

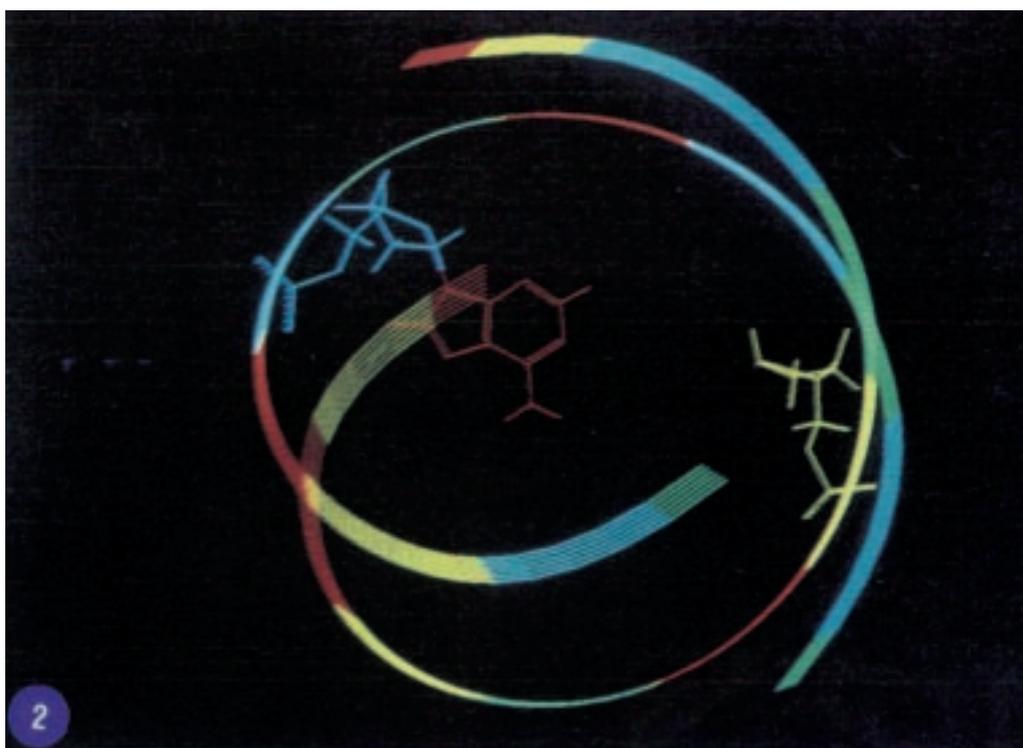
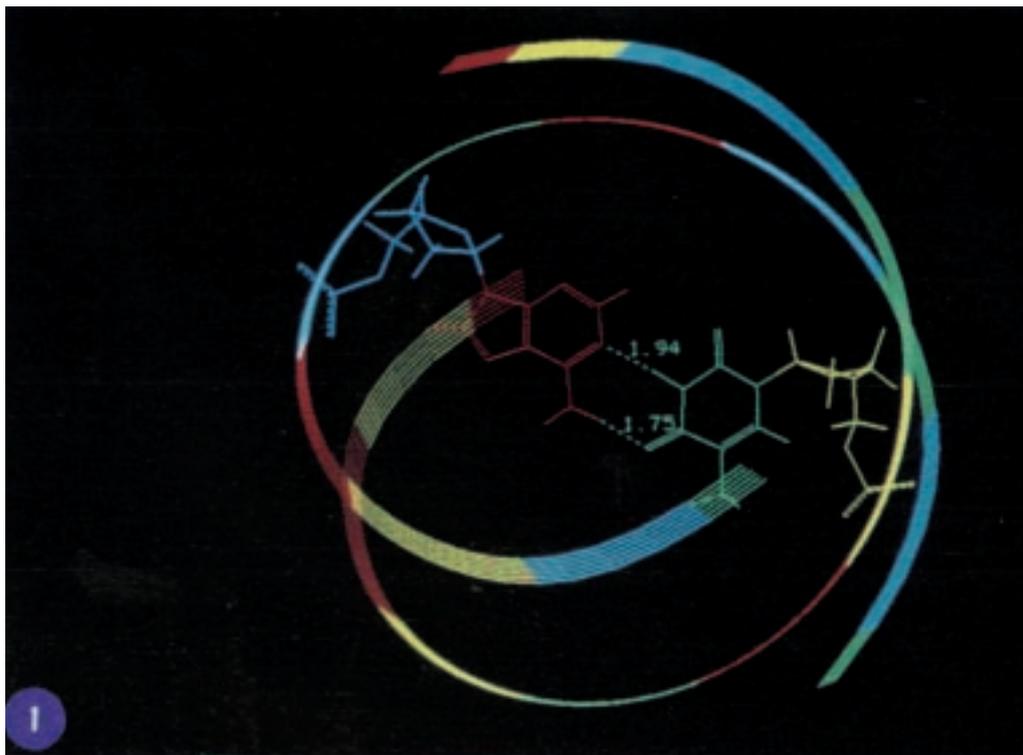
## **PARTE TERZA**

*Nell'universo delle onde  
elettromagnetiche*

**Tavola III**

*Distruzione radioindotta di una base azotata all'interno della doppia elica di DNA. (1)*

Normalmente una A complementa una T tramite due ponti-H (uno di 1,94 Å e l'altro di 1,75 Å nel modello). (2) Dopo la distruzione della T, causata dalla radiazine, nella doppia elica si crea un vuoto.



## Le regioni spettrali delle radiazioni ionizzanti e non ionizzanti

Il tema riguardante le radiazioni suscita spesso apprensione nell'opinione pubblica perché queste hanno fama di danno per i viventi.

Però è bene dire subito che le pericolose sono solo le ionizzanti.

La Biofisica si è anche interessata di radiazioni non pericolose. Per esempio, quelle coinvolte nella *visione dei colori*, nella *fotosintesi* o nel *fototropismo* testimoniano l'interazione del vivente con raggi che non producono ionizzazioni.

I fenomeni della visione dei colori, della fotosintesi e del fototropismo vengono descritti da altre discipline in maniera circostanziata (Fisiologia Umana, Fisiologia Generale, Biochimica Vegetale, ecc.).

Nella presente trattazione interessano più direttamente sia la natura delle *onde elettromagnetiche* che l'energia impiegata da esse quando colpiscono un atomo bersaglio ionizzandolo.

### a. Le onde elettromagnetiche

In due opere di notevole interesse storico - *Sulle linee di forza di Faraday* del 1865 e *Trattato sull'elettricità e sul magnetismo* del 1871 - il fisico britannico J. C. Maxwell (1831-1879) intuisce che la velocità di propagazione del campo elettromagnetico, nel vuoto, è uguale a quella della luce.

Su cosa si basa il suo ragionamento?

Egli argomenta che un campo magnetico con linee di forza chiuse può essere generato sia da una semplice corrente elettrica che da un campo elettrico alternato, mentre un campo elettrico con linee di forza chiuse può essere generato solo da un campo magnetico variabile nel tempo.

J. C. Maxwell osserva inoltre che, mentre le linee di forza del campo magnetico sono sempre chiuse, un campo elettrico con linee non chiuse può essere generato da cariche elettriche.

Queste correlazioni fanno capire che c'è un limite di velocità nella propagazione dei campi elettrico e magnetico.

Viene spiegato che, con l'insorgenza di una carica elettrica, il campo elettrico corrispondente si può formare all'inizio solo vicino alla carica stessa e poi, un po' per volta, può finire con l'occupare tutto lo spazio intorno. Allo stesso modo, quando si inserisce la corrente, il campo magnetico si può propagare sempre più lontano dalla sorgente con una velocità, come già detto, paragonabile a quella della luce.

Un campo elettrico alternato deve dunque generare inevitabilmente, intorno a sé, un campo magnetico altrettanto alternato (Fig.30).

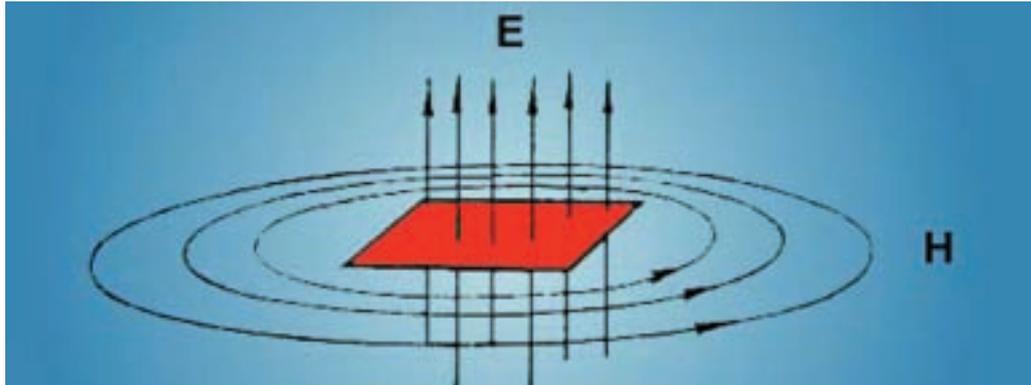
Questo campo magnetico alternato, a sua volta, deve generare un campo elettrico e così via.

Di conseguenza, nello spazio deve aver luogo un processo di propagazione sia del campo elettrico che di quello magnetico alla velocità di circa  $300.000 \text{ Km/sec}$ .

Se il campo elettrico iniziale varia periodicamente, anche quello elettromagnetico deve assumere un carattere periodico.

**Fig. 30**

*Origine di un campo magnetico.*  
Un campo elettrico alternato  $E$  genera intorno a sé stesso un campo magnetico  $H$  altrettanto alternato.



Nel caso della propagazione nel vuoto, i piani dei campi elettrico e magnetico si devono trovare a essere perpendicolari l'uno rispetto all'altro e rispetto alla direzione di propagazione dell'onda elettromagnetica (Fig.31).

L'eguaglianza della velocità della luce con quella delle onde elettromagnetiche suggerisce che le onde luminose siano anch'esse di natura elettromagnetica.

In tal modo, gli studi sulle radiazioni luminose diventano per J. C. Maxwell parte integrante di quelli sui fenomeni elettromagnetici.

Il fisico britannico scompare prima di vedere confermate le sue ipotesi.

Solo dieci anni più tardi, in Germania, H. R. Hertz (1857-1894) confermerà l'esistenza delle onde elettromagnetiche: la velocità di propagazione di queste onde - verrà dimostrato - è effettivamente uguale a quella della luce.

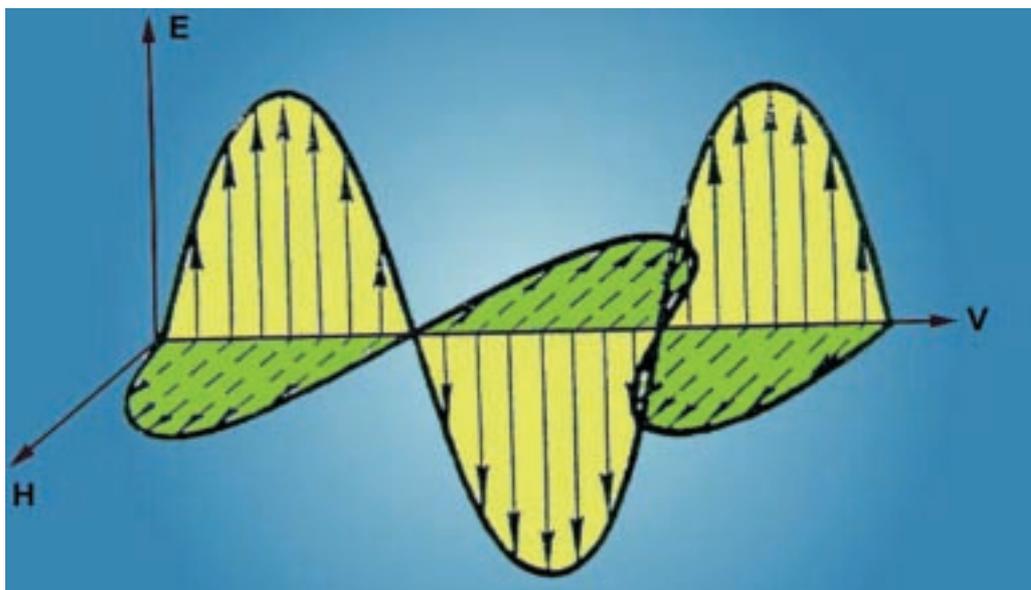
## b. La scomposizione della luce bianca in raggi monocromatici

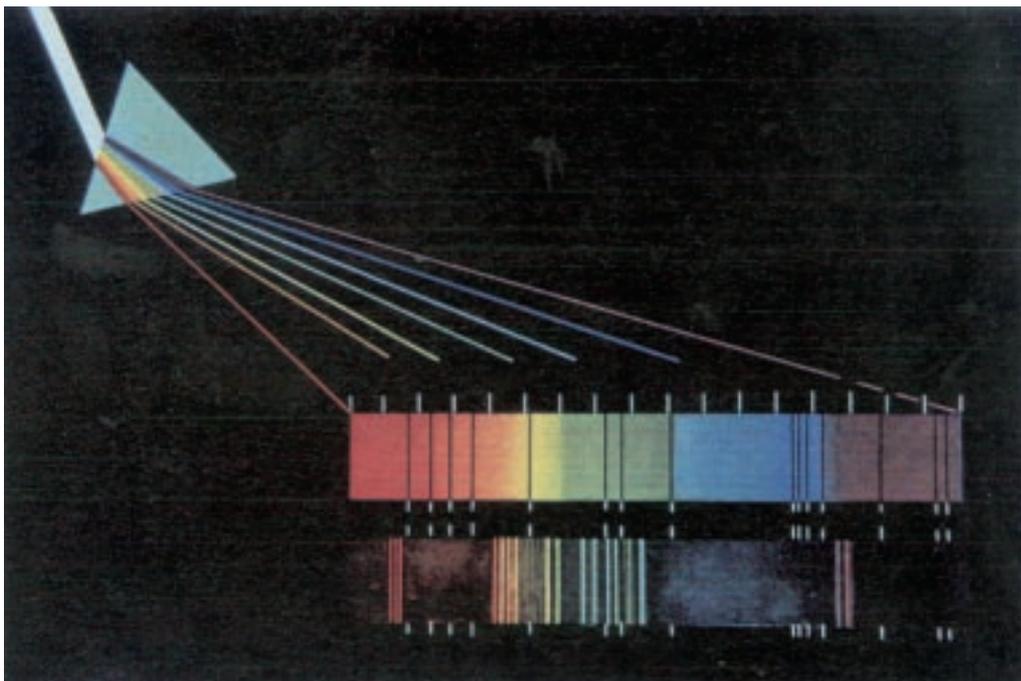
L'ipotesi avanzata da J. C. Maxwell, verificata sperimentalmente da H. R. Hertz, non è altro che la logica conseguenza delle pionieristiche scoperte di I. Newton (1643-1727).

Studiando la *rifrazione*, senza escludere una natura ondulatoria della luce, egli espone una teoria del tutto originale che chiama *corpuscolare*. Questa teoria lascia im-

**Fig. 31**

*Onde elettromagnetiche.* Il piano del campo elettrico  $E$  risulta perpendicolare a quello del campo magnetico  $H$ . Ambedue questi piani sono perpendicolari alla direzione di propagazione delle onde elettromagnetiche  $V$  considerate nel loro insieme.





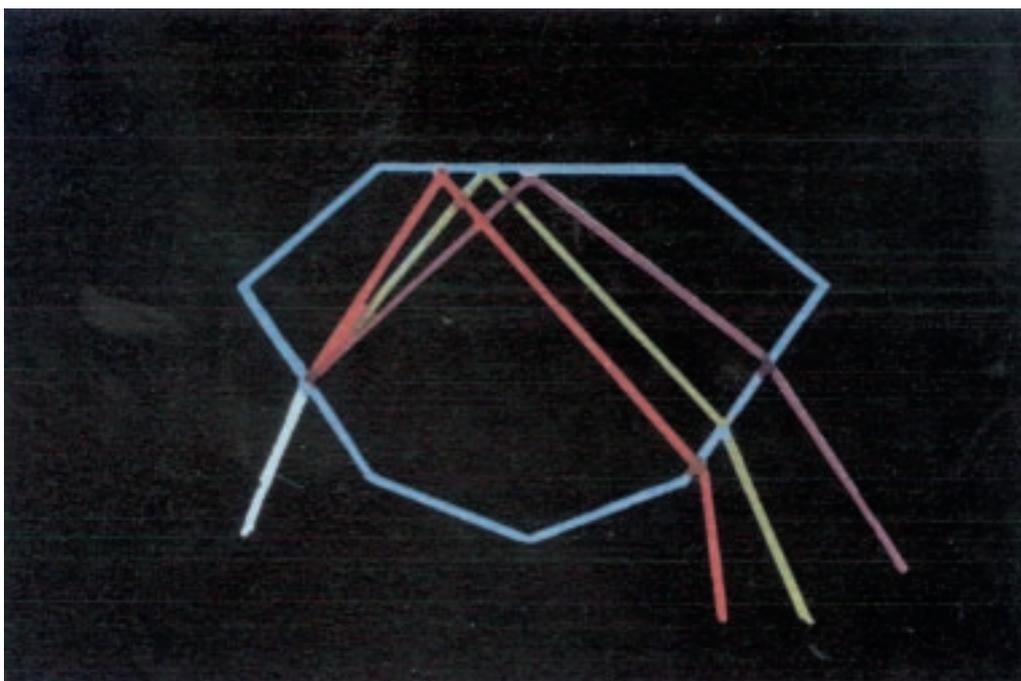
**Fig. 32**  
*Spettri di dispersione.* Un fascio di luce bianca viene scomposto attraverso un *prisma* nei sette colori dell'iride: *rosso, arancione, giallo, verde, blu, indaco e violetto.*

maginare che la luce possa essere prodotta da un'infinità di velocissime particelle emesse nel vuoto da un corpo luminoso.

I. Newton suggerisce che, in base a un principio di "inerzia", la luce si propaghi uniformemente nel vuoto seguendo un percorso rettilineo.

Il 6 febbraio del 1672, a una riunione della *Royal Society* di Londra, egli presenta una comunicazione dal titolo "*Nuova teoria della luce e dei colori*". In questa comunicazione sostiene che la combinazione più sorprendente dei colori non sia altro che la luce "bianca".

Se a metà strada lungo il percorso di un fascio di luce che penetri attraverso una



**Fig. 33**  
*Dispersione della luce in un cristallo.* Della luce bianca entra nel cristallo attraverso una delle sue sfaccettature e ne esce da un'altra ormai scomposta in vari raggi monocromatici.

piccola fessura di una finestra - spiega - si colloca un *prisma diedro*, si finisce col proiettare su uno schermo una larga striscia colorata ovvero uno *spettro*.

La scomposizione della luce bianca nelle sue parti costituenti viene definita *dispersione*.

I. Newton dimostra poi che lo spettro della luce bianca in realtà contiene sette colori: *rosso, arancione, giallo, verde, blu, indaco e violetto*. La larghezza di ognuna delle fasce colorate può essere determinata sperimentalmente (Fig.32).

Gli "spettri prismatici", per la loro bellezza, incuriosivano già molte persone. Dei prismi di vetro si vendevano per dilettere particolarmente i ragazzi. Però, prima di I. Newton, nessuno aveva sostenuto che la luce bianca contenesse in sé tutti i colori. La dispersione poteva ormai spiegare perché i ghiaccioli che si formano d'inverno sui vetri freddi delle finestre brillano come fuochi multicolori. Molti sicuramente si erano già soffermati a osservare i "ricami" dei colori riflessi sui vetri. Ma l'essenziale di questi ricami si poteva capire solo dopo I. Newton: i motivi multicolori non sono altro che il risultato della *rifrazione* e della *dispersione* della luce nei piccoli cristalli di ghiaccio. Il gioco dei colori nelle pietre preziose è pure esso un risultato della dispersione della luce. Attraversando un diamante, questa entra da una sua faccetta con certe proprietà e ne esce da un'altra con altre (Fig.33).

Le sfaccettature scompongono la luce bianca in raggi colorati che escono dal cristallo con angolazioni diverse. Può seguire poi, viceversa, anche una ricomposizione dei raggi monocromatici in luce bianca. In tal caso, in un raggio bianco, secondo i calcoli di I. Newton, questi si mescolano nelle seguenti proporzioni:

$1/2$  (*rosso*);  $9/16$  (*arancione*);  $3/5$  (*giallo*);  $2/3$  (*verde*);  $3/4$  (*blu*);  $5/6$  (*indaco*);  $8/9$  (*violetto*).

## I fenomeni ondulatori

C. Huygens (1629-1695), olandese, nel *Traité de la lumière*, comparso nel 1690, pur non negando l'esistenza dei corpuscoli luminosi immaginati dal contemporaneo I. Newton, formula delle nuove ipotesi sulla *natura ondulatoria* della luce.

Egli pensa che i corpuscoli di I. Newton non possano provenire dai corpi luminosi, poiché in realtà riempiono tutto lo Spazio.

La propagazione della luce, secondo lui, non comporterebbe un movimento progressivo di piccoli corpi, ma somiglierebbe piuttosto a una "trasmissione" di un colpo elastico da un corpuscolo a un altro.

I suoi sostenitori specificano poi che la luce non possa essere altro che una propagazione di un'oscillazione in un mezzo particolare, l'*etere*, che occupa tutto lo Spazio, penetrando in tutti i corpi. Secondo loro, la luminosità proveniente da una fonte di luce viene cioè trasmessa dall'etere in tutte le direzioni.

Un contributo importante alla teoria "ondulatoria" della luce viene dato in Francia dall'ufficiale napoleonico A. J. Fresnel (1788-1827). Secondo lui, qualsiasi punto raggiunto da una stimolazione luminosa, a sua volta, diventa centro di emissione di onde secondarie che si trasmettono in tutte le direzioni ai punti vicini.

I punti raggiunti dalle onde simultaneamente diventano *fronte* dell'onda.

La distanza che delimita lo spostamento di questo fronte, coincidente col periodo dell'oscillazione, viene definita *lunghezza d'onda*.

La direzione della propagazione dell'onda risulta perpendicolare al suo fronte.

L'insieme di questi studi consente finalmente di correlare la rifrazione della luce con la lunghezza d'onda: *una luce costituita da lunghezze d'onda più piccole viene rifratta da un prisma più di quella costituita da lunghezze d'onda più lunghe*.

Di conseguenza, la velocità di propagazione della luce si trova a essere dipendente dalla corrispondente lunghezza d'onda.

Nell'aria questa dipendenza può essere trascurata. Si può dire che nell'aria la luce si comporti come nel vuoto dove la dispersione è assente.

La scoperta della dispersione della luce consente di spiegare il fenomeno dell'*arcobaleno*. Questo viene interpretato come conseguenza della dispersione della luce solare attraverso gocce d'acqua (Fig.34). L'arcobaleno si trova sempre contro il Sole, mentre il centro della circonferenza - di cui fa parte il suo arco - è situato sulla linea che va dal Sole all'osservatore. Il raggio di questa circonferenza è sempre uguale. Se il Sole sta in alto, la comparsa dell'arcobaleno non è allora possibile. Più giù sta il Sole, più in alto può comparire all'orizzonte l'arcobaleno.

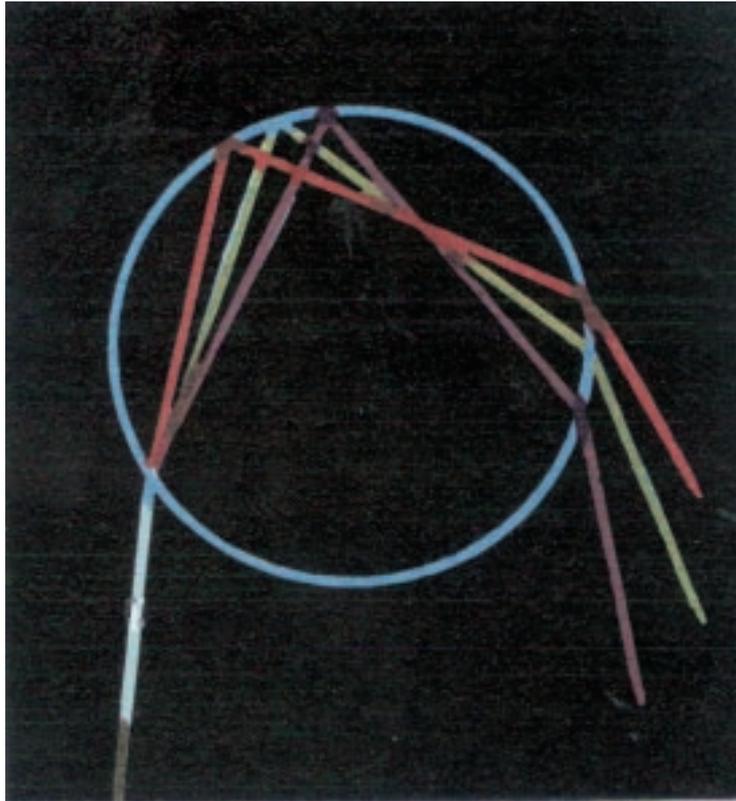
Anche se la teoria ondulatoria della luce solleva nel XIX Secolo ancora qualche perplessità, M. Faraday (1791-1867) prima e J. C. Maxwell dopo, come già ricordato, riescono a parlarne in termini di *fenomeni elettrici e magnetici*. Per loro diventa chiaro che la luce non sia altro che una vera e propria propagazione di onde elettromagnetiche.

Così si giunge alla conclusione che in natura esistano onde elettromagnetiche di lunghezze d'onda diverse.

All'analisi della regione visibile, descritta da I. Newton, si aggiungono le nuove conoscenze riguardanti, da un lato, le onde elettromagnetiche lunghe e, dall'altro, quelle corte.

**Fig. 34**

*Dispersione della luce in una goccia d'acqua. Della luce bianca penetra nella sfera acquosa attraverso uno dei suoi punti e, una volta scomposta, esce da altri suoi punti sotto forma di raggi monocromatici.*



### a. La scoperta dell'infrarosso

Le onde elettromagnetiche, avvertite dall'occhio umano, hanno una lunghezza d'onda che va da circa  $0,35 \mu\text{m}$  ovvero  $3500 \text{ \AA}$  (violetto intenso) a circa  $0,75 \mu\text{m}$  ovvero  $7500 \text{ \AA}$  (rosso intenso).

Oltre questi limiti, ci sono regioni che l'occhio non avverte più (nel *Lymulus polyphemus*, per esempio, la variazione della sensibilità del nervo ottico in funzione della lunghezza d'onda del raggio di luce incidente mostra un valore massimo a  $5500 \text{ \AA}$ ). Eppure un termometro, collocato oltre il rosso intenso, in corrispondenza di circa  $0,8 \mu\text{m}$  ( $8000 \text{ \AA}$ ), si riscalda (vuol dire che esiste una fonte di energia calorica).

Proprio questo serve a F. W. Herschel (1738-1822) per dimostrare, nel 1800, che ci sia della "luce" invisibile, oltre quella visibile, definibile *regione infrarossa (IR)*.

Studiando la riflessione e la rifrazione di questa luce invisibile, egli riesce poi a dimostrare che si tratta di raggi di maggiore lunghezza d'onda i quali si comportano come quelli della regione visibile.

### b. La scoperta dell'ultravioletto

Dopo un anno, nel 1801, W. H. Wollaston (1766-1828) scopre i *raggi ultravioletti (UV)*. In una provetta contenente *cloruro di argento*, collocata in vicinanza del violetto, cioè al di sotto di  $0,35 \mu\text{m}$  ( $3500 \text{ \AA}$ ), egli osserva lo sviluppo di una reazione chimica che porta alla scissione del *cloro* dall'*argento*. Le lunghezze d'onda in tale regione dello spettro appaiono più corte di quelle del violetto.

Le ricerche sugli *UV* risultano difficili per il fatto che questi raggi vengono assorbiti fortemente dal vetro che è il materiale comunemente usato per la costruzione di lenti e prismi.

Diventa necessaria la fabbricazione di “vetri” e “prismi” speciali, incapaci di assorbire raggi al di sotto di  $0,35 \mu\text{m}$ .

Si scopre così che il *quarzo* fa passare onde lunghe  $0,18 \mu\text{m}$ .

I cristalli di *fluorite* fanno passare addirittura raggi con lunghezza d'onda di  $0,12 \mu\text{m}$ .

Per delle lunghezze d'onda così piccole - ci si accorge - l'aria diventa poco trasparente. Soprattutto l'ossigeno le assorbe a  $0,18 \mu\text{m}$ . Per tale motivo queste onde vengono studiate in ambienti dai quali viene tolta previamente l'aria.

I raggi *UV* vengono ben evidenziati attualmente da speciali *emulsioni fotosensibili*, prive di *gelatina* (poiché questa assorbe tra  $0,24$  e  $0,23 \mu\text{m}$ ).

Ciò rende possibile lo studio di lunghezze d'onda inferiori a  $20 \text{Å}$ : se degli *UV* con lunghezza d'onda pari a  $12,1 \text{Å}$  cadono a  $89^\circ$  sulla superficie di un pezzo di materia contenente ferro, è possibile osservare come questo elemento si ionizza perdendo elettroni.

### c. Le onde hertziane

Dall'altra estremità della scala delle onde elettromagnetiche, oltre la regione visibile, come si vedrà (Fig.38), si estendono fino a  $300-400 \mu\text{m}$  i raggi infrarossi, emessi dai corpi incandescenti (la loro lunghezza d'onda è più grande quando provengono da corpi che hanno una temperatura relativamente più bassa).

Oltre gli infrarossi, vi sono le *radioonde* che vengono generate da particolari congegni (“circuiti oscillanti” con campo radiante  $1/r$  e  $1/r^2$ ). Le loro lunghezze d'onda sono assai grandi.

I generatori di corrente continua producono onde elettromagnetiche con lunghezze d'onda addirittura chilometriche (*hertziane*).



## Capitolo 20

# I raggi X e $\gamma$

A distanza di circa un Secolo dalla scoperta dei raggi ultravioletti, avvenuta nel 1801 grazie a W. H. Wollaston (*vedi Cap.19b*), l'interesse per le onde elettromagnetiche non solo non accennava ad affievolirsi ma portava anzi alla scoperta di altri due tipi di raggi.

### a. La scoperta dei raggi X

Nel 1895, W. K. Röntgen (1845-1923) scopre i *raggi X*.

Studiando le proprietà di una particolare lampada, denominata “a raggi catodici” (Fig.35), contenente aria molto rarefatta, egli osserva una fluorescenza su uno schermo coperto di *solfuro di zinco*.

Tale fluorescenza si manifesta nel momento in cui nella lampada passa una scarica elettrica.

Cercando la causa della luminosità dello schermo, W. K. Röntgen arriva alla conclusione che la scarica emana dei raggi fino ad allora sconosciuti che propone di denominare appunto “raggi X”.

Questi hanno una grande capacità di penetrazione. Un cartone, anche se spesso, o della carta oppure una tavolozza non hanno il potere di trattenerli. I raggi X attraversano benissimo tali ostacoli, mentre la luminosità degli schermi situati dietro di essi diminuisce di poco.

Un quadro diverso si osserva nel caso che il percorso dei raggi X venga intralciato da uno strato di piombo. Il piombo li assorbe. Per essi il piombo non è trasparente. Gli oggetti che lo contengono “proiettano” delle ombre molto nette sullo schermo di solfuro di zinco.

Tali proprietà collocano i raggi X nella grande famiglia degli altri raggi di luce, indicando che la loro propagazione avviene per via retta.

Trasparenti ai raggi X si verificano anche i tessuti del corpo animale, a eccezione delle ossa, che danno ombre sullo schermo, e perciò oggi i raggi X si adoperano comunemente per le radiografie.

Per quanto riguarda la natura dei raggi X, le opinioni divergono.

Alcuni sostengono che essi non siano altro che un flusso di particelle con una forte carica energetica.

Altri ritengono che essi siano delle onde elettromagnetiche così come la luce, ma con una lunghezza d'onda assai piccola.

Al riguardo G. Stokes (1819-1903) specifica che i raggi X sono delle onde elettromagnetiche che nascono in seguito a una brusca frenata - cioè in seguito a una netta variazione di velocità - degli elettroni che urtano contro l'anticatodo (Fig.35).

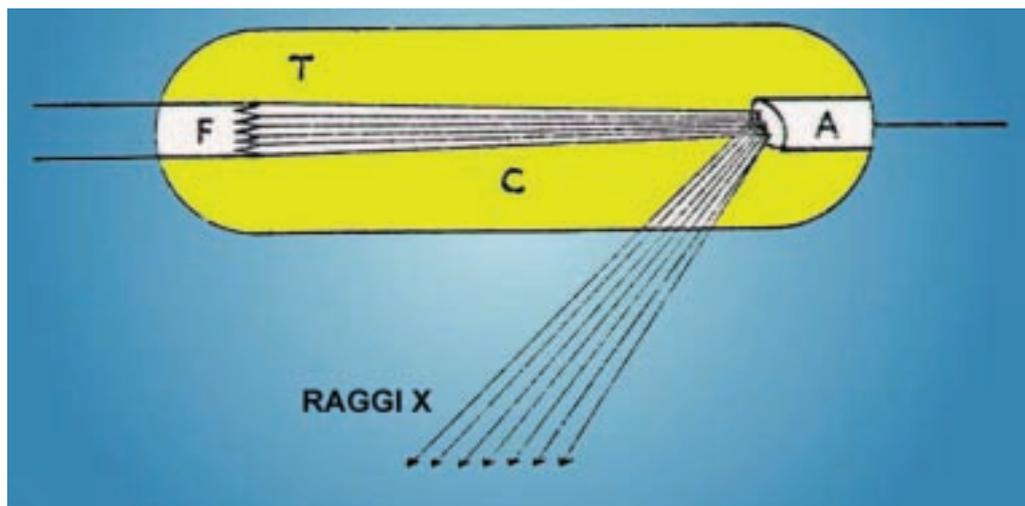
Però, sia la riflessione che la rifrazione dei raggi X non si rivelano facilmente.

Il dilemma viene risolto facendoli passare attraverso dei cristalli. Collocando un cristallo lungo il loro percorso, si osserva che su uno schermo situato dietro tale cristallo, oltre a una macchia centrale, compaiono delle macchie disposte simmetricamente.

La posizione delle macchie dipende dal tipo del cristallo.

**Fig. 35**

Schema della lampada a raggi catodici. In un tubo *T*, in cui viene praticato il vuoto, un filamento *F* proietta con forza dei raggi catodici *C* contro l'anticatodo *A* che a sua volta genera dei raggi *X*.



M. Laue (1879-1960) interpreta il fenomeno nel 1912. Se i raggi *X* sono onde - spiega - allora è ovvio che, passando attraverso il cristallo (dove gli atomi sono disposti a griglia regolare), si deve osservare una loro diffusione.

In realtà le onde diffuse interferiscono l'una con l'altra nelle stesse direzioni formando delle macchie su uno schermo. Ciò dimostra in maniera inequivocabile la natura ondulatoria ed elettromagnetica dei raggi *X*.

Gli esperimenti di M. Laue aprono la strada all'*analisi röntgeno-strutturale*. La posizione delle macchie dipende dalla distanza tra gli atomi e la griglia cristallina. Perciò, ogni cristallo ha una propria "fotografia" che consente di determinare la distanza tra i suoi atomi. Per esempio, la distanza tra gli atomi di sodio e di cloro nel cristallo del sale da cucina risulta uguale a  $2,814 \text{ \AA}$ . Se è nota la distanza tra gli atomi, in base alla posizione delle macchie, è possibile determinare viceversa la lunghezza d'onda dei raggi *X* emessi dalle varie lampade. Questa lunghezza va da quelle più corte dei raggi *UV* (caratterizzate da alcune decine di  $\text{\AA}$ ) fino a  $0,1 \text{ \AA}$ .

## b. La scoperta dei raggi $\gamma$

Esistono lunghezze d'onda ancora più piccole di  $0,1 \text{ \AA}$ .

Esse vengono scoperte per la prima volta nel 1898 in Francia da H. Bécquerel (1852-1908). Trattasi di onde elettromagnetiche che nascono dalla disintegrazione spontanea delle sostanze radioattive.

L'uranio - osserva H. Bécquerel - emette spontaneamente delle radiazioni che, al pari dei raggi *X*, possono attraversare della carta nera avvolta intorno a una lastra fotografica e impressionarla. Queste radiazioni sono capaci di scaricare un elettroscopio, ionizzando l'aria. Al fenomeno viene data la definizione di *radioattività*.

Una ventina di elementi mostrano proprietà radioattive: si tratta di famiglie discendenti rispettivamente dall'*uranio*, dall'*attinio* e dal *torio* (la famiglia dell'uranio ha particolare interesse: l'uranio si trasforma in *radio*; il radio in *radon*; alla fine si arriva al *piombo*).

Nel momento della trasformazione, ognuna di queste sostanze emette radiazioni  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ .

La radiazione  $\alpha$  è data dagli atomi di elio.

Quella  $\beta$  è data dagli *elettroni*.

L'ultima non è altro che una vera e propria sequenza di onde elettromagnetiche di altissima frequenza (come nel caso di raggi *X* emessi da un *tubo di Coolidge* alimenta-

to da oltre dieci milioni di volt).

La lunghezza di queste onde dipende dal tipo di sostanza che si disintegra.

La disintegrazione del torio genera raggi  $\gamma$  con lunghezza d'onda che è di centinaia di volte più piccola di quella dei raggi X (ora si sa che i raggi  $\gamma$  più molli sono emessi dal polonio, mentre quelli più duri sono emessi dal torio). I  $\gamma$  sostanzialmente si comportano come gli X.

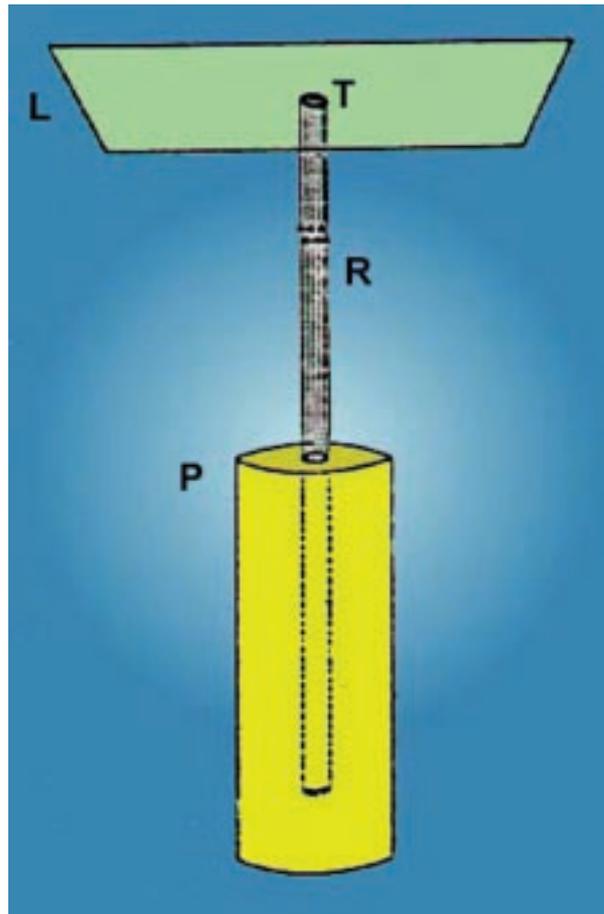
Le tre componenti radioattive vengono separate da H. Bécquerel in maniera assai elegante. In un cubo di piombo viene praticato un piccolo foro cieco. In fondo a questo, si adagia una sostanza radioattiva. Dal foro esce così un flusso di raggi che, cadendo su di una emulsione fotografica, vi lascia una traccia simile a una macchiolina nera (Fig.36). Se però il flusso di raggi viene fatto passare attraverso un campo magnetico, generato da una calamita, invece di una sola macchia, se ne rivelano tre, poiché il flusso  $\alpha$  devia da un lato, quello  $\beta$  devia da un altro e quello  $\gamma$  rimane fisso allo stesso posto (Fig.37).

Una volta separate le tre componenti radioattive (tutte di origine nucleare), si procede alla caratterizzazione di ognuna.

Le particelle  $\alpha$  mostrano una piccola capacità di penetrazione (possono essere arrestate da un semplice foglio di carta).

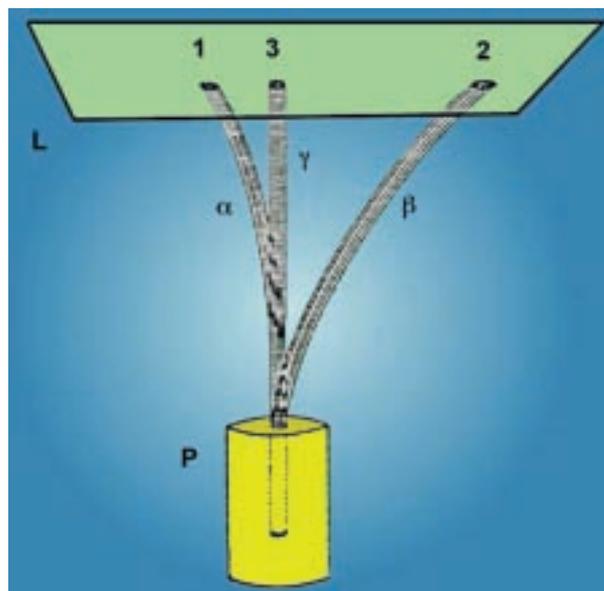
Le particelle  $\beta$  sono più penetranti (riescono cioè a percorrere qualche millimetro attraverso uno strato di alluminio).

La componente  $\gamma$  risulta molto penetrante (come i raggi X duri, essa è capace di attraversare vari centimetri di piombo).



**Fig. 36**

Primo esperimento di H. Bécquerel. Dal pozzetto P (praticato in un cilindro di piombo) l'uranio emette un fascio di raggi R che lascia una singola traccia T su una lastra fotografica L.



**Fig. 37**

Secondo esperimento di H. Bécquerel. Dal pozzetto P (praticato in un cilindro di piombo) l'uranio emette un fascio radioattivo che, passando tra i poli di una calamita, si scompone nelle radiazioni  $\alpha$  (particelle  $\alpha$ ),  $\beta$  (particelle  $\beta$ ) e  $\gamma$  (raggi  $\gamma$ ). Sull'emulsione della lastra fotografica L queste radiazioni lasciano corrispondentemente le tracce 1, 2 e 3.



## I fotoni e i raggi cosmici

Come accennato nel Cap.7a, il fisico americano R. A. Millikan nel 1925 propone di denominare *raggi cosmici* delle radiazioni che si estendono oltre i confini dei raggi  $\gamma$ .

Di questo tipo di radiazioni, nel 1912, ne comincia a parlare V. F. Hess (1883-1964).

All'epoca si fa però confusione con la radioattività emessa dal suolo e dalle rocce.

Solo quando ci si accorge che le radiazioni aumentano d'intensità in funzione dell'altezza, si conclude che veramente si ha a che fare con qualcosa che proviene dallo spazio esterno alla Terra.

Di che si tratta?

Trattasi di un flusso di particelle di alta energia che giunge dal Cosmo fino all'atmosfera terrestre: circa *2.000-4.000 particelle per metro quadrato* cadono ogni secondo sul suolo, dopo aver compiuto varie traiettorie nel campo magnetico del Globo che oscilla intorno a *45  $\mu T$  DC*.

Non tutte queste particelle provengono effettivamente dallo Spazio. Dallo Spazio ci raggiungono solo quelle denominate *primarie*. Le altre sono *secondarie*.

### a. La radiazione cosmica primaria

La *radiazione cosmica primaria*, rivelata da speciali emulsioni fotografiche in dotazione ai satelliti, risulta costituita soprattutto da particelle  $\alpha$ , *protoni*, *elettroni* e *tracce di altri atomi* esistenti nell'Universo (a concentrazioni inversamente proporzionali al loro numero atomico). Questo bombardamento è in gran parte di origine solare (con energia spettrale bassa), in parte di origine galattica e in minor parte di origine extragalattica (con energia spettrale alta).

Oltre alle varie esplosioni stellari, come fonte extragalattica, figurano le stelle doppie, simili a giganti ciclotroni. Probabilmente continuano a raggiungerci ancora delle particelle che costituiscono il *residuo corpuscolare del big bang*.

### b. La radiazione cosmica secondaria

La *radiazione cosmica secondaria*, derivante dalla collisione della radiazione cosmica primaria contro gli atomi dell'atmosfera (*ossigeno* e *azoto*), risulta costituita da *protoni*, *neutroni*, *pioni*, *elettroni*, *positroni* e *fotoni*.

La concentrazione di queste particelle, determinata da rivelatori collocati al suolo o su palloni, dipende dall'altezza.

Gli elettroni e i fotoni ad alta energia producono delle vere e proprie *cascate foto-niche*, somiglianti a sciami chilometrici.



## Capitolo 22

# I colori della natura

La Fig.38 mostra che, disponendo in scala le onde elettromagnetiche in base alla loro lunghezza, si ottiene uno *spettro continuo*.

La natura di queste onde è sostanzialmente la stessa; però, le loro proprietà variano a seconda della loro lunghezza.

Con queste proprietà è correlata la colorazione dei corpi, ben riconoscibile dall'Uomo nell'ambito della regione detta appunto visibile.

### a. Il concetto di colore

Perché le foglie degli alberi appaiono verdi, mentre i fiori possono apparire rossi, arancioni, gialli, azzurri? Che cos'è il colore? La risposta è la seguente.

Un corpo che assorbe quasi tutta la luce che lo investe, con scarsa riflessione, appare di colore nero, come la fuliggine. Se invece il corpo assorbe poco e riflette molto, diventa bianco.

Tale è la neve che al sole impressiona fortemente gli occhi, riflettendo la luce che la investe.

Ogni corpo ha la capacità di lasciar passare, di assorbire e di riflettere la luce di questo o di un altro colore. Il colore dei corpi dipende proprio dalla loro capacità di far passare, assorbire o riflettere la luce che li investe.

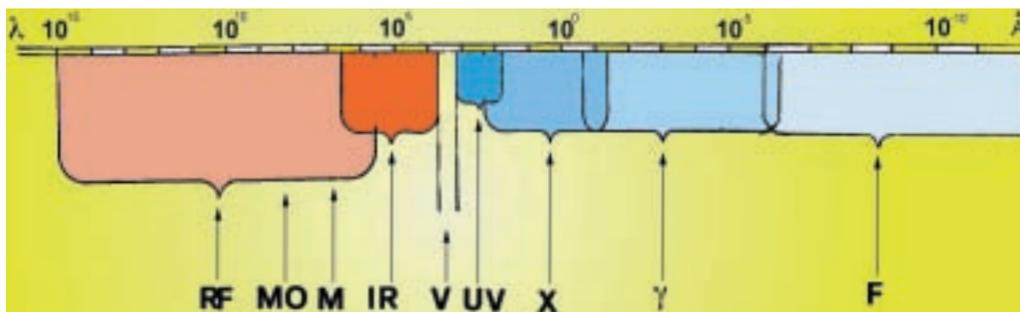
Se i raggi di due colori, mescolandosi, producono luce bianca, vuol dire che questi colori sono *complementari*, poiché aggiungono l'uno all'altro le parti necessarie per avere il bianco.

I colori indaco e giallo sono complementari, poiché mescolandosi danno il bianco. Il mescolamento del verde e del rosso pure produce il bianco. Allo stesso modo, si combinano il violetto e l'arancione.

La luce che viene riflessa dalla soluzione di clorofilla è quella verde, poiché nella luce riflessa manca proprio la componente complementare.

In tutti questi casi, il fenomeno concerne il mescolamento dei raggi di vari colori e non quello dei colori stessi.

Il mescolamento dei colori è un'altra cosa. Infatti l'indaco e il giallo, mescolandosi, danno il verde e non il bianco.



**Fig. 38**  
*Spettro delle onde elettromagnetiche.*  
 La regione visibile V occupa una piccola parte dello spettro, con lunghezze d'onda  $\lambda$  tra circa 0,35 e 0,75  $\mu\text{m}$  (3500-7500 Å). Alla sua sinistra, è situata la regione infrarossa IR che si estende fino a  $\lambda$  di circa 300-400  $\mu\text{m}$ . Alla sua destra, è situata invece la regione ultravioletta UV "non intensa" e "intensa" che si estende fino a  $\lambda$  di alcune decine di Å. La zona intorno al visibile rappresenta un *optimum* di interazione della vita con le onde elettromagnetiche (*visione dei colori, fotosintesi, fototropismo, tasso naturale di mutazioni*). Più a sinistra dell'IR, si colloca la regione delle radiofrequenze RF che, andando dalle onde submillimetriche M e dalle microonde MO fino alle radiofrequenze medie, alte ed estremamente alte, arriva fino a delle  $\lambda$  addirittura chilometriche. Al di là dell'UV, c'è la regione dei raggi X che si estende fino a  $\lambda$  di circa 0,1 Å. Oltre la regione X, c'è quella dei raggi  $\gamma$  che si estende fino a  $\lambda$  dell'ordine di  $10^{-5}$  Å. Ancora oltre questa regione, c'è quella dei fotoni dei raggi cosmici F caratterizzati da  $\lambda$  estremamente brevi.

Ciò si verifica poiché, dopo mescolamento, le “particelle” di colore azzurro prendono dalla luce bianca che le investe tutti i raggi tranne quelli azzurri e in parte quelli verdi. Le particelle di colore giallo in questa miscela prendono dalla luce bianca tutti i colori tranne il giallo e un po’ di verde. In tal modo, la luce riflessa da questo mescolamento ha il colore verde, poiché la miscela assorbe i raggi di tutti gli altri colori tranne il verde.

## b. Il concetto della trasparenza

Perché alcuni corpi sono trasparenti? In tal caso, essi non assorbono per niente la luce che li investe?

Certamente essi assorbono della luce, ma in modica quantità. Essi assorbono un po’ di luce di tutti i colori nella medesima proporzione.

In altre parole, nella luce che passa attraverso un corpo trasparente, non viene alterata la correlazione tra i vari colori.

Se un oggetto trasparente assorbe luce in misura diversa per i vari colori, si ottiene una certa colorazione.

Su tale principio si basa la fabbricazione dei filtri. Un filtro di luce rossa viene fatto con un vetro che assorbe di meno la componente rossa (rispetto alle altre componenti).

I corpi illuminati dalla luce bianca appaiono diversi da quelli illuminati dalla luce monocromatica. Una volta illuminati con luce bianca, alcuni corpi appaiono verdi. Se poi essi vengono illuminati con luce rossa, diventano scuri.

Perché il cielo è azzurro, mentre l’aurora è rossa?

Questi due fenomeni hanno un’altra spiegazione, poiché il colore azzurro del cielo dipende dalla diffusione della luce solare nell’atmosfera della Terra.

La diffusione della luce nell’atmosfera terrestre è dovuta alla composizione molecolare dell’aria stessa. L’aria non diffonde allo stesso modo i vari raggi che compongono la luce bianca. Una loro parte viene assorbita dalle molecole che sono nell’atmosfera. Pertanto viene diffusa di più la componente azzurra. Perciò il cielo sembra azzurro.

Sia il Sole che la Luna, quando spuntano o tramontano, hanno un colore giallo-rame e a volte rosso.

Ciò è dovuto al fatto che quando il Sole o la Luna si trovano all’orizzonte, i raggi di luce devono compiere un percorso maggiore attraverso l’atmosfera, rispetto a quando questi corpi celesti splendono allo *Zenit*. In tal caso, di nuovo vengono assorbite le componenti blu e azzurra della luce solare. Quindi, la luce che ci raggiunge ci sembra giallo-rame o addirittura rossa.

La presenza nell’aria di piccoli granelli di polvere o di goccioline d’acqua, come quando c’è nebbia, modifica alquanto la diffusione delle componenti blu e azzurra. Perciò queste componenti non arrivano all’osservatore e il Sole diventa rosso; diventano color rosa anche le nuvole rendendo particolarmente piacevoli albe e tramonti.

L’occhio umano è più sensibile alle regioni giallo-verdi dello spettro. Sarebbe allora del tutto casuale il fatto che nello spettro solare il massimo di energia corrisponde proprio a queste regioni?

## c. Il quanto di luce

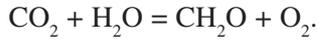
Per gli obiettivi della Biofisica delle Radiazioni, possono infine avere rilievo delle considerazioni riguardanti sia il concetto di *quanto* di luce che alcuni aspetti della Fisico-Chimica della luce.

Una molecola biatomica, assorbendo onde elettromagnetiche, può scindersi in ato-

mi: la molecola di idrogeno ioduro, sotto l'azione di raggi *UV*, si può scomporre in idrogeno e iodio.

Sotto l'azione della luce, le piante assimilano  $CO_2$  dall'aria.

Al buio, le piante "respirano", assorbendo ossigeno ed emettendo  $CO_2$ . Alla luce, invece, le piante assorbono  $CO_2$ , emettendo ossigeno. L'anidride carbonica, unendosi all'acqua, produce ossigeno e aldeide formica:



L'aldeide formica può polimerizzarsi. Con questi polimeri si possono formare dei polisaccaridi.

Il colore verde delle piante è intanto dovuto alla clorofilla che assorbe la parte visibile dello spettro solare. Nella profondità dei mari, dove penetrano di più i raggi di colore verde, alcune piante sono di colore rosso. La colorazione rossa suggerisce che queste piante assorbono i raggi verdi del Sole la cui energia viene utilizzata dalle loro trasformazioni fotochimiche.



# La duplice natura del fotone

Le conoscenze acquisite sul vastissimo mondo delle onde elettromagnetiche, dalle radioonde di bassissima frequenza ai fotoni dei raggi cosmici (Fig.38), l'uso di queste conoscenze nello studio della radioattività - che ha mostrato come le radioonde, l'infrarosso, il visibile e l'UV "meno intenso" non ionizzano, mentre ionizzano l'UV "intenso", i raggi X, quelli  $\gamma$  e i fotoni dei raggi cosmici - e, infine, la discussione riguardante la natura dei colori e la loro percezione meritano ulteriore approfondimento per affrontare il problema della trasformazione della *materia* in *energia* e dell'energia in *materia*.

### a. La teoria quantistica

La *teoria elettrodinamica classica* è sufficiente per interpretare correttamente gli effetti delle *onde hertziane*, cioè gli effetti di onde elettromagnetiche di notevole lunghezza d'onda. La *teoria quantistica* è essenziale per l'interpretazione dei fenomeni elettromagnetici alle lunghezze d'onda più corte (infrarosso, visibile, ultravioletto, raggi X e  $\gamma$ , fotoni dei raggi cosmici).

Sulla base della teoria quantistica, elaborata da M. Planck (1858-1947) e da altri (discussa ampiamente nei *Capitoli 3 e 4*), si può paragonare una radiazione di breve lunghezza d'onda a uno sparo di un fucile da caccia. I pallini emessi da tale fucile possono rappresentare i "fotoni" a condizione che si tenga conto che la loro massa sia zero.

Si sa che i fotoni si identificano con un "pacchetto d'onda", caratterizzato da una frequenza media (dalla quale, come visto prima, dipende il colore, se la radiazione è nella regione visibile dello spettro).

Quanto più alta è la frequenza di onde di questo tipo, tanto minore sarà la loro lunghezza.

Per tale motivo, ogni fotone sarà rappresentato da un ben determinato *quantum* di energia.

Come si ricorderà, tale quantum ( $h$ ) ha un suo valore specifico che si definisce *costante di Planck* (vedi *Capitoli 3b e 4a*). Il suo valore numerico è tanto piccolo che, per esprimerlo in  $erg \cdot sec^{-1}$ , bisogna usare dopo la virgola ben 26 zeri prima di arrivare a un numero significativo 6,6. Il numero dei quanti del fotone è uguale alla sua frequenza. Cioè, un raggio di piccola lunghezza d'onda vuol significare fotone di grande frequenza e quindi di grande energia. Per esempio, siccome la radiazione rossa ha una lunghezza d'onda vicino a  $0,8 \mu m$ , mentre quella violetta ne ha una vicino a  $0,4 \mu m$ , il fotone del violetto avrà un'energia due volte più grande di quella del rosso.

Nel processo fotoelettrico, quando un raggio monocromatico - formato da fotoni di eguale lunghezza d'onda - colpisce un dato metallo, si genera un flusso di elettroni, tanti di più quanto più quel raggio sarà intenso. Quindi si deve tener conto delle proprietà di un metallo, oltre che dell'energia fotonica.

Per tale motivo può capitare che, da un dato metallo, un intenso raggio giallo non strappi neppure un elettrone, mentre un debole raggio verde ne estragga un numero considerevole, perché un fotone del giallo, avendo minore frequenza, ha pure minore energia che non un fotone del verde.

In aggiunta all'effetto fotoelettrico, altre ragioni convalidano le concezioni di M. Planck. Si prenda in considerazione *come* il fotone viene sprigionato dalla materia.

## **b. Il corpuscolo e l'onda**

Se un evento esterno, quale la collisione di due atomi, causa lo spostamento di un elettrone dal proprio orbitale in uno più periferico, quell'evento esterno, conferendo all'elettrone l'energia necessaria per farlo allontanare dal nucleo, comporta un certo lavoro.

In questo stato di turbamento acquisito, l'atomo diventa "eccitato", si trova cioè in una situazione instabile e, appena può, tende a tornare alla configurazione iniziale.

Si definirà invece "ionizzato" se per la collisione l'elettrone viene allontanato dall'atomo.

Qualora ciò non accada, l'elettrone "eccitato" restituisce l'energia rientrando nell'orbitale di partenza e in più emette un fotone sulla cui natura, come per l'elettrone, si ripete il quesito già avanzato nel Cap.4: il fotone è un *corpuscolo* oppure è un' *onda*?

Un fiore ha senza dubbio un certo colore, ma ha anche un suo profumo specifico. Queste qualità lo rendono pittoresco e allo stesso tempo fragrante. La vista risponde per il colore; l'olfatto, per il profumo. Ambedue i sensi dicono il vero.

Per il fotone avviene qualcosa di simile: studiandolo con congegni adatti per rivelare dei corpuscoli, lo si definirà "corpuscolo"; studiandolo con congegni adatti per registrare delle onde, lo si definirà "onda".

L'unicità del fotone, pertanto, apparirà sorprendentemente come ambivalenza, ma soltanto in ragione dei mezzi usati per analizzarlo.

## La legge di Lambert-Beer

Lo *spettrofotometro* è una macchina che consente di misurare la *trasparenza* (o l'*assorbimento*) dei vari tipi di molecole e macromolecole esposte a delle radiazioni.

Di solito si opera nell'ambito della regione *visibile* o di quella *UV*.

Le molecole e le macromolecole devono possedere pertanto *proprietà cromofore*.

Nel visibile le hanno per antonomasia le sostanze di cui l'occhio riconosce i colori (si pensi all'emoglobina e ai pigmenti naturali).

Nell'*UV* assorbono invece *sostanze aromatiche* che sembrano incolori nel visibile come il *benzene* e derivati e come alcune *basi azotate* (*adenina, guanina, citosina, timina, uracile*) e gli *aminoacidi* aromatici (*tirosina, fenilalanina, triptofano*).

Comunque, la ionizzazione dei cosiddetti *gruppi funzionali* (*-OH, -NH<sub>2</sub>, -COOH*) fa variare l'assorbimento di un composto quando questi sono legati a un anello aromatico.

### a. La trasmittanza e la densità ottica

Le proprietà cromofore di un composto si basano sul concetto di *densità ottica* (*DO*) che è l'inverso della *trasmittanza* (*T*). Questa può essere definita dall'equazione

$$T = \frac{I_t}{I_o} \quad (1)$$

dove  $I_o$  è l'intensità della luce incidente e  $I_t$  è l'intensità della luce trasmessa (per comodità il valore di  $T$  si esprime in percentuale).

La densità ottica, a una certa *lunghezza d'onda* ( $\lambda$ ), è il logaritmo dell'inverso della trasmittanza

$$DO = \log \frac{1}{T} \quad (2)$$

oppure, invertendo i termini di (1), è

$$DO = \log \frac{I_o}{I_t} \quad (3)$$

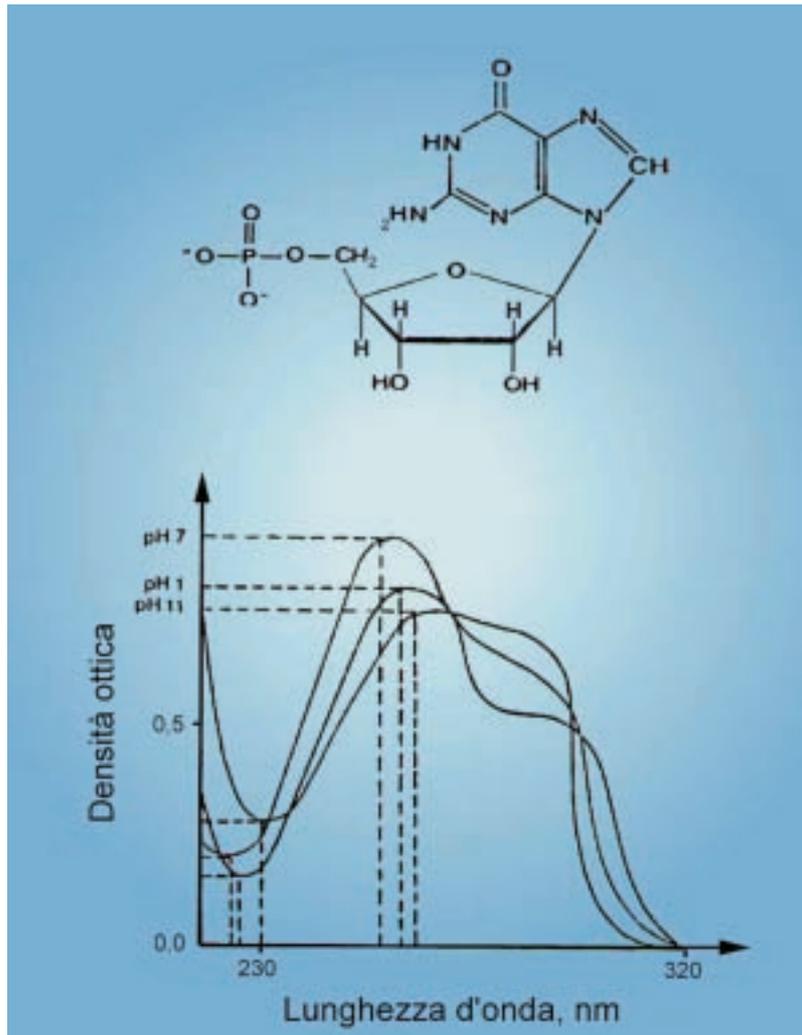
Questo parametro *DO* si misura in *cuvette standard* con uno spessore, *light path*, di  $l$  cm (per le misurazioni nel visibile sono adatte cuvette di vetro, mentre per le misurazioni nell'ultravioletto - che non passa attraverso il vetro - vengono adoperate cuvette di quarzo).

Il valore della densità ottica di un composto varia col variare della lunghezza d'onda. Tale correlazione si traduce in una curva "*DO vs.  $\lambda$* " detta *spettro di assorbimento* (Fig.39).

Lo spettro di assorbimento è caratteristico per i diversi composti e dipende dal *pH* del mezzo quando questi possiedono gruppi funzionali ionizzabili, come nel caso delle basi azotate degli acidi nucleici. Di conseguenza il *pK* di questi gruppi, la cui ionizzazione varia col *pH* (Fig.40), può essere determinato facendo uso di uno spettrofotometro.

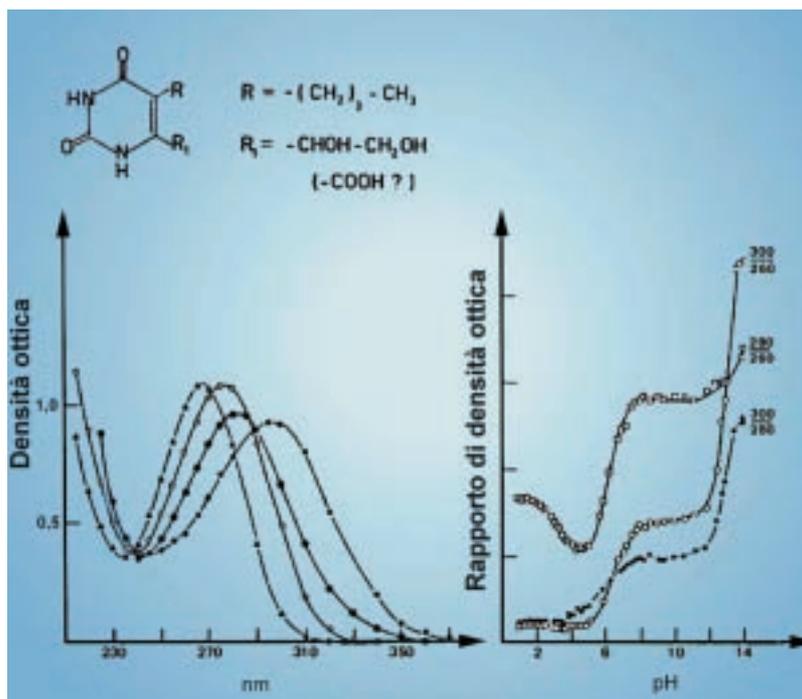
**Fig. 39**

*Fasci spettrali del nucleotide guanosin-5'-monofosfato (GMP) registrati in UV a pH diversi. Mentre i valori massimi e minimi di assorbimento variano a pH 1, 7 e 11 (testimoniando la presenza di gruppi dissociabili nel GMP), vi sono dei punti detti isosbastici che rimangono fissi (testimoniando la presenza in questa molecola di parti non ionizzabili). La variazione della densità ottica in funzione del pH comporta un'altrettanta variazione di  $\lambda$ .*



**Fig. 40**

*Determinazione spettrofotometrica dei valori pK di gruppi cromofori ionizzabili legati a una sostanza aromatica. In alto, è mostrata la struttura della base azotata di uno dei quattro nucleosidi-monofosfato associati all'apoenzima della NADPH-deidrogenasi cerebrale descritti nel 1967 dallo scrivente e da A. Giuditta. In basso a sinistra è mostrato lo spostamento degli spettri di assorbimento di questa base, in UV, in funzione del pH (da 1 a 14). In basso a destra, sono mostrati i valori pK dei suoi gruppi -OH, -NH<sub>2</sub> e -COOH che dissociano a pH 3, 6 e 13.*



## b. Il coefficiente molare di estinzione

La densità ottica varia con la concentrazione della sostanza presente in un dato solvente. Pertanto essa può essere adoperata con successo in Chimica Analitica.

Per esempio, a 1  $DO_{256nm}$  corrispondono: 50  $\mu g$  di DNA a doppia elica (*ds*), 40  $\mu g$  di DNA a singola elica (*ss*) oppure 20  $\mu g$  di basi azotate (adenina, guanina, timina e citosina insieme).

La ragione di ciò è da ricercarsi nel rapporto che sussiste fra tre parametri: *concentrazione*, *coefficiente molare di estinzione* e *densità ottica*.

La densità ottica è direttamente proporzionale alla concentrazione:

$$\log \frac{I_0}{I_t} = \epsilon h C \quad (4)$$

dove  $\epsilon$  è il coefficiente molare di estinzione,  $h$  è lo spessore (1 cm) e  $C$  è la concentrazione.

Questa correlazione, detta *Legge di Lambert-Beer*, può essere:

$$\frac{I_0}{I_t} = 10^{\epsilon h C} \quad (5)$$

oppure

$$I_t = I_0 \cdot 10^{-\epsilon h C} \quad (6)$$

L'estinzione  $\epsilon$  ha il valore di *coefficiente di poporzionalità* ed è costante per una determinata sostanza a una certa lunghezza d'onda (Fig.39). Se  $h = 1$ , si può esemplificare

$$C = \frac{DO}{\epsilon} \quad (7)$$

in modo che, conoscendo la densità ottica  $DO$  e il coefficiente molare di estinzione  $\epsilon$ , è possibile conoscere anche la concentrazione  $C$  della sostanza (di solito espressa in  $\mu\text{moli/ml}$ ). Viceversa, se per esempio la concentrazione  $C$  di un nucleotide è nota (in base, si supponga, al suo fosfato o al suo pentoso), siccome il rapporto base:pentoso:fosfato è 1:1:1, misurando la sua densità ottica, è possibile conoscere anche il suo coefficiente molare di estinzione:

$$\epsilon = \frac{DO}{C} \quad (8)$$

Le misurazioni relative alle regioni ionizzanti lungo la scala delle onde elettromagnetiche (Fig.38) si effettuano in altri tipi di macchine (*radiospettrofotometri*). Valga l'esempio delle *particelle  $\beta^-$*  e dei *raggi  $\gamma$*  che vengono rivelati rispettivamente dai cosiddetti  *$\beta^-$*  e  *$\gamma$ -counter*.

