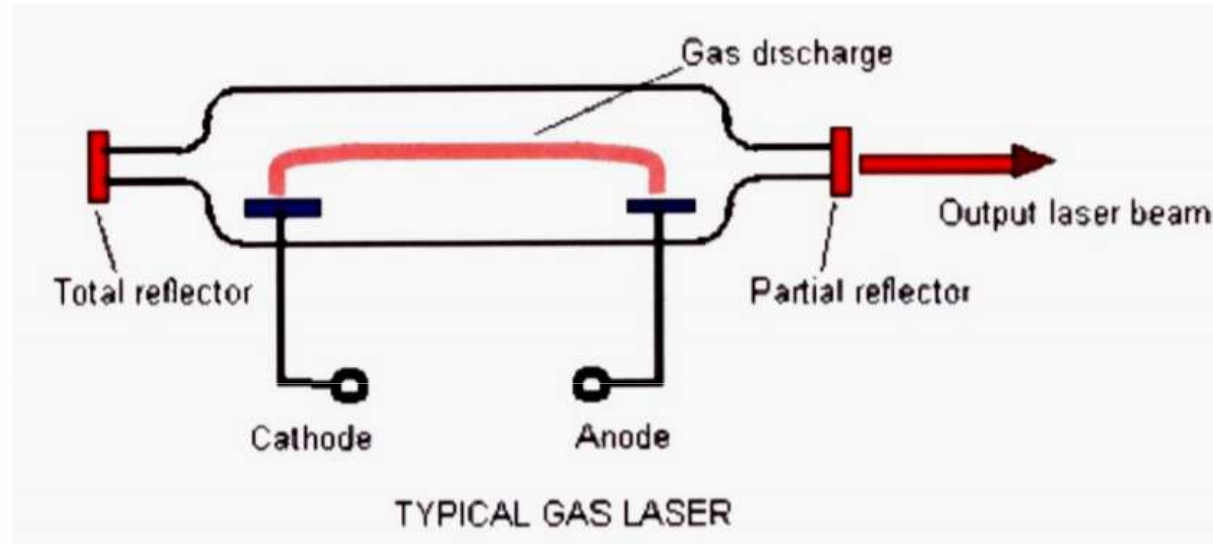
**Secondo il materiale attivo:**

- 1 Laser a gas: pompaggio ottico, o per scarica elettrica.**
- 2 Laser a liquidi: pompaggio ottico.**
- 3 Laser allo stato solido cristallino, pompaggio ottico.**
- 4 Laser a solido semiconduttore: pompaggio per scariche elettriche.**



## 1) Pompaggio mediante scarica elettrica

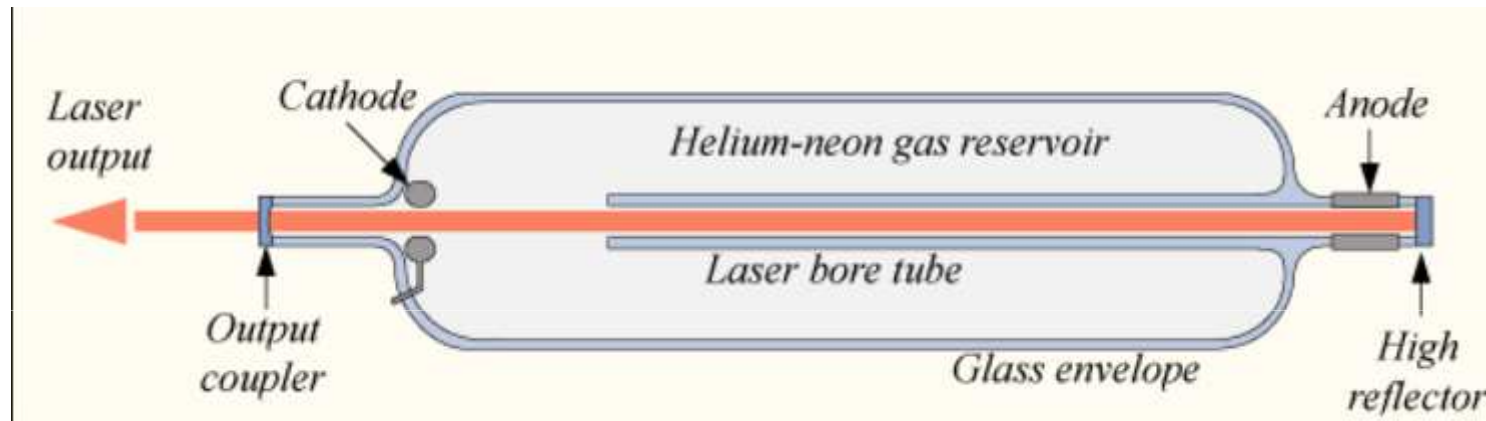
- usato nei laser a gas



- Il gas è racchiuso in tubo di quarzo sigillato agli estremi dagli specchi che costituiscono la cavità risonante.
- Tra i due elettrodi (A e C) viene creata una scarica elettrica che attraversa il gas.

## LASER a gas – He-Ne

- $\lambda = 632,8 \text{ nm}$  (rosso)
- Potenza  $\approx 0,5 - 50 \text{ mW}$
- Divergenza del fascio  $\cong 1 \text{ mrad}$

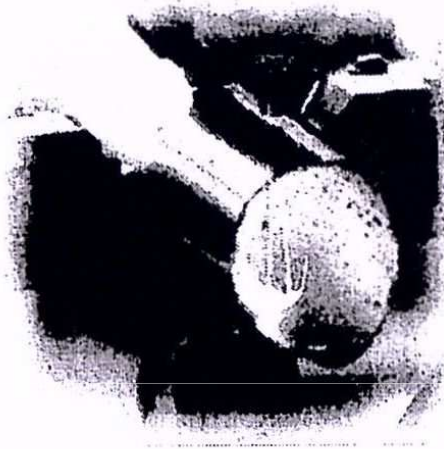


Il gas è racchiuso dentro un tubo di quarzo, sigillato agli estremi da 2 specchi (cavità ottica).

Un impulso elettrico di 10 kV, applicato fra gli elettrodi, dà luogo a una scarica elettrica attraverso il gas (pompaggio del mezzo attivo). Una corrente di 3-10 mA (dc) è sufficiente per mantenere la carica.

# LASER a CO<sub>2</sub>

Pompaggio avviene tramite una scarica elettrica in una miscela di gas



- Sfrutta le vibrazioni della molecola di CO<sub>2</sub>
- Emissione intorno a 10 μm
- Alte potenze di emissione in continua (~ centinaia di Watt - raffreddamento)

Applicazioni estetiche, mediche  
Marcatura, taglio

## LASER a gas – eccimeri

Excimer = excited dimer; laser impulsati in UV.

Contengono un gas nobile (Ar, Kr oppure Xe) e un gas alogeno (Cl, F oppure Br). Nelle condizioni normali la miscela di gas contiene atomi di gas nobile e molecole di alogeni.

Con il passaggio della corrente (eccitazione), si formano le molecole come ArF, KrF, XeBr, KrCl, ecc., che esistono solo nello stato eccitato. Tramite emissione fotonica si de-eccitano passando di nuovo alle molecole/atomi separati. In questo modo il livello più basso della transizione laser è sempre spopolato (equivalente a un laser a 4 livelli).

Tipiche energie sono in ordine: 0.1-1 J, durata d'impulso 10-30 ns.

Applicazioni: micro-lavorazioni (es. semiconduttori, testine per stampanti), trattamento superfici, spettroscopia, deposizione di micro-film, poi in medicina (correzione vista, angio-plastica).

Type of Excimer Laser	Wavelength (nm)
Argon Fluoride (ArF)	193
Krypton Chloride (KrCl)	222
Krypton Fluoride (KrF)	248
Xenon Chloride (XeCl)	308
Xenon Fluoride (XeF)	351

**ECCIMERI** = ECCItati diMERI  
**ECCIPLESSI** = ECCItati compLESSI

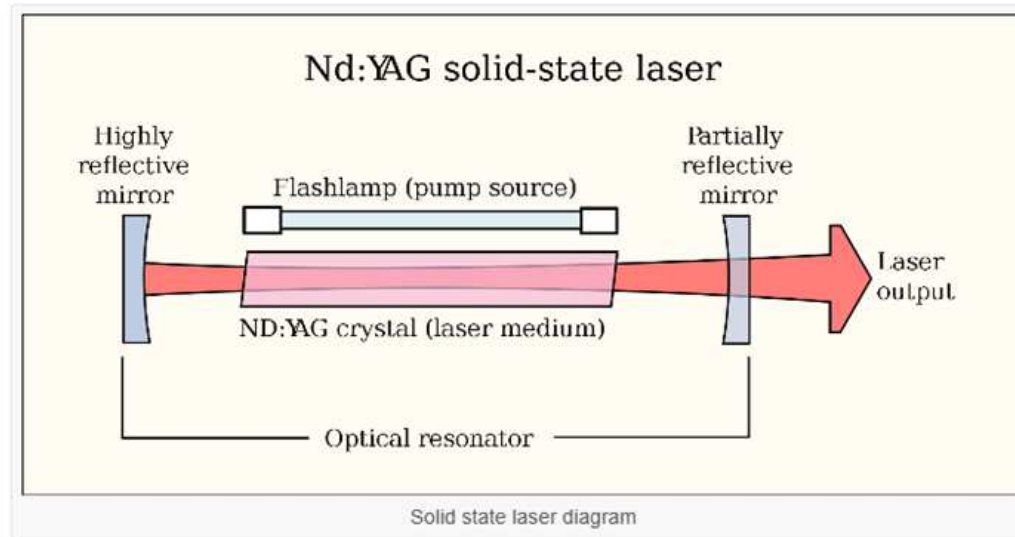
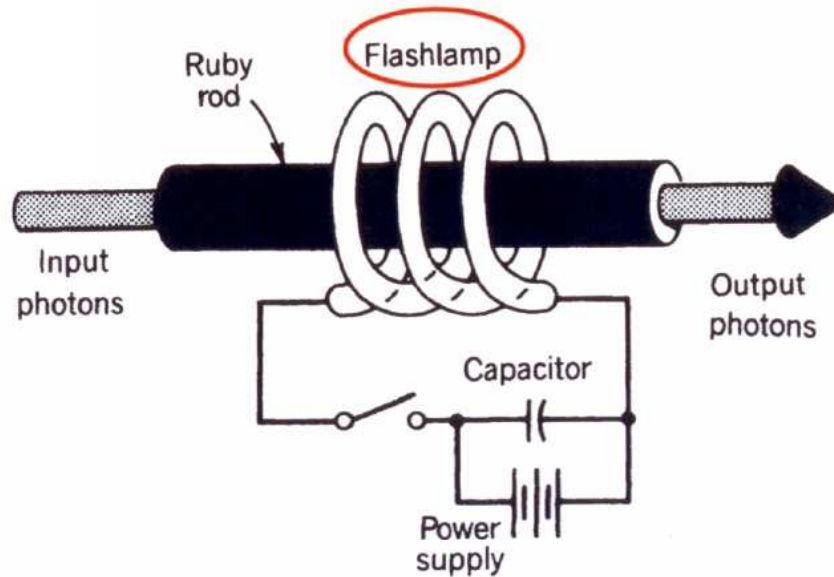
## Tipi di laser a gas

Mezzo e tipo di amplificazione laser	Lunghezza d'onda operativa	Sorgente di pompaggio	Usi e note
<a href="#">Laser a elio-neon</a>	632.8 nm (543.5 nm, 593.9 nm, 611.8 nm, 1.1523 μm, 1.52 μm, 3.3913 μm)	Scarica elettrica	Interferometria, olografia, spettroscopia, scansione di codici a barre, allineamento, dimostrazioni ottiche.
<a href="#">Laser ad argo</a>	454.6 nm, 488.0 nm, 514.5 nm (351 nm, 457.9 nm, 465.8 nm, 476.5 nm, 472.7 nm, 528.7 nm)	Scarica elettrica	Fototerapia retinica (per diabete), litografia, microscopia confocale, pompaggio di altri laser.
<a href="#">Laser al kripton</a>	416 nm, 530.9 nm, 568.2 nm, 647.1 nm, 676.4 nm, 752.5 nm, 799.3 nm	Scarica elettrica	Ricerca scientifica, mescolati con argo per ottenere laser a luce bianca per giochi di luci.
<a href="#">Laser a ioni di xeno</a>	Molte righe spettrali dall' <u>ultravioletto</u> fino all' <u>infrarosso</u> .	Scarica elettrica	Ricerca scientifica.
<a href="#">Laser ad azoto</a>	337.1 nm	Scarica elettrica	Pompaggio di laser a coloranti organici, misura dell'inquinamento ambientale, ricerca scientifica. I laser ad azoto possono funzionare in superradianza (cioè senza una cavità risonante). Costruzione di laser amatoriali.
<a href="#">Laser ad anidride carbonica</a>	10.6 μm, (9.4 μm)	Scarica elettrica trasversale (alta potenza) o longitudinale (bassa potenza)	Lavorazione di materiali (taglio, saldatura, etc.). Chirurgia.
<a href="#">Laser a monossido di carbonio</a>	2.6 to 4 μm, 4.8 to 8.3 μm	Scarica elettrica	Lavorazione di materiali (incisione, saldatura etc.), spettroscopia fotoacustica.
<a href="#">Laser a eccimeri</a>	193 nm (ArF), 248 nm (KrF), 308 nm (XeCl), 353 nm (XeF)	Ricombinazione di eccimeri con una scarica elettrica	Litografia ultravioletta per fabbricazione di circuiti integrati, chirurgia laser, LASIK.

[http://it.wikipedia.org/wiki/Lista di tipi di laser](http://it.wikipedia.org/wiki/Lista_di_tipi_di_laser)

## 2) Pompaggio mediante lampade flash

- usato nei laser a stato solido



**Nd: YAG = cristallo di Ittrio e Alluminio drogato al Neodimio ( $\text{Nd: Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ) che emette in IR.**

# Tipi di laser a stato solido

Mezzo e tipo di amplificazione laser	Lunghezza d'onda operativa	Sorgente di pompaggio	Usi e note
<a href="#">Laser a rubino</a>	694.3 nm	Lampada stroboscopica	Olografia, rimozione di tatuaggi. Il primo tipo di laser a luce visibile inventato (Maia 1960).
<a href="#">Laser Nd:YAG</a>	1.064 $\mu\text{m}$ , (1.32 $\mu\text{m}$ )	Lampada stroboscopica, diodo laser	Lavorazione di materiali, misurazione distanze, puntatori laser, chirurgia, ricerca, pompaggio di altri laser (combinato con duplicatori di frequenza per produrre un fascio verde da 532 nm). Uno dei piú comuni laser ad alta potenza. Di solito funziona ad impulsi (brevi fino a frazioni di nanosecondo)
<a href="#">Laser Er:YAG</a>	2.94 $\mu\text{m}$	Lampada stroboscopica, diodo laser	Scalatura periodontale, odontoiatria
<a href="#">Laser Nd:YLF</a>	1.047 e 1.053 $\mu\text{m}$	Lampada stroboscopica, diodo laser	Generalmente usato per il pompaggio impulsivo di certi tipi di laser Ti:zaffiro, combinato con duplicatori di frequenza.
<a href="#">Laser Nd:YVO<sub>4</sub></a>	1.064 $\mu\text{m}$	diodo laser	Generalmente usato per il pompaggio continuo di laser Ti:zaffiro o a coloranti in modelocking, in combinazione con duplicatori di frequenza. Usato anche a impulsi per marcatura e microlavorazioni meccaniche.
<a href="#">Laser Nd:YCOB (Nd:YCa<sub>4</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>)</a>	~1.060 $\mu\text{m}$ (~530 nm alla seconda armonica)	diodo laser	Nd:YCOB è un cosiddetto "materiale laser ad autoraddoppio di frequenza" o materiale SFD, che oltre ad essere capace di amplificazione laser ha anche caratteristiche ottiche nonlineari che lo rendono capace di funzionare in seconda armonica. Tali materiali permettono di semplificare il progetto di laser verdi ad elevata brillantezza.
<a href="#">Laser Neodimio-vetro (Nd:Glass)</a>	~1.062 $\mu\text{m}$ (vetri ai silicati), ~1.054 $\mu\text{m}$ (vetri ai fosfati)	Lampada stroboscopica, diodo laser	Usati per potenze ed energie estremamente elevate (dell'ordine del terawatt e dei megajoule), in sistemi a fasci multipli per fusione a confinamento inerziale. Viste le potenze in gioco, i laser Nd:Glass sono otticamente nonlineari e vengono usati per triplicare la loro stessa frequenza di lavoro: funzionano generalmente in terza armonica a 351 nm.
<a href="#">Laser titanio-zaffiro (Ti:zaffiro)</a>	650-1100 nm	Altri laser	spettroscopia, Lidar, ricerca. Questo laser si usa spesso in laser infrarossi altamente accordabili in modelocking per produrre impulsi ultrabrevi e in amplificatori laser per produrre impulsi ultrabrevi e ultrapotenti.
<a href="#">Laser Tm:YAG (Tm:YAG)</a>	2.0 $\mu\text{m}$	diodo laser	Lidar.
<a href="#">Laser itterbio:YAG (Yb:YAG)</a>	1.03 $\mu\text{m}$	Diodo laser, lampada stroboscopica	Raffreddamento ottico, lavorazione materiali, ricerca sugli impulsi ultrabrevi, microscopia multifotonica, Lidar.
<a href="#">Laser Osmio:YAG (Ho:YAG)</a>	2.1 $\mu\text{m}$	diodo laser	Ablazione tissutale, rimozione di calcoli renali, odontoiatria.

YAG = Ittrio Alluminio Granato  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$

LIDAR = Laser Imaging Detection And Ranging

# TECNICHE DI RILEVAMENTO

## LADAR (o LIDAR) = Laser Detection and Ranging

Utilizza un impulso laser costituito da radiazioni con  $\lambda$  tra 0,2 e 10  $\mu\text{m}$  ( $2 \cdot 10^{-7} \div 1 \cdot 10^{-5}$  m) (UV, visibili e vicino IR) per rilevare la distanza e la velocità di oggetti piccoli (micro) e grandi (macro) come auto, aerei, pianeti, stelle ma anche altezza delle nubi, profondità dei mari, stratificazione di terreni e giacimenti, ecc.

## RADAR = Radio Detection and Ranging

Utilizza onde radio con  $\lambda$  di 0,5÷2 m e quindi rileva solo oggetti di dimensioni macro con superfici larghe ed elevata discontinuità elettrica (metalli). I radar più moderni utilizzano radar a onde centimetriche.

## SONAR = Sound Navigation and Ranging

Utilizza la propagazione del suono ( $f$  tra 10 Hz e 10 MHz) in genere sott'acqua per rilevare la posizione e la distanza di imbarcazioni

N.B.: Con le tecniche descritte la distanza è determinata misurando il tempo trascorso tra l'emissione dell'impulso e la ricezione del segnale retro diffuso.

MHz =  $10^6$  Hz



# Radiazioni non ionizzanti

# Radiazioni ionizzanti

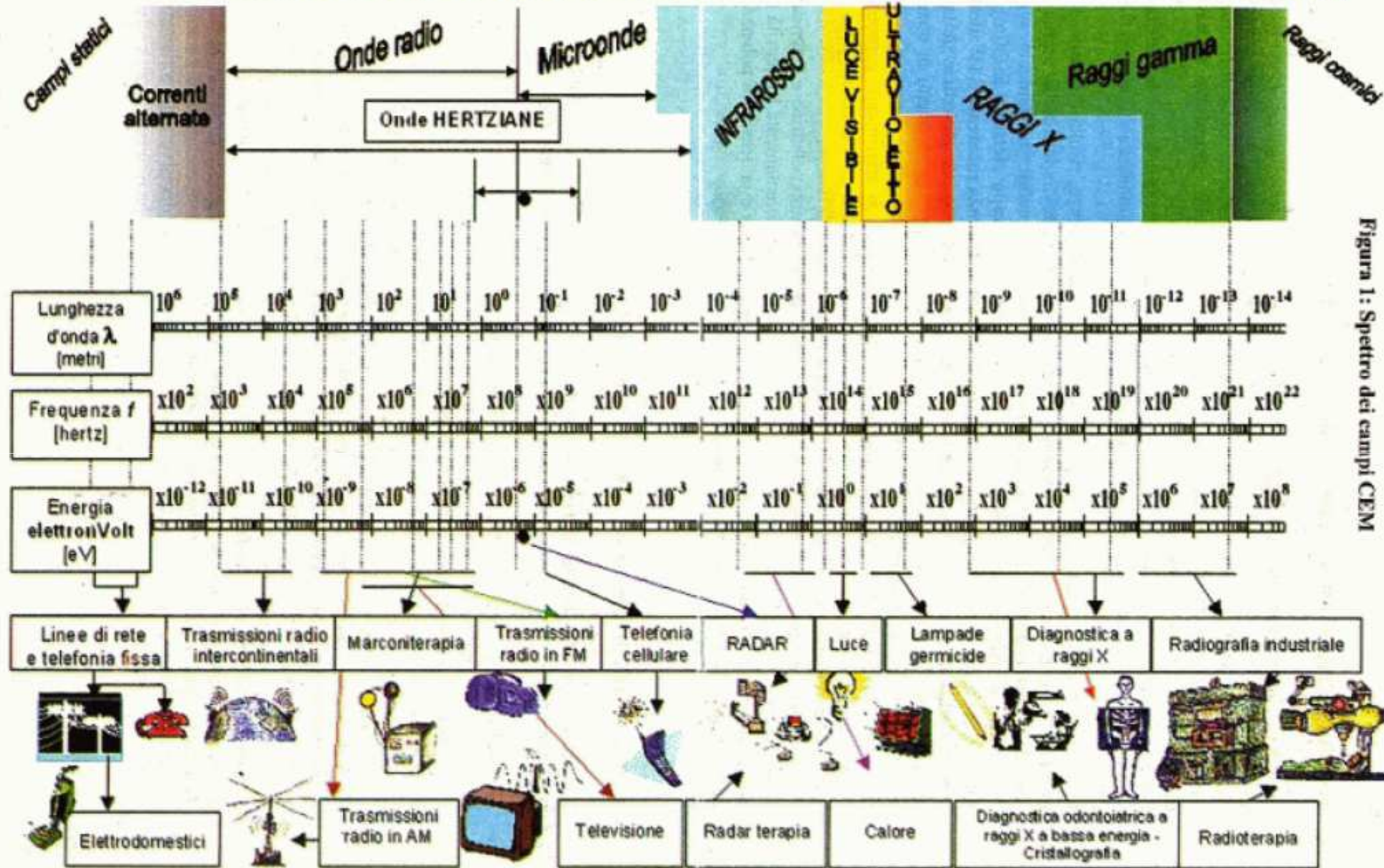
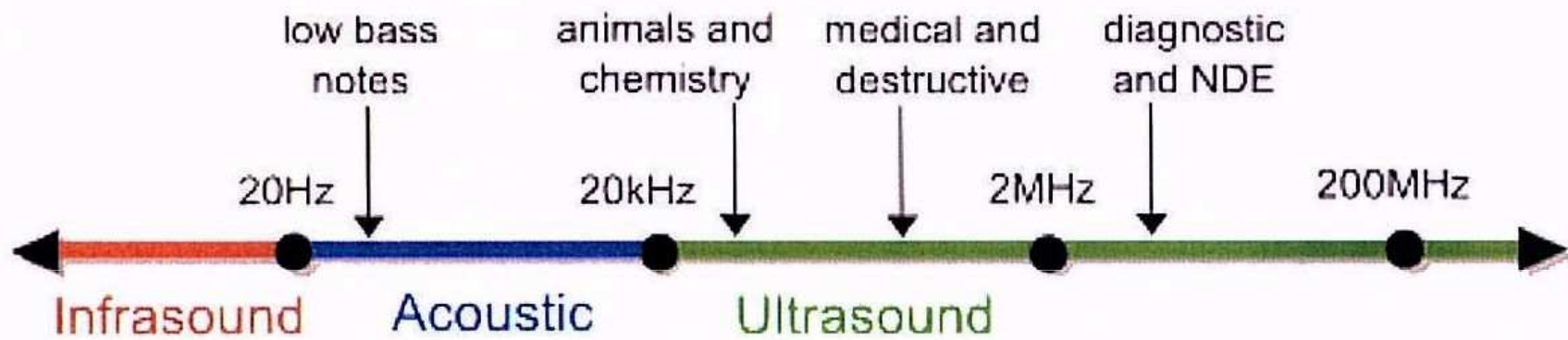


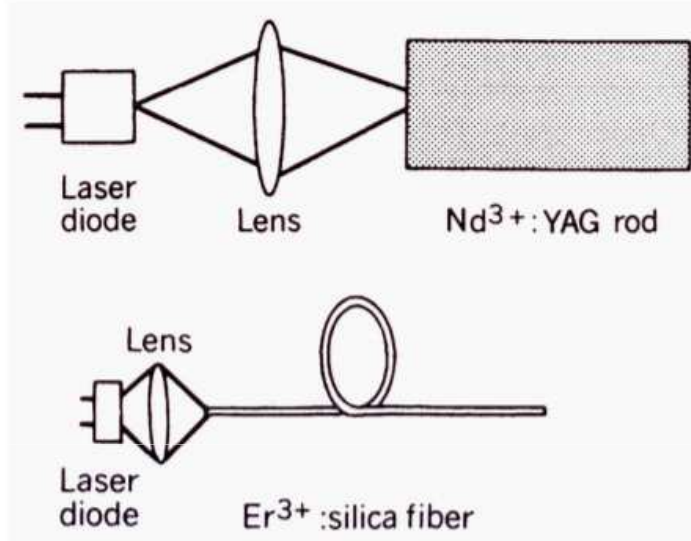
Figura 1: Spettro dei campi CEM



NDE = Near Death Experience

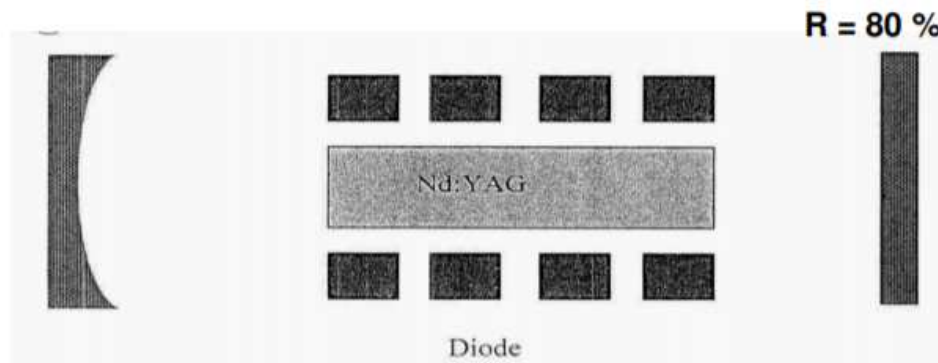
### 3) Pompaggio a diodi

- un diodo a semiconduttore (o un array di diodi) può essere usato per il pompaggio ottico nei laser a stato solido (Nd:YAG) oppure nei laser in fibra.



Pompaggio longitudinale:

Se la geometria del fascio di pompaggio coincide con la geometria del modo laser (es. TEM 00) si ottiene più alta efficienza di conversione



Pompaggio trasversale:

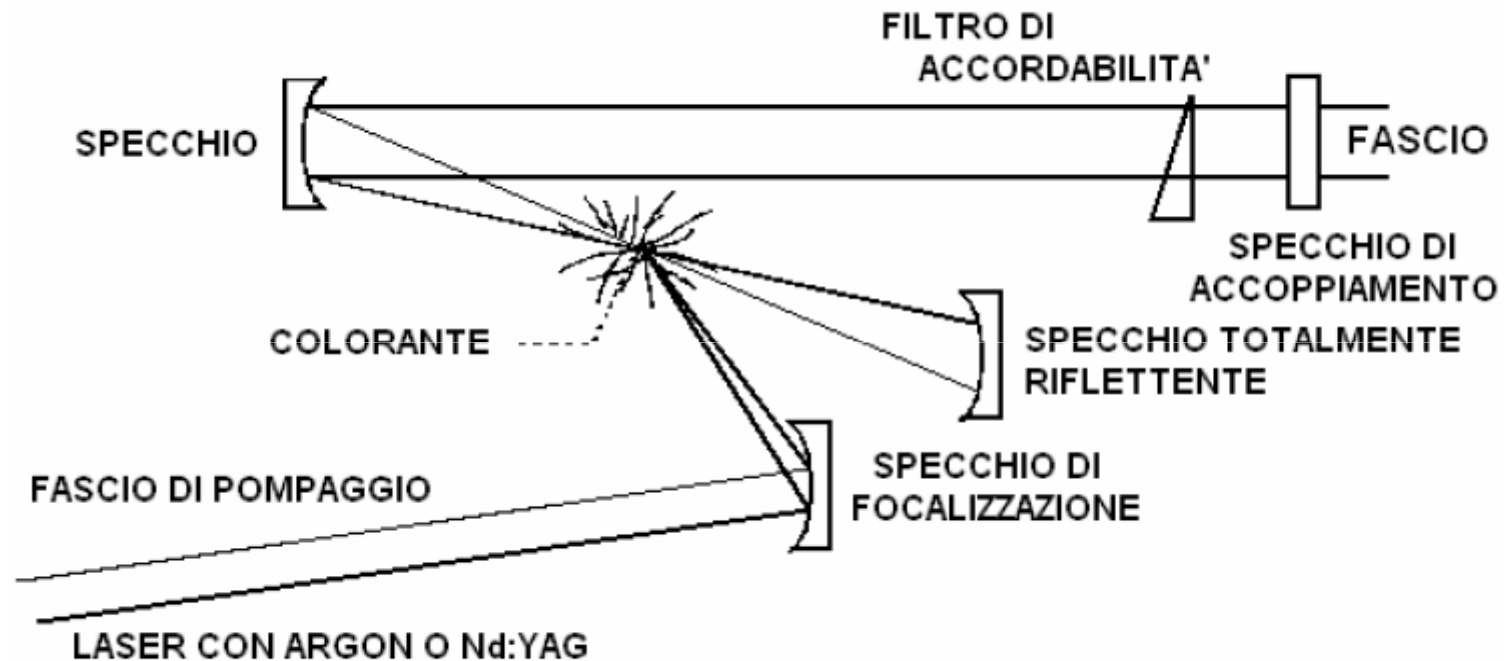
Diodi intorno al materiale attivo

Array di diodi = Struttura complessa di diodi in serie.

# Tipi di laser a semiconduttore

Mezzo e tipo di amplificazione laser	Lunghezza d'onda operativa	Sorgente di pompaggio	Usi e note
<a href="#">Diodo laser a semiconduttore (informazioni generiche)</a> <a href="#">GaN</a>	0.4-20 $\mu\text{m}$ , a seconda del materiale della regione attiva. 0.4 $\mu\text{m}$		Telecomunicazioni, olografia, stampa laser, armamenti, macchinari, saldatura, sorgenti di pompaggio per altri laser. Dischi ottici
<a href="#">AlGaAs</a>	0.63-0.9 $\mu\text{m}$		Dischi ottici, puntatori laser, comunicazioni dati. I laser da 780 nm per i lettori CD sono il tipo di laser più comune del mondo. Pompaggio di altri laser a stato solido, lavorazioni industriali, applicazioni mediche.
<a href="#">InGaAsP</a>	1.0-2.1 $\mu\text{m}$	Corrente elettrica	Telecomunicazioni, pompaggio di altri laser a stato solido, lavorazioni industriali, applicazioni mediche.
<a href="#">sali di piombo Vertical cavity surface emitting laser (VCSEL)</a>	3-20 $\mu\text{m}$ 850 - 1500 nm, a seconda del materiale		Telecomunicazioni
<a href="#">Laser a cascata quantica</a>	Dal medio al lontano infrarosso.		Ricerca, applicazioni future includono radar anticollisione, controllo di processi industriali e strumenti di diagnosi medica come analizzatori del fiato.
<a href="#">Laser ibridi al silicio</a>	Medio infrarosso		Ricerca

# Schema di principio di un LASER a liquido con colorante



## Laser chimici

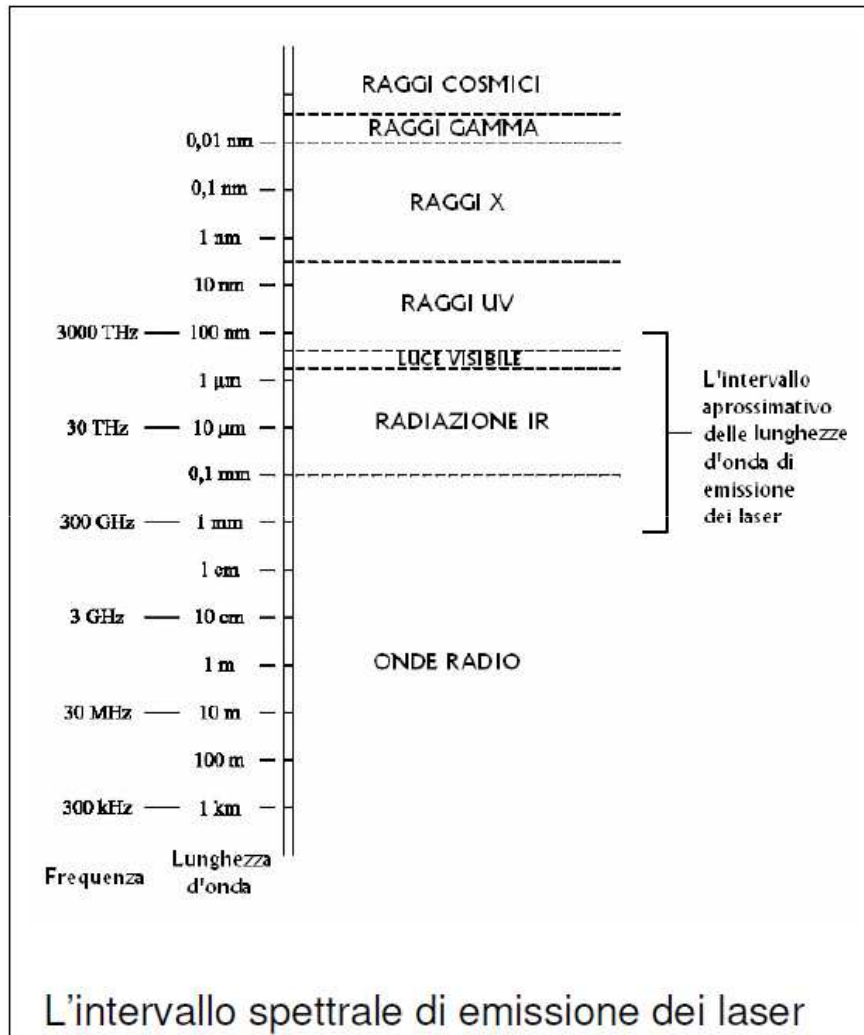
Usati come armi a energia diretta.

Mezzo e tipo di amplificazione laser	Lunghezza d'onda operativa	Sorgente di pompaggio	Usi e note
Laser a fluoruro di idrogeno	da 2.7 a 2.9 $\mu\text{m}$ per il fluoruro di idrogeno (<80% trasmittanza atmosferica)	Reazione chimica in un flusso di combustione di etilene e trifluoruro di azoto ( $\text{NF}_3$ )	Usato in ricerche sugli armamenti laser dal ministero della difesa degli Stati Uniti, funziona in onda continua e può raggiungere potenze dell'ordine del megawatt.
Laser a fluoruro di deuterio	~3800 nm (3.6 to 4.2 $\mu\text{m}$ ) (~90% trasmittanza atmosferica)	reazione chimica	MIRACL, Proiettile a energia impulsiva & Laser tattico ad alta energia
COIL (Chemical Oxygen-Iodine Laser)	1.315 $\mu\text{m}$ (<70% trasmittanza atmosferica)	Reazione chimica in un flusso di ossigeno in stato singlet e iodio	Armamenti laser, ricerca scientifica e sui materiali, laser usati nel Laser aviotrasportato degli Stati Uniti. Funziona in onda continua e può avere potenze dell'ordine del megawatt.

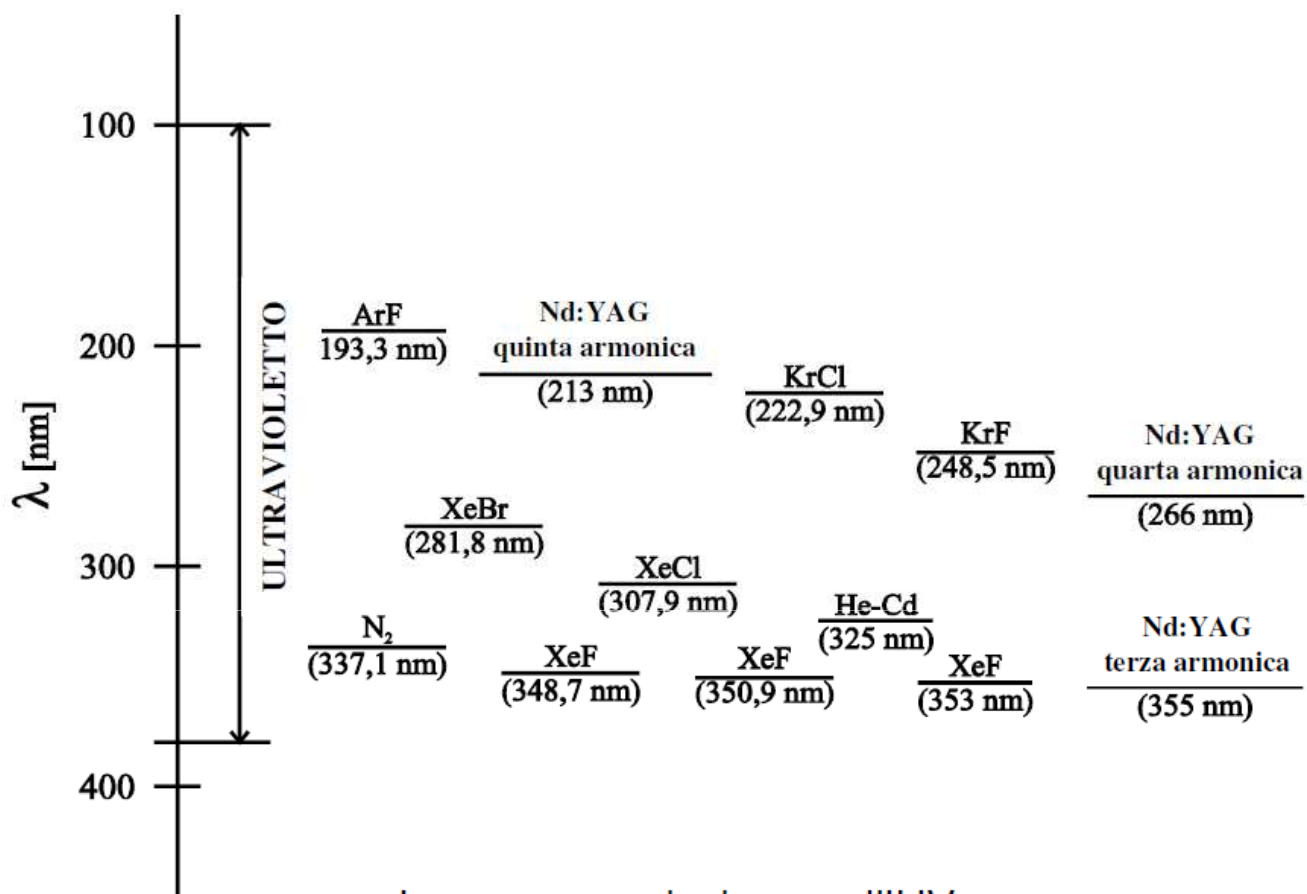
## Laser a coloranti organici

Mezzo e tipo di amplificazione laser	Lunghezza d'onda operativa	Sorgente di pompaggio	Usi e note
Laser a coloranti	390-435 nm (stilbene). 460-515 nm (cumarina 102), 570-640 nm (rodamina 6G) e molti altri	Altri laser. lampade stroboscopiche	Ricerca, spettroscopia, rimozione di voglie, separazione isotopica. La gamma di sintonia del laser varia a seconda del particolare colorante usato.

# Lunghezze d'onda di emissione dei laser



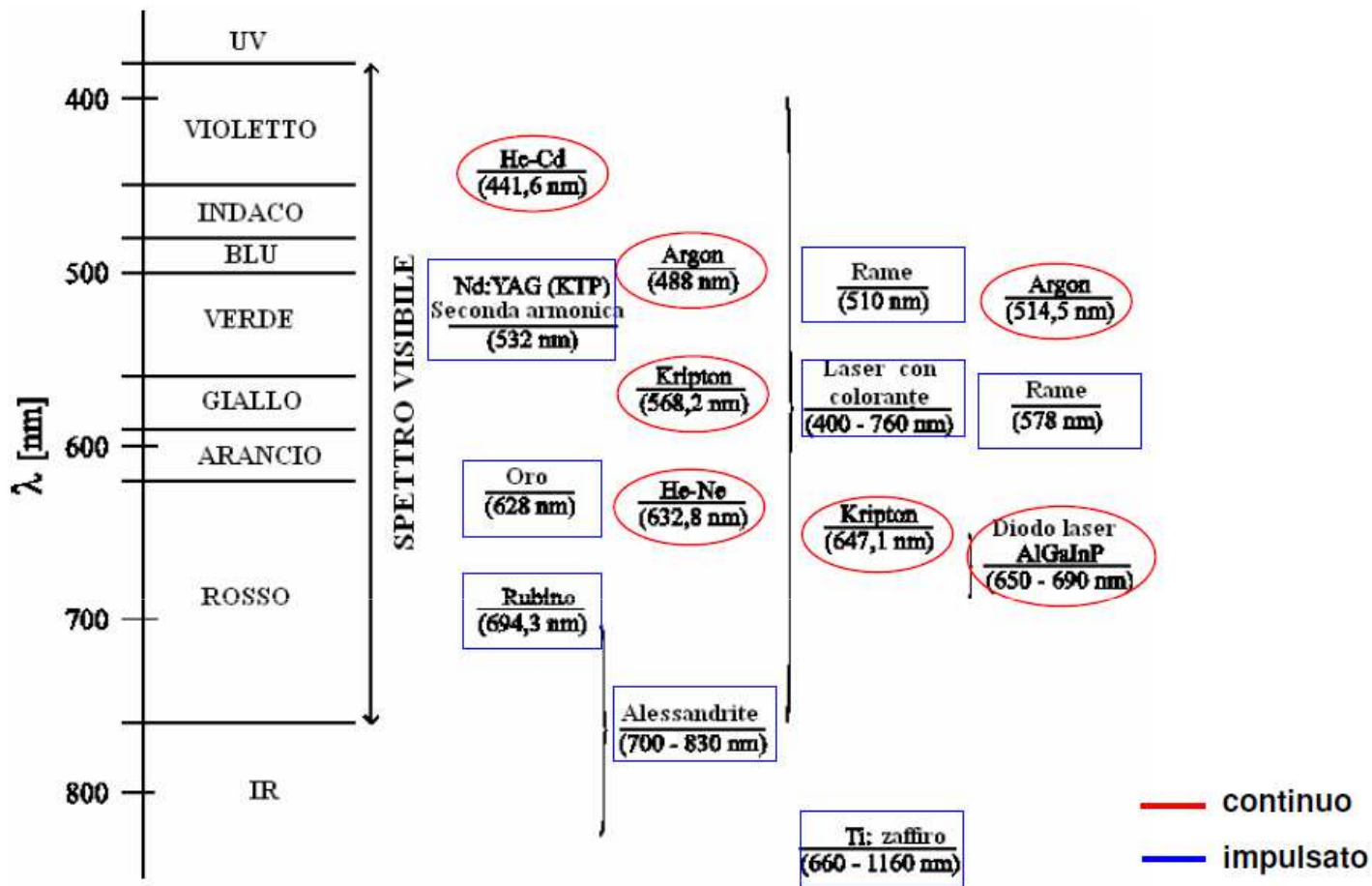
- La più piccola lunghezza d'onda utilizzata è emessa dal laser con eccimeri ArF (193 nm)
- Le più grandi lunghezze d'onda vengono emesse dai laser rotazionali (decine e centinaia di  $\mu\text{m}$ ).



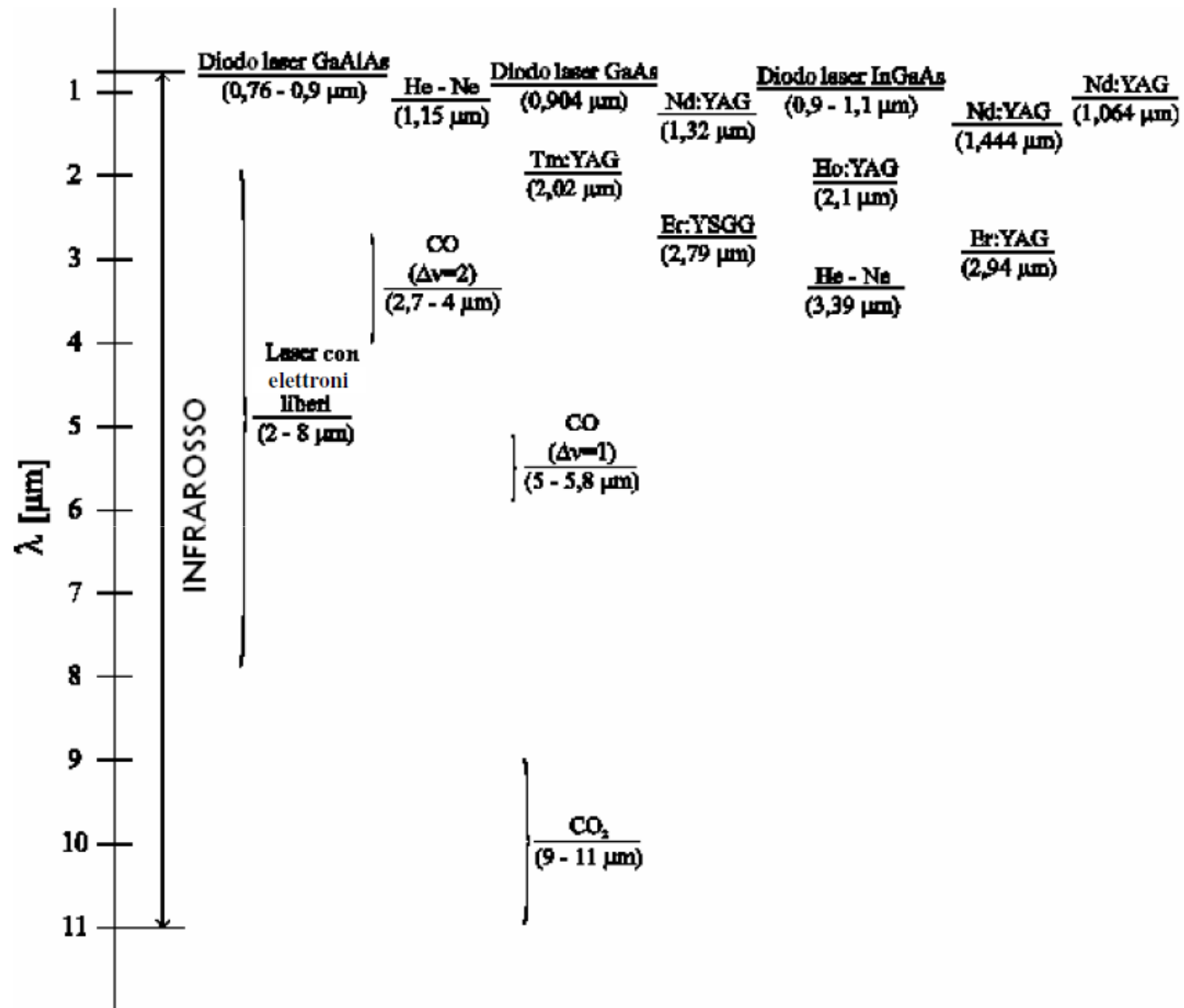
Laser con emissione nell'UV

- i laser più importanti nell'UV sono il laser con eccimeri ArF (193 nm), KrCl (223 nm), XeBr (282), XeCl (308 nm), XeF (348 nm) ed il laser con N<sub>2</sub> (337 nm) implusati.
- $\lambda_{\min}$  in emissione continua: He-Cd (325 nm).



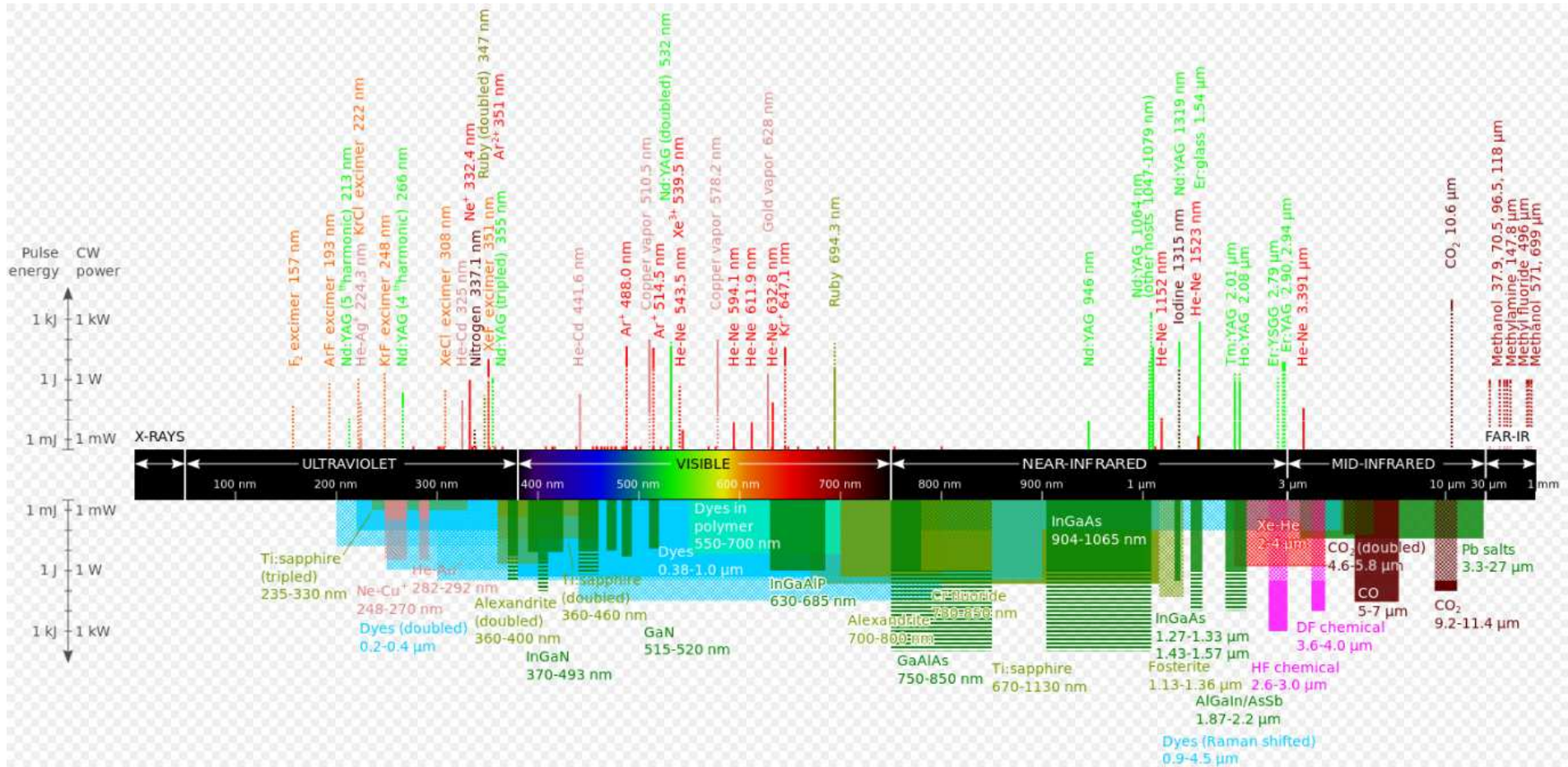


Laser con emissione nel visibile



Laser con emissione nell'IR

# TIPI DI LASER



Lunghezza d'onda dei laser commerciali. Nella parte superiore i laser che emettono ad una linea spettrale, in quella inferiore quelli che emettono in un intervallo; l'altezza indica potenza massima.




# IMPIEGO DEI LASER

L'emissione fotonica monocromatica, coerente e collimata comporta la possibilità di raggiungere una potenza irradiata elevatissima, utilizzabile in molti campi industriali (taglio, saldatura e incisione dei metalli); militari (puntamento e misura delle distanze); informatica (comunicazioni ottiche); medicali (chirurgia refrattiva, retinica, cutanea, vascolare); estetiche (epilazione, depigmentazione, trattamento delle cicatrici atrofiche, ipertrofiche e cheloidi), oltre ad altri utilizzi fisioterapici.

I laser possono però anche rappresentare una fonte di pericolo per la salute umana e vengono perciò classificati in 5 classi di rischio crescente in funzione della potenza, della lunghezza d'onda e del danno causabile.

Nel frattempo la classifica è stata portata a 7 classi.

## CLASSIFICAZIONE DEI LASER

	CLASSE DI APPARTENENZA	POTENZA	VENDITA, PRODUZIONE, PORTO E USO	VIOLAZIONE CODICE PENALE	CODICE DEL CONSUMO Dlgs 206/2005
	1	<0,04mW (puntatore, luce rossa)	SI	NO	Istruzioni e avvertenze in italiano art. 9
	2	<1mW (laser penna per lavagne luminose)	SI	NO	Istruzioni e avvertenze in italiano art. 9
	3A	<5mW (laser che può avere luce rossa o azzurrina)	Solo rivenditori autorizzati e per usi professionali	SI per porto e uso non professionale (art. 4 nr.2 legge 110/75)	Prodotto pericoloso (art. 102 e succ.)
	3B	tra 5mW e 500mW (laser di colore verde o viola)	Solo rivenditori autorizzati e per usi professionali	SI per porto e uso non professionale (art. 4 nr.2 legge 110/75)	Prodotto pericoloso (art. 102 e succ.)
	4	oltre 500mW (laser industriali, usati per il taglio dei metalli)	Solo rivenditori autorizzati e per usi professionali	SI per porto e uso non professionale (art. 4 nr.2 legge 110/75)	Prodotto pericoloso (art. 102 e succ.)

# LED

# LED

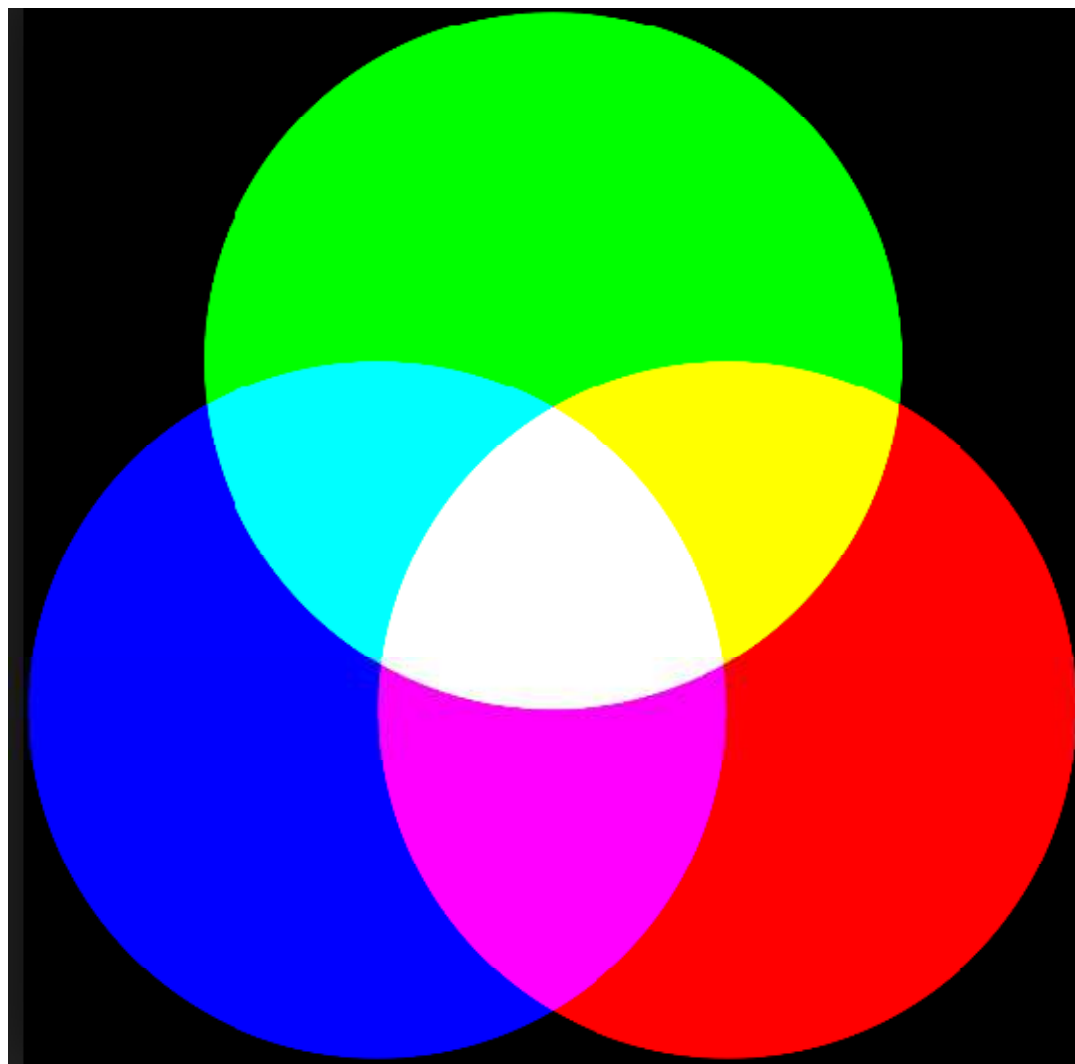
## (Light Emitting Diode)

È noto che l'effetto fotovoltaico viene utilizzato nei pannelli solari per produrre energia elettrica dalla luce. L'effetto inverso detto elettroluminescenza avviene nei LED per produrre luce dall'energia elettrica.

In entrambi i casi si utilizza un materiale ceramico semiconduttore opportunamente drogato  $n/p$  costituito da silicio o perovskiti (per es.  $\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$ ) per le celle fotovoltaiche o costituito da fosfoarseniuro di gallio ( $\text{GaP} \cdot \text{GaAs}$ ) per i LED.

I primi LED emettevano in rosso o in giallo verdastro e solo con la scoperta che il nitruro di gallio emetteva in blu è stato possibile mettere insieme le tre tonalità complementari per ottenere l'emissione di luce bianca (Nobel a NAKAMURA nel 2014).

Le differenze di potenziale utilizzati nei LED per avere l'emissione luminosa sono molto basse da 1,5 a 4 Volt e da ciò scaturisce il basso consumo di energia elettrica delle lampade LED e la loro crescente diffusione.



EMISSIONE LED DI RGB

R = ROSSO  
G = VERDE  
B = BLU

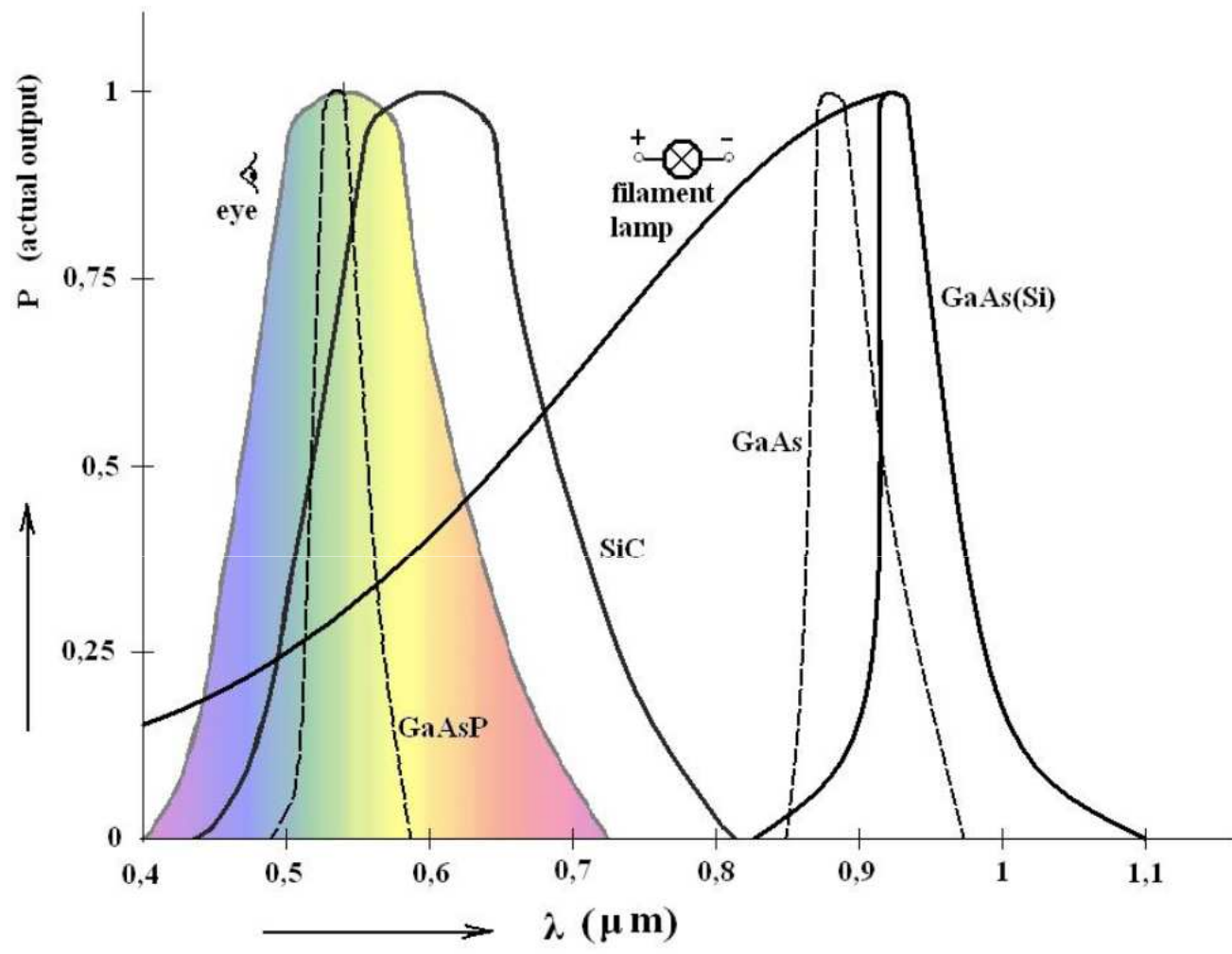
} sono i colori primari Additivi



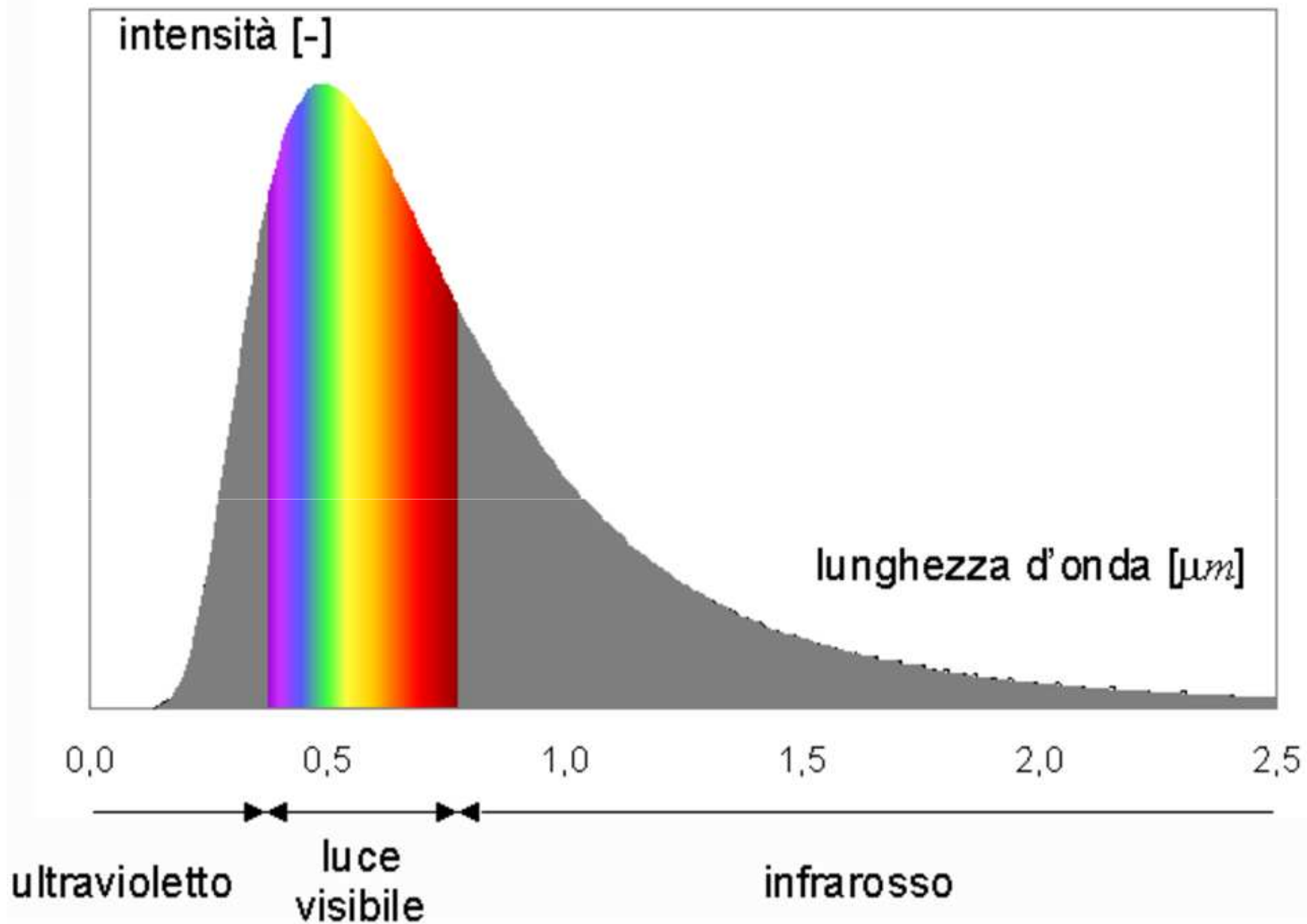
# COLORE DELLA LUCE EMESSA

A seconda del materiale utilizzato, i LED producono i seguenti colori:

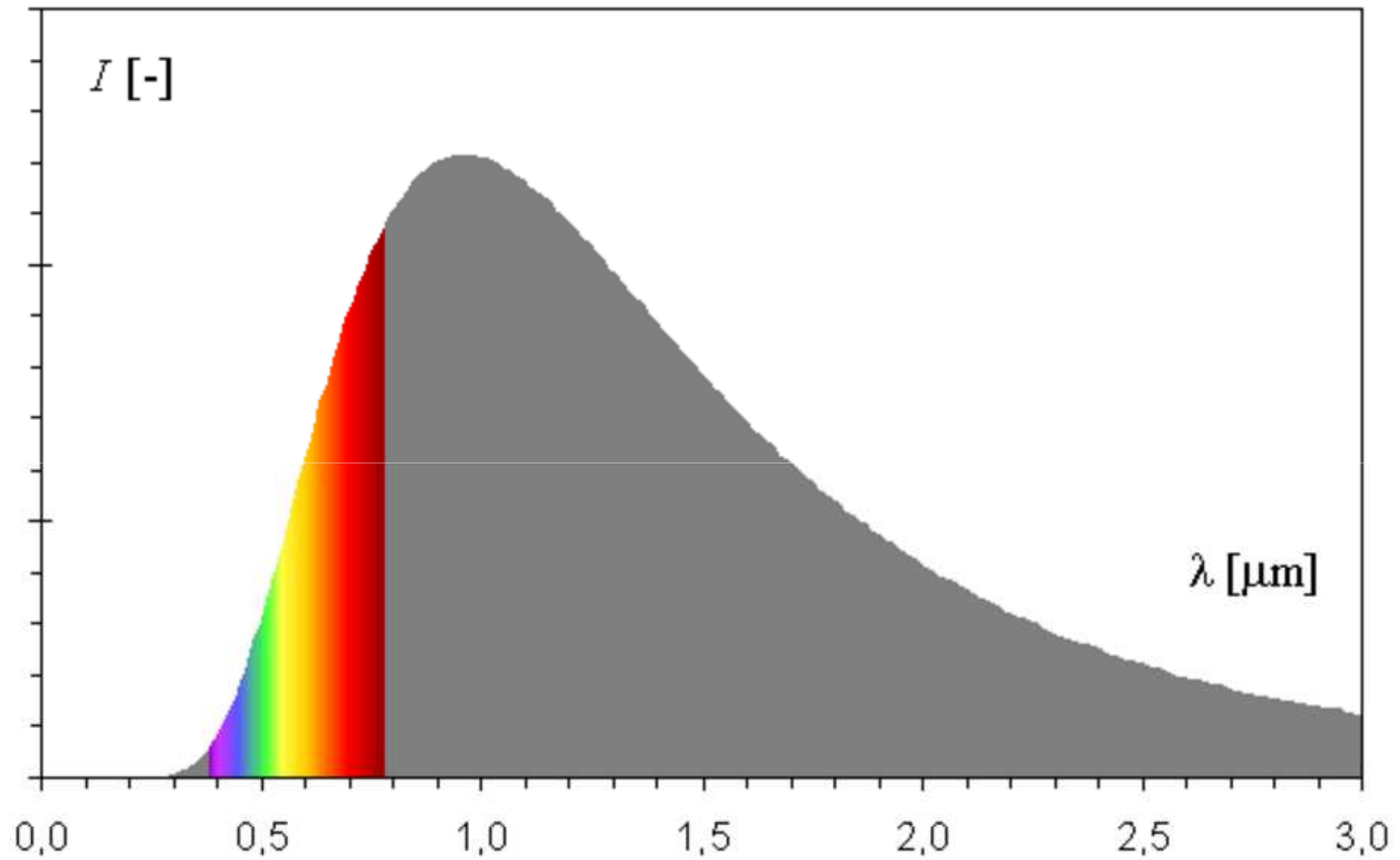
- AlGaAs – rosso ed infrarosso
- GaAlP – verde
- GaAsP – rosso, rosso-arancione, arancione e giallo
- GaN – verde e blu
- GaP - rosso, giallo e verde
- InGaN – blu-verde, blu
- InGaAlP – rosso-arancione, arancione, giallo e verde
- SiC come substrato – blu
- Diamante (C) – ultravioletto
- Silicio (Si) come substrato – blu (in sviluppo)
- Zaffiro ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) come substrato - blu



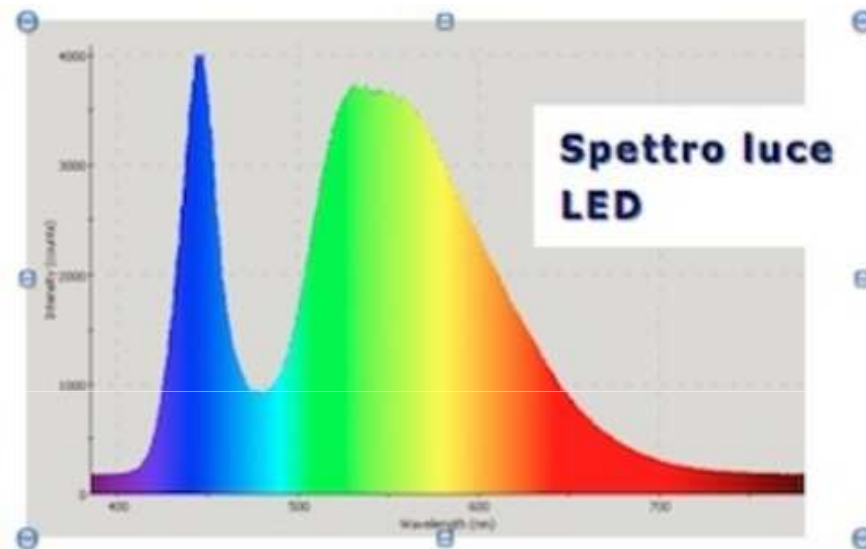
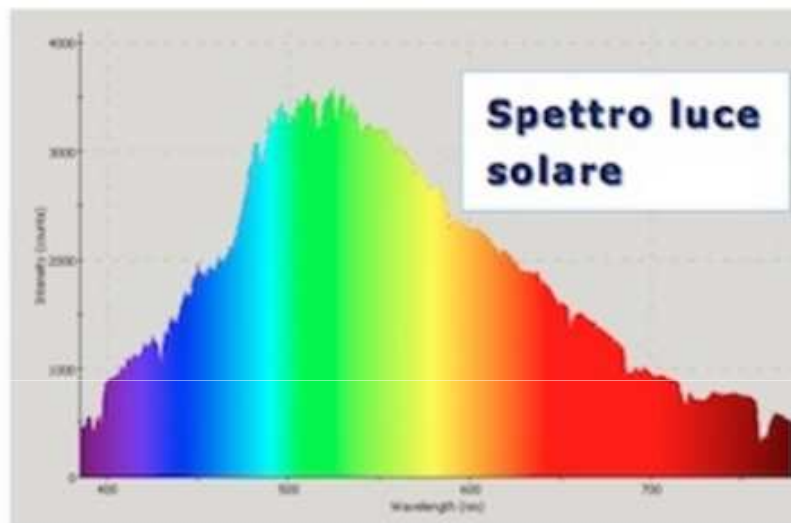
**SPETTRO DI EMISSIONE DEI LED A CONFRONTO CON LA LAMPADA A INCANDESCENZA**

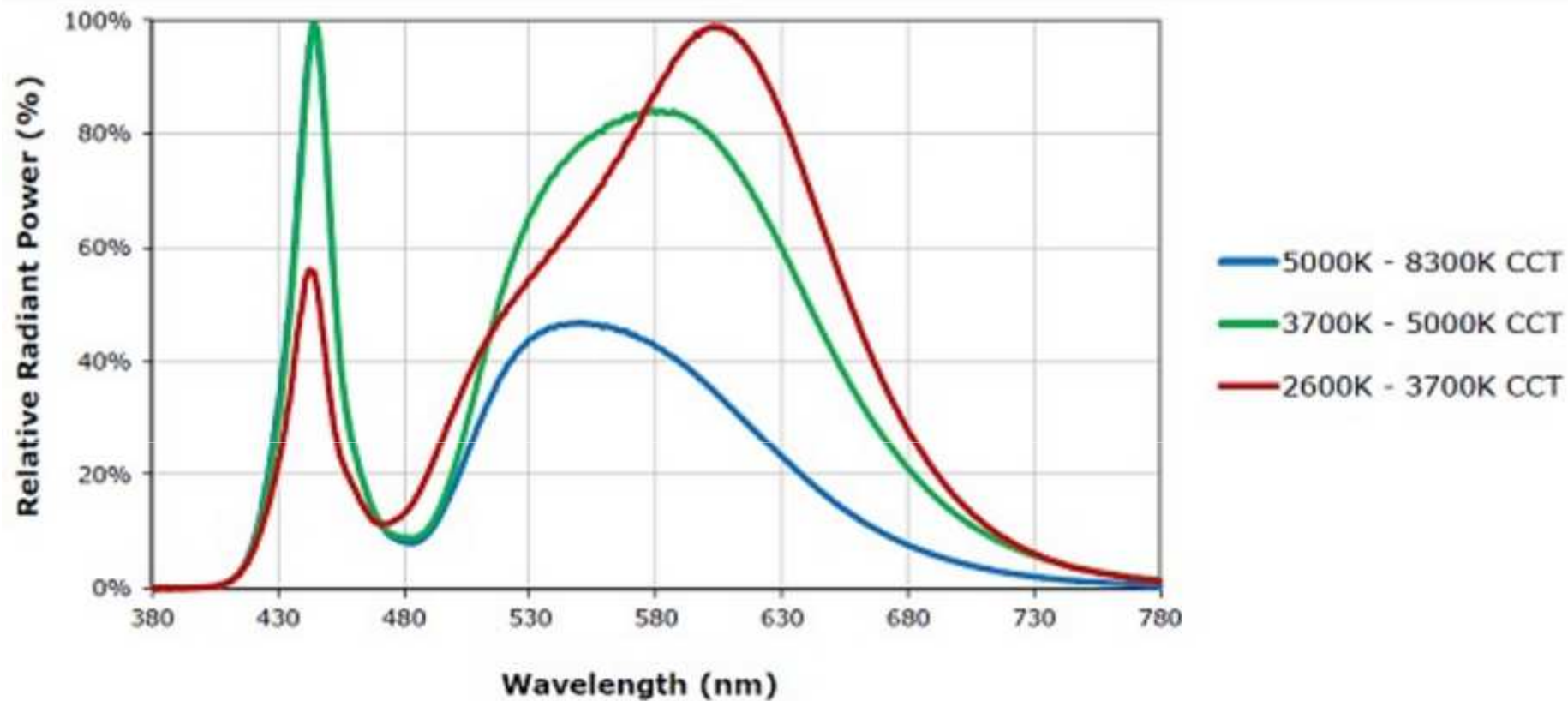


SPETTRO DELLA LUCE SOLARE



**SPETTRO DI EMISSIONE DELLE LAMPADE A INCANDESCENZA**





**SPETTRO DI EMISSIONE DI UNA COMBINAZIONE DI 3 LED PER OTTENERE LA LUCE BIANCA**

Color	Wavelength [nm]	Voltage drop [ $\Delta V$ ]	Semiconductor material
Infrared	$\lambda > 760$	$\Delta V < 1.63$	Gallium arsenide (GaAs) Aluminium gallium arsenide (AlGaAs)
Red	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	Aluminium gallium arsenide (AlGaAs) Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
Orange	$590 < \lambda < 610$	$2.03 < \Delta V < 2.10$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
Yellow	$570 < \lambda < 590$	$2.10 < \Delta V < 2.18$	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Gallium(III) phosphide (GaP)
Green	$500 < \lambda < 570$	$1.9^{[74]} < \Delta V < 4.0$	<b>Traditional green:</b> Gallium(III) phosphide (GaP) Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) Aluminium gallium phosphide (AlGaP) <b>Pure green:</b> Indium gallium nitride (InGaN) / Gallium(III) nitride (GaN)
Blue	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Zinc selenide (ZnSe) Indium gallium nitride (InGaN) Silicon carbide (SiC) as substrate Silicon (Si) as substrate—under development
Violet	$400 < \lambda < 450$	$2.76 < \Delta V < 4.0$	Indium gallium nitride (InGaN)
Purple	Multiple types	$2.48 < \Delta V < 3.7$	Dual blue/red LEDs, blue with red phosphor, or white with purple plastic
Ultraviolet	$\lambda < 400$	$3 < \Delta V < 4.1$	Indium gallium nitride (InGaN) (385-400 nm) Diamond (235 nm) <sup>[75]</sup> Boron nitride (215 nm) <sup>[76][77]</sup> Aluminium nitride (AlN) (210 nm) <sup>[78]</sup> Aluminium gallium nitride (AlGaN) Aluminium gallium indium nitride (AlGaInN)—down to 210 nm <sup>[79]</sup>
Pink	Multiple types	$\Delta V \sim 3.3^{[80]}$	Blue with one or two phosphor layers, yellow with red, orange or pink phosphor added afterwards, white with pink plastic, or white phosphors with pink pigment or dye over top. <sup>[81]</sup>
White	Broad spectrum	$2.8 < \Delta V < 4.2$	<b>Cool / Pure White:</b> Blue/UV diode with yellow phosphor <b>Warm White:</b> Blue diode with orange phosphor

<b>Tipologia LED</b>	<b>tensione di giunzione <math>V_f</math> (volt)</b>
Colore infrarosso	1,3
Colore rosso	1,8
Colore giallo	1,9
Colore verde	2,0
Colore arancio	2,0
Flash blu/bianco	3,0
Colore Blu	3,5 V
Colore Ultravioletto	4 ÷ 4,5 V

**Il basso voltaggio sufficiente per l'emissione determina il ridotto consumo energetico delle lampade LED**



## LAMPADA

## EFFICIENZA LUMINOSA

A INCANDESCENZA

13,8 Lumen/Watt

A LOGENA

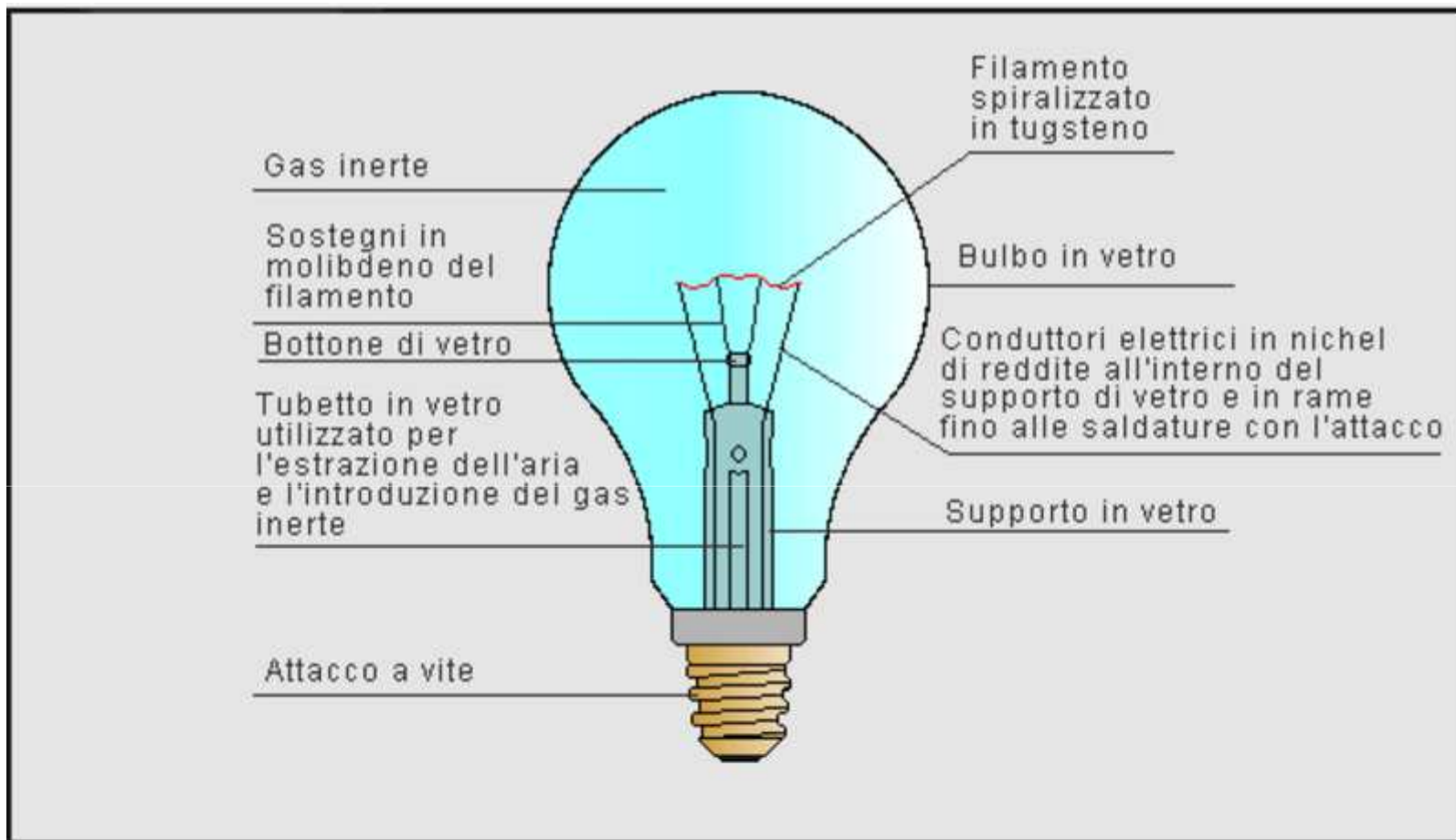
20 “

A FLUORESCENZA

60 “

LED

> 150 “



LAMPADA A INCANDESCENZA



LAMPADA A LED

# FIBRE OTTICHE

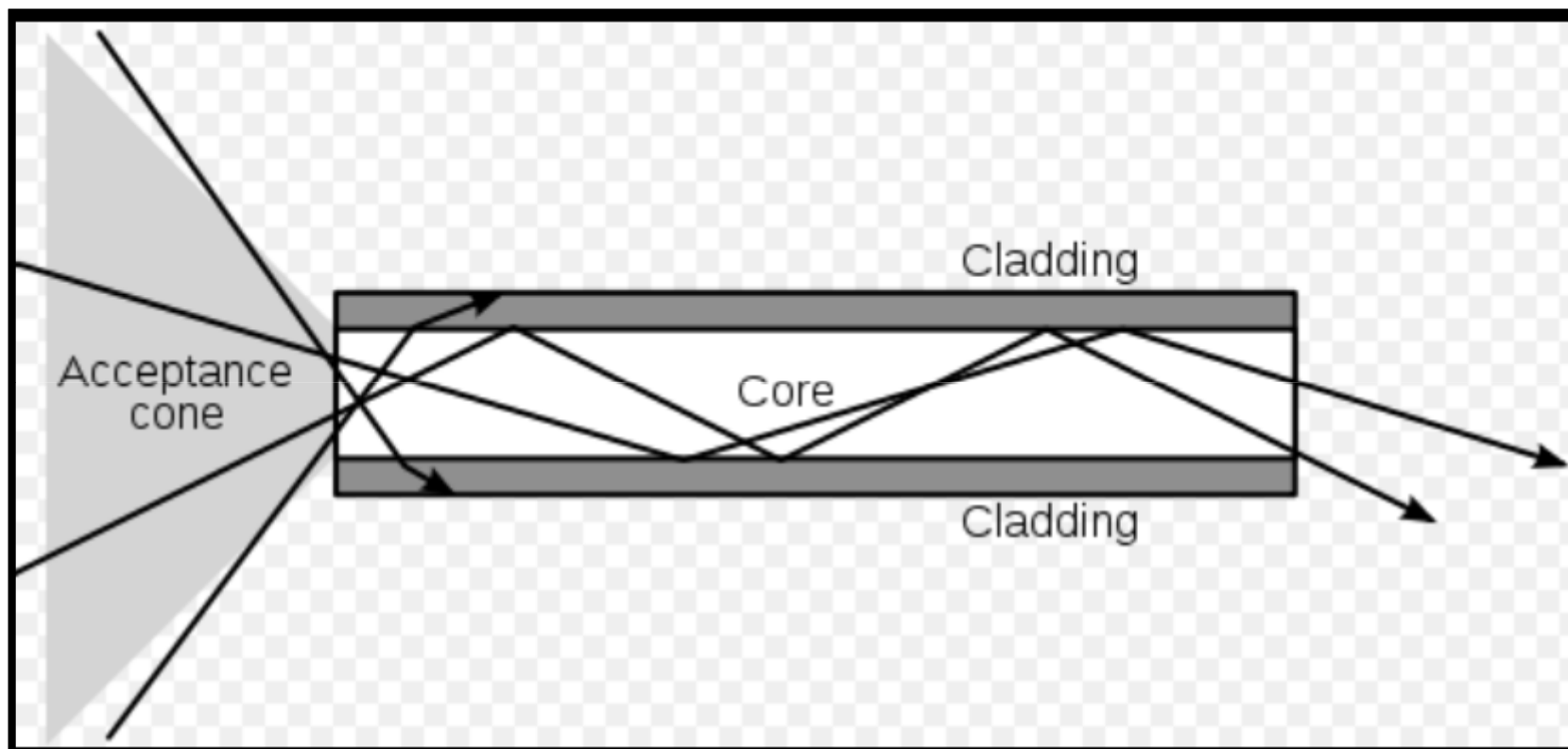
# FIBRE OTTICHE

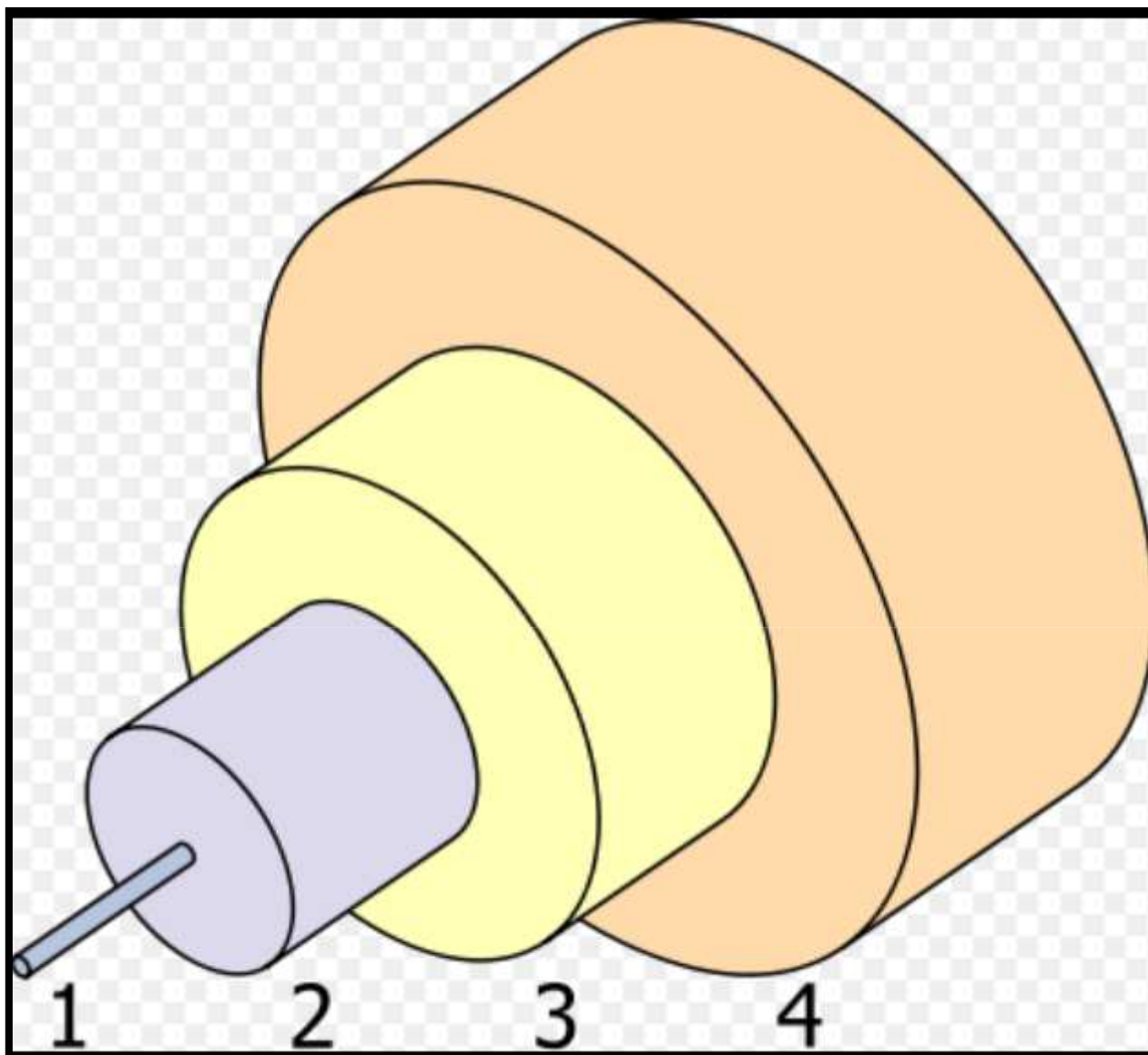
Sono fibre di materiale trasparente vetroso (o polimerico) costituiti da due strati coassiali di materiale a diverso indice di rifrazione, più elevato (per es. 1,7) per lo strato interno (core) e più basso per es. 1,45 per lo strato esterno (cladding).

In questo modo il messaggio luminoso trasmesso lungo il filamento interno subisce la legge della riflessione totale e non può mai uscire dalla fibra né perdere energia a parte l'attenuazione durante il percorso dovuta a impurezze, torbidità o colorazione che è maggiore per la fibra polimerica.

Il doppio filamento è rivestito da una guaina semirigida aramidica (buffer) che impedisce curvature troppo strette ed il tutto è protetto da una guaina (jacket) in materiale termoplastico contro calore ed umidità.

Le fibre ottiche sono sottilissime e il loro peso medio è di ca. 16 Kg/Km.





1: CORE 18  $\mu\text{m}$ ; 2: cladding 125  $\mu\text{m}$ ; 3:buffer 250  $\mu\text{m}$ ; 4: jacket 400  $\mu\text{m}$

# LUMINESCENZA



# LUMINESCENZA

Emissione di radiazioni luminose da parte di un corpo, conseguente al ritorno di elettroni da un livello energetico superiore al livello standard ad energia più bassa. L'eccitazione può essere stata provocata da:

- processi biochimici (bioluminescenza)
- reazioni chimiche (chemiluminescenza)
- differenze di potenziale applicate (elettroluminescenza)
- azione di fotoni (fotoluminescenza)
- azioni meccaniche e pressione (triboluminescenza)
- radiazioni nucleari (radioluminescenza)
- azione del calore (termoluminescenza)
- energia sonora (sonoluminescenza)
- energia di fascio elettrico (catodoluminescenza)

# TIPI DI FOTOLUMINESCENZA

- **FLUORESCENZA** = emissione luminosa contemporanea all'assorbimento della radiazione UV eccitante. Fenomeno tipico della fluoresceina e derivati.
- **FOSFORESCENZA** = emissione luminosa che continua per un certo tempo dopo la cessazione della radiazione eccitante. Si verifica con ZnS, SrAl, SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> il cui drogaggio con Ag, Mn, Cu decide del colore.
- **PUNTI QUANTICI LUMINOSI** = nanostruttura che assorbe gli UV e ne riemette l'energia ad una specifica lunghezza d'onda del visibile. I prodotti più utilizzati sono CdS e CdSe.

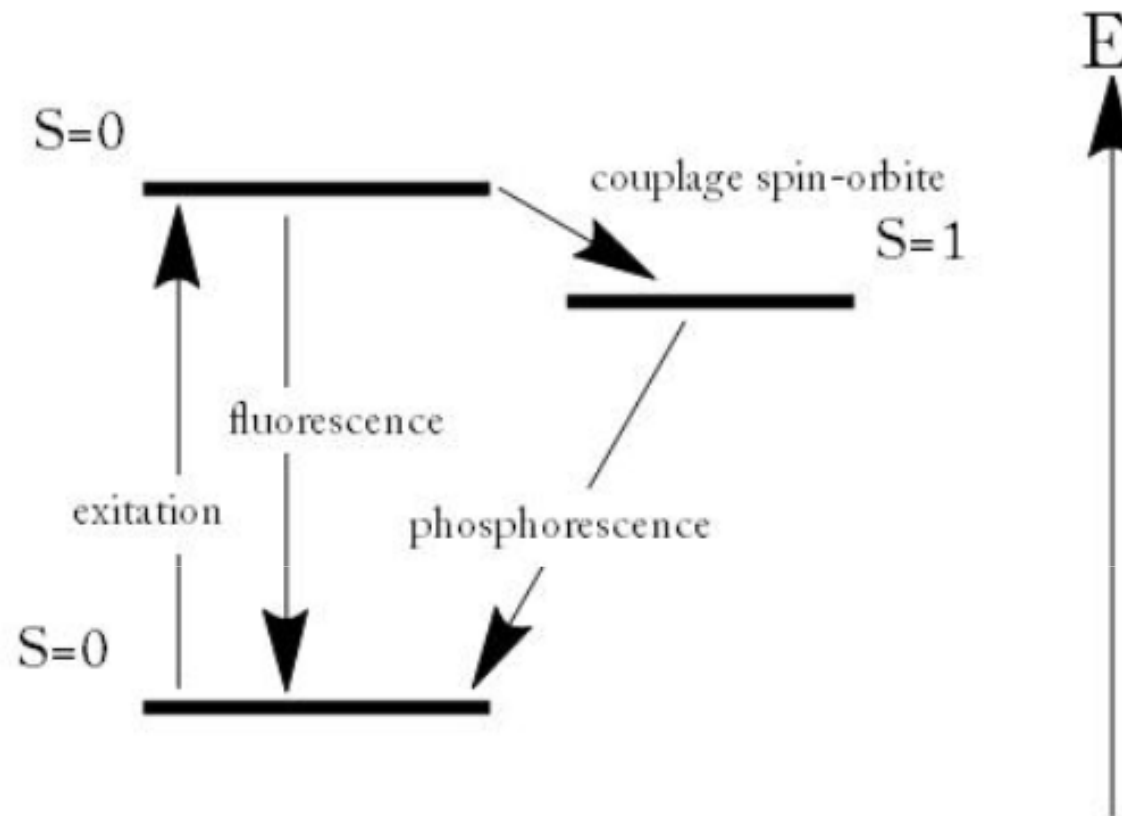
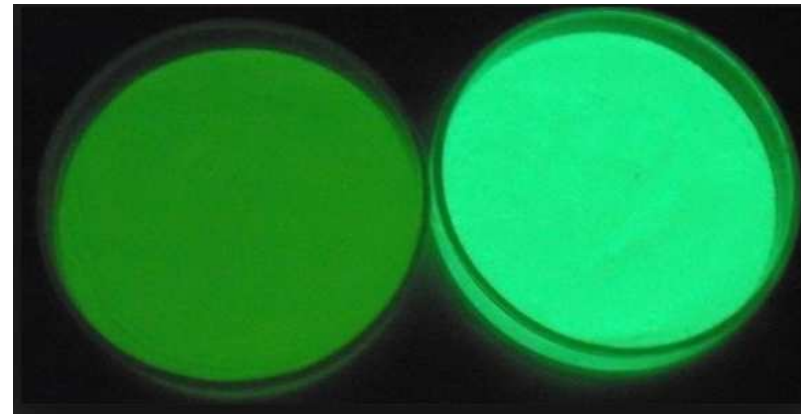


Schéma fluorescence contre phosphorescence

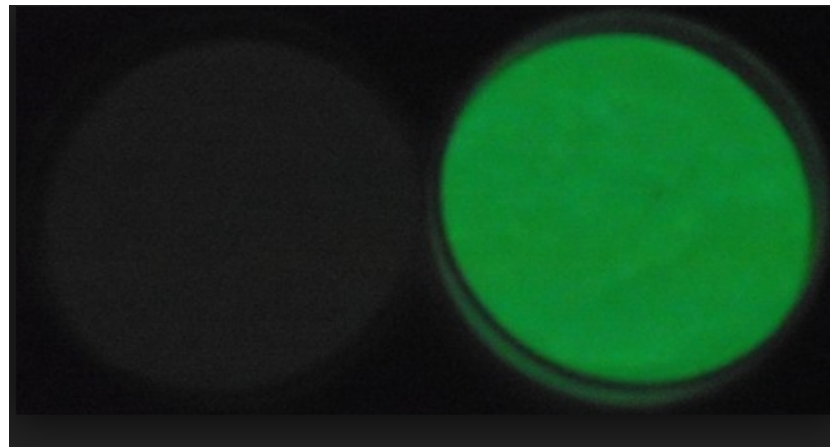
## Pigments phosphorescents – comparaison ZnS versus SrAl



Poudre de ZnS et de SrAl



Pigments dans l'obscurité

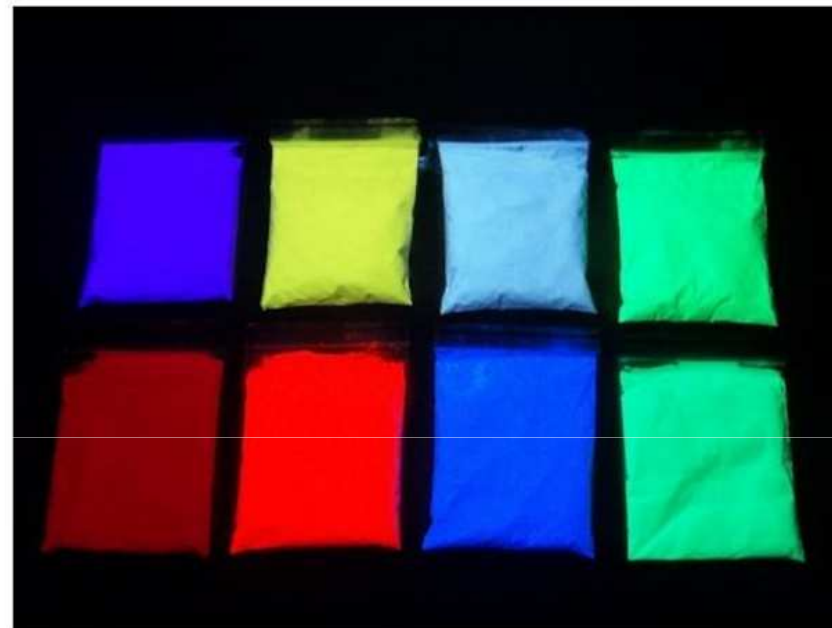


Pigments dans l'obscurité après 4 min.

# PUNTI QUANTICI



Sotto luce normale



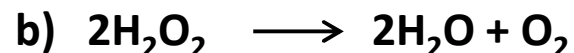
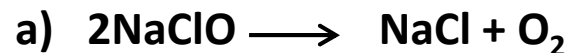
Sotto UV

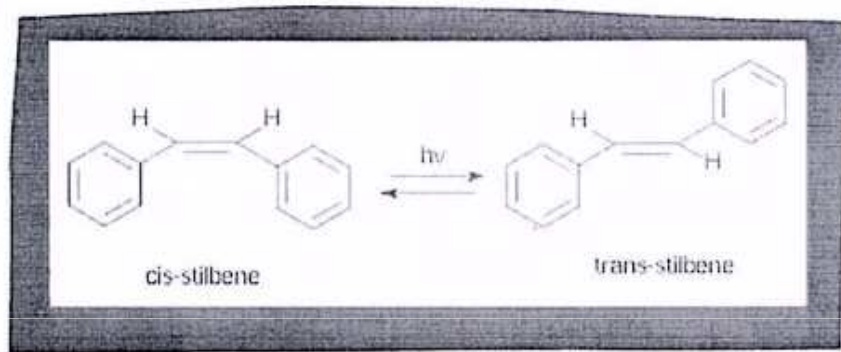
# AZZURRANTI OTTICI

Per diminuire il grado di giallo di un bianco si può aggiungere un colorante complementare cioè azzurro. Molto più efficace è l'aggiunta di un azzurrante ottico. Si tratta di un composto derivato dallo stilbene o dalla cumarina in grado di rimettere in fluorescenza la frazione UV della radiazione incidente, trasformandola in radiazione riflessa a lunghezza d'onda "visibile", di colore azzurrante. L'effetto è un aumento della luce riflessa totale, ossia un aumento del grado di bianco, congiuntamente ad una diminuzione del grado di giallo.

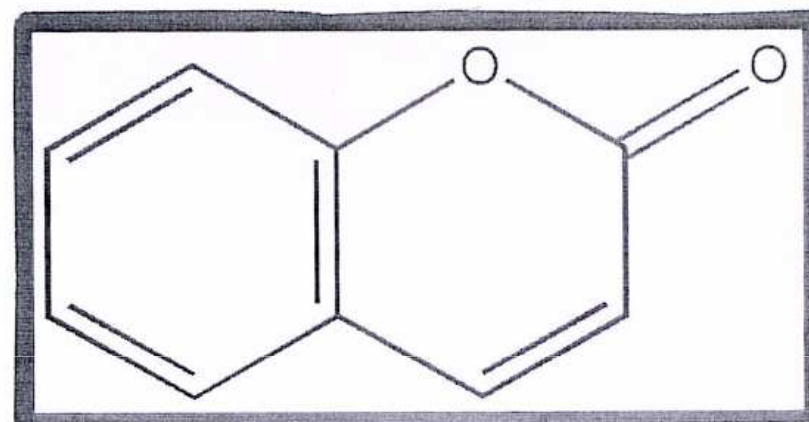
I coloranti azzurranti non ottici a differenza degli azzurranti ottici non aumentano il grado di bianco ma diminuiscono solamente il grado di giallo.

Gli azzurranti ottici trovano largo impiego come sbiancante di tessili, di carta, di prodotti vernicianti bianchi, ausiliari di detersivi, dentifrici, shampoo per capelli bianchi ecc. Non devono essere confusi con i candeggianti quali ipoclorito sodico o perossido di idrogeno che agiscono per ossidazione.

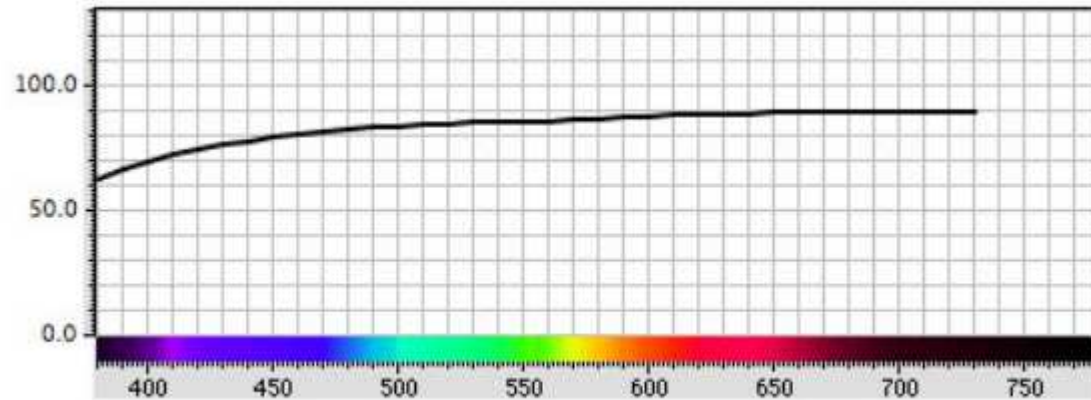




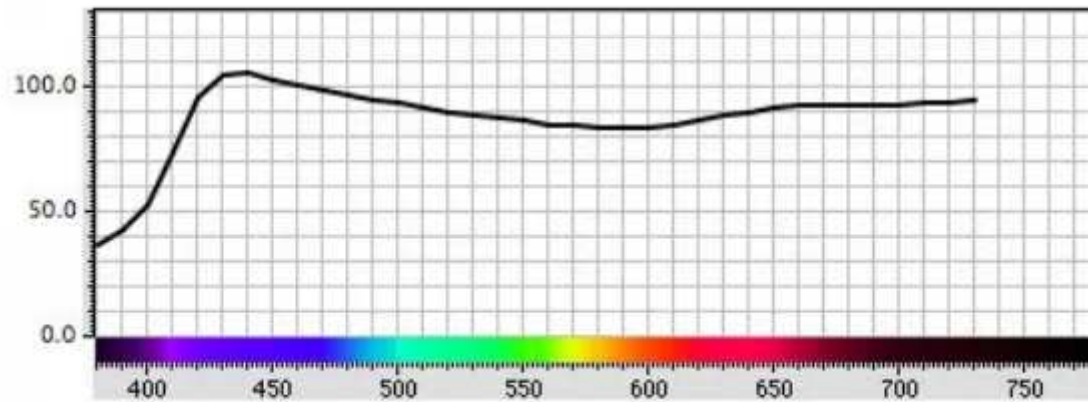
**STILBENE**



**CUMARINA**



spettro di riflessione di una carta **senza** sbiancanti ottici



effetto di uno sbiancante ottico **aggiunto** alla carta



# VISIONE AL BUIO

Molto recentemente è stato possibile sulle lenti da vista far crescere dei nanocristalli ceramici termoluminescenti in grado cioè di trasformare le radiazioni IR in radiazioni nelle lunghezze d'onda del visibile permettendo così la visione al buio.

Abbiamo già visto un fenomeno simile parlando dell'attività fotocatalitica del  $\text{TiO}_2$  che trasforma la lunghezza d'onda degli UV nella lunghezza d'onda dei raggi X e gamma ( $10^3 - 10^6$  volte inferiore)

# CRISTALLI FOTONICI

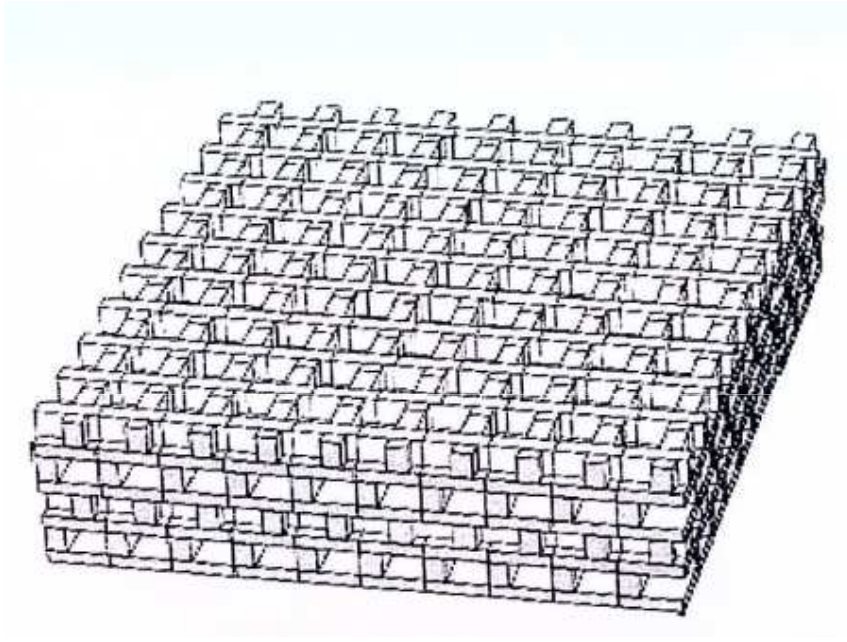
# CRISTALLI FOTONICI

Si intende per cristallo fotonico una struttura ordinata di elementi nanometrici in cui l'indice di rifrazione ha una modulazione periodica e per un gioco di interferenze rifrattive non permette l'attraversamento della radiazione luminosa che resterà assorbita completamente.

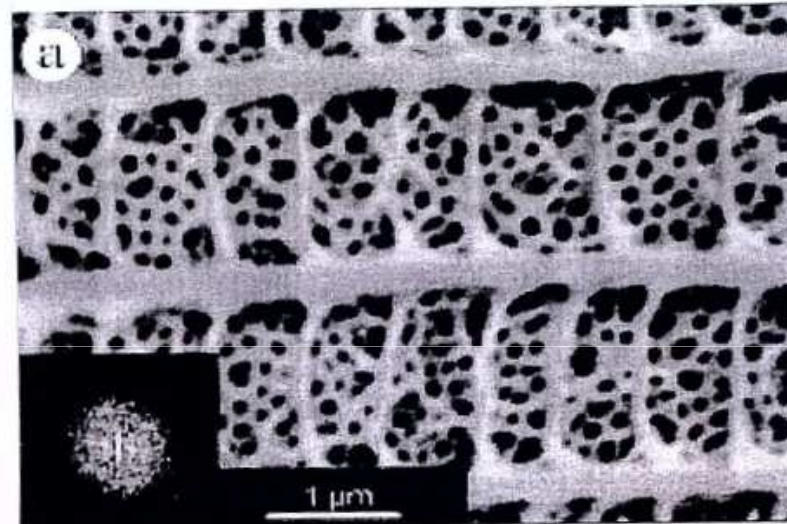
Se però la struttura suddetta presenta un'anomalia si rende possibile il mancato assorbimento di una certa lunghezza d'onda per es. quella del blu e tutta la struttura diventerà di questo colore senza bisogno di pigmento.

In natura si trovano spesso esempi di cristalli fotonici in materiali ceramici minerali, ma anche nel mondo animale (farfalle, insetti, uccelli e rettili).

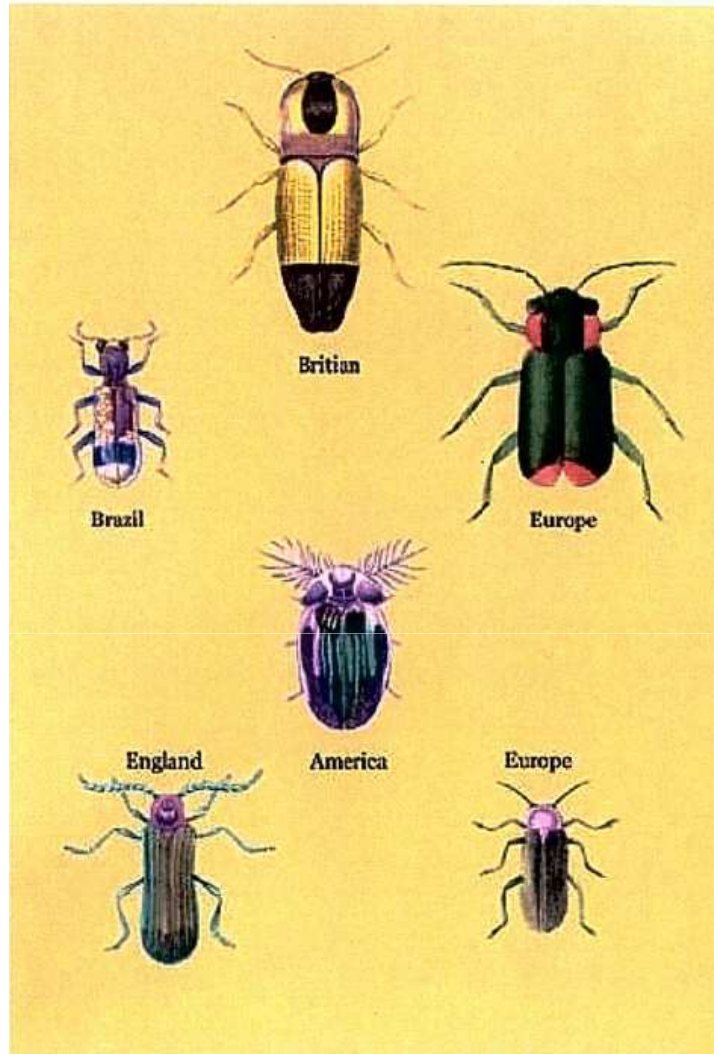
# NANOSTRUTTURE DI CRISTALLI FOTONICI



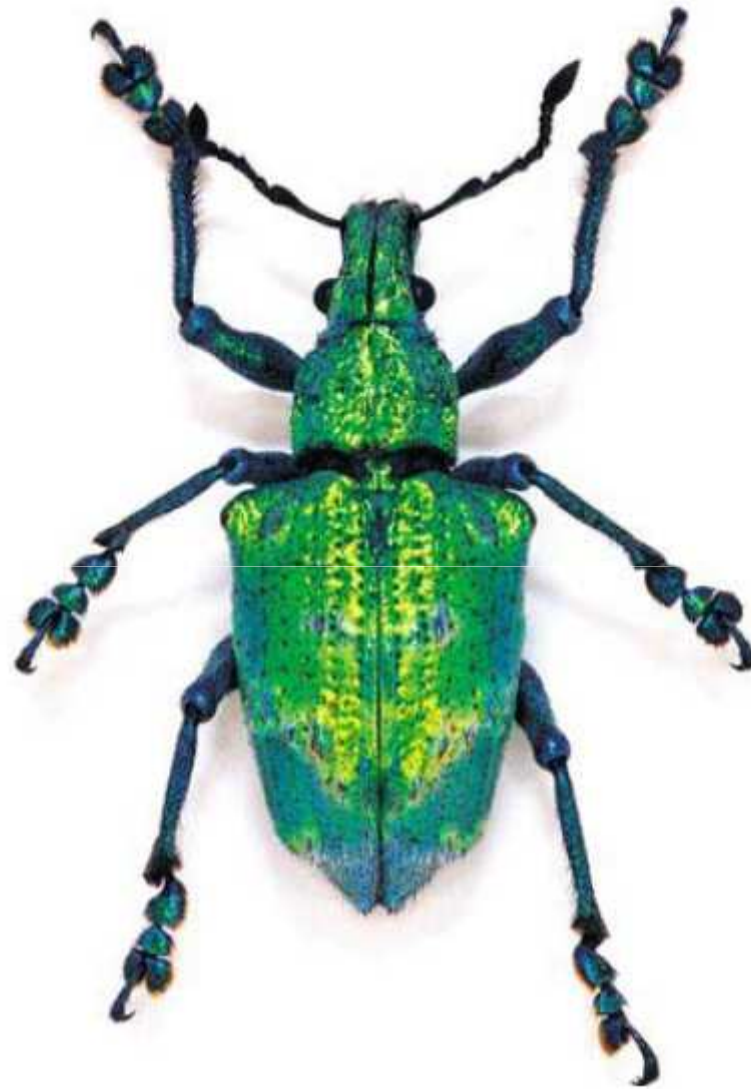
MODELLO TEORICO



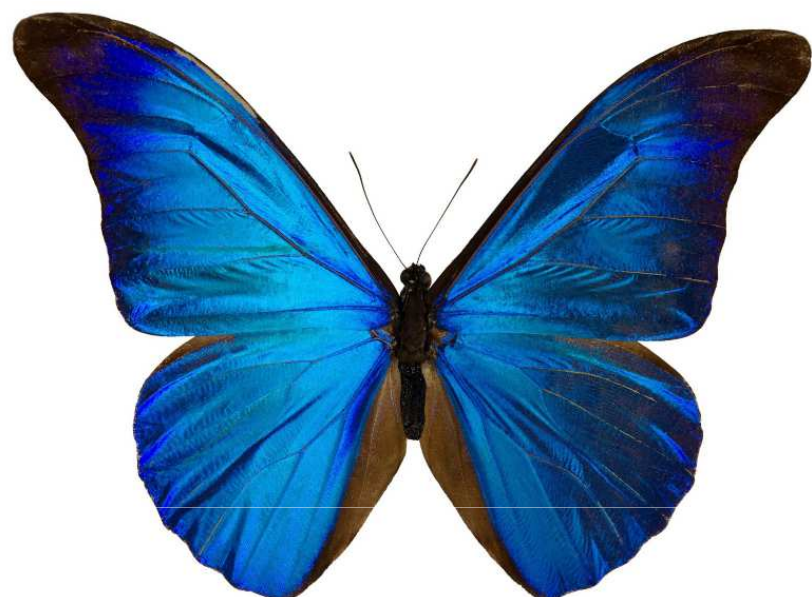
NATURALE DI FARFALLA DAPHNE



**CORAZZA DI COLEOTTERI COLORATI CON CRISTALLI FOTONICI**



LAMPROCYPHUS AUGUSTUS



**FARFALLA MORPHEO**



**FARFALLA DAPHNE**



PIUME DI PAVONE





## CAMBIAMENTO DI COLORE DEL CAMALEONTE



**SALAGINELLA WILLDENOWII (FELCE PAVONE)**

# **CRISTALLI FOTONICI CERAMICI**

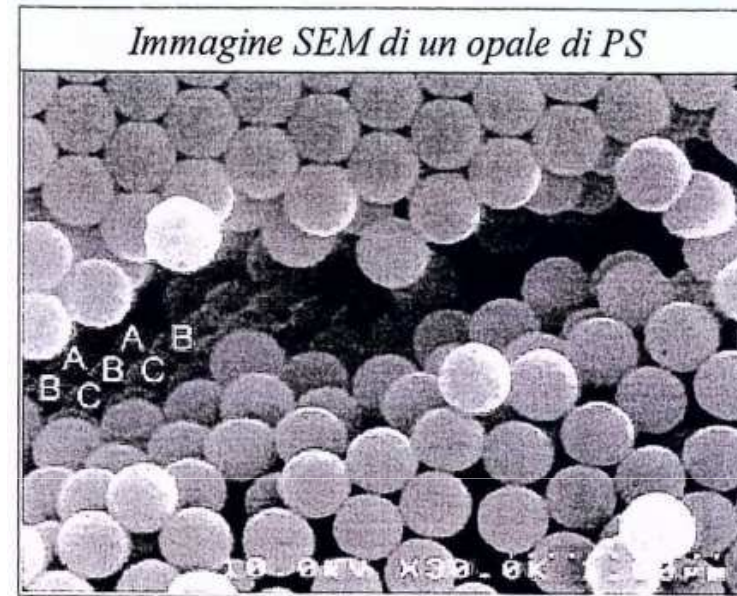
**ANCHE L'OPALE, MINERALE COSTITUITO DI SILICE AMORFA IDRATA, USATO SPESSO COME GEMMA, HA COLORAZIONI IN ASSENZA DI PIGMENTI QUINDI DETERMINATE DA STRUTTURE DI CRISTALLI FOTONICI INORGANICI.**

**LE ALTERAZIONI E VARIAZIONI DI TINTA SONO CAUSATE DA LORO ANOMALIE STRUTTURALI.**

# OPALE



**CRISTALLO FOTONICO INTEGRO**



**CRISTALLO FOTONICO CON ANOMALIA**

**SEM = Microscopio Elettronico a scansione**

**La faccia (111) indica secondo Miller un determinato piano cristallografico**



**OPALE NOBILE (silice amorfa idrata) variegata senza pigmenti**



OPALE VERDE/BLU senza pigmenti

# BIBLIOGRAFIA

- V. DEGIORGIO – *Note di Fotonica* – SPRINGER Ed. - 2015
- C. OLEARI – *Misurare il Colore* – HOEPLI - 2002
- A. RIZZI – *Colore e Colorimetria* – CET – 2005
- D. SCULLINO – *Led – Lampade e Illuminotecnica* – SANDIT - 2010
- G. FORCOLINI – *Illuminazione Led* – HOEPLI – 2017
- D. HILL – *Fibre Ottiche* – JACKSON
- C. MENCUCCINI – *Fisica II-Elettromagnetismo-Ottica-* AMBROSIANA – 2017
- A. SETTIMI – *Il Campo Elettromagnetico nei Cristalli Fotonici* – INTERSCIENZE – 2011
- S. SELLERI – *Componenti Ottici e Fotonici* – ESCULAPIO – 2012
- O. SVELTO – *Il Fascino Sottile del Laser* – DI RENZO Ed. – 2017
- J. P. HARBISON – *Laser* – ZANICHELLI Ed. - 2003

# SITOGRAFIA

- A. Licciulli – Prof. Unile – *VOCI SPECIFICHE*
- Wikipedia – *VOCI SINGOLE*