

Quinta parte

PARTICELLE DI LUCE E ONDE DI MATERIA

QUANTA DI LUCE - (Planck)

La teoria elettromagnetica ebbe un grande successo nell'interpretare molti fenomeni, ma quando fu applicata per calcolare la quantità di energia emessa dagli oggetti caldi, la famosa "*emissione di corpo nero*", portava alla conclusione assurda che veniva emessa una quantità di energia infinita. Un risultato chiaramente assurdo che fu definito "*catastrofe ultravioletta*". La catastrofe era solo teorica, non dipendeva né da errori di calcolo né dalla teoria di Maxwell, ma da un fatto fisico fondamentale del tutto imprevisto.

La soluzione fu trovata da Max Planck, che nel 1900 annunciò una nuova e inaspettata proprietà della materia: *l'emissione e l'assorbimento di energia elettromagnetica avvengono in modo discontinuo per quantità finite*. Queste quantità di energia elettromagnetica furono dette "*Quanta*" di luce. La legge di Planck stabilisce una relazione fra la *continuità* del campo elettromagnetico e la evidente *dis-continuità* della materia. Poiché non contiene elementi riferibili alla materia come la massa inerziale, questa legge è stata interpretata come *quantizzazione* del campo elettromagnetico. Planck non accettò questa interpretazione, perché la costante universale (*h*) che porta il suo nome, compare soltanto nei fenomeni in cui è coinvolta anche la materia (infatti non compare nelle equazioni di Maxwell). Quindi è del tutto evidente che la costante *h* deriva da discontinuità della materia, non della radiazione elettromagnetica.

FOTONI - (Einstein)

Nel 1905 Einstein riuscì a spiegare alcuni effetti elettromagnetici assumendo che i *quanta* di Planck si comportino come particelle di luce simili agli elettroni, che per assonanza furono definite “*Fotoni*”. Secondo questa ipotesi i fotoni di frequenza $\omega_E = W/\hbar$ sarebbero portatori della quantità di moto $p_E = W/c$, analoga a quella degli oggetti materiali.

L’ipotesi fu confermata nel 1922 da A. H. Compton, il quale dimostrò che i fotoni partecipano a processi d’urto esattamente come se fossero particelle materiali. Si attribuiva così ai fotoni una nuova proprietà definita *dualismo onda-corpuscolo*, totalmente incompatibile con le teorie precedenti. Al “fotone” di Einstein sono associati i seguenti parametri:

- Velocità di fase (Maxwell): $V_E = c.$
- Frequenza (Planck): $\omega_E = W/\hbar.$
- Quantità di moto (Einstein): $p_E = W/c.$
- Numero d’onda (Einstein): $k_E = p_E/\hbar.$
- Lunghezza d’onda (Einstein) : $\lambda_E = 2\pi/k = h/p_E.$

Da questi si ottiene la velocità di gruppo: $V_g = \frac{d\omega_E}{dk_E} = c = V_E.$

Essendo $V_g = V_E$ nel vuoto non vi è dispersione. Per la prima volta abbiamo insieme parametri ondulatori (ω_E) e corpuscolari (p_E), e la lunghezza d’onda legata alla quantità di moto ($\lambda_E = h/p_E$).

ONDE DI MATERIA - (De Broglie)

Fino al 1923 si riteneva che soltanto la radiazione elettromagnetica mostrasse un comportamento dualistico, sia di tipo ondulatorio sia di tipo corpuscolare. In quell’anno il giovane nobile francese Louis de Broglie propose nella sua tesi di dottorato una teoria che estendeva il dualismo alle particelle materiali, ricavando i parametri ondulatori per analogia con quelli del fotone.

Riprendiamo la quantità di moto del fotone $p_E = W/c$ ed il numero d'onda $k_E = p_E/\hbar$. Sostituendo al posto di p_E la quantità di moto $p = mu\gamma$, si ottiene il numero d'onda $k_B = p/\hbar = mu\gamma/\hbar$ associato alla particella materiale. Essendo $k = 2\pi/\lambda$, si ricava la lunghezza d'onda $\lambda = h/p$, fotocopia esatta dell'espressione di Einstein $\lambda = h/p_E$.

Questo procedimento è completamente analogico. Non avendo basi sperimentali, de Broglie fece l'ipotesi *euristica* che l'energia di riposo E_0 fosse connessa ad una oscillazione interna alla particella, ipotesi da verificare a posteriori in base ai risultati. Applicando assiomaticamente la legge di Planck all'energia E_0 , la particella ferma si associa alla frequenza $\omega_0 = E_0/\hbar$, quindi per la particella in movimento abbiamo:

$$\omega_B = E/\hbar = mc^2\gamma/\hbar.$$

Si ricava la velocità di fase:

$$V_B = \frac{\omega_B}{k_B} = \frac{mc^2\gamma}{mu\gamma} = \frac{c^2}{u}.$$

Le caratteristiche di questo parametro sono totalmente assurde, per es. la particella ferma risulta associata ad una velocità di fase infinita. De Broglie definì la sua ipotesi “*teoria dell'onda-di-fase*”, e per sostenerla inventò tra l'altro l'inutile “*Teorema dell'armonia di fase*”, sul quale ancora oggi i cultori dissertano compiaciuti. Sapendo bene che né energia né informazione possono viaggiare a velocità maggiore della luce, de Broglie precisò che l'*onda-di-fase* non si doveva considerare un fenomeno fisico reale, quindi la definì “*onda fittizia*”.

Ma l'uomo era fortunato, la sua “intuizione” era più potente del suo ragionamento. Nel 1927 Davisson e Germer, abilissimi fisici sperimentali, osservando emissioni prodotte da elettroni incidenti su un cristallo di nickel scoprirono fenomeni di diffrazione analoghi a quelli prodotti dai raggi X. In questo caso le figure di diffrazione non erano prodotte dalla radiazione, ma da particelle materiali.

La *diffrazione di elettroni* scoperta da Davisson e Germer risultava correlata alla lunghezza d'onda $\lambda = h/p$, esattamente prevista da de Broglie. I risultati sperimentali mettevano in crisi l'*onda fittizia*, ma la teoria acquistava enorme interesse. Per analogia con le *onde-di-luce*, fu coniata l'espressione *onde-di-materia*.

Molti teorici tentarono di interpretare "realisticamente" questi fenomeni, lo stesso de Broglie ed altri svilupparono la teoria *dell'onda pilota*, ma nessuno di questi tentativi ebbe successo. Oggi la primitiva teoria di de Broglie non è più sostenibile, rimane come un reperto storico da museo della Fisica, insieme al cannocchiale di Galileo, ed alle macchine elettrostatiche.

Incredibilmente nella Fisica contemporanea si dà ancora credito alla sua assurda *velocità di fase* $V_B = c^2 / u$.

ONDE DI ENERGIA CINETICA - (Schrödinger)

Erwin Schrödinger era un valente fisico-matematico austriaco, che insegnava Fisica teorica all'Università di Zurigo, dove Einstein era stato allievo e docente. Su suggerimento dello stesso Einstein riprese le idee di de Broglie, ma ignorò l'assurda frequenza $\omega_b = E/h$. Tentò una prima formulazione della teoria in termini relativistici, ma non ebbe risultati accettabili, quindi fece riferimento alle espressioni classiche dell'energia cinetica ($T = m u^2/2$) e della quantità di moto ($p = m u$). In questo modo la particella materiale veniva associata ai seguenti parametri ondulatori:

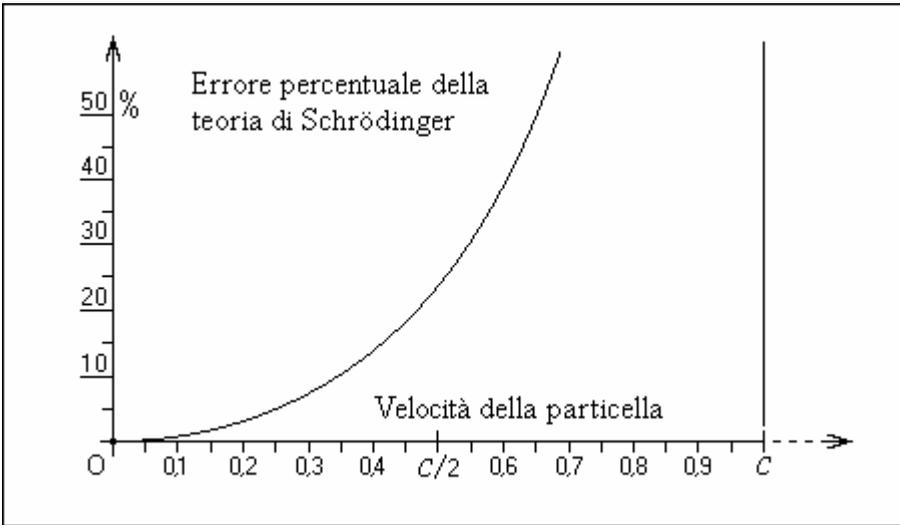
- Frequenza: $\omega_S = m u^2 / 2 \hbar$;
- Numero d'onda: $k_S = m u / \hbar$;
- Velocità di fase: $V_S = \omega_S / k_S = u / 2$.

Da questi si ricava la lunghezza d'onda $\lambda = h / m u$, che differisce da quella di de Broglie soltanto per la mancanza del fattore relativistico γ . Per velocità molto minori della velocità della luce la teoria di Schrödinger risulta in ottimo accordo con i dati sperimentali.

Il suo campo di validità si può valutarne approssimativamente considerando la differenza percentuale fra l'espressione relativistica $T_E = m c^2(\gamma - 1)$, e quella classica di Newton $T_N = m u^2/2$:

$$\frac{T_E - T_N}{T_N} = \frac{2c^2(\gamma - 1)}{u^2} - 1.$$

Dal grafico di questo parametro risulta evidente che la teoria di Schrödinger vale solo per velocità $u < 0,1 c$.



Si potrebbe pensare che la teoria di de Broglie sia migliore, essendo basata su parametri relativistici. Se così fosse consideriamo che per $u \ll c$ la formulazione relativistica deve coincidere con quella classica, quindi dovrebbe annullarsi la differenza fra le due teorie. Invece per $u = 0$ la frequenza minima di de Broglie è $\omega_B = mc^2/\hbar$, mentre risulta $\omega_S = 0$ quella di Schrödinger. Poiché per $u \ll c$ la teoria di Schrödinger dà risultati corretti, è evidente che la teoria di de Broglie è sbagliata.

NUOVA FORMULAZIONE OPERAZIONALE

Le velocità in gioco nella Meccanica atomica sono molto minori della velocità della luce, per queste applicazioni la teoria di Schrödinger funziona bene. Oltre il 10% della velocità della luce l'errore supera di alcuni ordini di grandezza la precisione sperimentale, occorre quindi una formulazione valida per qualsiasi velocità $u \leq c$, tale che per $u \ll c$ sia equivalente alla teoria di Schrödinger, mentre per $u = c$ sia compatibile con la teoria elettromagnetica.

La teoria di de Broglie e quella da Schrödinger in ultima analisi si basano entrambe sull'assioma che la legge di Planck ($W = \hbar \omega$) sia applicabile anche all'energia delle particelle materiali. La differenza fondamentale consiste nel parametro che si sostituisce all'energia W . De Broglie considera l'energia totale $E = mc^2 \gamma$, mentre Schrödinger fa riferimento all'energia cinetica classica $T = mu^2/2$. In realtà vi sono tre opzioni relativistiche:

- 1- l'energia inerziale intrinseca $E_o = mc^2$;
- 2 - l'energia cinetica $\Delta E = mc^2(\gamma - 1)$;
- 3 - l'energia totale $E = mc^2 \gamma = \Delta E + E_o$.

Se escludiamo interazioni con creazione e annichilazione di particelle, la quantità E_o non partecipa in nessun modo nei processi di urto, quindi è incompatibile con la quantità W che invece è totalmente disponibile. Inoltre non si sono mai osservati effetti ondulatori riferibili alla particella ferma. Per la stessa ragione si deve escludere anche l'energia $E = mc^2 \gamma$ che comprende l'energia E_o . La sola energia totalmente disponibile, in tutto assimilabile all'energia W , è l'energia ΔE . Riferendo a questa l'effetto ondulatorio abbiamo ancora i *parametri operazionali*:

- Frequenza: $\omega_\phi = \Delta E / \hbar = mc^2(\gamma - 1) / \hbar$.
- Numero d'onda: $k_\phi = \Delta p / \hbar = mu\gamma / \hbar$.
- Velocità di fase: $V_\phi = \Delta E / \Delta p = u / (1 + 1/\gamma)$.

Questo suggerisce una nuova definizione dell'energia cinetica in termini ondulatori:

Energia cinetica	=	quantità di moto	×	velocità di fase
------------------	---	------------------	---	------------------

Per la particella materiale: $\Delta E = mu\gamma V_\phi = mc^2(\gamma-1)$.

Per il fotone: $W = (W/c)c = W$.

Il fotone non ha energia di riposo, quindi l'energia W si deve considerare come energia cinetica del fotone. Per $u \ll c$ i *parametri operazionali* coincidono con quelli di Schrödinger (ω_S, k_S, V_S), mentre per $u=c$ abbiamo quelli della radiazione (ω_E, k_E, V_E).

Nella tabella seguente sono riassunti i parametri più significativi della propagazione ondulatoria nel vuoto secondo le diverse teorie.

Teoria	Frequenza	Lunghezza d'onda	Velocità di fase
Maxwell Planck Einstein	$\omega_E = W / \hbar$	$\lambda = h / p_E$	$V_E = c$
De Broglie	$\omega_B = mc^2 \gamma / \hbar$	$\lambda = h / p$	$V_B = c^2 / u$
Schrödinger	$\omega_S = m u^2 / 2 \hbar$	$\lambda = h / mu$	$V_S = u / 2$
<i>Operazionale</i>	$\omega_\phi = mc^2(\gamma-1) / \hbar$	$\lambda = h / p$	$V_\phi = u / (1 + 1/\gamma)$

VELOCITÀ DI FASE

De Broglie attribuiva molta importanza alla velocità di fase, Schrödinger si è occupato poco di questo parametro, la teoria quantistica lo ignora del tutto. Riteniamo che molte difficoltà teoriche derivano da insufficiente considerazione di questo importante parametro, pertanto vogliamo richiamare l'attenzione del lettore sul concetto di *fase*. Questo parametro ha un ruolo fondamentale nella descrizione di fenomeni ondulatori di qualsiasi natura, ed in molte discipline come Elettrotecnica, Acustica, Ottica, , ecc.. Per es. il suono stereofonico o le immagini prodotte dagli ologrammi sono essenzialmente combinazioni di fasi. In realtà tutto ciò che ascoltiamo o vediamo è connesso alla fase di onde sonore o luminose. In queste pagine ci occupiamo di onde molto particolari che si propagano nel vuoto, anche per queste il concetto di *fase* ha un ruolo fondamentale.

La teoria di de Broglie e quella di Schrödinger trattano della stessa situazione fisica, nonostante ciò la velocità di fase di de Broglie ($V_B = c^2/u$) è completamente differente da quella di Schrödinger ($V_S = u/2$), quindi è evidente che non possono essere entrambe corrette. L'atteggiamento dei fisici sulla questione è sorprendente, riportiamo (senza tradurlo) il commento a pag. 274 del quarto volume (Quantum physics) del popolare corso di Fisica di Berkeley:

“The reader may be bothered by the fact that the two phase velocities are not equal, although the two kinds of waves are supposed to describe exactly the same physical situation. However, there is no cause of alarm: the phase velocity is not the same thing as the velocity of the particle, and it does not correspond to anything observable”.

Inizialmente i fisici furono molto “*bothered*” per questo problema, ma in seguito lo abbandonarono pensando che non avesse soluzione. La teoria quantistica ignora la *velocità di fase* con la motivazione che questo parametro non sarebbe direttamente misurabile. In effetti per le particelle materiali non è possibile misurare né frequenza né velocità di fase, ma questi parametri sono determinati facilmente in modo indiretto.

La frequenza è direttamente proporzionale all'energia, mentre la velocità di fase è data dal prodotto della frequenza per la lunghezza d'onda, che si può ricavare con precisione dalle figure di diffrazione, o da altri parametri noti, Non esistono ancora strumenti per misure dirette di frequenza e velocità di fase della radiazione oltre lo spettro visibile, ma nessun fisico sperimentale direbbe mai: *“questi parametri non mi interessano perché non posso misurarli direttamente”*.

Questi parametri sono estremamente importanti per es. nella tecnica cristallografica, dove vengono determinati indirettamente con altissima precisione. Per le immagine di diffrazione ottenute con particelle materiali la situazione molto simile, i metodi di calcolo sono del tutto analoghi a quelli della Cristallografia, e fanno riferimento alla stessa teoria. In ogni casi tutte le analisi delle immagini di diffrazione si basano su combinazioni di fasi.

Per la propagazione ondulatoria nel vuoto abbiamo tre differenti espressioni della velocità di fase, una elettromagnetica e due derivate rispettivamente dalle teorie di de Broglie e di Schrödinger. A queste si deve aggiungere la *velocità di fase operativa* V_ϕ . Riportiamo di seguito le quattro espressioni:

$$\text{Maxwell:} \quad V_E = c.$$

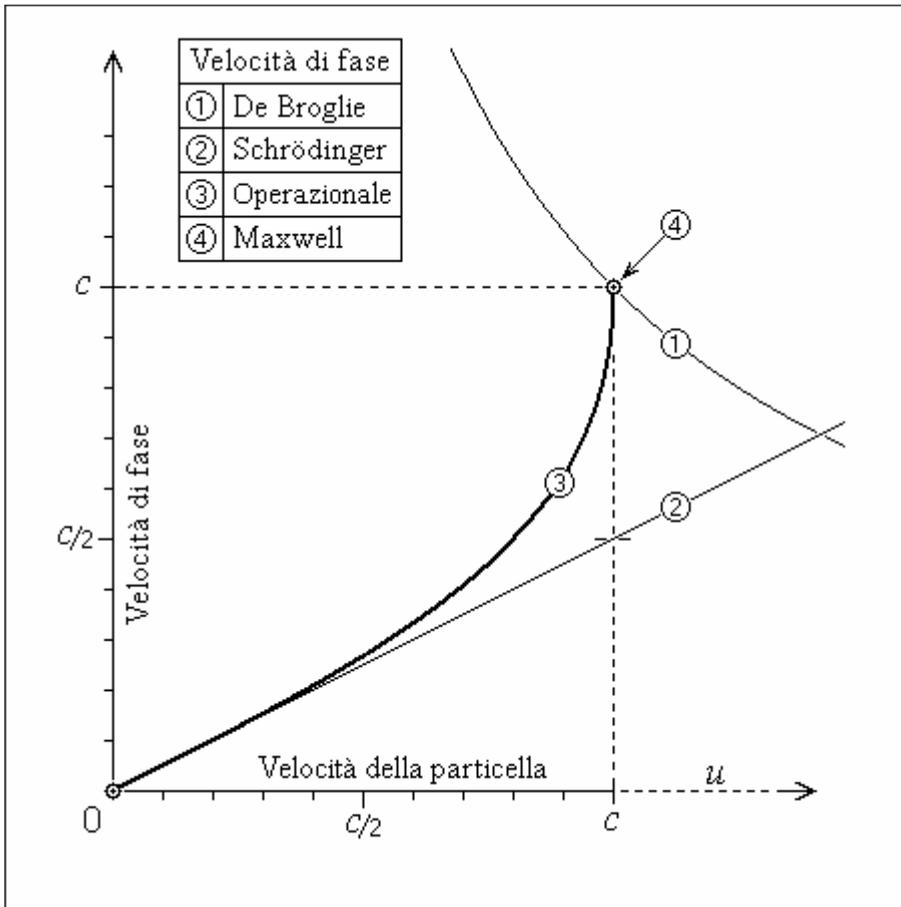
$$\text{De Broglie:} \quad V_B = \frac{c^2}{u}.$$

$$\text{Schrödinger:} \quad V_S = \frac{u}{2}.$$

$$\text{Operazionale:} \quad V_\phi = \frac{u}{1 + 1/\gamma}$$

I grafici sono riportati nella figura successiva. Sull'asse orizzontale abbiamo la velocità della particella, mentre l'asse verticale corrisponde alla velocità di fase.

Definiamo *zona reale* il campo delle velocità $u \leq c$, che riguarda tutti i fenomeni fisici che avvengono nel vuoto. Il punto (4), nell'angolo in alto a destra della *zona reale*, riguarda soltanto la radiazione nel vuoto, e pertanto è associato alla teoria di Maxwell.



- La curva (1) rappresenta la curva di de Broglie. È un ramo di iperbole passante per il punto di Maxwell, per il resto questo grafico è completamente esterno alla *zona reale*. De Broglie voleva estendere alle particelle materiali le proprietà ondulatorie della radiazione, ma il suo parametro ha un solo punto appartenente alla *zona reale*, che coincide col punto elettromagnetico di Maxwell. La contraddizione è lampante.

- La semiretta (2) deriva dalla teoria di Schrödinger, parte dall'origine e si estende illimitatamente. La teoria si basa su parametri non-relativistici, quindi vale soltanto per velocità $u \ll c$.
- La curva (3) rappresenta la *velocità di fase operativa* V_ϕ . Vediamo che si sovrappone alla linea di Schrödinger per $u \ll c$, comincia a differenziarsi al limite di validità della teoria di Schrödinger, e termina nel punto di Maxwell, dopo il quale assume valori immaginari. L'evidenza grafica mostra chiaramente che la *formulazione operativa* vale senza interruzione per qualsiasi velocità $u \leq c$.

Dal grafico di V_ϕ si evince chiaramente l'essenza unitaria di Meccanica ed Elettromagnetismo. Abbiamo un'altra conferma che tutti i fenomeni di propagazione ondulatoria nel vuoto hanno la stessa origine.

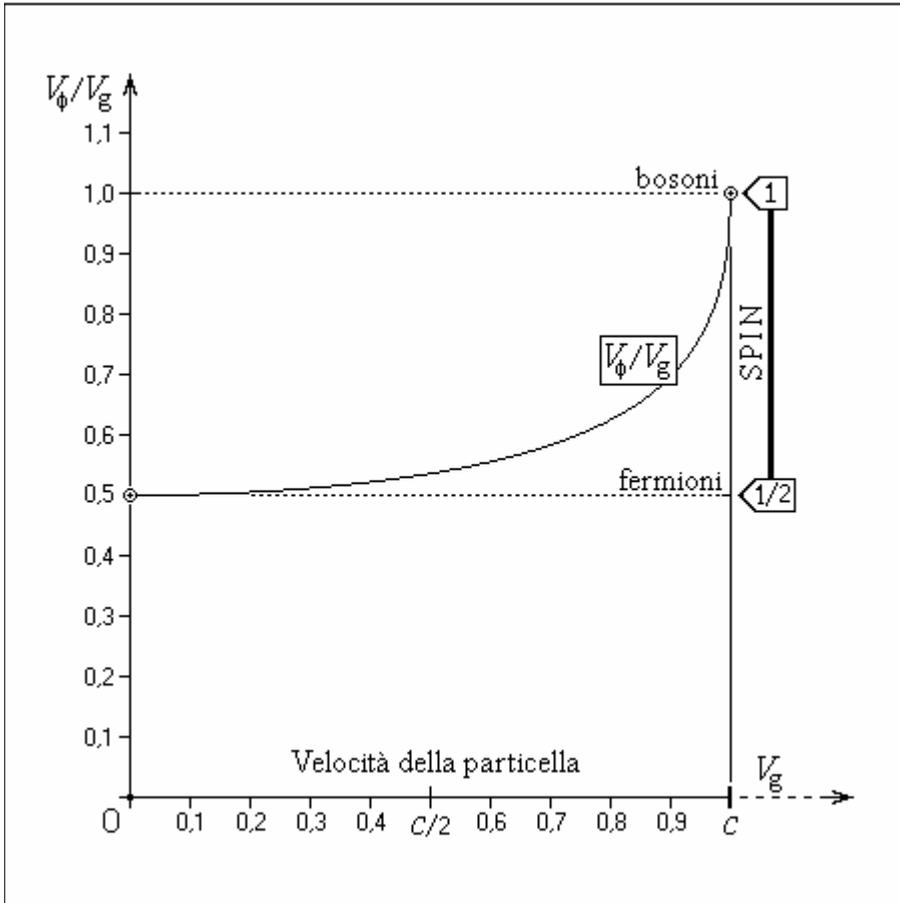
COINCIDENZE ?

Dai *parametri operazionali* ricaviamo il rapporto seguente:

$$V_\phi/V_g = 1/(1+1/\gamma).$$

Il grafico di questa espressione è riportato nella figura successiva. Si segnala la singolare circostanza che i limiti di questa espressione coincidono esattamente con i valori di *spin* ben noti. Per la particella *non-relativistica* abbiamo $V_\phi/V_g = 1/2$, che corrisponde al valore di *spin fermionico* in termini di \hbar , mentre per il fotone risulta $V_\phi/V_g = 1$, che coincide col valore di *spin bosonico*.

Se lo *spin* fosse legato alla velocità in questo modo, alla velocità $u = 0,94 c$ le particelle sarebbero associate al valore di *spin* di $(3/4)\hbar$. Le polarizzazioni circolari destra o sinistra del fotone si potrebbero interpretare come valori opposti di *spin*, ed estendere quindi lo stesso concetto alle particelle materiali. È possibile verificare questa ipotesi per via sperimentale.



Nella nostra analisi incontriamo molte coincidenze, spesso altamente significative, che complessivamente sono in numero troppo elevato per essere classificate sbrigativamente come “coincidenze matematiche senza significato fisico”. È inevitabile una forte percezione di consistenza della *Meccanica operativa* con la realtà fisica, avendo insieme chiara consapevolezza che sia necessario ancora molto lavoro di ricerca e di approfondimento.

RELAZIONI PRELIMINARI

Si definisce relazione di dispersione quella che esiste fra la frequenza ω e il numero d'onde k . Da questa relazione si ricava l'equazione d'onda che descrive l'evoluzione del fenomeno ondulatorio. Nella Teoria delle onde si usa un parametro detto funzione d'onda Ψ , che rappresenta una grandezza fisica periodica (per es. nelle onde marine rappresenta l'altezza della superficie liquida in ogni punto in funzione del tempo).

La sua espressione è:

$$\Psi(\mathbf{x}, t; k, \omega) = \exp i(kx - \omega t).$$

Nel seguito i parametri ω e k non saranno esplicitati per consentire un confronto più diretto fra espressioni derivate da teorie differenti.

Differenziamo la funzione Ψ rispetto al tempo:

$$\frac{\partial}{\partial t} \Psi = -i\omega \Psi \quad \Rightarrow \quad \boxed{\omega = \frac{i}{\Psi} \frac{\partial}{\partial t} \Psi}$$

Differenziamo due volte rispetto al tempo:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \Psi = -\omega^2 \Psi \quad \Rightarrow \quad \boxed{\omega^2 = -\frac{1}{\Psi} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \Psi}$$

Differenziamo la Ψ due volte rispetto a x_1, x_2, x_3 :

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} \Psi + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \Psi + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \Psi \right) = -k^2 \Psi.$$

Si introduce in questa espressione l'operatore di Laplace:

$$\nabla^2 \equiv \left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \right).$$

Si ottiene:

$$k^2 = -\frac{1}{\psi} \nabla^2 \psi$$

EQUAZIONE DI KLEIN-GORDON.

Le *equazioni d'onda* relative alla propagazione nel vuoto si possono ricavare seguendo diversi procedimenti, tuttavia applicheremo un procedimento molto semplice, dal quale si evince chiaramente la stessa origine relativistica. Partiamo dalla relazione fondamentale di Einstein:

$$E = m c^2 \gamma$$

$$E^2(1 - u^2/c^2) = m^2 c^4$$

$$E^2 - c^2 m^2 u^2 \gamma^2 = m^2 c^4$$

$$E^2 - c^2 p^2 = (E_0)^2$$

Questa è probabilmente la relazione più citata e “venerata” da molti fisici teorici. Sostituendo i parametri di de Broglie $E = \hbar \omega_B$ e $p = \hbar k_B$, abbiamo la seguente relazione di dispersione:

$$\omega_B^2 - c^2 k_B^2 = \frac{m^2 c^4}{\hbar^2}.$$

Sostituendo le precedenti espressioni differenziali di ω^2 e k^2 , ricaviamo subito la seguente equazione d'onda di Klein-Gordon:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi - \nabla^2 \psi = -\frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \psi$$

Questa equazione è congruente con la teoria di de Broglie e con la formulazione 4-dimensionale di Minkowski, quindi aveva suscitato grande interesse fra i teorici. Gli studi successivi hanno smentito tutte le attese.

Nella Fisica teorica esiste un “dogma” che attribuisce automaticamente la qualifica “relativistica” soltanto a ciò che fa riferimento all’espressione $E^2 - c^2 p^2 = (E_0)^2$. Questo vale per la teoria di de Broglie e per l’equazione Klein-Gordon. Occorre notare che la relazione $E^2 - c^2 p^2 = (E_0)^2$ riguarda l’energia di riposo E_0 , quantità non disponibile nelle interazioni d’urto, a cui non partecipa in nessun modo. Da questo derivano le assurde proprietà della velocità di fase di de Broglie $V_B = c^2/u$, ed il fatto che l’equazione di Klein-Gordon è del tutto incompatibile con i fatti sperimentali. Questo prova che il “dogma” teorico dominante è sbagliato. Lasciamo dunque i dogmi alle religioni!

EQUAZIONE GENERALE DELLA MECCANICA ONDULATORIA

I parametri ondulatori *operazionali* valgono per qualsiasi velocità $u \leq c$, pertanto sono riferibili sia a particelle materiali sia alla radiazione. La stessa proprietà vale per l’inedita equazione d’onda correlata ai parametri *operazionali*, che ricaveremo ancora dalle relazioni fondamentali di Einstein:

$$E = m c^2 \gamma \rightarrow E^2 - c^2 p^2 = (E_0)^2$$

$$E^2 + [(E_0)^2 - 2 E E_0] - c^2 p^2 = (E_0)^2 + [(E_0)^2 - 2 E E_0]$$

$$(E - E_0)^2 - c^2 p^2 = -2 E_0 (E - E_0)$$

Essendo $p = m u \gamma$, per $u = 0 \Rightarrow p_0 = 0$, possiamo scrivere:

$$(E - E_0)^2 - c^2 (p - p_0)^2 = -2 E_0 (E - E_0).$$

Poniamo $\Delta E = E - E_0$ e $\Delta p = p - p_0$, quindi abbiamo:

$\Delta E^2 - c^2 \Delta p^2 = -2 m c^2 \Delta E$

Ricordiamo che $\Delta E = m c^2 (\gamma - 1)$ e $\Delta p = m u \gamma$ sono quantità disponibili scambiate nelle interazioni d’urto.

Poniamo ora che la velocità delle particelle sia $u < c/10$. In questo caso si verifica facilmente che il primo termine dell'equazione d'onda operativa diventa trascurabile. Abbiamo infatti:

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi \right) \Big/ \left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi - \nabla^2 \psi \right) = \left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi \right) \Big/ \left(i \frac{2m}{\hbar} \frac{\partial}{\partial t} \psi \right)$$

Per valutare questo rapporto riprendiamo le derivate della funzione d'onda rispetto al tempo, essendo $\omega_0 = mc^2 (\gamma - 1) / \hbar$, si ottiene:

$$\left(\psi \frac{\omega^2}{c^2} \right) \Big/ \left(\psi \frac{2m\omega}{\hbar} \right) = \frac{mc^2 (\gamma - 1)}{2mc^2} = \frac{1}{2} (\gamma - 1)$$

Per $u \leq c/10$ abbiamo:

$$\frac{1}{2} (\gamma - 1) \leq \frac{1}{2\sqrt{1-10^{-2}}} - \frac{1}{2} = 0,0025189$$

Nell'atomo di Idrogeno la velocità orbitale dell'elettrone nello stato fondamentale è $u = c/137$:

$$\frac{1}{2} (\gamma - 1) = \frac{1}{2\sqrt{1-(1/137)^2}} - \frac{1}{2} = 0,00001332.$$

In questo caso il termine del second'ordine vale un errore di circa uno su centomila, molto inferiore a quello osservabile nella meccanica atomica. In questo campo di applicazioni l'equazione d'onda operativa si può scrivere nella forma seguente:

$$-\nabla^2 \psi = i \frac{2m}{\hbar} \frac{\partial}{\partial t} \psi$$

UN MISTERO INUTILE: IL “DUALISMO ONDA-PARTICELLA”

Miriadi di fotografie mostrano particelle elementari che si urtano e rimbalzano come bocce, ma dalle particelle elementari si ottengono facilmente anche figure di diffrazione del tutto simili a quelle prodotte dalla luce, che inevitabilmente hanno una interpretazione di tipo ondulatorio. Tutti i tentativi di associare a questi effetti onde “reali” sono falliti, gli effetti ondulatori prodotti da particelle materiali sono “reali”, ma le “onde reali” non si trovano.

Allora è prevalsa l’interpretazione che fa riferimento a combinazioni di *onde-di-probabilità*, che si propagherebbero con la velocità di fase di de Broglie, cioè a velocità migliaia di volte maggiore della velocità della luce. Sebbene sostenuta da fisici di grandissimo valore, questa interpretazione non è senza problemi, per es. non si capisce quale significato fisico abbia la velocità di fase di un’onda-di-probabilità, e perché questa sia proprio la velocità di fase di de Broglie, ignorando la velocità di fase di Schrödinger che riguarda la stessa situazione fisica, ed ha interpretato i dati sperimentali con grande successo. Un calcolo banalissimo mostra che mentre l’elettrone percorre una sola orbita dell’atomo di idrogeno, nello stesso tempo le orbite percorse con la velocità di fase di de Broglie sarebbero:

$$V_B / u = 137^2 = 18.769 \quad !!!$$

È molto difficile credere che la formidabile stabilità della struttura atomica abbia qualche relazione con la velocità pazzesca voluta da questa teoria. Saggiamente de Broglie pensava che questa assurda *velocità teorica* potesse riferirsi soltanto ad un’*onda fittizia*. Oggi molti fisici sperimentali sono convinti della “*realtà*” delle *onde-di-materia*, mentre i fisici teorici spiegano questi fenomeni in termini di *onde-di-probabilità*. Non risulta che *materia* e *probabilità* siano sinonimi equivalenti, quindi non si capisce come conciliare i termini *onde-di-materia* e *onde-di-probabilità*.

È evidente che regna ancora grande confusione.

Quando non si trova la spiegazione giusta, si trovano le parole giuste per nascondere la nostra ignoranza, spesso sono efficaci tranquillanti! Buttandola in Filosofia i fisici non hanno più necessità di capire, è sufficiente che statisticamente i risultati di complicatissimi calcoli teorici siano in accordo con i risultati sperimentali.

Nel 1913 il danese Bohr riuscì a spiegare la stabilità della struttura atomica partendo dall'ipotesi le orbite elettroniche fossero determinate da poche regole empiriche. Queste regole furono spiegate molti anni dopo dalla teoria quantistica, attribuendo alle particelle elementari caratteristiche tipicamente corpuscolari e ondulatorie insieme.

Sull'interpretazione della funzione d'onda nacque una lunga e durissima controversia che vide schierati su opposti fronti Einstein, de Broglie, e Schrödinger per una interpretazione "realistica", mentre sull'altro fronte Bohr, Born, Heisenberg, difendevano l'interpretazione "probabilistica". Su questa epica controversia il lettore interessato potrà consultare una vasta letteratura, in cui elementi rigorosamente scientifici sono mescolati a considerazioni filosofiche, e vicende di carattere strettamente personale. Coloro che non conoscono l'ambiente della Fisica teorica difficilmente possono immaginare l'alto livello di animosità dei contendenti, che si batterono per lunghi anni senza risparmio di energie intellettuali.

Alla fine prevalse l'interpretazione di Bohr, detta "di Copenaghen", che si basa sul *principio di complementarietà*, per il quale le manifestazioni ondulatorie e corpuscolari sarebbero effetti "*complementari*" determinati dall'apparato sperimentale dell'osservatore.

Schrödinger considerava la "*complementarietà*" di Bohr un concetto vago e fumoso, che nascondeva essenzialmente l'ignoranza dei fenomeni. Nonostante ciò questa interpretazione è diventata uno dei fondamenti assiomatici della teoria quantistica. I fatti sperimentali sono indiscutibili, ma l'interpretazione corpuscolare e quella ondulatoria sono inconciliabili. Il *dualismo onda-corpuscolo* è rimasto quindi un fatto misterioso che sfugge ad ogni possibilità di comprensione, per cui nel linguaggio comune si è affermata l'interpretazione più semplice:

“se le particelle elementari manifestano effetti corpuscolari ed ondulatori, ciò significa che per loro natura sono insieme corpuscoli e onde”.

Questa affermazione è incomprensibile, non è sostenuta da sicure evidenze sperimentali, e sarebbe invalidata dal Principio operativo.

Nell'introduzione abbiamo riportato l'espressione di Feynman:

“...Neppure io lo capisco. Nessuno lo capisce...”.

Soltanto pazzi o sciocchi presuntuosi possono mettere in dubbio le parole del premio Nobel Feynman, e nessun fisico vuole essere giudicato pazzo o sciocco. Dopo anni di inutili tentativi molti teorici avranno concluso :

“Questa cosa non la capisco, ma se non la capisce nemmeno Feynman allora non la può capire nessuno!”

Così i “Padri Fondatori” hanno stabilito per postulato che il *dualismo* sia una proprietà intrinseca del mondo atomico, incomprensibile per il nostro pensiero strutturato sull'esperienza macroscopica e deterministica. Alla fine il *dualismo* è stato assunto come assioma, troppo simile ad un Mistero di Fede, da credere senza pretendere di capire. Così è diventato il grande Atto di Fede della Ortodossia fisica del ventesimo secolo.

Molte volte le interpretazioni più evidenti sono state scelte assiomaticamente, poi condivise e sostenute con grande determinazione e per lungo tempo da tutta la comunità, fino a quando si è finalmente capito che erano completamente sbagliate. Riteniamo che il *dualismo* delle particelle elementari potrebbe essere un ottimo candidato da proporre per il “*Club degli Assiomi Evidenti*”, che annovera fra i suoi soci più insigni la *Terra piatta*, la *Cosmologia geocentrica*, l'*Impossibilità del volo umano*, l'*Etere luminifero*

Qualsiasi fenomeno ondulatorio, anche l'onda stazionaria, è sempre accompagnato da parametri che variano periodicamente, mentre non si conosce niente di simile riferibile a particelle ferme, quindi l'effetto ondulatorio non può derivare da una caratteristica intrinseca delle particelle. Questo invalida definitivamente la teoria di de Broglie. D'altra parte i brillanti risultati della teoria di Schrödinger sono limitati al campo *non-relativistico*, a cui si deve aggiungere il fatto che l'interpretazione della funzione d'onda è stata controversa per molto tempo.

De Broglie ha fallito applicando la legge di Planck all'energia relativistica totale delle particelle materiali, da cui ha ottenuto una velocità di fase con caratteristiche assurde. Schrödinger invece ha ottenuto una equazione d'onda di grande successo facendo riferimento solo all'energia cinetica, sebbene nella versione classica.

Quinta parte

PARTICELLE DI LUCE E ONDE DI MATERIA

QUANTA DI LUCE - (Planck)

La teoria elettromagnetica ebbe un grande successo nell'interpretare molti fenomeni, ma quando fu applicata per calcolare la quantità di energia emessa dagli oggetti caldi, la famosa "*emissione di corpo nero*", portava alla conclusione assurda che veniva emessa una quantità di energia infinita. Un risultato chiaramente assurdo che fu definito "*catastrofe ultravioletta*". La catastrofe era solo teorica, non dipendeva né da errori di calcolo né dalla teoria di Maxwell, ma da un fatto fisico fondamentale del tutto impreveduto.

La soluzione fu trovata da Max Planck, che nel 1900 annunciò una nuova e inaspettata proprietà della materia: *l'emissione e l'assorbimento di energia elettromagnetica avvengono in modo discontinuo per quantità finite*. Queste quantità di energia elettromagnetica furono dette "*Quanta*" di luce. La legge di Planck stabilisce una relazione fra la *continuità* del campo elettromagnetico e la evidente *dis-continuità* della materia. Poiché non contiene elementi riferibili alla materia come la massa inerziale, questa legge è stata interpretata come *quantizzazione* del campo elettromagnetico. Planck non accettò questa interpretazione, perché la costante universale (*h*) che porta il suo nome, compare soltanto nei fenomeni in cui è coinvolta anche la materia (infatti non compare nelle equazioni di Maxwell). Quindi è del tutto evidente che la costante *h* deriva da discontinuità della materia, non della radiazione elettromagnetica.

FOTONI - (Einstein)

Nel 1905 Einstein riuscì a spiegare alcuni effetti elettromagnetici assumendo che i *quanta* di Planck si comportino come particelle di luce simili agli elettroni, che per assonanza furono definite “*Fotoni*”. Secondo questa ipotesi i fotoni di frequenza $\omega_E = W/\hbar$ sarebbero portatori della quantità di moto $p_E = W/c$, analoga a quella degli oggetti materiali.

L’ipotesi fu confermata nel 1922 da A. H. Compton, il quale dimostrò che i fotoni partecipano a processi d’urto esattamente come se fossero particelle materiali. Si attribuiva così ai fotoni una nuova proprietà definita *dualismo onda-corpuscolo*, totalmente incompatibile con le teorie precedenti. Al “*fotone*” di Einstein sono associati i seguenti parametri:

- Velocità di fase (Maxwell): $V_E = c.$
- Frequenza (Planck): $\omega_E = W/\hbar.$
- Quantità di moto (Einstein): $p_E = W/c.$
- Numero d’onda (Einstein): $k_E = p_E/\hbar.$
- Lunghezza d’onda (Einstein) : $\lambda_E = 2\pi/k = h/p_E.$

Da questi si ottiene la velocità di gruppo: $V_g = \frac{d\omega_E}{dk_E} = c = V_E.$

Essendo $V_g = V_E$ nel vuoto non vi è dispersione. Per la prima volta abbiamo insieme parametri ondulatori (ω_E) e corpuscolari (p_E), e la lunghezza d’onda legata alla quantità di moto ($\lambda_E = h/p_E$).

ONDE DI MATERIA - (De Broglie)

Fino al 1923 si riteneva che soltanto la radiazione elettromagnetica mostrasse un comportamento dualistico, sia di tipo ondulatorio sia di tipo corpuscolare. In quell’anno il giovane nobile francese Louis de Broglie propose nella sua tesi di dottorato una teoria che estendeva il dualismo alle particelle materiali, ricavando i parametri ondulatori per analogia con quelli del fotone.

Riprendiamo la quantità di moto del fotone $p_E = W/c$ ed il numero d'onda $k_E = p_E/\hbar$. Sostituendo al posto di p_E la quantità di moto $p = mu\gamma$, si ottiene il numero d'onda $k_B = p/\hbar = mu\gamma/\hbar$ associato alla particella materiale. Essendo $k = 2\pi/\lambda$, si ricava la lunghezza d'onda $\lambda = h/p$, fotocopia esatta dell'espressione di Einstein $\lambda = h/p_E$.

Questo procedimento è completamente analogico. Non avendo basi sperimentali, de Broglie fece l'ipotesi *euristica* che l'energia di riposo E_0 fosse connessa ad una oscillazione interna alla particella, ipotesi da verificare a posteriori in base ai risultati. Applicando assiomaticamente la legge di Planck all'energia E_0 , la particella ferma si associa alla frequenza $\omega_0 = E_0/\hbar$, quindi per la particella in movimento abbiamo:

$$\omega_B = E/\hbar = mc^2\gamma/\hbar.$$

Si ricava la velocità di fase:

$$V_B = \frac{\omega_B}{k_B} = \frac{mc^2\gamma}{mu\gamma} = \frac{c^2}{u}.$$

Le caratteristiche di questo parametro sono totalmente assurde, per es. la particella ferma risulta associata ad una velocità di fase infinita. De Broglie definì la sua ipotesi “*teoria dell'onda-di-fase*”, e per sostenerla inventò tra l'altro l'inutile “*Teorema dell'armonia di fase*”, sul quale ancora oggi i cultori dissertano compiaciuti. Sapendo bene che né energia né informazione possono viaggiare a velocità maggiore della luce, de Broglie precisò che l'*onda-di-fase* non si doveva considerare un fenomeno fisico reale, quindi la definì “*onda fittizia*”.

Ma l'uomo era fortunato, la sua “intuizione” era più potente del suo ragionamento. Nel 1927 Davisson e Germer, abilissimi fisici sperimentali, osservando emissioni prodotte da elettroni incidenti su un cristallo di nickel scoprirono fenomeni di diffrazione analoghi a quelli prodotti dai raggi X. In questo caso le figure di diffrazione non erano prodotte dalla radiazione, ma da particelle materiali.

La *diffrazione di elettroni* scoperta da Davisson e Germer risultava correlata alla lunghezza d'onda $\lambda = h/p$, esattamente prevista da de Broglie. I risultati sperimentali mettevano in crisi l'*onda fittizia*, ma la teoria acquistava enorme interesse. Per analogia con le *onde-di-luce*, fu coniata l'espressione *onde-di-materia*.

Molti teorici tentarono di interpretare "realisticamente" questi fenomeni, lo stesso de Broglie ed altri svilupparono la teoria *dell'onda pilota*, ma nessuno di questi tentativi ebbe successo. Oggi la primitiva teoria di de Broglie non è più sostenibile, rimane come un reperto storico da museo della Fisica, insieme al cannocchiale di Galileo, ed alle macchine elettrostatiche.

Incredibilmente nella Fisica contemporanea si dà ancora credito alla sua assurda *velocità di fase* $V_B = c^2 / u$.

ONDE DI ENERGIA CINETICA - (Schrödinger)

Erwin Schrödinger era un valente fisico-matematico austriaco, che insegnava Fisica teorica all'Università di Zurigo, dove Einstein era stato allievo e docente. Su suggerimento dello stesso Einstein riprese le idee di de Broglie, ma ignorò l'assurda frequenza $\omega_b = E/h$. Tentò una prima formulazione della teoria in termini relativistici, ma non ebbe risultati accettabili, quindi fece riferimento alle espressioni classiche dell'energia cinetica ($T = m u^2/2$) e della quantità di moto ($p = m u$). In questo modo la particella materiale veniva associata ai seguenti parametri ondulatori:

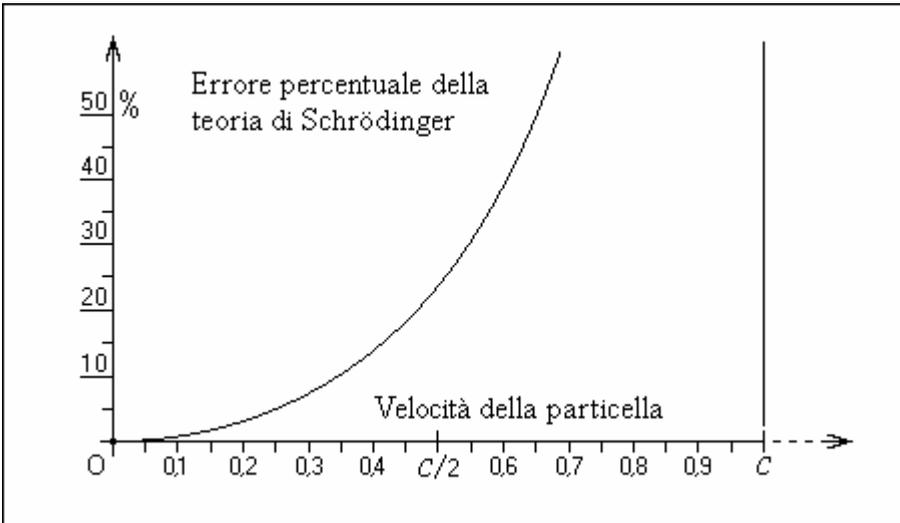
- Frequenza: $\omega_S = m u^2 / 2 \hbar$;
- Numero d'onda: $k_S = m u / \hbar$;
- Velocità di fase: $V_S = \omega_S / k_S = u / 2$.

Da questi si ricava la lunghezza d'onda $\lambda = h / m u$, che differisce da quella di de Broglie soltanto per la mancanza del fattore relativistico γ . Per velocità molto minori della velocità della luce la teoria di Schrödinger risulta in ottimo accordo con i dati sperimentali.

Il suo campo di validità si può valutarne approssimativamente considerando la differenza percentuale fra l'espressione relativistica $T_E = m c^2(\gamma - 1)$, e quella classica di Newton $T_N = m u^2/2$:

$$\frac{T_E - T_N}{T_N} = \frac{2c^2(\gamma - 1)}{u^2} - 1.$$

Dal grafico di questo parametro risulta evidente che la teoria di Schrödinger vale solo per velocità $u < 0,1 c$.



Si potrebbe pensare che la teoria di de Broglie sia migliore, essendo basata su parametri relativistici. Se così fosse consideriamo che per $u \ll c$ la formulazione relativistica deve coincidere con quella classica, quindi dovrebbe annullarsi la differenza fra le due teorie. Invece per $u = 0$ la frequenza minima di de Broglie è $\omega_B = mc^2 / \hbar$, mentre risulta $\omega_S = 0$ quella di Schrödinger. Poiché per $u \ll c$ la teoria di Schrödinger dà risultati corretti, è evidente che la teoria di de Broglie è sbagliata.

NUOVA FORMULAZIONE OPERAZIONALE

Le velocità in gioco nella Meccanica atomica sono molto minori della velocità della luce, per queste applicazioni la teoria di Schrödinger funziona bene. Oltre il 10% della velocità della luce l'errore supera di alcuni ordini di grandezza la precisione sperimentale, occorre quindi una formulazione valida per qualsiasi velocità $u \leq c$, tale che per $u \ll c$ sia equivalente alla teoria di Schrödinger, mentre per $u = c$ sia compatibile con la teoria elettromagnetica.

La teoria di de Broglie e quella da Schrödinger in ultima analisi si basano entrambe sull'assioma che la legge di Planck ($W = \hbar \omega$) sia applicabile anche all'energia delle particelle materiali. La differenza fondamentale consiste nel parametro che si sostituisce all'energia W . De Broglie considera l'energia totale $E = mc^2 \gamma$, mentre Schrödinger fa riferimento all'energia cinetica classica $T = mu^2/2$. In realtà vi sono tre opzioni relativistiche:

- 1- l'energia inerziale intrinseca $E_o = mc^2$;
- 2 - l'energia cinetica $\Delta E = mc^2(\gamma - 1)$;
- 3 - l'energia totale $E = mc^2 \gamma = \Delta E + E_o$.

Se escludiamo interazioni con creazione e annichilazione di particelle, la quantità E_o non partecipa in nessun modo nei processi di urto, quindi è incompatibile con la quantità W che invece è totalmente disponibile. Inoltre non si sono mai osservati effetti ondulatori riferibili alla particella ferma. Per la stessa ragione si deve escludere anche l'energia $E = mc^2 \gamma$ che comprende l'energia E_o . La sola energia totalmente disponibile, in tutto assimilabile all'energia W , è l'energia ΔE . Riferendo a questa l'effetto ondulatorio abbiamo ancora i *parametri operazionali*:

- Frequenza: $\omega_\phi = \Delta E / \hbar = mc^2(\gamma - 1) / \hbar$.
- Numero d'onda: $k_\phi = \Delta p / \hbar = mu\gamma / \hbar$.
- Velocità di fase: $V_\phi = \Delta E / \Delta p = u / (1 + 1/\gamma)$.

Questo suggerisce una nuova definizione dell'energia cinetica in termini ondulatori:

Energia cinetica	=	quantità di moto	×	velocità di fase
------------------	---	------------------	---	------------------

Per la particella materiale: $\Delta E = mu\gamma V_\phi = mc^2(\gamma-1)$.

Per il fotone: $W = (W/c)c = W$.

Il fotone non ha energia di riposo, quindi l'energia W si deve considerare come energia cinetica del fotone. Per $u \ll c$ i *parametri operazionali* coincidono con quelli di Schrödinger (ω_S, k_S, V_S), mentre per $u=c$ abbiamo quelli della radiazione (ω_E, k_E, V_E).

Nella tabella seguente sono riassunti i parametri più significativi della propagazione ondulatoria nel vuoto secondo le diverse teorie.

Teoria	Frequenza	Lunghezza d'onda	Velocità di fase
Maxwell Planck Einstein	$\omega_E = W / \hbar$	$\lambda = h / p_E$	$V_E = c$
De Broglie	$\omega_B = mc^2 \gamma / \hbar$	$\lambda = h / p$	$V_B = c^2 / u$
Schrödinger	$\omega_S = m u^2 / 2 \hbar$	$\lambda = h / mu$	$V_S = u / 2$
<i>Operazionale</i>	$\omega_\phi = mc^2(\gamma-1) / \hbar$	$\lambda = h / p$	$V_\phi = u / (1 + 1/\gamma)$

VELOCITÀ DI FASE

De Broglie attribuiva molta importanza alla velocità di fase, Schrödinger si è occupato poco di questo parametro, la teoria quantistica lo ignora del tutto. Riteniamo che molte difficoltà teoriche derivano da insufficiente considerazione di questo importante parametro, pertanto vogliamo richiamare l'attenzione del lettore sul concetto di *fase*. Questo parametro ha un ruolo fondamentale nella descrizione di fenomeni ondulatori di qualsiasi natura, ed in molte discipline come Elettrotecnica, Acustica, Ottica, , ecc.. Per es. il suono stereofonico o le immagini prodotte dagli ologrammi sono essenzialmente combinazioni di fasi. In realtà tutto ciò che ascoltiamo o vediamo è connesso alla fase di onde sonore o luminose. In queste pagine ci occupiamo di onde molto particolari che si propagano nel vuoto, anche per queste il concetto di *fase* ha un ruolo fondamentale.

La teoria di de Broglie e quella di Schrödinger trattano della stessa situazione fisica, nonostante ciò la velocità di fase di de Broglie ($V_B = c^2/u$) è completamente differente da quella di Schrödinger ($V_S = u/2$), quindi è evidente che non possono essere entrambe corrette. L'atteggiamento dei fisici sulla questione è sorprendente, riportiamo (senza tradurlo) il commento a pag. 274 del quarto volume (Quantum physics) del popolare corso di Fisica di Berkeley:

“The reader may be bothered by the fact that the two phase velocities are not equal, although the two kinds of waves are supposed to describe exactly the same physical situation. However, there is no cause of alarm: the phase velocity is not the same thing as the velocity of the particle, and it does not correspond to anything observable”.

Inizialmente i fisici furono molto “*bothered*” per questo problema, ma in seguito lo abbandonarono pensando che non avesse soluzione. La teoria quantistica ignora la *velocità di fase* con la motivazione che questo parametro non sarebbe direttamente misurabile. In effetti per le particelle materiali non è possibile misurare né frequenza né velocità di fase, ma questi parametri sono determinati facilmente in modo indiretto.

La frequenza è direttamente proporzionale all'energia, mentre la velocità di fase è data dal prodotto della frequenza per la lunghezza d'onda, che si può ricavare con precisione dalle figure di diffrazione, o da altri parametri noti. Non esistono ancora strumenti per misure dirette di frequenza e velocità di fase della radiazione oltre lo spettro visibile, ma nessun fisico sperimentale direbbe mai: *“questi parametri non mi interessano perché non posso misurarli direttamente”*.

Questi parametri sono estremamente importanti per es. nella tecnica cristallografica, dove vengono determinati indirettamente con altissima precisione. Per le immagini di diffrazione ottenute con particelle materiali la situazione molto simile, i metodi di calcolo sono del tutto analoghi a quelli della Cristallografia, e fanno riferimento alla stessa teoria. In ogni caso tutte le analisi delle immagini di diffrazione si basano su combinazioni di fasi.

Per la propagazione ondulatoria nel vuoto abbiamo tre differenti espressioni della velocità di fase, una elettromagnetica e due derivate rispettivamente dalle teorie di de Broglie e di Schrödinger. A queste si deve aggiungere la *velocità di fase operativa* V_ϕ . Riportiamo di seguito le quattro espressioni:

$$\text{Maxwell:} \quad V_E = c.$$

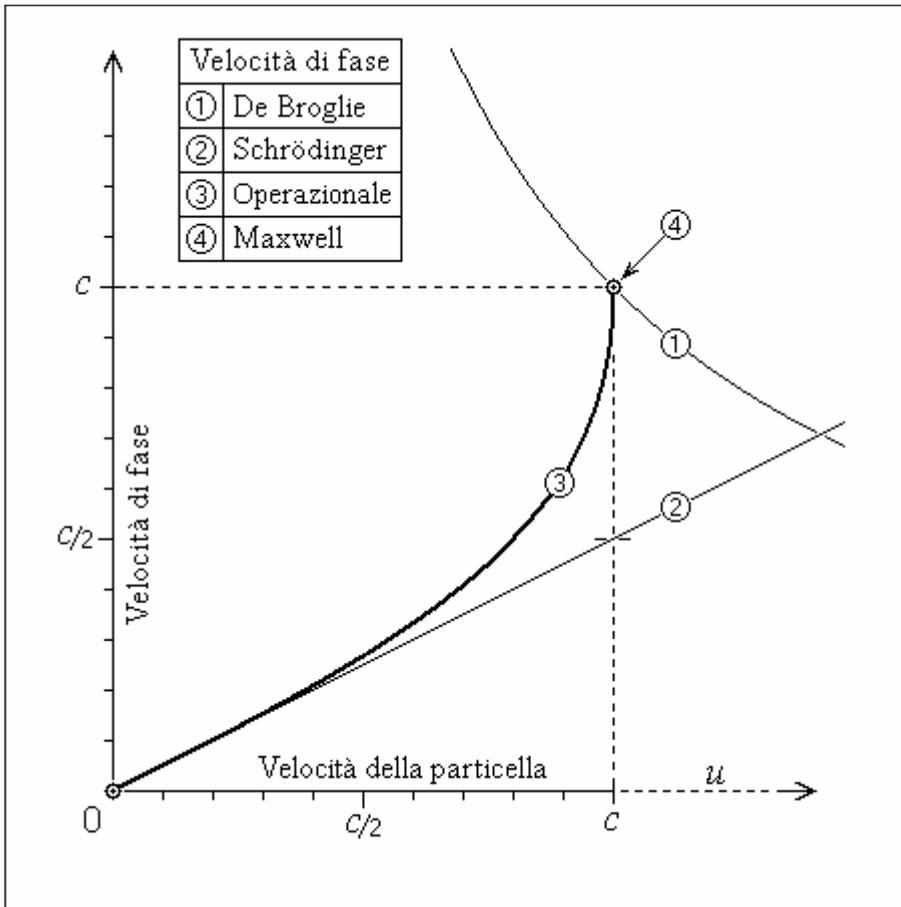
$$\text{De Broglie:} \quad V_B = \frac{c^2}{u}.$$

$$\text{Schrödinger:} \quad V_S = \frac{u}{2}.$$

$$\text{Operazionale:} \quad V_\phi = \frac{u}{1 + 1/\gamma}$$

I grafici sono riportati nella figura successiva. Sull'asse orizzontale abbiamo la velocità della particella, mentre l'asse verticale corrisponde alla velocità di fase.

Definiamo *zona reale* il campo delle velocità $u \leq c$, che riguarda tutti i fenomeni fisici che avvengono nel vuoto. Il punto (4), nell'angolo in alto a destra della *zona reale*, riguarda soltanto la radiazione nel vuoto, e pertanto è associato alla teoria di Maxwell.



- La curva (1) rappresenta la curva di de Broglie. È un ramo di iperbole passante per il punto di Maxwell, per il resto questo grafico è completamente esterno alla *zona reale*. De Broglie voleva estendere alle particelle materiali le proprietà ondulatorie della radiazione, ma il suo parametro ha un solo punto appartenente alla *zona reale*, che coincide col punto elettromagnetico di Maxwell. La contraddizione è lampante.

- La semiretta (2) deriva dalla teoria di Schrödinger, parte dall'origine e si estende illimitatamente. La teoria si basa su parametri non-relativistici, quindi vale soltanto per velocità $u \ll c$.
- La curva (3) rappresenta la *velocità di fase operativa* V_ϕ . Vediamo che si sovrappone alla linea di Schrödinger per $u \ll c$, comincia a differenziarsi al limite di validità della teoria di Schrödinger, e termina nel punto di Maxwell, dopo il quale assume valori immaginari. L'evidenza grafica mostra chiaramente che la *formulazione operativa* vale senza interruzione per qualsiasi velocità $u \leq c$.

Dal grafico di V_ϕ si evince chiaramente l'essenza unitaria di Meccanica ed Elettromagnetismo. Abbiamo un'altra conferma che tutti i fenomeni di propagazione ondulatoria nel vuoto hanno la stessa origine.

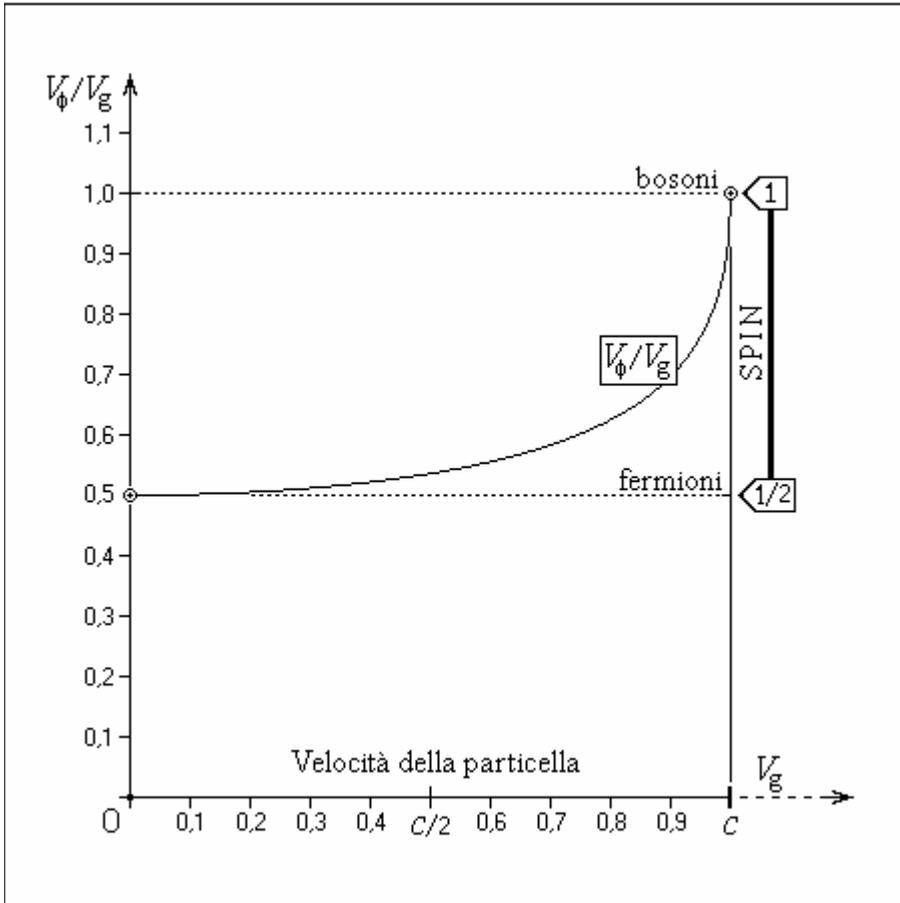
COINCIDENZE ?

Dai *parametri operazionali* ricaviamo il rapporto seguente:

$$V_\phi/V_g = 1/(1+1/\gamma).$$

Il grafico di questa espressione è riportato nella figura successiva. Si segnala la singolare circostanza che i limiti di questa espressione coincidono esattamente con i valori di *spin* ben noti. Per la particella *non-relativistica* abbiamo $V_\phi/V_g = 1/2$, che corrisponde al valore di *spin fermionico* in termini di \hbar , mentre per il fotone risulta $V_\phi/V_g = 1$, che coincide col valore di *spin bosonico*.

Se lo *spin* fosse legato alla velocità in questo modo, alla velocità $u = 0,94 c$ le particelle sarebbero associate al valore di *spin* di $(3/4)\hbar$. Le polarizzazioni circolari destra o sinistra del fotone si potrebbero interpretare come valori opposti di *spin*, ed estendere quindi lo stesso concetto alle particelle materiali. È possibile verificare questa ipotesi per via sperimentale.



Nella nostra analisi incontriamo molte coincidenze, spesso altamente significative, che complessivamente sono in numero troppo elevato per essere classificate sbrigativamente come “coincidenze matematiche senza significato fisico”. È inevitabile una forte percezione di consistenza della *Meccanica operativa* con la realtà fisica, avendo insieme chiara consapevolezza che sia necessario ancora molto lavoro di ricerca e di approfondimento.

RELAZIONI PRELIMINARI

Si definisce relazione di dispersione quella che esiste fra la frequenza ω e il numero d'onde k . Da questa relazione si ricava l'equazione d'onda che descrive l'evoluzione del fenomeno ondulatorio. Nella Teoria delle onde si usa un parametro detto funzione d'onda Ψ , che rappresenta una grandezza fisica periodica (per es. nelle onde marine rappresenta l'altezza della superficie liquida in ogni punto in funzione del tempo).

La sua espressione è:

$$\Psi(\mathbf{x}, t; k, \omega) = \exp i(kx - \omega t).$$

Nel seguito i parametri ω e k non saranno esplicitati per consentire un confronto più diretto fra espressioni derivate da teorie differenti.

Differenziamo la funzione Ψ rispetto al tempo:

$$\frac{\partial}{\partial t} \Psi = -i\omega \Psi \quad \Rightarrow \quad \boxed{\omega = \frac{i}{\Psi} \frac{\partial}{\partial t} \Psi}$$

Differenziamo due volte rispetto al tempo:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \Psi = -\omega^2 \Psi \quad \Rightarrow \quad \boxed{\omega^2 = -\frac{1}{\Psi} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \Psi}$$

Differenziamo la Ψ due volte rispetto a x_1, x_2, x_3 :

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} \Psi + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} \Psi + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \Psi \right) = -k^2 \Psi.$$

Si introduce in questa espressione l'operatore di Laplace:

$$\nabla^2 \equiv \left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \right).$$

Si ottiene:

$$k^2 = -\frac{1}{\psi} \nabla^2 \psi$$

EQUAZIONE DI KLEIN-GORDON.

Le *equazioni d'onda* relative alla propagazione nel vuoto si possono ricavare seguendo diversi procedimenti, tuttavia applicheremo un procedimento molto semplice, dal quale si evince chiaramente la stessa origine relativistica. Partiamo dalla relazione fondamentale di Einstein:

$$E = m c^2 \gamma$$

$$E^2(1 - u^2/c^2) = m^2 c^4$$

$$E^2 - c^2 m^2 u^2 \gamma^2 = m^2 c^4$$

$$E^2 - c^2 p^2 = (E_0)^2$$

Questa è probabilmente la relazione più citata e “venerata” da molti fisici teorici. Sostituendo i parametri di de Broglie $E = \hbar \omega_B$ e $p = \hbar k_B$, abbiamo la seguente relazione di dispersione:

$$\omega_B^2 - c^2 k_B^2 = \frac{m^2 c^4}{\hbar^2}.$$

Sostituendo le precedenti espressioni differenziali di ω^2 e k^2 , ricaviamo subito la seguente equazione d'onda di Klein-Gordon:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi - \nabla^2 \psi = -\frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \psi$$

Questa equazione è congruente con la teoria di de Broglie e con la formulazione 4-dimensionale di Minkowski, quindi aveva suscitato grande interesse fra i teorici. Gli studi successivi hanno smentito tutte le attese.

Nella Fisica teorica esiste un “dogma” che attribuisce automaticamente la qualifica “relativistica” soltanto a ciò che fa riferimento all’espressione $E^2 - c^2 p^2 = (E_0)^2$. Questo vale per la teoria di de Broglie e per l’equazione Klein-Gordon. Occorre notare che la relazione $E^2 - c^2 p^2 = (E_0)^2$ riguarda l’energia di riposo E_0 , quantità non disponibile nelle interazioni d’urto, a cui non partecipa in nessun modo. Da questo derivano le assurde proprietà della velocità di fase di de Broglie $V_B = c^2/u$, ed il fatto che l’equazione di Klein-Gordon è del tutto incompatibile con i fatti sperimentali. Questo prova che il “dogma” teorico dominante è sbagliato. Lasciamo dunque i dogmi alle religioni!

EQUAZIONE GENERALE DELLA MECCANICA ONDULATORIA

I parametri ondulatori *operazionali* valgono per qualsiasi velocità $u \leq c$, pertanto sono riferibili sia a particelle materiali sia alla radiazione. La stessa proprietà vale per l’inedita equazione d’onda correlata ai parametri *operazionali*, che ricaveremo ancora dalle relazioni fondamentali di Einstein:

$$E = m c^2 \gamma \rightarrow E^2 - c^2 p^2 = (E_0)^2$$

$$E^2 + [(E_0)^2 - 2 E E_0] - c^2 p^2 = (E_0)^2 + [(E_0)^2 - 2 E E_0]$$

$$(E - E_0)^2 - c^2 p^2 = -2 E_0 (E - E_0)$$

Essendo $p = m u \gamma$, per $u = 0 \Rightarrow p_0 = 0$, possiamo scrivere:

$$(E - E_0)^2 - c^2 (p - p_0)^2 = -2 E_0 (E - E_0).$$

Poniamo $\Delta E = E - E_0$ e $\Delta p = p - p_0$, quindi abbiamo:

$\Delta E^2 - c^2 \Delta p^2 = -2 m c^2 \Delta E$

Ricordiamo che $\Delta E = m c^2 (\gamma - 1)$ e $\Delta p = m u \gamma$ sono quantità disponibili scambiate nelle interazioni d’urto.

Abbiamo visto che un dogma teorico “assoluto e indiscutibile “ vuole che siano “relativistiche” soltanto le formulazioni che fanno riferimento alla relazione $E^2 - c^2 p^2 = (E_0)^2$, che in ultima analisi tratta dell’energia costante $E_0 = mc^2$. La *Meccanica operativa* invece trae origine dalla espressione relativistica $\Delta E^2 - c^2 \Delta p^2 = -2mc^2 \Delta E$, che non tratta della quantità costante $E_0 = mc^2$, ma della relazione fra le quantità ΔE e Δp , quantità totalmente disponibili nelle interazioni d’urto. Sostituendo in questa relazione i *parametri operazionali* $\Delta E = \hbar \omega_\phi$ e $\Delta p = \hbar k_\phi$ si ottiene subito la relazione di dispersione operativa:

$$\omega_\phi^2 - c^2 k_\phi^2 = -\frac{2mc^2}{\hbar} \omega_\phi.$$

Dalle precedenti espressioni differenziali di ω , ω^2 , k^2 , si ricava l’equazione d’onda della Meccanica operativa:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi - \nabla^2 \psi = i \frac{2m}{\hbar} \frac{\partial}{\partial t} \psi$$

Questa espressione inedita vale per qualunque oggetto fisico, particelle materiali e fotoni, pertanto il suo campo di applicazione si estende senza interruzione dalla particella ferma fino alla velocità della luce. La validità di questa equazione d’onda è provata dal fatto che da essa si ricavano espressioni ben note e ampiamente verificate, come la famosa equazione di Schrödinger per la particella libera, e l’equazione di d’Alembert per la propagazione elettromagnetica nel vuoto.

Notiamo infatti che ponendo $m = 0$ (fotone) si ottiene subito:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi - \nabla^2 \psi = 0.$$

Questa è esattamente l’equazione d’onda di d’Alembert che riguarda la propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto.

Poniamo ora che la velocità delle particelle sia $u < c/10$. In questo caso si verifica facilmente che il primo termine dell'equazione d'onda operativa diventa trascurabile. Abbiamo infatti:

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi \right) / \left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi - \nabla^2 \psi \right) = \left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi \right) / \left(i \frac{2m}{\hbar} \frac{\partial}{\partial t} \psi \right)$$

Per valutare questo rapporto riprendiamo le derivate della funzione d'onda rispetto al tempo, essendo $\omega_0 = mc^2 (\gamma - 1) / \hbar$, si ottiene:

$$\left(\psi \frac{\omega^2}{c^2} \right) / \left(\psi \frac{2m\omega}{\hbar} \right) = \frac{mc^2 (\gamma - 1)}{2mc^2} = \frac{1}{2} (\gamma - 1)$$

Per $u \leq c/10$ abbiamo:

$$\frac{1}{2} (\gamma - 1) \leq \frac{1}{2\sqrt{1-10^{-2}}} - \frac{1}{2} = 0,0025189$$

Nell'atomo di Idrogeno la velocità orbitale dell'elettrone nello stato fondamentale è $u = c/137$:

$$\frac{1}{2} (\gamma - 1) = \frac{1}{2\sqrt{1-(1/137)^2}} - \frac{1}{2} = 0,00001332.$$

In questo caso il termine del second'ordine vale un errore di circa uno su centomila, molto inferiore a quello osservabile nella meccanica atomica. In questo campo di applicazioni l'equazione d'onda operativa si può scrivere nella forma seguente:

$$-\nabla^2 \psi = i \frac{2m}{\hbar} \frac{\partial}{\partial t} \psi$$

Con facili aggiustamenti diventa:

$$i \hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi$$

Questa è la famosa *equazione di Schrödinger per la particella libera*, ben nota a tutti i fisici da circa 80 anni.

Abbiamo provato che dall'*equazione d'onda operazionale* si ricavano come casi particolari sia l'equazione fondamentale di Schrödinger per la particella libera, sia l'equazione di d'Alembert per la propagazione elettromagnetica nel vuoto.

L'equazione di Schrödinger è il fondamento della Meccanica ondulatoria, ma non vale oltre il 10% della velocità della luce. D'altra parte l'equazione d'onda di d'Alembert per la radiazione elettromagnetica vale solo per $u = c$. Così rimane scoperto più del 90% dell'intervallo di velocità che hanno senso fisico.

La nuova *equazione d'onda operazionale* vale per qualsiasi velocità $u \leq c$, e si applica al moto di qualunque oggetto fisico, particelle materiali e fotoni, per queste ottime ragioni sarà definita:

equazione generale della Meccanica ondulatoria .

Si conferma ancora una volta che effetti quantistici ed onde elettromagnetiche sono tutti fenomeni comunque riconducibili al *terzo effetto relativistico* .

SULLA FUNZIONE D'ONDA

Nella *Teoria delle onde* la funzione d'onda rappresenta una grandezza reale che varia periodicamente. Per le onde sull'acqua rappresenta l'altezza (o la profondità) dell'onda in un dato punto ad un dato istante, per le onde sonore esprime la pressione dell'aria, per una corda vibrante esprime lo spostamento fisico della corda dalla sua posizione di riposo. Infine per la radiazione la funzione d'onda rappresenta l'intensità del campo elettrico che varia periodicamente con frequenza $\omega_E = W/\hbar$.

In questi casi il significato della funzione d'onda è chiaro, rappresenta sempre una grandezza fisica reale (la coordinata di una corda che oscilla, la pressione dell'aria, il campo elettrico, ecc.) legata all'energia che si propaga in forma ondulatoria. Questo non avviene per l'equazione di Schrödinger, che è notevolmente diversa da quella di d'Alembert, e tuttavia Schrödinger era orientato verso una interpretazione di tipo ondulatorio.

Max Born propose di considerare $|\psi|^2$ come probabilità di trovare la particella in una data posizione, senza fare alcun riferimento all'energia che si manifesta in forma ondulatoria. Oggi l'idea di Born è universalmente accettata, sebbene sia del tutto estranea alla Teoria delle onde.

Abbiamo visto che dalla *equazione d'onda generale* si ricava sia l'equazione di d'Alembert, sia quella di Schrödinger, questo implica che l'interpretazione sia **univoca** per la radiazione e per le particelle materiali. Infatti nelle interazioni l'energia del fotone $W = \hbar \omega_E$ ha lo stesso ruolo dell'energia $\Delta E = \hbar \omega_\phi$. In ogni caso la traccia lasciata sull'emulsione della lastra fotografica non indica la posizione in cui si trova la particella, come vorrebbe l'interpretazione di Born, ma la posizione dove la particella ha ceduto l'energia ΔE , o W se si tratta di un fotone. In conclusione ripetiamo che l'*equazione d'onda generale* porta a concepire una **interpretazione univoca della funzione d'onda**.

L'interpretazione di Born si è rivelata estremamente utile, ma appare possibile che non sia definitiva, per cui riteniamo che sarebbe auspicabile riaprire questa problematica ad ulteriori riflessioni.

UN MISTERO INUTILE: IL “DUALISMO ONDA-PARTICELLA”

Miriadi di fotografie mostrano particelle elementari che si urtano e rimbalzano come bocce, ma dalle particelle elementari si ottengono facilmente anche figure di diffrazione del tutto simili a quelle prodotte dalla luce, che inevitabilmente hanno una interpretazione di tipo ondulatorio. Tutti i tentativi di associare a questi effetti onde “reali” sono falliti, gli effetti ondulatori prodotti da particelle materiali sono “reali”, ma le “onde reali” non si trovano.

Allora è prevalsa l’interpretazione che fa riferimento a combinazioni di *onde-di-probabilità*, che si propagherebbero con la velocità di fase di de Broglie, cioè a velocità migliaia di volte maggiore della velocità della luce. Sebbene sostenuta da fisici di grandissimo valore, questa interpretazione non è senza problemi, per es. non si capisce quale significato fisico abbia la velocità di fase di un’onda-di-probabilità, e perché questa sia proprio la velocità di fase di de Broglie, ignorando la velocità di fase di Schrödinger che riguarda la stessa situazione fisica, ed ha interpretato i dati sperimentali con grande successo. Un calcolo banalissimo mostra che mentre l’elettrone percorre una sola orbita dell’atomo di idrogeno, nello stesso tempo le orbite percorse con la velocità di fase di de Broglie sarebbero:

$$V_B / u = 137^2 = 18.769 \quad !!!$$

È molto difficile credere che la formidabile stabilità della struttura atomica abbia qualche relazione con la velocità pazzesca voluta da questa teoria. Saggiamente de Broglie pensava che questa assurda *velocità teorica* potesse riferirsi soltanto ad un’*onda fittizia*. Oggi molti fisici sperimentali sono convinti della “*realtà*” delle *onde-di-materia*, mentre i fisici teorici spiegano questi fenomeni in termini di *onde-di-probabilità*. Non risulta che *materia* e *probabilità* siano sinonimi equivalenti, quindi non si capisce come conciliare i termini *onde-di-materia* e *onde-di-probabilità*.

È evidente che regna ancora grande confusione.

Quando non si trova la spiegazione giusta, si trovano le parole giuste per nascondere la nostra ignoranza, spesso sono efficaci tranquillanti! Buttandola in Filosofia i fisici non hanno più necessità di capire, è sufficiente che statisticamente i risultati di complicatissimi calcoli teorici siano in accordo con i risultati sperimentali.

Nel 1913 il danese Bohr riuscì a spiegare la stabilità della struttura atomica partendo dall'ipotesi le orbite elettroniche fossero determinate da poche regole empiriche. Queste regole furono spiegate molti anni dopo dalla teoria quantistica, attribuendo alle particelle elementari caratteristiche tipicamente corpuscolari e ondulatorie insieme.

Sull'interpretazione della funzione d'onda nacque una lunga e durissima controversia che vide schierati su opposti fronti Einstein, de Broglie, e Schrödinger per una interpretazione "realistica", mentre sull'altro fronte Bohr, Born, Heisenberg, difendevano l'interpretazione "probabilistica". Su questa epica controversia il lettore interessato potrà consultare una vasta letteratura, in cui elementi rigorosamente scientifici sono mescolati a considerazioni filosofiche, e vicende di carattere strettamente personale. Coloro che non conoscono l'ambiente della Fisica teorica difficilmente possono immaginare l'alto livello di animosità dei contendenti, che si batterono per lunghi anni senza risparmio di energie intellettuali.

Alla fine prevalse l'interpretazione di Bohr, detta "di Copenaghen", che si basa sul *principio di complementarietà*, per il quale le manifestazioni ondulatorie e corpuscolari sarebbero effetti "*complementari*" determinati dall'apparato sperimentale dell'osservatore.

Schrödinger considerava la "*complementarietà*" di Bohr un concetto vago e fumoso, che nascondeva essenzialmente l'ignoranza dei fenomeni. Nonostante ciò questa interpretazione è diventata uno dei fondamenti assiomatici della teoria quantistica. I fatti sperimentali sono indiscutibili, ma l'interpretazione corpuscolare e quella ondulatoria sono inconciliabili. Il *dualismo onda-corpuscolo* è rimasto quindi un fatto misterioso che sfugge ad ogni possibilità di comprensione, per cui nel linguaggio comune si è affermata l'interpretazione più semplice:

“se le particelle elementari manifestano effetti corpuscolari ed ondulatori, ciò significa che per loro natura sono insieme corpuscoli e onde”.

Questa affermazione è incomprensibile, non è sostenuta da sicure evidenze sperimentali, e sarebbe invalidata dal Principio operativo.

Nell'introduzione abbiamo riportato l'espressione di Feynman:

“...Neppure io lo capisco. Nessuno lo capisce...”.

Soltanto pazzi o sciocchi presuntuosi possono mettere in dubbio le parole del premio Nobel Feynman, e nessun fisico vuole essere giudicato pazzo o sciocco. Dopo anni di inutili tentativi molti teorici avranno concluso :

“Questa cosa non la capisco, ma se non la capisce nemmeno Feynman allora non la può capire nessuno!”

Così i “Padri Fondatori” hanno stabilito per postulato che il *dualismo* sia una proprietà intrinseca del mondo atomico, incomprensibile per il nostro pensiero strutturato sull'esperienza macroscopica e deterministica. Alla fine il *dualismo* è stato assunto come assioma, troppo simile ad un Mistero di Fede, da credere senza pretendere di capire. Così è diventato il grande Atto di Fede della Ortodossia fisica del ventesimo secolo.

Molte volte le interpretazioni più evidenti sono state scelte assiomaticamente, poi condivise e sostenute con grande determinazione e per lungo tempo da tutta la comunità, fino a quando si è finalmente capito che erano completamente sbagliate. Riteniamo che il *dualismo* delle particelle elementari potrebbe essere un ottimo candidato da proporre per il “*Club degli Assiomi Evidenti*”, che annovera fra i suoi soci più insigni la *Terra piatta*, la *Cosmologia geocentrica*, l'*Impossibilità del volo umano*, l'*Etere luminifero*

Qualsiasi fenomeno ondulatorio, anche l'onda stazionaria, è sempre accompagnato da parametri che variano periodicamente, mentre non si conosce niente di simile riferibile a particelle ferme, quindi l'effetto ondulatorio non può derivare da una caratteristica intrinseca delle particelle. Questo invalida definitivamente la teoria di de Broglie. D'altra parte i brillanti risultati della teoria di Schrödinger sono limitati al campo *non-relativistico*, a cui si deve aggiungere il fatto che l'interpretazione della funzione d'onda è stata controversa per molto tempo.

De Broglie ha fallito applicando la legge di Planck all'energia relativistica totale delle particelle materiali, da cui ha ottenuto una velocità di fase con caratteristiche assurde. Schrödinger invece ha ottenuto una equazione d'onda di grande successo facendo riferimento solo all'energia cinetica, sebbene nella versione classica.

È un altro importante indizio della stretta analogia esistente fra l'energia elettromagnetica W dei fotoni e l'energia cinetica degli oggetti materiali. Dall'espressione relativistica dell'energia cinetica abbiamo ottenuto la *trasformazione generale dell'energia*, valida anche per l'energia elettromagnetica, questo risultato è molto più che un indizio. Ne abbiamo ricavato nuovi parametri ondulatori validi per qualsiasi oggetto fisico e per qualsiasi velocità $u \leq c$. Il grafico della *velocità di fase operativa* evidenzia in modo eclatante la completa continuità fra Meccanica ed Elettromagnetismo.

Dalla Relatività abbiamo ricavato l'*equazione d'onda generale*, da cui si ottiene sia l'equazione d'onda elettromagnetica di d'Alembert, sia quella classica di Schrödinger per le particelle materiali. Da tutto questo emerge un quadro unitario per cui dobbiamo considerare l'energia cinetica e quella elettromagnetica come due manifestazioni differenti dello stesso fenomeno. In altre parole risulta che:

l'energia cinetica di oggetti fisici privi di massa (fotoni)
si manifesta come energia elettromagnetica.

Per conseguenza l'espressione *onde-di-materia* si deve sostituire con quella più appropriata di *onde-di-energia-cinetica*, che comprende anche le onde della radiazione elettromagnetica. Se l'energia elettromagnetica si considera come energia cinetica degli oggetti privi di massa, si capisce che le proprietà ondulatorie della luce, la stabilità dei livelli atomici, la diffrazione degli elettroni, ecc., sono in realtà tutte manifestazioni diverse della natura elettromagnetica dello *spazio-tempo fisico*.

Come avvenne per il fantomatico *etere luminifero* del 1800, dalla *Meccanica operativa* si deduce che sarebbe inutile anche il misterioso *dualismo onda-corpuscolo* del 1900. Riteniamo che una adeguata considerazione del *terzo effetto relativistico* porterà ad una profonda revisione delle stesse basi concettuali della teoria quantistica.

È un altro importante indizio della stretta analogia esistente fra l'energia elettromagnetica W dei fotoni e l'energia cinetica degli oggetti materiali. Dall'espressione relativistica dell'energia cinetica abbiamo ottenuto la *trasformazione generale dell'energia*, valida anche per l'energia elettromagnetica, questo risultato è molto più che un indizio. Ne abbiamo ricavato nuovi parametri ondulatori validi per qualsiasi oggetto fisico e per qualsiasi velocità $u \leq c$. Il grafico della *velocità di fase operativa* evidenzia in modo eclatante la completa continuità fra Meccanica ed Elettromagnetismo.

Dalla Relatività abbiamo ricavato l'*equazione d'onda generale*, da cui si ottiene sia l'equazione d'onda elettromagnetica di d'Alembert, sia quella classica di Schrödinger per le particelle materiali. Da tutto questo emerge un quadro unitario per cui dobbiamo considerare l'energia cinetica e quella elettromagnetica come due manifestazioni differenti dello stesso fenomeno. In altre parole risulta che:

*l'energia cinetica di oggetti fisici privi di massa (fotoni)
si manifesta come energia elettromagnetica.*

Per conseguenza l'espressione *onde-di-materia* si deve sostituire con quella più appropriata di *onde-di-energia-cinetica*, che comprende anche le onde della radiazione elettromagnetica. Se l'energia elettromagnetica si considera come energia cinetica degli oggetti privi di massa, si capisce che le proprietà ondulatorie della luce, la stabilità dei livelli atomici, la diffrazione degli elettroni, ecc., sono in realtà tutte manifestazioni diverse della natura elettromagnetica dello *spazio-tempo fisico*.

Come avvenne per il fantomatico *etere luminifero* del 1800, dalla *Meccanica operativa* si deduce che sarebbe inutile anche il misterioso *dualismo onda-corpuscolo* del 1900. Riteniamo che una adeguata considerazione del *terzo effetto relativistico* porterà ad una profonda revisione delle stesse basi concettuali della teoria quantistica.

Tutti i diritti riservati
Copyright © 2009 by Lucio Ossino

lucio.f.ossino@tiscali.it

Prima edizione luglio 2009.