

## **CONSIGLI PER EFFETTUARE IN COMPLETA SICUREZZA LE ESPERIENZE RIPORTATE DAL TESTO**

Quasi tutte le esperienze riportate in questo libro sono state progettate considerando in modo particolare la sicurezza del personale coinvolto alla preparazione. Poiché in qualche caso specifico, per esigenze didattiche, sono state adoperate alcune sostanze oppure impiegati sistemi non completamente esenti da rischi è assolutamente necessario conoscere le modalità operative consone al caso. Per questa ragione è necessario spendere alcune importanti parole a riguardo.

Quasi sempre ho provveduto a fornire al lettore tutte le necessarie indicazioni durante la spiegazione dei laboratori contenuti in questo testo. Resta ovviamente il consiglio di procedere con la massima prudenza per ogni fase delle operazioni di preparazione e di esecuzione. La mia personale esperienza mi porta ad affermare che i momenti più delicati, dove bisogna stare molto attenti, si verificano soprattutto durante la fase espositiva delle esperienze. La responsabilità dell'aula, l'ansia e la distrazione, che sopraggiunge inevitabilmente a causa della presenza della platea, portano a sbagliare in maniera più frequente rispetto ad altre condizioni dove possiamo godere una maggiore tranquillità. Una buona preparazione preventiva della prova e una sistemazione razionale delle apparecchiature o degli strumenti, riuscirà ad evitare problemi legati alla sicurezza. Comunque, sono convinto che le esperienze che si sceglieranno fra tutte quelle contenute in questo testo, sono certamente quelle dove ci si riconoscerà padroni della materia trattata e in cui si avrà la completa padronanza delle parti e delle procedure esecutive relative. Saranno in pratica anche quelle più vicine alle abituali attività formative. Questo fatto costituisce di per se una forma di assicurazione sulla sicurezza.

Normalmente si tende a fare quello che si è in grado di controllare. Tuttavia, alcune mie esperienze indirette, verificate sulla pelle di docenti che ho trovato impegnati su talune situazioni sperimentali o che hanno manipolato sostanze senza rendersi conto dei rischi che correvano, mi fa pensare che tutto questo non è sempre vero. Credo quindi sia doveroso da parte mia continuare a scrivere circa questo importante argomento propedeutico che trattiamo purtroppo nell'appendice finale solo per ragioni di struttura dell'opera.

È buona norma effettuare le esperienze, in aula o in laboratorio, munendosi di un camice da lavoro. L'uso di guanti o di occhiali di protezione, da usarsi durante alcune esperienze in cui si fa uso di acidi o di riscaldamento di sostanze, può essere considerato da alcuni eccessivo e scomodo. Tuttavia se si pensa che oltre a proteggere sé stessi da eventuali e spiacevoli circostanze, si fornisce anche una sorta di esempio di comportamento per gli allievi che stanno guardando, credo che questo modo di fare, assuma una grande importanza educativa.

Si tenga presente inoltre, di avere sempre a disposizione per ogni esperienza che fa uso di sostanze o processi di tipo chimico, un contenitore pieno di acqua nei pressi dell'area di lavoro. Quest'acqua potrà servire per qualsiasi situazione di emergenza. La presenza di acqua a disposizione immediata, può essere utile per lavarsi le mani, gli occhi, buttarla velocemente su parti che potrebbero prendere fuoco, ecc. Personalmente provvedo a tenere nei paraggi anche un contenitore di carbonato di sodio, da utilizzarsi in caso di rovesci di acido.

In ogni caso è consigliabile avere nelle vicinanze sempre un estintore e conoscere le normative di utilizzo. Ricordarsi che l'acqua non è sempre utilizzabile come ottimo rimedio per estinguere gli incendi (vedi normative).

Non bisogna mai stare in laboratorio da soli e soprattutto mai e poi mai devono stare in laboratorio gruppi di allievi senza la vigile presenza di un insegnante.

Se si hanno i capelli lunghi, è necessario sistemarli con una pettinatura che porti gli stessi a stare raccolti in alto. Ovviamente lo stesso vale per gli allievi che devono lavorare ad un'esperienza.

Non si deve mai dirigere l'imboccatura della provetta, in cui sta avvenendo una reazione chimica, verso i colleghi vicini o verso gli allievi e mai e poi mai bisogna guardarvi dentro per scorgere quello che accade.

Absolutamente non si deve mangiare in laboratorio e deve essere evitato di portare le mani alla bocca o sugli occhi. Anche i cibi, se toccati con mani contaminate da reagenti possono essere pericolosi.

Qualora, nel giorno in cui avete deciso di recarvi in laboratorio, ci si è beccati un raffreddore, che non consente di percepire gli odori, occorre evitare di fare esperienze di tipo chimico.

Occorre ricordarsi di leggere le schede di sicurezza di ogni sostanza che si sta adoperando. La conoscenza della sostanza che si usa è fondamentale per scongiurare qualsiasi rischio possa verificarsi da un'errata manipolazione. C'è da aggiungere però una cosa importante: le schede di sicurezza sono scritte in modo da infondere una certa apprensione in chi le legge, riportando fedelmente tutti i dati di pericolosità della sostanza. Per questa ragione provocano paure forse anche un po' eccessive. Certamente l'obiettivo delle schede di sicurezza è proprio quello, e la capacità di ravvedere l'operatore che le sta usando risulta essere uno dei punti fondamentali in tema di sicurezza. Personalmente sono completamente d'accordo su questo punto, ma sono convinto che l'eccesso di apprensione può anche essere negativo. In alcuni casi, può contribuire ad abbandonare un'impresa. Per esempio se si leggono gli effetti collaterali dei farmaci, oppure le schede di sicurezza delle vernici, dei solventi o di alcuni prodotti detergenti che si hanno in casa, ci si rende conto che in qualche modo, si ha già normalmente un costante rapporto con il pericolo. Comunque, sono convinto che il fatto di parlarne adesso, regoli esattamente il rapporto prudenza/spregiudicatezza al valore corretto che questo dovrebbe avere, per procedere celermente nelle varie attività in completa sicurezza. Il regime di prudenza è comunque una linea di condotta che ritengo applicabile per tutte le attività umane. E senza voler tirare in ballo la costante di entropia della termo-dinamica, voglio solo ricordare, scherzando, che *se esiste anche una sola possibilità che un certo numero di cose vadano male, ad andar male è sicuramente quella destinata a provocare il danno peggiore*. Con questa battuta, estratta dalle note leggi di Murphy, voglio continuare il mio discorso.

Si ricordi che tutti i contenitori in vetro o in plastica che si usano devono essere completamente puliti, sia prima che dopo averli usati. Questa precauzione deve essere una norma che serve, sia per scongiurare reazioni moleste che potrebbero arrecar danno, sia per consentire il funzionamento ottimale dei reattivi che si adoperano. Il banco di lavoro deve essere sempre accuratamente ripulito.

Ricordo, che un giorno, in un laboratorio di fisica di una scuola trovai delle palline di mercurio che circolavano imprudenti fra le pieghe del legno del tavolo di lavoro che fungeva da cattedra. Questa scena abominevole è il segnale che qualche operatore o assistente non è certamente stato messo a conoscenza dei rischi che il mercurio può provocare all'ambiente e alle persone.

Occorre maneggiare sempre con molta cura la vetreria. Il vetro rompendosi può produrre ferite molto pericolose; in modo particolare occorre stare molto attenti agli inserimenti dei tubi di vetro all'interno dei tappi forati. È necessario agire con molta cautela proteggendo la mano con uno straccio e assicurandosi che il tubo di vetro abbia i bordi ben arrotondati. Nel caso sia necessario consiglio di usare un sapone o un grasso al silicone per far scivolare il tubo nel tappo forato.

Non si deve permettere agli allievi di avvicinarsi troppo al banco dove si sta effettuando la sperimentazione. Se si ritiene necessario che questo accada, occorre programmare una regolare procedura di avvicinamento, disciplinando l'azione con logica e con metodo. Se si usa l'energia elettrica bisogna assicurarsi di adoperare utilizzatori a norma e in perfetto stato di uso. Non si devono usare triple spine ma, solo spine di sicurezza. Bisogna inoltre assicurarsi che i cavi elettrici siano a norma e non siano logorati sporchi o umidi.

Se si adoperano laser o sorgenti di luce molto intense non si devono mai puntare i proiettori direttamente negli occhi delle persone.

Si tenga presente che ogni cosa può reagire chimicamente. Anche i contenitori che si usano per contenere le sostanze. Si verifichi di aver riposto le sostanze in contenitori che non reagiscono con il reattivo che si è deciso di introdurvi. Esistono delle schede chiamate "Chemical Compatibility Result" che informano di come un materiale reagisce quando è posto a contatto con alcune sostanze. Molti infatti non sanno che alcuni contenitori plastici reagiscono con alcuni solventi organici. Per esempio l'acetone (lo smacchiatore per le unghie) non può essere conservato in contenitori di policarbonato (PC), oppure di PVC, mentre risulta ottimo un contenitore di polipropilene (PP). L'acqua ossigenata deve essere invece conservata in contenitori di PVC molto puliti e con profili estremamente uniformi e arrotondati. Non è consigliato il vetro, dove in alcuni casi l'acqua ossigenata può decomporsi e generare un'esplosione.

Sono convinto che il lettore non ha niente da obiettare se a questo punto, approfittando del contesto di cui stiamo discorrendo, io possa in qualche modo cautelarmi da qualsiasi perversa situazione possa verificarsi per incuria o negligenza del docente o di qualsiasi altro operatore che metta in pratica le applicazioni contenute in questo testo.

In ogni caso, io sottoscritto, quale autore dei contenuti di questo testo, declino ogni responsabilità di qualsiasi ordine e grado, sia se si verifica a danno di cose che a danno di persone, per la lettura, l'interpretazione e l'esecuzione errata delle sperimentazioni descritte.

Voglio fare inoltre cosa gradita allegando una tabella, frutto di studi e ricerche svolte dal sottoscritto in tempi lontani, che illustra in modo semplice e schematico gli antidoti o i provvedimenti che, in caso di avvelenamento, potrebbero essere praticati al malcapitato. Questa tabella deve sempre essere posta in modo visibile nel laboratorio di lavoro dello sperimentatore. Essa non ha la pretesa di risolvere qualsiasi problematica di avvelenamento, ne' risulta

essere esaustiva: voglio fornirla unicamente come guida o suggerimento per fronteggiare un'eventuale situazione inaspettata in cui, per diverse ragioni, è impossibile disporre delle attrezzature o delle competenze del più vicino centro antiveneni. Ripeto, le informazioni riportate dalla tabella sono solo indicative.

Si ricordi di avere sempre a portata di mano i numeri di telefono del centro antiveneni più vicino.

| ANTIDOTI   |   |   |  |
|--|---|---|--|
| PRINCIPALI TOSSICI   | MECCANISMO DI AZIONE (antidoto)                             | ANTIDOTO  | OSSERVAZIONI   |
| Quasi tutti i veleni<br>Funghi velenosi,<br>tossine,<br>alcaloidi, ecc   | Adsorbimento del tossico                                    | - <b>Carboni assorbenti</b><br>1) 2-4 cucchiaini da tavola in 1/2 litro di acqua<br>2) in mancanza di carbone attivo pane grattato carbonizzato<br>- <b>argilla ventilata</b>   | ESCLUSI:<br>Acidi forti e basi forti, acido bórico, cianuro, solfato ferroso, litio, alcole metilico, ed etilico |
| 1) Sali di metalli pesanti eccetto il tallio<br>N.B. per il mercurio sono necessari 8 bianchi d'uovo.<br>2) Emetici<br>3) Acidi ed alcali caustici | Formazione di composti insolubili                           | - <b>Acqua albuminosa:</b><br>4 bianchi d'uovo battuti in 1 litro di acqua  |  |
| Arsenico   | Lesione di capillari  | Dimercapolo   |  |
| Metalli pesanti.<br>Mercurio,<br>piombo, tallio.<br>Alcuni metalloidi (Arsenico, antimonio);<br>Acido cianidrico e cianuri                         | Formazione di solfuri insolubili                            | 1) Antidotum metallorum<br>2) Antidoto multiplo da (*) somministrare in mezzo bicchiere d'acqua<br>3) Miele solforato: solfo sublimato e lavato: 20 g di Miele bianco<br>4) iposolfito di sodio per acido cianidrico inalazioni di NITRITO D'AMILE Nitrito di sodio (per HCN)<br>Tiosolfato di sodio (per HCN) (via endovenosa) | (*) da conservare al riparo dell'aria  |
| Sostanze corrosive, iodio, cloro e derivati  | Formazione di composti di reazione con l'albumina del latte | LATTE   | Controindicazioni:<br>Tossici liposolubili, fosforo, cantaridina, DDT, parathion, nitrobenzene, felce maschio    |

| PRINCIPALI TOSSICI   | MECCANISMO DI AZIONE (antidoto)                           | ANTIDOTO   | OSSERVAZIONI   |
|--|---|--|--|
| Iodio, ipoclorito, cromati, bicromati, clorati, permanganati.                                  |   | Tiosolfato di sodio (iposolfito) 250 ml al 5%  | Per via endovenosa e usato per i cianuri con cui reagisce e forma tiocanati            |
| SARIN  | Edema polmonare e paralisi                                | Atropina (endovenosa)  |  |
| CURARO   | Paralisi motoria  | Gli indios dicono NaCl Eserina, neostigmina  |  |
| Sali di metalli pesanti, zinco, numerosi alcaloidi, e glicosidi (eterosidi)                    | Precipitazione dei sali dei metalli pesanti e dello zinco | <b>TANNINO:</b><br>Tannino officinale: 5 g in 1/2 litro di acqua; in mancanza di esso decotto di tè forte<br>N.B. (**) se possibile somministrare contemporaneamente bicarbonato di sodio o acetato di sodio | (**) liberare lo stomaco dopo ciascuna ingestione mediante lavaggio gastrico o emetici |
| Sali di metalli pesanti, alcaloidi, glicosidi, (eterosidi) acidi e alcali, derivati arsenicati | Idem  | ANTIDOTO UNIVERSALE<br><b>CARBONE ATTIVO</b>   |  |
| ALCALOIDI  | Precipitazione degli alcaloidi sotto forma di perioduri   | SOLUZIONE IODOIODURATA:<br>IODIO 2g; ioduro di potassio 5 g; acqua distillata 250 cc 1 cucchiaino da tavola in un bicchiere d'acqua. Per lavanda gastrica aggiungere bicarbonato di sodio.                   |  |
| Acido ossalico e fenolo  | Formazione di un precipitato                              | <b>Saccarato di calce:</b><br>Saccarosio 16 g, Calce spenta 5 g acqua distillata 40 g  |  |
| Anidrite arseniosa, arseniti, arseniati  | Idem  | <b>Sesquiossido di ferro idrato:</b><br>2-4 cucchiaini da tavola ogni dieci minuti. provocare il vomito dopo ciascuna ingestione<br><b>LATTE DI MAGNESIA:</b><br>50 g in un litro d'acqua                    |  |

| PRINCIPALI TOSSICI                                | MECCANISMO DI AZIONE (antidoto) | ANTIDOTO  | OSSERVAZIONI   |
|---|---------------------------------|---|--|
| TALLIO  |                                 | <b>Blu di prussia</b><br>Colorante n. 77520   |  |
| Sali di piombo, sali di bario                     | Idem                            | <b>LIMONEA SOLFORICA</b><br>Albumine d'uovo   |  |
| ACIDI   | Formazione di sali              | <b>ANTIACIDI</b><br>LATTE<br>LATTE DI MAGNESIA  |  |
| ALCALI  | Idem                            | <b>ANTIACALINI</b><br>Succo di limone diluito<br>Aceto diluito<br>Limonea tartarica (10%)                     |  |
| FORMOLO   |                                 | Carbonato d'ammonio   |  |
| ACIDO CLORIDRICO<br>HCl                           |                                 | Somministrare abbondante acqua, sospensione di magnesio ustato o idrossido di alluminio. Non provocare vomito |  |
| ACIDO FLUORIDRICO<br>HF                           |                                 | Somministrare abbondante acqua, bianco d'uovo e olio minerale. Soluzione di calcio                            | Il calcio sottoforma di gel è utilizzabile anche sulla pelle |
| ACIDO NITRICO<br>HNO <sub>3</sub>                 |                                 | Latte o acqua calda saponosa, favorire il vomito, tenere l'infortunato al riposo e al caldo                   |  |
| ACIDO SOLFORICO<br>H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> |                                 | Latte con bianco d'uovo, o sospensione acquosa di magnesio. Non si provochi il vomito                         |  |
| ACIDO ACETICO<br>CH <sub>3</sub> COOH             |                                 | Acqua latte o bianco d'uovo   |  |
| ALCALI CAUSTICI                                   |                                 | Acqua pura e acidificata. Non provocare il vomito   |  |

| PRINCIPALI TOSSICI  | MECCANISMO DI AZIONE (antidoto) | ANTIDOTO  | OSSERVAZIONI  |
|---|---------------------------------|---|---|
| PIOMBO  |                                 | Solfato di magnesio<br>Albumine d'uovo  | Perdita di bava,<br>barcollamenti dolori<br>lombalri  |
| AMMONIACA   |                                 | Somministrare<br>succo di agrumi,<br>bianco d'uovo, latte,<br>olio di oliva, favorire<br>il vomito.<br>Tenere a caldo<br>l'infortunato                                  |   |
| GAS: Cloro e<br>Bromo   |                                 | far respirare<br>ammoniaca diluita e<br>ossigeno  |   |
| GAS: Vapori nitrosi   |                                 | Far respirare vapori<br>di ammoniaca e<br>tenere l'infortunato<br>in riposo in<br>ambiente caldo  |   |
| GAS: Idrogeno<br>solforato<br>H <sub>2</sub> S (può provocare<br>avvelenamento<br>mortale in<br>concentrazione<br>1°/∞ in aria) |                                 | Aria fresca<br>respirazione<br>artificiale, inalazioni<br>di ossigeno.<br>L'infortunato al<br>riposo e al caldo.<br>Quando si è riavuto<br>somministrargli del<br>latte | I sintomi sono:<br>cefalea, infiammazione<br>agli occhi, dolori<br>viscerali, perdita dei<br>sensi. |
| ARSENICO  |                                 | Tiosolfato e<br>tranquillanti<br>Albumine d'uovo  | Gastroenteriti<br>violente, dolori<br>addominali e vomito<br>ematico                                |
| TANNINO<br>(ingestione)   |                                 | Olio di vasellina<br>minerale medicinale<br><b>No!!</b> Latte o grassi<br>animali o vegetali in<br>genere   |   |
| STRICNINA   |                                 | Nessuno   | Convulsioni   |



## Sostanze Chimiche Incompatibili

Molte sostanze chimiche comunemente usate in laboratorio reagiscono in modo pericoloso quando vengono a contatto con altre. Alcune di queste sostanze incompatibili sono qui di seguito elencate.

|   |   |
|---|---|
| <b>Acetilene</b>                                  | con rame (tubazioni), alogeni, argento, mercurio e loro composti  |
| <b>Acetone</b>                                    | con miscele concentrate di acido solforico e nitrico  |
| <b>Acido acetico</b>                              | con acido cromico, acido nitrico, composti contenenti idrossili, glicole etilenico, acido perclorico, perossidi e permanganati                      |
| <b>Acido cromico</b>                              | con acido acetico, naftalene, canfora, alcool, glicerolo, trementina e altri liquidi infiammabili   |
| <b>Acido nitrico</b>                              | con acido acetico, cromico e cianogeno, anilina, carbonio. Idrogeno solforato, fluidi, gas e sostanze che vengono prontamente nitrate               |
| <b>Acido ossalico</b>                             | con argento e mercurio  |
| <b>Acido perclorico</b>                           | con anidride acetica, bismuto e le sue leghe, alcool, carta, legno e altre sostanze organiche   |
| <b>Acido solforico</b>                            | con clorati, perclorati, permanganati e acqua   |
| <b>Ammoniaca anidra</b>                           | con mercurio, alogeni, ipoclorito di calcio e fluoruro di idrogeno  |
| <b>Anilina</b>                                    | con acido nitrico e perossido di idrogeno   |
| <b>Argento</b>                                    | con acetilene, acido ossalico, acido tartarico e composti ammoniacali   |
| <b>Biossido di cloro</b>                          | con ammoniaca, metano, fosfina, idrogeno solforato  |
| <b>Bromo</b>                                      | con ammoniaca, acetilene, butadiene, butano, idrogeno, carburo di sodio, trementina e metalli finemente polverizzati                                |
| <b>Carbonio attivato con ipoclorito di calcio</b> | con tutti gli agenti ossidanti  |
| <b>Cianuri</b>                                    | con acidi e alcali  |
| <b>Clorati</b>                                    | con sali di ammonio, acidi, polveri metalliche, zolfo, composti organici o infiammabili finemente polverizzati e carbonio                           |
| <b>Cloro</b>                                      | con ammoniaca, acetilene, butadiene, benzina e altri derivati del petrolio, idrogeno, carburo di sodio, trementina e metalli finemente polverizzati |
| <b>Diossido di cloro</b>                          | con ammoniaca, metano, fosfina idrogeno solforato   |
| <b>Idrocarburi in generale</b>                    | con fluoro, cloro, acido formico, acido cromico, perossido di sodio   |
| <b>Idrogeno solforato</b>                         | con vapori di acido nitrico e gas ossidanti   |
| <b>Iodio</b>                                      | con acetilene e ammoniaca   |
| <b>Liquidi infiammabili</b>                       | con nitrato di ammonio, acido cromico, perossido di idrogeno, acido nitrico, perossido di sodio e alogeni   |

|  |  |
|--|--|
| <b>Mercurio</b>  | con acetilene, acido fulminico, idrogeno   |
| <b>Metalli alcalini (es. calcio, potassio e sodio)</b> | con acqua, anidride carbonica, tetracloruro di carbonio e altri idrocarburi clorati  |
| <b>Nitrato di ammonio</b>                              | con acidi, polveri metalliche, liquidi infiammabili, clorati, nitrati, zolfo e sostanze organiche finemente polverizzate o composti infiammabili   |
| <b>Ossigeno</b>  | con olii, grassi, idrogenati, e liquidi, solidi e gas infiammabili   |
| <b>Pentossido di fosforo</b>                           | con l'acqua  |
| <b>Permanganato di potassio</b>                        | con glicerolo, glicole etilenico, benzaldeide, e acido solforico   |
| <b>Perossido di idrogeno</b>                           | con cromo, rame, ferro, la maggior parte degli altri metalli e i loro sali, liquidi infiammabili e altri prodotti combustibili, anilina e nitrometano  |
| <b>Perossido di sodio</b>                              | con qualsiasi sostanza ossidabile come metanolo, acido acetico glaciale, anidride acetica, benzaldeide, disolfuro di carbonio, glicerolo, acetato di etile e furfurale   |
| <b>Rame</b>  | con acetilene, azide e perossido di idrogeno   |
| <b>Sodio</b>   | con tetracloruro di carbonio, diossido di carbonio e acqua   |
| <b>Sodio azide</b>                                     | con piombo, rame e altri metalli. (Questo composto è comunemente usato come conservante, ma forma composti instabili ed esplosivi con i metalli. Se eliminato attraverso gli scarichi dei lavandini, i sifoni e i tubi potrebbero esplodere quando ci stia lavorando un idraulico) |

## APPENDICE A)

### TERMODINAMICA

La termodinamica studia il comportamento di un qualsiasi sistema, in relazione alle trasformazioni di energia che vi si verificano. Queste trasformazioni avvengono tramite l'assorbimento o il rilascio di una parte di energia con l'ambiente esterno. Questa disciplina pertanto si occupa di coordinare tutti i fenomeni osservabili e gli effetti sulla materia che derivano dal calore o dal lavoro meccanico ceduto o acquisito da un sistema.

Come è noto una reazione chimica procede attraverso uno scambio di energia con l'ambiente. Possiamo definire con il termine **dH** *l'energia termica scambiata con l'ambiente a pressione costante*. Questo termine è anche chiamato **ENTALPIA**.

Supponendo che la reazione avvenga senza produrre alcun lavoro possiamo ritenere **dH=dU**, indicando con quest'ultimo termine il contenuto totale di energia di un sistema (energia interna). In poche parole la trasformazione produce soltanto un innalzamento o un abbassamento di temperatura.

Utilizziamo il simbolo **-dH** oppure in questo caso **-dU** se la reazione è **eso-energetica**.

*(il calore è fornito all'ambiente circostante)*

Utilizziamo il simbolo **dH** oppure in questo caso **dU** se la reazione è **endo-energetica**.

*(il calore è assorbito dall'ambiente circostante)*

Consideriamo come esempio la reazione chimica seguente:



Se in una soluzione poniamo 1 mole di rame più due moli di argento, osserviamo una trasformazione che produce argento metallico e rame che passa in soluzione. In questa reazione ossido-riduttiva, il rame si ossida e l'argento si riduce. La soluzione che contiene questi prodotti di reazione comincerà a riscaldarsi in quanto la reazione procede in modo esoenergetico sviluppando **30 kcal** per mole di rame (**dH = -30 kcal**)

Questo è un esempio di reazione che avviene senza produrre alcun lavoro (**dH=dU**).

Facciamo un altro tipo di esempio. Consideriamo la reazione prodotta tra 1 mole di zinco, che si scioglie in acido cloridrico, sviluppando gas idrogeno a 1 atmosfera di pressione. In questo caso abbiamo a che fare con una nuova reazione esoenergetica, il sistema infatti perde questa volta **-37 kcal**. Accurate

misure calorimetriche però, portano un risultato un tantino diverso, **dH= - 36.4 kcal.**

Questo fatto non deve meravigliarci, infatti, abbiamo dimenticato di considerare che, una parte di energia del sistema, è stata spesa come lavoro fatto grazie alla pressione del gas idrogeno prodotto che abbandona la soluzione consumando un po' di energia per farlo, appunto il valore di **- 0,6 kcal.**

La formulazione dovrà tenere conto di questo fatto, in questo caso infatti **dU** non è uguale a **dH**.

$$\mathbf{dH = (-36.4 - 0.6) = - 37 Kcal}$$

scriveremo quindi:

$$\mathbf{dH = dU + dG} \quad (2.0A)$$

Entalpia = Energia interna + **energia libera del sistema**

Abbiamo fatto un primo passo per la comprensione di questi concetti e abbiamo introdotto un nuovo termine chiamato energia libera del sistema. Ora introduciamo nuovamente l'esempio della reazione chimica n.1.0A, ma considerando quanto segue: quando abbiamo parlato della reazione chimica n.1.0A non abbiamo detto che una parte dell'energia prodotta (-30 kcal) può essere trasformata in lavoro. Questo fatto può essere ottenuto tramite una cella voltaica che produrrà un potenziale di 0.46 V in grado di sfruttare la capacità della coppia ossido-riduttiva Cu/Ag. Il potenziale di 0.46 V corrisponde a un'energia di 20 kcal per mole di rame, le rimanenti 10 kcal verrebbero trasferite all'ambiente sotto forma di calore. L'energia trasformabile in lavoro (-20 kcal) è definita anche in questo caso energia libera del sistema.

$$\mathbf{dH = dU + dG} \quad \mathbf{- 30 kcal = - 10 kcal - 20 kcal} \quad (3.0A)$$

In parole diverse, il concetto di energia libera è stato introdotto per definire quella quantità termodinamica di energia disponibile per effettuare un generico lavoro. In una trasformazione termodinamica potremo avere una certa quantità di energia libera tale da essere sfruttata opportunamente in lavoro anziché vederla degradata in calore.

Tutte le volte che scriviamo l'equazione n.2.0A stiamo utilizzando un'espressione matematica caratteristica del **primo principio** della termodinamica.

Esso dice: ***l'energia non si crea dal nulla, ne' si annulla; se una certa quantità di energia si trasforma, apparirà in un'altra forma presentandosi in una quantità ad essa equivalente.*** Da questo enunciato si può evincere che se forniamo ad un sistema una quantità molto piccola di energia sotto forma di calore **dQ**, questo sistema potrà eventualmente produrre lavoro in una quantità stabilita dalla seguente equazione:

$$dQ = dE + dL \quad (4.0A)$$

dove dE è considerata l'energia interna del sistema (quella parte che si trasforma in calore) e dL il lavoro possibile. Certamente sono state riconosciute le evidenti analogie con i termini dell'equazione precedente, anche se in questo caso siamo noi a fornire calore ad un sistema che risulta essere in stato di equilibrio prima della somministrazione di questo calore.

Definiamo meglio quello che chiamiamo lavoro possibile o, nel caso precedente energia libera. Dalla fisica abbiamo che il lavoro è uguale alla forza (Newton) per lo spostamento (metri) quindi:

$$W = f \cdot m \quad (5.0A)$$

moltiplichiamo questa espressione per un termine unitario costituito da un rapporto area/area:

$$W = f \cdot m \cdot \frac{m^2}{m^2} = \frac{f}{m^2} \cdot V \quad (6.0A)$$

possiamo facilmente verificare che essendo  $f/m^2$  una pressione e "V" un volume, in conclusione abbiamo:

$$W = P \cdot V \quad (7.0A)$$

Questo semplice risultato può servirci per comprendere che in termodinamica abbiamo lavoro tutte le volte che un sistema si espande o si contrae. In parole più corrette tutte le volte che osserviamo una variazione di pressione o di volume.

La termodinamica dimostra facilmente anche che:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (8.0A)$$

questa equazione, conosciuta anche come equazione dei gas perfetti, stabilisce la relazione che passa tra il volume e la pressione di un dato gas in relazione alla temperatura assoluta e al numero delle moli. La costante R definita costante dei gas perfetti, assume il valore di **0.0821 litri atmosfera /temperatura<sup>-1</sup> mole<sup>-1</sup>**.

Per completare il quadro teorico alla base delle fenomenologie di tipo termodinamico, è stato necessario però introdurre un'altro termine di energia che tira in ballo il concetto di probabilità. In questo modo le trasformazioni di fase possono essere interpretate in termini energetici governate dalla probabilità termodinamica.

Questo termine si chiama **ENTROPIA**. L'entropia è il calore scambiato diviso per la temperatura. Essa si indica con **S** ed è facilmente calcolabile per le diverse sostanze.

$$S = \frac{\delta Q}{\delta T} \quad (9.0A)$$

S è anche definito come grado di disordine di un sistema.

Per esempio, se un sistema costituito da 1kg di acqua e ghiaccio in equilibrio, assorbe 100 kcalorie alla temperatura costante di 0°C (273 °K). Il suo aumento di entropia sarà:

$$\Delta S = 100/273 = 0.367 \text{ kcal T}^{-1}$$

Nella vaporizzazione di una mole d'acqua a 100 °C si assorbono 9717 kcalorie. il corrispondente aumento di entropia è:

$$\Delta S = 9717/373 = 26 \text{ kcal T}^{-1}$$

Quest'ultimo esempio ha un grado di disordine maggiore del precedente di conseguenza, lo stato gassoso è certamente più disordinato dello stato liquido.

Per processi che avvengono a temperatura costante la variazione di entropia può essere facilmente calcolata con:

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T} \quad (10.0A)$$

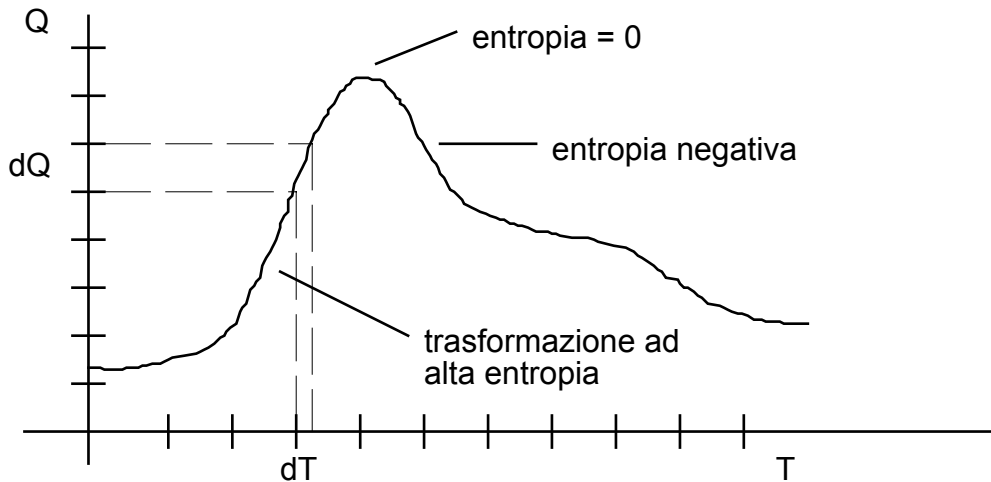
Tornando all'equazione n.2, che riscriviamo qui di seguito ( $dH = dU + dG$ ), essa può anche essere espressa tenendo conto questo nuovo fattore:

$$dH = dG + TdS \quad (11.0A)$$

Abbiamo certamente notato che il termine  $dU$ , pari all'energia interna, è scomparso e al suo posto è stato introdotto il termine di entropia che ci descrive perfettamente la relazione di fase di un sistema. Il termine di energia interna è ora stato determinato perfettamente. L'equazione n.11.0A, può essere anche scritta come:

$$dG = dH - TdS \quad (12.0A)$$

in questo caso appare chiaro che l'energia disponibile di un sistema, cioè l'energia libera trasformabile in lavoro è degradata dall'aumento del valore dell'entropia.



La figura presentata mostra una curva entalpica ottenuta tramite uno strumento chiamato DSC. (**Differential - Scanning -Calorimetric**) e mostra le trasformazioni termodinamiche subite da una sostanza sottoposta a riscaldamento.

Non a caso è stata trovata una relazione tra l'entropia e una funzione di probabilità termodinamica  $W$ .

$$S = K \cdot \ln W$$

dove  $K$  è la costante di Boltzman pari a  $1.380 \cdot 10^{-23} \text{ j K}^{-1}$ . Questo significa che quanto maggiore è la probabilità, più bassa è l'energia libera, poiché il termine entropico  $TdS$  si sottrae all'energia (vera) o entalpia del sistema.

Dato che l'entropia delle fasi meno ordinate è più elevata, la loro entalpia libera diminuisce più rapidamente con la temperatura di quella delle fasi più ordinate. Per questo motivo l'entalpia libera di un cristallo varia meno rapidamente di quella di un liquido che a sua volta varia più lentamente dell'entalpia libera di un gas, che corrisponde a uno stato completamente disordinato della materia.

In sintesi:

*il **primo principio della termodinamica** esclude la possibilità di produrre lavoro senza un consumo contemporaneo di un'altra forma di energia.*

*Il **secondo principio della termodinamica** vincola invece il rendimento di trasformazione, assumendo per questo un valore sempre inferiore a 1*

*Il **terzo principio**, utilizzando il concetto di entropia, dichiara che in una qualsiasi trasformazione spontanea, un sistema effettuerà la trasformazione in modo da portarsi sempre ad un livello di energia più bassa; oppure di entropia maggiore.*

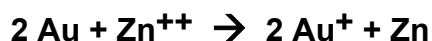
## FACCIAMO UN ESEMPIO RELATIVO AL TERZO PRINCIPIO

Supponiamo di avere una soluzione di ioni di zinco e mettiamo in questa soluzione dell'oro metallico. Ci chiediamo se avviene una qualche reazione chimica. Per rispondere a questa domanda dobbiamo introdurre una formula, facilmente ricavabile dalle equazioni della termodinamica applicata alle reazioni di ossido-riduzione, che esprime l'energia libera di una trasformazione chimica:

$$\Delta G = -n \cdot F \cdot \Delta E$$

Dove  $\Delta G$  è l'energia libera,  $n$  esprime il numero di elettroni messi in gioco,  $F$  è la costante di Faraday (96500 C),  $\Delta E$  esprime la differenza tra i potenziali standard (potenziale redox  $E^+_0 - E^-_0$ ).

Scriviamo a questo punto la reazione chimica supposta:



Essa avviene con la messa in gioco di due elettroni. I potenziali redox delle due sostanze sono:

$$E_0 (\text{Au}/\text{Au}^+) = 1.7 \text{ V} ; E_0 (\text{Zn}/\text{Zn}^{++}) = - 0.763 \text{ V}$$

In base alla formula precedente avremo:  $\Delta G = 2 \cdot 96500 (+1.7 - 0.763) = \Delta G$  **positivo**, quindi la reazione non può avvenire in quel senso, semmai avviene in senso perfettamente contrario.

Il sistema  $\text{Au} \text{ Zn}^{++}$  si trova ad un livello di energia minore del sistema  $\text{Au}^+ \text{ Zn}$ , quindi è preferito dalla natura.



## APPENDICE B)

### FISICA QUANTISTICA

#### LO STATO QUANTIZZATO

Spesso i docenti di elettronica durante le loro dissertazioni circa l'introduzione del capitolo riguardante l'elettronica digitale stabiliscono la profonda differenza che esiste fra i fenomeni fisici naturali definiti analogici e la nuova materia che si apprestano a introdurre, definita "digitale".

I circuiti digitali sono costituiti infatti da reti in grado di manipolare livelli di segnale (tensione o corrente) quantizzati in solo due stati logici. Per questa ragione lo strumento matematico necessario per studiare la logica digitale utilizza il sistema dei numeri binari costituiti da **1** e **0** ed è strutturato dalle relazioni booleane che tutti gli elettronici conoscono.

L'elettronica digitale è quindi una tecnologia che fa uso di elementi logici discreti rappresentati dai livelli binari.

I fenomeni fisici naturali, come spesso si dice e come il senso comune ci detta, appartengono invece ad una categoria molto diversa, in cui regna il concetto del continuo o come si è soliti definire, "analogico".

Ebbene in realtà pare che la natura sia strutturata in un modo esattamente contrario ribaltando completamente la nostra intuizione. Tutti i fenomeni naturali sono infatti quantizzati. Gli scienziati si erano accorti già da tempo che la natura si comportava in maniera discontinua, basta pensare alla teoria atomica moderna già peraltro intuita dagli antichi greci 2500 anni fa.

È infatti noto che la materia si presenta come un insieme discontinuo di atomi, fino ad arrivare alla discretizzazione delle particelle che a loro volta li costituiscono. È ovvio che, studiando un fenomeno fisico a livello macroscopico, si trascurano gli effetti della quantizzazione. Ma cerchiamo di capire con un esempio cosa vogliamo dire.

Osservando un filo d'acqua che fuoriesce da un rubinetto aperto si potrebbe superficialmente attribuire al fenomeno una struttura di continuità, per esempio partendo dal concetto della portata. Come è noto la portata è la misura di quanta acqua passa nell'unità di tempo. Si supponga a questo punto di chiudere lentamente il rubinetto aspettandosi flussi d'acqua sempre più piccoli. Chiamando "x" la sezione utile del rubinetto, "P" la pressione nella condotta e con "K" una costante di proporzionalità che tenga conto di tutti i fattori relativi al sistema: la portata "φ" risulterà definita dalla relazione matematica  $P \cdot K \cdot x$ , e facendo tendere a zero la sezione utile della valvola potremo scrivere:

$$\lim_{x \rightarrow 0} (P \cdot K \cdot x) = 0 \quad (1.0B)$$

I matematici sono soliti definire con ingegnosi espedienti il variare di una funzione in relazione ad un'altra grandezza (vedi la formula n. 1.0B che esprime come è noto il limite di una funzione). Cioè la portata tende a zero, per la

sezione utile della valvola che si porta a zero. In parole semplici si sta dicendo che, riducendo continuamente la sezione di uscita della valvola, il flusso di acqua diminuirà fino ad annullarsi. Facendo notare a questo punto che questo esperimento potrà essere effettuato soltanto nella pura e semplice astrazione matematica (infatti il fenomeno si arresterebbe molto prima a causa della tensione superficiale), si analizzino i risultati prevedibili.

Se per definizione, l'elemento preso in considerazione nella condotta è l'acqua, il limite di chiusura della valvola sarà caratterizzato da una certa apertura minima dalle proporzioni opportune per la fuoriuscita di una sola molecola d'acqua per volta. Una successiva diminuzione di  $x$ , arresterebbe completamente il flusso d'acqua in quanto le molecole non potrebbero più passare. L'orifizio della valvola, infatti, diventerebbe troppo piccolo anche per il passaggio di una sola molecola d'acqua. Questo esperimento paradossale mostra che una funzione matematica, espressa da un limite che caratterizza una legge fisica così tipicamente continua, è in realtà rappresentata da stati discontinui. La portata verrebbe misurata, in questo caso, con numeri sottomultipli di **18 grammomolecole al secondo** (peso molecolare dell'acqua).

Anche la corrente elettrica che fluisce in un conduttore, essendo costituita da elettroni, all'atto di diminuire costantemente il suo valore di portata (chiamata intensità di corrente), al limite sarà rappresentata da un elettrone per volta, e quindi da uno specifico valore di corrente al di sotto del quale è impossibile andare. Si può quindi dire che la corrente elettrica non potrà mai essere più piccola di un multiplo di **1.602 10<sup>-19</sup> ampere** (la carica elettrica unitaria dell'elettrone). Un valore così piccolo non è assolutamente apprezzabile dagli apparecchi di misura più comuni, per questa ragione il senso pratico porta a considerare trascurabile la granulosità intrinseca della corrente elettrica, definendo continuo il flusso di quest'ultima.

Queste congetture hanno il sapore di una semplice e gratuita filosofia ma le sorprese non finiscono qui, anche l'energia è fornita o sottratta ad un sistema fisico con piccoli campioni per volta. Fu Max Planck che, all'inizio del secolo scorso, decretò la nascita della fisica quantistica partendo proprio da questo concetto.

Le vicissitudini che portarono l'esimio scienziato alla formulazione analitica, che si vedrà tra breve, erano legate al problema matematico del corpo nero, studiato alcuni anni prima da Wilhelm Wien. Una radiazione elettromagnetica, per esempio la luce, trasporta un certo quantitativo di energia. Questa energia è a sua volta legata alla frequenza del segnale tramite una costante di proporzionalità definita costante di Planck.

$$E = h \nu \quad E/\nu = h \quad h = 6.62617636 \cdot 10^{-34} \text{ joule s} \\ (2.0B)$$

La costante assumeva, secondo i calcoli dello stesso Planck, il valore di  $6.610 \cdot 10^{-34}$  joule per secondo, (oggi è considerata uguale a:  $6.62617636 \cdot 10^{-34}$  j sec) ed era definita come il rapporto costante fra l'energia della radiazione e la frequenza  $\nu$  posseduta da quest'ultima. Questo voleva dire che radiazioni elettromagnetiche (per esempio luce) a frequenza molto alte, trasportavano una grande quantità di energia, radiazioni elettromagnetiche a frequenza bassa

erano invece provviste di un minore livello di energia. I fotoni della radiazione luminosa di colore rosso, posseggono infatti energia pari a circa 1.1 eV, e si propagano con una frequenza piccola, mentre i fotoni della radiazione luminosa di colore violetto assumono un'energia pari a circa 3.3 eV e si propagano con una frequenza più elevata. In ogni caso il più piccolo granello di energia assumibile come riferimento, non poteva essere minore del numero espresso dalla costante di Planck. In base a queste considerazioni Einstein trasse un grande aiuto nel formulare la sua teoria sull'effetto fotoelettrico che gli permise di avere nel 1921 il premio Nobel per la fisica.

Ma gli aspetti sconcertanti di questa nuova teoria sono ben lontani dall'essere terminati. Nel 1923 il francese **Louis De Broglie** in seguito agli studi sulla duplice natura della luce (corpuscolare o ondulatoria), suppose l'esistenza di una relazione matematica che legava la lunghezza d'onda alla quantità di moto di una particella.

In base a questa famosa espressione, (vedi formula n. 3.0B) oggi possiamo ritenere quasi conclusa la diatriba che, all'inizio del novecento, vedeva ancora divisi i fisici che ritenevano la luce un fenomeno corpuscolare, da quelli che volevano interpretare il fenomeno come un'emissione ondulatoria.

$$\lambda = \frac{h}{mu} \quad (3.0B)$$

Tale concetto fu esteso a qualsiasi corpo materiale, microscopico o macroscopico, visto come una duplice identità. Esso infatti si presenta sia come sostanza solida, cioè materiale, che come onda. La formula n. 3.0B mostra infatti la dipendenza di un fenomeno ondoso ( $\lambda$  = lunghezza d'onda) dalla massa **m** del corpo e dalla sua velocità **u**, tutto legato dalla nota costante **h** definita precedentemente.

Il termine "duplice identità" è però fuorviante della vera natura fisica della materia ed è stato utilizzato per legare il concetto particolarmente insolito che si stanno analizzando. Deve essere la capacità astrattiva del lettore a carpire il significato straordinario di questa interpretazione matematica. Di solito si è abituati a comprendere i fenomeni della natura assoggettandoli ai nostri sensi, che come si definirà alla fine di questo capitolo, sono estremamente limitati.

Si provi a pensare, per esempio, al concetto di corpo solido. Questo concetto è tutto racchiuso nella nostra capacità di vedere e toccare il corpo. Ma cosa si intende quando si guarda o si tocca un oggetto? Per quanto riguarda la capacità di vedere l'oggetto, possiamo sicuramente escludere l'attendibilità di questo apprezzamento atto a formulare un giudizio di solidità del corpo. Vedere un corpo è una sensazione a livello celebrale, che si attua tramite la funzione degli occhi, che trattano una radiazione elettromagnetica diffusa o riflessa da quello specifico corpo. La modalità con cui avviene questo fenomeno (che risulta sufficientemente approfondita nel modulo "L'occhio e la visione") non sono tali da giustificare una valutazione di solidità. Si supponga allora di toccare il corpo con le nostre dita, per esempio si tocchi una biglia di vetro. In realtà sotto certi aspetti, per quanto riguarda questo specifico caso, non si tocca mai il corpo. Se si avvicinano le dita alla biglia di vetro ci sarà ad un certo punto una interazione di campi di forza elettrici fra alcune molecole che costituiscono

la periferia delle cellule della nostra pelle ed alcune molecole della biglia di vetro. Si potrebbe supporre per esempio ad un' interazione di tipo repulsivo fra i campi di forza sprigionati dagli elettroni periferici di un atomo di carbonio della pelle, e quelli generati dagli elettroni periferici di un atomo di silicio del vetro della biglia. Come risposta a questa repulsione, alcune cellule della pelle subiscono una compressione e uno specifico recettore tattile produce un segnale nervoso che verrà opportunamente decodificato come corpo rigido. Questo fatto porta ad ammettere che, un vero contatto di materia, per lo meno avente il significato che i nostri sensi intendono, non c'è mai stato fra le dita e la pallina. Abbiamo avuto con il corpo solo una semplice interferenza elettromagnetica. La solidità di un corpo è un concetto sfuggente e per certi versi di tipo "virtuale".

Il senso comune porta a raffigurare il concetto di corpo solido come un oggetto impenetrabile occupante uno spazio ben delimitato. Questa interpretazione, dettata dalla nostra capacità tattile e visiva nel mondo macroscopico, risulta non corretta se si considerano corpi estremamente piccoli e dotati di certe quantità di moto. In questi ultimi casi infatti la materia mostrerà più frequentemente il suo aspetto ondulatorio e, per questa ragione, sarà difficilmente determinabile la posizione o la quantità di moto di un corpo che si propaga come un'onda.

I corpi macroscopici presentano sicuramente il loro aspetto ondulatorio, ma questa caratteristica viene mascherata dalla lunghezza d'onda enormemente bassa che li distingue (vedi formula n. 30B), vista la quantità della loro massa. Allo stesso modo, per mezzo della relazione di De Broglie, particelle e onde possono essere considerate materia ma, l'aspetto consistente del corpo, verrebbe misurato solo per fenomeni dotati di una lunghezza d'onda estremamente piccola, o ciò che è lo stesso, per frequenze elevatissime.

Ma sarà poi vero tutto questo? In realtà "io" credo molto umilmente che all'interno delle particelle esistano dei meccanismi molto complessi che non si sono ancora ben compresi. Pertanto, il modello quantistico, oggi giorno in così esaltante ascesa, è in auge solo perché, per ora, è l'unico modello che permette di inquadrare la situazione. Ma prima di arrivare a delle conclusioni che hanno il sapore di pura speculazione filosofica, procediamo con ordine e continuiamo a percorrere la strada dell'autorevolezza.

Facciamo un esempio con le onde acustiche, per spiegare meglio la formula di De Broglie. Come è noto un'onda acustica è una vibrazione meccanica che si produce in un mezzo materiale, sottoposto a oscillazioni. Quando questo fenomeno avviene in un mezzo aeriforme, le oscillazioni possono essere distinte come aree ad alta e a bassa densità del gas. Queste oscillazioni si propagano lungo il fronte d'onda.

Una formula valida per propagazione del suono in corpi di natura solida è la seguente:

$$u = \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \quad (4.0B)$$

Il termine "E" in questo caso, rappresenta il modulo di elasticità del materiale in cui il suono si propaga e il termine  $\sigma$  rappresenta la densità di questo materiale.

A questo punto si esegua un esperimento: si colpisca energicamente con un corpo solido, per esempio un martello, una parete rigida di ferro, fornendo ad essa un colpo secco, un impulso. Viene prodotto un suono; quest'ultimo si propaga con le leggi della propagazione sonora lungo la superficie della parete con velocità regolata dall'espressione n. 4.0B. In fisica dello stato solido è ancora possibile introdurre il concetto di quantizzazione sonora. Il quanto sonoro è chiamato **fonone**. Si provi ad immaginare, nel precedente esperimento di aver creato un fonone nel momento in cui è stato prodotto l'impulso di energia sonora con il colpo di martello. Si vuole adesso calcolare la massa di questa ipotetica particella del campo sonoro (il lettore mi scuserà per l'assurda pretesa volta unicamente a raggiungere uno scopo concettuale). Si adoperi per tale ragione la nota formula di De Broglie n. 3.0B. È necessario semplificare il problema cercando di ridurre ad un suono semplice monofrequenziale l'impulso sonoro che in realtà è costituito da uno spettro di frequenze piuttosto estese. È ragionevole supporre che, il suono complesso prodotto, sia costituito da un armonico fondamentale di 100 hertz (questo per definire una lunghezza d'onda di lavoro pari a 50 metri). Poiché si è scelto il ferro per la parete utilizzata come mezzo di propagazione, applicando la formula n. 4.0B si ottiene una velocità di 5000 metri al secondo relativamente alle onde sonore. Utilizzando quindi la formula n. 3.0B otteniamo:

$$m = \frac{h}{\lambda \cdot u} = \frac{6.626 \cdot 10^{-34}}{50 \cdot 5000} = 2.65 \cdot 10^{-39}$$

Ricordando che un elettrone ha una massa di  $9.11 \cdot 10^{-31}$  Kg, si può ritenere che l'ipotetico fonone sia una particella con una massa 343 milioni di volte più piccola dell'elettrone. Una particella così piccola risulterebbe difficilmente individuabile, ed è per questa ragione che si preferisce trattare il fenomeno in termini di propagazione ondosa evitando assolutamente, in questo caso, l'introduzione di ipotetiche particelle di scambio. Il lettore comprenderà che è stato esaminato di proposito un caso estremo in cui l'assunzione corpuscolo-onda-fonone è impercettibile, ma altri fenomeni fisici ondulatori come la luce, presentano una maggiore affinità al concetto di particella e, contemporaneamente, al concetto di onda.

L'esempio precedente ha cercato di indurre nel pensiero una nuova realtà fisica, quella delle particelle-onda, e la presenza della costante di Planck al numeratore della formula di De Broglie determina il fenomeno della propagazione ondosa solo se vengono rispettate alcune caratteristiche tipiche dei sistemi microscopici. L'elettrone quindi, grazie alla sua piccola massa, è il candidato principale per essere considerato come un particella-onda. Questa affermazione porta ad affrontare diversamente la meccanica di propagazione della corrente elettrica nei conduttori. Infatti, come si è visto nell'allegato del modulo "La corrente elettrica", si è parlato, se pur brevemente, di propagazione di un fronte d'onda nell'ambito della corrente di elettroni che attraversa un conduttore.

Ci sono un disparato numero di esempi presenti nella realtà fisica che portano a ritenere che quello che si sta dicendo a proposito dell'elettrone-onda sia effettivamente possibile. Basti pensare al microscopio elettronico,

all'oscillografo a raggi catodici, al televisore, ecc. Questi dispositivi sono in grado di utilizzare pienamente l'effetto onda di un elettrone costringendolo a subire deflessioni, aggiustamenti e diffusioni tipiche delle radiazioni luminose e quindi rispettando pienamente alcune leggi dell'ottica, normalmente applicabili per la propagazione della luce.

Ad esempio nei microscopi elettronici, il fascio di elettroni, accelerato dalla tensione anodica, si comporta come un'onda avente lunghezza definita dalla formula pratica seguente:

$$\lambda(10^{-10} m) = \frac{12.3}{\sqrt{V_a}} \quad (5.0B)$$

Dove  $V_a$  è la tensione fornita all'elettrodo anodico. Tuttavia ci sono sempre alcuni esperimenti, in cui l'elettrone può mostrare il suo aspetto corpuscolare: questo dipende semplicemente dal fatto che le condizioni sperimentali favoriscono questo tipo di rilevazione. La figura n.1.0B seguente mostra, con un elevato sforzo immaginativo, una rappresentazione che permette di considerare contemporaneamente l'aspetto ondulatorio e l'aspetto corpuscolare di una particella. Mi rendo perfettamente conto che questo mio tentativo di rappresentazione potrebbe nuocere al modello mentale quantistico, invece di migliorarne la sua comprensione. Tuttavia, questa figura è una di quelle che ha influito maggiormente nella comprensione di questi concetti durante i miei anni di studio.

La formula matematica riportata in figura, riproduce la funzione di pacchetto d'onda rappresentato sulla destra, un po' simile nell'aspetto al pacchetto d'onda raffigurato in alto, che vuole sforzarsi di far vedere una particella e contemporaneamente la sua lunghezza d'onda.

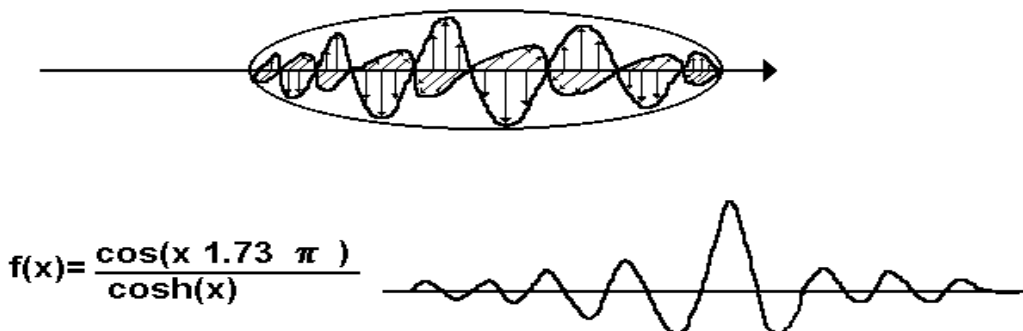


Fig 1.0B - Rappresentazione di un pacchetto d'onde -

## La nuova visione atomica

Dal momento che l'elettrone può essere considerato più una propagazione ondosa che un corpuscolo materiale, la struttura atomica assume una visione più completa. Il modello dell'elettrone orbitale, intuito da **Rutherford** all'inizio del secolo scorso, si trasforma nel modello quantomeccanico, sicuramente più rispondente alle esigenze attuali della fisica dell'atomo.

Furono Bohr, Sommerfeld e Schroedinger che trasformarono completamente la visione atomica illustrata dai loro predecessori, contribuendo all'applicazione di un modello tuttora usato dai fisici contemporanei.

L'elettrone era visto come un'onda di probabilità che orbitava intorno al nucleo su orbite sia circolari che ellittiche. La distanza delle varie orbite era stabilita da precise indicazioni matematiche, dovute alla capacità di un elettrone di orbitare come pacchetto d'onda su un preciso stato stazionario.

In poche parole un elettrone non può orbitare su livelli qualsiasi, ma solo su orbite precise, in modo che la circonferenza di queste deve essere un multiplo della lunghezza d'onda che compete all'elettrone.

Se il lettore ha dimestichezza con i problemi della propagazione della radiofrequenza, sa che le antenne devono avere lunghezze determinate dalla frequenza del segnale utilizzato. Tutte le volte che si sintonizza un apparecchio radio, si adatta continuamente, tramite un organo elettronico particolare, un circuito presente all'interno della radio. In questo modo si consente al circuito di entrare in risonanza soltanto con la specifica lunghezza d'onda selezionata. Allo stesso modo una corda di chitarra, o un diapason entra in oscillazione soltanto con una ben precisa frequenza.

La figura n.2.0B mostra un contenitore nel quale è presente un liquido soggetto a oscillazioni stazionarie; l'immagine vuole dare una visione di quello che potrebbe essere un elettrone che orbita intorno ad un nucleo atomico.

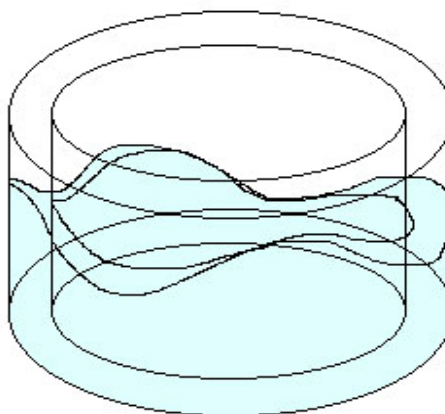


Fig. 2.0B - Oscillazioni stazionarie dell'acqua -

Da queste ultime considerazioni, appare chiaro che la visione di un elettrone rappresentato da una piccola sfera che ruota frettolosamente su un'orbita che attornia il nucleo dell'atomo che lo ospita, non risulta confacente a quello che sembra essere la realtà. Per questa ragione Bohr immaginò l'atomo così come è stato rappresentato nella figura n. 3.0B. In questa immagine si possono

osservare gli stati stazionari previsti dalla teoria di Bohr, essi hanno una circonferenza esattamente pari a multipli della lunghezza d'onda dell'elettrone.

Il livello, definito "**stato quantico n=1**", risulta essere il primo che si incontra partendo dal nucleo, quindi di lunghezza pari esattamente a una lunghezza d'onda ( $\lambda$ ).

Successivamente gli altri livelli si organizzano via via con multipli sempre maggiori della lunghezza d'onda dell'elettrone.

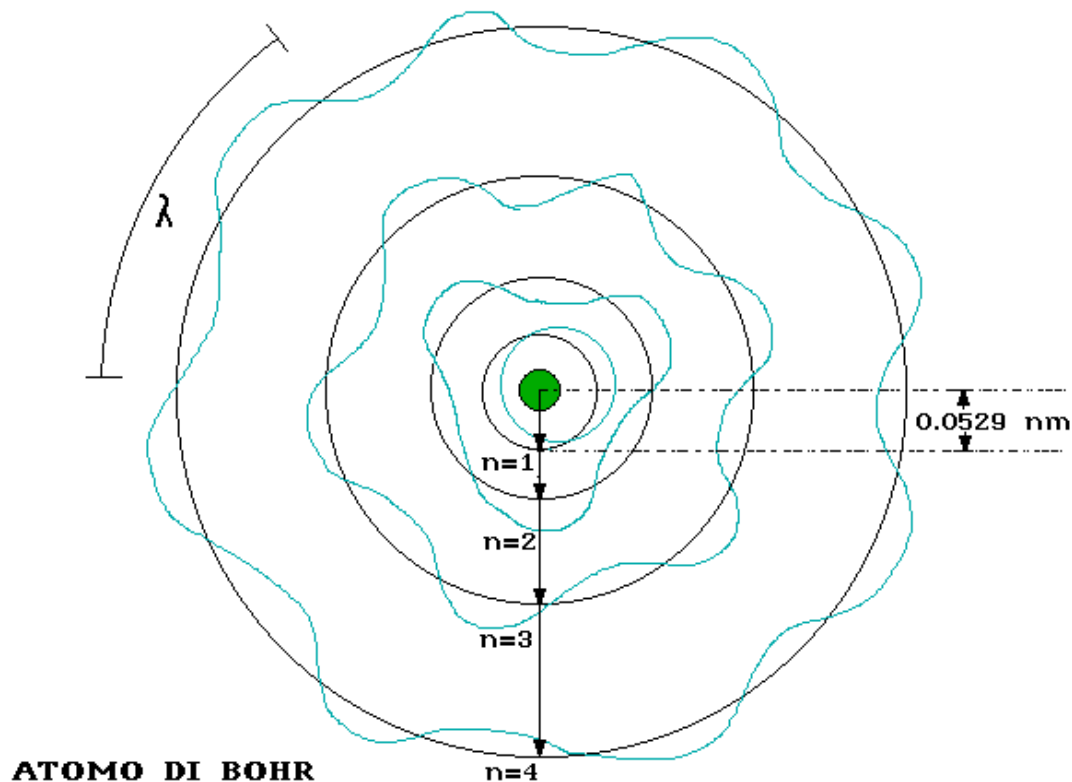


Fig n. 3.0B

L'elettrone viene quindi immaginato come un'onda di energia che occupa uno stato stazionario localizzato ad una precisa distanza dal nucleo. In queste condizioni si può scrivere:

$$\lambda n = 2 \pi r \quad (6.0B)$$

Dove "r" è il raggio dell'orbita ed "n" è lo stato quantico relativo. È semplicissimo a questo punto considerare che:

$$\lambda = (2 \pi r)/n \quad (7.0B)$$

Uguagliando l'equazione n. 7.0B con l'equazione n. 3.0B di De Broglie, si può scrivere:



$$\frac{2 \cdot \pi \cdot r}{n} = \frac{h}{m \cdot u} \quad (8.0B)$$

Con semplici passaggi matematici l'equazione (8.0B) può essere trasformata come segue:

$$m \cdot u \cdot r = \frac{h}{2 \cdot \pi} \cdot n \quad (9.0B)$$

Ma il termine al primo membro dell'equazione appena scritta risulta essere il momento della quantità di moto dell'elettrone sull'orbita e non è difficile osservare che questo termine può essere espresso in quantità pari a  $h/(2 \pi)$  moltiplicato il numero quantico "n". Questa semplificazione matematica quantizza il valore del momento della quantità di moto dell'elettrone per ogni suo stato quantico e l'espressione si riduce ad un termine che comprende la costante di Planck divisa per due e per il numero fisso pigreco. I fisici sono soliti chiamare il termine  $h/2 \pi$  "acca tagliato".

## Il principio di indeterminazione

Tutte le volte che si osserva un corpo, significa che gli occhi ricevono le onde luminose riflesse da quest'ultimo. In questo modo si possono decodificare le forme, i contrasti, i colori e avere anche informazioni circa il volume del corpo. Le onde luminose sono radiazioni di natura elettromagnetica e, per quanto detto precedentemente a proposito della complementarità onda-materia, possono essere considerate anche come dei corpuscoli. A queste particelle viene dato il nome di **fotoni**. **Richard P. Feynman** addirittura era solito interpretare l'emissioni luminose come una corrente di particelle o una pioggia di fotoni. *L'occhio umano è uno strumento molto sensibile (come diceva egli stesso) e bastano cinque o sei fotoni per attivarlo e permetterci di effettuare una visione. Se l'evoluzione ci avesse portato ad avere una sensibilità visiva dieci volte maggiore dell'attuale, percepiremmo la luce molto fioca di un dato colore come una serie di lampi intermittenti, tutti della stessa intensità. Un'eventualità del genere ci avrebbe consentito immediatamente di cogliere l'aspetto corpuscolare della radiazione luminosa.*

In ogni caso si può sicuramente affermare che per osservare un oggetto è necessario colpirlo con dei fotoni e poi analizzare tramite la vista quelli che vengono riflessi. L'asserzione "colpirlo con dei fotoni" è normalmente intesa nella pratica abituale col significato di illuminare il corpo.

In effetti, estendendo questo concetto, si diviene certi di poter dire che qualsiasi fenomeno fisico osservabile (e con questo termine si intende definire qualsiasi criterio di misurazione in grado di fornire informazioni circa lo stato fisico dell'oggetto) viene caratterizzato dalla risposta dell'oggetto ad un certo numero di segnali prodotti e inviati verso di esso.

Il pipistrello, il tursiope, inviando verso la preda delle onde acustiche ad alta frequenza ed analizzandone gli echi di ritorno, sono in grado di stabilirne la posizione. Il radar è in grado di stabilire alcune informazioni, relativamente agli obiettivi rilevati, grazie all'analisi di un'eco di ritorno che, in questo caso, è

costituito da microonde. In un microscopio elettronico si invia un fascio di elettroni onda verso un campione e si analizza, per mezzo di uno schermo, l'interazione ottica prodottasi, raccogliendo preziose informazioni circa la struttura di alcune cellule, altrimenti invisibili con i consueti metodi ottici.

In tutti questi esempi è lecito trascurare la reazione dell'oggetto investito dai segnali di indagine, ma se ci si sposta nel mondo dell'infinitamente piccolo, questa concessione non è più valida.

Un fotone infatti è costituito da una certa energia secondo quanto mostrato dalla relazione di Planck (vedi formula 2.0B). I fotoni che cadono nello spettro del visibile, cioè la luce che giunge anche in questo momento nei nostri occhi, sono caratterizzati da un'energia di alcuni elettron-volt. Questa energia è sufficiente per impressionare le pellicole fotografiche, per attivare la clorofilla che a sua volta è in grado di sintetizzare glucosio all'interno delle cellule vegetali, per alterare alcuni composti chimici, per produrre conduzione in alcuni materiali e per di più basti pensare alla trasformazione diretta in energia elettrica prodotta tramite la luce solare dalle batterie fotovoltaiche.

A questo punto non ci si deve meravigliare se lo stato fisico di una piccola particella subisce una modificazione, appena si prova ad illuminarla con un raggio di luce.

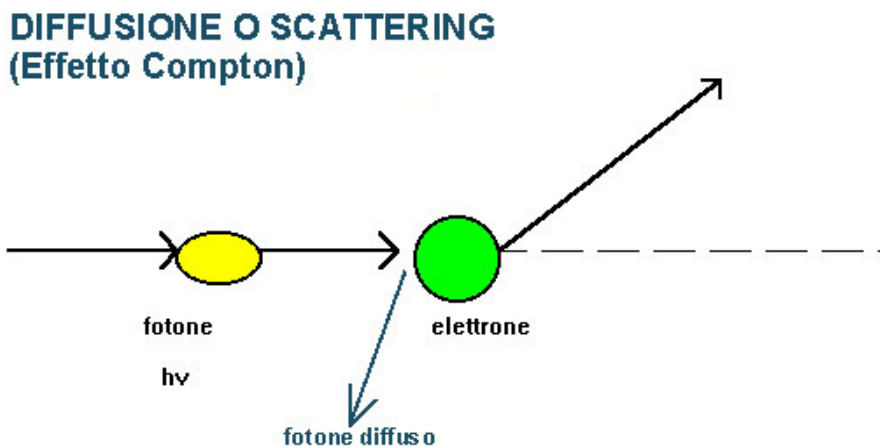


Fig n. 4.0B

Addirittura, se si volesse illuminare un elettrone, per osservarlo in un ipotetico e paradossale microscopio, quest'ultimo schizzerebbe via a grande velocità non appena si accende la lampada dello strumento illuminatore. Il fotone è in fondo una particella che condivide aspetti legati al campo di forze dell'elettrone col quale infatti, ha delle importanti interazioni.

A questo punto si potrebbe immaginare l'evento come un urto elastico che avviene fra due particelle. Questo fatto è stato ampiamente studiato da Compton e l'effetto, chiamato diffusione o scattering è conosciuto anche con il termine " effetto Compton "

Una mente sveglia potrebbe pensare di utilizzare qualcosa di diverso da un fotone per ottenere informazioni circa la posizione dell'elettrone, ma cosa si potrebbe utilizzare? Non potendo addentrarci in problemi di fisica atomica si potrebbe rispondere che, per adesso, le uniche particelle utilizzabili sono tutte in grado di alterare la posizione del piccolo elettrone.

Il fatto curioso è che tutte le particelle elementari si trovano nelle condizioni dell'elettrone. È come se la natura volesse nasconderci le forme, le sembianze, i toni, la struttura del suo meraviglioso mondo microscopico... ma, esistono forme e toni? Esistono strutture materiali da osservare? Probabilmente queste frasi non hanno alcun significato per quello che si è detto all'inizio di questo capitolo. Le forme, i toni, le strutture e certamente i colori sono sensazioni umane che non hanno alcun riscontro nella natura microscopica della materia.

Questa insolita caratteristica della materia, che mostra la sua fuggevolezza all'osservazione e quindi alla determinazione della sua posizione, è stata studiata da **Werner Heisenberg** che, nel 1927, formulò la sua teoria dell'indeterminazione, lavoro che gli conferì più tardi il premio Nobel per la fisica. Analizzando un esempio dello stesso Heisenberg si può vedere di che cosa si tratta.

Si supponga di volere osservare, con un ipotetico microscopio a elevata risoluzione, un elettrone. Come è noto, la risoluzione di un sistema ottico utilizzabile per l'osservazione di sistemi microscopici, dipende quasi esclusivamente dalla lunghezza d'onda della sorgente utilizzata. In poche parole, le leggi dell'ottica obbligano a usare una radiazione per l'illuminazione del soggetto, dotata di una lunghezza d'onda molto più piccola della dimensione del più piccolo particolare contenuto nel soggetto che si vuole risolvere. Altrimenti, in caso contrario, non si riuscirebbero a risolvere questi dettagli.

Per osservare elettroni, che sono corpuscoli piccolissimi, occorrono radiazioni con lunghezza d'onda molto piccola. Per questa ragione, ricordando la relazione di Planck, si può pensare di utilizzare fotoni ad elevata energia. Questi fotoni dotati di frequenze che si estendono oltre i 30 EHz ( $1 \text{ EHz} = 10^{18} \text{ Hz}$ ) sono chiamati quanti "gamma".

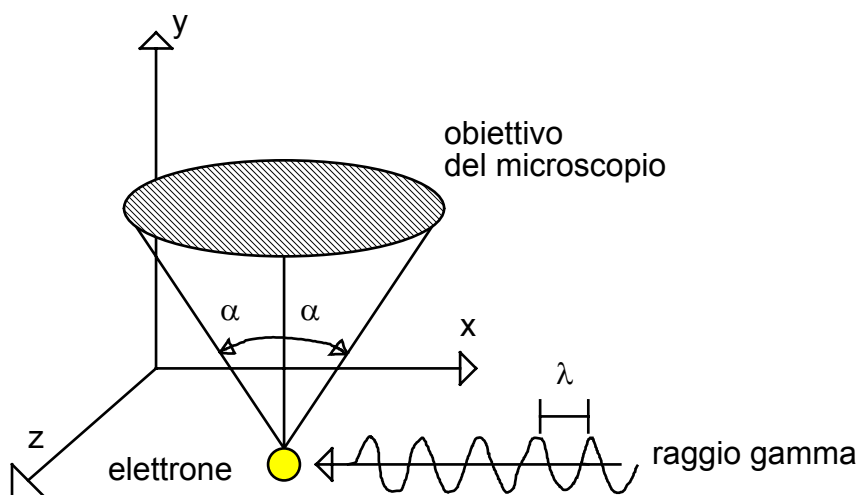


Fig. 5.0B

La figura mostra come può essere rappresentata questa apparecchiatura sperimentale. L'elettrone, supposto centrale all'obiettivo del microscopio, vede

la lente con un cono di apertura  $2\alpha$  e viene illuminato con un raggio gamma, proveniente dalla sua destra, di lunghezza d'onda  $\lambda$ .

Secondo i principi dell'ottica ondulatoria, il microscopio potrà risolvere oggetti fino ad una dimensione  $\Delta x$  che dipende dalla lunghezza d'onda del fotone gamma e dall'angolo di apertura  $\alpha$ , la formula seguente definisce quanto detto.

$$\Delta x = \lambda / (2 \sin(\alpha)) \quad (10.0B)$$

Non appena la luce viene riflessa nell'obiettivo del microscopio, l'elettrone si sposta sulla sinistra (effetto Compton). La quantità di moto totale del sistema, costituito dall'elettrone e dal quanto gamma, deve essere conservata, quindi si può scrivere.

$$P_t = P_x + P_\gamma \quad (11.0B)$$

Indicando con  $P_t$  la quantità di moto del sistema, con  $P_x$  la quantità di moto dell'elettrone nella direzione  $x$  e con  $P_\gamma$  la quantità di moto del fotone gamma diffuso. Il raggio gamma, dopo l'urto, potrebbe essere diffuso in qualsiasi angolo entro il cono  $2\alpha$ . Valutando i due casi limite, nei quali consideriamo il fotone diffuso o sul bordo destro della lente o su quello sinistro si può scrivere:

$$P_{x'} + (h/\lambda') \sin(\alpha) \quad P_{x''} + (h/\lambda'') \sin(\alpha) \quad (12.0B)$$

In questo caso  $\lambda'$  indicherà la lunghezza d'onda del fotone gamma diffuso su di una estremità,  $\lambda''$  quella del fotone gamma diffuso sull'altra.

In entrambi i casi la componente secondo l'asse  $x$  della quantità di moto finale deve essere uguale a quella iniziale per cui :

$$P_{x'} + (h/\lambda') \sin(\alpha) = P_{x''} + (h/\lambda'') \sin(\alpha) \quad (13.0B)$$

Se si suppone un angolo  $\alpha$  sufficientemente piccolo si può scrivere:

$$\lambda' = \lambda'' = \lambda$$

per cui:

$$P_{x''} - P_{x'} = \Delta P_x = (2 h/\lambda) \sin(\alpha) \quad (14.0B)$$

la formula n. 14.0B potrà essere trascritta con semplici passaggi in:

$$\Delta P_x = \frac{h}{\lambda} \quad (15.0B)$$

$$2 \cdot \sin(\alpha)$$

osservando infine la formula n. 10.0B si può sostituire e scrivere:

$$\Delta P_x = h / \Delta x \quad (16.0B)$$

scritta più correttamente nella forma:

$$\Delta P_x \Delta x = h \quad (17.0B)$$

La formula n. 17.0B approssima molto bene la relazione di indeterminazione di Heisenberg. Osservando quest'ultima equazione si possono trarre queste considerazioni: se per una particella microscopica, grazie ad una misurazione, si ottiene un  $\Delta P_x$  molto piccolo (il che significa che si conosce la sua quantità di moto e quindi la sua velocità con discreta precisione), ne risulta un  $\Delta x$  molto grande (il che significa che non si conosce  $x$  con precisione).

È abbastanza ovvio che il ragionamento inverso porta alle stesse conclusioni. Quindi in un sistema non si potrà mai sapere contemporaneamente la posizione e la velocità di una particella con una precisione superiore ad  $h$ .

Poiché  $h$  è un numero molto piccolo, nei fenomeni macroscopici l'errore di indeterminazione è assolutamente trascurabile. Nel mondo dell'infinitamente piccolo invece l'errore non può essere trascurato e quindi il moto di una particella, come l'elettrone, non può essere studiato con la meccanica classica ma solo con la meccanica quantistica.

Alcuni esperimenti di fisica atomica, come per esempio l'osservazione della traccia di alcune particelle in una camera a nebbia, mostrano con discreta precisione la quantità di moto della particella, ma non permettono di determinare la sua posizione. Altre osservazioni invece permettono di localizzare con più precisione la particella (per esempio emulsioni fotografiche) ma non permettono di avere informazioni riguardo la velocità di quest'ultima.

Il principio di indeterminazione è una diretta conseguenza del comportamento ondulatorio della materia. Se una particella si comporta come un'onda, risulta difficile determinare la sua posizione. Quando invece questa mostra il suo aspetto corpuscolare, si possono più facilmente avere informazioni sulla sua posizione.

La scelta, fra l'una o l'altra possibilità, dipenderà solo dalla tecnica di rilevazione utilizzata dall'esperimento.

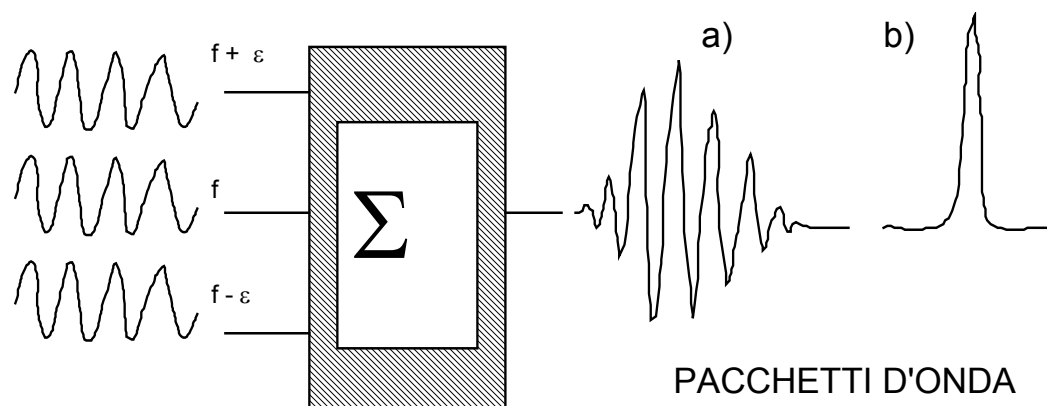


Fig. 6.0B

Si vuole ora presentare al lettore un'altro ragionamento applicato ad un'altro fenomeno, che permette di interpretare il principio di indeterminazione. Questa volta l'esperimento non è ideale, ma perfettamente riproducibile. Si supponga di possedere un circuito elettronico che effettua la somma di un certo numero di segnali forniti ai suoi canali di ingresso. Vedi figura 6.0B. Si parta da un segnale sinusoidale di frequenza "f" e si sommino a questo segnale due bande di segnali tutti sinusoidali, di uguale ampiezza e di frequenza leggermente diversa. In pratica la prima banda dei segnali deve avere una frequenza leggermente minore "f" e l'altra banda, appena superiore a "f". Se si utilizzano un numero sufficientemente grande di segnali, sia appartenenti alla gamma di frequenza appena superiore a "f" e sia a quella appena inferiore a questa stessa frequenza "f", si ottiene un pacchetto d'onde come quello illustrato nella figura n.6.0B (parte a). Questo in pratica significa che, applicando un apparecchio elettronico visualizzatore di segnali nel dominio del tempo, come per esempio un oscilloscopio, si osserveranno appunto quel tipo di forma d'onda. Continuando ad espandere la gamma di frequenze utilizzate, portando cioè il numero degli ingressi ad un valore molto grande, si ottiene un pacchetto d'onde molto simile a quello visualizzato dalla figura n.6.0B (parte b). Solo fornendo un numero infinito di frequenze in ingresso si otterrà un impulso estremamente stretto chiamato impulso di **Dirac**.

In termini matematici, indicando con  $\Delta\nu$  la larghezza della banda di frequenza e con  $\Delta t$  la durata dell'impulso si può scrivere:

$$\Delta\nu \Delta t = 1/(4 \pi) \quad (18.0B)$$

questa relazione esprime il comportamento del segnale in uscita appena analizzato, infatti occorre una gamma elevata di frequenze per costruire un pacchetto d'onda più stretto. Se si sostituisce al termine  $\nu$  il rapporto  $E/h$ , come illustra la relazione di Planck, la formula 18.0B potrà essere scritta come:

$$\Delta E \Delta t = h/(4 \pi) \quad (19.0B)$$

che può essere considerata ancora una legge matematica relativa al principio di indeterminazione. Il dispositivo sommatore visto nell'esperimento precedente, espleta una funzione conosciuta nel mondo elettronico come antitrasformazione di Fourier, che non è altro che l'inverso della nota operazione matematica denominata "sviluppo in serie di Fourier" applicata a segnali di tipo elettronico. Tramite questo procedimento un gruppo di segnali esistenti nel dominio della frequenza può essere trasformato in un segnale nel dominio del tempo.

È anche possibile operare in modo opposto, in questo caso si opera un normale sviluppo in serie. Ciò significa che un segnale visto nel dominio del tempo può essere ricondotto al dominio della frequenza ed essere osservato nelle sue frequenze costituenti. Vedi fig. 7.0B

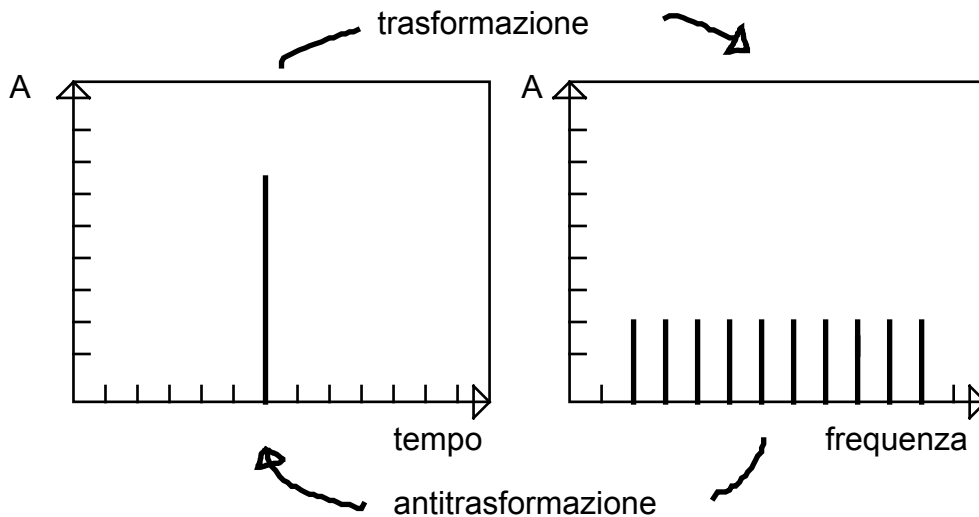


Fig. 7.0B

La figura n.7.0B mostra nel primo riquadro l'impulso di breve durata visto nel dominio del tempo mentre il secondo riquadro mostra un certo numero di frequenze, tutte sinusoidali, chiamate armonici, che costituiscono il segnale stesso. Secondo il teorema di Fourier, qualsiasi segnale non sinusoidale, visto nel suo andamento temporale può essere ricondotto ad una rappresentazione di questo tipo. L'apparecchio elettronico, che esplora un segnale mostrando il suo contenuto frequenziale, si chiama analizzatore di spettro e questo esempio rappresentato è soltanto uno dei moltissimi casi possibili.

Esso è caratteristico poiché ci si trova di fronte ad un caso in cui la trasformazione di un treno di impulsi nel dominio del tempo è rappresentato nel dominio della frequenza da un segnale costituito da una frequenza unica. Viceversa un segnale ad impulso strettissimo può essere rappresentato da un treno di impulsi nel dominio delle frequenze. La figura n.8.0B mostra infatti un caso perfettamente opposto a quello precedente.

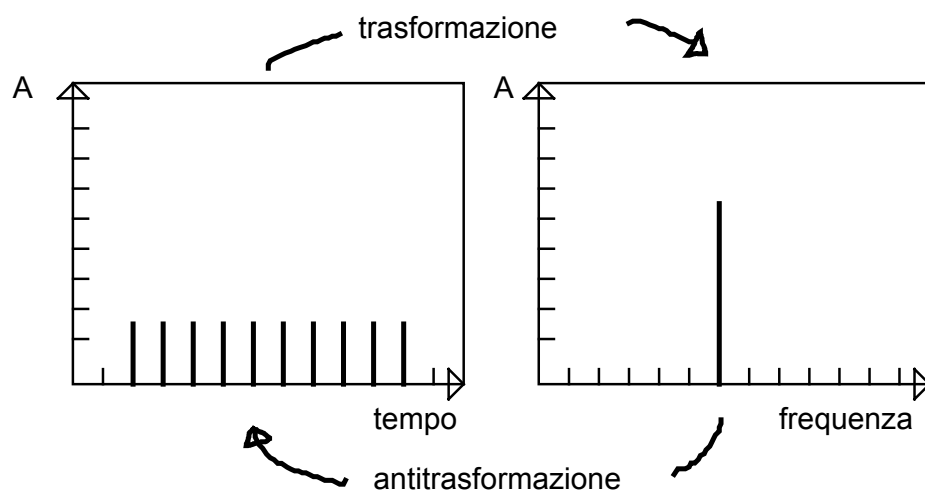


Fig. 8.0B

Da queste ultime considerazioni si può trovare comodo interpretare il principio di indeterminazione come la trasformata di Fourier di una delle grandezze fisiche indeterminabili. In poche parole la quantità di moto di una particella può essere paragonata alla trasformata di Fourier della posizione. La posizione è a sua volta considerata come la trasformata di Fourier della quantità di moto.

Il lettore consideri che anche in questo caso, il mio esempio è solo un'ulteriore tentativo effettuato per facilitare la comprensione di questi concetti ed è stato fornito unicamente per stimolare la vostra mente e farvi pensare. La trasformata di Fourier è un espediente, un mezzo per capire in un modo diverso il principio di indeterminazione. È facile accorgersi però, di un sottile fattore comune nelle leggi della fisica. Queste analogie sono quindi molto importanti per cercare di affrontare i problemi più ostici. Tutte le leggi fisiche sono correlate in maniera logica con sorprendente esattezza. E anche se non è proprio il capitolo opportuno e soprattutto l'argomento giusto per ricordarlo, come qualcuno ha detto; "Dio non gioca a dadi con il mondo".



## APPENDICE C)

### L'equazione d'onda di Schroedinger

Nel 1926 apparve un articolo di un fisico austriaco, Erwin Schroedinger, che formulò un'equazione generale per le onde di De Broglie. L'importante conseguenza di questo lavoro è stata la formulazione di un nuovo modello di rappresentazione dell'atomo. Mentre Bohr e De Broglie mostravano un atomo costituito da orbite definite in modo più o meno precise sulle quali gli elettroni vibravano secondo precise risonanze quantiche, Schroedinger ha invece presentato un atomo completamente rinnovato e in linea con le attuali esigenze scaturite dalla meccanica-quantistica.

Il principio d'indeterminazione, i corpuscoli onda, la quantizzazione di Planck, obbligarono i fisici ad immaginare l'edificio atomico non più come un sistema planetario caratterizzato da precise leggi geometriche appartenenti alla meccanica classica (immagine straordinariamente gradevole ed anche estremamente diffusa) ma come una struttura sorprendentemente meravigliosa, caratterizzata da una rappresentazione probabilistica delle sue funzioni materia-spazio costituenti.

Quando si parla di probabilità e contemporaneamente di rappresentazione, si intende far riferimento appunto ad una visualizzazione statistica di un evento. Un esempio: si supponga di voler sapere dove si trova in questo momento un nostro lontano parente che vive in America. In pratica si vuole conoscere la sua posizione attuale, in particolare, proprio in questo momento. Per risolvere questo problema si devono necessariamente tracciare, su di una cartina particolareggiata degli U.S.A., delle zone dove probabilmente possa essere presente la posizione della persona che si conosce. Si supponga che il nostro amico o parente si trovi a New York e si supponga di conoscere anche il suo indirizzo preciso e di considerare il fuso orario corrispondente in quella località. A questo punto si potrebbe sicuramente affermare che, conoscendo questa persona (per esempio potrebbe essere uno zio), in questa precisa ora del giorno potrebbe essere nel suo ufficio di Trenton. Ma di tale affermazione si è veramente sicuri ? .. In relazione all'età, oppure alle abitudini del nostro parente o ancora alle sue eventuali cagionevoli condizioni di salute o in base ad una circostanza imprevedibile, egli potrebbe essere anche da un'altra parte. Pertanto occorre escogitare un modello di rappresentazione su base statistica all'interno del quale si è sicuri di non sbagliarci. Si può elaborare, per esempio un calcolo che permette di attribuire alla posizione geografica "Trenton" un determinato valore probabilistico diciamo, 80 %. A questo punto non resta che valutare la possibilità che nostro zio possa trovarsi anche da un'altra parte, per esempio per la strada, oppure in un particolare negozio o a casa sua o addirittura sia in viaggio in una località più distante. Nel tracciare la posizione sulla cartina potrà convenire disegnare delle aree sfumate, attribuendo una maggiore intensità di colore per quelle zone dove la probabilità di trovare il nostro parente è più elevata, mentre per le località a basso livello probabilistico, si sfumeranno i settori con una tonalità più chiara.

Fatto questo si ottiene una struttura che ricalca con la sua forma geometrica e il colore la posizione prevista assunta dal nostro parente (vedi fig.

1.0C). Di sicuro questo è l'unico modo per determinare scientificamente l'ubicazione di un sistema "zio", se non si hanno elementi informativi supplementari che consentono di determinare la sua posizione.

Per quanto riguarda la posizione assunta dagli elettroni che orbitano in periferia dell'atomo, ci si trova costretti ad adottare lo stesso procedimento. Per mezzo del principio d'indeterminazione, nonché della teoria ondulatoria Bohr-De Broglie, non si sarà mai in grado di stabilire l'esatta posizione di un elettrone, pertanto conviene considerare il corpuscolo esteso su di un volume di probabilità.



Fig. n.1.0C

Per quanto possa sembrare paradossale, se non vengono fornite esatte informazioni circa la posizione assunta dalle persone che conosciamo e che sono lontane da noi, saremo sempre costretti a determinarle attraverso un diagramma come quello mostrato in figura 1.0C. Qualcuno potrebbe affermare che basterebbe ricevere una telefonata dalla persona, ma come potremo ricevere mai una telefonata da un elettrone? (Scherzosamente un mio amico a questo punto mi disse "basta digitare il numero di Avogadro")

A parte gli scherzi, l'equazione di Schroedinger permette quindi di rappresentare il modello probabilistico dell'atomo moderno. In parole molto semplici si tenga presente che tale lavoro matematico ha permesso di disegnare i contorni esatti delle aree elettroniche e quindi la visualizzazione dell'intero atomo in base ad uno schema un po' simile a quello visto nell'esempio trattato precedentemente a riguardo del nostro parente d'America.

In realtà, il contributo esatto di quello che si ottiene dalle soluzioni di questa equazione, permette di misurare, e quindi di comprendere, le geometrie insite negli orbitali atomici, la meccanica d'interazione degli atomi, nonché la loro influenza quantistica a seconda del livello d'energia posseduto.

La funzione rappresentata dall'equazione di Schroedinger è chiamata dai fisici teorici "Funzione d'onda  $\Psi$ ": vediamone adesso il significato matematico.

La trattazione matematica che seguirà a questo punto illustrerà, in modo estremamente semplice, un certo numero di passaggi analitici che permetteranno di definire l'equazione di Schroedinger. Lo scopo di questo lavoro è mostrare al lettore che con un poco di buona volontà è possibile dimostrare, con delle semplici operazioni analitiche, una delle più importanti equazioni della fisica quantistica.

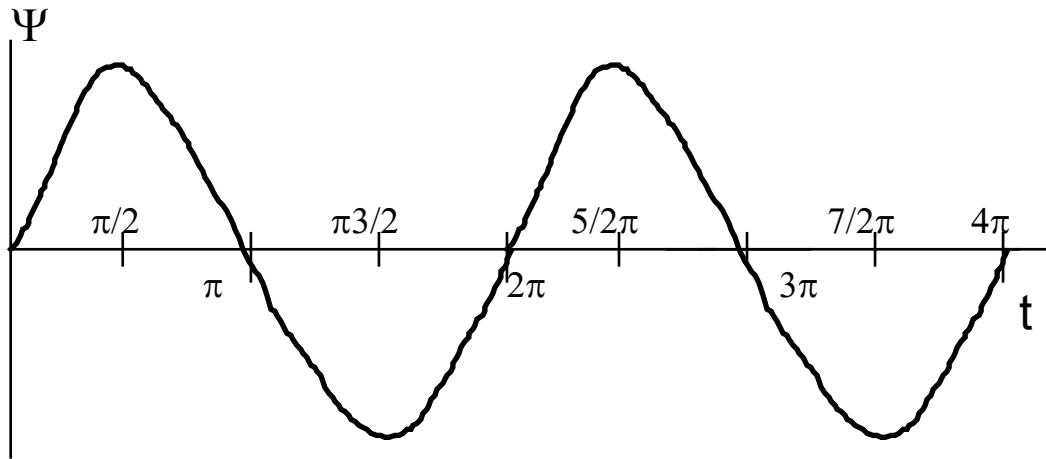


Fig. 2.0C

Si riporta la funzione matematica che esprime un moto ondoso, vedi fig. n. 2.0C. La legge è valida per qualsiasi esempio fisico, ma, è riferita, per comodità fin d'ora, al moto ondoso degli elettroni-onda.

$$Y = A \sin \omega t \quad (1.0C)$$

Come già noto la funzione sinusoidale rappresenta un fenomeno che varia rispetto al tempo "t" con un andamento caratteristico definito appunto sinusoidale. Il termine " $\omega$ " rappresenta la pulsazione, cioè la frequenza dell'oscillazione ed è pari a  $2\pi f$ . Il termine A rappresenta il massimo valore raggiungibile dall'onda, cioè la sua ampiezza.

Si supponga sia "u" la velocità di propagazione lungo la direzione "x". L'onda impiegherà  $x/u$  tempo, per raggiungere una distanza appunto pari a "x". Si può scrivere quindi:

$$Y = A \sin[2 \pi f (t - x/u)] \quad (2.0C)$$

Poiché la velocità di propagazione di un qualsiasi moto ondoso, dipende dal prodotto della sua frequenza per la lunghezza d'onda, cioè  $u = f \lambda$  Si può scrivere:

$$Y = A \sin[2 \pi f (t - x/(f \lambda))] \quad (3.0C)$$

Moltiplicando il termine  $2 \pi f$  per le quantità fra parentesi, semplificando e riscrivendolo sotto forma di pulsazione si ottiene:

$$Y = A \sin (\omega t - (2 \pi x) / \lambda) \quad (4.0C)$$

Tutti questi espedienti, per quanto semplici, sono serviti per esprimere l'equazione d'ampiezza di un'onda, presente in una regione di spazio  $x$ , in relazione alla lunghezza dell'onda stessa. Per quello che si intende tra poco dimostrare non è molto utile considerare l'ampiezza dell'onda elettronica, tra l'altro non si saprebbe che significato attribuirle. In poche parole il lavoro fatto fino ad ora potrà avere un certo significato fisico se si sostituisce il concetto d'ampiezza con il concetto più importante d'**ampiezza di probabilità**.

Non si deve dimenticare che si sta descrivendo matematicamente un'onda elettronica e si sta semplificando il lavoro analitico immaginandolo in una sola direzione dello spazio tridimensionale e, per di più, tutto il ragionamento verte a conferire a quest'onda un significato posizionale per quanto riguarda l'elettrone stesso. Chiedo scusa fin d'ora a quei lettori più esperti che trovano le mie considerazioni troppo scostanti dalla realtà fisico-matematica più rigorosa ma, attraverso parole più comprensibili per la logica del nostro cervello, si vuole dare un quadro iniziale che servirà da base per impostare, nel lettore meno esperto, quei ragionamenti che serviranno alla comprensione di aspetti così lontani dalla portata delle abituali esperienze quotidiane.

Quindi, volendo definire la funzione  $\Psi$  come la probabilità di trovare qualcosa nell'ampiezza d'onda e utilizzando anche la funzione coseno, in modo da avere la possibilità di esprimere un eventuale scostamento di fase del fenomeno, si possono scrivere queste due relazioni:

$$\Psi = A \sin (\omega t - (2 \pi x) / \lambda)$$

$$\Psi = A \cos (\omega t - (2 \pi x) / \lambda) \quad (5.0C)$$

Le funzioni seno e coseno identificano quindi la probabilità di trovare qualcosa, (per esempio un elettrone) in una certa regione di spazio scelta per adesso lungo la direzione " $x$ ". Bisogna però considerare un problema. Il campo di variabilità di una funzione sinusoidale è definito da valori positivi e negativi. Una probabilità negativa non ha un preciso significato fisico (anzi non lo ha affatto), per questa ragione conviene assumere il quadrato dell'ampiezza dell'onda come probabilità. Assumendo il quadrato dell'ampiezza dell'onda spariscono come noto i valori negativi della probabilità.

Gli studenti delle scuole superiori conoscono molto bene i problemi che comportano a volte l'elevazione al quadrato dei numeri negativi. Essi sanno che per dare significato a certe operazioni, la matematica ha esteso il campo dei numeri naturali fino all'ordine dei numeri immaginari. Solo utilizzando quest'ultimi si possono esprimere correttamente le idee che sottendono a questa trattazione e, poiché un numero immaginario è espresso nella forma  $(a + i b)$ , si può esprimere l'ampiezza d'onda o, ancora meglio, il suo quadrato cioè la probabilità effettiva come:

$$\Psi = (a + i b) \quad |\Psi|^2 = (A^2 + B^2) \quad (6.0C)$$

Non resta che combinare insieme un'onda reale con un'onda immaginaria per ottenere un' espressione matematica globale che tiene conto della probabilità, ottenendo quindi:

$$\Psi' = A \cos (\omega t - (2 \pi x)/\lambda) \quad (7.0C)$$

$$\Psi'' = i A \sin (\omega t - (2 \pi x)/\lambda) \quad (8.0C)$$

e quindi:

$$\Psi = A [ \cos (\omega t - (2 \pi x)/\lambda) + i A \sin (\omega t - (2 \pi x)/\lambda) ] \quad (9.0C)$$

Che in base al teorema di Moivre ed esprimendo  $k = (2 \pi)/\lambda$ , può essere scritta in forma esponenziale come:

$$\Psi = A e^{i(\omega t + k x)} \quad (10.0C)$$

oppure anche:

$$\Psi = A e^{i\omega t} e^{ikt} \quad (11.0C)$$

Esprimendo con  $\psi = A e^{ikt}$  che rappresenta la variazione dell'onda nello spazio si ottiene:

$$\Psi = \psi e^{i\omega t} \quad (12.0C)$$

La funzione d'onda risulta quindi espressa da un termine esponenziale che tiene conto del tempo e da un termine anch'esso esponenziale che tiene conto dello spazio.

Ma il lavoro matematico eseguito fino a questo punto non è ancora sufficiente per inquadrare il fenomeno correttamente. Nell'equazione 12.0C non esiste nessun termine che esprime l'energia e per di più ogni matematico non esiterebbe ad ammettere che l'equazione 12.0C è una soluzione particolare e non un'equazione generale.

Fatto questo quindi, per continuare il discorso, occorre rivolgere la nostra attenzione ad un'altra considerazione di carattere fisico che aiuterà a venire a capo di questa faccenda.

Ricordate il piano inclinato, oppure il pendolo semplice o ancora un grave che cade in un campo accelerato ? Come tutti gli studenti ricordano e quindi anche il lettore, certamente, tutti questi fenomeni venivano studiati imponendo una semplice relazione che riguardava l'energia cinetica e l'energia potenziale del sistema che si considerava.

Non è solo un'arcaica abitudine di studio, ma è anche il naturale comportamento dei sistemi fisici che porta a preferire relazioni analitiche che

tengono conto delle variazioni di queste due rappresentazioni dell'energia. Un sistema in evoluzione è sempre caratterizzato da uno stato potenziale e uno stato attivo o vivo, come dicono i fisici. Un sistema può essere sempre studiato tenendo conto delle trasformazioni della sua energia potenziale in energia cinetica.

Cioè, l'energia cinetica, come energia di movimento o di azione, e l'energia potenziale, come energia latente. Non è questo il momento per chiarire questi semplici concetti, che sono già perfettamente assimilati dalla maggior parte dei lettori, li si tenga in ogni caso presenti per completare il quadro analitico che abbiamo iniziato.

In base a quanto si stava trattando poc'anzi, si può definire che, per un certo sistema fisico, e quindi anche per l'elettrone orbitante attorno all'atomo, vale l'equazione seguente che esprime l'energia totale del sistema come la somma della sua energia potenziale più la sua energia cinetica. Si scriverà quindi:

$$E = E_C + E_p \quad (13.0C)$$

Ricordando dalla fisica che l'energia cinetica è uguale a:

$$E_C = m u^2 / 2 \quad (13.0C)$$

e poiché la quantità di moto è espressa da  $P = m u$ , l'energia cinetica potrà essere assunta pari a:

$$E_c = \frac{p^2}{2 \cdot m} \quad (14.0C)$$

Sostituendo il termine  $p$  con il fattore  $h/\lambda$  ricavato dall'equazione di De Broglie n. 3.0B presente nell'appendice B e ricordando che è stato posto  $k = (2 \pi)/\lambda$ , si può scrivere:

$$P = \frac{h \cdot k}{2 \cdot \pi} \quad (15.0C)$$

e ancora utilizzando la formula 14.0C, si avrà:

$$E_c = \frac{h^2 \cdot k^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot m} \quad (16.0C)$$

Ricordando che in molti casi il termine  $h/(2 \pi) = h$  (acca tagliato) si può anche scrivere:

$$E_c = \frac{\hbar^2 \cdot k^2}{2 \cdot m} \quad (17.0C)$$

Dall'equazione n. 16.0C si può estrarre il termine  $k$  che risulta uguale a:

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{h} \cdot \sqrt{2 \cdot m \cdot E_c} \quad (18.0C)$$

utilizzando l'equazione n. 13.0C si può estrarre il termine  $E_c = E - E_p$  e sostituendolo nella n. 18.0C si avrà:

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{h} \cdot \sqrt{2 \cdot m \cdot (E - E_p)} \quad (19.0C)$$

Questo parziale risultato mostra la dipendenza del termine " $k$ " dall'energia potenziale  $E_p$ . A questo punto si riscriva l'equazione estratta precedentemente dalla formula n. 11.0C che rappresenta la funzione d'onda nello spazio:

$$\psi = A e^{(ikt)} \quad (20.0C)$$

e differenziando rispetto a " $x$ ", avremo quindi:

$$\frac{d\psi}{dx} = i \cdot k \cdot A \cdot e^{(ikt)} \quad (21.0C)$$

differenziamo di nuovo per ottenere quindi:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -k^2 \cdot A \cdot e^{(ikt)} = -k^2 \cdot \psi \quad (22.0C)$$

sostituendo  $k^2$ , utilizzando l'equazione n. 19.0C si ottiene:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{8 \cdot \pi^2 \cdot m}{h^2} \cdot (E - E_p) \psi = 0 \quad (23.0C)$$

Quest'ultima formula rappresenta già l'equazione di Schroedinger valida per la propagazione di un'onda elettronica nella direzione " $x$ ". Per validarla nelle condizioni più generali, offerte da tutte le direzioni dello spazio tridimensionale, occorre scrivere anche i termini relativi alle altre direzioni dello spazio:

$$\frac{\delta^2 \psi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \psi}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \psi}{\delta z^2} + \frac{8 \cdot \pi^2 \cdot m}{h^2} \cdot (E - E_{p(x,y,z)}) \psi = 0$$

(24.0C)

Il lettore noterà la necessità di definire l'equazione differenziale sotto forma di derivate parziali. Queste ultime permettono di tenere conto delle variazioni della funzione d'onda calcolate per una dimensione alla volta.

Osservando attentamente l'equazione di Schroedinger il lettore si sarà accorto che si tratta di un'equazione differenziale di secondo ordine. Si è giunti a questo risultato un po' laboriosamente, poiché si è avuta la necessità di eliminare il numero immaginario "i" come si vede nella formula n. 21.0C. Ma gli sforzi compiuti permettono di godere l'efficacia delle equazioni differenziali per descrivere i fenomeni fisici che si stanno studiando.

La natura è contraddistinta da un continuo mutare delle sue forme, i fenomeni si rincorrono in un continuo di variazioni, nessuna grandezza rispetto ad un'altra è mai costante. In alcuni casi, se ci accorgessimo del contrario, vorrà dire che non abbiamo misurato l'evento con la dovuta risoluzione. Gli Induisti sembra vogliano farci osservare che la mitica danza della dea Shiva rappresenta proprio questa incessante vibrazione della materia, un po' come sosteneva Epicuro quando parlava della fluttuazione degli atomi. Soprattutto l'energia è continuamente in trasformazione e questo tra l'altro permette di vivere, di pensare e di essere. Non dobbiamo stupirci allora, se i matematici sono riusciti a studiare un modo per rappresentare le leggi fisiche attraverso operatori che tengono conto delle variazioni. Essi rappresentano un modo veramente efficace per rappresentare i fenomeni naturali con delle relazioni che tengono conto delle variabili e delle loro reciproche variazioni. Le derivate, infatti, sono lo strumento indispensabile per l'analisi dei fenomeni dinamici.

Qualsiasi fenomeno fisico può essere esaminato grazie ad un'equazione differenziale. Anche se il più delle volte, l'ordine troppo elevato di alcune equazioni differenziali, dotate di coefficienti non sempre costanti, comporta problemi di complessità che portano ad equazioni di difficile, se non impossibile, soluzione.

Se si prova a sostituire il termine  $E_p$  (energia potenziale) dell'equazione n. 24.0C con l'energia potenziale assunta da un elettrone nell'orbita base di un atomo di idrogeno, si avrà come soluzione l'andamento della distribuzione di carica elettronica di questo atomo. Come oggi è noto, questa distribuzione si chiama orbitale 1s, e l'energia potenziale dell'elettrone è rappresentata dall'equazione:

$$E_p = -e^2/(4 \pi \epsilon r) \quad (25.0C)$$

Provi il lettore a giungere semplicemente a questo risultato tramite la legge di Coulomb.

Il metodo adoperato per giungere all'equazione di Schroedinger è stato molto semplice anche se molto laborioso, si poteva pervenire ad un identico risultato se si fosse utilizzato il metodo consigliato da un mio caro amico, il dott.



Renato Fedele, del Dipartimento di Fisica Nucleare di Napoli, che ringrazio per il preziosissimo contributo.

Ricordando quanto detto a proposito dell'equazione n. 13.0C; ancora:

$$E = E_p + E_c$$

si può esprimere direttamente l'energia potenziale come un'equazione relativa alla dimensione "x" e valida nel tempo "t" e l'energia cinetica come si è già avuto modo di definirla. Si scriverà quindi:

$$E = p^2/(2m) + v(x,t) \quad (26.0C)$$

In fisica quantistica la corrispondenza di Bohr pone:

$$p \rightarrow -i\hbar \frac{\delta}{\delta x} \quad (27.0C)$$

ed E (energia totale) corrispondente a:

$$E \rightarrow i\hbar \frac{\delta}{\delta t} \quad (28.0C)$$

Quindi tramite l'equazione n. 26.0C si può scrivere:

$$i\hbar \frac{\delta}{\delta t} = \left( -i\hbar \frac{\delta}{\delta x} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot m} + V_{(x,t)} \quad (29.0C)$$

Esprimendo l'operatore probabilistico e svolgendo il quadrato tra parentesi si ottiene:

$$i\hbar \frac{\delta \psi}{\delta t} = -\frac{\hbar^2}{2 \cdot m} \cdot \frac{\delta^2 \psi}{\delta x^2} + V_{(x,t)} \psi \quad (30.0C)$$

Il lettore svelto, provi con semplici passaggi matematici a verificare che l'equazione n. 30.0C sopra riportata, risulta essere identica all'equazione n. 23.0C. La corrispondenza di Bohr dell'energia totale andrà chiaramente considerata come "E" e inoltre, dovrà essere sostituito il termine  $\hbar$  con il termine  $h/(2\pi)$  ad esso equivalente.

L'equazione di Schroedinger è quindi una rappresentazione generale della funzione d'onda " $\Psi$ " degli elettroni che orbitano attorno ad un atomo. Possiamo

paragonarla ad una distribuzione della densità di carica elettronica, avendo posto l'elettrone ad un preciso e determinato livello energetico. Questa equazione permette di descrivere in modo completo tutti quei fenomeni legati alla posizione degli elettroni e allo stato della loro energia. Il lettore deve però comprendere come le soluzioni di questa equazione hanno carattere generale e possono essere utilizzate per analizzare una qualsiasi distribuzione di cariche elettriche.

Al termine di questo paragrafo, il lettore non avrà sicuramente dubbi circa l'implicazione dei concetti quantistici per quanto riguarda la comprensione dell'edificio atomico e quindi il funzionamento della struttura molecolare della materia. Tutto questo anche se la meccanica quantistica ci costringe ad osservare una materia molto meno statica di quanto si poteva inizialmente immaginare. Anzi, la meccanica quantistica conferma palesemente che la materia non è separabile dal movimento. Tutto fluttua come sosteneva Epicuro. Fluttua l'elettrone, fluttuano le altre particelle, fluttuano i campi, ma queste oscillazioni sono probabilmente l'espressione dell'energia impressa nella materia dal grande progettista, sono la dimostrazione della vitalità dello stato condensato. La materia vive, affermava Paracelso, e le stesse fluttuazioni sono forse l'amore che ogni singolo atomo prova per tutti gli altri e questo meraviglioso disegno è disperso tutto nella sua interezza, nella nostra incapacità di comprenderlo.

È mia opinione però, che abbiamo ancora molto da approfondire e studiare sulle argomentazioni che riguardano la fisica quantistica. Alcuni studiosi oggi affermano che certe tesi quantistiche possono essere spiegate in modo diverso. Questi fisici ipotizzano l'esistenza di alcune variabili nascoste che sarebbero ancora da scoprire. Nel 1986, il sottoscritto ipotizzò la possibilità di spiegare l'elettrone come particella costituita da 3 strutture elementari. Se questo fosse vero, si potrebbero spiegare alcune caratteristiche quantistiche di questa particella. Si potrebbe per esempio comprendere meglio la costante di struttura fine e la manifestazione ondulatoria dell'elettrone ma, fino a questo momento, nessun esperimento mostra alcun segno che possa far pensare ad una cosa del genere. L'elettrone rimane una particella misteriosa che si presenta a volte come onda e a volte come corpuscolo e la mia speculazione teorica risulta quindi assurda e infondata. La presenza dell'elettrone attorno al nucleo dell'atomo deve necessariamente essere studiata attraverso la distribuzione della sua energia/materia. Ne consegue che l'equazione di Schroedinger è un caposaldo indistruttibile ed è il migliore strumento in nostro possesso che permette, ad oggi, di comprendere l'atomo con la maggiore efficacia possibile. Per questa ragione, il lavoro fatto fino ad ora dai fisici teorici, resta patrimonio di grande valore per tutti gli studi che intraprenderemo nel nostro lungo cammino verso la conoscenza intima del mondo che ci circonda.

## BIBLIOGRAFIA

“Il primo libro di elettrotecnica” di Giacomo Giuliani della SEI Torino

“Trattato di elettrochimica” di G. Kortum della Piccin Editore

“1000 facili esperienze di fisica” di A. zammarchi e F.Baresi della LA SCUOLA EDITRICE

“Fisica per scienze e ingegneria” A.C. Melissinos F. Lobkowicz della Piccin Editore Padova

“Nuovi orizzonti in medicina” la teoria dei biofotoni di Fritz Albert Popp della IPSA

"Minerali industriali e minerali delle rocce" di E.Grill dell' editore Hoepli

“Introduzione alla scienza dei materiali” W.kurz , J.P. Mercier , G. Zambelli della Hoepli

“Scienza dei materiali” Anderson Leaver e Alexander Rawlings della Manuali Sansone

“Psicologia Fisiologia” di Philip Teitelbaum della Aldo Martello Editore

“Chimica d’oggi” di M. Bondioli editore Minerva Italica

“Chimica fisica” di Walter J. Moore della PICCIN

“Fisica e Chimica” della Peruzzo Bordas Enciclopedia

“Biologia” di Helena Curtis e N.Sue Barnes della Zanichelli

“Eureka” di giorgio Rivieccio, volume I e II della Rusconi Editore

“A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds” di Thorsten Ritz, Salih Adem, and Klaus Schulten Biophysical Journal Volume 78 February 2000

“Q.E.D. La strana teoria della luce e della materia” di Richard P. Feynman della Adelphi

“Il sistema internazionale di unità di Misura e le nuove definizioni del metro del secondo e dell’ampere” di Giacomo Giuliani -- della Universalia Editrice Napoli.

“Il Colore “ a cura di Andrea Frova – quaderno delle scienze n. 78 del giugno 1994

“La Fotobiologia” a cura di Giorgio Forti – quaderno delle scienze n. 46 del febbraio 1989

“Gli atomi e la loro energia” di Enrico Persico - Zanichelli Bologna -

“Chimica degli elementi “ di N.N.Greenwood e A.Earnshaw volume 1 e volume 2 della Piccin

“Nozioni di fisica e chimica” di Santo Garrubba Stabilimento tipografico M. D'auria

Dai Quark ai cristalli – Giuliano Preparata Boringhieri

E. Del Giudice, R. Mele, G. Preparata, Mod Phy lett. 51 (1977) 2

V. Elia and M. Niccoli Thermodynamics of Extremely Diluted Aqueous Solutions, “ Annals of the New York Academy of Sciences” , 879, 241 (1999)

“AQUA – L’acqua elettromagnetica e le sue mirabolanti avventure “ di Roberto Germano – Bibliopolis –

- Hubel D. H.: Occhio, cervello e visione. Ed. Zanichelli Bologna, 1989.

- Koch S.A. : Distribution of cones in the normal dog. Am. J. Vet. Res., 3:2,361-363, 1972.

La visione del cane di Pierluigi Dodi. Ann. Fac. Medic. Di Parma (volume XXIII, 2003). Consultazione documento da pag.113 a 119 – sito web

Lighting Work – La luce e la percezione visiva di Maurizio Gianandrea – Sito Web

Il segreto dei geroglifici. di Christian Jacq - Piemme edizione -

A Capacitor Paradox di Kirk T. McDonald Joseph Henry Laboratories, Princeton University, N.J. (July 10, 2002)

Rivista “Le scienze” n. 240 agosto 1988

Rivista “Le scienze” n. 221 gennaio 1987

Rivista “Le scienze” n. 280 dicembre 1991

Rivista “Le scienze” n. 146 ottobre 1980

Rivista “Le scienze” n. 287 luglio 1992

Rivista “Le scienze” n. 136 dicembre 1979

Rivista “Le scienze” n. 470 – pag.n.48 – ottobre 2007

Rivista “Le Scienze” n. 516 –pagina 40 – Agosto 2011