

1 Principi fisici

1.1 La struttura della materia

L'ipotesi atomica

Una delle più importanti conquiste della scienza è consistita nello scoprire che la materia è costituita da un certo numero limitato di costituenti elementari chiamati atomi. L'ipotesi che la materia sia costituita da alcune particelle indivisibili risale ai primi filosofi greci e la parola atomo deriva dalla parola greca $\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$ (àtomos) che significa appunto indivisibile.

Tavola degli elementi

1																	2
3	4											5	6	7	8	9	10
11	12											13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110								
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71				
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103				

Fig. 1 La tavola periodica degli elementi nella sua forma attuale

Ci vollero però un paio di millenni prima di poter disporre di una prova certa, basata su osservazioni scientifiche ripetibili, dell'effettiva esistenza degli atomi. Ciò avvenne all'inizio del '900 e anche in questo caso, come per molte altre scoperte fondamentali della fisica contemporanea, un ruolo importante lo ebbe Albert Einstein.

In epoche precedenti, pur non esistendo prove certe dell'esistenza degli atomi, molti scienziati, soprattutto chimici, diedero ugualmente importanti contributi allo sviluppo della nostra conoscenza della materia e delle sue proprietà, e la sintesi di questa attività fu la tavola periodica degli elementi. Questa tavola, mostrata nella figura 1, venne proposta dal chimico russo Dmitrij Ivanovič Mendeleev nel 1869 con l'idea di sistematizzare le informazioni relative ai 63 elementi chimici fino ad allora scoperti. Nello studio delle loro proprietà Mendeleev si rese conto che nel comportamento chimico degli elementi vi erano delle regolarità che si ripetevano periodicamente e quindi organizzò gli elementi stessi in una tabella. Nella tabella vi erano diversi spazi ancora vuoti e Mendeleev affermò che questi corrispondevano a elementi non ancora scoperti, arrivando anche a prevederne le proprietà chimiche. Nel giro di alcuni anni questi elementi mancanti vennero effettivamente scoperti e si constatò che le loro proprietà erano proprio quelle previste.

Quando, all'inizio del '900, divenne chiaro che la materia è costituita da unità elementari, ci si rese anche conto del fatto che esiste un numero limitato di tipologie di atomi e che a ciascuna di esse corrisponde un particolare elemento chimico. Gli atomi sono molto piccoli, ed è per questo che c'è voluto tanto tempo prima di poterne dimostrare con certezza l'esistenza. Le loro dimensioni sono dell'ordine del decimiliardesimo di metro e quindi, quando si parla di dimensioni atomiche, si adottano unità di misura diverse e più adatte a oggetti così piccoli. Una delle unità più utilizzate è chiamata Ångstrom: $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$. Le dimensioni tipiche degli atomi sono di circa 1 \AA .

Ciascuna delle caselle della tabella periodica è individuata da un numero, detto numero atomico, il cui valore è 1 per il primo elemento, l'idrogeno, 2 per l'elio, e così via fino all'uranio il cui numero atomico è pari a 92. Quasi tutti gli elementi fino all'uranio sono

effettivamente presenti in natura. Nel corso degli ultimi decenni è stato possibile creare artificialmente anche elementi con numeri atomici più alti. Questi elementi sono detti transuranici perché, nella tabella periodica, vengono dopo l'uranio. Nessuno di questi elementi è presente in natura perché gli atomi di cui sono costituiti sono instabili e si disintegrano spontaneamente in tempi generalmente molto rapidi.

Le forme di aggregazione della materia

Partiamo dunque dal presupposto che tutta la materia è formata da atomi. È bene precisare che, dal momento che gli atomi sono molto piccoli, qualsiasi oggetto macroscopico ne contiene sempre un numero enorme. Persino un microbo, che è possibile osservare solo con un buon microscopio, è costituito da circa mille miliardi di atomi. Gli atomi si uniscono fra loro in diversi modi dando così luogo a tutte le innumerevoli forme in cui ci appare la materia. Nel seguito vedremo i più importanti fra questi modi di aggregazione.

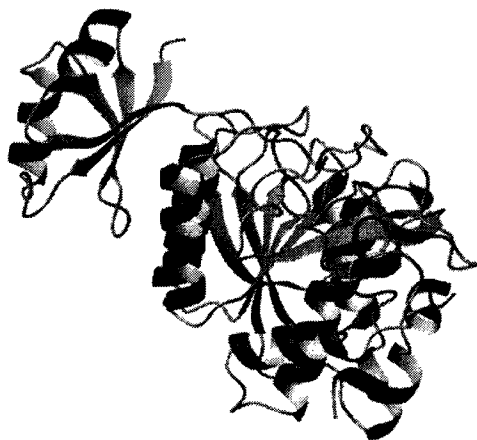


Fig. 2 Molecola di subtilisina, un enzima

Le molecole

Quando alcuni atomi si uniscono fra loro, l'oggetto cui danno luogo prende il nome di molecola. Un esempio di molecola è costituito

dall'ossigeno, uno dei primi elementi della tabella periodica, che normalmente ci appare come un gas. Si potrebbe pensare che, in un gas, gli atomi si muovano liberamente all'interno del contenitore che lo contiene. È all'incirca così, l'unica differenza è che in realtà gli atomi di ossigeno non vivono da soli ma si legano fra loro a coppie formando molecole di ossigeno la cui formula chimica si indica con O_2 . Anche l'azoto, l'elemento che segue l'ossigeno nella tabella periodica, forma molecole costituite da due atomi uguali. Molecole di questo tipo sono dette biatomiche. L'aria, il gas più noto e importante, è appunto costituita da una miscela di molecole di azoto (80 %) e di ossigeno (20 %), oltre a una piccola frazione di altre sostanze. In un gas, come si è detto, le molecole si muovono liberamente e interagiscono poco le une con le altre. Si può anche dire che le diverse molecole si ignorano completamente fra loro e al massimo quello che capita è che urtino fra loro rimbalzando poi ciascuna per la propria strada come in una specie di autoscontro perpetuo.

Un altro importante esempio di molecola è quella in cui un atomo di ossigeno si unisce a due atomi di idrogeno, formando la ben nota molecola dell'acqua. L'acqua che vediamo in un bicchiere è formata da un numero enorme di molecole, tutte esattamente uguali le une alle altre. Nella sua fase liquida l'acqua è una miscela di queste molecole mischiate fra loro alla rinfusa come chiodi in una scatola, tutti uguali ma disposti senza alcun ordine. A differenza dei chiodi però le molecole d'acqua sono in continuo movimento e la loro disposizione cambia continuamente (questo moto perpetuo è ciò che comunemente si indica col termine agitazione termica; tanto più elevata è la temperatura, tanto più le molecole si agitano).

Le molecole possono essere piccole e formate da pochi atomi, come appunto l'acqua, o essere enormemente complicate e contenere milioni di atomi, come ad esempio quelle che costituiscono gli organismi viventi. Queste molecole hanno tutte in comune il fatto di contenere, fra gli altri, l'elemento chimico fondamentale per la vita, il carbonio. Per questo motivo, cioè il fatto che danno luogo agli organismi viventi, le molecole contenenti il carbonio prendono il nome di molecole organiche. Un esempio di complessa molecola organica è mostrato nella fig. 2. A differenza delle semplici molecole inorganiche come l'acqua, molecole di questo tipo possono anche

deformarsi facilmente e cambiare forma, e proprio da questa prerogativa dipendono molte delle loro proprietà e di conseguenza degli organismi più complessi cui danno luogo.

I solidi cristallini

La formazione delle molecole non è l'unico modo che gli atomi hanno a disposizione per aggregarsi fra loro. Quando molti atomi si uniscono fra loro per dar luogo a una disposizione caratterizzata da un preciso ordine, allora si ha a che fare con i solidi cristallini o cristalli (da non confondere con i cristalli usati per realizzare i bicchieri di vetro che, come vedremo più avanti, non rientrano per niente nella categoria dei solidi cristallini).

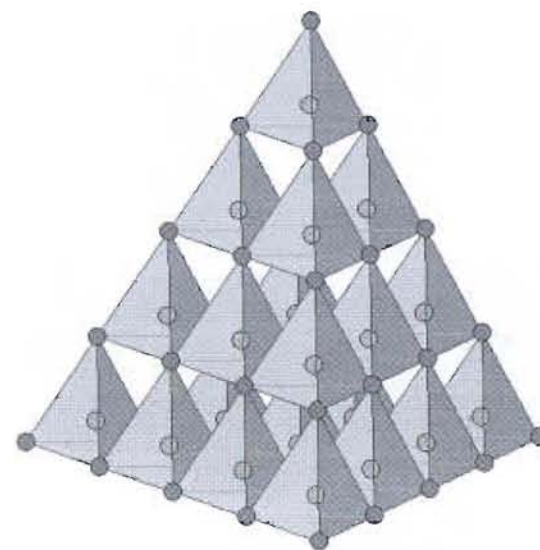


Fig. 3 Struttura cristallina del diamante. Ciascun pallino rappresenta un atomo di carbonio

Un esempio molto noto di solido cristallino è il diamante. Questo materiale è costituito da atomi di carbonio disposti in modo tale che ciascuno di essi formi quattro legami con altrettanti atomi. Questo fa sì che gli atomi, legandosi fra loro in gran numero, diano luogo a una struttura regolare come quella mostrata nella figura 3.

Il caso del diamante è semplice perché è un materiale costituito da atomi di un solo tipo. È tuttavia possibile, anzi è il caso più comune, che più atomi diversi diano comunque luogo a una struttura ordinata costituita da tanti gruppi di atomi impilati con regolarità. Un caso noto e semplice è quello del sale da cucina, il cloruro di sodio, costituito da un ugual numero di atomi di sodio e di cloro. Nella figura 4 si vede appunto come due tipi diversi di atomo possano formare una struttura regolare (della quale, nella figura, si vede solo un piccolo pezzo, ma bisogna pensare che si può estendere indefinitamente). In questo caso la struttura che si forma è particolarmente semplice perché gli atomi si dispongono come se ciascuno di essi si trovasse sullo spigolo di un cubo, e quindi il materiale nel suo complesso è costituito da un grande numero di piccoli cubi di questo tipo disposti in modo ordinato.

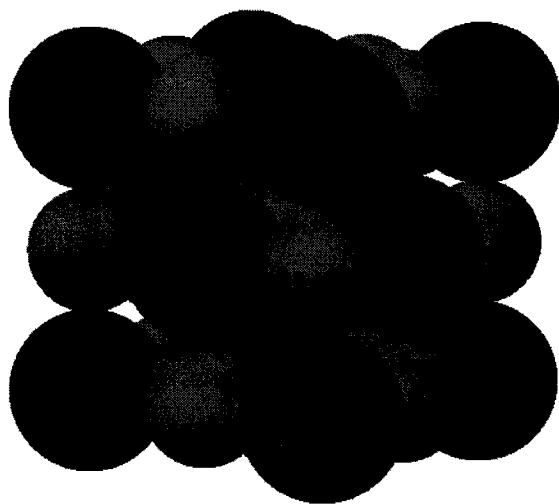


Fig. 4 Struttura cristallina del cloruro di sodio, NaCl. I due tipi di atomi, quelli del sodio (Na) e del cloro (Cl) sono disposti in modo ordinato secondo una geometria di tipo cubico

Il fatto che il cristallo di dimensioni macroscopiche sia costituito da piccole celle elementari, come il tetraedro nel caso del diamante (figura 3) oppure il cubo nel caso del sale da cucina (figura 4), influisce molto sul modo di apparire macroscopico di questi materiali. Prendiamo per esempio un piccolo cristallo di cloruro di sodio come

quello rappresentato nella figura 5 e che si può ottenere facilmente tritando del sale da cucina e osservandolo con un microscopio. Come si vede, questo cristallo ha la forma di un cubo e questa è una diretta conseguenza della sua struttura microscopica, cioè del modo in cui si dispongono gli uni rispetto agli altri gli atomi che costituiscono il materiale.

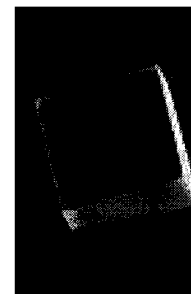


Fig. 5 Piccolo cristallo di cloruro di sodio

Un altro esempio di cristallo è il ghiaccio, che si forma quando la temperatura dell'acqua scende al di sotto di zero gradi centigradi. In queste condizioni l'agitazione termica diventa abbastanza piccola da consentire alle molecole d'acqua di rimanere disposte in modo regolare invece di muoversi senza formare legami stabili con le altre molecole come avviene invece nella fase liquida. Nella parte di sinistra della figura 6 si vedono le molecole d'acqua disposte in modo regolare e ordinato.

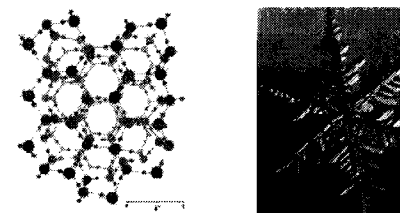


Fig. 6 Cristallo di ghiaccio e struttura cristallina relativa

Da notare che, a livello microscopico, le molecole d'acqua si dispongono a formare delle figure esagonali. Nella parte di destra

invece si vede un fiocco di neve, cioè un cristallo di ghiaccio di dimensioni macroscopiche. Anche in questo caso si nota come la struttura che si forma sia caratterizzata dalla presenza di esagoni. Come già osservato in precedenza, questa caratteristica dell'oggetto macroscopico è determinata dal modo di disporsi reciprocamente, a livello microscopico, degli atomi che lo costituiscono.

I materiali policristallini

Se consideriamo un sasso, oppure un pezzo d'acciaio, non è facile riconoscere che si tratta di solidi cristallini. Infatti, questi materiali non hanno quelle forme simmetriche che caratterizzano, ad esempio, i fiocchi di neve o i cristalli di sale da cucina delle fotografie precedenti. Per comprendere questa apparente contraddizione bisogna osservare questi materiali (sassi, metalli) con un microscopio capace di ingrandire le immagini alcune centinaia di volte. Quello che si vede osservando ad esempio delle rocce sono immagini come quelle raffigurate nella figura 7. Si intuisce che in realtà una qualsiasi roccia, anche se a occhio ci appare perfettamente omogenea, a livello microscopico non lo è affatto ma risulta essere formata da tanti piccoli pezzi. Ciascuno di questi pezzi, per l'appunto, è un cristallo all'interno del quale gli atomi si trovano disposti secondo un ordine ben preciso.

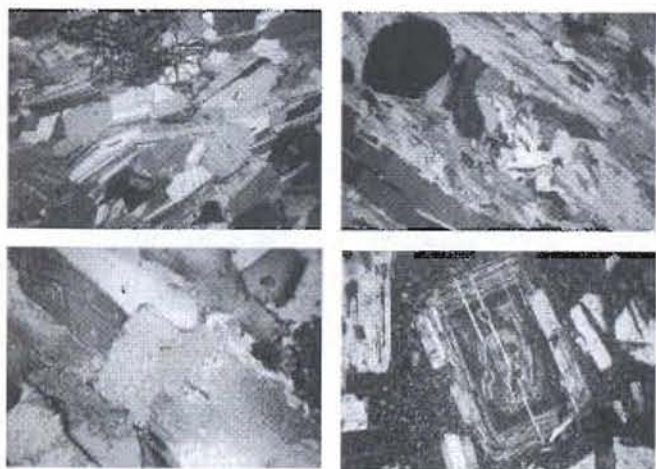


Fig. 7 Immagini riprese al microscopio di diverse rocce

Materiali di questo tipo, costituiti da molti cristalli disposti in modo casuale, sono detti policristallini. In questa categoria rientrano praticamente tutti i minerali, ivi compresi i materiali per l'edilizia e i pigmenti minerali utilizzati come coloranti. Le dimensioni dei piccoli cristalli che costituiscono i materiali policristallini sono di solito piuttosto piccole, decimi di millimetro o anche meno.

I materiali amorfi

Le molecole e i solidi cristallini rappresentano situazioni nelle quali gli atomi si uniscono a formare una struttura ordinata disponendosi in modo preciso. Nel caso delle molecole l'ordine è limitato agli atomi che le costituiscono, nel senso che tutte le molecole di un certo tipo sono esattamente uguali le une alle altre. Nel caso di un solido invece quest'ordine si estende all'infinito, o per lo meno a tutto il solido. Abbiamo però già citato il caso dei liquidi nei quali le molecole costituenti, pur essendo tutte uguali fra loro, si trovano mischiate alla rinfusa nel contenitore, e abbiamo fatto l'esempio dei chiodi in una scatola. Trattandosi di un liquido le molecole sono libere di muoversi e quindi non si instaurano legami stabili fra due molecole particolari. Immaginiamo però di "congelare" il materiale esattamente come appare in un istante qualsiasi, con tutte le molecole mischiate senza alcun ordine. Possiamo per esempio pensare di incollare improvvisamente le molecole contenute in un bicchier d'acqua mantenendo però la disposizione che hanno in quel momento. Quello che si ottiene è un solido nel quale atomi e molecole non sono disposti in modo ordinato, come nei cristalli, ma in modo casuale. Solidi di questo tipo esistono e si chiamano amorfi, cioè privi di una "forma" particolare.

Questo dell'acqua è solo un esempio per rendere l'idea, in realtà l'acqua quando solidifica lo fa nel modo descritto in precedenza, disponendo le molecole in modo ordinato. Ci sono però molti solidi costituiti da molecole mischiate fra loro in modo casuale. Per esempio, quasi tutte le materie plastiche sono costituite da molecole di dimensioni anche considerevoli, mischiate fra loro in modo assolutamente caotico. Si tratta di solito di molecole costituite da lunghe catene di atomi di carbonio ai quali sono legati atomi di idrogeno e altri elementi. Queste molecole, proprio per la loro

lunghezza, possono piegarsi, e quando se ne mettono insieme tante si forma una materiale che, a livello microscopico, è abbastanza simile a un piatto di spaghetti.

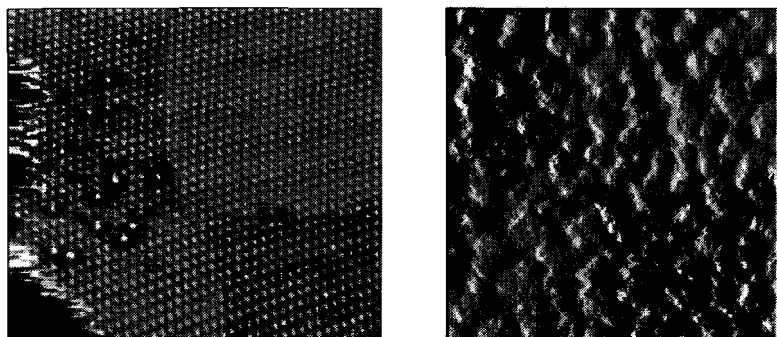


Fig. 8 Immagini riprese con un microscopio a forza atomica di un cristallo, a sinistra, e di un materiale amorfo, a destra

Per capirci meglio si osservino le due immagini mostrate nella figura 8, acquisite utilizzando un microscopio che consente di vedere i singoli atomi (è molto diverso dai microscopi tradizionali, il suo nome è AFM, acronimo inglese che significa Atomic Force Microscope, microscopio a forza atomica). In quella di sinistra si vede un cristallo di rame e ciascuno dei pallini chiari corrisponde a un singolo atomo di rame. È evidente la presenza di un ordine preciso nella disposizione degli atomi. I pochi pallini bianchi nella parte di sinistra sono atomi di piombo depositi intenzionalmente sul rame. Nell'immagine di destra invece è raffigurata la superficie di un pezzo di plastica. Ciascuno dei grumi che si osservano corrisponde a una singola molecola. Come si vede, manca del tutto una forma di ordine nella loro disposizione.

Ci sono anche solidi amorfi, che non sono costituiti da tante molecole mischiate alla rinfusa, ma che sono invece dei solidi cristallini (cioè ben ordinati) nei quali si è introdotto del disordine. Nella figura 9, nella parte sinistra, è mostrato il caso di un cristallo generico. Nella parte di destra invece si vede lo stesso cristallo reso amorfo facendo variare (non importa come) le distanze fra gli atomi in modo casuale. In questo modo, avendo messo in disordine il tutto, non c'è più una struttura di tipo cristallino ma, appunto, una struttura amorfa.

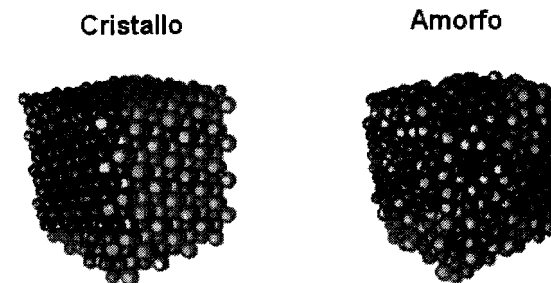


Fig. 9 Atomi in ordine (cristallo) e in disordine (amorfo)

L'esempio forse più noto di solidi amorfi è costituito dai vetri. Per rendere l'idea, il vetro è una versione amorfizzata del quarzo (costituito da atomi di silicio e ossigeno) un materiale che, nella forma cristallina, produce dei bellissimi cristalli di forma esagonale. Nella sua versione amorfa invece (il vetro) il materiale non assume una forma particolare e può essere facilmente plasmato a formare oggetti di forma arbitraria (dai vetri per le finestre alle spericolate creazioni dei vetrai di Murano).

1.2 La struttura dell'atomo

Il nucleo e gli elettroni

Come si è detto la materia, pur presentandosi in un'innumerabile varietà di forme, è costituita da un numero abbastanza limitato di costituenti fondamentali, gli atomi. In realtà le cose possono essere ulteriormente semplificate perché gli atomi, a loro volta, sono costituiti da un numero ancora più piccolo di costituenti fondamentali: i protoni, i neutroni e gli elettroni. Tutti oggi sappiamo come è fatto un atomo. Al suo interno si trova il nucleo, costituito da protoni e neutroni, intorno al quale ruotano gli elettroni (figura 10).

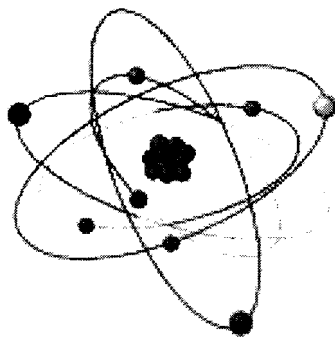


Fig. 10 L'atomo

Le proporzioni reali di questi oggetti però non sono quelle mostrate nella figura. Nella realtà il nucleo è piccolissimo rispetto all'atomo. Se questo ha una diametro di circa 1 Å, il diametro del nucleo è centomila volte più piccolo (dell'ordine di 10^{-15} m). Ciò che caratterizza un atomo è il numero di protoni contenuti nel nucleo. Questo numero si chiama numero atomico e vale 1 per l'idrogeno, 2 per l'elio, fino ad arrivare a 92 per l'uranio (il numero atomico si indica solitamente con la lettera Z). Nel nucleo, oltre ai protoni, ci sono anche i neutroni la cui funzione è essenzialmente quella di tenere insieme le particelle che costituiscono il nucleo che altrimenti tenderebbero a respingersi le une con le altre essendo i protoni delle cariche elettriche positive. Siccome la maggior parte della massa di un

atomo si trova concentrata nel nucleo (gli elettroni sono leggerissimi) il numero totale di particelle contenuto nel nucleo si chiama numero di massa (il numero di massa si indica solitamente con la lettera A). Gli elettroni sono particelle cariche negativamente che si muovono intorno al nucleo. Per assicurare la neutralità elettrica dell'atomo nel suo complesso il numero di cariche positive e negative deve essere uguale, e quindi il numero di elettroni in un atomo è uguale al numero di protoni nel nucleo (questo perché la carica dei protoni e degli elettroni è esattamente uguale in valore assoluto, la differenza è nel segno).

Una cosa importante da comprendere è il fatto che, mentre il numero di protoni in un atomo di un dato elemento chimico è sempre lo stesso, il numero di neutroni può variare. Prendiamo per esempio il carbonio, un elemento chimico molto importante. Il suo numero atomico è 6, quindi nel suo nucleo ci sono 6 protoni e intorno al nucleo ruotano 6 elettroni. Nella maggior parte degli atomi di carbonio il nucleo contiene anche 6 neutroni, il che corrisponde a un numero atomico pari a 12 (per indicare questo tipo di carbonio si indica il suo simbolo chimico con il numero di massa scritto in alto a sinistra, ^{12}C). Per la precisione, il 98.9 % degli atomi di carbonio è fatto in questo modo. Tuttavia, una piccola frazione degli atomi ha dei nuclei con 7 neutroni, cioè ha un numero di massa pari a 13 (^{13}C), e una frazione ancora più piccola ha nuclei con 8 neutroni, e quindi numero di massa pari a 14 (^{14}C). In altre parole, il carbonio può esistere in forme diverse che vengono chiamate isotopi (parola di origine greca che significa che stanno nello stesso luogo, cioè nella stessa casella della tabella periodica).

Le orbite elettroniche

La definitiva conferma dell'esistenza degli atomi venne agli inizi del '900. Pochi anni prima, nel 1895, il fisico inglese J. J. Thomson aveva scoperto l'esistenza di una delle particelle che costituiscono gli atomi, l'elettrone. Sulla base di questa scoperta nel 1902 un altro scienziato inglese, William Thomson meglio conosciuto come Lord Kelvin, ipotizzò per primo che l'atomo dovesse essere una specie di panettone di carica positiva nel quale, al posto dei canditi, trovavano posto gli

elettroni carichi negativamente. Le cose non stanno proprio così, come dimostrò nel 1911 un fisico neozelandese, Ernest Rutherford. Nel suo modello di atomo la carica positiva si trova al centro e gli elettroni le ruotano intorno, come i pianeti intorno al sole. Nel modello di Rutherford non sono menzionati i neutroni, che vennero scoperti solo negli anni '30. Anche questo modello però si rivelò inadeguato, perchè ipotizzare che gli atomi siano come dei piccoli sistemi solari porta a contraddizioni insanabili con le leggi della fisica classica, cioè quella nata con Galileo e Newton e culminata con la teoria di Maxwell dei fenomeni elettrici e magnetici. Per questo motivo, per spiegare come sono fatti gli atomi si dovette costruire una fisica nuova, la meccanica quantistica. Questa branca della fisica venne creata negli anni '20 a opera di numerosi scienziati e da allora ha consentito di comprendere molti aspetti del comportamento degli atomi. Capire la meccanica quantistica è un compito impegnativo che richiede lunghi studi e l'apprendimento di tecniche matematiche alquanto sofisticate. In questa sede non proveremo nemmeno ad addentrarci in questi argomenti ma ci limiteremo a proporre un modello molto semplificato di atomo. Ci baseremo sul modello planetario di Rutherford adattandolo in modo abbastanza fantasioso. Quello che descriveremo non ha lo scopo di mostrare come sia fatto "realmente" un atomo, ma solo di rendere l'idea di alcune delle sue proprietà più importanti. Va anche detto che nemmeno i fisici sono in grado di descrivere come è fatto un atomo nel senso in cui si descrive un qualsiasi oggetto macroscopico, che so, un'automobile. E la ragione è facile da capire, l'automobile è alla portata dei nostri sensi e quindi possiamo parlare della sua forma, del suo colore, del suo odore, di tante cose che i nostri sensi ci permettono di percepire. Gli atomi invece sono talmente piccoli che qualsiasi esperienza sensoriale diretta delle loro proprietà ci è preclusa.

Per farci un'idea di come sono fatti gli atomi torniamo a considerare la tabella periodica. Il primo elemento chimico è l'idrogeno, il cui nucleo contiene un protone e intorno al quale ruota un elettrone. Il secondo elemento chimico è l'elio, con due protoni e due elettroni. Si può pensare di creare uno qualunque degli elementi della tabella periodica partendo dal nucleo e aggiungendo tanti elettroni quanti sono i protoni in esso contenuti. Il punto importante è il modo in cui gli elettroni si distribuiscono intorno al nucleo. Se pensiamo al sistema solare, non ci

sono limitazioni su come i pianeti si possono disporre intorno al sole, nel senso che non ci sono limiti sulla distanza e sulla forma dell'orbita che ciascuno di essi può seguire. Per gli elettroni la cosa è molto diversa e la meccanica quantistica ci ha permesso di capire che non possono mettersi dove capita. Infatti, intorno ad un nucleo vi sono dei percorsi obbligati che l'elettrone deve seguire. Per capire il concetto lasciamo perdere il rigore scientifico e osserviamo un dipinto di Botticelli che rappresenta l'Inferno come se lo era immaginato Dante (figura 11). Come si vede, l'Inferno Dantesco è un grande buco a forma di imbuto sulla cui parete interna si trovano tanti anelli, i gironi, collocati a quote diverse, lungo i quali si muovono i dannati.

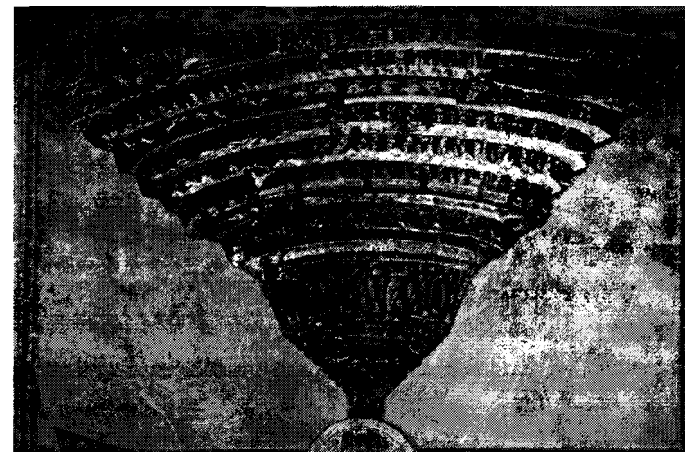


Fig. 11 L'Inferno Dantesco come lo raffigurò Sandro Botticelli

Bene, cosa c'entra l'inferno di Dante con gli atomi? C'entra nel senso che anche gli elettroni intorno al nucleo sono costretti, dalle leggi della natura, a muoversi lungo percorsi ben definiti. Immaginiamo, per semplificare al massimo il discorso, di poter considerare gli elettroni come delle minuscole sferette che rotolano lungo traiettorie circolari intorno al nucleo (è bene ribadire che non è affatto così, ma accontentiamoci, di più non si può proprio fare). Queste piste circolari corrispondono proprio ai gironi infernali e, in fisica, prendono il nome di shell. Shell in inglese vuol dire guscio ed è più corretto parlare di "guscio" piuttosto che di "pista" perché, in effetti, gli elettroni ruotano

in tre dimensioni intorno al nucleo, quindi invece che su circonferenze si muovono lungo superfici sferiche, cioè delle specie di gusci.

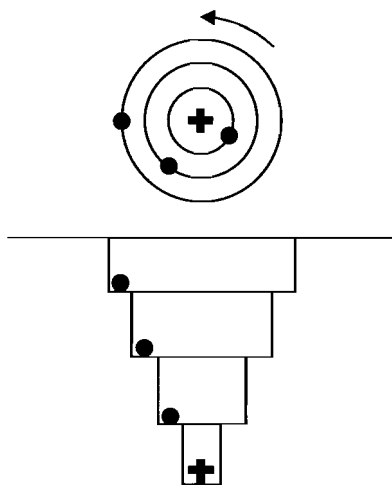


Fig. 12 Un semplice modello atomico

Se accettiamo l'idea di considerare l'atomo come una specie di imbuto con tante piste circolari sulle quali ruotano gli elettroni, abbiamo a che fare con una situazione come quella mostrata nella figura 12. In fondo all'imbuto si trova il nucleo, con la sua carica positiva. Sulle pareti laterali ci sono le shell lungo le quali ruotano gli elettroni. Queste shell si trovano a diverse altezze (e dopo vedremo cosa questo possa significare) e vengono indicate con numeri progressivi o, anche, con delle lettere a partire dalla K. La prima shell quindi è la numero 1 (K), la seconda 2 (L), la terza 3 (M), la quarta 4 (N), la quinta 5 (O). Non occorre specificarne altre, queste cinque bastano per gli atomi della tavola periodica.

Una delle conseguenze della meccanica quantistica è che, in ciascuna di queste shell può stare al massimo un certo numero di elettroni, numero che dipende dalla shell. Questa tabella riassume il numero massimo di elettroni nelle diverse shell:

Shell	Numero massimo di elettroni
1 (K)	2
2 (L)	8
3 (M)	18
4 (N)	32
5 (O)	50

Quando una shell è riempita completamente di elettroni, allora non può più contenerne altri, e quindi per formare gli elementi chimici successivi si deve cominciare a collocare gli elettroni nella shell successiva. Le shell complete sono particolarmente stabili, nel senso cioè che è difficile aggiungere o togliere un elettrone da esse. Gli elementi chimici che contengono solo shell complete sono i gas nobili, e la loro scarsa reattività chimica dipende proprio da questo fatto.

Un esempio di atomo che ci aiuta a capire tutti questi discorsi è il sodio. Il suo numero atomico è 11. Intorno al suo nucleo, che contiene 11 protoni, si trovano 11 elettroni così disposti: 2 si trovano nella prima shell, la shell K che ne può contenere al massimo 2, e altri 8 nella shell L, che ne può contenere al massimo 8. Col che abbiamo sistemato 10 elettroni. Per sistemare l'undicesimo, visto che nelle shell K e L non c'è più posto, bisogna mettere il povero elettrone rimasto tutto da solo nella terza shell, la shell M. Essendo da solo però l'elettrone non è vincolato rigidamente come i suoi fratelli delle due shell più interne, e in effetti è proprio lui quello che determina in modo più significativo il comportamento chimico e fisico del sodio.

I livelli energetici

Gli elettroni, carichi negativamente, sono attratti dal nucleo costituito da cariche positive. Per allontanare un elettrone da un atomo perciò bisogna vincere questa forza attrattiva "tirando" letteralmente l'elettrone fuori dall'atomo. Più gli elettroni si trovano vicino al nucleo, maggiore è la forza che si deve applicare. Per essere precisi, un elettrone ha bisogno di ricevere una certa quantità di energia per potersi allontanare dall'atomo. (Per dirla tutta, l'energia è pari al lavoro compiuto da una forza, che a sua volta è pari al valore della

forza moltiplicato per la distanza lungo cui agisce. Se per estrarre un elettrone si deve applicare una forza maggiore, ne consegue che anche l'energia che in questo modo è necessario fornire all'elettrone è maggiore).

Prendiamo ad esempio il solito atomo di sodio. Come abbiamo visto in questo elemento ci sono tre tipi di elettroni (grosso modo). Quelli della shell K, la più interna. Quelli della shell L, e infine l'unico elettrone esterno nella shell M. Per estrarre da un atomo l'elettrone più esterno, quello della shell M, bisogna fornire una modesta quantità di energia. Nel mondo degli atomi si usa una particolare unità per esprimere i valori dell'energia: questa unità prende il nome di elettronvolt, e si indica con la sigla eV (per chi si intende di queste cose l'elettronvolt è l'energia acquistata da un elettrone che si muove tra una differenza di potenziale di 1 V ed è pari a 1.6×10^{-19} Joule). Per ionizzare l'atomo di sodio estraendo l'elettrone più esterno bisogna fornire un'energia di circa 5 eV. Vedremo più avanti come si possa realizzare in pratica una cosa del genere. Per i livelli più interni l'energia in gioco è molto maggiore. Per gli elettroni della shell L, ad esempio, sono necessari 63 oppure 30 eV (ci sono in realtà due tipi di elettroni nella shell L), che diventano 1070 eV per gli elettroni più interni, quelli della shell K (che sono di un tipo solo).

1.3 La radiazione elettromagnetica

Le cariche e i campi elettrici e magnetici

La materia, come si è visto, è costituita da atomi che, a loro volta, sono costituiti da particelle cariche, i protoni e gli elettroni (oltre ai neutroni che non possiedono carica elettrica ma hanno un'altra funzione, quella di mantenere uniti i nuclei atomici). A questo punto è bene riassumere alcune informazioni importanti relativamente alle cariche elettriche, che nel seguito ci serviranno per capire molte cose.

Cominciamo con il considerare una carica elettrica nel vuoto, per esempio una carica positiva. Una carica di questo tipo modifica, in qualche modo, lo spazio circostante. Per rendercene conto possiamo mettere un'altra carica in prossimità della prima. Come si sa, quello che vedremo sarà il manifestarsi di una forza attrattiva o repulsiva fra le due cariche (attrattiva se le cariche hanno segno opposto, repulsiva se sono dello stesso segno). Per questo motivo si usa dire che una carica elettrica genera intorno a sé un campo elettrico. Un modo molto semplice di sperimentare l'esistenza delle cariche elettriche e delle forze che esercitano le une sulle altre consiste nell'attrarre piccoli pezzi di carta con una penna di plastica dopo averla strofinata su un pezzo di tessuto.

Immaginiamo ora che la carica elettrica non sia immobile nello spazio, ma sia in movimento a velocità costante. Questo è quello che per esempio succede nei fili elettrici percorsi da corrente: una corrente elettrica è simile al flusso dell'acqua nelle tubature, solo che a muoversi non sono le molecole d'acqua ma le cariche elettriche (per la precisione gli elettroni contenuti nel materiale con cui sono realizzati i fili). Bene, se le cariche elettriche si muovono, nello spazio circostante si manifesta un altro tipo di influsso, e per rendercene conto possiamo provare a mettere una bussola vicino a un filo percorso da corrente. Quello che vediamo è che l'ago della bussola si muove, il che sta a indicare che in quella regione dello spazio nasce qualcosa quando la corrente elettrica fluisce. Questo qualcosa viene chiamato campo magnetico. Tutti i campi magnetici, anche quello generato dalle

calamite oppure quello terrestre, sono prodotti da cariche elettriche in movimento.

Le onde elettromagnetiche

Fin qui abbiamo parlato di cariche elettriche che, quando sono ferme, generano un campo elettrico e, quando sono in moto a velocità costante, un campo magnetico. Le cose più interessanti però si verificano quando le cariche elettriche si muovono a velocità variabile, cioè quando le cariche subiscono un'accelerazione. In questi casi succede la stessa cosa che capita quando si tocca una superficie d'acqua immobile con un dito. Come sappiamo, dal punto in cui abbiamo toccato l'acqua partono delle onde che si propagano in tutte le direzioni lungo la superficie del liquido. Nel caso delle cariche elettriche, quando una di queste subisce un'accelerazione, partono delle perturbazioni dei campi elettrico e magnetico che viaggiano nello spazio proprio come la perturbazione prodotta toccando la superficie dell'acqua si propaga nel liquido. Queste onde prendono il nome di onde elettromagnetiche. Tanto per dare un'idea dell'importanza di queste onde, pensiamo ad esempio al fatto che la luce è un'onda elettromagnetica.

Dunque, una particella carica elettricamente la cui velocità subisce delle variazioni, cioè delle accelerazioni, emette onde elettromagnetiche. Quando si parla di "variazioni" di velocità si possono intendere sia gli incrementi di velocità (come nel linguaggio comune, quando si parla di "accelerazione" si intende dire che la velocità sta aumentando) sia le diminuzioni di velocità (nel qual caso, nel linguaggio comune si parla di "decelerazione"). Nel linguaggio tecnico invece si parla di "accelerazione" sia per gli aumenti che per le diminuzioni della velocità. Per capire, con un esempio relativamente semplice, come vengano emesse le onde elettromagnetiche consideriamo il caso del tubo a raggi X.

Il tubo a raggi X è un dispositivo molto comune nei laboratori radiologici, negli studi dei dentisti e anche nei laboratori di indagine sui beni culturali. Il suo modo di funzionare costituisce un esempio molto semplice di come delle cariche accelerate possano emettere

onde elettromagnetiche, in questo caso i raggi X. Guardiamo la figura 13.

In un tubo a raggi X le cariche elettriche (elettroni) vengono emesse da un filamento incandescente, come quello delle comuni lampadine,

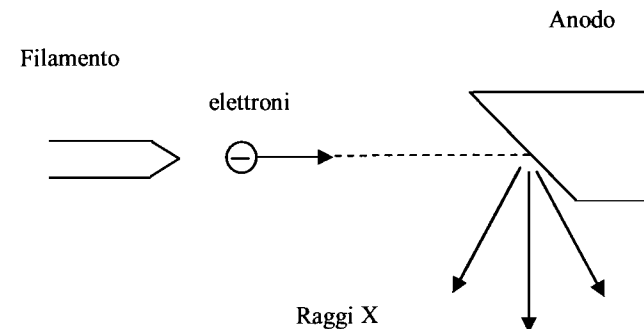


Fig. 13 Schema di funzionamento di un tubo a raggi X

e poi vengono accelerate per mezzo di una tensione dell'ordine di alcune decine di migliaia di Volt. In questo modo le cariche raggiungono velocità molto elevate. Per generare i raggi X, nei tubi, viene posta una piastra metallica (l'anodo) contro la quale gli elettroni a forte velocità vanno a urtare e si fermano. In questo modo la loro velocità subisce una forte accelerazione (in questo caso sarebbe una decelerazione) e questo comporta l'emissione di onde elettromagnetiche. I tubi a raggi X dei dentisti oppure quelli con i quali si fanno le radiografie per vedere se ci sono ossa rotte sono fatti proprio in questo modo.

Un altro esempio di cariche accelerate che emettono onde elettromagnetiche è quello che si verifica nelle antenne. Le antenne sono dei conduttori di forma opportuna. I conduttori sono quei materiali, come ad esempio i metalli rame e alluminio, all'interno dei quali si trovano tanti elettroni liberi di muoversi. Se si applica una tensione alternata a un conduttore metallico gli elettroni al suo interno cominciano a muoversi avanti e indietro. In questo modo la loro velocità varia sempre e quindi si ha un'emissione continua di onde elettromagnetiche dovuta all'accelerazione che le cariche subiscono continuamente. Nella antenne dei telefoni cellulari, ad esempio, le

cariche vengono fatte muovere avanti e indietro ad una frequenza di 1.8 GHz (un miliardo e 800 milioni di volte ogni secondo) e in questo modo dall'antenna partono le microonde che trasportano la nostra voce o i nostri sms. Anche quando si costringono gli elettroni a muoversi lungo una traiettoria circolare si provoca l'emissione di onde elettromagnetiche. Questo dipende dal fatto che anche se la velocità rimane la stessa, ai fini dell'emissione di onde elettromagnetiche contano anche le variazioni della sua direzione, e questo è il caso che si verifica quando le cariche girano su un'orbita circolare. Nei forni a microonde succede proprio questo. Il dispositivo che emette le microonde che scaldano le cibarie si chiama klystron e la frequenza di rotazione degli elettroni al suo interno è di 2.45 GHz (simile a quella dei telefonini).

Esistono onde elettromagnetiche di molti tipi diversi, ma tutte hanno degli elementi in comune. Cercheremo adesso di descrivere questi elementi in comune e di spiegare cosa rende diversi fra loro i vari tipi di onda elettromagnetica. Una carica elettrica oscilla e, come si è detto, genera delle perturbazioni che si propagano nello spazio. Un'analogia che rende abbastanza conto di come sono fatte le onde elettromagnetiche è quella della corda. Immaginiamo di appoggiare una corda su un piano come nella figura 14.

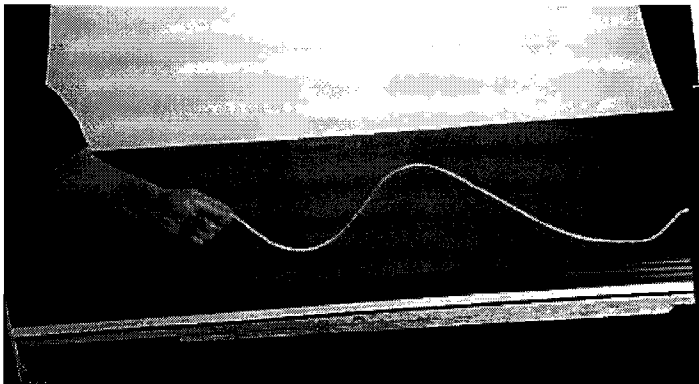


Fig. 14 Onda che si propaga su una corda

Se prendo una delle estremità della corda, e la faccio oscillare abbastanza velocemente, quello che vedo è un'onda che comincia a

propagarsi lungo la corda. In un linguaggio più preciso si dice che muovendo la corda genero una perturbazione, e che questa perturbazione si propaga lungo la corda con una certa velocità. In questo caso la perturbazione consiste nel fatto che la corda, invece di stare lungo una retta sul pavimento, subisce uno spostamento in direzione laterale.

Nel caso delle onde elettromagnetiche la cosa è molto più complicata da spiegare, ma se si fa un disegno di quello che succede ci si ritrova con qualcosa che somiglia molto al moto di un'onda su una corda. In questo caso la perturbazione non è uno spostamento fisico come nel caso della corda ma è invece un campo. Per la precisione, siccome i campi in gioco sono due, quello elettrico e quello magnetico, si hanno due perturbazioni, una di tipo elettrico e una di tipo magnetico, che si propagano insieme.

Nella figura 15 il campo magnetico è quello indicato con E, quello elettrico con B. A ciascuno di essi corrisponde, come si vede, un'onda che si propaga lungo la direzione orizzontale. Tutte le onde elettromagnetiche sono fatte in questo modo: ci sono un campo elettrico e un campo magnetico, fra loro perpendicolari, che danno luogo a perturbazioni che si propagano lungo una direzione perpendicolare a entrambi. La forma di questa perturbazione è una

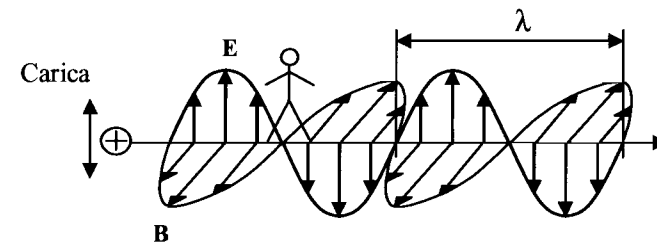


Fig. 15 Generazione e propagazione di un'onda

successione da massimi a minimi che si ripetono periodicamente a una distanza indicata con λ nella figura: si tratta della lunghezza d'onda. Ciò che contraddistingue i diversi tipi di onde elettromagnetiche è proprio la loro lunghezza d'onda λ .

A differenza di quanto si vede nella figura, un'onda elettromagnetica non è statica, ma le due onde del campo elettrico E e del campo magnetico B si propagano lungo la direzione indicata dalla freccia. La velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nello spazio vuoto (ma anche nell'aria) è la stessa per tutte, indipendentemente dalla loro lunghezza d'onda, ed è pari a 300.000 km/s. Proprio come la luce! Anzi, fu proprio dopo aver previsto che le onde elettromagnetiche si propagano tutte a 300.000 km/s che il loro scopritore (J. K. Maxwell) concluse che anche la luce deve essere un'onda elettromagnetica visto che viaggia proprio a quella velocità. Questa constatazione rappresenta tuttora una delle più clamorose conferme della validità di una teoria scientifica.

Un altro modo per caratterizzare un'onda, oltre che specificarne la lunghezza, è fare riferimento alla sua frequenza, che di solito si indica con la lettera greca ν . Per capire cosa è la frequenza di un'onda pensiamo a un omino, come quello della figura 15, che se ne sta fermo e vede l'onda che passa. Quello che lui vede è che i due campi E e B variano continuamente nel tempo, in modo periodico. Proprio come chi sta sulla riva di un fiume, fermo, e vede le onde che passano. Il tempo che intercorre tra il passaggio di due creste successive dell'onda (una lunghezza d'onda) si chiama periodo. Il suo inverso, che rappresenta quante lunghezze d'onda passano in un secondo, si chiama frequenza. La frequenza si esprime in Hertz (Hz); 1 Hz vuol dire un periodo al secondo. Nel caso delle onde dei telefoni cellulari la frequenza, come abbiamo visto prima, è di 1.8 GHz.

Le due grandezze che caratterizzano un'onda, la sua lunghezza e la sua frequenza, non sono fra loro indipendenti perché il loro prodotto deve essere pari alla velocità di propagazione dell'onda. Nel caso delle onde elettromagnetiche la loro velocità è, come si è detto, la velocità della luce, che di solito si indica con la lettera c . Quindi deve valere la relazione:

$$\lambda \nu = c \quad \text{da cui} \quad \lambda = \frac{c}{\nu} \quad \text{oppure} \quad \nu = \frac{c}{\lambda}$$

Per riassumere:

- Le onde elettromagnetiche sono perturbazioni del campo elettromagnetico che si propagano tutte alla stessa velocità, la stessa della luce.
- Le onde sono di tipo trasversale, vale a dire che la perturbazione (i campi E e B) è trasversale alla direzione di propagazione (le onde sonore invece sono onde longitudinali perché le fluttuazioni della pressione dell'aria che le costituiscono si verificano lungo la direzione di propagazione).
- Se si potesse fotografare un'onda elettromagnetica si vedrebbe un'onda caratterizzata da una certa lunghezza, detta lunghezza d'onda, che si indica con la lettera greca λ .
- Ciò che rende diversi fra loro i vari tipi di onda elettromagnetica è proprio la loro lunghezza d'onda. Esistono onde elettromagnetiche lunghe migliaia di km (le onde radio) e onde la cui lunghezza è dell'ordine delle dimensioni di un nucleo atomico (i raggi gamma). L'insieme di tutte le possibili onde elettromagnetiche costituisce ciò che si chiama lo spettro elettromagnetico.

Lo spettro elettromagnetico

Senza troppe pretese faremo ora una panoramica dello spettro elettromagnetico visitandone le regioni di lunghezza d'onda progressivamente decrescenti. Nel descrivere ciascuna delle regioni dello spettro elettromagnetico cercheremo di evidenziare le più importanti applicazioni di quel tipo di onde, illustrando i principi fisici che si utilizzano per generarle.

Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto, pur essendo numerosissime le modalità di generazione, tutte hanno in comune una caratteristica, che già conosciamo: per produrre onde elettromagnetiche è necessario accelerare delle cariche elettriche. Tipicamente, per produrre onde in modo continuo è necessario far oscillare periodicamente le cariche

elettriche. Si deve cioè disporre, per ciascun intervallo di frequenze, di un opportuno oscillatore di carica. Lo studio dell'oscillatore armonico in meccanica insegna che la frequenza di oscillazione dipende dalla rigidità della molla.

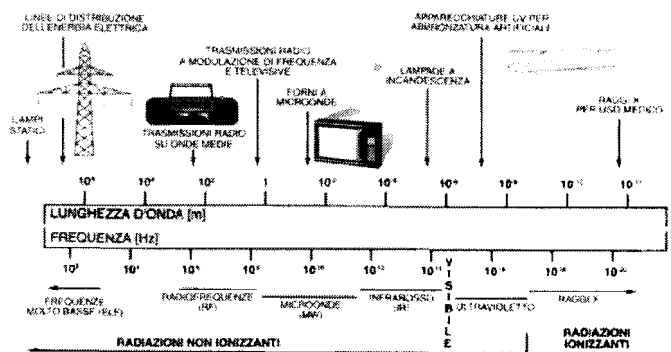


Fig. 16 Lo spettro elettromagnetico

Nel caso delle cariche elettriche, per generare onde di frequenza crescente si devono utilizzare oscillatori sempre più rigidi e questo, come vedremo, significa usare oscillatori sempre più piccoli.

Le onde radio

Il termine onde radio comprende una vastissima regione dello spettro, nella quale vengono incluse tutte le onde elettromagnetiche la cui lunghezza d'onda è superiore ad alcuni metri. Trattandosi di uno spettro così ampio la tecnologia ha coniato molti termini specifici per suddividere in modo più fine le onde radio in base alla loro lunghezza d'onda: onde lunghe, onde medie, onde corte, eccetera. In generale, queste onde trovano la loro applicazione nella trasmissione dei segnali radio. Per fare un esempio, le normali stazioni radio FM trasmettono i loro segnali utilizzando onde elettromagnetiche ad una frequenza intorno a 100 MHz (1 Megahertz = 10^6 Hz) cui corrisponde una lunghezza d'onda di circa 3 m.

Per generare le onde radio si utilizzano circuiti elettronici che fanno oscillare le cariche libere in un conduttore (l'antenna trasmittente) alla

frequenza desiderata. A loro volta, le onde emesse mettono in oscillazione le cariche presenti all'interno dell'antenna ricevente, anch'essa un conduttore. Queste oscillazioni vengono raccolte da un ulteriore circuito elettronico che amplifica l'intensità del segnale proveniente dall'antenna e lo trasforma, nel caso della radio, in un segnale acustico.

Le microonde

Le microonde sono caratterizzate da una lunghezza d'onda che va da pochi metri a pochi millimetri. Questa regione dello spettro è diventata importante durante la seconda guerra mondiale, quando venne sviluppato il radar, un dispositivo in cui le microonde vengono emesse da un'antenna per poi essere riflesse dall'oggetto di cui si vuole rilevare la presenza, ad esempio un aereo o una nave. Misurando il tempo trascorso dall'emissione delle microonde al momento in cui le onde riflesse tornano al punto di partenza (dove è installata anche l'antenna ricevente) è possibile stabilire la distanza dell'oggetto che ha prodotto la riflessione.

Le frequenze delle microonde sono in genere molto elevate: si consideri, ad esempio, che un'onda con una lunghezza d'onda di 3 mm ha una frequenza di 100 GHz (1 Gigahertz = 10^9 Hz). Attualmente i dispositivi elettronici sono in grado di operare normalmente fino a frequenze dell'ordine di alcune decine di GHz e quindi le frequenze delle microonde si collocano al limite superiore delle loro possibilità. Un esempio di apparecchiatura elettronica di largo consumo che sfrutta le microonde sono i telefoni cellulari, che operano a frequenze di 1.8 GHz. Il panorama delle applicazioni delle microonde è comunque destinato ad aumentare grazie al rapido sviluppo dei dispositivi elettronici.

L'infrarosso

Per radiazione infrarossa si intendono le onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda compresa fra alcuni millimetri e alcuni micron ($1 \mu\text{m} = 10^{-6}$ m). Per generare onde di questo tipo non è possibile utilizzare, allo stato attuale della tecnologia, circuiti elettronici, perché

le frequenze in gioco sono troppo elevate. Si devono quindi sfruttare i dispositivi già esistenti in natura, nei quali le cariche elettriche oscillano spontaneamente alle frequenze desiderate. Un esempio di sistema oscillante la cui frequenza di oscillazione si trova in questa regione dello spettro elettromagnetico è costituito dalle molecole. Consideriamo ad esempio la molecole dell'anidride carbonica, che contiene un atomo di carbonio al quale sono legati due atomi di ossigeno. I tre atomi sono allineati fra loro, con l'atomo di carbonio in posizione centrale. Gli atomi di ossigeno possono vibrare, proprio come delle molle, intorno alla loro posizione di equilibrio. La frequenza di oscillazione connessa con le vibrazioni della molecola di anidride carbonica è tale per cui quando gli atomi (costituiti da particelle cariche) oscillano, vengono emesse onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda pari a circa $10 \mu\text{m}$. È su questo fenomeno fisico che si basa la produzione di luce infrarossa nei LASER a CO_2 comunemente utilizzati nell'industria per il taglio dei metalli.

Le vibrazioni degli atomi che costituiscono la materia sono quindi responsabili dell'emissione di onde elettromagnetiche di tipo infrarosso. Quando si parla di vibrazioni atomiche è immediato pensare all'agitazione termica degli atomi. A temperatura ambiente (circa 300 K) sappiamo che gli atomi nella materia si trovano in uno stato di continua agitazione e, trattandosi di cariche in movimento, per quanto affermato in precedenza è lecito attendersi che a queste vibrazioni sia associata la generazione di onde elettromagnetiche nella regione dell'infrarosso. In effetti questo è proprio ciò che si verifica: tutti i corpi emettono radiazione elettromagnetica a una lunghezza d'onda che dipende dalla temperatura. Per temperature relativamente basse, la maggior parte della radiazione emessa è di tipo infrarosso. Questo è per esempio il caso degli organismi viventi a sangue caldo, che si trovano a una temperatura superiore rispetto all'ambiente in cui si muovono. Questa differenza di temperatura fa sì che gli organismi viventi, per esempio gli esseri umani, emettano una maggiore quantità di radiazione infrarossa rispetto all'ambiente circostante. Questo fenomeno fisico viene sfruttato nei sistemi di sorveglianza con i quali, utilizzando delle particolari telecamere sensibili alla radiazione infrarossa, è possibile visualizzare l'immagine di persone o animali anche di notte, in assenza di luce visibile.

La luce visibile

Le onde elettromagnetiche la cui lunghezza d'onda è all'incirca compresa fra $0.8 \mu\text{m}$ e $0.4 \mu\text{m}$ (ossia fra 800 e 400 nm, dove nm sta per nanometro: $1 \text{ nanometro} = 10^{-9} \text{ m}$) hanno un ruolo molto, ma molto importante nella nostra esistenza. Infatti, nonostante si tratti di un intervallo così piccolo dello spettro elettromagnetico, al suo interno ritroviamo tutto ciò che, nel linguaggio comune, è conosciuto come "luce". La visione, il nostro principale canale di comunicazione con la realtà, funziona perché le onde di questa specialissima regione dello spettro possono essere rivelate con incredibile efficienza da quel capolavoro di ingegneria che è l'occhio. Le straordinarie possibilità di questo sensore risultano evidenti in base a due diverse considerazioni.

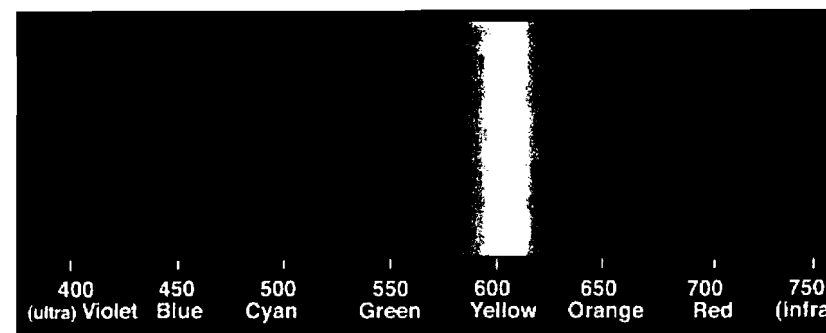


Fig. 17 Lo spettro della luce visibile. Le lunghezze d'onda sono espresse in nanometri (nm)

Innanzitutto la sua sensibilità. L'occhio umano è in grado di rivelare segnali di luce debolissimi e, allo stesso tempo, di vedere correttamente in condizioni di forte illuminazione, come ad esempio accade in pieno giorno. L'altro aspetto è la sensibilità dell'occhio umano alla lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica nello spettro del visibile. L'enorme varietà di colori che il nostro occhio è in grado di percepire ne è una prova (a parte i daltonici come nel caso dell'autore di questo testo). Il colore che noi percepiamo dipende dalla lunghezza d'onda della luce. Scorrendo l'intervallo di lunghezze d'onda della luce visibile e partendo da quelle maggiori andando verso quelle più piccole, si passa dal rosso, al verde, al giallo, al blu.

La frequenza della luce visibile è dell'ordine di 10^{15} Hz. Gli elettroni esterni degli atomi possono oscillare a queste frequenze, e infatti la luce visibile viene di solito generata proprio da questi elettroni. Anche l'agitazione termica delle cariche di cui sono costituiti gli atomi può dar luogo all'emissione di luce visibile e, al crescere della temperatura, diminuisce la lunghezza d'onda delle onde elettromagnetiche emesse. A temperatura ambiente, come visto in precedenza, si osserva emissione di luce infrarossa. A temperature dell'ordine di 1000 K si osserva l'emissione di luce visibile. Un esempio di questo tipo di emissione ce lo forniscono i corpi incandescenti, per esempio un pezzo di metallo arroventato dal fuoco. Per temperature ancora più elevate la lunghezza d'onda della luce emessa diminuisce ulteriormente. A una temperatura di 6000 K la luce emessa appare al nostro occhio bianca, anche se in realtà è una miscela di molte lunghezze d'onda cui corrispondono tutti i colori dell'iride. È proprio questo il principio fisico su cui si basa la sorgente di luce più importante, il sole, la cui temperatura superficiale è appunto di 6000 K.

La luce ultravioletta

Quando la lunghezza d'onda della luce è più piccola di $0.4 \mu\text{m}$, il limite inferiore dello spettro visibile, si parla di luce ultravioletta, per lo meno fino a lunghezze d'onda dell'ordine di alcune decine di nm. Questa è una delle regioni meno esplorate dello spettro elettromagnetico. Limitiamoci a dire che, anche in questo caso, per generare onde di questa lunghezza d'onda si utilizzano le vibrazioni degli elettroni più esterni degli atomi.

I raggi X

Quando la lunghezza d'onda assume valori più piccoli di qualche decina di nm si parla di radiazione X. Per poter emettere onde elettromagnetiche di questo tipo bisogna mettere in movimento gli elettroni più interni degli atomi, che oscillano a frequenze molto più elevate di quelli esterni. Per questa regione dello spettro esistono tuttavia altri possibili meccanismi di generazione, come abbiamo visto

prima quando abbiamo descritto il funzionamento del tubo a raggi X. La scoperta dei raggi X avvenne casualmente, facendo incidere un fascio di elettroni, accelerati da un campo elettrico, su un elettrodo di metallo.

Un'altra importante sorgente di radiazione X è rappresentata dai sincrotroni. Si tratta di grandi macchine nelle quali un fascio di elettroni viene fatto circolare lungo un'orbita poligonale. Per alcuni tratti gli elettroni viaggiano lungo una traiettoria rettilinea, e quindi non producono onde elettromagnetiche. In alcuni punti però sono collocati dei potenti magneti che deflettono la loro traiettoria. Dopo aver subito un certo numero di opportune deviazioni, gli elettroni si ritrovano al punto di partenza e quindi continuano a circolare lungo l'orbita. La velocità a cui vengono fatti muovere gli elettroni è molto elevata, molto prossima a quella della luce, e le energie cinetiche corrispondenti sono dell'ordine dei GeV (1 Giga elettronvolt = 10^9 eV). Quando elettroni così energetici subiscono una deflessione a opera dei campi magnetici si ha un'accelerazione e, di conseguenza, anche l'emissione di onde elettromagnetiche su uno spettro abbastanza ampio che abbraccia anche la regione dei raggi X.

I raggi gamma

Si parla di raggi gamma per indicare le radiazioni emesse nel corso dei processi in cui sono coinvolte le particelle nucleari, cioè i protoni e i neutroni. Nei nuclei le particelle si trovano a stretto contatto sotto l'azione di forze molto intense, e quindi le loro frequenze di oscillazione sono molto più elevate di quelle degli elettroni atomici. Di conseguenza, anche la lunghezza d'onda delle onde elettromagnetiche emesse è molto più piccola, dell'ordine degli Ångstrom ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$) o meno. Le onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda più piccola fino ad ora osservate sono quelle presenti nei raggi cosmici, radiazioni di origine spesso ignota che raggiungono la terra dallo spazio.

1.4 Il dualismo onda-corpuscolo

Particelle e onde nel mondo macroscopico

Fino a questo punto abbiamo incontrato due tipi di oggetti fisici: le particelle, come ad esempio gli elettroni, e le onde elettromagnetiche. “Particella” e “onda” sono due paradigmi della fisica che corrispondono a due modi diversi e inconciliabili di manifestarsi dei fenomeni fisici nel nostro mondo macroscopico. Le particelle sono quegli oggetti chiaramente localizzati che, nei fenomeni cui danno luogo, mantengono una loro ben precisa individualità. Le palle da biliardo, le automobili, i pianeti, sono tutti oggetti fisici etichettabili che, quando si muovono, possono essere seguiti individualmente.

Le onde, come quelle del mare, sono invece oggetti delocalizzati, vale a dire che un'onda non occupa una posizione particolare come accade invece a una pallina su un tavolo. Un'onda è distribuita nello spazio, e questa è una prima differenza. Inoltre, quando si verifica un fenomeno che coinvolge più onde, in genere è coinvolta una regione di spazio abbastanza ampia e non è possibile parlare di ciascuna onda come di un'entità a sé stante. Pensiamo per esempio ad un urto. Se si urtano due palle da biliardo ciascuna delle due conserva la propria identità ed è possibile seguirne il movimento prima e dopo l'urto. Pensiamo invece ad un urto fra due onde: il risultato di quest'urto è una miscela delle due onde che perdono in questo modo la loro individualità.

Questa distinzione manichea fra particelle e onde è del tutto legittima e coerente con la percezione che abbiamo della realtà circostante. Il fatto è che, quando si ha a che fare con oggetti piccoli come gli atomi, le cose cambiano in modo radicale e i medesimi oggetti si comportano a volte come particelle e a volte come onde, dipende dalle circostanze. Questo modo molto strano di comportarsi della materia su scala atomica ha costretto i fisici della prima metà del '900 a riformulare tutte le leggi note sostituendole con altre, creando una nuova branca della fisica che prende il nome di meccanica quantistica. Per onestà va detto che per imparare la meccanica quantistica bisogna studiare a lungo e, in particolare, bisogna impadronirsi di alcune tecniche

matematiche piuttosto elaborate. Per questo motivo, ovviamente, non parleremo di meccanica quantistica in questo libro, ci limiteremo a fare qualche osservazione sulla stranezza che ne costituisce il fondamento, ciò che i fisici chiamano dualismo onda corpuscolo.

Cominciamo con il parlare delle particelle, e facciamo un esempio. Pensiamo a una palla da biliardo in movimento che ne urta una inizialmente ferma. Come sa chi ha giocato a biliardo, se l'urto avviene in un certo modo (e le due palle sono uguali) la palla che era in movimento si ferma mentre quella che era ferma si mette in moto alla stessa velocità di quella che aveva l'altra. In fisica si dice che, in un urto come questo, tutta l'energia della prima palla è stata trasferita alla seconda.

Cosa fanno invece le onde? Fanno tante cose strane che possiamo riassumere sotto il termine diffrazione.

Consideriamo per primo il caso di uno schermo nel quale è praticato

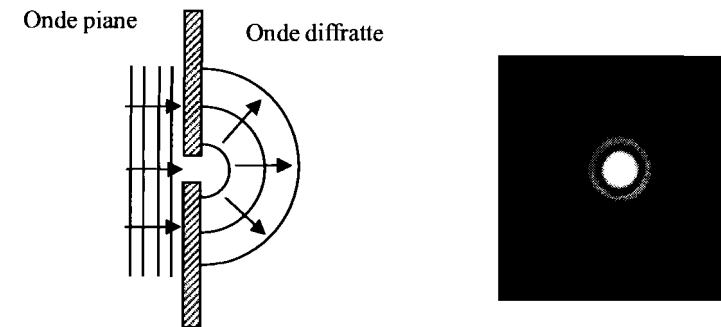


Fig. 18 La diffrazione della luce

un piccolo foro (parte sinistra della figura 18). Se sulla parete vengono sparate delle particelle, per esempio dei proiettili sparati con una mitragliatrice, quelle che finiscono contro la parete si fermano, quelle che arrivano in corrispondenza del foro continuano la loro traiettoria senza subire deviazioni (trascuriamo le poche che urtano contro il bordo). Se invece sulla parete arrivano delle onde le cose vanno in modo molto diverso. Pensiamo per esempio che le onde siano quelle

che viaggiano sulla superficie dell'acqua e che lo schermo sia in realtà una specie di diga ma con una fessura. Come possiamo facilmente immaginare, la parte delle onde che arriva in corrispondenza della fessura si propaga, al di là dello sbarramento, in tutte le direzioni, come mostrato nella figura. Questo è il tratto caratteristico delle onde, vanno dappertutto. Se poi si mette un secondo schermo dopo il primo e si misura l'intensità delle onde che arrivano su questo schermo quello che si vede è qualcosa di simile all'immagine di destra della figura. Qui l'esperimento è stato effettuato inviando luce visibile contro uno schermo nel quale era stato praticato un piccolo foro circolare. La figura di diffrazione che si produce in questo modo è costituita da una serie di anelli luminosi concentrici. Un punto importante del fenomeno della diffrazione è il seguente: affinché la si possa osservare in modo significativo la lunghezza delle onde deve essere dello stesso ordine di grandezza (o anche maggiore) di quella delle fenditure o degli ostacoli che le onde incontrano. Se invece la lunghezza d'onda è molto minore non si verifica il fenomeno della diffrazione e le onde si propagano come se fossero delle particelle.

Tanto per capire cosa questo significa nel caso dell'esempio precedente nel quale della luce visibile incide sulla fenditura, una figura di diffrazione come quella mostrata nella figura precedente si osserva solo se il foro attraverso cui si fa passare la luce è molto piccolo, dell'ordine di un micron. Se il foro è molto più grande si osserva semplicemente l'immagine circolare prodotta dal foro senza le caratteristiche frange intorno.

Un altro dispositivo usato per produrre la diffrazione della luce è il reticolo di diffrazione. Per capire cosa si intende per reticolo si consideri la figura 19, nella quale delle onde incidono su uno schermo in cui ci sono molte fenditure tutte uguali e poste alla stessa distanza fra loro. In un caso come questo succede che le onde in arrivo in direzione perpendicolare vengono deviate tutte lungo una particolare direzione, o meglio, solo lungo un certo numero ben definito di direzioni possibili. Queste direzioni dipendono dalla lunghezza d'onda della luce e dalla distanza tra le fenditure del reticolo. Se su un medesimo reticolo vengono inviate contemporaneamente onde di

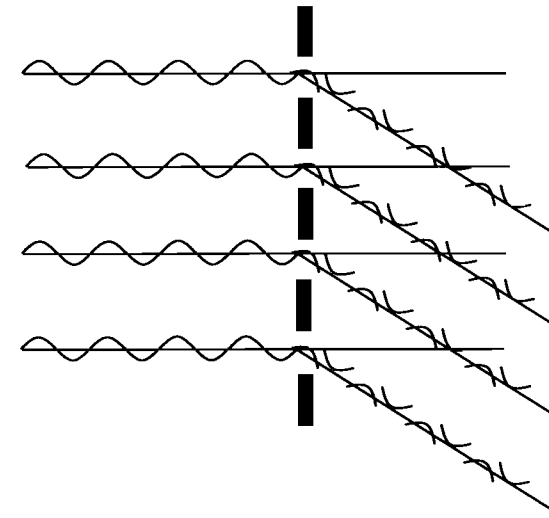


Fig. 19 Il reticolo di diffrazione

lunghezza d'onda diversa, ciascuna di esse verrà deviata lungo una direzione particolare che dipende proprio da λ . Per esempio, consideriamo la luce che, come noto, è costituita da tante onde elettromagnetiche la cui lunghezza varia da 0.4 fino a 0.8 μm . Se si manda la luce visibile su un reticolo le sue diverse lunghezze d'onda vengono deviate lungo direzioni diverse, e quindi si possono osservare separatamente. Questo è quello che succede quando si guarda un CD illuminato con la luce generata da una lampadina o quella proveniente dal sole. Sulla superficie dei CD sono realizzate tantissime righe circolari che si comportano come un reticolo di diffrazione (in questo caso la luce viene riflessa e non attraversa il reticolo come nella figura, ma la sostanza del ragionamento non cambia). La luce incide sul CD e le diverse componenti vengono riflesse lungo direzioni diverse e arrivano al nostro occhio lungo strade diverse. Questo ci permette di osservare tutti i colori dell'iride. Anche in questo caso la distanza fra le righe del CD è confrontabile con quella della lunghezza d'onda della luce (circa un micron) e quindi la diffrazione si manifesta.

Un ultimo esempio di diffrazione prodotta da onde è rappresentato dai raggi X. Quando un fascio di raggi X incide su un reticolo opportuno,

quello che si vede è una complessa figura di diffrazione come ad esempio quella mostrata nella figura 20.

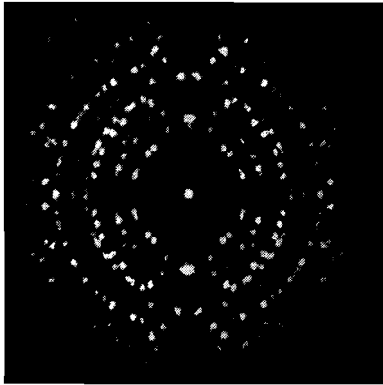


Fig. 20 La figura di diffrazione dei raggi X prodotta da un cristallo

Anche in questo caso, per poter osservare la diffrazione, si deve operare con un reticolo i cui elementi siano separati da una distanza confrontabile con la lunghezza d'onda dei raggi X, che è dell'ordine di alcuni Å. Un sistema fisico costituito da oggetti separati da distanze di questo ordine di grandezza sono i reticoli cristallini, le cui "fenditure" sono le file di atomi. L'immagine di diffrazione mostrata nella figura è stata ottenuta inviando i raggi X su un reticolo di atomi di alluminio (per inciso, la diffrazione si osserva solo se si ha a che fare con un reticolo, su un sistema disordinato come sono i materiali amorfi non si osserva alcuna figura di diffrazione).

Particelle e onde nel mondo degli atomi

Adesso che abbiamo visto come si comportano le particelle e le onde, vediamo cosa succede quando un'onda si scontra con una particella. Cominciamo considerando un semplice esempio del mondo macroscopico: pensiamo ad una boa che galleggia sull'acqua. Se viene investita dalle onde comincia a muoversi su e giù e l'ampiezza delle oscillazioni dipende dall'ampiezza delle onde che arrivano. Fin qui tutto normale, si tratta di fenomeni del mondo macroscopico ai quali

siamo abituati. In particolare va rimarcato che se una cosa è una particella si comporta sempre come una particella, se è un'onda si comporta sempre come un'onda. Questo è il caso delle onde sull'acqua, che sono sempre onde, e della boa, che è sempre una particella. Chi ne dubiterebbe?

Se passiamo invece al mondo microscopico le cose vanno in modo molto diverso. Pensiamo per esempio al caso delle onde elettromagnetiche (che a livello macroscopico danno luogo a diffrazione, quindi sono inequivocabilmente onde) quando vengono mandate a urtare contro gli elettroni contenuti in un pezzo di materiale. Ciò che si verifica viola il comune buon senso e fu proprio questo strano fenomeno fisico, l'effetto fotoelettrico, che diede il via, grazie ad un lavoro di Einstein del 1905, ad una revisione di tutte le teorie fisiche note.

Quando un'onda elettromagnetica viene inviata su un materiale si osserva che dal materiale stesso fuoriescono degli elettroni. Si può osservare questo fenomeno mandando per esempio luce ultravioletta su metalli come il sodio. Si potrebbe pensare che gli elettroni siano come una barca che galleggia sull'acqua: se le onde che arrivano sono abbastanza forti, riescono a sollevarla fino a buttarla sul molo. Detto in modo più preciso, l'onda trasferisce una certa quantità di energia alla barca, più ampie sono le oscillazioni, più grande è l'energia trasferita. Cose del genere (barche buttate sulla terraferma dalle onde) a volte capitano realmente, e non suscitano particolare meraviglia. Nel caso degli elettroni investiti dalle onde elettromagnetiche però si osserva una cosa strana. Supponiamo di mandare onde con un particolare valore della lunghezza d'onda. Quello che vediamo sono degli elettroni che fuoriescono con una ben definita velocità (l'esperto mi farebbe notare che si dovrebbe parlare dell'energia, non della velocità, dell'elettrone, ma questo è un testo divulgativo per lettori di estrazione umanistica, quindi non sottilizziamo!). Immaginiamo ora di aumentare l'intensità dell'onda, proprio come si fa quando si gira il potenziometro per aumentare l'intensità della luce in casa. Ci aspetteremmo di vedere elettroni uscire con una velocità maggiore invece no, la velocità è sempre quella. Magari ne escono di più, ma sempre alla stessa velocità.

Questo comportamento è del tutto inspiegabile, bisogna inventarsi qualche spiegazione alternativa. La spiegazione la diede proprio Einstein e, almeno a dirla, sembra una cosa abbastanza semplice: la luce in realtà non è fatta di onde, ma di particelle. Ogni volta che una di queste particelle di luce urta un elettrone gli trasferisce tutta la sua energia, proprio come fanno le palle da biliardo in un urto frontale. Per queste particelle venne coniato il termine fotoni. Una volta fissata la lunghezza d'onda tutte le particelle che costituiscono il fascio luminoso hanno la stessa energia. Una fascio di luce più intenso (cioè che trasporta più energia) è semplicemente un fascio costituito da un numero maggiore di fotoni.

Il fatto strano di tutta questa storia è che la luce si comporta in due modi diversi, a seconda dei casi. In certi casi si comporta come un'onda, cioè quando dà luogo ai fenomeni di diffrazione, e a volte come particella, come ad esempio nel caso dell'effetto fotoelettrico. Quando ci si rese conto che la luce si comporta come una particella anche in altri fenomeni fisici oltre all'effetto fotoelettrico, divenne inevitabile arrendersi e riconoscere il fatto che la luce in realtà è qualcosa di molto diverso da quello che ci possiamo immaginare e che il suo comportamento è duale: a volta si comporta in un modo, a volte in un altro.

Visto che la luce fa questo, un geniale fisico francese, Louis De Broglie, si chiese se per caso non si potesse pensare che lo stesso comportamento duale si potesse osservare anche in altri casi, per esempio nel caso degli elettroni. All'epoca gli elettroni erano unanimemente considerati come delle piccole particelle, e l'idea che si aveva dell'atomo era quella di un piccolo sistema solare con il nucleo al posto del sole e gli elettroni a svolgere il ruolo dei pianeti. L'ipotesi di De Broglie, formulata nel 1924, fu che anche gli elettroni siano oggetti con un comportamento duale, e che perciò in alcune particolari circostanze avrebbero dovuto comportarsi come delle onde, nonostante il fatto che fino ad allora li si fosse visti comportarsi sempre come delle particelle.

Come abbiamo visto, un fenomeno tipico delle onde è la diffrazione e quindi, per verificare la correttezza di questa ipotesi, si effettuarono esperimenti mirati a produrre la diffrazione degli elettroni. Nell'arco di un paio d'anni questi esperimenti confermarono che la diffrazione

degli elettroni esiste realmente e questo spianò definitivamente la strada alla creazione di una nuova fisica più adatta a descrivere questi strani fenomeni: la meccanica quantistica.

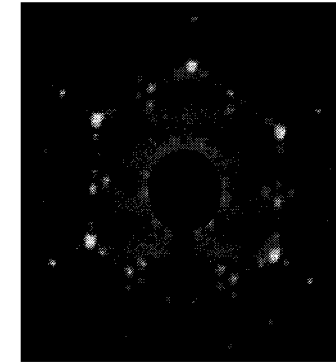


Fig. 21 Diffrazione di elettroni da parte di un cristallo

Nella figura 21 è mostrata una figura di diffrazione prodotta mandando degli elettroni su un cristallo di silicio. Come si vede è un'immagine simile a quella precedente ottenuta inviando fotoni su un cristallo di alluminio. Questa immagine è la prova che gli elettroni, almeno in questo caso, si comportano come delle onde.

In definitiva, ci si deve rassegnare all'idea che le cose, a livello microscopico, si comportano in un modo molto strano per il quale si è coniato il termine dualismo onda-corpuscolo. La fisica moderna parte dall'accettazione di questo presupposto, rinunciando all'idea di "capire" come siano fatti realmente elettroni e luce, e si sviluppa con un formalismo matematico molto complesso. Formalismo che, è bene precisare, non aiuta a "capire" o a visualizzare come sono fatti gli elettroni e i fotoni. La vera natura di oggetti come i fotoni e gli elettroni sarà probabilmente sempre per noi incomprensibile perché i nostri strumenti cognitivi si basano sull'esperienza diretta di un mondo, quello macroscopico, totalmente diverso e quindi sono inadeguati ad altre realtà fisiche. Ma tutto questo è filosofia, e in questo libro stiamo cercando di parlare di una cosa molto concreta, cioè dei metodi fisici per la caratterizzazione dei beni culturali.

1.5 Considerazioni generali sulle tecniche di indagine

Introduzione

Moltissime sono le tecniche sperimentali utilizzate nello studio dei materiali. Anche se non è possibile catalogarle in modo sistematico è tuttavia possibile formulare alcune considerazioni di carattere generale. È inoltre utile suddividerle in alcune categorie principali, facendo riferimento al tipo di informazioni che sono in grado di fornire e alla natura dei fenomeni fisici su cui si basano.

Moltissime (anche se non tutte) delle tecniche di indagine che si utilizzano nello studio dei materiali si basano sul principio di stimolare il materiale in esame per mezzo di una opportuna sonda costituita da un fascio di particelle (onde elettromagnetiche, elettroni, ...). In seguito a questa stimolazione il materiale emette altre particelle (anche in questo caso possono essere di qualsiasi tipo) che, opportunamente raccolte e misurate, forniscono informazioni sulle proprietà del materiale stesso. Un esempio banale, ma che rende meno vaga la questione, è di pensare al modo in cui noi “vediamo” le cose.

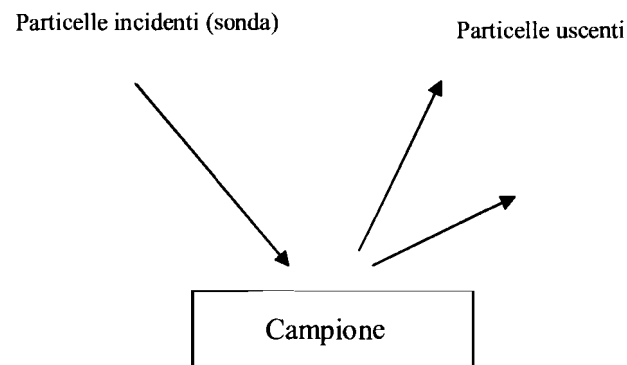


Fig. 22 Tipico schema di una tecnica di caratterizzazione materiali

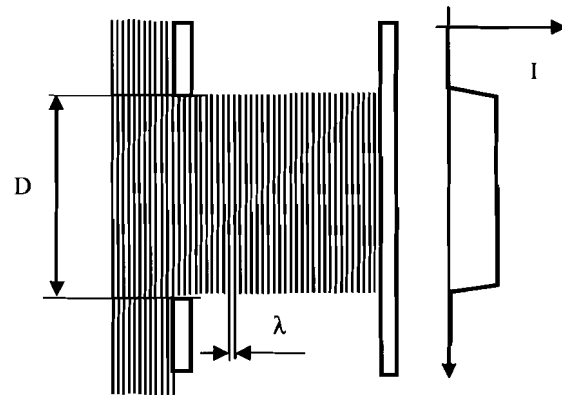
La luce (la sonda) incide sul materiale, viene riflessa (le particelle uscenti) e arriva al nostro occhio dove, dopo essere stata opportunamente deviata, forma un'immagine sulla retina dell'oggetto su cui era stata inviata.

Le particelle utilizzate possono essere le più svariate e questo dà luogo ad un numero enorme di tecniche di misura diverse. Si usano infatti fotoni su tutto l'arco dello spettro elettromagnetico, elettroni, positroni, neutroni, protoni, ioni, atomi neutri, molecole. Nel seguito ci occuperemo quasi esclusivamente di alcune tecniche di misura basate sull'impiego di fotoni ed elettroni (utilizzati sia come particelle entranti che uscenti).

Il ruolo della lunghezza d'onda: microscopia e diffrazione

Abbiamo parlato, in precedenza, del dualismo onda-corpuscolo in base al quale le stesse cose si comportano a volte come onde e a volte come particelle. Questo vuol dire che, per capire che tipo di informazioni è possibile ottenere, bisogna tener conto di entrambi i possibili comportamenti delle particelle che si stanno utilizzando. Cominciamo con il considerare il ruolo della lunghezza d'onda.

1) La lunghezza d'onda è molto minore delle dimensioni caratteristiche degli oggetti sulla quale viene inviata. Pensiamo ad esempio di mandare un'onda a incidere su una fenditura circolare. Se il diametro D della fenditura è molto maggiore della lunghezza d'onda λ ($\lambda \ll D$), dopo la fenditura si ha una propagazione del tipo mostrato nella figura 23: la propagazione delle onde, in questa situazione fisica, è ben descritta nei termini dell'ottica geometrica basata sul concetto di raggio. Su uno schermo posto dopo la fenditura si forma un'immagine che riproduce esattamente la fenditura stessa. Quando si è in questo regime quindi è possibile fare della microscopia, cioè è possibile creare delle immagini degli oggetti in esame. In linguaggio tecnico si usa, per questo tipo di tecniche, il termine imaging.

Fig. 23 Situazione limite ($\lambda \ll D$), è possibile fare imaging

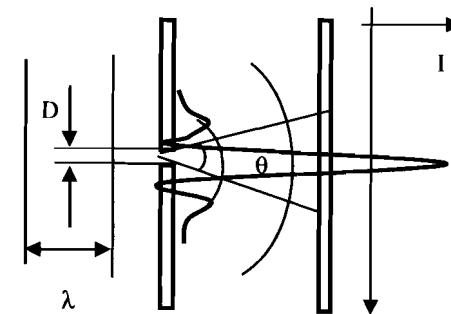
2) La lunghezza d'onda è confrontabile con il diametro della fenditura. In questo caso diventa rilevante il fenomeno della diffrazione e le onde non si propagano più come raggi ma pervadono tutto lo spazio e l'immagine sullo schermo non riproduce più quella della fenditura. Si forma invece una figura di diffrazione come mostrato schematicamente nella figura 24. Questa figura di diffrazione ha un'apertura angolare θ che dipende dal rapporto tra D e λ :

$$\theta \propto \frac{\lambda}{D} \quad (\text{il simbolo } \propto \text{ significa "circa uguale a"})$$

In questo caso dunque le onde non formano un'immagine dell'oggetto su cui incidono ma formano una figura diversa dalla quale però, come vedremo, è comunque possibile ricavare molte utili informazioni.

Tecniche di indagine strutturale

Un qualsiasi materiale è costituito da atomi a stretto contatto gli uni con gli altri: il modo in cui questi atomi si dispongono prende il nome di struttura del materiale. Le tecniche di indagine strutturale si occupano per l'appunto di ricavare informazioni relative alla struttura, cioè alla posizione che gli atomi occupano all'interno del materiale.

Fig. 24 Situazione limite ($\lambda \approx D$), si ha diffrazione

Vi sono materiali nei quali gli atomi sono disposti in modo ordinato: si tratta dei cristalli nei quali un atomo o un dato raggruppamento di atomi (la cosiddetta cella elementare) si ripete periodicamente nello spazio dando luogo a un reticolo cristallino. Si tratta dei materiali meglio conosciuti perché la periodicità rende possibile semplificare enormemente il problema dello studio delle proprietà di queste strutture (anche se rimane comunque molto complicato).

È difficile avere a che fare con pezzi macroscopici di materiali perfettamente cristallini (il cristallo inteso come un particolare tipo di vetro ha una struttura che non ha nulla a che vedere con quella dei cristalli, o reticoli cristallini, di cui stiamo parlando). La ragione, intuibile, è che stabilire un ordine perfetto risulta più difficile al crescere delle dimensioni della zona ordinata. Per questo motivo in moltissimi materiali si osserva un perfetto ordinamento cristallino solo su distanze relativamente piccole anche se macroscopiche (tipicamente alcuni micron). I campioni macroscopici di questi materiali sono costituiti da un insieme di tanti piccoli cristalli orientati in modo diverso e uniti fra loro a formare l'oggetto completo. È questo ad esempio il caso di molti metalli.

Vi sono poi materiali nei quali non si ha alcun tipo di ordine: un esempio evidente è il caso dei liquidi, nei quali le molecole costituenti si muovono continuamente e non ha più senso parlare di una loro posizione, al più si può parlare della posizione mediamente occupata dalle altre molecole intorno a una assunta come riferimento. Vi sono anche molti materiali solidi nei quali non si ha un ordine definito, e un

importante esempio sono i vetri (compresi i “cristalli”, come detto in precedenza). Per la precisione un vetro non è propriamente un solido ma è meglio considerarlo come un liquido con una viscosità estremamente elevata. Vi sono poi dei solidi a tutti gli effetti che non hanno una struttura definita, e in questi casi si parla di materiali amorfi. Per visualizzare la struttura di un materiale amorfo proviamo a pensare di prendere un cristallo perfetto e di spostare, in modo casuale, tutti gli atomi dalle loro posizioni di equilibrio.

Le tecniche strutturali si occupano di ricavare informazioni sulla struttura dei materiali: nel caso dei cristalli è possibile stabilire con precisione la posizione di tutti gli atomi ricostruendo così la struttura cristallina. Nel caso dei liquidi si misura di solito la cosiddetta distribuzione radiale, cioè la probabilità di trovare una molecola del liquido a una distanza R da una qualsiasi altra molecola. A differenza di quello che si potrebbe pensare anche nei liquidi, su distanze molto piccole, dell'ordine di alcune dimensioni molecolari, è possibile osservare una regolarità nel modo di disporsi delle molecole. Nel caso dei materiali amorfi le informazioni che interessa osservare riguardano la distribuzione statistica delle distanze fra gli atomi stessi.

Tecniche spettroscopiche

Oltre alla struttura, intesa nel senso del paragrafo precedente, i materiali sono anche formati da elettroni, e molte delle loro proprietà macroscopiche sono proprio dovute a questi. Lo studio della cosiddetta struttura elettronica riveste quindi una grande importanza nella caratterizzazione dei materiali.

Quando si parla di elettroni conviene distinguere fra gli elettroni più esterni degli atomi, quelli cioè direttamente coinvolti nella formazione del legame chimico, e quelli degli stati elettronici più interni. I primi, cosiddetti di valenza, sono quelli che subiscono i maggiori cambiamenti passando dall'atomo isolato al solido. Gli altri, detti elettroni interni o di core (dall'inglese core, che significa parte interna di qualcosa), non vengono praticamente influenzati dalla formazione del solido e quindi mantengono le stesse caratteristiche che hanno nell'atomo isolato.

Quando si studiano le proprietà degli elettroni nei materiali si usa in genere il termine spettroscopia. Se si studiano gli elettroni di valenza si parla di spettroscopia di valenza, viceversa si parla di spettroscopia di core.

La propagazione di un fascio di particelle in un mezzo materiale

Per studiare le proprietà di un materiale, come si è detto, è necessario mandare delle sonde (radiazioni elettromagnetiche, elettroni...) e vedere cosa succede. In altre parole, si spara qualcosa dentro un materiale, questo qualcosa si propaga al suo interno, si producono effetti fisici il cui esito ci fornisce informazioni utili. Una cosa importante da capire è quanto le diverse sonde si propagano all'interno dei materiali. Per capire di cosa stiamo parlando pensiamo alla luce visibile. Se mandiamo la luce a incidere su un vetro sappiamo che lo attraversa senza subire perdite significative. Come ben noto il vetro è trasparente. Se invece la mandiamo su un pezzo di metallo viene riflessa, non ce la fa a entrare nel materiale (per essere precisi la luce visibile penetra nei metalli solo per pochi nanometri).

La legge fisica che descrive il modo in cui un fascio di particelle (luce, elettroni o qualsiasi altra cosa) si attenua all'interno di un materiale è molto semplice e prende il nome di legge di Lambert-Beer. Per intensità di un fascio di particelle si intende il numero di particelle

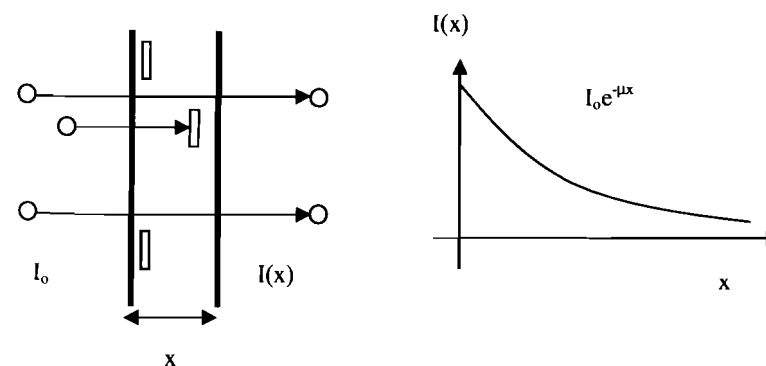


Fig. 25

che passano in ogni secondo. Supponiamo di avere un fascio la cui intensità è pari a I_0 e che questo fascio venga inviato su una lastra di materiale di spessore x (figura 25). Una volta attraversato il materiale alcune particelle del fascio si saranno perse in seguito agli urti che subiscono all'interno del materiale, quindi l'intensità del fascio stesso sarà diminuita. Indichiamo con $I(x)$ l'intensità del fascio dopo che ha attraversato uno spessore x di materiale. La legge di Lambert-Beer ci dice che:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

L'attenuazione della luce dunque segue un andamento di tipo esponenziale decrescente. Il coefficiente μ che compare nella formula si chiama coefficiente di assorbimento e dipende dal tipo di particelle e dal materiale in cui si propagano. Se il coefficiente di assorbimento è piccolo allora le particelle si propagano nel materiale per distanze grandi, come la luce nel vetro. Altrimenti la loro penetrazione nel materiale è molto limitata, come nel caso della luce nei metalli.

Il coefficiente di assorbimento dei raggi X

Consideriamo in modo più dettagliato il fenomeno dell'assorbimento dei raggi X quando si propagano all'interno di un materiale perché questo ci permette di ottenere informazioni importanti su come sono fatti gli atomi.

Quando si parla di raggi X ci si riferisce di solito a radiazione elettromagnetica di lunghezza d'onda confrontabile con le dimensioni atomiche il che, tradotto in termini di energia, significa fotoni dell'ordine di alcuni KeV (kilo elettronvolt). Quando un fascio di radiazione X si propaga in un mezzo materiale interagisce con gli elettroni atomici e questo può dar luogo all'assorbimento dei fotoni da parte degli elettroni. Come abbiamo visto nel semplice modello illustrato in precedenza, negli atomi gli elettroni si trovano all'interno di una buca nella quale si dispongono lungo orbite ben definite dove l'energia non assume valori arbitrari ma solo alcuni precisi valori.

Nella parte sinistra della figura 26 è mostrato lo schema dei livelli energetici di un atomo idealizzato, dove l'energia viene valutata rispetto al "livello di vuoto". Per capire cosa significa questo termine ripensiamo all'atomo come a una buca scavata nel terreno. Il livello di vuoto equivale alla quota del terreno immediatamente fuori dalla buca. Se un fotone, la cui energia indichiamo con $h\nu$, interagisce con questo

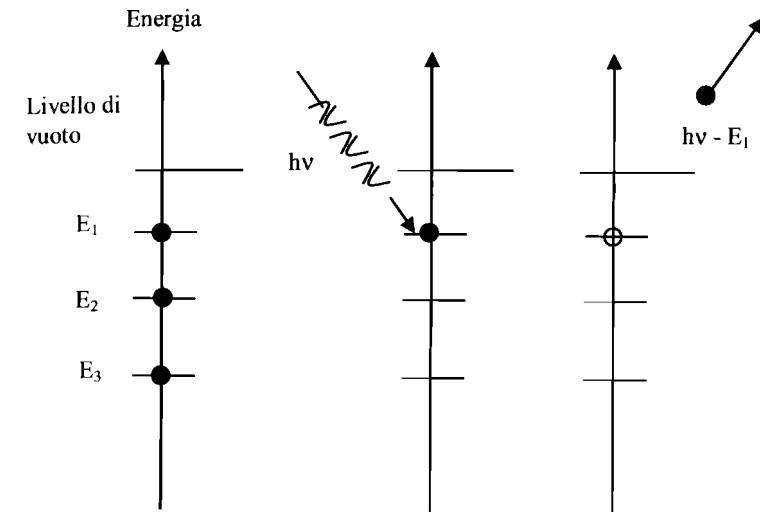


Fig. 26 Schema del processo di fotoemissione

atomo può verificarsi l'assorbimento di questo fotone a opera di uno degli elettroni dell'atomo, nel caso mostrato nella figura quello con energia E_1 . In seguito al processo di assorbimento l'energia del fotone viene trasferita all'elettrone che, in questo modo, si allontana dall'atomo con un'energia pari a quella del fotone meno l'energia di legame E_1 . Si tratta del ben noto effetto fotoelettrico.

Ovviamente, perché questo assorbimento possa verificarsi l'energia del fotone deve essere maggiore di quella del livello in cui si trova l'elettrone. In altre parole, il coefficiente di assorbimento per i raggi X dipende dall'energia (o dalla lunghezza d'onda). Se l'energia è inferiore non può verificarsi assorbimento, se l'energia è maggiore invece sì. Questo comportamento si manifesta in modo molto evidente quando si va a misurare il coefficiente di assorbimento X di un atomo

facendo variare l'energia dei fotoni della luce incidente. In genere l'andamento osservato è quello mostrato nella figura 27 relativo al caso dell'atomo di un elemento chimico (poco conosciuto) scelto a caso, l'ytterbio (Yb). Al crescere dell'energia del fotone il coefficiente di assorbimento μ tende a diminuire, ma quando il valore coincide con quello dell'energia di legame di uno degli elettroni allora si apre una nuova possibilità per la luce di essere assorbita e per questo il coefficiente di assorbimento risale bruscamente. In corrispondenza di ciascun livello energetico quindi si osserva la presenza, nella curva di μ in funzione di $h\nu$, di uno spigolo, detto spigolo di assorbimento o, in inglese, absorption edge.

La figura 27 mostra come il coefficiente di assorbimento tenda a diminuire progressivamente al crescere dell'energia del fotone ma che, ogni tanto, si osservano delle brusche risalite. Si tratta degli spigoli di assorbimento che, nel caso dell'Yb, possono essere suddivisi in tre gruppi principali. Lo spigolo più a destra è lo spigolo K e corrisponde all'assorbimento dei fotoni da parte degli elettroni più interni dell'atomo, quelli appunto della prima shell, quella che si indica con il numero quantico dell'energia 1. Il secondo spigolo mostrato nella figura (in realtà sono diversi spigoli abbastanza vicini fra loro) è quello L, dovuto all'assorbimento da parte degli elettroni della seconda shell. Il terzo è lo spigolo M, dovuto agli elettroni della terza shell.

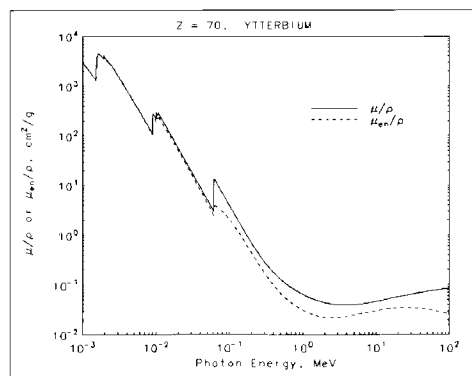


Fig. 27 Andamento del coefficiente di assorbimento dei raggi X

Il coefficiente di assorbimento è tanto più grande quanto più grande è il peso atomico del mezzo, ed è per questo motivo che si utilizzano i raggi X per visualizzare le ossa nelle radiografie. Queste, che contengono il calcio, assorbono i raggi X molto più degli altri tessuti proprio per la presenza di questo elemento il cui numero atomico è molto maggiore di quello degli altri elementi che costituiscono gli organismi viventi (C, O, H).

Fino a quali distanze i raggi X penetrano nei materiali? Come per la luce visibile dipende molto dalla loro lunghezza d'onda e dal tipo di materiale. Per esempio, i raggi X usati per le radiografie attraversano agevolmente tutto il nostro corpo (decine di centimetri) ma si attenuano sensibilmente quando attraversano pochi cm di ossa e vengono bloccati quasi completamente dai metalli (pensiamo per esempio alle radiografie di chi ha delle placche metalliche nelle ossa in seguito a fratture o, come capita, ha nello stomaco una pinza dimenticata dal distratto chirurgo).

Il libero cammino medio degli elettroni

Gli elettroni si propagano all'interno dei materiali in modo molto inferiore rispetto ai raggi X e questo dipende dal fatto che si tratta di cariche elettriche, al pari di quelle che costituiscono gli atomi del materiale. Le cariche elettriche interagiscono fra loro in modo molto forte, e questo spiega il fatto che gli elettroni vengano assorbiti molto più della radiazione elettromagnetica. La distanza percorsa da un elettrone in un mezzo dipende, come per i raggi X, dall'energia dell'elettrone. A differenza dei raggi X però dipende molto poco dal materiale.

La figura 28 mostra la distanza percorsa mediamente da un elettrone in diversi mezzi. Come si vede, questa distanza varia tra un minimo di alcuni Å fino ad un massimo di alcune decine di Å.

Un'altra prerogativa della propagazione degli elettroni in un mezzo materiale è che le perdite di energia subite dagli elettroni in seguito al verificarsi degli eventi di scattering sono di solito abbastanza piccole. La situazione è quindi molto diversa dal caso dei fotoni che, quasi sempre, scompaiono in seguito al verificarsi di un'interazione con il

materiale. Gli elettroni invece perdono parte della loro energia ma rimangono in circolazione, magari muovendosi lungo una direzione diversa da quella originale.

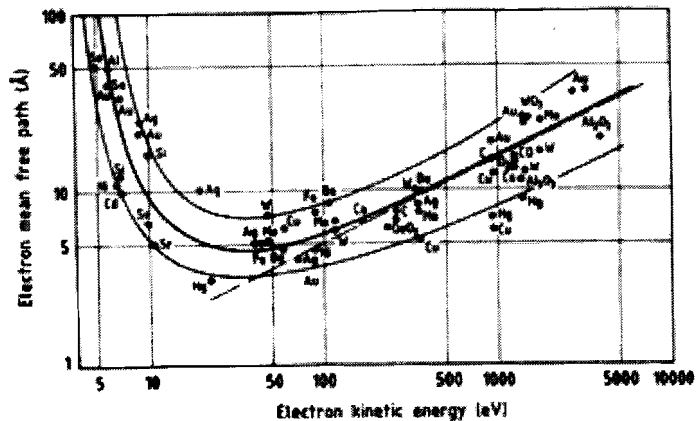


Fig. 28 Libero cammino medio degli elettroni nei materiali in funzione della loro energia cinetica

2 Osservazione diretta

2.1 Le immagini ottiche delle opere d'arte

La digitalizzazione delle opere

La possibilità offerta dalle moderne tecniche ottiche e informatiche ha reso possibile la digitalizzazione su vasta scala di molte opere d'arte. Con questo termine si intende il trasferimento delle immagini delle opere in un formato digitale, cioè memorizzabile su sistemi capaci di immagazzinare grandi quantità di informazione come dischi magnetici e ottici (CD e DVD), con la possibilità di richiamare tali immagini e di poterle osservare successivamente per mezzo di opportuni programmi.

Le ragioni per procedere alla digitalizzazione sono molteplici e molte campagne di acquisizione digitale di immagini di opere d'arte sono state avviate nel corso degli ultimi anni da parte di numerose istituzioni. Si può dire che le immagini digitali costituiscano un'evoluzione degli archivi fotografici. La pratica di salvare immagini di interesse in forma digitale non riguarda solo le opere d'arte ma, ad esempio, anche libri e riviste. Molte biblioteche e case editrici hanno avviato progetti di digitalizzazione dei loro patrimoni librari. Vi sono anche progetti per salvare in forma digitale tridimensionale le opere scultoree.

Per rendere l'idea di cosa significhi realizzare un archivio digitale prendiamo il caso della National Gallery di Londra che, nel 1999, ha lanciato il progetto VERMEER (un acronimo che sta a significare

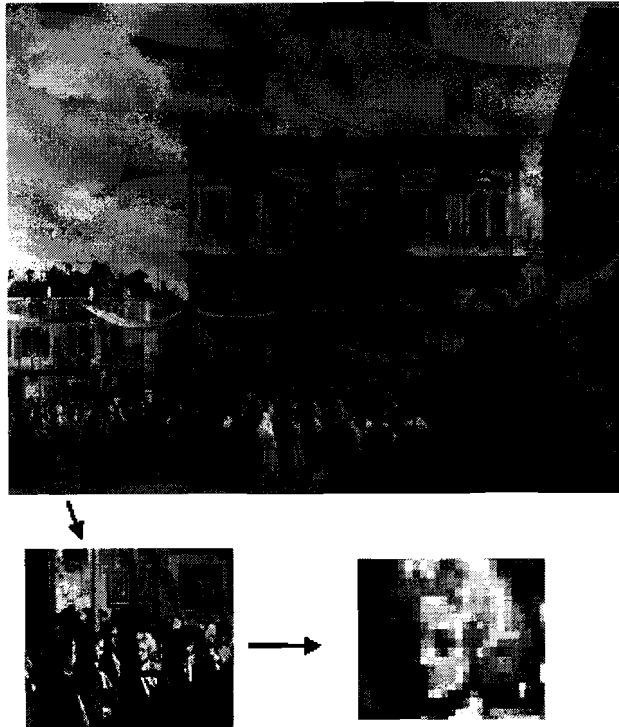


Fig. 1

Virtual Environment for Education, Exploration and Research). Questo progetto si proponeva di acquisire in formato digitale, e con una elevata risoluzione, tutte le opere conservate presso la National Gallery (alcune migliaia). Un'operazione di questo genere è complessa e richiede investimenti significativi e un'adeguata pianificazione. Nel caso del progetto VERMEER il punto di partenza fu che le immagini digitali sarebbero state acquisite utilizzando una fotocamera appositamente costruita e già sperimentata in precedenza. Nel corso di alcuni anni tutte le opere conservate presso la National Gallery sono così state digitalizzate e ora le immagini sono in vendita, su internet, a un prezzo che dipende dalla risoluzione desiderata e dell'uso che si intende farne. Oltre al progetto della National Gallery ve ne sono molti altri, già completati o in corso di svolgimento, presso

svariati musei, e alcuni di essi rivestono carattere nazionale o europeo, come nel caso ad esempio di NARCISSE (Network of Art Research Computer Image Systems in Europe), un progetto europeo che ha portato alla digitalizzazione di circa 70.000 opere d'arte. Parte di queste immagini (che comprendono immagini ottiche ma anche di altro tipo come ad esempio radiografie, riflettografie IR, etc...) sono disponibili via web sul sito del ministero della cultura francese.

La digitalizzazione delle opere d'arte richiede una strumentazione adeguata e un'elevata professionalità perchè sono numerosi gli aspetti tecnici di cui tener conto. Vediamone alcuni.

- La risoluzione. Si prenda in esame un'immagine digitale, come ad esempio quella della figura 1 che rappresenta un quadro di Canaletto (*Il Giorno della Festa di San Rocco*) conservato presso la National Gallery. Se si ingrandisce l'immagine, si scopre che questa è in realtà un mosaico composto da tanti piccoli quadratini, ciascuno con un colore ben definito. Questi quadratini si chiamano pixel e, nel caso dell'immagine della figura la risoluzione è di 1300 x 957 pixel. Siccome il quadro ha una larghezza di circa 2 m, ciascun pixel corrisponde a una lunghezza di circa 1.5 mm. La National Gallery vende immagini con risoluzione che arriva a 5000 pixel (quindi, nel caso del quadro della figura con pixel dell'ordine di circa 0.4 mm). Il costo dell'immagine dipende dalla risoluzione desiderata. Il motivo per cui le immagini riprese con macchine fotografiche digitali sono come dei mosaici, le cui caselle sono i pixel, va cercato nel modo di funzionare degli strumenti di ripresa digitali delle immagini come ad esempio le macchine fotografiche, le videocamere oppure gli scanner. In questi strumenti l'immagine che si vuole acquisire viene proiettata, per mezzo di opportune lenti, sul "sensore di immagine" che è in realtà costituito da una matrice di tanti piccolissimi sensori. Quando si compra una fotocamera da 5 Megapixel, ad esempio, significa che il sensore è un mosaico costituito da 5 milioni di piccoli "occhi", ciascuno di quali registra l'intensità (e il colore) della luce che arriva in quel punto. Ciascuno di questi occhi corrisponde a un pixel nell'immagine.

L'elettronica poi provvede a trasformare il valore dell'intensità in un numero e a salvarlo, insieme a tutti gli altri, in un file che perciò contiene tutte le informazioni necessarie a ricostruire, tramite calcolatore, l'immagine.

- Quando si fotografano i quadri occorre illuminare il soggetto in modo uniforme, rispettando i colori originali, con una luce di intensità adeguata ma non tale da poter danneggiare l'opera. Non è un lavoro facile e deve essere fatto da persone molto esperte. In genere si usano lampade alogene o allo xeno, che ben riproducono le caratteristiche della luce solare, illuminando la parte da fotografare con un angolo di incidenza abbastanza elevato in modo da evitare riflessioni dirette nella macchina fotografica digitale. In molti casi si utilizzano lampade "impulsate", cioè lampade che illuminano l'opera solo per il tempo strettamente necessario a riprendere l'immagine. Ci sono ad esempio lampade impulsate allo xeno che emettono luce per un tempo molto breve, pochi millesimi di secondo, ma questo è sufficiente per scattare una fotografia esponendo quindi l'opera alla luce per un tempo brevissimo.
- Il problema forse più delicato è quello del colore. Quando si cerca di tradurre in forma digitale (cioè in numeri) un colore ci si basa sul cosiddetto modello RGB, in base al quale tutti i colori sono una combinazione di tre colori fondamentali, il rosso, il giallo e il blu. Quando si ha a che fare con un particolare colore, lo si scopone nelle sue tre componenti RGB e per ciascuna di esse si misura l'intensità. L'intensità di ciascuna delle componenti viene espressa con un numero compreso fra 0 e 255 che, in formato digitale, si può esprimere con 8 bit, cioè un byte. Quando si legge che una scheda grafica o una fotocamera hanno 24 bit di colore si intende che sono in grado di distinguere, per ciascuno dei colori fondamentali, 256 livelli (i 24 bit vogliono dire 8 bit per ciascuno dei 3 colori fondamentali). Questo livello di risoluzione del colore è il meglio che si riesce a fare attualmente e corrisponde anche alla sensibilità dell'occhio umano. Con questo livello di risoluzione si possono creare $256^3 = 16$ milioni di colori circa. A volte si

sente parlare di "colore a 32 bit" ma è solo un modo di dire, i bit al massimo possono essere 24.

Le operazioni di digitalizzazione di immagini di opere d'arte già concluse, come VERMEER e NARCISSE, devono però fare i conti con il rapido evolvere della tecnologia. Attualmente i sistemi utilizzati per acquisire le immagini risalgono a più di 10 anni fa e, da allora, le macchine fotografiche digitali hanno fatto enormi progressi, come tutti sappiamo bene. Attualmente vi sono apparati che consentono di digitalizzare opere di grandi dimensioni (come ad esempio il *Cenacolo* Vinciano) in modo automatico, rapidamente e con risoluzione elevatissima. Nel caso del *Cenacolo* ad esempio è stata recentemente effettuata una digitalizzazione che ha portato ad un'immagine di 16 miliardi di pixel.

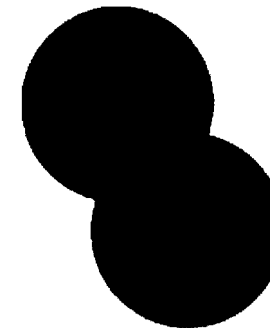


Fig. 2 Colori fondamentali per la sintesi sottrattiva utilizzata nei processi di stampa

Il colore

Il colore è un elemento essenziale delle opere d'arte. Lo studio scientifico del colore è un argomento complesso e qui ci limiteremo ad alcune semplici considerazioni. Cominciamo con il precisare il

punto di vista adottato, perché quando si parla di questo argomento è facile cadere in confusione. Ci occuperemo di come la luce, a seconda delle componenti in essa contenute, dia luogo a sensazioni diverse quando viene percepita dall'occhio umano: ci occuperemo cioè della relazione tra le proprietà fisiche della luce e quella sensazione che noi chiamiamo colore.

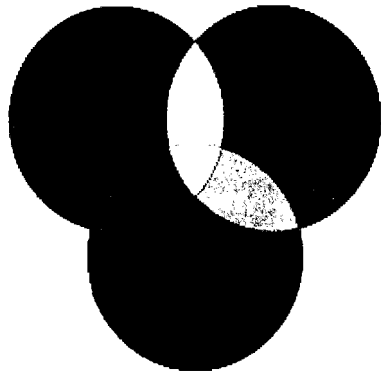


Fig. 3 Colori fondamentali per la sintesi additiva utilizzata negli schermi dei PC o nelle fotocamere digitali

Questo modo di affrontare il problema non va confuso con quello che si occupa di come devono essere mescolati fra loro pigmenti di colore diverso per produrre il colore desiderato. Questo modo di procedere si basa sull'idea che esistano tre colori primari che sono il ciano, il magenta e il giallo (di solito indicati con la loro iniziale in inglese, (C – Cyan, M – Magenta, Y – Yellow). Questo modo di trattare il problema prende il nome di sintesi sottrattiva e interessa chi deve stampare a colori. Per produrre i colori con un processo di stampa infatti si devono mischiare in modo opportuno inchiostri di colore diverso. Si veda la figura 2.

L'approccio che interessa noi è quello che parte dalla composizione spettrale della luce. Con questo termine si intende dire che la luce visibile è in realtà composta da molte onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda compresa fra circa 400 e 800 nm, mescolate fra loro. Il colore percepito dipende dalla composizione spettrale. Un metodo semplice ed efficace (anche se non perfetto) di generare i colori consiste nell'assumere che la luce sia costituita da tre componenti fondamentali, ciascuna con una particolare lunghezza d'onda. Le tre componenti adottate sono il rosso, il verde e il blu. Anche in questo caso si adottano le iniziali inglesi e quindi il modello di colore prende il nome di modello RGB (Red, Green e Blue). Quando si utilizzano modelli basati su questo principio, cioè scomporre la luce in diverse componenti, si parla di sintesi additiva della luce stessa. Il modello RGB è alla base del funzionamento degli schermi dei PC e delle fotocamere digitali.

Sono concetti abbastanza difficili da capire, per comprenderli meglio si possono trovare su internet molti siti dove è possibile "costruire" i colori mischiando fra loro quelli fondamentali oppure modificando lo spettro della luce.

2.2 Stratigrafia delle opere pittoriche

Dipinti su legno e tavola

I dipinti della tradizione pittorica Europea, a partire dal '200, hanno una struttura comune essendo costituiti da diversi strati ciascuno con una specifica funzione (figura 4). Ogni strato contribuisce in modo specifico alla stabilità e alla resa cromatica dell'opera. Il supporto è in genere costituito da tavole di legno incollate tra loro e sostenute da rinforzi metallici. Talvolta, sulla superficie destinata a ricevere il colore, si trova incollato un tessuto sottile per ammortizzare i movimenti che avrebbero potuto compromettere l'integrità del dipinto (incammottatura). Al supporto in legno si cominciò a preferire, nel Rinascimento, la tela in virtù della sua maggiore stabilità. La stratigrafia però rimase essenzialmente la stessa delle opere su tavola.

Sulla tavola in legno per prima cosa veniva steso uno strato di preparazione sul quale poter applicare il colore in modo uniforme. Per molti secoli venne usata una miscela di gesso e colla animale, che veniva applicata a strati: il primo, a contatto col legno, era più grossolano, quelli più superficiali erano più fini e stesi con maggiore cura. Lo strato finale della preparazione, l'imprimitura costituiva lo sfondo del dipinto e su di esso veniva effettuato il disegno preparatorio, di solito a carboncino.

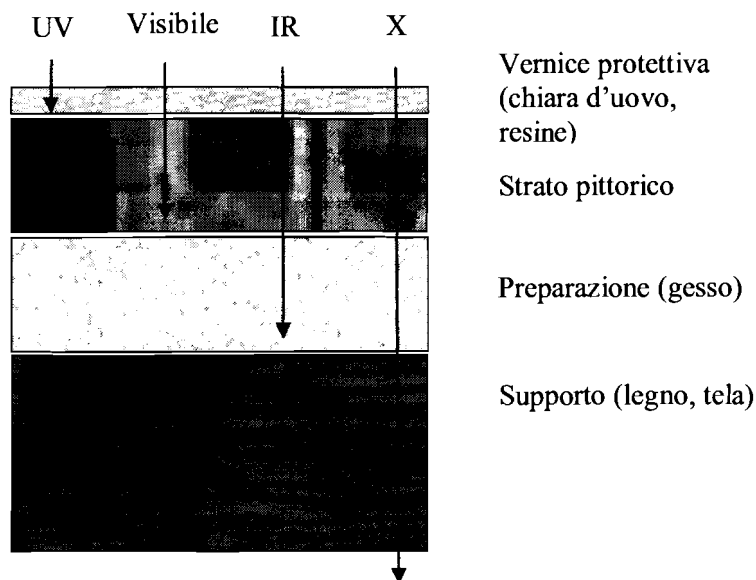


Fig. 4 I diversi strati che costituiscono un dipinto su tavola. I dipinti su tela hanno la stessa struttura ma al posto della tavola di legno si trova la tela

I colori erano preparati per la maggior parte macinando terre colorate o tritutando minerali (malachite, cinabro...), ma anche impiegando coloranti organici di natura vegetale o animale (porpora) o preparati

artificiali (bianco di calce, verde rame). Per consentire la stesura e la durevolezza sul quadro i colori dovevano poi essere mescolati ad un legante o medium. Quest'ultimo era di origine animale (basso d'uovo in base acquosa per la tempera) o vegetale (oli vegetali per la pittura ad olio). Infine una vernice, costituita da resine naturali, era applicata su tutta la superficie del dipinto con funzione protettiva. Per quanto riguarda i dipinti contemporanei, non è possibile individuare degli schemi realizzativi standardizzati come avveniva in epoche passate. Le tecniche di composizione e i materiali stessi sono molteplici e variano come libera espressione dell'artista.

Cercheremo ora di capire cosa succede quando viene inviata su un dipinto della radiazione elettromagnetica (quale è ad esempio la luce visibile, ma il discorso vale anche per altre lunghezze d'onda). Questo ci consentirà di capire innanzitutto il meccanismo che ci permette di "vedere", e quindi di apprezzare, le opere d'arte. In secondo luogo, tenendo conto dei vari fenomeni cui danno luogo i diversi tipi di radiazione elettromagnetica, saremo in grado di comprendere i principi di funzionamento di svariate tecniche di misura utilizzate nel campo dei beni culturali.

Quando la radiazione elettromagnetica si propaga all'interno di un materiale si possono verificare tre fenomeni diversi:

- **Assorbimento.** In questo caso le particelle che costituiscono il fascio di radiazione elettromagnetica (i fotoni) trasmettono tutta la loro energia agli atomi del materiale e scompaiono. Abbiamo già parlato di questo fenomeno nel capitolo precedente.
- **Riflessione.** La luce rimbalza sulla superficie, come avviene per la luce visibile su uno specchio, e continua a propagarsi lungo una direzione precisa (per dire le cose in modo scientifico, si ha riflessione speculare caratterizzata dal fatto che l'angolo che forma il raggio di luce incidente con la superficie riflettente è uguale a quello formato, con la stessa superficie, dal raggio di luce riflesso).

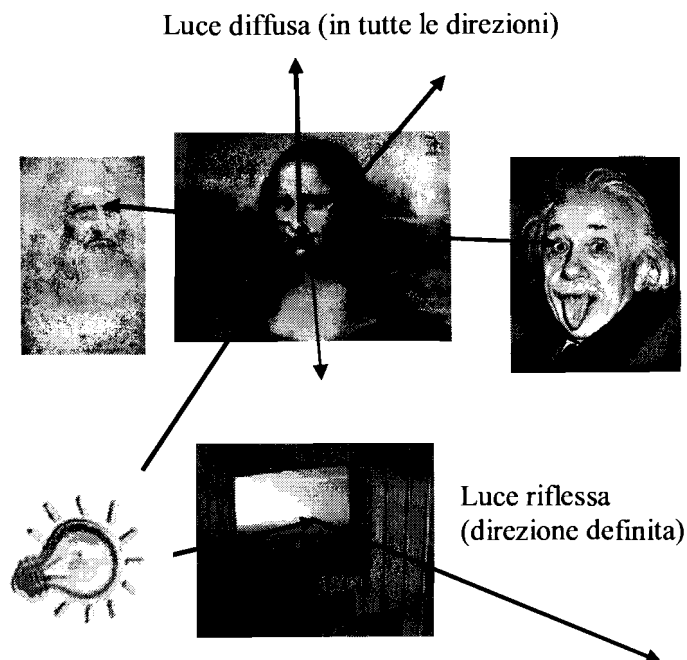


Fig. 5 come noi “vediamo” le cose. La luce colpisce l’oggetto e viene diffusa in tutte le direzioni. Negli specchi invece si ha la riflessione in seguito alla quale il raggio di luce continua a viaggiare lungo una direzione precisa

- **Diffusione.** Con questo termine si indica il fatto che la luce incide sul materiale muovendosi lungo una direzione precisa ma viene diffusa da questo in tutte le direzioni. È questo fenomeno fisico quello che ci consente di “vedere” le cose. La luce arriva su di esse provenendo da una sorgente, e quindi muovendosi lungo una direzione precisa. I raggi della luce diffusa invece viaggiano in tutte le direzioni e quindi possiamo riceverli, e vedere le cose illuminate, in qualsiasi posizione noi ci troviamo. Per vedere la luce riflessa da uno specchio invece ci si deve posizionare lungo la sua direzione di propagazione.

La struttura a strati sovrapposti dei dipinti (su tavola in legno o su tela è lo stesso) fa sì che, all’interno del dipinto, la radiazione luminosa si propaghi con diverse modalità: la radiazione che non è riflessa dalla vernice penetra nello strato del dipinto e va incontro a fenomeni di diffusione (scattering) e assorbimento.

Il fatto che prevalgano l’assorbimento oppure la diffusione dipende molto dalla lunghezza d’onda della radiazione: la radiazione ultravioletta (UV) è maggiormente diffusa dagli strati superficiali e non penetra in profondità, mentre la radiazione infrarossa (IR) è meno diffusa e, per questo, riesce a raggiungere gli strati più profondi del dipinto. I raggi X invece hanno un elevato potere penetrante e sono in grado di attraversare completamente i dipinti, anche quelli su tavola.

Gli affreschi

Diverso è il caso della composizione stratigrafica degli affreschi, realizzati sull’intonaco che ricopre le murature. In questo caso la stratigrafia è quella indicata nella figura 6. Sul muro di pietre o mattoni viene per prima cosa steso l’intonaco. Questo è uno strato protettivo posto sulle pareti costituito da una miscela di un opportuno legante, tipicamente calce, e sabbia. L’intonaco, a sua volta, non è un singolo strato ma si compone di più strati a grana progressivamente più fine. Il primo di questi, il più grossolano, prende il nome di arriccio. A questo segue l’intonaco propriamente detto (chiamato anche tonachino o intonachino), con sabbia a grana molto fine. Il colore, costituito da pigmenti minerali mischiati ad acqua, viene steso sull’intonaco ancora umido (da cui il nome a fresco). A questo punto si verificano delle reazioni chimiche di carbonatazione tra il pigmento e il materiale dell’intonaco, che portano a fissare in modo stabile il colore. Questo modo di dipingere risale agli antichi Egizi e ha raggiunto il suo apice in epoca medievale e rinascimentale. Esempi illustri di affreschi sono la Cappella degli Scrovegni, dipinta da Giotto, o la Cappella Sistina, dove Michelangelo dipinse il *Giudizio Universale*. Gli affreschi esistenti esistono in numerose varianti, dal punto di vista della tecnica pittorica utilizzata, a testimonianza della costante ricerca condotta dagli artisti per migliorare la resa pittorica e sfruttare al meglio i materiali disponibili.

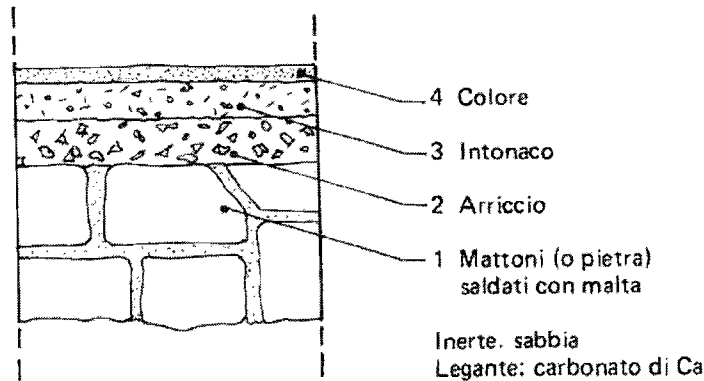


Fig. 6 Stratigrafia di un affresco

Affrescare non è un lavoro facile. La principale difficoltà di questa tecnica è il fatto che non permette ripensamenti: una volta lasciato un segno di colore, questo viene immediatamente assorbito dall'intonaco. Per stendere il colore poi i tempi sono stretti: la carbonatazione infatti (cioè l'indurimento della calce) avviene entro tre ore dalla stesura dell'intonaco. Per ovviare a questo problema, l'artista deve realizzare piccole porzioni dell'affresco (giornate). Eventuali correzioni sono comunque possibili a secco, ovvero mediante tempere applicate sull'intonaco asciutto: sono però più facilmente degradabili.

Un'altra difficoltà consiste nel capire quale sarà la tonalità effettiva del colore: l'intonaco bagnato, infatti, rende le tinte più scure, mentre la calce tende a sbiancare i colori. Per ovviare al problema, è possibile eseguire delle prove su una pietra pomice o su un foglio di carta fatto asciugare con aria calda.

Esistono poi altre varianti delle tecniche di pittura muraria. Un caso celebre di dipinto murario che non è un affresco è il *Cenacolo Vinciano*. Si tratta infatti di un dipinto a tempera su intonaco e il suo degrado è dipeso anche dalla scarsa stabilità di questa tecnica pittorica (oltre che dalle condizioni di umidità dell'ambiente).

Anche nel caso degli affreschi, prima di stendere il colore, era normale la realizzazione di un disegno preparatorio. A differenza dei dipinti su tavola o su legno però negli affreschi il disegno preparatorio viene realizzato con ocre rosse e prende il nome di sinopia (in origine l'ocra rossa proveniva da Sinope, sul Mar Nero).

I pentimenti e i ritocchi

Le opere d'arte non sono quasi mai esattamente come erano in origine, e questo è ovviamente tanto più vero quanto più antica è l'opera. Le intemperie, le condizioni ambientali non adatte, gli interventi dell'uomo, sono tutte possibili cause di modifica delle opere. Le tecniche di indagine oggi a disposizione degli studiosi spesso consentono di individuare queste modifiche e di identificarne la natura. Oltre ai danni prodotti sulle opere, vi sono interventi deliberatamente compiuti su di esse che si è soliti classificare, quando si ha a che fare con opere pittoriche, in tre diverse categorie.

- Innanzitutto vi sono le tracce lasciate dall'artista nel corso della composizione dell'opera, che quasi mai procede in modo lineare e senza ripensamenti. Nella prima fase di realizzazione delle opere pittoriche spesso gli artisti realizzavano delle correzioni sul disegno preparatorio, senza cancellare l'immagine realizzata in precedenza. Ad esempio, una volta realizzato l'intero disegno preparatorio, il pittore si rendeva conto che una certa figura andava collocata in una posizione leggermente diversa. In questo caso si disegnava una seconda figura senza badare a quella inizialmente tracciata. In ogni caso tutto sarebbe poi stato nascosto dallo strato di colore. Lo sporco sotto il tappeto, per intenderci. In casi di questo genere si parla di cambiamento di composizione.
- Un ripensamento però poteva venire anche nel corso della stesura dello strato pittorico. In questo caso si parla di pentimento dell'artista e consiste nel fatto che il dipinto finale è diverso dal disegno preparatorio sottostante. Vedremo fra

poco come, con le attuali tecniche, sia possibile osservare con relativa facilità queste varianti in corso d'opera.

- L'altra categoria comprende gli interventi di restauro compiuti successivamente alla realizzazione dell'opera. Se si tratta di piccoli interventi si parla di ritocchi, che spesso consistono in una singola pennellata. Se si ha invece a che fare con ampie zone dell'opera allora il termine da usare è rifacimenti.

2.3 Immagini in altre regioni dello spettro

Consideriamo nuovamente la figura 4 e pensiamo di illuminare il nostro quadro non con la solita luce visibile, ma con radiazione elettromagnetica di altre regioni dello spettro. A seconda del tipo di radiazione utilizzata si ha una diversa penetrazione nei materiali come messo in evidenza nella figura. La luce visibile, come ben noto, è quella che consente di vedere lo strato pittorico. Con le altre lunghezze d'onda invece si possono apprezzare altri dettagli che la luce visibile non consente di osservare. Considereremo nel seguito le tecniche sperimentali e le informazioni che si possono ottenere utilizzando, al posto della luce visibile, la luce ultravioletta (UV), quella infrarossa (IR) e i raggi X.

Immagini in fluorescenza UV

L'osservazione UV trova largo impiego come metodo di indagine diagnostica nel campo dei beni culturali. Questa tecnica permette di valutare lo stato di conservazione dello strato pittorico, e di discriminare tra le vernici e i pigmenti di un dipinto, anche quando questi appaiono indistinguibili se osservati normalmente. Inoltre è anche utile qualora si vogliano esaltare e rendere più leggibili scritte sbiadite dal tempo su documenti e manoscritti antichi. I suoi vantaggi sono quelli di essere un metodo non invasivo e la sua facilità d'uso. La sua implementazione pratica è piuttosto semplice: basta disporre di una lampada di Wood, uno strumento del costo di poche decine di euro, e oscurare l'ambiente di lavoro. La lampada di Wood è una

lampada che emette, oltre a una certa frazione di luce blu visibile, anche luce ultravioletta con lunghezza d'onda inferiore ai 400 nm. Se ne vedono molte nei luoghi più disparati, dalle discoteche (dove sono responsabili dell'intensa luce emessa dai vestiti bianchi anche in un ambiente buio) ai supermercati dove vengono utilizzate per verificare l'autenticità delle banconote.

Quando un'opera viene irraggiata con radiazione di lunghezza d'onda compresa nella regione dell'ultravioletto, tale radiazione viene in parte riflessa e in parte assorbita dagli strati superficiali. Parte dell'energia assorbita viene quindi riemessa nuovamente per fluorescenza nella banda del visibile (400-700 nm). Proiettando un fascio di raggi UV sulla superficie di un dipinto potremo osservare come alcune parti di esso si illuminino mentre altre rimangano scure. Questo è dovuto al fenomeno fisico della fluorescenza ultravioletta nel campo del visibile, cioè alla proprietà che hanno alcune sostanze di illuminarsi quando vengono colpite dai raggi UV. In pratica i raggi UV (a noi invisibili) vengono assorbiti e riemessi come raggi visibili. Le variazioni di intensità della luce emessa per fluorescenza da un dipinto "illuminato" da una lampada UV dipendono sia della composizione chimica delle varie sostanze che costituiscono la vernice protettiva e gli strati pittorici, che dal tempo trascorso da quando questi materiali sono stati applicati. Ecco perché con questo esame è spesso facile differenziare le ridipinture effettuate in epoca successiva (cioè che prima abbiamo chiamato ritocchi o rifacimenti) dalla pittura originale: i materiali sovrapposti, essendo meno antichi, risultano più scuri. Infatti, con l'invecchiamento si verificano fra leganti e pigmenti delle reazioni chimiche che rendono questi composti più fluorescenti, mentre le reintegrazioni pittoriche più recenti, dove queste reazioni non hanno potuto aver luogo, appaiono come macchie opache (meno fluorescenti).

Una variante introdotta in tempi recenti dell'imaging con luce di fluorescenza è la tecnica FLIM (Fluorescence Lifetime Imaging). Per capire come funziona questa tecnica bisogna tornare brevemente al fenomeno della fluorescenza e osservare che l'emissione della luce di fluorescenza avviene con un certo ritardo temporale rispetto all'assorbimento della luce UV. Questo tempo prende il nome di tempo di vita della fluorescenza. Con la moderna strumentazione

elettronica è possibile misurare questo ritardo, anche se è in generale estremamente breve, dell'ordine di pochi nanosecondi (1 nanosecondo è pari a un milionesimo di secondo). Addirittura, è possibile acquisire immagini costituite solo da quella porzione di luce che viene emessa con un particolare valore del ritardo temporale. La tecnica proposta sfrutta la combinazione di un laser, in grado di emettere brevi impulsi di luce UV, e di una particolare telecamera estremamente sensibile, capace di registrare i fotoni di fluorescenza all'interno di un intervallo temporale di pochi nanosecondi. In questo modo è possibile misurare il tempo di vita della fluorescenza in ogni punto della superficie indagata, al fine di discriminare aree caratterizzate dalla presenza di sostanze differenti. Contestualmente, nei punti che mostrano un'emissione fluorescente di particolare intensità o interesse, viene effettuata la misura dello spettro di emissione tramite un analizzatore ottico multicanale portatile. Mediante questo strumento è possibile registrare lo spettro di fluorescenza di un punto di interesse.

L'applicazione di questa metodologia si è rivelata molto interessante nello studio di importanti cicli di affreschi rinascimentali (il ciclo pittorico di Masolino da Panicale a Castiglione Olona e gli affreschi di Filippo Lippi nel Duomo di Prato), dove la tecnica ha permesso di rivelare sovrammissioni dovute a interventi di restauro e ha consentito di riconoscere le aree degli affreschi dipinte a secco grazie alla consistente presenza di leganti organici. L'applicazione della medesima tecnica al *David* di Michelangelo alla Galleria dell'Accademia di Firenze e alla *Pietà Rondanini* al Castello Sforzesco di Milano ha permesso di individuare e mappare depositi di natura organica (cera e tensioattivi) e inorganica (ossalati e gesso), presenti sulle statue a causa dell'esposizione agli agenti atmosferici e come conseguenza dei trattamenti conservativi e delle operazioni di calcatura effettuati nel corso dei secoli.

Fotografia IR

Le radiazioni infrarosse cominciano al confine con lo spettro visibile e le loro lunghezze d'onda si estendono dagli 800 nm ai 10 μm . Alcuni componenti delle opere d'arte hanno la proprietà di essere più o meno

trasparenti ai raggi IR, che sono pertanto utilizzati per esplorare lo strato sottostante la superficie pittorica. La radiazione infrarossa attraversa lo strato pittorico ed è riflessa dal disegno ad esso sottostante tracciato sulla preparazione bianca.

Per effettuare riprese di immagini infrarosse, la prima tecnica sviluppata si basava sull'illuminazione dell'opera per mezzo di normali lampade ad incandescenza, che emettono anche luce infrarossa, e sull'impiego di macchine fotografiche che utilizzavano pellicole particolarmente sensibili a questa regione dello spettro. Questa tecnica, relativamente semplice ed economica, è ancora oggi utilizzata anche se le sue prestazioni sono notevolmente inferiori rispetto alla riflettografia IR, descritta nel seguito, che però comporta l'utilizzo di strumentazione molto più costosa e sofisticata.

Riflettografia IR

La radiazione elettromagnetica nel vicino infrarosso riesce ad attraversare i materiali che costituiscono il film pittorico e viene riflessa e diffusa dagli strati sottostanti. In questo modo è possibile vedere ciò che si trova sotto il dipinto e non si vede ad occhio nudo. Una delle grandi scoperte effettuate con la radiazione IR applicata alle opere d'arte è stata la possibilità di osservare i disegni preparatori sottostanti. È così relativamente facile osservare il disegno preparatorio nei dipinti del Rinascimento italiano, quando esso era realizzato in carboncino su imprimitura chiara. Nel Seicento, con l'adozione dello sfondo scuro, lo scarso contrasto con quest'ultimo rende di solito invisibile il disegno. Tuttavia è possibile scoprire eventuali pentimenti dell'artista nella redazione dell'opera. Inutile sottolineare l'importanza che informazioni di questo tipo rivestono per gli studiosi.

La tecnologia infrarossa ha subito una fortissima evoluzione nell'arco dell'ultimo decennio, soprattutto grazie al fatto che molte delle sue applicazioni in campo militare sono state declassificate e rese disponibili per le applicazioni civili (l'interesse militare di questa tecnologia deriva dal fatto che le fonti di calore come aerei o anche le persone, emettono radiazioni infrarosse, e quindi la possibilità di

osservare le immagini da esse prodotte equivale a poterle vedere in condizioni di assenza di luce). Attualmente, per riprendere un'immagine infrarossa sono disponibili particolari telecamere dette termocamere che producono immagini come quella mostrata nella figura 7 che mostra la radiazione IR emessa da un corpo umano, evidenziando le zone in cui questa emissione è più o meno marcata e quindi fornendo una precisa indicazione della temperatura delle diverse parti del corpo (l'intensità della radiazione emessa dipende infatti dalla temperatura cui si trova il corpo). La termografia è ormai divenuta una pratica standard in molte applicazioni industriali, medicali, nell'edilizia, e anche nel campo dei beni culturali viene usata per diagnosticare lo stato di edifici storici.

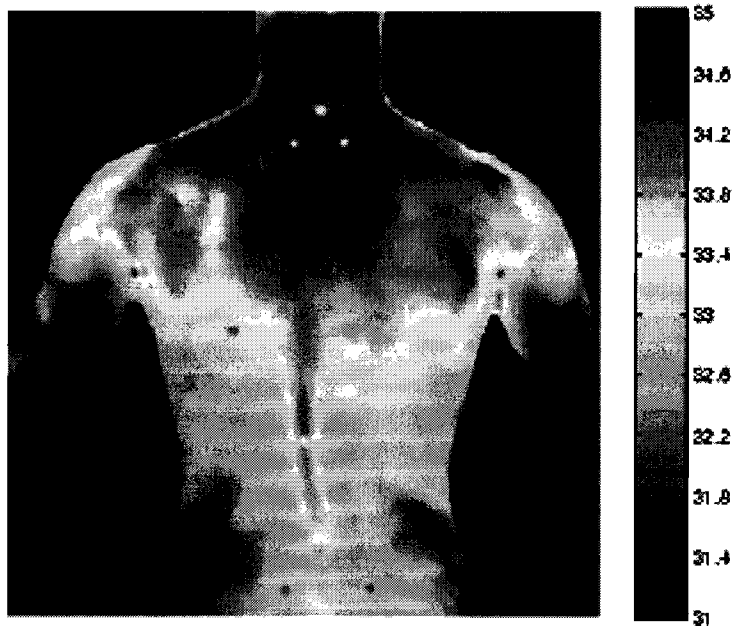


Fig 7 Immagine termografica di un corpo umano. La fotocamera è sensibile alla radiazione infrarossa emessa e permette di misurare come varia la temperatura della superficie corporea

Per ottenere un'immagine infrarossa di un'opera pittorica si illumina la medesima con una normale lampada ad incandescenza, che emette

anche radiazione infrarossa. Questa viene inviata sulla superficie del quadro e la luce diffusa viene poi rivelata dalla termocamera fornendo così un'immagine IR del quadro. È bene osservare che, come si è detto prima, la strumentazione per riflettografia IR è abbastanza costosa dal momento che una buona termocamera arriva a costare diverse decine di migliaia di euro.

La riflettografia IR permette di visualizzare i disegni sottostanti se questi sono stati realizzati con un colore che contrasta a sufficienza con il resto. Non è ad esempio utilizzata per gli affreschi in quanto il rosso utilizzato per le sinopie risulta trasparente agli infrarossi e quindi non dà luogo a una diffusione significativa.

Radiografia X

I raggi X, onde elettromagnetiche la cui lunghezza d'onda è confrontabile con le dimensioni degli atomi, possono penetrare considerevolmente attraverso la materia e questo fatto è alla base di numerose applicazioni come ad esempio le radiografie che si effettuano in ambito medico. Una delle prerogative della penetrazione dei raggi X nei materiali è che la possibilità di essere assorbiti è tanto più elevata quanto maggiore è il numero atomico degli atomi che incontrano. Quando si fa la radiografia di un corpo umano i raggi X penetrano facilmente attraverso i tessuti costituiti prevalentemente da elementi chimici leggeri come il carbonio (numero atomico 6) e l'idrogeno. Le ossa invece contengono il calcio, il cui numero atomico è 20, e quindi assorbono meglio i raggi X. Per questo nell'immagine che si forma sulla lastra fotografica le ossa appaiono come macchie più chiare mentre invece i tessuti poco assorbenti appaiono scuri. Sullo stesso principio si basano le tecniche radiografiche utilizzate in ambito culturale.

Nella figura 8 è mostrato un apparecchio operante presso il Louvre. Il tubo a raggi X è quello appeso al soffitto tramite un braccio snodato. L'opera da radiografare, in questo caso una statua di Cristo, è collocata sotto la sorgente X e dietro l'opera viene posta la lastra fotografica.

I raggi X penetrano nella materia per distanze considerevoli, e la profondità di penetrazione aumenta con l'aumentare dell'energia di questo tipo di radiazione elettromagnetica. I raggi X vengono prodotti accelerando degli elettroni per mezzo di un potenziale elettrico. Nei tubi a raggi X utilizzati in ambito medico ad esempio i potenziali acceleranti sono dell'ordine di alcune decine di migliaia di Volt. Questo consente ai raggi X generati di attraversare un corpo umano.

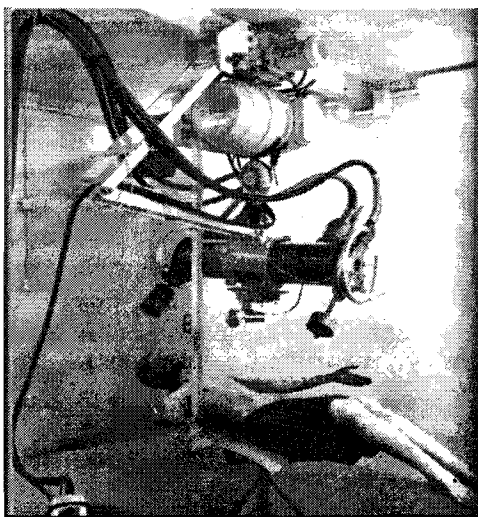


Fig. 8 Apparato per radiografie su opere d'arte presso il Louvre

Vi sono poi apparati a raggi X usati per verificare la presenza di difetti all'interno di oggetti di produzione industriale, generalmente metallici, pensiamo ad esempio a cerchi in lega per automobili. In questo caso si utilizzano tubi a raggi X con potenziali acceleranti di alcune centinaia di migliaia di Volt.

Nel campo dei beni culturali si usano raggi X diversi a seconda delle opere analizzate. Ovviamente, il loro potere penetrante dovrà essere modesto per opere pittoriche su tela, superiore per tavole su legno, molto elevato per ceramiche e opere scultoree.

I raggi X sono una delle tecniche maggiormente utilizzate nell'ambito dei beni culturali e, se opportunamente adoperati, possono fornire una varietà di informazioni importanti.

Emissiografia X

È una variante della radiografia pensata per vedere attraverso dipinti particolari come ad esempio quelli realizzati su tavola e ricoperti, nella parte posteriore, con uno strato di biacca a scopo protettivo. La biacca, essendo a base di piombo, assorbe fortemente i raggi X e quindi una radiografia in trasmissione non produrrebbe alcuna immagine. L'emissografia invece, il cui principio è mostrato nella figura 9 a confronto con quello della più tradizionale radiografia, consente di ottenere immagini anche in casi come quello citato della tavola ricoperta di biacca.

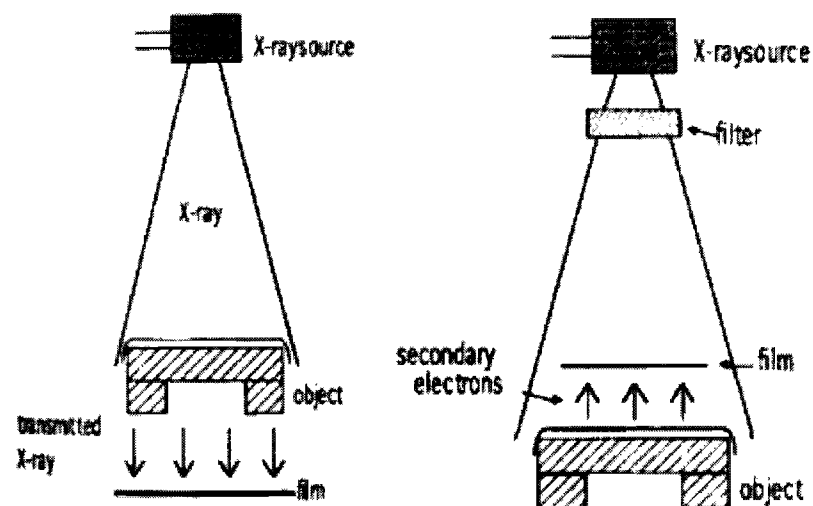


Fig. 9 Principio di funzionamento della radiografia (sinistra) e dell'emissografia (destra)

Nella radiografia i raggi X prima attraversano l'oggetto e poi raggiungono la pellicola fotografica. Nell'emissografia invece i raggi X, dopo aver attraversato la lastra fotografica (che è scelta in modo da risultare debolmente impressionata e comunque in modo uniforme) colpiscono il dipinto e provocano l'emissione di elettroni (si tratta proprio dell'effetto fotoelettrico). Questi elettroni fuoriescono dal dipinto e vanno a colpire la lastra fotografica, impressionandola. In

questo modo si ottiene un'immagine a raggi X del quadro senza il problema della biacca che, trovandosi sul retro, non assorbe i raggi che provocano l'emissione di elettroni.

Gammagrafia

Come si è detto i raggi X penetrano tanto più quanto più piccola è la loro lunghezza d'onda. Per generare raggi X di lunghezza d'onda inferiore si deve aumentare il potenziale usato per accelerare gli elettroni nei tubi a raggi X. Oltre un certo valore di questo potenziale però diventa molto problematico lavorare, e quindi per generare radiazione elettromagnetica ancora più penetrante si utilizzano sorgenti naturali, vale a dire materiali radioattivi che emettono raggi gamma. I raggi gamma sono radiazioni elettromagnetiche le cui lunghezze d'onda sono molto più piccole delle dimensioni atomiche. Una sorgente molto usata di questo tipo di radiazione è il cobalto 60, usato anche in medicina.

2.4 Applicazioni delle tecniche di osservazione diretta

Immagini UV

Risultati ottenibili

La radiazione UV non attraversa la pellicola pittorica ma interagisce solo con la superficie del dipinto. È utile pertanto per studiare le parti superficiali dell'opera: mette in evidenza, infatti, macchie più o meno grigie, o nere, interpretabili come ombre messe dal pittore (pieghe dei manti o profilature), ridipinture di restauro e zone in cui è stata stesa la vernice che per natura, distribuzione e spessore ha una fluorescenza diversa.

Raffaello, *Lo Sposalizio della Vergine*

1504

Olio su tavola

Milano, Pinacoteca di Brera



Raffaello, *Lo Sposalizio della Vergine*, dettaglio volto della Vergine e dello scambio degli anelli: foto in luce visibile, Soprintendenza per il Patrimonio Storico Artistico e Demotnoantropologico di Milano e della Lombardia occidentale-Laboratorio fotoradiografico, in *Lo Sposalizio* 1983