

Art. n° 9 – I COLORI IN NATURA

Cominciamo col dire che i “colori” sono sensazioni che il nostro occhio ci procura quando riceve quantità sufficienti di radiazione elettromagnetica con certi valori di lunghezza d’onda.

Parliamo di “lunghezza d’onda” poiché quelle radiazioni consistono nella propagazione di un campo elettromagnetico oscillante, vagamente paragonabile alle onde sulla superficie dell’acqua. Come le onde del mare, anche le radiazioni appena citate hanno una lunghezza (distanza fra una cresta e l’altra), ma molto piccola.

Quelle di cui parliamo, comunemente chiamate “luce”, mostrano una lunghezza d’onda compresa circa fra 0,4 e 0,8 μ (millesimi di millimetro). L’altro termine con cui s’indica la “luce” (“radiazione **ottica**”) è giustificato dal fatto che il nostro occhio è sensibile solo a quelle onde con una lunghezza nell’intervallo che abbiamo appena indicato. Ma vi sono altre radiazioni con lunghezza maggiore o minore, come si accenna nella figura seguente¹.

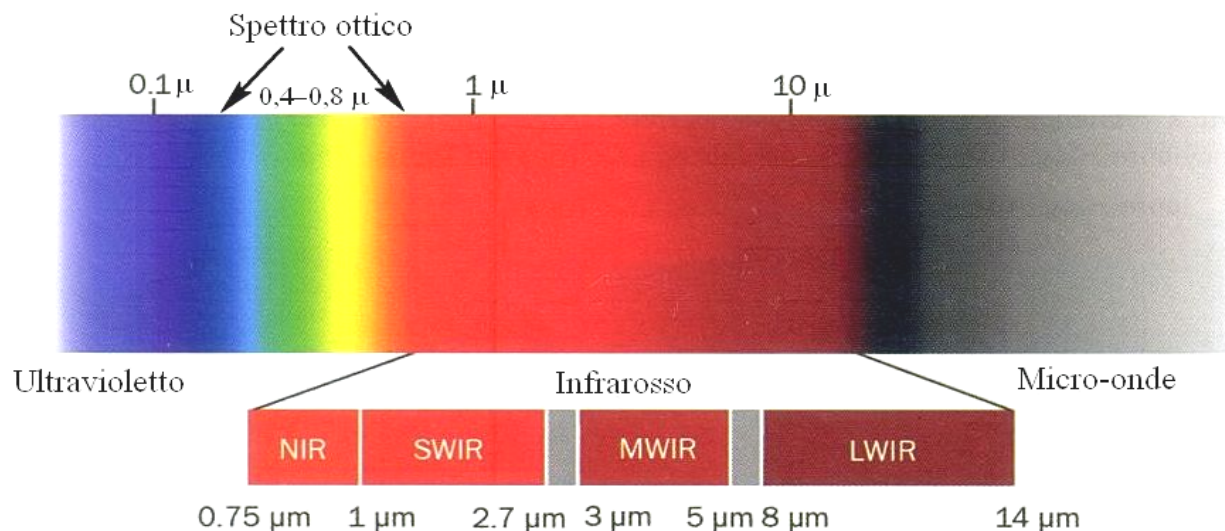


Fig. 1 – Con lunghezza fra circa 0,4 e 0,01 μ , troviamo i “raggi ultravioletti”, ben presenti nella radiazione solare. Più corti sono i “raggi X”, i raggi gamma (nella radiazione cosmica), ecc. Sopra 0,8 μ troviamo un’ampia gamma di radiazioni “che scaldano”, gli “infrarossi, fino a circa 14 μ (suddivisi in varie gamme più piccole). Poi troviamo le micro-onde, le onde corte, le onde medie, ecc. Il nostro occhio è sensibile solo ad una piccola parte di questa serie (“spettro”) di radiazioni. Le altre possono farci abbronzare, magari danneggiarci la pelle, scaldarci, far funzionare tutte le trasmissioni radio-TV, ma si possono rivelare solo indirettamente; ad esse siamo ciechi.

Nel mondo vivente, la sensibilità alla “luce” è assai variabile. Molti piccoli animali, specialmente insetti, sono sensibili all’ultravioletto (UV) e perciò molti fiori, se illuminati in UV, mostrano disegni (“marcatori”) adatti ad attirare gli insetti impollinatori, disegni invisibili al nostro occhio. Altri insetti ematofagi, succhiatori di sangue, sono sensibili all’infrarosso (IR) in modo da individuare anche al buio la presenza delle loro prede a sangue caldo: mammiferi ed uccelli – vedi le amabili zanzare.

Così molti predatori a sangue freddo, in particolare serpenti, possiedono un organo frontale mediano, anch’esso sensibile all’IR, prezioso per individuare le loro prede preferite: roditori, uccellini,

¹ Vedi, in questo sito, sezione “Esperienze di ottica”, l’art. n° 4, “Lo spettro ottico”.

ecc., che tengono la temperatura del loro corpo generalmente al di sopra di quella ambiente.

Ora, l'occhio umano è un organo otticamente molto raffinato, sia per la risoluzione (migliore di 0,1 mm in visione ravvicinata) sia per la sensibilità (migliore di molti moderni sistemi fotografici). È capace inoltre di complessi automatismi: regola il diaframma (la pupilla) e la sensibilità dello strato sensibile (la retina) in relazione all'illuminazione dell'ambiente; regola la messa a fuoco ("accomodazione") e la convergenza degli assi ottici in relazione alla distanza dell'oggetto; compensa a nostra insaputa la dominante di colore della sorgente prevalente, e così via.

Ma, d'altra parte, è molto debole nella valutazione dei colori.

Se ora esaminiamo la sensazione che l'occhio umano medio produce quando riceve radiazioni nello "spettro ottico" sopra definito (con lunghezza d'onda fra 0,4 e 0,75 μ circa), percepiamo una successione di colori come nella figura seguente, parte superiore.

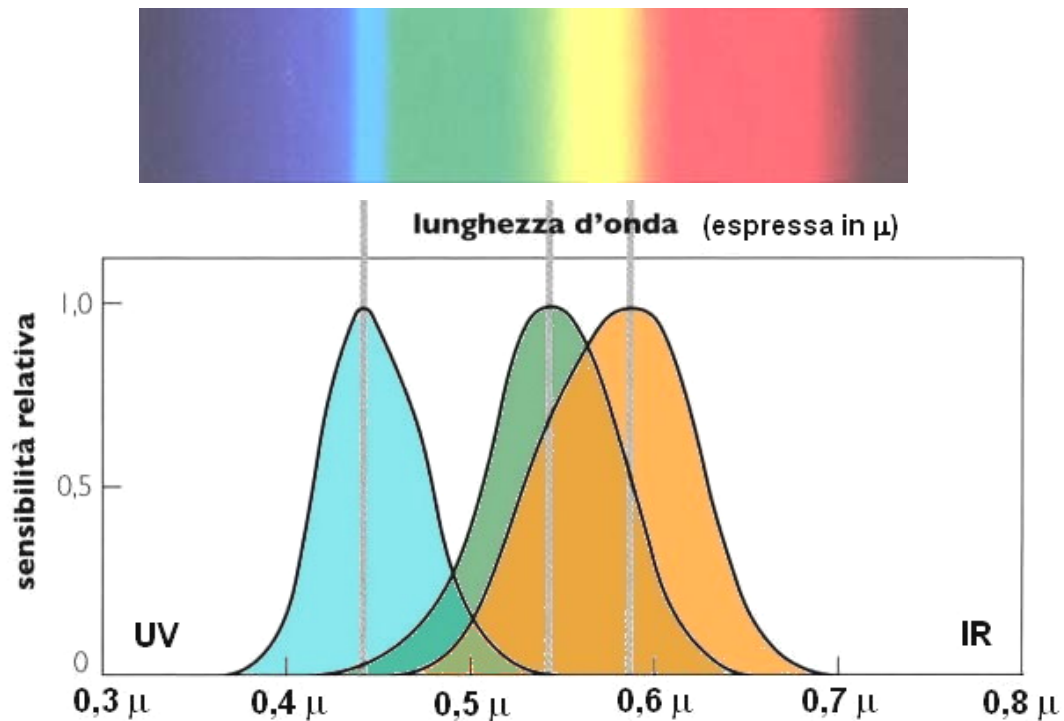


Fig. 2 – In alto: una riproduzione tipografica delle sensazioni fornite dall'occhio umano se riceve luce di lunghezza d'onda fra 0,4 e 0,8 μ (vedi la scala in basso: il simbolo μ – lettera **m** minuscola greca – indica il "micron" o millesimo di millimetro).

Le tre curve disegnate inferiormente indicano in unità relative la sensibilità dei tre tipi di cellule della retina umana sensibili ai colori, i "coni", cosiddetti a causa della loro forma. Si noti che i massimi di sensibilità sono nel blu, nel verde e nell'arancione, anche se la sensibilità si estende al rosso estremo. È dall'elaborazione degli impulsi nervosi provenienti dai tre tipi di coni che il nostro sistema visivo ricostruisce la percezione di tutti i colori presenti nello spettro ottico.

Ebbene, nel riconoscimento dei colori, è facile rendersi conto che l'occhio umano è un sistema scadente: tutti sanno che si ottiene la sensazione di verde mescolando vernici gialla e blu, per es. Esistono i cosiddetti "colori complementari": coppie di colori che, associati, danno la sensazione del bianco. Basti pensare che molte sorgenti artificiali che appaiono bianche (tubi a fluorescenza, LED, ecc.), esaminate con opportuni strumenti – spettroscopi – risultano emettere su alcune bande dello spettro ottico, solo su quelle, ma danno comunque l'illusione del bianco. Il vero "bianco" deve nascere da un'emissione sull'intero spettro.

Così va detto che molti dei colori che percepiamo non risultano dallo stimolo di "luce" di una determinata lunghezza d'onda, ma più spesso si tratta di "colori misti" che nascono da una mesco-

lanza di radiazioni in bande più o meno estese e più o meno numerose, sia pure all'interno dell'intero "spettro ottico" come sopra definito. Il nostro occhio non riesce spesso a decifrare la composizione dei colori misti.

E ancora: se un oggetto presenta punti molto fini di diverso colore, il nostro occhio ci può dare la sensazione di un colore globale assai diverso.



Fig. 3 – Un coleottero nostrano, la *Cicindela sylvicola*, appare di colore verde scuro o brunastro ad occhio nudo. L'insetto è lungo 15 mm.

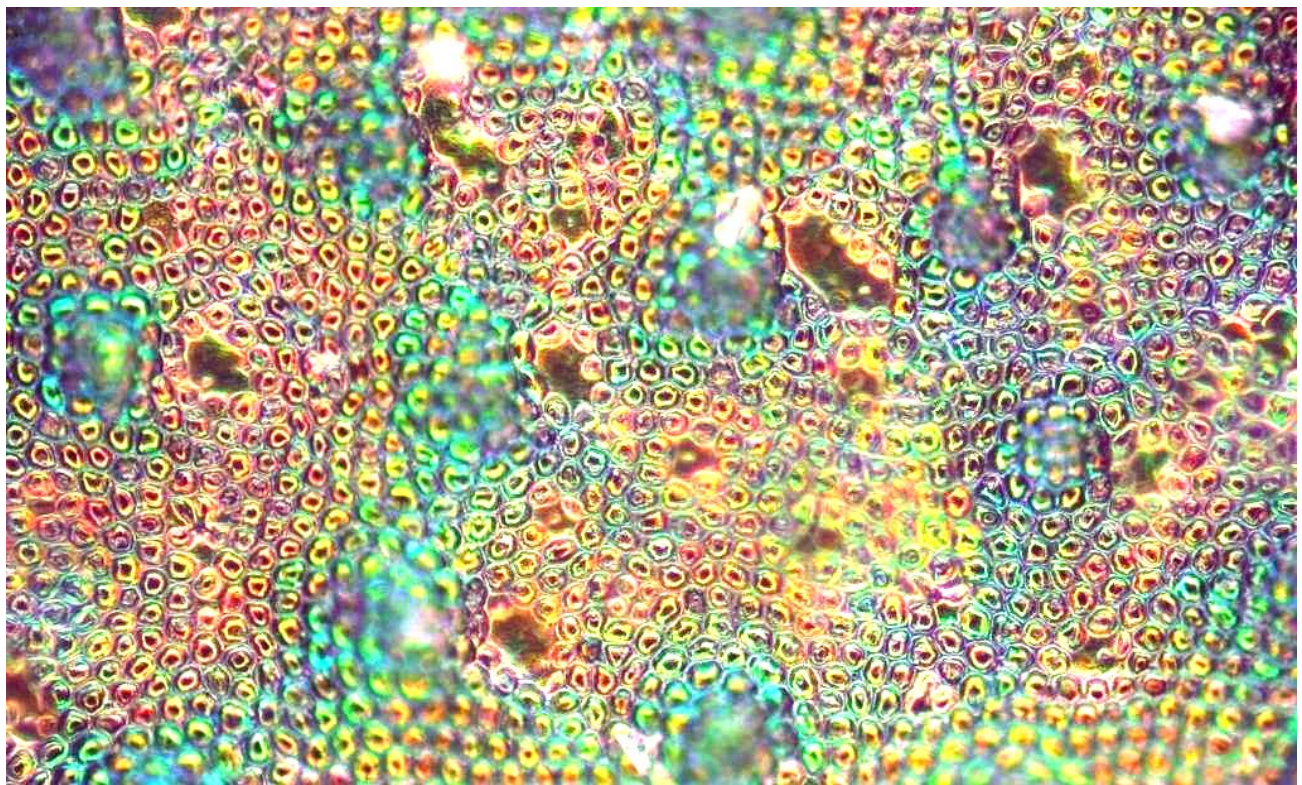


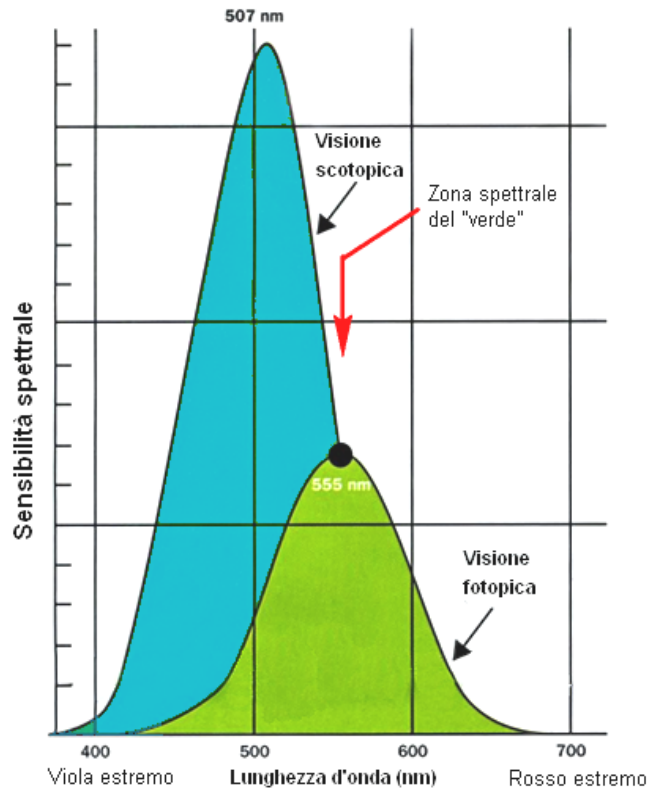
Fig. 4 – Lo stesso insetto al microscopio. La superficie delle elitre è rugosa, con innumerevoli fossette che, per i fenomeni d'interferenza che vedremo più avanti, appaiono di colori molto vivi e vari. Il nostro occhio non può risolvere i singoli punti di colore e ci mostra solo un colore "medio".

Obiettivo 20/0,40, episcopia in fondo scuro.

Del resto, la sensibilità dell'occhio umano ai vari colori dipende anche dal livello d'illuminazione dell'ambiente: di giorno (visione diurna o fotopica), siamo meno sensibili, ma con un massimo di sensibilità nel verde (adattamento al colore della luce diffusa in ambienti naturali ricchi di vegetazione – curva a destra nella figura a lato); di notte (visione notturna o scotopica) il nostro occhio diventa più sensibile e si sposta verso il blu (ancora, un adattamento al colore prevalente nella fioca luce notturna in ambiente naturale – curva a sinistra).

(Vedi, in questo sito, sezione “Biologia”, l'art. n° A 12, “L'occhio umano” e, nella sezione “Esperienze di ottica”, l'art. n° O 12. “L'occhio”)

Fig. 5



Abbiamo visto nella fig. 2 come appaiono all'occhio “medio” – che non tiene conto delle varianti individuali – le radiazioni di varia lunghezza d'onda, all'interno dello spettro ottico.

Tali colori si dicono “puri” o “spettrali” nel senso che sono dovuti ad una precisa lunghezza d'onda, e sono quindi l'opposto dei colori “misti”, che nascono da miscugli i più vari di lunghezze d'onda diverse. Per es., nella fig. 2 non compaiono il lilla, l'ocra, il marrone, il porpora, ecc.

Se si esamina una sorgente che emette in tutto lo spettro ottico (una fiamma, un corpo incandescente, come il filamento di una classica lampadina elettrica, il sole), avremo una sensazione di bianco. Le sorgenti di luce bianca ci presentano un colore singolarmente misto, appunto il bianco. Si parla di “spettro continuo”.

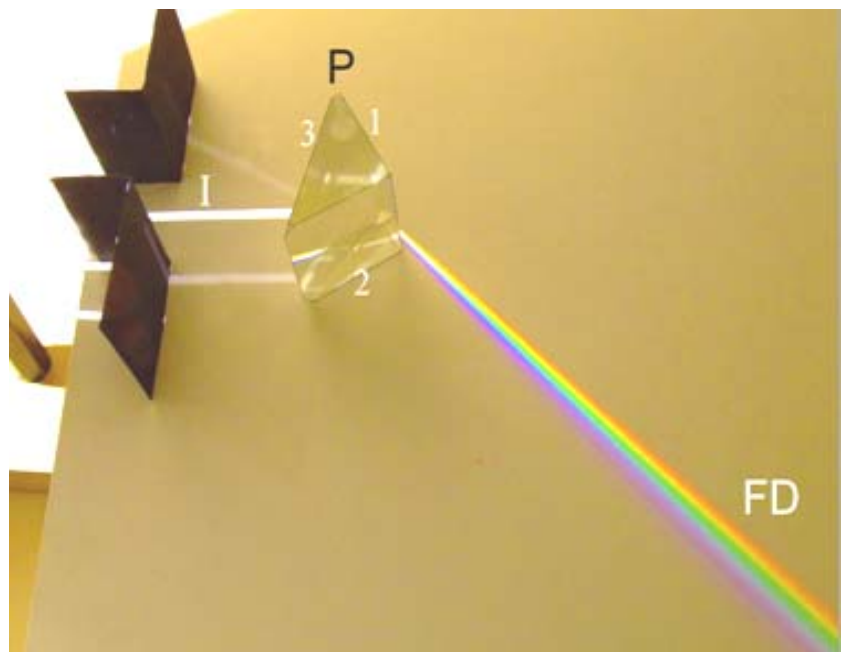


Fig. 6 – Se **I** è il fascio incidente sulla faccia 3 del prisma **P**, il fascio che è stato deviato e disperso dal prisma (**FD**) e che emerge dalla faccia 1, mostra la successione dei colori dello spettro.

Possiamo definire la cosiddetta “luce bianca” come un colore misto integrale, una radiazione che è la somma di tutte le lunghezze d'onda dello spettro ottico, uno spettro continuo totale. Se poi i vari colori sono presenti con intensità non uniforme, si parlerà di “dominante di colore”: una lampadina ad incandescenza, per es., emette su uno spettro continuo, che sembra “bianco”, ma prevale il

giallo-rosso; il nostro occhio non se ne accorge, ma i fotografi lo sanno bene.

Non sarebbe necessario precisare che il “nero” appare come il contrario del bianco, un’assenza di tutte le radiazioni ottiche, l’assenza di qualunque colore. In altre parole, il nero non è un colore, ma la sensazione che il nostro occhio ci dà quando non riceve alcuna radiazione, di qualunque colore si voglia.

La rifrazione

(vedi, in questo sito, sezione “Esperienze di ottica”, gli artt. n° O 1, “La rifrazione” ed O 2, “I prismi ottici”)

Volendo ripetere le classiche esperienze di I. Newton, è possibile visualizzare lo “spettro ottico” sfruttando il fenomeno della rifrazione. È noto che un fascio di radiazione, attraversando la superficie piana che separa due materiali trasparenti diversi, per es. un prisma di vetro immerso in aria, può venir deviato (rifratto), ma in maniera diversa a seconda della lunghezza d’onda. Con un prisma di vetro come quello della figura precedente si può così sparpagliare (“disperdere”) un fascio prodotto da una lampadina, mostrando in successione tutti i colori corrispondenti all’intera successione delle lunghezze d’onda comprese nello spettro ottico.

Ecco qui che la scomposizione della luce bianca sfruttando la rifrazione e la dispersione rappresenta un primo metodo di “produrre colori”.

In natura, è facile osservare colori spettrali abbastanza puri proprio nel caso che la luce del sole (bianca, a spettro continuo) attraversi una goccia d’acqua. Chi è abituato ad osservare la vegetazione bagnata dalla pioggia ed illuminata dal sole avrà notato che, col sole alle spalle, le gocce aderenti alle foglie possono apparire brillanti e colorate, di colore variabile a seconda della posizione dell’occhio: egli riceve la luce solare che è stata dispersa dalla goccia, come avviene in un prisma. La goccia è rigonfia, non ha facce piane come il prisma di cui sopra, e la rifrazione si complica, ma il principio è lo stesso, e la dispersione nelle gocce di pioggia col sole scoperto che illumina le nubi o la nebbia delle cascate, produce il noto fenomeno dell’arcobaleno.



Fig. 7 – Un tipico esempio di arcobaleno col sole basso sull’orizzonte. Il secondo arcobaleno, più pallido, all’esterno del primo, è dovuto ad un diverso percorso della luce all’interno delle gocce di pioggia.

(Vedi, in questo sito, nella sezione “Esperienze di ottica”, l’art. n° O 13, “L’arcobaleno”)

Poiché la rifrazione disperde un fascio di luce bianca in base alla lunghezza d'onda, come fa il prisma di fig. 6, anche nell'arcobaleno troveremo la stessa successione di colori (l'“iride”) che abbiamo visto nella fig. 2. Non si tratterà di colori puri e saturi a causa della diffusione in atmosfera, del fondo del cielo retrostante, e simili. Ma il fenomeno è lo stesso.

Altri colori da rifrazione e dispersione della luce bianca si possono osservare in materiali naturali cristallini o vetrosi (come le rocce vulcaniche dette ossidiane). Lo stesso si può dire dei prismi di vetro che pendono da tanti lampadari, ma quelli sono opera umana.

Colori da assorbimento selettivo

Molto spesso, noi osserviamo in luce naturale (sole, luna) o artificiale (lampade a “luce bianca”) oggetti non speculari, che diffondono in tutte le direzioni la radiazione che ricevono. Alcuni oggetti, che noi percepiamo come “bianchi”, diffondono con pari intensità tutte le radiazioni che ricevono, senza riguardo alla lunghezza d'onda e pertanto, con sorgente bianca, ci appaiono bianchi, con sorgente verde ci appaiono verdi, e così via.

Ma molti oggetti diffondono in prevalenza certe lunghezze d'onda (“colori”) e diffondono meno – assorbono di più – le altre. Così, un mattone diffonde in prevalenza l'arancione, a scapito di altri colori che vengono assorbiti ed alla fine scaldano l'oggetto assorbente. Se illuminiamo con luce rossa (colore puro) un oggetto verde, esso ci apparirà nero poiché assorbe più o meno totalmente il rosso. Per quanto detto sopra, il “nero” è in genere il risultato di un assorbimento totale, non selettivo.

Un oggetto che noi chiamiamo comunemente “colorato” non fa altro che operare un assorbimento selettivo ed una diffusione selettiva sulla luce che riceve, alterandone la composizione spettrale. È un caso assai comune. Fra i minerali, tutti conoscono le sfumature dal giallo al rosso al bruno degli ossidi di ferro – quelle che i pittori chiamano ocre, terra di Siena, terra bruciata –, il rosso vivo del cinabro, il verde della malachite, il viola dell'ametista ...

Interessante il caso delle agate e pietre affini. Si tratta di noduli di silice (biossido di silicio), durissimi, che si formano per aggregazione spontanea di particelle di silice presenti in molte rocce sedimentarie nelle profondità marine (sabbie, argille, calcari) e provenienti sia da resti organici (gusci microscopici di radiolari e diatomee, spicole di alcune spugne, ecc.), sia da silice prodotta dalla disgregazione di rocce cristalline e trasportata dalle acque fluviali. La silice, di per sé, sarebbe quasi incolore ma, appena viene a contatto con altri minerali sospesi nell'acqua, assume colori svariatisimi; se il deposito avviene in acque calme, per apposizione di strati successivi, si formano le “agate striate”, con aloni concentrici.

Fig. 8 – Nessuno può dubitare che, sul fondo di quel mare in cui si è formato questo nodulo di silice, si trovassero degli ossidi di ferro ...

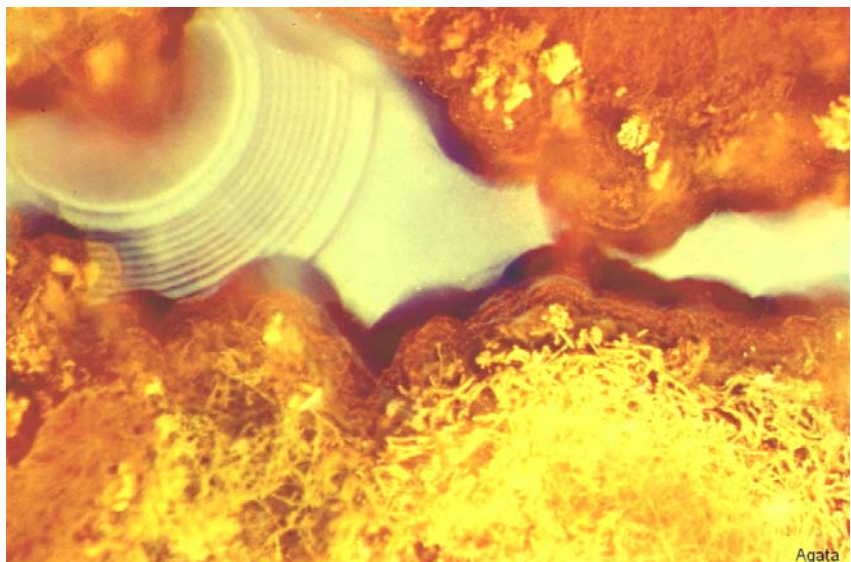


Fig. 9 – ... e nemmeno in questo caso.

La zona centrale bluastra è invece più trasparente: quando si è formata, le acque erano più limpide.

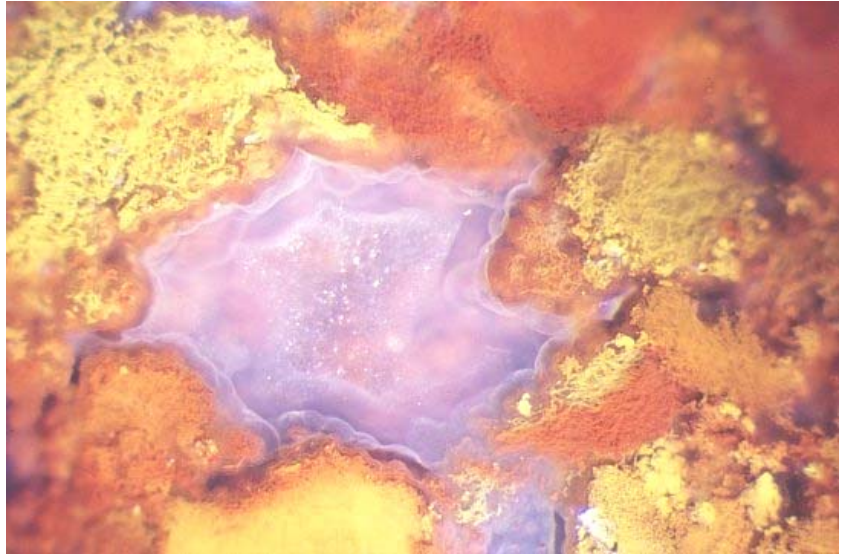


Fig. 10 – Un esempio di agata zonata.

Le striature rappresentano fasi successive di deposizione delle particelle di silice. La differente colorazione dei vari strati dipende dalla composizione delle acque mentre si depositava ogni singolo strato.



Agata

Anche i colori dei fiori, delle piume degli uccelli, dell'epidermide di molti animali, sono dovuti a sostanze coloranti ("pigmenti") che presentano una diffusione selettiva. Molti colori del genere, specialmente nel mondo animale, hanno un significato biologico preciso. Vediamo qualche esempio.

Fig. 11 – Molte specie di ofiure ("stelle serpentine") mostrano colori assai vari: quando in uno stesso ambiente, come i mari tropicali, si trovano a convivere molte specie simili per forma, ma diverse per colore, l'eventuale predatore rimane disorientato poiché non riesce a concentrarsi, ad "addestrarsi" su una particolare specie ed è confuso dalla varietà dei colori.

Tale varietà diviene quindi un meccanismo di difesa.

Le specie note di ofiure sono circa 2.000.

(da: PEARSE V. e J. e BUCHSBAUM M. e R.- Invertebrati viventi - Zanichelli, Bologna, 1993, p. 805, modif.)



Fig. 12 – Quando una specie assume il colore dell’ambiente in cui vive, tende a nascondersi rispetto ai potenziali predatori.

Si parla di “mimetismo criptico”, “da camuffamento”.

Al centro della figura, si vede un bruchetto di geometride – una numerosa famiglia di farfalle diurne, ben nascosto fra le foglie verdi di un epilobio.



Fig. 13 – Quando un animale mostra invece colori evidenti, si tratta spesso di specie sgradevoli o velenose, che tendono a farsi riconoscere per avvertire il predatore di “tenersi alla larga”.

Si parla di mimetismo “aposematico”, di avvertimento, di allontanamento.

Qui si tratta di una farfalla nostrana, la Zigena, il cui sangue contiene derivati dell’acido cianidrico.



In certi casi, il colore dell’animale è variabile, per adattarsi volta per volta a quello dell’ambiente. Si pensi a molti camaleonti, alle seppie e calamari. In questi casi il colore della pelle è dovuto a particolari cellule (“cromatofori”) a forma stellata, cellule con prolungamenti ramificati che si possono retrarre od espandere. Poiché i cromatofori si trovano dispersi nella pelle, ma sono di vario colore, l’animale assume il colore di quella categoria di cellule che sono in massima espansione, mentre le cellule di altri colori si retraggono.

Esistono anche insetti con esoscheletro totalmente riflettente: sono sempre mimetici, poiché riflettono comunque l’ambiente in cui si trovano in ogni momento della loro vita. L’origine di queste cuticole riflettenti dipende però da altri fenomeni (interferenze multiple) di cui parleremo fra poco.

Inutile ricordare poi che il mondo naturale è in prevalenza di colore verde (vegetazione) e pertanto l’evoluzione ci ha spinti verso una maggior sensibilità al verde (vedi la fig. 5); il colore delle parti vegetali addette alla fotosintesi clorofilliana è appunto dovuto a particolari organuli cellulari (cloroplasti) rimpinzati di un pigmento di colore verde (figure seguenti).

Fig. 14 – In una foglia di muschio, almeno di molte specie, le cellule sono disposte in unico strato e quindi mostrano bene il loro contenuto.

Ogni cellula contiene molti cloroplasti ovoidali che si spostano automaticamente al suo interno per meglio utilizzare la luce del giorno.

Obb. 20:1

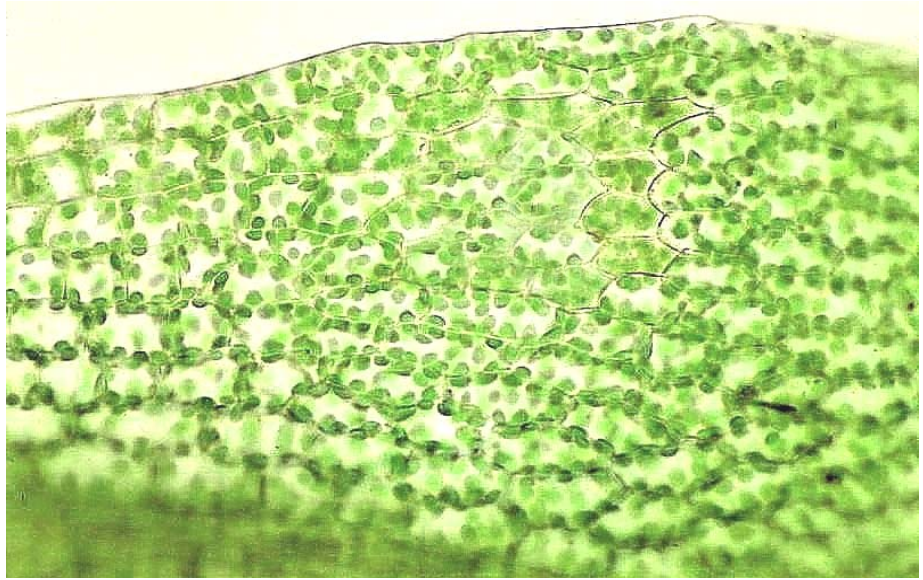


Fig. 15 – Nelle foglie di una pianta superiore (Angiosperma), invece, si susseguono vari strati di cellule. Le più esterne, in questo caso alla superficie superiore (epidermide) sono incolori perché prive di cloroplasti; lo strato sottostante (“a palizzata”) è formato da cellule prismatiche appressate e colme di cloroplasti.

Sezione trasversale.

Obb. 40:1



Fig. 16 – Sotto lo strato a palizzata, un altro strato di cellule verdi (“parenchima lacunoso”) con struttura spugnosa, in modo da lasciar circolare l’aria e l’anidride carbonica, necessaria alla fotosintesi.

Sezione tangenziale.

Obb. 20:1

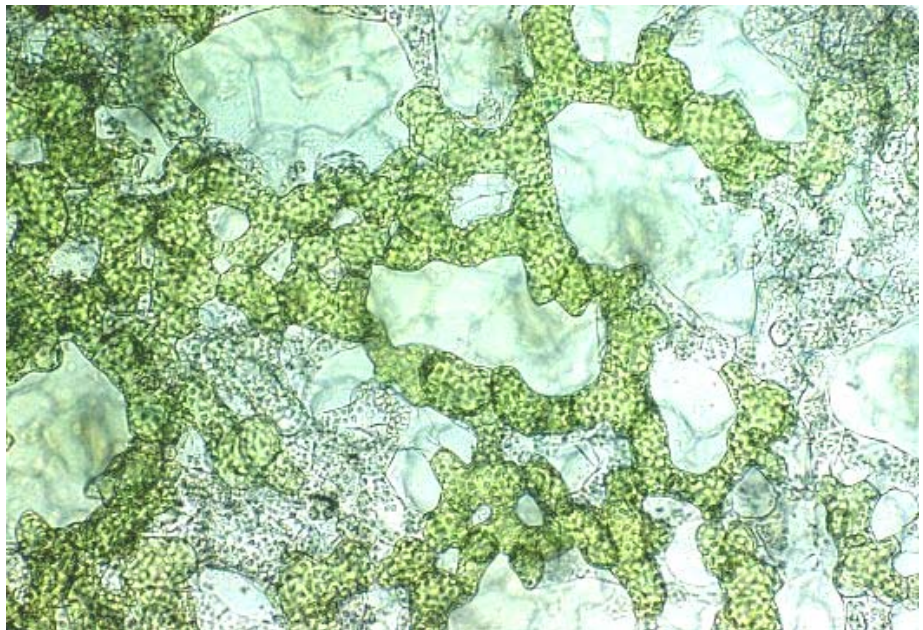
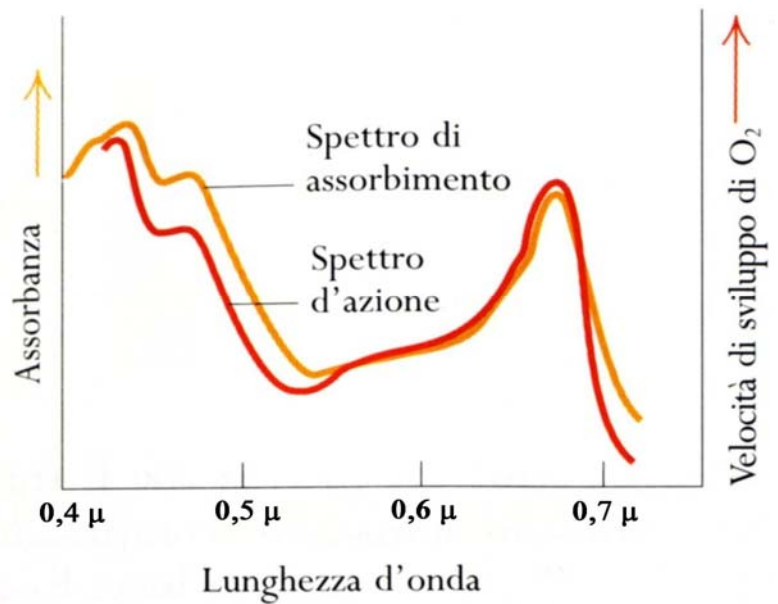


Fig. 17 – Lo spettro d'assorbimento della clorofilla (curva arancione) si concentra su due regioni spettrali: sul viola, poco sopra il limite dello spettro visibile, e sul rosso, all'estremo opposto. Poiché l'assorbimento nel verde (fra $0,5$ e $0,6 \mu$) è minore, la clorofilla appare verde.

Le regioni spettrali per le quali la sintesi di glucosio e la produzione di ossigeno sono maggiori (curva in rosso), sono quasi le stesse.



In altre piante verdi vi sono organi di altro colore: basta pensare ai fiori ed a certe foglie. In quei casi, magari assieme alla clorofilla, vi sono altri pigmenti organici, carotinoidi, i flavoni, gli antociani, ecc. Quando certi organi vegetali verdi, specie in autunno, muoiono, riassorbono buona parte dei loro pigmenti; spesso la prima ad essere recuperata è la clorofilla e, per qualche tempo, prevalgono altri pigmenti che danno alle foglie morte colori dal giallo al rosso.

In altre piante, come i licheni, si trova clorofilla, ma questa difficilmente prevale ed è mascherata da altri pigmenti; da qui i colori molto vari dei licheni.

Fig. 18 – La *Lecidea geographica*, un lichene crostoso diffuso sulle rocce contenenti molta silice, presenta ampie zone superficiali giallo vivo, ma le cellule contenenti la clorofilla (gonidi) si trovano in profondità.

I licheni producono spesso pigmenti specifici, che non si rinvengono in nessun altro gruppo vegetale.



Finora abbiamo tacitamente limitato il nostro discorso al caso di un oggetto opaco con superficie diffondente, che noi osserviamo dallo stesso lato da cui viene illuminato.

Ma conviene parlare anche di oggetti trasparenti, che possiamo osservare interponendoli fra il nostro occhio e la sorgente. E bisogna anche distinguere fra oggetti limpidi, come certi cristalli e prodotti industriali (plastiche, liquidi e vetri colorati) ed oggetti diffondenti come molti cristalli contenenti impurezze, liquidi torbidi ed altri prodotti umani.

In ogni caso, la radiazione che attraversa questi oggetti può essere parzialmente diffusa dalle minute irregolarità dell'oggetto o da micro particelle in esso disperse (pensiamo al latte), ma co-

munque viene assorbita o diffusa selettivamente, certi colori più di altri, e l'oggetto apparirà del colore complementare.

Colori da riflessione selettiva

Così come molti oggetti diffondono più certi colori di altri ed appaiono colorati se illuminati con luce bianca, così alcuni oggetti, meno comuni, riflettono selettivamente, vale a dire riflettono più certi colori che altri.

Basti pensare al colore dei metalli, anche lucidati: il rossiccio del rame, il giallo dell'oro e dell'ottone, il grigio del ferro e dei suoi derivati, ecc. L'oro, poi, appare giallo in riflessione ma, in sottili fogli, appare verde in trasparenza. Riflessione e trasmissione avvengono in bande diverse dello spettro ottico.

Anche molti minerali appaiono con riflessi metallici colorati, come il giallo-oro della pirite, il grigio della galena, e così via. Questo tipo di riflesso si riscontra spesso in solfuri.

Lo stesso fenomeno si ritrova in alcuni coloranti organici, come il blu di toluidina, verdastro in riflessione, viola in trasparenza.

Colori da diffrazione

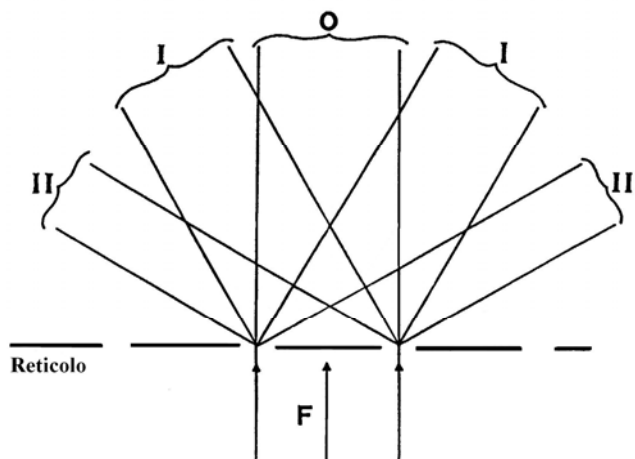
Qui le cose si complicano. Immaginiamo un oggetto sottile formato da righe parallele di diversa trasparenza o di diverso spessore, che chiameremo genericamente "reticolo". Tale oggetto può essere assolutamente privo di colore. Immaginiamo di illuminarlo da un lato con un fascio di luce bianca (F in figura) e consideriamo il caso più semplice in cui il reticolo presenta righe trasparenti ed opache alternate.

Sempre per chiarezza, occupiamoci di una sola coppia di righe trasparenti, che lasciano passare una piccola parte del fascio incidente F.

Nella stessa direzione del fascio F si propagano due fasci, due onde, perfettamente in fase, che percorrono lo stesso tragitto (O); i loro effetti si sommano e, nella direzione O, troveremo un fascio simile a quello F, di luce bianca.

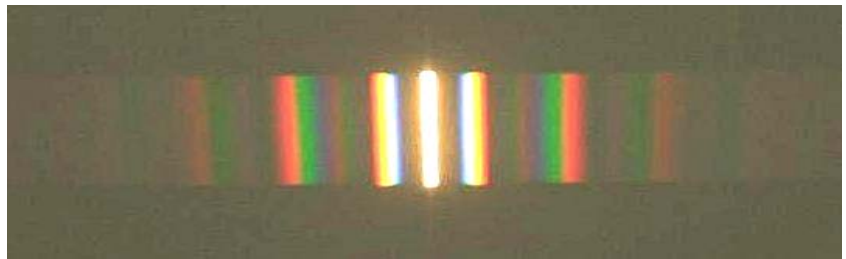
Se ora consideriamo una direzione obliqua, come quella indicata con I, si può dimostrare che anche in essa si propaga un fascio, per un fenomeno provocato dalla natura ondulatoria della luce, chiamato appunto "diffrazione". Ma i due fasci in direzione I partono da un piano inclinato e non sono quindi in fase: l'uno sarà in ritardo rispetto all'altro; questo significa che, se l'inclinazione è corretta, potrebbero trovarsi in opposizione di fase, ed in quella direzione avremo buio, ma potrebbero trovarsi sfasati di una o più lunghezze d'onda, ed in questo caso i loro effetti si sommano e si avrà un fascio più o meno intenso.

Fig. 19 – Nella figura, il reticolo sottile è visto di taglio ed è illuminato dal basso (F). Il fascio diretto (O) è bianco poiché nasce da fasci sempre in fase. I fasci diffratti I sono simmetrici rispetto al fascio O e sono dovuti allo sfasamento di una lunghezza d'onda fra i fasci diffratti da due fenditure contigue. Se lo sfasamento è di due lunghezze d'onda, avremo i fasci II, e così via.



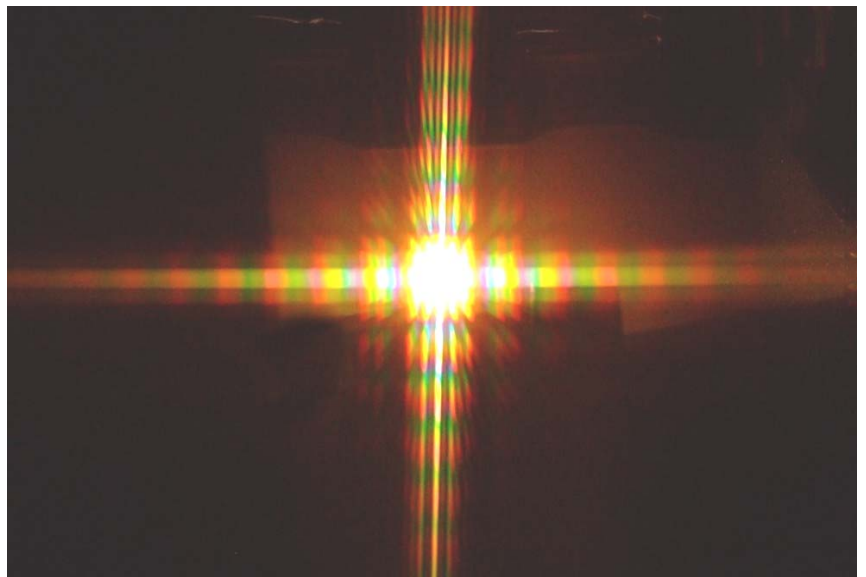
La faccenda si complica poiché, come abbiamo appena detto, il fenomeno dipende dalla lunghezza d'onda. Avendo supposto di operare con luce bianca, l'inclinazione dei fasci (e non ci sarà solo quello indicato con I) sarà diversa per ogni colore dello spettro e, su uno schermo posto ad una certa distanza dal reticolo, osserveremo dei fasci ad arcobaleno come si vede in figura.

Fig. 20 – Con un proiettore da diapositive ed un telaio opaco con una fessura, è facile ottenere un fascio sottile che, dopo aver attraversato un reticolo, produrrà questa figura su uno schermo lontano.



Per osservare questo fenomeno si può fare questa semplice prova. Di notte, ci si metta ad una certa distanza da un fanale, o comunque da una sorgente piccola ed intensa, purché di luce bianca. Se ora s'interpone fra l'occhio ed il fanale la tela di un ombrello aperto od un pezzo di fodera da vestiti, comunque una tela sottile con fili diritti e ben ravvicinati, avremo in mano un reticolo con due serie di fenditure incrociate, la trama e l'ordito della tela, e potremo vedere due figure come quella precedente, ma incrociate (figura seguente). Del resto, tutti conoscono i riflessi iridescenti dei CD e DVD, legati ai finissimi solchi concentrici in cui sono dispersi i dati digitali incisi in essi.

Fig. 21 – Così potrebbe essere visto di notte un fanale lontano attraverso la tela di un ombrello. Se le due serie di fasci colorati non sono perpendicolari, come in questo caso, è segno che i due sistemi di fili della tela non sono ad angolo retto.



In natura, possiamo vedere questi colori da diffrazione, anche se molto irregolari, in molti campioni di madreperla: in quel caso il reticolo è costituito dalla struttura fibrillare degli strati di carbonato di calcio che, assieme a sostanze organiche come la conchiolina, costituiscono la conchiglia di molti molluschi.

Nella madreperla prevale però il fenomeno dell'interferenza da strati sottili, che vedremo più avanti.

Nelle scaglie di molti pesci e rettili è presente la guanina, una base purinica, concentrata in speciali cellule (iridociti), sotto forma di microcristalli incolori. Sono queste strutture microscopiche a conferire l'iridescenza tipica di questi animali.

Strutture assimilabili a reticoli, contenenti fibre, striature o punteggiature parallele si trovano spesso negli insetti.

Tutti conoscono le scagliette che ricoprono le ali della maggioranza delle farfalle, ma non tutti sanno che tali scagliette si trovano anche in altri ordini di Insetti: Ditteri (zanzare e simili), Coleotteri, Tisanuri (il "pesciolino d'argento"), ecc.

Ebbene, queste scagliette hanno spesso una struttura assai complessa. Si può trattare di due sottili fogli di una proteina particolare, simile alla cheratina dell'epidermide e dei peli dei mammiferi, tenuti a distanza fissa, e molto piccola, da sottili colonnine perpendicolari ai fogli.

I due fogli possono essere solcati da striature parallele, e qui avremmo già un vero e proprio re-

ticolo come sopra definito, ma anche le colonnine distanziali sono spesso disposte in file regolari e costituiscono un secondo reticolo, con striature spesso perpendicolari a quelle dei due fogli. Non ci vuole altro per creare un complesso sistema di fasci diffratti. I colori prodotti saranno spesso misti e confusi fra loro, ma non deve sorprendere: le strutture naturali non sono molto regolari.

Fig. 22 – Un coleottero nostrano di pochi millimetri, il *Phyllobius* (Curculionidi), assai diffuso in tutto il paese, appare verde ad occhio nudo, ma in realtà il suo tegumento è nero, coperto da numerose scagliette verdi, con evidenti funzioni mimetiche.

Qui si vede una parte del dorso, con la fessura fra le elitre.

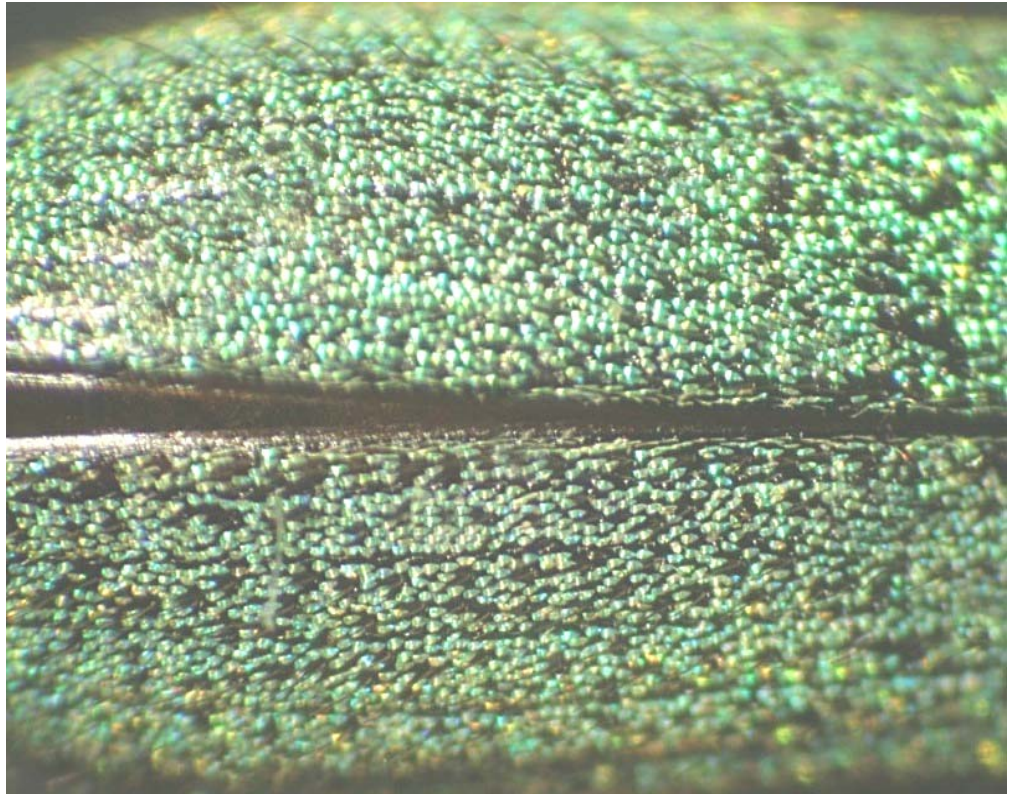
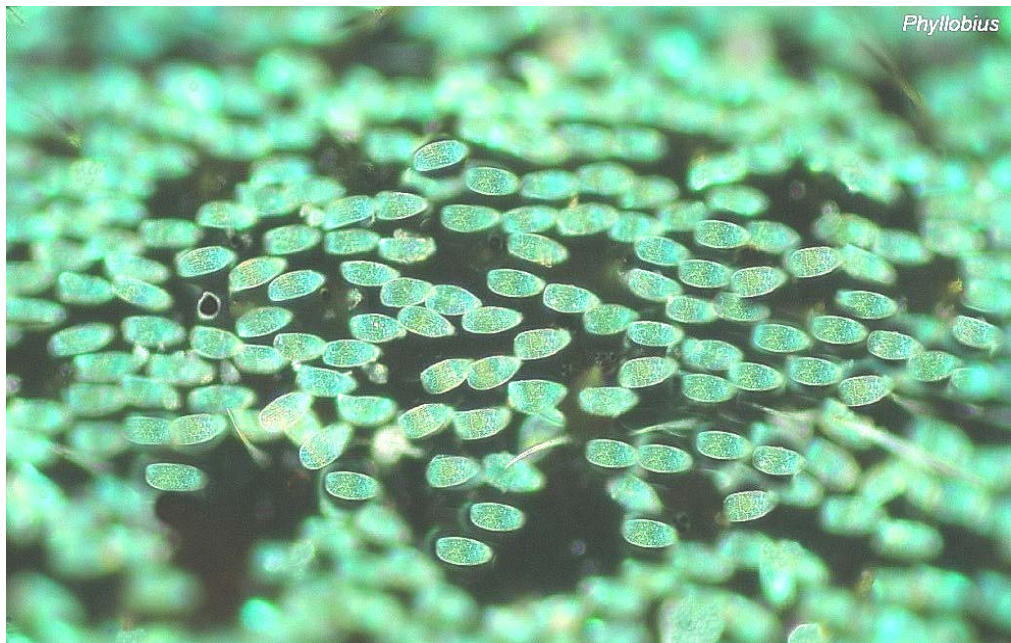


Fig. 23 – Con circa 500 ingrandimenti, le scagliette appaiono striate con colori troppo vivi perché siano attribuibili ad assorbimento selettivo.

In mezzo alle scagliette, alcune setole bianche.

La foto qui a lato è stata ripresa in luce polarizzata per ridurre i riflessi alla superficie delle scagliette; ne ripareremo.

Episcopia in fondo scuro.



La presenza di scagliette iridescenti si riscontra in molte altre specie di coleotteri della stessa famiglia, soprattutto in quelle delle foreste tropicali.

Fig. 24 – Altri coleotteri della famiglia Curculionidi, genere *Othiorrhynchus*, di paesi tropicali.

Le scagliette sono distribuite su un esoscheletro sempre nero, ma in fasce o macchie.



Già, ad occhio nudo, in certi casi, le ali delle farfalle mostrano colori iridescenti; se l'apparenza dei riflessi è metallica, si tratta spesso di fenomeni d'interferenza, di cui parleremo presto, ma ora parliamo dei fenomeni di diffrazione.

Fig. 25 – Una farfalla diurna molto comune (*Inachis Io*), è detta “pavonia di giorno” o “vanessa pavone” per via delle macchie oculari che ricordano quelle della coda del pavone. Altre farfalle diurne o notturne (“pavonia maggiore”, “pavonia minore di notte”) possiedono analoghe macchie oculari, con funzione di deterrenza nei confronti dei predatori che vi vedono il capo di un grande animale.

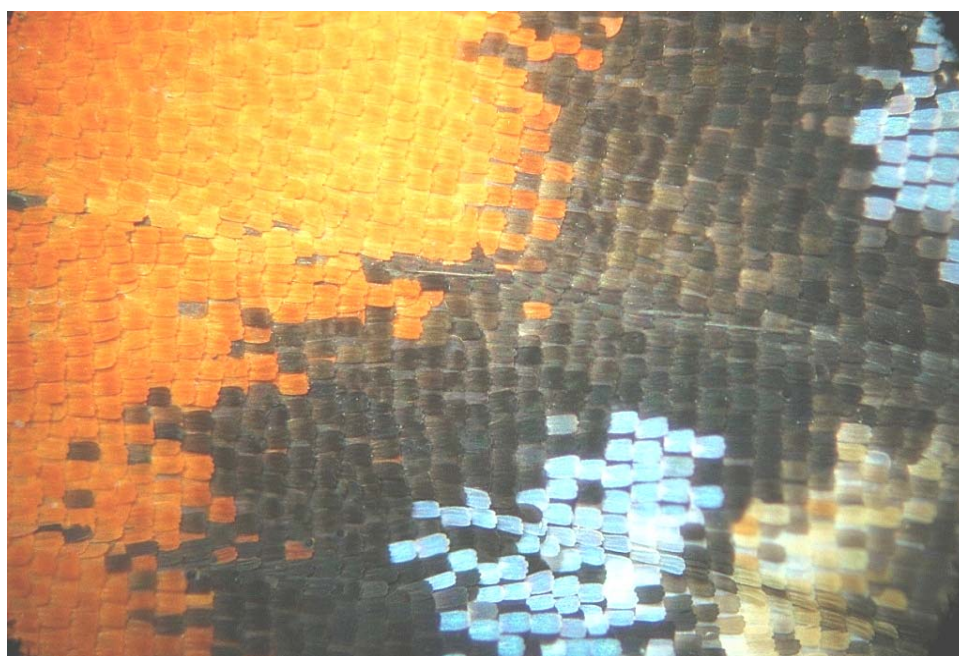
La vanessa pavone qui illustrata mostra in buona parte delle ali colori da diffusione selettiva. In certe zone, attorno od al centro delle macchie, si vedono però sottili iridescenze, che fanno sospettare altri meccanismi ottici (figura seguente).



Fig. 26 – Con una buona lente, nei pressi delle macchie oculari della vanessa pavone appaiono gruppi di scagliette bluastre che non sembrano proprio legate a colori da assorbimento.

Fig. 27 (sotto) – A maggiore ingrandimento (il lato maggiore della foto corrisponde a 0,3 mm), si riconosce la striatura delle scagliette.

Episcopia in fondo scuro.



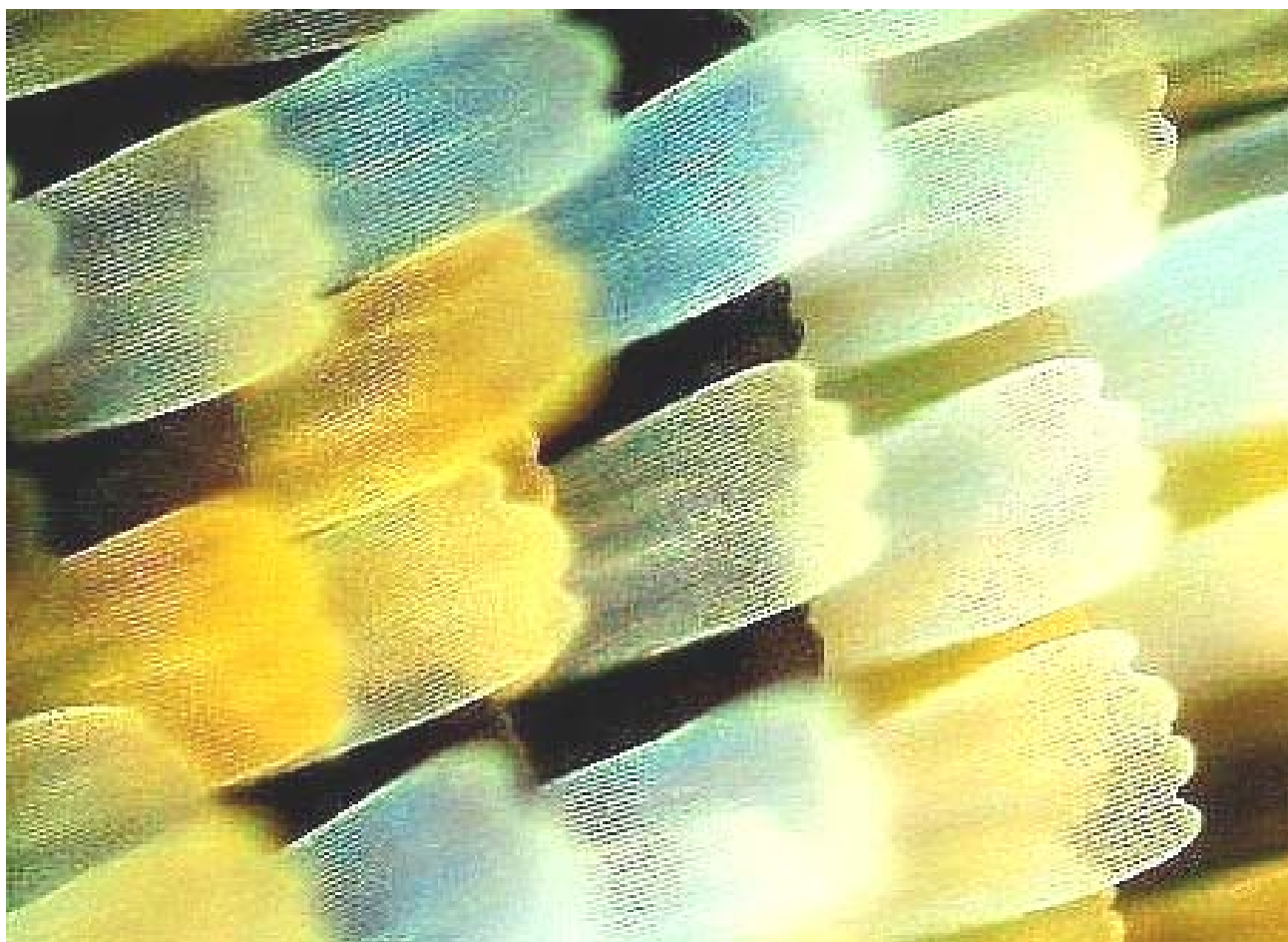


Fig. 28 – Ingrandendo di altre tre volte il centro della figura precedente, cade ogni dubbio sulla struttura reticolare delle scagliette della farfalla.

Ora stacciamo una singola scaglietta, la isoliamo e la osserviamo con maggiore ingrandimento.

In queste condizioni, la profondità di fuoco dell'obbiettivo è di una frazione di micron e consente di focalizzare separatamente i diversi piani dell'oggetto.

Questo è essenziale per riconoscere la struttura interna dell'oggetto stesso, quella che giustifica la formazione di fenomeni di diffrazione.

Figg. 29/30 – È possibile distinguere la superficie di una scaglietta con le striature longitudinali (a destra) da un piano più profondo, con più fini striature trasversali (sotto).

Si noti che il colore generale dell'oggetto appare diverso nelle due condizioni: il movimento verticale dell'obiettivo lo costringe ad abbracciare differenti fasci diffratti dall'oggetto.

Episcopia in fondo scuro.

Obiettivo 50/0,80.

Ingrandimento elettronico 2:1.

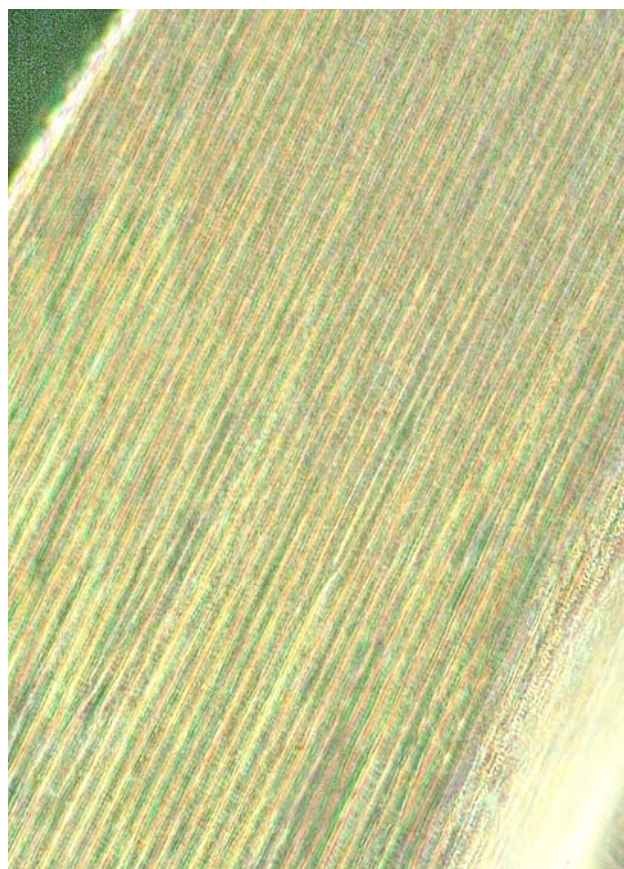


Fig. 31 (a lato) – Con un ingrandimento elettronico successivo ($2 \times$), e con illuminazione in trasparenza, appaiono bene i due sistemi di striature incrociate, capaci di produrre due differenti serie di fasci diffratti.

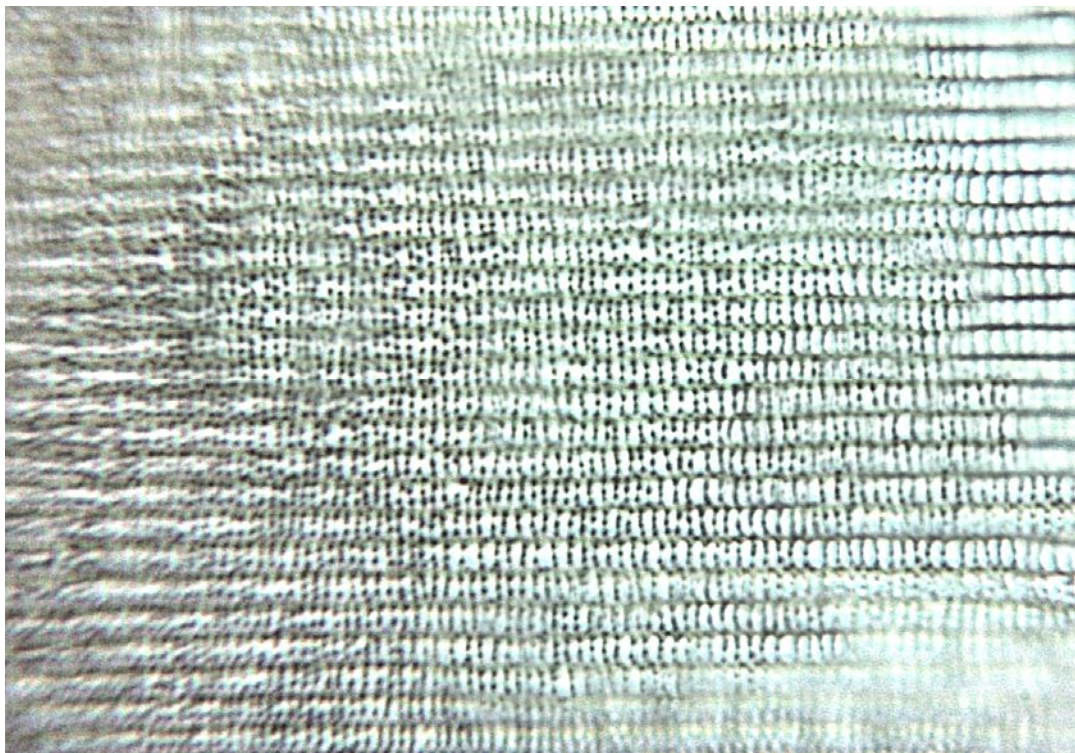
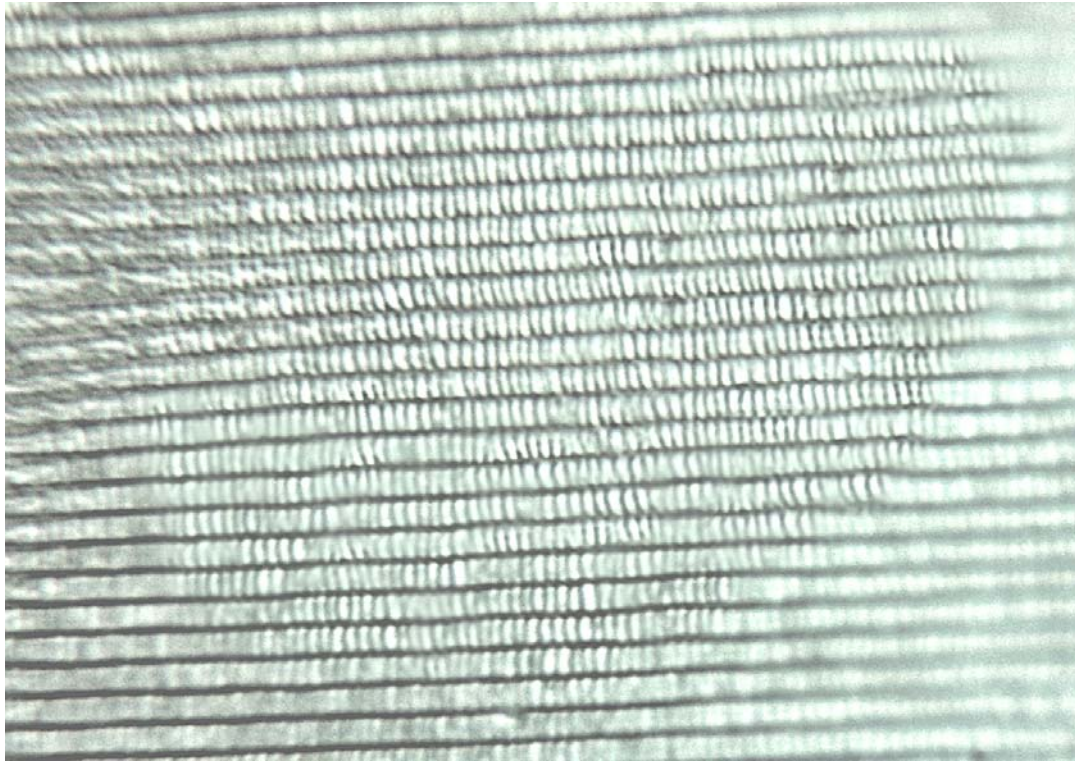


Fig. 32/33 – Usiamo ora il massimo della risoluzione possibile che un microscopio ottico fornisce con un obiettivo ad immersione. Alla superficie della scaglietta (in alto), vediamo i due sistemi di striature ad angolo retto, già visti sopra. Scendendo di poco con la messa a fuoco, si visualizza il sistema di colonnine che collegano i due fogli esterni della scaglietta. Anche queste, con distanza minore del passo dei due reticoli precedenti, costituiscono un reticolo a passo più fine, capace di creare un altro sistema di fasci diffratti.

Obiettivo 100/1,25 HI. Diascopia. Ingrandimento elettronico: 2,5:1. Oculare acromatico 10 ×/17.

Il lato maggiore della foto corrisponde nel piano oggetto a 50 micron

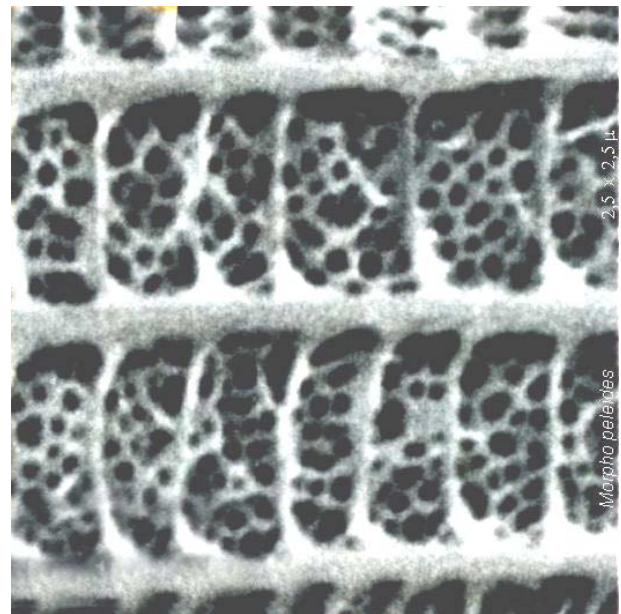
Fig. 34 – Al microscopio elettronico a scansione (SEM) appaiono meglio le strutture di cui abbiamo discusso finora. La farfalla è una *Morpho peleides*.

L'immagine corrisponde ad un campo oggetto di $2,5 \times 2,5$ micron.

Quello che si può concludere è che le scagliette delle farfalle possiedono una struttura fine con diversi ordini di strie più o meno parallele, più o meno perpendicolari fra loro.

Ognuno di questi sistemi di strie costituisce un reticolo, sia pure un po' irregolare, capace di formare una serie indipendente di fasci diffratti, colorati se si opera in luce bianca.

Il risultato finale sarà difficile da decifrare, ma un occhio attento ci avvertirà della singolarità dei colori apparenti.



Altri oggetti naturali che possiedono strutture periodiche con striature o file parallele di punti sono i frustuli di diatomee.

Le diatomee costituiscono un grande gruppo di alghe unicellulari, ben conosciute dai micrografi e diffusissime nei mari e nelle acque dolci. A parte alcuni caratteri specifici, le diatomee possiedono una specie di guscio a due valve, i frustuli appunto, che s'incastrano l'una nell'altra.

I frustuli sono costituiti da una parete esilissima di silice, del tutto incolore. Ma questa parete non è liscia, bensì solcata da finissime incisioni o zigrinature, solchi o punteggiature a file parallele. Un ottimo carattere per determinare la specie di appartenenza.

Dunque, abbiamo dei perfetti reticoli, capaci di produrre colori da diffrazione.

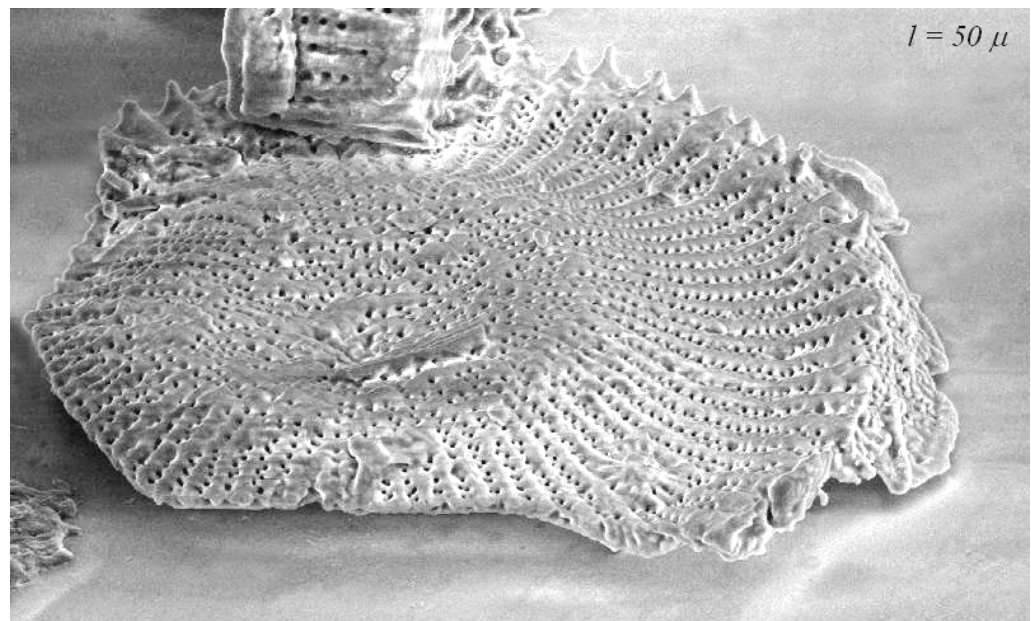


Fig. 35 – Un frustulo di diatomea visto al SEM. Evidenti i solchi radiali contenenti file regolari di puntini incavati. Il lato maggiore della foto corrisponde a 50 micron. (Foto M. Badalotti, per gentile concessione)

Fig. 36 – Ecco frustuli di varie specie di diatomee, che dovrebbero apparire del tutto incolori.

Illuminati opportunamente, essi mostrano colori anche vivaci, che non sono certo dovuti al colore proprio della silice che, in quelle dimensioni, è del tutto trasparente.

Non c'è da stupirsi che le diatomee costituiscano uno degli aspetti più curiosi ed affascinanti del mondo microscopico. Se, camminando su un sasso bagnato, vi accade di scivolare, quasi sicuramente è colpa di un velo di diatomee il cui guscio è avvolto da un sottile strato di mucilagine. Se, in una vasca o un ruscello, osservate una patina verdastria o bruniccia, cercate anche lì le diatomee.

Dal punto di vista biologico, il loro ciclo vitale è assai complesso e di grande interesse.

Le dimensioni delle diatomee vanno da pochi micron a decine di micron.



Colori da interferenza

Un altro fenomeno ottico può produrre colori, per una via ancora diversa.

Consideriamo uno “strato sottile”, uno strato di materiale trasparente² limitato da due facce più o meno parallele, che lo separano da altri materiali anch'essi trasparenti. Sappiamo che la superficie di separazione fra due materiali trasparenti fa da specchio, almeno parziale: basta pensare ai riflessi sull'acqua o sui vetri delle finestre.

Se schematizziamo un tale sistema colpito da un fascio di luce bianca, comprendiamo come il fascio incidente (1 in figura) venga parzialmente riflesso una prima volta sulla superficie d'incidenza (A) creando il fascio 2, di solito molto più debole³.

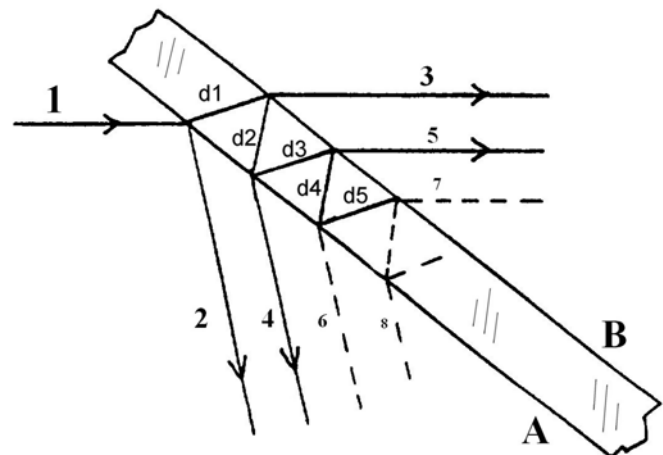
Fig. 37 – Lo strato trasparente è limitato dalle superfici A e B ed ai suoi lati si trovano altri mezzi trasparenti.

Le riflessioni multiple sulle due facce producono fasci ripetuti all'interno dello strato trasparente, indicati come d1, d2, d3 e così via.

All'esterno della lamina, si creano fasci riflessi indicati con numeri pari e fasci trasmessi, indicati con numeri dispari.

Ad ogni riflessione interna, si crea un fascio verso l'esterno, ma con intensità ovviamente decrescente.

Ma il fascio 1, in buona parte, prosegue all'interno della lamina come fascio rifratto (d1).



² Un corpo omogeneo almeno in parte trasparente, in ottica, si chiama “mezzo”.

³ Su una superficie aria-vetro il fascio riflesso ha un'intensità che varia dal 4 al 100% di quella incidente, in funzione dell'angolo d'incidenza.

Quest'ultimo, raggiunta la seconda faccia della lamina (B) viene in parte riflesso internamente (d2), in parte rifratto sulla superficie A (4), in parte ancora riflesso internamente (d3), e così via.

Salvo imperfezioni del sistema, si crea una successione di fasci riflessi (2, 4, 6, 8 ...) ed una di fasci trasmessi oltre la lamina (3, 5, 7 ...), sempre più deboli.

Fra ogni fascio riflesso (o trasmesso) e quello contiguo si crea un ritardo costante, dato dal doppio attraversamento della lamina: per es., fra il fascio 2 ed il 4, il ritardo corrisponde a $d1 + d2$, fra 3 e 5 si ha $d2 + d3$, e così via.

A questo punto abbiamo una serie di fasci riflessi (o trasmessi); in ogni serie possiamo considerare una successione di coppie, un fascio ed il suo contiguo; in ogni coppia due fasci, con uno sfasamento, un ritardo reciproco, costante per ogni coppia.

Ebbene, poiché abbiamo supposto di operare con strati "sottili", di spessore non superiore a qualche lunghezza d'onda, risulta che i due fasci di ogni coppia, molto vicini fra loro e quindi quasi perfettamente sovrapposti, possono "interferire", sovrapporre i loro effetti e quindi rinforzarsi (interferenza positiva) oppure annullarsi a vicenda (interferenza negativa), a seconda del rapporto di fase; trovandosi gomito a gomito, litigano un po' fra loro come viaggiatori troppo stretti sullo stesso sedile.

Questo ritardo reciproco, questo sfasamento, dipende naturalmente dallo spessore della lamina, dall'inclinazione del fascio (angolo d'incidenza), ma anche dalla lunghezza d'onda: una data differenza di cammino, per es, $d1 + d2$ può corrispondere ad opposizione di fase fra i fasci 2 e 4 per certe lunghezze d'onda, a concordanza di fase per altre. Le prime lunghezze d'onda verranno attenuate o eliminate, le seconde saranno rinforzate.

Se lo strato sottile è illuminato con luce bianca, troveremo nei fasci riflessi o trasmessi un'attenuazione o soppressione solo di alcuni colori dello spettro, un'esaltazione degli altri.

Ne risulta che il colore complessivo non sarà un colore puro, come nel caso della rifrazione e della diffrazione, ma un **colore "di sottrazione"**, un colore misto, complementare di un colore puro.

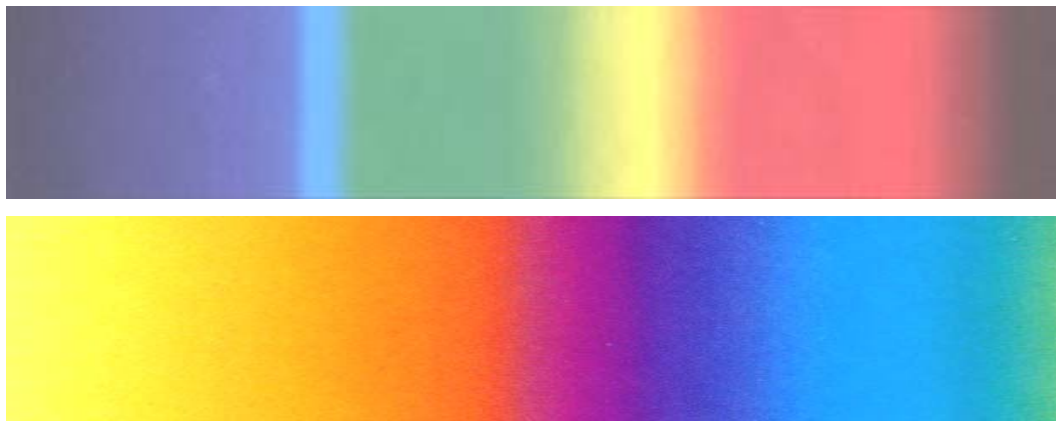


Fig. 38 – Nella fascia superiore, vediamo i colori puri dell'intero spettro ottico, come risultano dalla rifrazione o dalla diffrazione. Da sinistra a destra: dal viola (0,4 micron di lunghezza d'onda) al rosso estremo (0,8 micron).

Nella fascia inferiore, i corrispondenti colori di sottrazione; da sinistra a destra, i principali "colori fondamentali", usati anche in alcuni sistemi di riproduzione tricromatica dei colori: il "giallo di sottrazione" (bianco meno viola, da non confondere col giallo puro), il "magenta" o "porpora" (bianco meno verde, da non confondere col viola), il cyan (bianco meno rosso, da non confondere col celeste).

Per realizzare questa nuova composizione dei colori, basta osservare comuni sistemi di strati sottili: le bolle di sapone (aria – acqua saponata – aria), oppure le macchie colorate che si osservano sul selciato bagnato dalla pioggia quando un automezzo (che ha perso qualche goccia d'olio) si sposta (aria – olio – acqua). In quest'ultimo caso, quando la goccia d'olio cade sullo strato d'acqua, galleggia, si allarga progressivamente assumendo una forma vagamente lenticolare, e finisce per diven-

tare uno strato sottile sospeso sull'acqua.

Ebbene, né l'acqua saponata né l'olio lubrificante hanno un colore proprio, almeno in strati così sottili, ma le bolle di sapone e le macchie d'olio possono apparire a colori vivaci. Se si presta attenzione, ci si accorgerà che si tratta di colori di sottrazione, come illustrati nella figura precedente, fascia inferiore.

Si noterà che finora abbiamo sempre parlato di “strati sottili”. Se lo strato trasparente ha uno spessore superiore a qualche lunghezza d'onda (pochi micron) succede che le fasce dei differenti colori di sottrazione si allargano, si sovrappongono, si mescolano, e divengono sempre più sfumate ed indistinte. Alla fine, si vede solo un bianco sporco. Il vetro di una finestra, per es., apparirà sempre incolore (tranne il caso di un suo assorbimento selettivo): non è abbastanza sottile. I cosiddetti “anelli di Newton”, anelli colorati concentrici che si formano schiacciando fra loro due sottili lamine di vetro, sono dovuti al sottile strato d'aria che rimane fra i due vetri; il sistema diventa: vetro – aria – vetro. Se i due vetri sono distanziati da qualche granello di polvere, i colori spariscono. Se essi si toccano, quando lo strato d'aria diventa più sottile di una frazione di lunghezza d'onda (“contatto ottico”), si vede una chiazza nera: il fascio incidente supera lo strato d'aria “senza accorgersene”, viene meno la riflessione. I fisici parlano di “onda evanescente”, che supera la barriera dello strato d'aria, troppo sottile.

Abbiamo detto sopra che i colori da interferenza dipendono anche dall'angolo d'incidenza: uno dei caratteri di questo tipo di colori è appunto che essi mutano al variare dell'inclinazione dell'oggetto o della direzione dello sguardo. Si parla di “colori cangianti”.

Fra i prodotti industriali, si possono osservare casi di “interferenza da strati sottili” nelle “brunture”, fasce di colori mostrate da molti materiali ferrosi quando vengono scaldati e si ossidano; lo strato sottile è rappresentato dallo strato di ossido che ha spesso uno spessore variabile e mostra quindi colori differenti. Così avviene in un particolare trattamento protettivo (“anodizzazione”) di oggetti d'alluminio che vengono coperti da uno strato di sesquiossido, durissimo ed omogeneo (chimicamente identico al minerale corindone).

In natura, casi di “interferenza da strati sottili” sono tutt'altro che rari, e spesso si osservano colori molto vivi, con apparenza metallica.

Un caso ben noto è quello delle penne o di macchie nelle penne di molti uccelli: le penne caudali del pavone; le penne del collo di gallinacci e colombe; penne su tutto il corpo di varie specie di colibrì ...

Abbiamo più sopra descritto la struttura delle scagliette sulle ali delle farfalle e sul corpo di altri insetti. Per spiegare la formazione in esse di colori di diffrazione abbiamo dimostrato la presenza di strutture a linee parallele, di “reticoli”.

Ma abbiamo anche detto che, spesso, quelle scagliette sono formate da due fogli sottili, collegati da colonnine interposte. Ecco qui una struttura a “strati sottili”, capace di formare anche colori da interferenza. Qualche esempio.

Nella fig. 23 a pag. 13 abbiamo mostrato le scagliette sulle elitre di un piccolo coleottero, ma abbiamo anche specificato che l'immagine è stata ripresa in radiazione polarizzata: in quel modo è stato soppresso il riflesso sulla superficie della scaglietta rendendo visibile solo il colore da diffrazione creato dalle strutture sottostanti.

Nella figura seguente osserviamo lo stesso oggetto, ma in luce “naturale”, non polarizzata. Il colore da interferenza creato alla superficie delle scagliette è molto vivo e nasconde quello da diffrazione (ed è anche diverso).

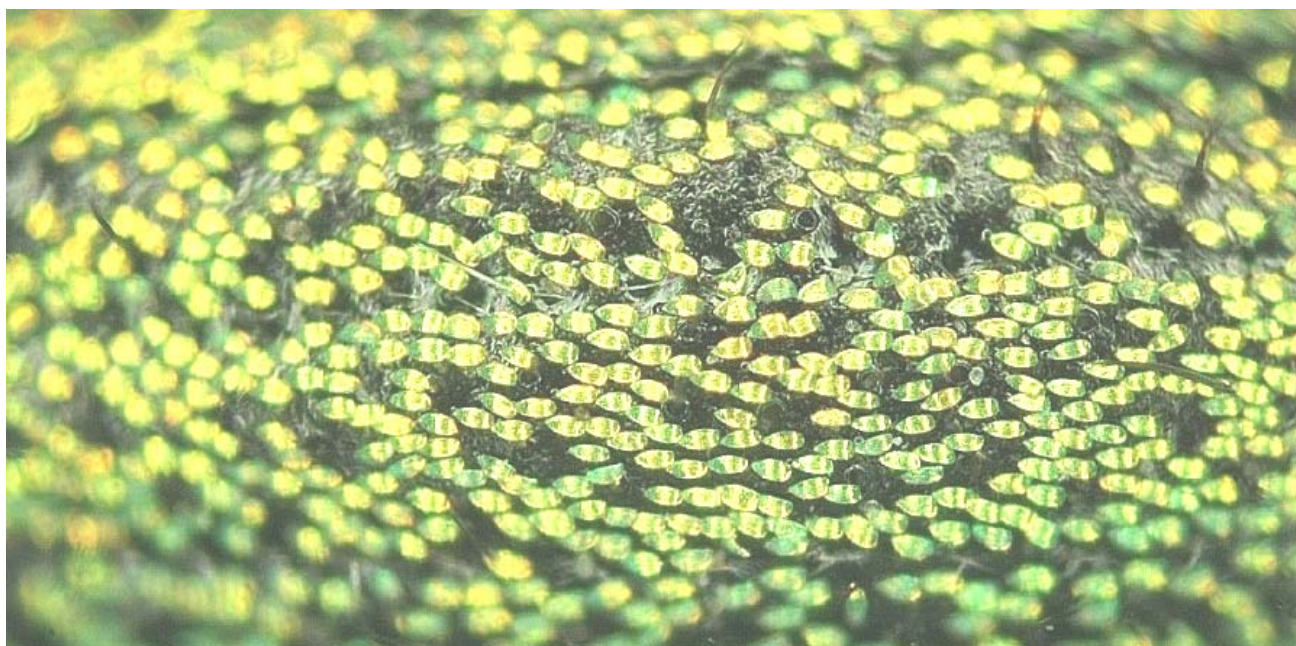


Fig. 39 – Le scagliette sull’elitra di un *Phyllobius*, in luce naturale. Poiché le scagliette sono ricurve, il colore lungo il loro asse maggiore non è uniforme: i colori da interferenza dipendono dall’angolo d’incidenza.

Anche i colori visibili nella fig. 4, pag. 3, (elitre di *Cicindela sylvicola*), che abbiamo usato per mostrare i limiti di risoluzione dell’occhio umano, sono colori d’interferenza.

Per quanto riguarda le scagliette delle ali di farfalla, si possono trovare scagliette isolate a riflessi metallici in mezzo a scagliette con colori d’assorbimento (figura seguente), oppure buona parte delle ali con colori metallici, specialmente nelle foreste tropicali, dove una livrea sgargiante ha lo scopo di facilitare il riconoscimento d’individui della stessa specie in vista dell’accoppiamento (vedi la pagina seguente).

Fig. 40 – Le scagliette con colori d’interferenza si distinguono bene da quelle “normali”, che presentano morbidi colori da assorbimento selettivo.

Osservazione in luce naturale.

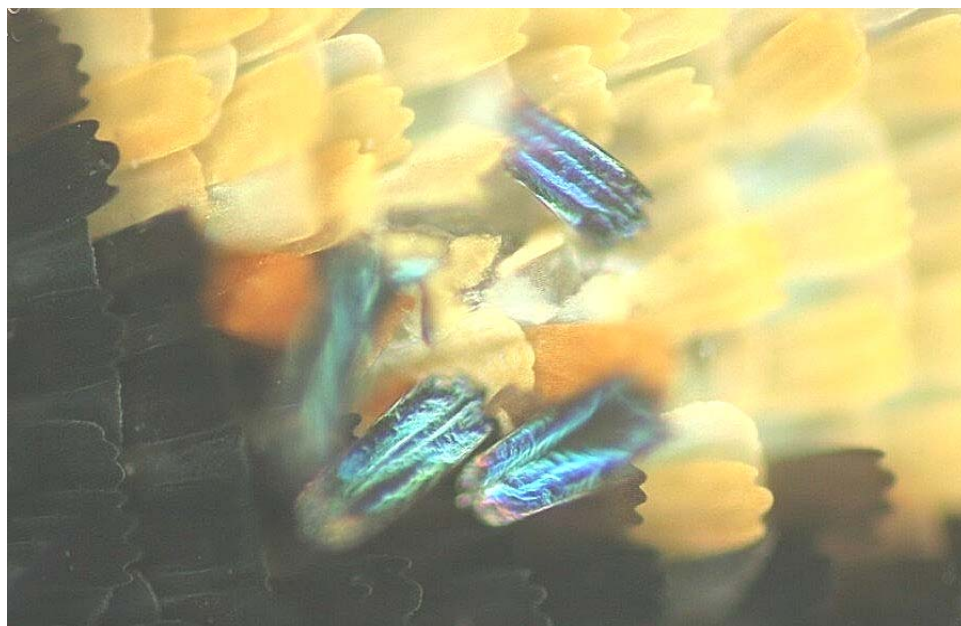


Fig. 41 – Lo stesso oggetto, in radiazione polarizzata. Il riflesso superficiale scompare e le tre scagliette bluastre della figura precedente appaiono nere (assorbimento totale).



Fig. 42 (a destra) – Una famosa farfalla, ben nota ai collezionisti, dalle ali quasi tutte iridescenti.

Si può essere certi che nessuna fotografia può rendere lo splendore di questi gioielli.

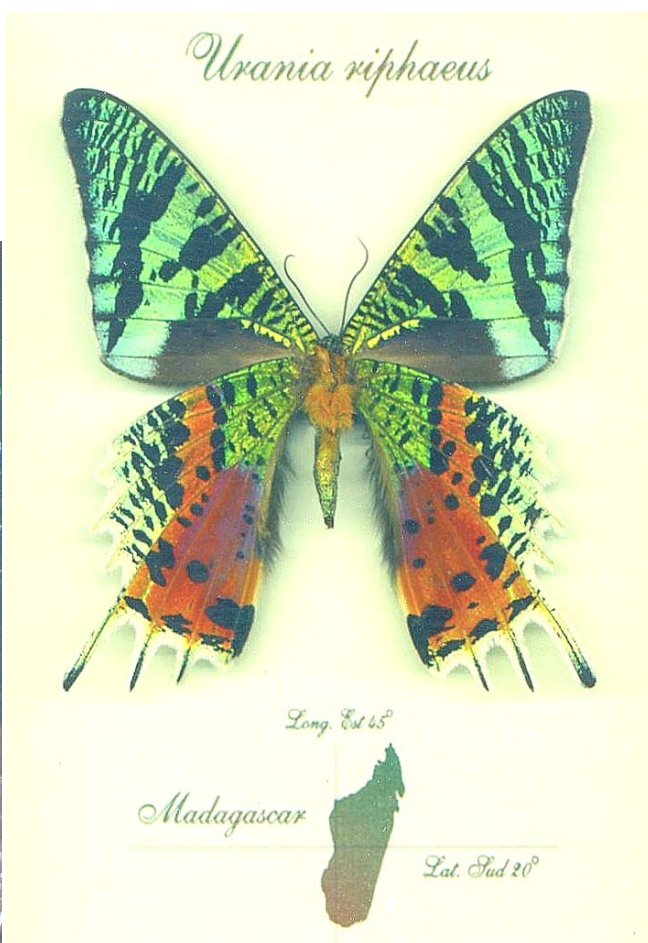


Fig. 43 (a sinistra) – Anche una vespetta nostrana presenta un esoscheletro a colori metallici, da interferenza, ma anche le ali trasparenti di molte specie possono rappresentare uno strato sottile capace di produrre visibili iridescenze.

Fra i coleotteri, molte specie presentano una cuticola formata da strati sottili di differente spessore ed indice di rifrazione, capaci anche in questo caso di produrre vivaci colori da interferenza, generalmente ad apparenza metallica.

Fig. 44 (a destra) – Molte specie di crisomele nostrane appaiono con vivaci colori, dal blu profondo al rosso, a volte a strisce. Le loro dimensioni vanno da 5 a 10 mm.

Anche le cetonie, impropriamente chiamate “maggiolini” (termine troppo generico, che viene usato per molte specie diverse), sono assai comuni. Il loro colore varia dal rossiccio, al verde, più comune, al giallo oro.

Numerosissimi i coleotteri dei paesi tropicali a riflessi metallici.

Anche l’occhio composto di vari insetti tabanidi (Ditteri, mosconi ematofagi, figura seguente) è coperto da una cuticola a colori distribuiti spesso in strisce. Quando l’insetto muore e si dissecca, cambia lo spessore della cuticola ed i colori scompaiono.



Fig. 45 – Se non fosse per la pessima abitudine di succhiare il sangue altrui, questi insetti potrebbero anche apparire gradevoli.

Colori misti, da diffrazione + interferenza

In natura, non sono frequenti le strutture semplici e regolari come i cristalli ideali. Abbiamo già visto nelle scagliette delle farfalle come coesistano fenomeni di diffrazione e d’interferenza.

La madreperla, ad es., può presentare fenomeni di diffrazione quando il carbonato di calcio (nelle due forme cristallografiche della calcite ed aragonite) si presenta talvolta in cristalli fibrillari, ma più spesso è in forma di sottili lamine intercalate da sostanze organiche, per cui prevalgono fenomeni d’interferenza.

Alcuni minerali, in particolare l’opale (silice idrata non cristallina) possono presentare sottili fenditure interne, che rientrano nella categoria degli “strati sottili interferenziali”, questa è la causa dei particolari colori interni che danno a questa pietra un notevole valore estetico e commerciale.

Colori da diffusione

Tutti vedono come il fumo, anche quello di sigaretta, possa apparire a volte bluastrò.

La ragione è che le particelle solide del fumo, di qualunque composizione chimica, se molto più piccole della lunghezza d'onda della luce, possono diffondere la luce che ricevono, ma con prevalenza delle lunghezze d'onda minori, quindi nel blu – viola. Queste sospensioni appaiono quindi colorate.

Lo stesso fenomeno appare nelle ali membranose di alcuni insetti, in particolare libellule, ed in alcuni liquidi torbidi. Così avviene nelle piume di certi uccelli tropicali in cui la diffusione produce un fondo blu che, sovrapponendosi ad un giallo da assorbimento, conduce ad un'apparenza verde.

Colori da fluorescenza

In certi casi, in un corpo irradiato con radiazione ottica o UV, gli atomi assorbono la radiazione incidente, entrano in uno stato “eccitato” di maggiore energia e, entro un tempo brevissimo (dell'ordine di 10^{-8} sec), restituiscono l'energia assorbita sotto forma di una radiazione diversa, generalmente di lunghezza d'onda maggiore (legge di Stokes).

Questa radiazione “di fluorescenza” è generalmente contenuta in bande strette, ed è quindi colorata.

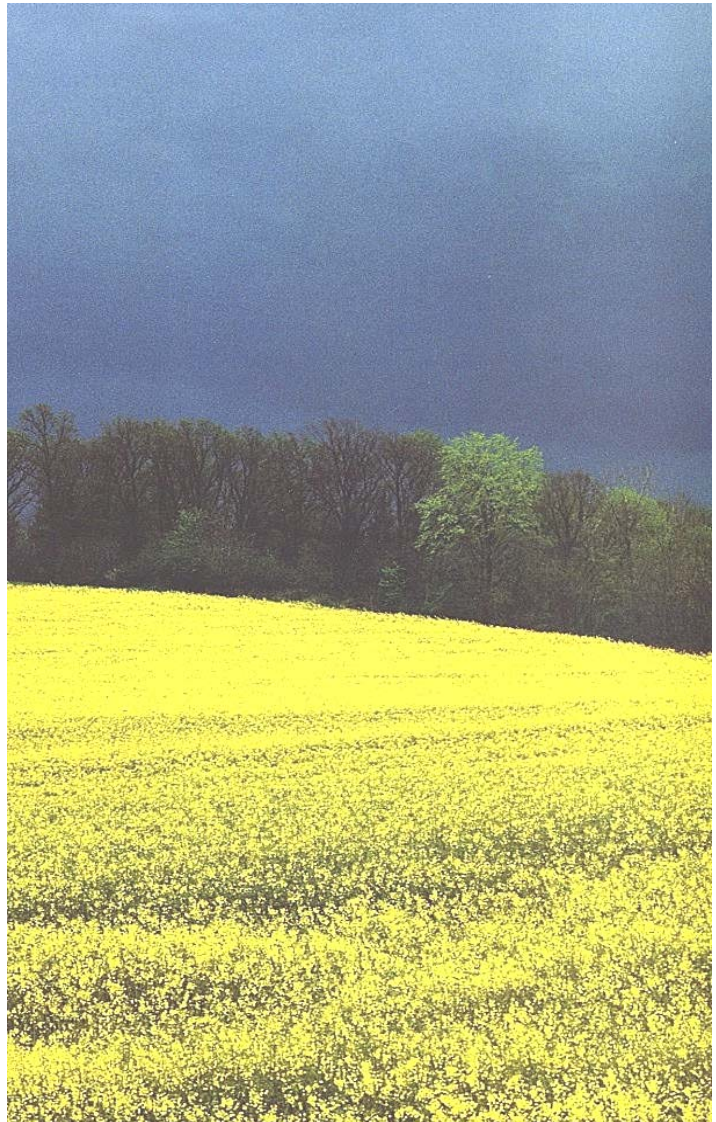
Molte sostanze artificiali sono fluorescenti: basti pensare ai pennarelli “evidenziatori”, ai coloranti usati per indumenti indossati nelle strade dagli operai, ecc.

In natura, però, la fluorescenza è generalmente debole e non si avverte poiché la sorgente irradiante, per es., la luce del cielo o del sole, contiene, sì, bande adatte a suscitare la fluorescenza – spesso l'UV – ma contiene anche tanta radiazione nello spettro ottico da nascondere completamente la fluorescenza.

La clorofilla, ad esempio, un pigmento piuttosto diffuso in natura, ha una fluorescenza rossa, ma non la si percepisce poiché è assai più debole della luce del giorno. Solo in rari casi, quando il cielo è molto nuvoloso e poco intenso nello spettro ottico, la radiazione UV che è diffusa dalle nuvole può suscitare in molti fiori una fluorescenza che appare percepibile (figura seguente).

Fig. 46 – Un campo di fiori gialli di crucifere appare più brillante del cielo nuvoloso.

L'unica sorgente di radiazione ottica presente è quella diffusa dalle nuvole – non vi sono lampioni – ma l'occhio non vede l'UV, che diventa invece la sorgente prevalente per i carotenoidi contenuti nelle cellule dei petali, sostanze che riemettono altra radiazione nello spettro ottico.



Viceversa, è facile osservare la fluorescenza in molti cristalli ed in materiali organici se si dispone di una sorgente UV opportunamente filtrata, in modo da emettere il meno possibile nello spettro “visibile”. Tali sorgenti sono usate spesso per rivelare contraffazioni in documenti e banconote, per rivelare la presenza di tracce di composti organici (l’esame del sangue in tracce col luminol), ecc.

Fig. 47 – Nell’interno della valva di un mollusco bi-valve, l’illuminazione in UV mette in evidenza le impronte dei due muscoli adduttori e l’orlo del mantello.

Alla luce del giorno, tali strutture si distinguono appena per un colore più scuro.

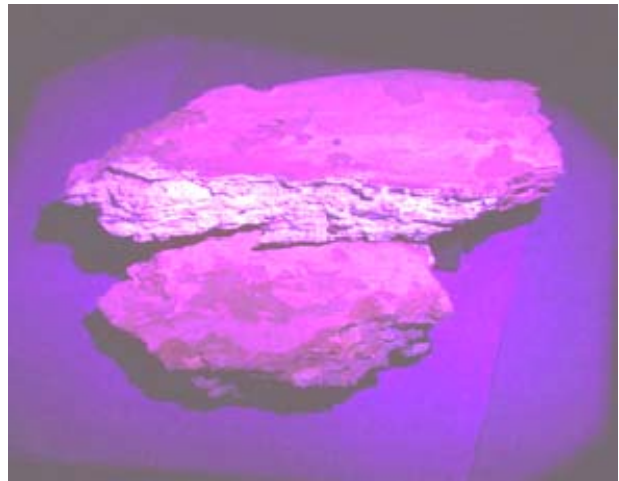
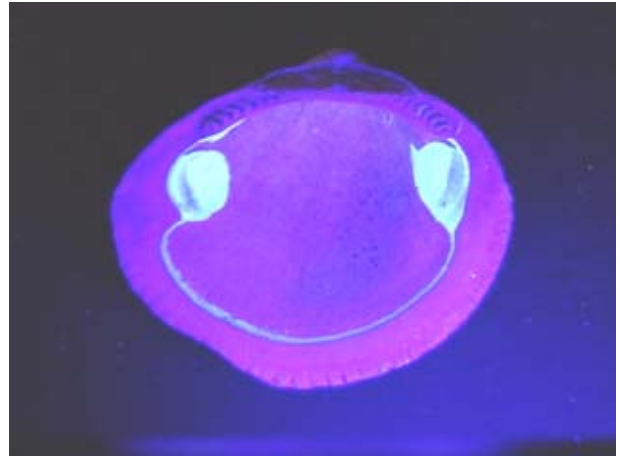


Fig. 48 (a sinistra) – Nella superficie interna della corteccia del larice è ben visibile il colore rossastro, tipico di questa specie arborea, ma una fenditura è diventata sede di una colonia di alghe verdi unicellulari, che sono ben visibili in luce bianca per il colore verdastro.

Fig. 49 (a destra) – Illuminato in UV, lo stesso oggetto accentua il colore della corteccia, ma la fluorescenza rossa della clorofilla copre il colore delle alghe.

Colori da polarizzazione

Sappiamo che la radiazione elettromagnetica, in particolare quella che noi chiamiamo luce, è costituita da onde. Tali onde sono “trasversali”, cioè si sviluppano in un piano che passa per la direzione di propagazione.

Nella figura seguente è schematizzata una singola onda che si propaga nella direzione D, oscilla nel piano V, con un’ampiezza massima E_0 . La sua lunghezza d’onda è λ .

Un normale “fascio di luce”, quello chiamato “naturale”, è costituito da innumerevoli onde con piani di oscillazione orientati a caso. Con opportuni filtri, chiamati “polarizzatori”, si può ottenere dalla luce “naturale” un fascio “linearmente polarizzato”, formato da onde che oscillano tutte nello stesso piano. È questo il “piano principale” del filtro polarizzatore.

Un polarizzatore non lascia passare le onde che vibrano in un piano perpendicolare al proprio

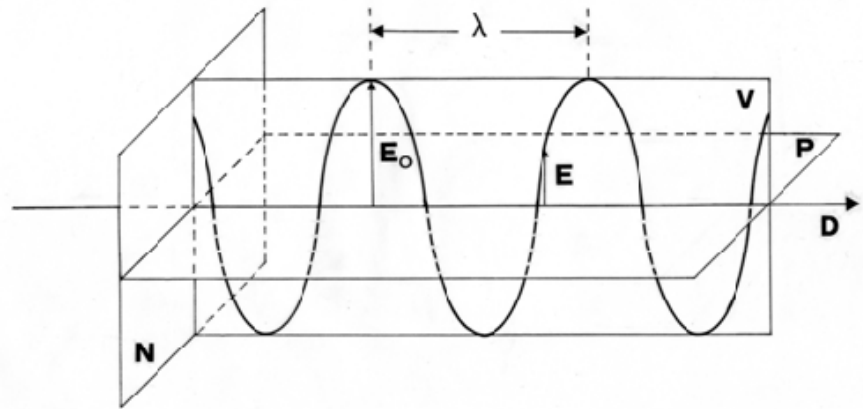
piano principale. Due polarizzatori attraversati dallo stesso fascio bloccano il medesimo se i piani principali dei due filtri sono perpendicolari fra loro, come si suol dire, “incrociati”.

Un sistema formato da due polarizzatori incrociati risulta opaco ma, interponendo molti oggetti fra i due filtri, si ottengono immagini chiare o a colori vivaci poiché molti oggetti, chiamati “**birifrangenti**”, decompongono le onde provenienti dal primo filtro ed una parte di esse può attraversare il secondo, che verrà chiamato perciò “analizzatore”.

Si può dimostrare che nell’analizzatore avvengono fenomeni d’interferenza, come quelli visti a proposito degli strati sottili, per cui alcuni colori vengono soppressi a vantaggio di altri. L’oggetto allora può apparire colorato dai colori di sottrazione già descritti.

Fig. 50 – Schema di una singola onda elettromagnetica di ampiezza E_0 , che vibra nel piano V. Il piano P, perpendicolare a V, si chiama “piano di polarizzazione”.

Per i dettagli, vedi in questo sito, sez. “Microscopia ottica”, il testo: “Introduzione alla microscopia in radiazione polarizzata”.



Ebbene, in natura esistono innumerevoli oggetti birifrangenti, capaci di mostrare colori di sottrazione: molti cristalli, molti organi e tessuti animali e soprattutto vegetali, interi organismi.

Posti in mezzo ad un sistema di due filtri polarizzatori, un “polariscopio”, tali oggetti possono apparire come si vede in qualche esempio nelle figure seguenti.

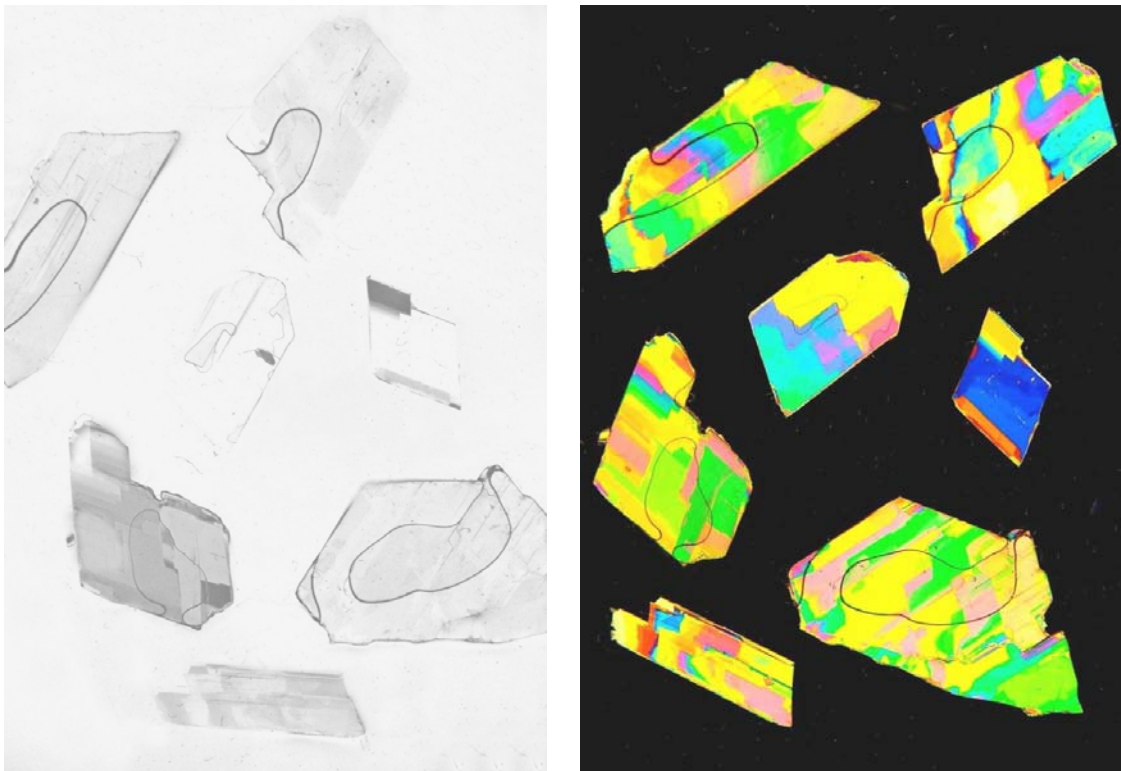


Fig. 51 – Il gesso, solfato di calcio, nella varietà selenite, tende a sfaldarsi in sottili lamine trasparentissime.

Osservate con luce naturale (a sinistra), sono poco visibili. Le linee scure ricurve all'interno di alcune lamine mostrano i contorni di bolle d'aria rimaste all'interno dell'adesivo adoperato per confezionare il preparato.

Fra polarizzatori incrociati (a destra), il campo appare scuro, ma le lamine diventano coloratissime.

Fig. 52 – I capelli umani, nelle stesse condizioni, possono apparire molto colorati. Anche il tessuto corneo della pelle, delle unghie e dei capelli è birifrangente.

NB: il proprietario di questi capelli è (era, qualche decennio fa) biondo.

Nel mondo microscopico, l'abbondanza e la varietà di oggetti birifrangenti è sconfinata. Non mancano gli esempi.

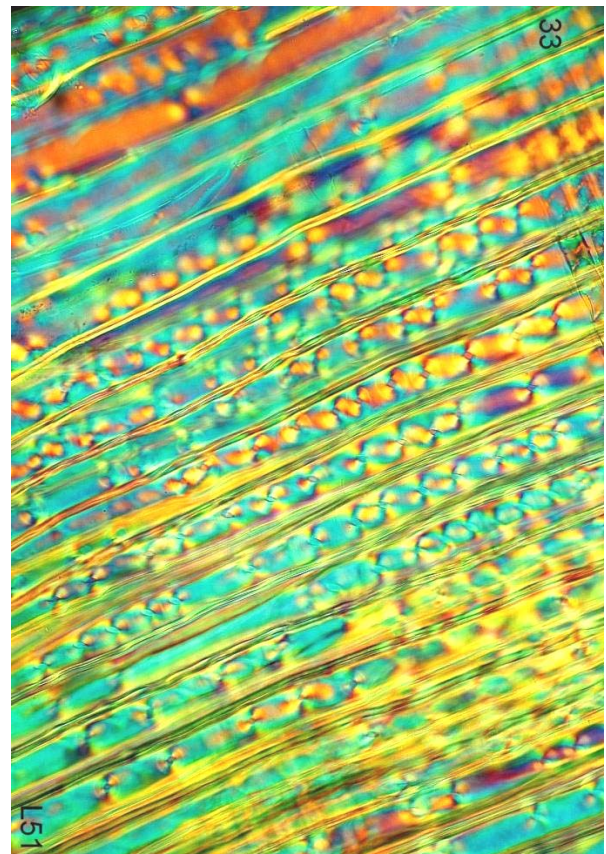
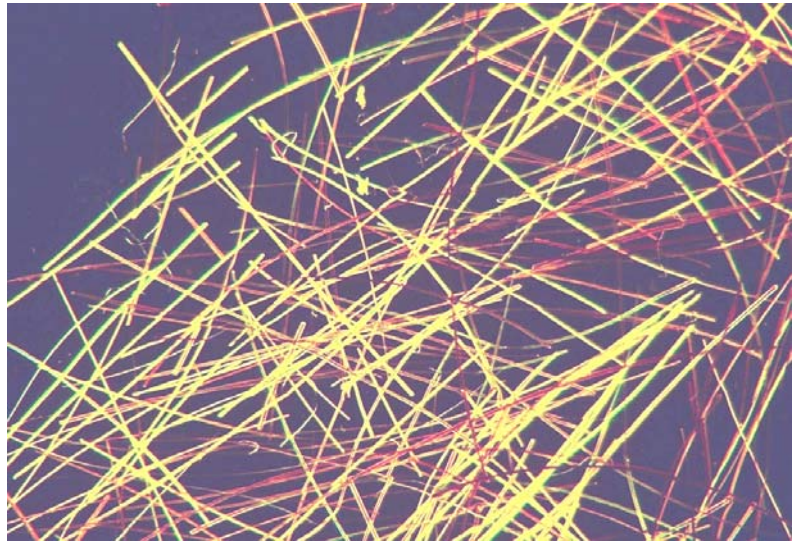


Fig. 53 – Una sottile sezione – longitudinale radiale – di legno d'abete rosso appare molto trasparente in luce naturale, ma l'osservazione in polarizzazione rende evidenti molte strutture, in particolare le “punteggiature areolate”, i minuscoli canali che permettono il passaggio dei liquidi da una cellula all'altra. Obiettivo 40/0,65.

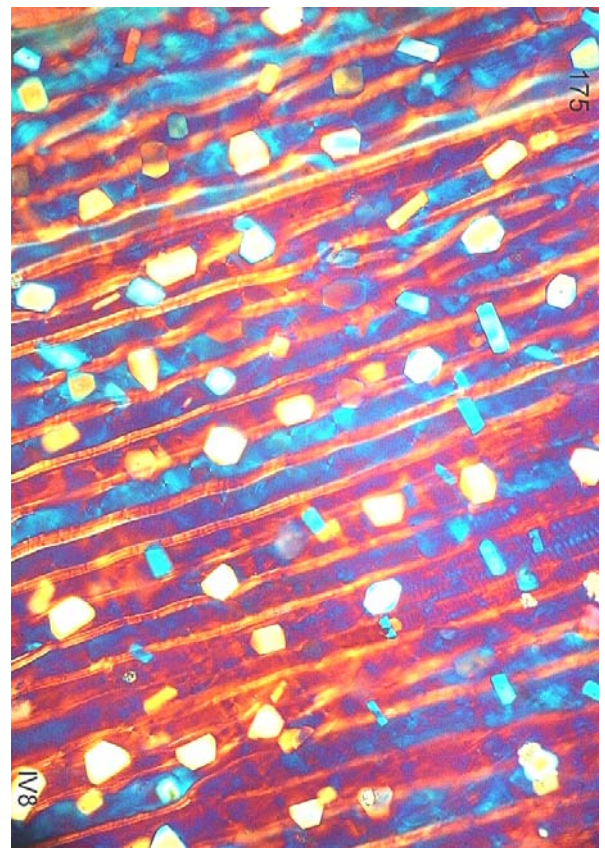
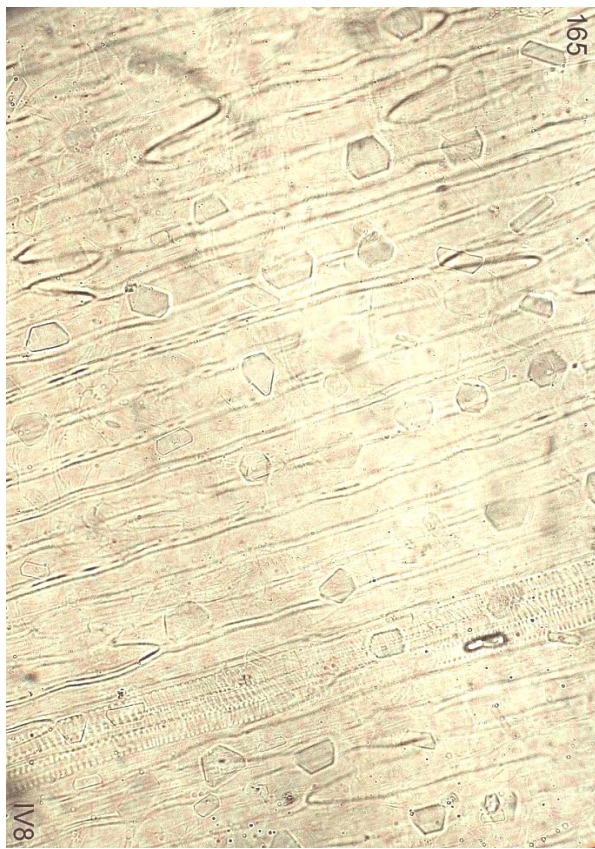


Fig. 54 – Nelle scaglie esterne della cipolla e dell’aglio (scaglie che i botanici chiamano pomposamente “catafilli papiracei esterni”), si trovano vari cristalli di un prodotto di rifiuto (ossalato di calcio) che la pianta accumula nei tessuti morti. Anche qui tali cristalli si rivelano bene in polarizzazione. Obiettivo 20/0,45.

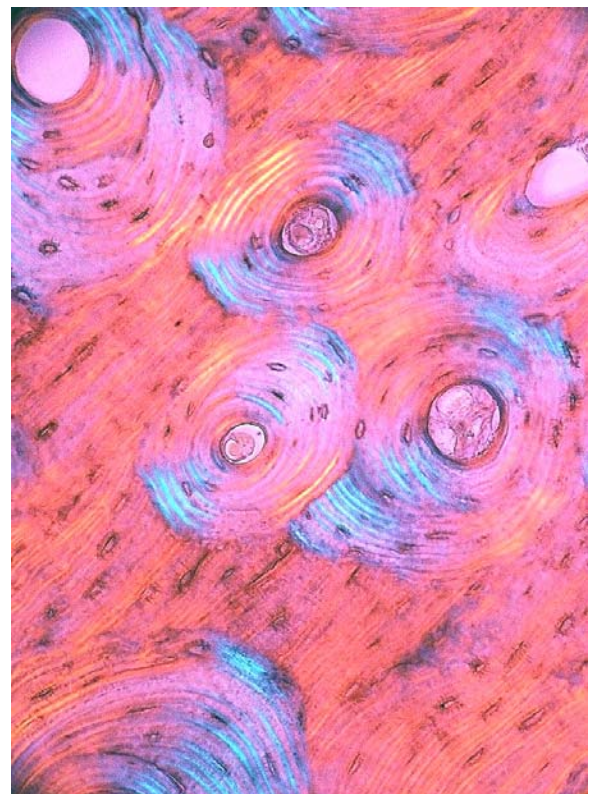
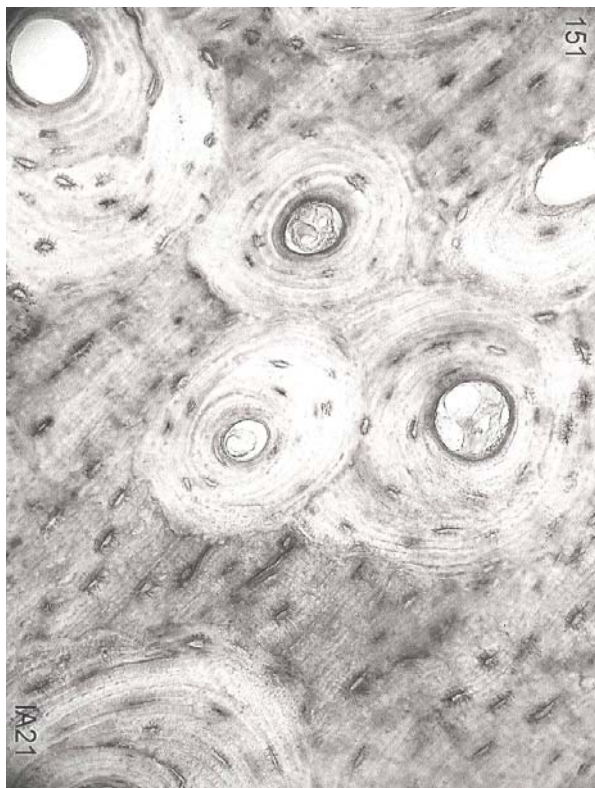


Fig. 55 – Una sezione sottile di osso, in polarizzazione (a destra), mostra l’andamento delle lamelle di tessuto attorno

alle arteriole; il diverso colore degli anelli concentrici mostra l'andamento prevalente delle molecole di minerali e composti organici che formano la sostanza intercellulare dell'osso. Le cellule (osteociti) appaiono come piccole mandorle scure.

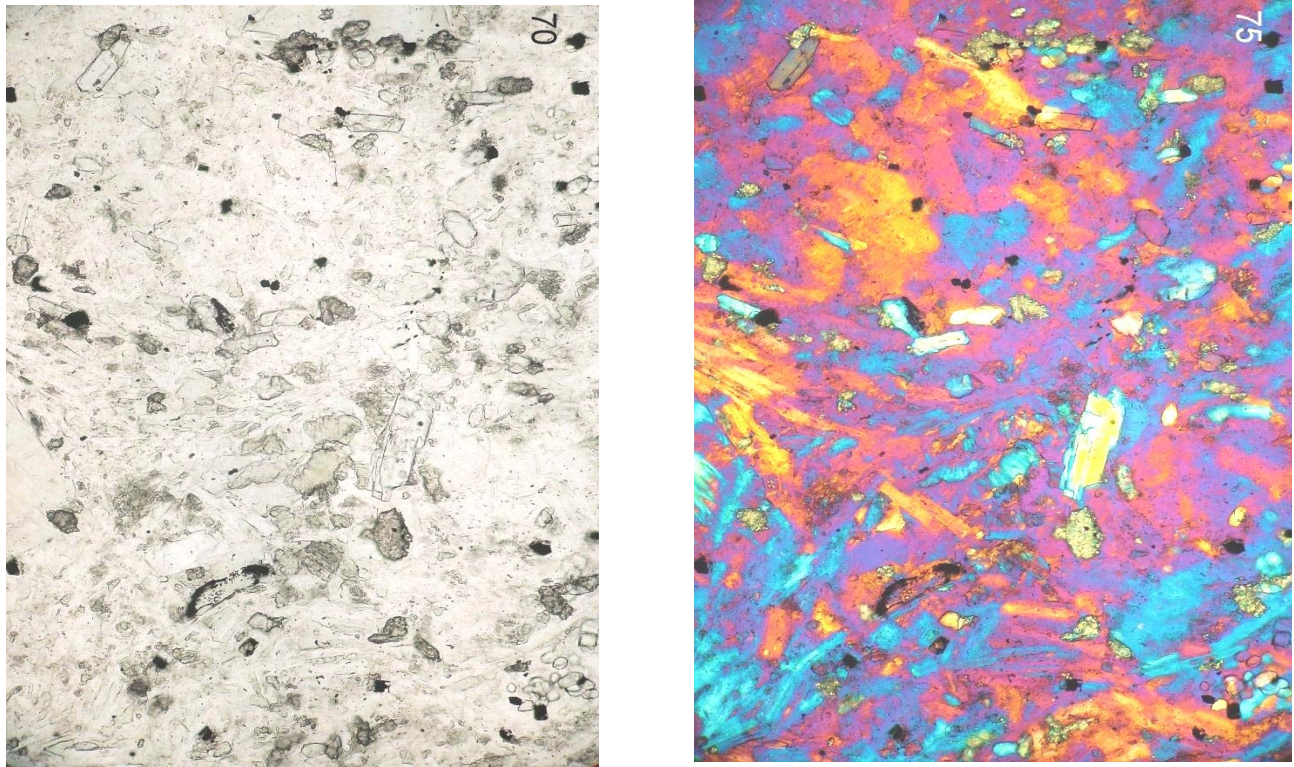


Fig. 56 – Una sezione sottile di roccia vulcanica a grana fine (andesite, La Garde, Var., con augite). Molte rocce, in sezione sottile (30 – 50 μ) appaiono incolori, ma l'osservazione in luce polarizzata consente di distinguere i vari componenti mineralogici, sia pure attraverso particolari misure. Obiettivo 40/0,75.

Si può ricordare qui che certi cristalli limpidi e colorati mostrano un colore diverso, secondo la direzione del fascio che li attraversa. È questo il “pleocroismo”, un fenomeno particolare, sempre legato alla birifrangenza.

Si potrebbe obiettare che finora abbiamo esaminato la radiazione polarizzata prodotta in trasparenza dai filtri polarizzatori.

Ma la polarizzazione si può ottenere anche per riflessione. Tutti i fotografi sanno che una lastra di vetro o la superficie di qualunque specchio d'acqua producono un fascio riflesso che può danneggiare la ripresa. Il fascio riflesso è polarizzato, almeno in parte; lo è totalmente solo se l'angolo d'incidenza assume un preciso valore, che dipende dall'indice di rifrazione (angolo di Brewster).

Per eliminare il riflesso, i fotografi pongono davanti al loro obiettivo un filtro polarizzante, opportunamente orientato.

Già nel confronto fra le figg. 23 (pag. 13) e 39 (pag. 23), avevamo notato come l'immagine delle scagliette di un piccolo coleottero appaia assai diversa se s'illumina l'oggetto con luce polarizzata (fig. 23) o naturale (fig. 39).

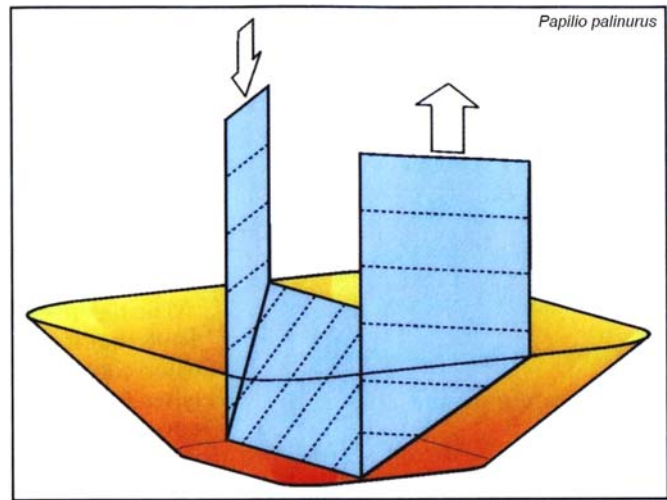
Ma vi sono casi più complessi, sempre nel variegato mondo delle scagliette di farfalla.

Nella specie indonesiana *Papilio palinurus*, per es., le ali appaiono verdi, ma per la sovrapposizione di due differenti fenomeni.

Le scagliette della farfalla sono fittamente incavate da piccole fossette (circa 5×5 micron, profondità 1 – 3 micron) con fianchi a 45° rispetto la superficie della scaglietta. Riguardo al fondo delle fossette, l'ala apparirebbe gialla per una singola riflessione che polarizza e predilige il giallo, ma i fianchi della fossetta, come si vede nello schema seguente, riflettono due volte ogni raggio incidente e, per queste riflessioni, il raggio si polarizza due volte e produce colori di sottrazione nella regione

del blu. Il colore complessivo, sempre per la limitata risoluzione del nostro occhio, appare così giallo + blu = verde.

Fig. 57 – Schema della doppia riflessione che avviene nelle incisioni delle scagliette dell'ala di una farfalla indonesiana. La doppia riflessione produce polarizzazione della luce e, per interferenza, attenua le maggiori lunghezze d'onda (giallo-rosso) lasciando al fascio retro-riflesso un colore di soppressione blu. Il fondo della fossetta, invece, riflette in prevalenza nella regione del giallo.



Colori da luminescenza

Alcuni organi vegetali, in particolare funghi e batteri, possono emettere una debole luce, di cui non è chiara la funzione biologica. Si citano anche alcuni protozoi, come la *Noctiluca miliaris* (Flagellati) delle acque oceaniche, che possono far apparire le acque superficiali come fosforescenti.

È più chiaro, invece, perché molti animali che vivono in ambienti bui producano luce, a volte colorata. In assenza di sorgenti esterne (grotte, profondità marine), l'emissione di luce consente a molti organismi mobili di rivelarsi ed attrarre individui dell'altro sesso. Più raramente, i segnali luminosi possono servire a dissuadere eventuali predatori (funzione "aposematica", di ripulsione).

In questi casi, l'emissione di luce avviene a spese di reazioni chimiche ("**chemioluminescenza**") con minima produzione di calore, quindi con elevatissimo rendimento. Si potrebbe parlare di "luce fredda". Essendo ridotta la banda dell'infrarosso e, per sconfinamento, del rosso estremo, queste sorgenti appaiono di solito verde-azzurro.

Esempi in questo senso possono venire dalle nostre comuni lucciole; l'eventuale intermittenza dell'emissione è data da ondate di ossigeno proveniente dal loro sistema di tubuli respiratori ("trachee"). La materia prima per la reazione è una proteina (luciferina), attivata da un enzima (luciferasi).

Altri coleotteri dei climi tropicali sono più grandi ed emettono più luce delle nostre lucciole, al punto che sono usati come sorgente di luce nelle capanne degli indigeni.

Fig. 58 – Coleotteri "pirofori" utilizzati come sorgente di luce per piccole abitazioni.



Più diffusa è la chemioluminescenza in animali marini abissali: pesci, meduse, molluschi (sepie e calamari) e simili, a volte con la funzione d'illuminare lo spazio circostante, almeno per breve tempo, in cerca di prede.

Va detto però che in questi casi, spesso, non sono i tessuti dell'animale ad essere luminescenti, ma piuttosto batteri particolari che formano colonie all'interno delle cellule; esistono quindi casi di stretta simbiosi fra batterio ed ospite, simbiosi mutualistiche nel senso che l'ospite trae vantaggio dai batteri luminosi, ma questi ultimi si sono accasati con poca fatica e si fanno mantenere.

Altri animali marini gelatinosi, simili a meduse, gli Ctenofori, appaiono con colori vivaci, cangianti ed intermittenti, ma si tratta di colori da diffrazione poiché questi animali nuotano agitando delle "palette" o "cteni" formati da serie di ciglia agglutinate e parallele, con tutte le caratteristiche di un reticolo. Non serve altro, almeno dal punto di vista ottico.

Poiché le palette oscillano come piccole pinne, e poiché anche i colori da diffrazione sono legati all'angolo d'incidenza, i riflessi delle palette, molto brillanti per altro, sono rapidamente cangianti.

E non basta: poiché le palette sono distribuite in serie, e lungo ogni serie l'oscillazione delle palette si propaga in onde successive, anche i colori si propagano lungo il corpo dell'animale in onde veloci. Chi non ha mai visto questi animali, almeno in qualche documentario, non può immaginare la loro bellezza.

Quella bellezza "... ond'ebbero ristoro unico a' mali / le nate a vaneggiar menti mortali."

