Ipotesi sulle onde stazionarie di materia

Sommario

Premessa - Difficoltà di interpretazione della meccanica quantistica

1 Fenomeni di meccanica quantistica e riflessioni.
- 1.1 Lo spettro del corpo nero di Planck
- 1.2 Interferenza e diffrazione delle particelle - Onde reali
- 1.3 Descrizione matematica dell'elettrone.
- 1.4 Il confinamento mediante onde stazionarie.
- 1.5 Energia di punto zero del vuoto.
- 1.6 Il principio della minima azione.
- 1.7 L'integrale sui cammini di Feynman.
- 1.8. L'esperimento di Afshar.
- 1.9 Correlazione fra principio d'indeterminazione e non-località
- 1.10 Incompatibilità tra probabilità e meccanica quantistica
- 1.11 L'esperimento 'a scelta ritardata' di Wheeler

2. Alcune interpretazioni della meccanica quantistica.
- 2.1 L'interpretazione di Bohm.
- 2.2 L'interpretazione transazionale
- 2.3 L'interpretazione (personale) con le onde stazionarie.

3. Le Onde
- 3.1 Onde armoniche
- 3.2 Onde in moto (nello spazio e nel tempo)
- 3.3 Onde stazionarie (onde stabili).

4. Le onde stazionarie con la serie di Fourier
- 4.1 Funzioni pari e dispari
- 4.2 La serie di Fourier con solo seni (armoniche)
- 4.3 Punto spaziale e Onda di armoniche
- 4.4 Onde stazionarie e Pacchetto d'onde
- 4.5 Aspetto ondulatorio e corpuscolare
- 4.6 Vuoto quantomeccanico e pacchetto d'onda.

5. Equazione del campo ed energia dell'onda stazionaria
- 5.1 Onda stazionaria come equazione del campo
- 5.2 Energia dell'onda stazionaria

6. Quanto d'onda e Relatività Ristretta
- 6.1 Relatività e Spazio-Tempo
- 6.2 Quanto, Treno d'onde e Spazio-Tempo
- 6.3 Quanto di Planck e Principio di Minima Azione
- 6.4 Leggi di conservazione e analisi dimensionale

7. Onde stazionarie e Pacchetto d'onde
7.1 L'onda stazionaria e lo Spazio Tempo
7.2 Pacchetto d'onde e frequenze
7.3 Pacchetto d'onde e particella
7.4 Considerazioni sulla particella/pacchetto d'onda

8. L'Effetto Doppler nell'onda stazionaria e la Relatività Ristretta
8.1 L'effetto Doppler nel suono
8.2 L'effetto Doppler nella luce
8.3 L'effetto Doppler nell'onda stazionaria

9. Il Pacchetto d'onde
9.1 Quantizzazione del campo elettromagnetico
9.2 Onde di diversa frequenza ma con uguale energia

10. Il pacchetto d'onde e i dati sperimentali.
10.1 Il Principio di Indeterminazione e la diffrazione.
10.2 Interferenza del fascio di particelle attraverso 2 fessure.
10.3 L'effetto tunnel.
10.4 L'intreccio quantistico.
10.5 Il collasso della funzione d'onda.
10.6 Interferenza di particelle singole.
10.7 L'esperimento a scelta ritardata di Wheeler.

11. Confronto delle tre interpretazioni
11.1 Energia, materia oscura e vuoto quantistico.
11.2 Divagazioni sul concetto di Universo.

Appendice
Analisi dimensionale
Principio di minima azione
Assiomi sullo spazio e il tempo.
Equazione d'onda di Schrödinger.
Fenomeni quantistici con le onde stazionarie.

«La fisica non è una rappresentazione della realtà, ma del nostro modo di pensare ad essa »

(Werner Heisenberg)

«A parità di fattori la spiegazione più semplice è da preferire»

(Guglielmo di Occam)

Premessa

Difficoltà di interpretazione della meccanica quantistica

Sebbene la meccanica quantistica abbia compiuto più di un secolo non si è ancora riusciti a trovare una sua interpretazione chiara e soddisfacente.
I fenomeni fisici di tale meccanica, nata con la scoperta del quanto h, sono studiati utilizzando l'equazione di Schrödinger ossia con la funzione d'onda ψ.
Occorre ricordare che Schrödinger aveva proposto un'interpretazione reale della funzione ψ, considerando l'elettrone composto da un pacchetto d'onde di carica totale –e. Questa interpretazione fu subito criticata poiché si è ritenuto che il pacchetto d'onde non possieda la coesione necessaria per descrivere l'indivisibilità della carica dell'elettrone.
All'interpretazione dell'onda come densità di materia di Schrödinger ha prevalso quindi, l'interpretazione dell'onda come densità di probabilità di Born.
Tale interpretazione probabilistica della funzione d'onda, oltre a dare inizio ad una concezione sempre più astratta della realtà, non dà delle risposte soddisfacenti a numerosi risultati sperimentali, per cui, ritengo, che si sia abbandonato prematuramente l'interpretazione reale della funzione d'onda con il suo pacchetto d'onde.

Possiamo fare diverse osservazioni ai modelli teorici della meccanica quantistica: ad esempio ciò che definiamo come antimateria non dovrebbe equivalere alla materia ordinaria con carica elettrica opposta (con l'energia negativa ipotizzata da Dirac) ma all'antimassa con attrazione gravitazionale negativa.

Il pacchetto d'onda, ad esempio, può conservarsi stabile nel tempo se lo consideriamo costituito da solitoni.

Avendo ben presente quanto espresso da Feynman, uno dei maggiori fisici del XXI secolo, sulla sua difficoltà di interpretare la fisica quantistica, consapevole di poter esprimere delle assurdità esporrò una mia rappresentazione della fisica quantistica riportando indizi e riflessioni. [1]

1. Fenomeni di meccanica quantistica e riflessioni.

(David Bohm, On Quantum Physics, 1987)

I fisici invece di chiedersi perché le onde appaiono in certe circostanze come corpuscoli si chiesero perché i corpuscoli in certe circostanze appaiono come onde …. Al presente i fisici quantistici tendono ad evitare il problema adottando l'attitudine per la quale le nostre visioni generali riguardanti la natura della realtà sono di poca o nulla importanza. Si suppone che tutto quello che conta nella teoria fisica, sia lo sviluppo di equazioni matematiche che ci permettano di prevedere e controllare il comportamento di grandi aggregati statistici di particelle. Tale obiettivo non è considerato solo per la sua utilità pragmatica e tecnica: è divenuto un presupposto di molto del lavoro nella fisica moderna, che la predizione e il controllo di questo tipo sia tutto quello che riguardi la conoscenza umana.

Il principale problema della fisica moderna è che la meccanica quantistica fornisce solo la probabilità di un risultato sperimentale. Permette solo di predire statisticamente i risultati dei vari esperimenti. La fisica è cambiata dalla sua precedente forma, quando cercava di spiegare le cose e fornire una qualche immagine fisica. Ora l'essenza è considerata matematica. Si pensa che la verità sia nelle formule. Ora possono trovare un algoritmo col quale sperano di spiegare un'ampia gamma di risultati sperimentali, ma conterrà ancora inconsistenze. Sperano di poter infine spiegare tutti i risultati che si potrebbero ottenere, ma questa è solo una speranza.

L'interpretazione causale dice che l'elettrone è una particella, ma possiede anche un campo attorno. La particella non è mai separata da tale campo e il campo influisce sul movimento della particella in certi modi.
Le interconnessioni quantistiche inseparabili dell'intero universo sono la realtà fondamentale e che le parti che si comportano come relativamente indipendenti, siano solamente forme contingenti e particolari di questa totalità.
La fisica classica dice che la realtà è veramente fatta di piccole particelle che separano il mondo in elementi indipendenti. Ora propongo l'inverso, che la realtà fondamentale sia il ripiegamento e il dispiegamento e queste particelle siano le astrazioni derivanti. Noi potremmo descrivere l'elettrone non come particella che esiste in modo continuo, ma come qualcosa che entra ed esce e ritorna ancora. Se queste varie condensazioni sono vicine, approssimano una traccia. L'elettrone stesso non può mai essere separato dalla totalità dello spazio, che è il suo terreno. [2]

1.1 Interferenza e diffrazione delle particelle - Onde reali (De Broglie 1964).

Di fronte a fenomeni di interferenza e di diffrazione (delle particelle), un fisico, senza una teoria preconcetta, si vede obbligato a credere che si tratta della propagazione di onde reali, e non una semplice rappresentazione di una probabilità che solo esiste nella sua mente.

1.2 Lo spettro del corpo nero di Planck

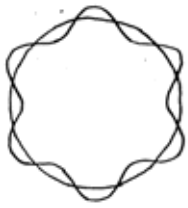
La meccanica quantistica è nata casualmente poiché si voleva dare una spiegazione allo strano comportamento dello spettro emesso dal *corpo nero*.
In fisica viene definito *corpo nero* un oggetto che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente. Esso, per il principio di conservazione dell'energia, irradia tutta l'energia assorbita e deve il suo nome solo all'assenza di riflessione. Lo spettro di un corpo nero (intensità della radiazione emessa ad ogni lunghezza d'onda) è caratteristico e dipende unicamente dalla sua temperatura.
Le teorie matematiche, utilizzate per spiegare il fenomeno delle radiazioni, sembravano accertate sperimentalmente solo per alcuni intervalli di frequenza; per altri intervalli di frequenza, invece, venivano condotte conclusioni paradossali come la "*catastrofe ultravioletta*", che un corpo nero ideale in equilibrio termico emetterebbe radiazione con potenza infinita.
Con l'unico fine di trovare una formula il cui grafico fosse concorde con i dati sperimentale del corpo nero, Planck suppose che per ogni valore di frequenza v, l'energia del sistema potesse assumere solo valori quantizzati: $E = vh$ con v intero ed $h = 6{,}62*10^{-34}$ J*s .

1.3 Descrizione matematica dell'elettrone.

Un altro fenomeno fisico "strano", che ha contribuito alla formulazione della meccanica quantistica, era la stabilità di rotazione dell'elettrone (dotato di carica elettrica) attorno al nucleo dell'atomo.

Poiché dotato di carica elettrica, l'elettrone nel suo moto di rotazione (per effetto dell'accelerazione centripeta) doveva emettere radiazioni e, perdendo energia, cadere sul nucleo.

Si osservava, inoltre, che l'elettrone si stabilizzava attorno al nucleo solo quando la *lunghezza d'onda* dell'elettrone e quella della lunghezza dell'orbita convergevano su valori multipli interi.



Onda stazionaria chiusa

De Broglie ipotizzò che le orbite, come le *onde stazionarie* in una corda, potevano essere esaustivamente definite con un intero n, il numero quantico dell'orbita.

L'ipotesi di De Broglie, ampliata dagli studi di Schrödinger, sull'equazione delle onde elettroniche, risultò in perfetto accordo con le previsioni secondo il modello di Bohr. Il modello di De Broglie fisicamente non aveva introdotto nulla di nuovo, se non l'idea dell'estendibilità del dualismo onda particella a tutta la natura.

In seguito si è scoperto, grazie agli studi di altri fisici come Heisenberg, che gli elettroni non percorrono un'orbita ben definita ma si muovono in un modo non del tutto prevedibile in regioni di spazio chiamate *orbitali*.

Fisicamente è più corretto paragonare il movimento delle onde elettroniche a quello di onde in supporti tridimensionali, come i risuonatori di Helmholtz; questo spiega anche perché per definire un orbitale siano necessari tre numeri quantici e non uno: l'elettrone si comporta come un'onda stazionaria in una cavità. Tuttavia, mentre nei casi da noi considerati la regione di spazio che le onde possono percorrere è limitata dalle pareti del contenitore, nel caso degli orbitali le limitazioni sono costituite dalla forza elettrica che si stabilisce tra gli elettroni e il nucleo.

Quindi, tutta la materia è descrivibile fondamentalmente tramite tre numeri interi n,m,l.

L'orbitale (1s, 2s o 2p, eccetera) **è un *autostato*** (un particolare stato che fornisce una misura oggettiva) **rispetto all'osservabile *energia*, ma non è un autostato per l'osservabile *posizione***, **rispetto alla quale è invece uno "*stato di sovrapposizione*"**: cioè l'elettrone in questo stato (energetico) non può avere una posizione definita e appare sparpagliato nello spazio, in altre parole appare come una "*nuvola elettronica*" detta *funzione d'onda*.

Secondo alcuni fisici (tra cui Schrödinger), la funzione d'onda non ha un supporto materiale, si ritiene che essa stessa rappresenti e costituisca la cosiddetta materia, ed è una sorta di vibrazione nella struttura dello spazio-tempo.

All'atto della misura, l'elettrone sarà rivelato solo in un punto tra quelli possibili, in altre parole la "*funzione d'onda*" collasserebbe in quel singolo punto. La fisica non è in grado di prevedere quale punto sarà scelto, cioè è incapace di spiegare perché un punto sia preferito a un altro, e quindi sembra essere presente un elemento casuale, la famosa indeterminazione.

Per ragioni di principio, non è possibile prevedere quale valore effettivo si avrà all'atto della misura: a priori si ha soltanto una rosa di probabilità su certi valori definiti, chiamati *autovalori*, i quali, però, sono definiti con grande precisione. Vi è quindi una "indeterminazione" sui valori della misura. In realtà ciò non altera l'utilità delle applicazioni della meccanica quantistica, che in certi campi, come in spettroscopia, ottiene delle precisioni sbalorditive. In altre parole, *la statistica permette risultati molto precisi sul comportamento collettivo del sistema, ma indeterminati sulle singole particelle*. [3]

Nel formalismo matematico di Heisenberg la particella in moto si presenta come una somma di onde sinusoidali (sviluppo in serie di Fourier per un'orbita periodica). Essa appare come una sovrapposizione di moti armonici di frequenza ν, 2ν, 3ν, ... La frequenza ˆfondamentale' ν dipende, in generale, dall'orbita (cioè dai numeri quantici che definiscono lo stato stazionario).

Le ampiezze dei moti armonici componenti sono i coefficienti di Fourier (che vedremo più avanti). L'intera impalcatura del metodo di Bohr-Sommerfeld (cioè le equazioni classiche del moto e le regole quantiche) si può mettere sotto la forma di una serie di relazioni tra i coefficienti di Fourier e le relative frequenze.

L'idea di Heisenberg fu di sostituire, in queste relazioni, le componenti armoniche classiche con un insieme ˆcorrispondente' di componenti, le cui *frequenze* sono quelle fisicamente osservabili date dalla relazione di Bohr e le cui *ampiezze* e *frequenze*, sono assegnate ognuna a una determinata *transizione tra due stati stazionari*. Il modo naturale di assegnare indici a queste ampiezze è perciò di disporle in una matrice, le cui righe (e le cui colonne) sono numerate in corrispondenza con i livelli energetici $E1$, $E2$, $E3$, ... [4]

Quando esiste uno spettro continuo di autovalori, la somma diventa un integrale. Un esempio del genere si ha nel caso di particelle libere ($V = 0$), quando le autofunzioni sono semplici esponenziali $e^{ik\ x}$. La funzione d'onda è allora una sovrapposizione di onde piane (integrale di Fourier tridimensionale):

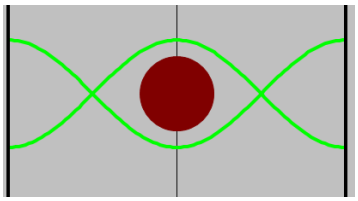
$$\psi(\boldsymbol{x}, t) = \int c(\boldsymbol{k}) e^{i(\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{x}-\omega t)} d\boldsymbol{k}$$

dove ω ≡ ω(*k*) e *d*k è l'elemento di volume nello 'spazio dei momenti'. **Sovrapponendo onde piane, si possono costruire in questo modo 'pacchetti di onda' di dimensioni finite**, che in assenza di forze esterne si muovono in linea retta e in presenza di un potenziale *V* si muovono lungo il cammino ricurvo che la particella percorrerebbe nel caso classico corrispondente.

Un pacchetto d'onde di carica −*e* (carica dell'elettrone) potrebbe quindi considerarsi come un interessante modello dell'elettrone.

Si anticipa che per l'elettrone in orbita attorno al nucleo vale il *principio di minima azione* (principio che verrà discusso più avanti), ossia la quantità di moto $p = mv$, esteso all'intera orbita chiusa *s*, è un multiplo intero *n* della costante di Planck *h*:
$mv * s = nh$, dove v è la velocità dell'elettrone ed *s* è la "lunghezza" dell'orbita (quantizzazione del momento angolare).
Si hanno due numeri quantici, uno dei quali determina l'*energia* e l'altro il *momento angolare*. Insieme essi determinano l'eccentricità dell'orbita. L'orientamento spaziale del piano dell'orbita rimarrebbe così ancora interamente arbitrario. La quantizzazione della *terza componente del momento angolare* permette di determinare gli assi attorno a cui ruota l'elettrone. Questi tre numeri: *n, l* ed *m* determinano gli orbitali.

1.4 Il confinamento mediante onde stazionarie.



Tale fenomeno fisico viene citato in quanto interessa la capacità che hanno le onde stazionarie di confinare la materia (energia) all'interno di nodi.
Il metodo per la *levitazione acustica* è descritto sulle pagine della rivista "*Proceedings of the National Academy of Sciences*" da Daniele Foresti e colleghi, del dipartimento d'Ingegneria meccanica del Politecnico di Zurigo.
Un'onda sonora, emessa da una superficie e riflessa da un'altra superficie posta di fronte, è in grado di tenere sospese piccole quantità di materia, come goccioline di liquido, che rimangono intrappolate in punti fissati denominati nodi.

1.5 Energia di punto zero del vuoto.

In fisica, l'energia di punto zero è il più basso livello energetico possibile in un sistema quantistico.
Dal principio d'indeterminazione di Heisenberg deriva che **il vuoto è permeato da un mare di fluttuazioni quantistiche che creano coppie di particelle e anti-particelle virtuali che si annichilano in un tempo inversamente proporzionale alla propria energia**.
Il contributo complessivo all'energia del vuoto è così mediamente diverso, e pari a: $hv/2$, dove *h* è la costante di Planck e *v* è la frequenza di un generico modo di vibrazione associabile alla lunghezza d'onda materiale delle particelle virtuali.

1.6 Il Principio della minima azione.

In fisica classica si è sempre considerato valido il *principio di causa ed effetto.* Per esempio: se do un calcio a un pallone esso, percorre una traiettoria parabolica da un punto A ad un punto B. Il passaggio dalla *causa* all'*effetto* avviene tramite una sequenza continua di eventi osservabili.
Tale Principio, tuttavia, non riesce a spiegare in che modo la luce, quando attraversa dei mezzi con diversi indici di rifrazione, percorre (trova) la traiettoria con il minimo tempo di percorrenza (principio di Fermat). Tale percorso è simile al percorso di un bagnino per raggiungere il bagnante nel minor tempo possibile *"problema del bagnino"*, tenuto conto che nella spiaggia corre a una velocità maggiore che nel mare.
Non si riesce a comprendere in che modo la luce tra le infinite traiettorie riesca a "trovare" quella di tempo minimo (che collega il punto iniziale A e il punto finale B). E' possibile che vi siano delle traiettorie invisibili che collegano i punti dello spazio?
Per spiegare la traiettoria della luce si è "considerata" la formula $S = m*v*l = minima$ (massa*velocità*spazio=minimo) definita come **principio di minima azione.**
Cioè **la traiettoria che congiunge due punti dello spazio è quella che minimizza l'azione S**.

Anziché predire l'evoluzione futura dalle condizioni iniziali, ***si parte da una conoscenza delle condizioni iniziali e finali quindi si trova il cammino tra esse, come se il sistema sapesse in qualche maniera dove stia andando.***
Supponiamo, ad esempio, di volere andare da Roma a Milano, il principio *di minima azione* ci dice che il moto deve essere tale che la combinazione*: lunghezza percorso - energia* (velocità) deve essere minima.
Un esempio più chiaro si ha considerando due punti (iniziale e finale), posti su una superficie convessa, collegati con una corda elastica. Tale corda si dispone lungo una curva tale da rendere minima la lunghezza e l'energia elastica.
L'**azione** S è una grandezza fisica che può essere espressa con un numero come: l'energia, il tempo, la massa, … ed ha le dimensioni uguali alla *quantità di moto*spazio (mv*l)* ossia alla *energia*tempo* (*E*t*) o, ancora, alla *costante di Planck h*.
Quando in natura avviene qualche cambiamento, quindi, la *quantità* di azione necessaria per questo cambiamento è la più piccola possibile: $S = m*v*l = minima$.
Questo principio è alla base della moderna metodologia matematica (equazioni di Lagrange) chiamata *calcolo delle variazioni*. Torneremo a parlare di tale principio nei capitoli 6.3 *Principio di minima azione* e 6.4 *Leggi di conservazione e analisi dimensionale ed in altri capitoli*.

1.7 L'integrale sui cammini di Feynman [5]

Uno dei "metodi matematici" per trovare la traiettoria della luce è *l'integrale sui cammini di Feynman.* Esso trova il percorso del fotone calcolando la risultante di tutti i possibili cammini della particella. Quasi tutti i cammini si annullano fra loro (interferenza distruttiva), alcuni, invece, interferiscono costruttivamente definendo il percorso. Questo metodo, deve considerarsi un procedimento esclusivamente matematico, infatti, ipotizza che una singola particella percorra infiniti cammini simultaneamente.

1.8 L'esperimento di Afshar. [6]

Uno dei più interessanti esperimenti della meccanica quantistica è l'esperimento di Afshar. Questo esperimento mette in discussione certi postulati della meccanica quantistica, poiché dimostra la **non validità del principio di complementarità.** In altre parole con questo esperimento può essere osservato contemporaneamente il duplice aspetto: *corpuscolare* e *ondulatorio* della particella.
Nell'esperimento di Afshar è possibile verificare, infatti, le frange d'interferenza di un flusso di fotoni e osservare contemporaneamente il percorso di ogni fotone. Da ciò discende che **molti fenomeni non possono essere osservati in chiave esclusivamente probabilistica** (legati all'osservatore e al tempo in cui l'esperimento si svolge), ma il fenomeno è riproducibile sempre e osservabile da qualsiasi osservatore.

1.9 Correlazione fra principio d'indeterminazione e non-località (Stephanie Wehner – Jonathan Oppenheim).

Uno degli aspetti peculiari della meccanica quantistica è il **principio di indeterminazione (**di Heisenberg), in base al quale **non è possibile conoscere simultaneamente con esattezza alcune proprietà di una particella, come la sua *posizione* e *velocità*.** Quanto più accurata è la determinazione della sua posizione, tanto più indeterminata diventa la sua velocità.
Il principio di non-località si manifesta nel fenomeno dell'entaglement (intreccio). Secondo tale principio due particelle intrecciate *(*si intendono intrecciate, ad esempio, due elettroni che occupano lo stesso orbitale), **si comportano come se una sapesse istantaneamente che cosa succeda all'altra anche se vengono poste a grande distanza**. Cioè si considera l'onda ψ (che descrive tutte e due gli elettroni) capace di adeguarsi immediatamente alla nuova frequenza. Non esisterebbe un fronte d'onda in moto; ma, attraverso ψ, tutto l'universo sarebbe in presa diretta!

Finora *non-località* (particelle non isolate) e *indeterminazione* erano considerati fenomeni distinti, tanto che il famoso esperimento mentale proposto da Einstein, Podolsky e Rosen (EPR), che considerava insoddisfacente la meccanica quantistica, era stato ideato proprio per cercare di dimostrare come il *principio di non-località* fosse in contraddizione con il *principio d'indeterminazione*.
Un legame fra, il *principio di indeterminazione* ed il *principio* di *non-località*, è stato scoperto da due ricercatori - *Stephanie Wehner della National University of Singapore e Jonathan Oppenheim dell'Università di Cambridge*, che sono riusciti a derivare un'equazione che mostra come **la "quantità" di non-località sia determinata dal principio d'indeterminazione**.

1.10 Incompatibilità tra probabilità e meccanica quantistica (Matthew F. Pusey, 14 Nov 2011).

La meccanica quantistica è famosa per la *funzione d'onda*, una potente ma misteriosa entità che viene utilizzata per determinare le *probabilità* che le particelle quantistiche possiedono.
In contrasto con il concetto *funzione d'onda-probababilità* il fisico **Pusey** e colleghi propongono un esperimento mentale nel quale, tramite un ragionamento per assurdo, si arriva a dimostrare che: **un'interpretazione puramente statistica (*probabilistica)* della funzione d'onda porta a contraddire le previsioni stesse della meccanica quantistica.**
Il teorema mostra che, se la funzione d'onda quantistica fosse uno strumento puramente statistico, allora anche gli stati quantistici che non sono spazialmente e temporalmente collegati sarebbero in grado di comunicare l'uno con l'altro. Dato che sembra molto improbabile che ciò sia vero, **i ricercatori concludono che la funzione d'onda deve essere fisicamente reale.**
(L'interpretazione: funzione d'onda = probabilità si rivela errata; infatti è uguale a ritenere che 2 dadi (che hanno un comportamento puramente probabilistico), siano tra loro interdipendenti. Pusey ritiene, quindi, che per esserci una connessione la funzione d'onda non sia probabilistica ma reale. - N.d.R.).
Lo studio arriva a concludere che la ***funzione d'onda*** **descrive qualcosa di fisicamente reale**, e non può essere considerata solo come uno strumento matematico e statistico. Inoltre, leggerla in quel modo sembrerebbe porsi in diretta contraddizione con le previsioni della teoria quantistica. la Funzione d'onda, quindi, è qualcosa di reale e tangibile: **l'elettrone esiste davvero in un'infinita di punti lungo la sua orbita**.

1.11 Il paradosso della 'scelta ritardata' di Wheeler. [6]

Immaginiamo un *fotone* che passa attraverso due fessure, come un'onda, e fa interferenza con se stesso. Gli esperimenti dimostrano che per distruggere la figura d'interferenza, è sufficiente osservarlo "subito dopo" che è passato da una fessura.
Esso, cioè, non si comporta più come un'onda ma come una particella per cui non può passare anche dall'altro foro. Pertanto, non passando dall'altro foro la figura d'interferenza scompare.
Sembra perciò che possiamo "decidere" se osservare il fotone come particella o se permettergli di fare la figura di interferenza come un'onda.
Abbiamo detto che riveliamo il fotone "subito dopo" che è transitato dal primo foro. Ma, per quanto piccolo sia il tempo trascorso, il fotone ha già oltrepassato il foro; inoltre fino a questo momento esso è rimasto un'onda perché non l'abbiamo ancora rivelato. Perciò nel frattempo l'onda ha già imboccato anche l'altro foro e lo ha oltrepassato. Come fa, allora, il fotone a essere rivelato "tutto intero" vicino al primo foro? Che fine fa il fronte d'onda che aveva appena oltrepassato il secondo foro? Scompare nel nulla? Sembra proprio di sì! Ma come è possibile?
Ciò che appare incredibile è che ciò che il fotone ha deciso di fare quando attraversa lo schermo (passare da una sola fessura o da entrambi) dipende da una scelta successiva al transito stesso! Infatti il rivelatore viene inserito dopo che il fronte d'onda è transitato dallo schermo. Come dice Wheeler si ha il paradosso

che**: la "scelta" del fotone di passare da un solo foro o da entrambi è "ritardata", cioè avviene dopo che il fotone è passato!**

2. Alcune interpretazioni della Meccanica Quantistica.

Premesso che l'interpretazione di Copenaghen è un'interpretazione probabilistica e non deterministica, le interpretazioni deterministiche che, a mio avviso, riescono meglio spiegare gli strani fenomeni della M.Q. (dando una immagine fisica di questa realtà) sono: l'**Interpretazione di Bohm** e **l'Interpretazione Transazionale**.

2.1 L'interpretazione di Bohm [2]

Prevede l'esistenza di una funzione d'onda universale e non locale, che permette quindi a particelle lontane di interagire istantaneamente. L'interpretazione generalizza la teoria di De Broglie del 1927 che afferma che **sia l'onda sia la particella sono reali**. La funzione d'onda (onda pilota) guida il moto della particella ed evolve in base all'equazione di Schrödinger.

L'interpretazione assume un singolo universo, che non si dirama come nell'interpretazione a molti mondi, ed è deterministica, a differenza di quanto previsto dall'interpretazione di Copenaghen. L'interpretazione di Bohm asserisce che lo stato dell'universo evolve linearmente nel tempo, senza prevedere il collasso delle funzioni d'onda all'atto di una misurazione, previsto invece dall'interpretazione di Copenaghen. In questa interpretazione, si assume comunque l'esistenza di un certo numero di variabili nascoste, rappresentanti le posizioni di tutte le particelle nell'universo le quali, come le probabilità in altre interpretazioni, non possono mai essere misurate direttamente.

2.2 L'interpretazione transazionale (TIQM) [8]

Formulata da John Cramer, è un'interpretazione piuttosto originale della meccanica quantistica che descrive le interazioni (transazione) in termini di onde stazionarie prodotte da onde ritardate e anticipate.

Si basa su di un'evoluzione dell'equazione d'onda di Schrödinger che prende in considerazione i principi della teoria della relatività (**equazione di Klein-Gordon**). Questa equazione contiene due soluzioni descriventi due onde: una soluzione, che descrive il flusso di energia dal passato al futuro *(onde ritardate*) e una soluzione che descrive il flusso di energia dal futuro al passato (*onde anticipate*).

Quando, infatti, si "relativizza" la funzione d'onda di Schrödinger (ψ) : $E = \pm\sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$

è necessario considerare tutte e due le soluzioni della radice quadrata: energia positiva ed energia negativa, giungendo così alla descrizione di *onde ritardate* che si propagano dal passato verso il futuro (*causalità*) e di *onde anticipate* che si propagano a ritroso dal futuro verso il passato (*retrocausalità*).

Si fa osservare che la suddetta equazione lega l'energia, la quantità di moto e la massa.

La transazione tra onde ritardate, provenienti dal passato, e onde anticipate, provenienti dal futuro, dà luogo alla nota dualità onda/particella. La proprietà delle onde è conseguenza dell'interferenza delle onde ritardate e anticipate e la proprietà della particella è dovuta alla localizzazione della transazione.

Questo modello riesce a risolvere i paradossi quantistici (ad esempio: l'interferenza di particelle singole, l'esperimento a scelta ritardata di Wheeler , ecc.) rendendola, inoltre, compatibile con i presupposti della relatività ristretta. Questo miracolo si ottiene però al prezzo di accettare che l'onda quantistica possa realmente viaggiare a ritroso nel tempo.

2.3 L'interpretazione (personale) con le onde stazionarie. [15]

Tutti gli indizi derivanti dalle esperienze fisiche e le interpretazioni sopra esposte, ci inducono a ritenere che le onde abbiano un ruolo di primo piano per la spiegazione della meccanica quantistica!

Come abbiamo visto l'*interpretazione transazionale* descrive la meccanica quantistica in termini di onde che viaggiano nel tempo: dal passato e dal futuro (ovvero flusso di energia dal passato al futuro *(onde ritardate*) e un flusso di energia dal futuro al passato (*onde anticipate*)) .

Poiché (vedi capitolo sulle onde in moto) per un'onda in moto una variazione del *tempo t* può essere equiparata ad una variazione dello *spazio x*, **si propone che le due soluzioni dell'equazione di Klein-Gordon si possano interpretare come onde provenienti da direzioni opposte** cioè da onde progressive ed onde regressive.

In meccanica quantistica il pacchetto d'onda (un insieme di onde con diverso numero d'onda che interferiscono costruttivamente in una regione e distruttivamente nel resto dello spazio), descrive la probabilità che una o più particelle in un determinato stato abbiano una data posizione o una data quantità di moto.

Premesso quanto sopra **ipotizzo**:

a. Che la particella, sia costituita da un **pacchetto di onde stazionarie** "spazio di risonanza" (vedi ipotesi di De Broglie) costituito da onde armoniche provenienti da opposte direzioni ;
b. Che la **funzione d'onda Ψ** sia **reale** (vedi ipotesi di Schrödinger) e descrivibile come somma di onde (Serie di Fourier);

Occorre ricordare che con la serie di Fourier: un sistema fisico, descritto con la funzione f(x,t), può essere rappresentato con precisione mediante le onde.

La particolarità consiste nel riprodurre la **serie di Fourier come somma di soli seni** al fine di ottenere onde stazionarie, le quali hanno particolari proprietà. Sarà pertanto possibile mostrare l'assoluta **simmetria tra onde e particelle**.

Fourier ci informa che **la conoscenza dello spettro (delle onde) corrisponde a una conoscenza completa della dinamica del sistema**, del tutto sostituibile con la conoscenza delle equazioni che lo governano. In altri termini: *note le onde che descrivono il sistema, si è in grado di calcolare con precisione come tale sistema si comporterà*.

La conoscenza dello spettro equivale ad avere trovato un modello matematico che lo rappresenti.

Questa scoperta è veramente sconvolgente dal punto di vista filosofico, infatti potremmo pensare che la fisica possa andare avanti senza saper nulla del mondo reale e che per mezzo degli spettri (onde) prevedere con esattezza quello che sta per succedere. **Gli spettri possono diventare il condensato della nostra conoscenza del mondo specialmente quando i sistemi diventano così piccoli da essere inaccessibili come nella fisica delle particelle**. **Possiamo ritenere, al limite, che la realtà sia costituita effettivamente da onde.**

Dal web: "*Sembra che il mondo degli spettri di Fourier abbia trovato modo attraverso la funzione d'onda ψ di insinuarsi nel mondo reale e ci propone fenomeni fuori dal tempo*".

Di seguito, quindi, vengono illustrate le proprietà delle onde, il vantaggio di scrivere la serie di Fourier con soli seni e quindi con le onde stazionarie, la descrizione dei fenomeni quantistici con tali onde, l'interpretazione dello spazio-tempo, ecc. [9] e [15] .

3. Le Onde

I corpi interagiscono fra loro mediante vibrazioni/oscillazioni (il pendolo, una trave, un corpo appeso a una molla, etc.). Un corpo entra in risonanza se è sollecitato da onde che hanno frequenze uguali o multiple a quella del corpo.
Si premette che per ogni deformata di un corpo è possibile trovare le onde stazionarie che compongono tale deformata.

3.1 Onde armoniche

Equazione di un'onda periodica **nello spazio *x***, con lunghezza d'onda λ e velocità v = *v**λ :

$$f(x) = a * \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda}\right)$$

Equazione di un'onda periodica **nel tempo *t*** con periodo *T* : essendo ω = 2π /T e α= ω *t = 2π t/T:

$$f(t) = a * \sin 2\pi \left(\frac{t}{T}\right)$$

3.2 Onde in movimento

Per descrivere un'onda periodica in movimento si deve considerare una funzione con le 2 variabili: spazio *x* e tempo *t,* la cui rappresentazione analitica è*:*

$$f(x,t) = a * \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) \qquad (1)$$

Essa si può considerare costituita quindi di due parti: un'armonica in moto nello spazio e un'armonica in moto nel tempo.

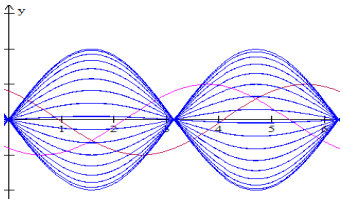
Si osserva dalla (1) che la frequenza dell'onda rimane uguale se il valore all'interno della parentesi resta costante (basta variare opportunamente *spazio* x e *tempo* t; ovvero *velocità* v e *frequenza v).*

Faccio rilevare, già adesso, che nei sistemi di riferimento inerziali (che si muovono di moto rettilineo uniforme) non è possibile distinguere se un'onda è in moto (nello spazio) o in oscillazione (nel tempo), e che ciò ha delle ripercussioni nella concezione dello spazio e del tempo.[10]

---

[*] La relazione *spazio-tempo* è stata evidenziata nella Teoria della Relatività, indicata con c la velocità della luce si ha: $s^2 = x^2 - c^2t^2$. La relazione tra *velocità* e *frequenza* verrà ripresa nel capitolo sul comportamento corpuscolare e ondulatorio della particella.

3.3 Onde stazionarie [14]

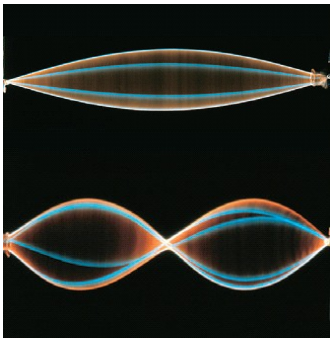


Quando si pizzica una corda di chitarra si generano delle onde che si propagano verso i due estremi della corda. Arrivate alle due estremità le onde si riflettono e si dirigono verso il capo opposto della corda.

La sovrapposizione dell'onda originaria (progressiva) e di quella riflessa (regressiva), ambedue della stessa frequenza ma con versi opposti, dà origine a un'*onda stazionaria* la cui rappresentazione analitica è*:*

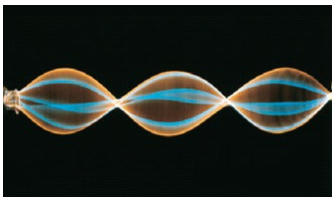
$$f(x,t)=\sin 2\pi\left(\frac{x}{\lambda}-\frac{t}{T}\right)+\sin 2\pi\left(\frac{x}{\lambda}+\frac{t}{T}\right)=2*\sin kx*\cos\omega t \qquad \textbf{(2)}$$

con $k = 2\pi/\lambda$ e $\omega = 2\pi/T$



Le onde stazionarie hanno dei punti sempre fissi detti *nodi* agli estremi della corda; tutti gli altri punti si muovono di moto armonico nello stesso verso: o tutti verso l'alto, o tutti verso il basso, cioè raggiungono insieme il punto di massimo dell'oscillazione e il punto di minimo.

Dalla (2) si nota che la sinusoide *sin(kx)* non si muove lungo l'asse x, ma oscilla attorno a tale asse con frequenza ωt, per cui **l'onda stazionaria non trasporta energia**.



Pizzicando opportunamente una corda si possono ottenere onde stazionarie con un numero maggiore di nodi. Ciascuna di queste particolari onde rappresenta un **modo normale di oscillazione** della corda.

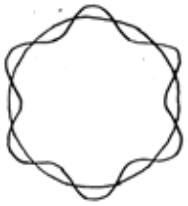
Il primo modo normale di oscillazione, quello con 2 nodi, ha una lunghezza d'onda $\lambda_1 = 2L$, dove L è la lunghezza della corda, i modi normali con 3 nodi e con 4 nodi hanno lunghezza, rispettivamente:

$$\lambda_2=2L/2, \quad e \quad \lambda_3=2L/3$$

In generale, il modo normale numero n (che ha n+1 nodi) ha: $\lambda_n=2L/n, \; n = 1, 2,\ldots$

Se indichiamo con v la velocità delle onde sulla corda, possiamo ottenere la frequenza f_n del modo normale numero n; infatti, se indichiamo con T_n il periodo di oscillazione del modo normale numero n, si ha

$$f_n = 1/T_n$$



Onda stazionaria chiusa

Le frequenze dei modi normali sulla corda sono tutte multipli della frequenza

$$f_1 = 1*v/2L \qquad\qquad f_n = n*v/2L \quad , \; n = 1, 2,\ldots$$

In linguaggio musicale la frequenza f_1 è detta *fondamentale* o *prima armonica*.

Le onde stazionarie oltre che aperte lungo una corda possono essere chiuse, come si ipotizzano siano le onde attorno ad un atomo.

Abbiamo visto che le onde stazionarie lungo una corda (una dimensione) creano dei **punti nodali**; si può osservare che su una superficie (due dimensioni) esse creano delle **linee nodali** (vedi la *Cimatica*); mentre nello spazio (tre dimensioni) delle **superfici nodali**.

Nella nostra ipotesi vengono considerate le onde in moto lungo una direzione (la direzione del fotone) e in oscillazione nel tempo.

Le onde stazionarie sono le uniche **onde stabili** sul lungo periodo, infatti, sovrapponendo onde viaggianti di frequenza diversa dalle frequenze proprie della corda, si ottiene un'oscillazione instabile.

Tutte le altre frequenze da f_2 in poi sono dette *armoniche superiori*.

Si premette che un'onda stazionaria generica si può ottenere come sovrapposizione di *armoniche*.

Le onde stazionarie hanno particolari proprietà:

- *Non trasportano energia (l'onda ha velocità risultante nulla ma ampiezza doppia) ;*
- *Sono stabili (in fase);*

- *La sovrapposizione di più onde stazionarie è ancora un'onda stazionaria;*
- *Hanno quantità di moto nulla;*
- *Accumulano energia 'statica'.*

Tutte queste proprietà ci inducono ad ipotizzare che la materia possa essere composta da onde stazionarie. Di seguito, utilizzando la serie di Fourier, si riporta un metodo con il quale una funzione f(x) può essere rappresentata come somma di sole armoniche (solo sinusoidi).

Calcolate tali onde armoniche (onde progressive) e considerate le relative onde *riflesse* (cioè aventi uguale frequenza e ampiezza ma direzioni opposte), sarà possibile ricavare la serie di **onde stazionarie che rappresentano la funzione d'onda *ψ*.**

4. Le onde stazionarie con la serie di Fourier.

Sappiamo che con la serie di Fourier è possibile rappresentare una funzione f(x) mediante una somma di funzioni periodiche della forma *cos(nx)* e *sen(nx)*, cioè come:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\frac{n\pi x}{L} + b_n \sin\frac{n\pi x}{L} \right)$$

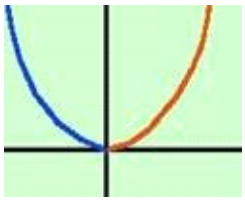
Dove: $a_0 = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(x)dx$, $a_n = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(x)\cos(nx)dx$, $b_n = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(x)\sin(nx)dx$

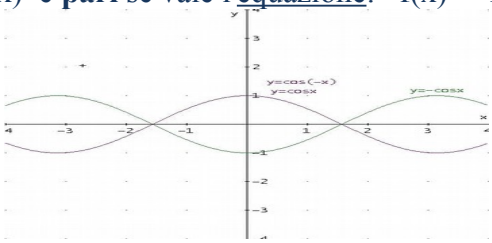
i **coefficienti a_n e b_n esprimono le ampiezze delle sinusoidi e cosinusoidi, mentre a_0** corrisponde al **valor medio** in un periodo della funzione *f(x)*.

Vediamo che cos(nx) è una funzione pari, mentre sen(nx) è una funzione dispari.

4.1 Funzioni pari e dispari

Una **funzione** f(x) è **pari** se vale l'equazione: f(x) = f(-x)

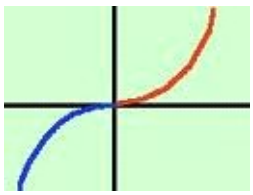


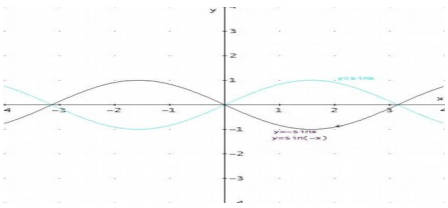


Geometricamente, una funzione pari è simmetrica rispetto all'asse y.
Esempi di funzioni pari sono:
x^2, x^4, *cos(x), cosh(x)* .

Una **funzione** *f(x)* è **dispari** se vale l'equazione: f(-x) = -f(x) , cioè f(x) = -f(-x)

Geometricamente, una funzione dispari è simmetrica rispetto all'origine degli assi, cioè i valori a destra dell'origine sono uguali a quelli di sinistra cambiati di segno.





Esempi di funzioni dispari sono:
x, x^3, *sin(x), sinh(x)* .

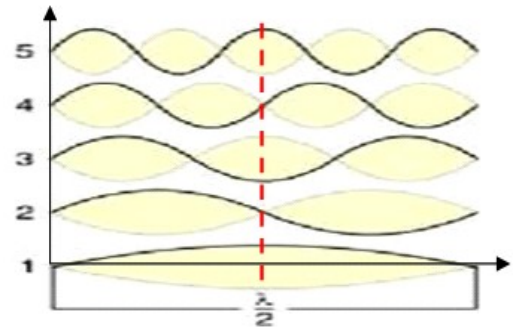
Una funzione f(x) può essere ottenuta come somma di una funzione simmetrica (pari) e di una funzione emisimmetrica (dispari), infatti:

$$f(x) = \frac{f(x)+f(-x)}{2} + \frac{f(x)-f(-x)}{2}$$

Si osserva che se poniamo *a= f(x)* e *ib= f(-x)* tali funzioni ricordano i numeri complessi coniugati *a-ib* e *a+ib,* la cui somma da il numero reale *2a.* Di seguito vedremo che una qualsiasi funzione *f(x)* si può descrivere con *armoniche* (aventi frequenze multiple della fondamentale).

4.2 La Serie di Fourier con solo seni (armoniche)

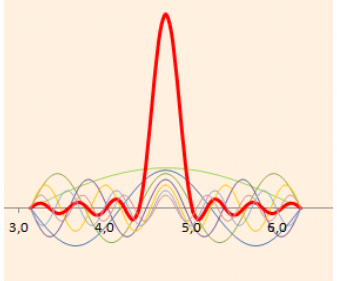
Abbiamo visto che con la serie di Fourier (somma di seni e coseni), è possibile rappresentare una funzione f(x). Vediamo, adesso, che traslando l'asse y di λ/4 è possibile rappresentare la funzione f(x) come somma di armoniche.



Consideriamo l'armonica principale *seno* e le sue multiple della *figura a fianco, s*i osserva che tali armoniche, rispetto all'asse verticale x = λ/4, possono essere considerate alternativamente coseni e seni, e pertanto idonee, con una traslazione della f(x) di *λ/4,* a descrivere la *f(x)*.

Rispetto alla retta verticale (rossa) x = λ/4 (asse di simmetria) la funzione *sen(i*x)* è:

- Pari se *i =1, 3, 5, ...*;
- Dispari se *i =2, 4, ...* (vedi figura),



Ricordando che una funzione *f(t)* di periodo *T* e frequenza *f = 1/T,* può essere considerata come avente periodo *2π* con la trasformazione della variabile: *x = t*(2 π/T) = t*(2 π*f),* "stiriamo" le funzioni suddette in modo da raddoppiare il loro periodo a [0; 2π] cioè sen(1*x) con sen(1*x/2) e in generale sen(i*x) con sen(i*x/2), mentre l'asse di simmetria diventa x = π.

Trasliamo adesso la f(x) in avanti di π : f(x- π) in modo che il suo asse sia x = π .

Trasliamo, quindi, la funzione *f(x)* di *x=λ/4*, cioè:

f(x- λ/4), e calcoliamo con la serie di Fourier di soli seni i coefficienti *bi* per x [0; 2π], cioè:

$$b_i = 1\pi * \int_0^{2\pi} f(x-\pi) * \sin(i*x)\,dx \qquad i = 1, 2, \ldots \quad \textbf{(3)}$$

Trovati i coeff. b_i si ricava la f(x):

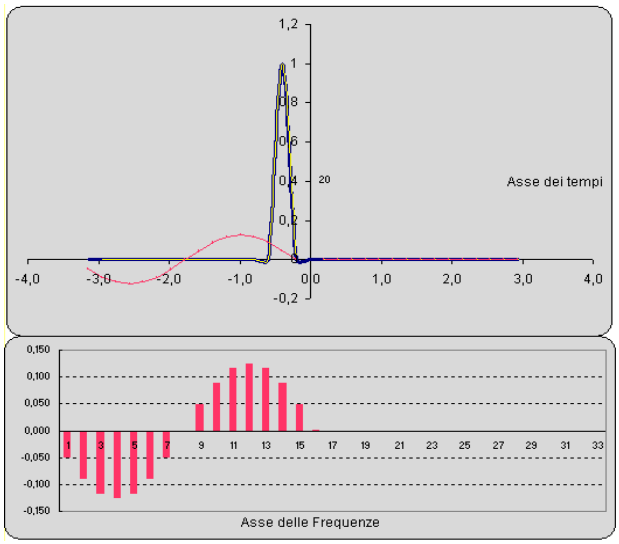
$$f(x) = \int_0^{2\pi} b_t * \sin(i*x)\,dx \qquad i = 1, 2, \ldots \quad \textbf{(4)}$$

Come anticipato l'equazione (4) descrive la **f(x) con la somma di solo seni**.

Se invece della f(x) si conoscono N punti $y_1, y_2, \ldots, y_N$ equidistanziati:

$$b_i = 2*\left(\sum_{s=1}^{N} y_s * \sin(i*x)\right) \Big/ N \quad \textbf{(3a)} \qquad \text{e} \qquad f(x) = \left(\sum_{s=1}^{N} b_i * \sin(i*x)\right) \Big/ N \quad \textbf{(4a)}$$

Nella figura a fianco, come esempio, è stata rappresentata la f(x) (f(x)= 0 tranne un punto P) con la somma delle prime sette armoniche (sinusoidi).



4.3 Punto spaziale e Onda temporale

Consideriamo la funzione f(x) con tutti i punti nulli (= 0) tranne il punto $S(x_s;y_s)$ la

(3a) $b_i = 2 * (\sum_{s=1}^{N} y_s * sin(ix))/N$ diventa

$b_i = 2 * y_s * sin(i * x_s)$ (6)

Dalla (6) si nota che i coefficienti b_i descrivono una sinusoide di ampiezza y_s e frequenza proporzionale ad x_s

Ossia la *trasformata* di "*Fourier*"della funzione "*punto*" $S(x_s; y_s)$ è la funzione *seno*, mentre l'*antitrasformata* della funzione *seno* è la funzione "*punto*"$S(x_s; y_s)$.

Nella figura a fianco: sopra in nero è riportata la funzione f(x) con il punto non nullo, sotto in rosso i valori dei coefficienti $\boldsymbol{b_i}$.

Sostituendo la (6) nella(4a):

$$y_s = \sum_{s=1}^{N}(b_i * \sin(ix))/N = \sum_{s=1}^{N}(2 * y_s * sin(ix)^2)/N \qquad (7)$$

ovvero $y_s = {}^{y_s}/_{\pi} * \int_{o}^{2\pi} sin(ix)^2\, dx$ (7a)

La (7a) descrive un punto y_s come risultante di armoniche al quadrato.

Eliminando la y_s dall'equazione (7a) si ricava: $N/2 = \sum_{s=1}^{N} \sin(ix)^2$ che assicura l'esattezza del calcolo.

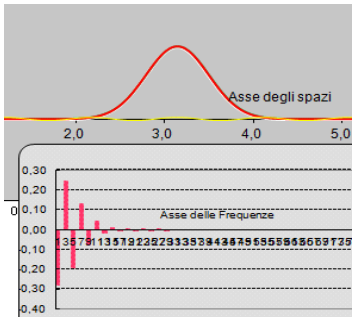
L'indice *i* prende il nome di *numero d'onda*. Esso rappresenta la variazione di fase in radianti per unità di lunghezza dell'onda rappresentata dalla funzione periodica.

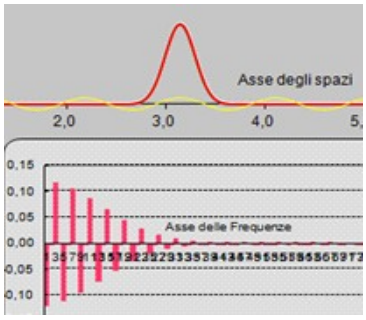
Riassumendo: ogni punto P (x_p ;y_p) della funzione f(x) contribuisce ai valori dei coefficienti b_i con sinusoidi di ampiezza y_p e frequenza proporzionale ad x_p .

Quindi con la serie di solo seni si ottiene la simmetria punto/onda e spazio/tempo:

- ad ogni **frequenza (punto temporale)** corrisponde un'**onda (spaziale)**;
- ad ogni **punto (spaziale)** corrisponde un'onda di **frequenze (onda temporale)**.

In altre parole **la serie di soli seni mette in evidenza la simmetria spazio–tempo, ossia la simmetria particella-onda.** Per tale motivo **ritengo che la serie di solo seni sia la *struttura matematica* più idonea per descrivere l'onda/particella.**

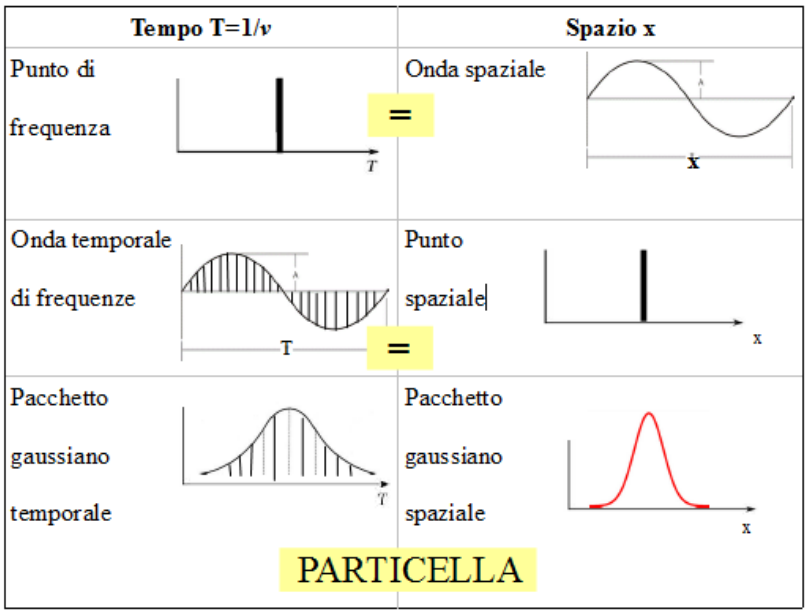




Inoltre, se il pacchetto d'onde ha una ***distribuzione gaussiana*** (normale) nello ***spazio*** (aspetto particella), avrà una ***distribuzione gaussiana*** anche nelle ***frequenze*** (aspetto onda).

Nella figura a fianco sono riportate le simmetrie tra l'onda e la particella e tra lo spazio ed il tempo.

a) Una frequenza nel tempo origina un onda nello spazio;
b) Un'onda di frequenze nel tempo origina un punto nello spazio;
c) Un pacchetto gaussiano di frequenze nel tempo origina un pacchetto gaussiano nello spazio.



Ritengo allora che la particella sia definita nello spazio-tempo secondo una distribuzione gaussiana che riflette la proprietà onda/corpuscolo.

Si nota che: più la distribuzione del pacchetto è compatta nello spazio più risulta espansa nelle ampiezza-frequenze.
La forma gaussiana dei due pacchetti d'onda (nello spazio e nelle frequenze), minimizza il prodotto tra le incertezze sulla *posizione* e sull'*impulso*, cioè la più probabile condizione di misurare contemporaneamente le suddette grandezze.
Si osserva che i pacchetti d'onda gaussiani verificano la relazione $\Delta x * \Delta \nu = k$ (equivalente al principio d'indeterminazione).
La suddetta rappresentazione trova una forte corrispondenza con gli *stati coerenti* dell'oscillatore armonico che costituiscono una solida prova sull'esistenza del pacchetto d'onde concentrato in una regione limitata dello spazio che si muove proprio sulle orbite classiche.[*]
[*] STATI COERENTI IN MECCANICA QUANTISTICA Tesi di laurea di Francesco Pepe.

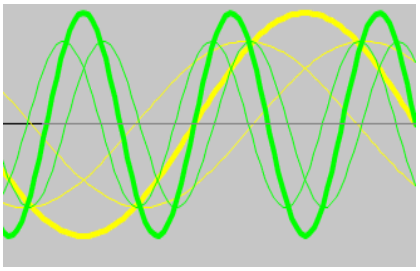
Come si è visto, la rappresentazione del pacchetto con sole sinusoidi riesce a descrivere in modo adeguato la complementarietà onda/corpuscolo del pacchetto d'onde: *più è facile rilevare l'aspetto corpuscolare più è difficile rilevare l'aspetto ondulatorio*.

4.4 Onde stazionarie e pacchetto d'onde

Nei capitoli precedenti si è descritto il metodo per trovare le armoniche che descrivono la funzione f(x). Per ricavare le onde stazionarie dobbiamo aggiungere a ognuna di queste armoniche quella riflessa (cioè avente stessa frequenza e ampiezza ma direzione opposta (vedi la (2)):

$$f_s(x,t) = \int_0^{2\pi} b_i * \sin i * (\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}) + \sin i * (\frac{x}{\lambda} + \frac{t}{T}) dx \qquad 1, 2, \ldots \textbf{(5)}$$

Con la (5) possiamo scomporre la *funzione d'onda* ψ nella somma di (onde) armoniche.



Nella figura a fianco: con linee sottili sono raffigurate una coppia di armoniche gialle ed una coppia di armoniche verdi. Le onde di ogni coppia viaggiano in direzione opposte,

- le $y = \sin(\frac{x}{\lambda} + i * \frac{t}{T})$ si muovono verso destra:
- le $y = \sin(\frac{x}{\lambda} - i * \frac{t}{T})$ verso sinistra;

Le *onde stazionarie,* rappresentate in grassetto, sono:

$$y_i = \sin(\frac{x}{\lambda_i} + i * \frac{t}{T}) + \sin(\frac{x}{\lambda_i} - i * \frac{t}{T}) \qquad \text{i=1, 2, …}$$

Supponendo la *particella* costituita da un *pacchetto d'onde*, la funzione d'onda ψ^2 corrisponderà al pacchetto di sinusoidi (armoniche dette ***autostati***) aventi lunghezze d'onda $\lambda_i=2L/i$, $(i = 1, 2, \ldots)$ e ampiezze $\boldsymbol{b_i}$ (dette ***autovalori***):

Per quanto sopra credo che la funzione d'onda non rappresenti la *probabilità* (di trovare la particelle in una ragione di spazio) ma, (come ha ipotizzato Schrödinger) la distribuzione del pacchetto cioè della particella.

Ricordando (vedi Planck e De Broglie) che le particelle a volte agiscono come onde altre volte come particelle:

$$per \quad \omega=2\pi/t, \quad \hbar=h/2\pi \quad e \quad v=1/T=E/h, \quad \lambda=h/P, \qquad 2\pi/\lambda=P/\hbar \qquad (d)$$

Dove P è la *quantità di moto* della particella ed E l'*energia*.

La (5) si può riscrivere:

$$f_s(x,t) = \Psi^2(x,t) = \sum_i b_i * (\sin(\frac{P_i x}{\hbar} - i * \frac{Et}{\hbar}) + \sin(\frac{P_i x}{\hbar} + i * \frac{Et}{\hbar}) \qquad i = 1, 2, \ldots \quad \textbf{(5a)}$$

4.5 Aspetto ondulatorio e corpuscolare

Il pacchetto d'onde stazionario, come sopra descritto, è rappresentato con la (5b):

$$f_s(x,t) = \Psi^2(x,t) = \sum_i b_i * (\sin(\frac{P_i x}{h} - i * \frac{Et}{h}) + \sin(\frac{P_i x}{h} + i \frac{Et}{h})) \qquad \text{i = 1, 2, …} \qquad (5b)$$

che può essere scritta nella forma $f_s(x,t) = 2 * \sum b_i * \cos(-i * \frac{Et}{h}) * \sin(\frac{P_i x}{h})$

Osservando l'equazione si può ipotizzare che:

- I *coseni* descrivano *l'aspetto* ***ondulatorio*** (frequenza "temporale") del pacchetto, con *frequenza* di oscillazione $v = c/\lambda = E/h$; e che la frequenza di oscillazione corrisponda (come vedremo) allo scorrere del *tempo proprio* della particella;
- I *seni,* con i coefficienti b_i , (che costituiscono le ampiezze delle onde) descrivano *l'aspetto* ***corpuscolare*** (frequenza "spaziale") del pacchetto.

Si osservi che il pacchetto è composto di onde aventi quantità di moto P_i e lunghezza d'onda x diversi, ma tali che il loro prodotto sia costante; Le due coppie P/x ed E/t devono essere grandezze coniugate giacché nelle misurazioni non è possibile misurare con precisione quantità di moto e posizione o Energia e tempo (*Principio di Indeterminazione*).

Se osserviamo la funzione d'o*nda in movimento*:

$$f(x,t) = a * \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)$$

si è fatto notare che essa rimane uguale se l'argomento del seno (valore tra parentesi) resta costante (basta variare opportunamente *spazio* x e *tempo* t; oppure *velocità* v e *frequenza ν);* cioè l'onda può essere considerata:

- In moto con velocità v senza oscillare (v≠0 e *ν*=0): "**frequenza spaziale**";
- Ferma ma in oscillazione con frequenza *ν* (v=0 e *ν*≠0): *"***frequenza temporale**".

A riguardo, ipotizzo che il fotone (con velocità massima *c)* abbia tempo proprio nullo in quanto sia costituito solo da "*frequenza spaziale*" *ν* = c/λ e quindi "*frequenza temporale*" nulla.

Ritengo inoltre che, quando esso viene 'assorbito' dal pacchetto, parte della sua frequenza "spaziale" si trasformi in frequenza "temporale" (energia vibrazionale).

Si osserva che per essere stabile il pacchetto d'onde deve essere composto da onde con *frequenze* e *velocità* diverse, ma di frequenze spazio-temporali uguali a *ν* = c/ λ = mvc/h con λ = h/mv; ossia le onde di maggiore frequenza devono essere meno veloci, così da avere tutte frequenze spazio-temporali uguali.

In tal modo onde con frequenze e velocità diverse, in un tempo T, possono formare uno stesso numero di quanti *h,* ed avere quindi la stessa energia: E*T = n*h.

Considerata la particella come pacchetto d'onde e le equazioni: $E = mc^2$ (energia contenuta nella materia) ed $E = h\nu$ (energia contenuta nel fotone), ricaviamo che la massa $m = (h/c^2)*\nu$ (essendo h/c^2 una costante), può essere considerata come un insieme di onde di *frequenze temporali*.

Dall'equazione (5b) sopra riportata si può ipotizzare che:

- Con la variazione della velocità un'onda vari sia la sua frequenza "*spaziale*" che "*temporale*";
- L'aspetto *ondulatorio/corpuscolare* del pacchetto sia dovuto rispettivamente alla prevalenza della frequenza *spaziale*/*temporale*;
- Il pacchetto d'onde libero assuma un aspetto corpuscolare per la pressione del vuoto quantomeccanico (effetto Casimir);
- Il rallentamento del tempo della particella, con l'aumento della velocità, sia dovuto alla graduale trasformazione della frequenza "temporale" in frequenza "spaziale". Più alta è la velocità più frequenza temporale si trasforma in frequenza spaziale.

Si ipotizza che la luce, avendo velocità c massima, abbia solo frequenza di tipo "spaziale" e frequenza "temporale" nulla. A riguardo si richiama il servizio riportato su *Focus.it* del 17/10/2013, che illustra l'esperimento eseguito da fisici tedeschi, i quali hanno sparato impulsi laser attraverso uno speciale cristallo che li ha, di fatto, rallentati conferendo loro proprietà fisiche uguali a quelle di particelle dotate di massa.

[Note]: ----------

La (5a) equivale alla *soluzione generale dell'equazione di D'Alembert* per la corda vibrante, mentre la (5c) equivale alla soluzione per la *corda vibrante* col *Metodo di Fourier*].[11] e [12]

Nel coseno compare l'indice *i* , in tal modo *le coppie di onde stazionarie di maggiore frequenza si avvicinano fra loro con minore velocità*, e le onde di diversa lunghezza spaziale λ oscillano con la stessa frequenza. (ritengo che da ciò derivi il *principio d'indeterminazione* mv*λ = h posto che λ = c/*ν)*].

Nelle suddette equazioni, a differenza delle equazioni *di D'Alembert* e di Fourier, compaiono i coefficienti b_i con cui è possibile descrivere la funzione d'onda ψ^2.

(vedi Equazione delle corde vibranti:***http://it.****wikipedia****.org/wiki/Equazione_della_corda_vibrante*** e Soluzione generale l'equazione di Schrodinger:***http://it.****wikipedia****.org/wiki/Equazione_di_Schr%C3%B6dinger)*.
Un metodo tecnicamente diverso per la soluzione dell'equazione di d'Alembert, è quello delle serie di Fourier. Tale metodo si dice metodo di separazione delle variabili, e consiste tecnicamente nella ricerca di soluzioni particolari fattorizzate nel prodotto di funzioni di una sola variabile.
Il metodo di separazione delle variabili conduce spontaneamente alla soluzione di un problema agli autovalori in uno spazio vettoriale di dimensione infinita.
Da un punto di vista fisico gli *autovalori* che si determinano con il procedimento di separazione delle variabili sono particolarmente importanti, perché essi forniscono nel caso del problema di d'Alembert le possibili frequenze di vibrazione della corda e nel caso dell'equazione di Schrodinger le possibili energie del sistema studiato.
Il procedimento di Fourier permette di dare una espressione all'energia della corda vibrante, che viene ad apparire formalmente come l'energia di un sistema di infiniti oscillatori armonici disaccoppiati (indipendenti).

Decomposizione spettrale: Ricordiamo l'esperienza del prisma di Newton, in cui la luce bianca incidente su un prisma ne esce suddivisa in un fascio di raggi, ciascuno di diverso colore.
Con la suddetta equazione ritengo che effettui una decomposizione spettrale dell'energia di modi di oscillazione della corda. Nel caso del campo elettromagnetico l'analogo procedimento venne compiuto prima da Rayleigh e poi da Jeans, in due articoli su Nature rispettivamente del 1900 e 1905.
Riassumendo con **l'equazione (3)** si calcolano i coefficienti b_i che dovrebbero costituire le ampiezze delle armoniche della funzione d'onda ψ^2 **, mentre con le equazioni (5a) e (5c) si può descrivere la ψ^2 come somma di armoniche con i modi normali di vibrazione**.

4.6 Vuoto quantomeccanico e pacchetto d'onda.

Il vuoto quantomeccanico viene descritto come una fluttuazione quantistica di onde di energia $E*t = h/2$ che creano una pressione. L'effetto Casimir ipotizza che fra due pareti poste ad una distanza quantistica d, non si possano formare onde di lunghezza maggiore di d, per cui la pressione fra le pareti risulterebbe minore di quella esterna. Tale fenomeno dimostrerebbe l'energia di punto zero e della pressione del vuoto quanto-meccanico.

Presumo che il pacchetto d'onda in oscillazione con frequenza ν, entri in risonanza esclusivamente con onde aventi frequenze multiple della fondamentale mentre esclude tutte le altre frequenze; al suo interno si creerebbe pertanto una *pressione* inferiore a quella del vuoto che impedirebbe la dispersione del pacchetto.

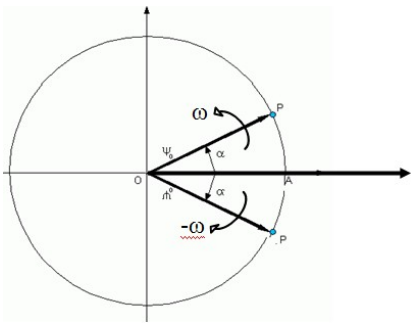
Penso che nella diffrazione si possa verificare il fenomeno dell'*effetto Casimir*: il pacchetto d'onda quando attraversa la fessura è sottoposto ad una pressione minore tale da permettere l'espansione del pacchetto d'onde contribuendo alla formazione della diffrazione. Più piccola è la fessura, minore è la pressione e maggiore è l'effetto della diffrazione.

5. Equazione del campo ed energia dell'onda stazionaria.

5.1 Onda stazionaria come equazione del campo.

Le onde stazionarie si possono considerare come equazione di campi.

Ad esempio, l'equazione differenziale del campo nello spazio/tempo è $\Delta^2 \psi = Sorgente$



Supponiamo di essere lontani dalla sorgente e poniamo quindi *Sorgente = 0* essa è di secondo grado, per cui ammette due soluzioni ψ e ψ^* che si dicono coniugate.

Nel caso più semplice hanno la forma:

$$\psi = \psi_0 e^{i\omega(\Delta x - \Delta t)} \quad e \quad \psi^* = \psi_0 e^{-i\omega(\Delta x - \Delta t)}$$

Nell'esponente oltre al tempo è presente lo spazio, poiché le onde si muovono.
Se fissiamo lo spazio Δx e consideriamo le 2 funzioni $\psi = \psi_0 e^{i\omega t}$ e $\psi^* = \psi_0 e^{-i\omega t}$ nel tempo, esse possono essere rappresentate su un orologio (nel campo complesso), ognuna con una lancetta di lunghezza ψ_0 che ruotano in senso opposto con velocità $i\omega t$ (vedi figura). La somma delle due frecce ruotanti, annullandosi la parte immaginaria (la componente lungo l'asse y), determina un'oscillazione sinusoidale di **ampiezza reale**:

$$e^{i\omega t} + e^{-i\omega t} = 2\cos\omega t$$

Si noti come questa equazione corrisponda all'oscillazione delle <u>onde stazionarie</u>, cioè al coseno dell'equazione (5c). Ritengo che nelle soluzioni ψ e ψ^* si possano cioè riconoscere le coppie di onde che compongono <u>l'onda stazionaria</u>.

[Nota: Feynman descrive la Natura attraverso una freccia analoga a quella di cui sopra, una freccia matematica che ruota in un misterioso orologio nascosto dentro un elettrone. La freccia di Feynman si propaga all'esterno dell'elettrone, riempie lo spazio tempo e determina la fisica di ogni fenomeno].

<u>5.2 Energia dell'onda stazionaria</u>

In questo capitolo calcoliamo <u>l'energia di un'onda</u> che si propaga lungo un <u>pezzo di corda</u>. Dal punto di vista energetico osserviamo che nel suo processo oscillatorio abbiamo una continua conversione di energia cinetica in potenziale e viceversa. In un istante generico saranno presenti tutte e due le forme di energia. Per calcolare l'energia totale trasportata dal pezzo di corda possiamo sfruttare l'istante in cui tutta l'energia e' nella forma cinetica, cioè quando il pezzo di corda passa attraverso la posizione di equilibrio (orizzontale). Se consideriamo allora un pezzo di corda di lunghezza dx e densità lineare μ, essa contiene una massa $dm = \mu * dx$, la sua velocità sarà: quindi la sua energia cinetica sarà:

$$\text{cioè} \quad E_c = 1/2 m v^2,$$

Nell'onda stazionaria, essendo essa composta di due onde uguali aventi direzioni opposte, l'energia cinetica non si propaga ma si accumula è vale il doppia: $E_c = m v^2$.
Se consideriamo l'energia del pacchetto d'onde paragonabile all'energia della corda e ipotizzando che il pacchetto abbia una frequenza temporale ν tale che $c = \nu/\lambda$ (con c velocità della luce) si ricava la famosa formula relativistica: $\boldsymbol{E = mc^2}$. Se riteniamo valida l'ipotesi fatta **possiamo interpretare la materia costituita da pacchetti di onde stazionarie** (frequenza spaziale nulla) **che vibrano nel tempo** (con frequenza temporale).

6. Quanto d'onda e Relatività Ristretta

La teoria della relatività ristretta, si basa su 2 postulati:

- *le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali;*
- *la velocità della luce c si propaga con velocità costante per tutti gli osservatore inerziali.*

Della Teoria della Relatività occorre specificare cosa si intende per "relativo".

Se degli osservatori inerziali (in moto rettilineo uniforme) esaminano un'onda che oscilla nello *spazio* x e nel *tempo* t (ovvero con *velocità* v e *frequenza v)* ognuno osserva l'onda con velocità e frequenze diverse.

Supponiamo, ad esempio, che il mio amico Mario si muova, rispetto a me, con velocità c/2 (con c velocità della luce), per le trasformazioni di Lorentz calcolo che il suo orologio scorre più lentamente e il suo metro è più corto. Tuttavia allo stesso identico modo Mario fa la mia stessa osservazione: mi vede viaggiare ad una velocità -c/2, vede il mio orologio scorrere più lentamente e il mio metro più corto.

Per capire questo strano fenomeno rappresentiamo la luce con una sinusoide che viaggia nello spazio e nel tempo: $f(x,t) = a * \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)$

Se io e Mario osserviamo il raggio di luce che viaggia lungo la direzione del moto relativo, per l'effetto Doppler, io vedo la radiazione con una frequenza diversa da Mario. Una parte di onde che per me sono dovute allo scorrere del tempo, per Mario, a causa del suo movimento, sono dovute allo "scorrere" dello spazio. Oltre a vedere la luce con lunghezze d'onda (spazio) diverse la vediamo anche con frequenze (tempo) diverse.

In altre parole, parte del mio spazio per Mario è tempo e viceversa. In ogni caso, sia per me che per Mario la velocità della luce *c* è uguale, così come lo spazio*tempo: $\Delta t * \Delta x = \Delta t' * \Delta x' = cost.$, (considerando il moto lungo l'asse x).

Non è possibile, cioè, determinare se un'onda è in moto (nello spazio) o in oscillazione (nel tempo), in quanto ciò è *relativo* all'osservatore.

Si ha pertanto un collegamento tra lo spazio lungo la direzione del moto ed il tempo.

Poichè un'onda la possiamo identificare ad un quanto h (*vedi paragrafo 6.2 Quanto e Treno d'onde ...),* rileviamo uno stretto legame tra il quanto h e la Relatività Ristretta (d'altra parte i due aspetti fisici derivano dalla proprietà della luce).

6.1 Relatività e Spazio-Tempo.

Consideriamo le equazioni di Lorentz:

$x' = \gamma(x - vt)$, $t' = \gamma(t - vx/c^2)$

posto: $c = 1$, $\tau = c*t = 1t$, $\beta = v/c$ esse diventano: $x' = \gamma(x - \beta\tau)$, $\tau' = \gamma(\tau - \beta x)$

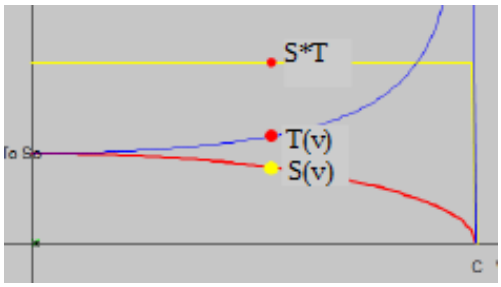
cioè le coordinate spaziali x e temporali τ hanno una forma totalmente simmetrica.

Dalle equazioni di Lorentz si ricavano le equazioni della Relatività Ristretta:

- Dilatazione dei tempi $\Delta t = \Delta t' * \gamma$ e
- Contrazione delle lunghezze $\Delta x = \Delta x'/\gamma$

Sappiamo che lo spaziotempo: $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2dt^2$, per i sistemi di riferimento inerziali (trasformazione di Lorentz), è invariante; se il moto è lungo l'asse x si ha: $ds^2 = dx^2 - c^2 dt^2 = cost$.

Dalle equazioni di Lorentz si ricava anche l'invarianza: $\Delta t * \Delta x = \Delta t' * \Delta x' = cost$.



Nella figura si osserva come all'aumentare della velocità v: lo spazio si contrae, il tempo si dilata, mentre lo spazio*tempo rimane costante.

Dalla suddetta equazione si può immaginare che: più un corpo è veloce più il *moto complessivo* nello spazio-tempo sottrae al *moto del tempo* (rallentamento del tempo) a favore del *moto nello spazio* (contrazione dello spazio). Ossia con l'aumento della velocità si acquista più *spazio* a spese del *tempo* che rallenta. La luce, avendo velocità *c,* è costituita solo dalla componente spaziale mentre la componente temporale è nulla. [16]

Ritengo che si debba considerare con attenzione l'invarianza del prodotto SPAZIO*TEMPO: $\Delta t * \Delta x = cost$. Tale prodotto ricorda le coppie di grandezze coniugate Energia*Tempo e Quantità di moto*Spazio.

Dalla relazione $\Delta t * \Delta x = cost$ si può osservare che la quantità Δt di tempo trascorso dalla particella è uguale al tempo impiegato dalla luce ad attraversarla $\Delta t = \Delta x/c$. In altre parole: il tempo di invecchiamento è proporzionale al tempo di attraversamento della particella da parte della luce *lungo la direzione del moto*, (la contrazione Δx si ha solo lungo tale direzione). Ossia: lo scorrere del tempo della particella è inversamente proporzionale alla sua contrazione lungo la direzione del moto.

Per cui, ritengo che la *direzione del moto* abbia un significato non ancora del tutto compreso.

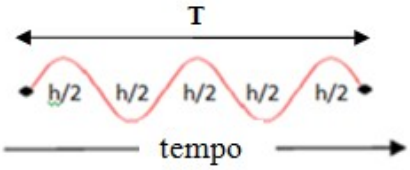
Si evidenzia, inoltre, che spazio e tempo sono proprietà intrinseche di ogni particella.

Quanto sopra considerato verrà ripreso nei paragrafi successivi: *Principio di Minima Azione,* S*pazio-Tempo, Effetto Doppler ,* nonché con l'ipotesi di una *linea d'onda* da associare alla particella.

Si fa osservare che l'equazione d'onda $y = sin2\pi(x/\lambda - t/T)$, risulta simmetrica alle coordinate spazio e tempo, come le equazioni di Lorentz, (infatti l'oscillazione dipende dalla lunghezza d'onda λ cioè dallo spazio Δx). Ritengo, cioè, che *relatività* e *fisica quantistica* siano due modi diversi di guardare lo stesso fenomeno.

6.2 Quanto, Treno d'onde e Spazio-Tempo

L'equazione $\boldsymbol{E = h*v}$ esprime l'energia di un fotone di frequenza *v*. Sappiamo tuttavia che in natura è difficile trovare singoli fotoni, per cui esprimiamo tale equazione non per una sola onda (fotone) *h* ma per un treno d'onde (vedi figura a fianco).



Dalla figura si nota che: **Un'oscillazione d'onda di frequenza qualsiasi contiene un quanto d'azione *h*.**

Supponiamo che in un intervallo di tempo unitario T si abbiano *n* onde, la frequenza $\boldsymbol{v}$ sarà:

$v = n/T$ per cui $\boldsymbol{E = h*v = h*n/T}$ cioè:

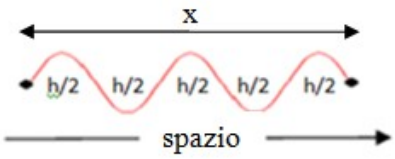
l'Energia è uguale al numero di quanti nell'unità di tempo T

Dall'equazione $\boldsymbol{h = E*t}$ si osserva che per un'onda *h: maggiore è l'energia E impiegata minore è il tempo t necessario a crearla.*

In natura, cioè, esistono solo onde intere di azione *h*, per cui ritengo che l'indeterminazione di Heisenberg sia insita nella quantizzazione h dell'onda.

Un'onda (quanto *h)* può essere descritta dalla funzione seno: ***f (t) = sen (φ)***.
Si noti che l'equazione dell'onda in movimento

$$f(x,t) = a * \sin 2\pi(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}) \qquad (1)$$



dipende sia da *x* che da *t*, per cui oltre all'equazione $E = h/T$, si può scrivere: $\boldsymbol{p = h/\lambda}$.

Supponiamo che in un intervallo di spazio unitario *x* siano presenti *n* onde di lunghezza $\boldsymbol{\lambda}$ cioè:

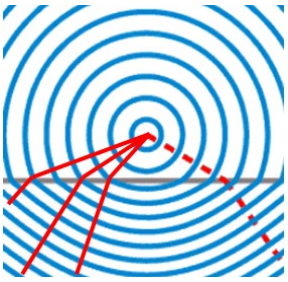
$\boldsymbol{\lambda = x/n}$ per cui $\boldsymbol{p = h/\lambda = n*h/x}$ essa esprime che:

la Quantità di Moto è uguale al numero di quanti (oscillazioni) nell'unità di spazio *x*.

Abbiamo visto quindi come il quanto *h,* entità indivisibile, sia legato allo spazio ed al tempo.

[Note: *Osservando la figura notiamo che l'onda, qualunque sia la sua frequenza v, può variare dalla posizione di equilibrio di metà onda, avente valore pari a h/2 ed energia* ***E = h/2*v****. Tale valore rappresenta l'energia di punto zero del vuoto. In fisica, l'energia di punto zero è il più basso livello energetico possibile in un sistema quantistico*].

6.3 Quanto di Planck e Principio di Minima Azione



Il principio di minima azione *(come* abbiamo visto al paragrafo 1.6) stabilisce che nei fenomeni della natura la traiettoria, che congiunge due punti dello spazio, è quella che minimizza l'azione S.

L'**azione** S ha le dimensioni di: *energia*tempo* (*E*t*) cioè *quantità di moto*spazio (m*v**l) (*momento angolare) o, ancora, *costante di Planck h*.

A conferma di tale '*principio'* nell'orbita elettronica si ha un numero intero di onde. Ossia l'integrale di linea della quantità di moto, esteso all'intera orbita chiusa è un multiplo intero della costante di Planck:

$\int m\mathrm{v}\, ds = nh.$

Considerando l'azione S costituito da quanti (onde), ritengo che in un fenomeno fisico il principio di minima azione si possa descrivere come il numero minimo di quanti *h: S = n*h = minima.*

Ossia ritengo che *il principio di minima azione si possa esprimere come*: La traiettoria che congiunge due punti dello spazio, è quella che minimizza il numero di quanti (onde).

Nella rifrazione le onde che attraversano un mezzo con indice di rifrazione maggiore, si propagano con velocità e lunghezza d'onda minori, mentre i raggi (traiettorie) hanno sempre direzioni ortogonali ai fronti d'onda così da percorrerle più velocemente.

Nella *figura* i raggi (in rosso) si propagano in direzione ortogonale (radiale) ai fronti d'onda. Per trovare le traiettorie che collegano la sorgente con i punti basta tracciare da tali punti i raggi ortogonali alle onde fino alla sorgente. (Si noti che per tracciare la traiettoria noi dobbiamo conoscere il punto iniziale "sorgente" e il punto finale); la natura pur non conoscendo il punto finale riesce a trovare la traiettoria con minima azione, ossia con il minor numero di onde.

Ritengo che, come le bolle di sapone si dispongono prontamente a forma di sfera per occupare il maggior volume ossia per ottenere al suo interno la minima pressione; allo stesso modo il raggio, quasi all'istante, si dispone lungo la traiettoria più corta. Presumo cioè che tale comportamento derivi dall'isotropia dello spazio.

L'azione S può essere espressa, altresì, come l'integrale dell'energia *L* nel tempo: $S=\int L*dt$ in cui *L* è la Lagrangiana (ossia come $S=\int_{x1}^{x2} P*dx$).

Quanto sopra viene espresso con il principio variazionale di Hamilton: l'evoluzione del sistema tende a minimizzare il valore dell'integrale che definisce l'azione S. Ossia un oggetto che si muove nello spazio-tempo compie il percorso che minimizza l'azione.

Dal punto di vista matematico l'evoluzione del sistema fisico è la soluzione dell'*equazione variazionale*:

$$\frac{dS}{dq(t)} = dS = 0$$

Se si sostituisce *S* con la costante di Planck *h,* ricordando le equazioni: ***h/T = E*** ed ***h /λ = p***
Considerato *h* piccolissimo ci si concede di scrivere:

$$\frac{dh}{dT} = dE = 0 \quad \text{da cui } E = cost \quad \text{conservazione dell'energia, inoltre}$$

$$\frac{dh}{dx} = dP = 0 \quad \text{da cui } P = cost \quad \text{conservazione della quantità di moto}$$

osservato che $i=\sqrt{-1}$ ed *h = costante* si ha:

$$\frac{dh}{dT} = i\hbar\frac{\partial}{\partial t} = dE = 0 \qquad \text{e} \qquad \frac{dh}{dx} = -i\hbar\frac{\partial}{\partial x} = dP = 0$$

tali equazioni esprimono la conservazione dell'energia e della quantità di moto.

Consideriamo il *quadrimpulso* V = [E/c, p_x, p_y, p_z] = [mγc, mγv_x, mγv_y, mγv_z], con $\gamma = (1-\beta^2)^{1/2}$, sappiamo che tale quadrimpulso al quadrato è un invariante (relativistico).

Se consideriamo il *Quadrimpulso quantico* P_h = [*dh/(c*dT), dh/d*λ_i] *(i= x,y,z)* con

*dh/(c*dT) = E/c componente temporale;* - *dh/d*λ_i = P_i *componenti spaziali x, y, z.*

Ritengo che il quadrimpulso esprima l'invarianza dello spazio*tempo. Questo concetto verrà espresso meglio nel capitolo: analisi dimensionale.
Vedi anche: *Tensore energia-impulso*, le sue *componenti spaziali* sono le componenti tridimensionali dell'*impulso* classico, mentre la *componente temporale* è l'*energia divisa per la velocità della luce*.

Per quanto sopra credo che l'equazione del moto di Eulero-Lagrange, cioè il *principio di minima azione,* derivi dalla **conservazione del quanto d'azione *h*** dell'onda. Tale interpretazione verrà approfondita nel paragrafo 6.4 *Leggi di conservazione ed analisi dimensionale*.

Occorre evidenziare che, mentre la 2° legge della dinamica F = m*a studia il moto della particella in ogni istante di tempo; il *principio di minima azione,* per sua stessa definizione, rileva tra le infinite traiettorie della particella quella con minima azione, prendendo in esame la struttura dello spaziotempo.

Ricordando che uno dei postulati della relatività ristretta è la *costanza della velocità della luce* (dell'onda), ritengo che il quanto d'azione *h* sia la grandezza fisica in grado di unire fisica quantistica e fisica relativistica.

6.4 Leggi di conservazione e analisi dimensionale

Mi sono sempre chiesto perché nei fenomeni fisici si ha la conservazione di alcune grandezze fisiche come: l'*energia*, la *quantità di moto*, il *momento angolare*, e non di altre, come ad esempio la forza.

L'equazione del moto di Eulero-Lagrange, che scaturisce dal *principio di minima azione*, e il teorema di Noether (che coglie le simmetrie del sistema fisico), cercano di dare una spiegazione alla suddetta domanda.

Ritengo che la risposta a tale domanda sia da ricercare nel significato del principio di minima azione, in particolare ritengo che occorra riflettere sul perchè:

1. Nel *vuoto quantomeccanico* si hanno solo onde di oscillazione quantizzate di valore *h* (perturbazione spazio-temporale*)*;
2. La luce, cioè il quanto *h,* viaggia sempre alla stessa velocità c qualunque sia il sistema di riferimento inerziale;
3. L'Azione S (su cui si basa il *principio di minima azione)* ha le stesse dimensioni del quanto *h* che costituisce l'onda;
4. L'*energia* è uguale al numero di *quanti nell'unità di tempo T;*
5. La *quantità di moto* è uguale al numero di *quanti nell'unità di spazio x*.

Da quanto sopra **si può ipotizzare che la conservazione di alcune grandezze fisiche derivi dalla conservazione del quanto d'azione *h*** cioè dell'onda, ovvero nella proprietà del *vuoto quantomeccanico.*

Se si ipotizza il **quanto h** una grandezza fisica **indivisibile** e **adimensionale**, (senza dimensioni), il *vuoto quantomeccanico* verrebbe ad assumere una struttura granulare cioè quantizzata.

Indicando, allora, con: "*T*" il tempo, "*L*" lo spazio e "*V*" la velocità, si possono osservare le nuove grandezze fisiche quantizzate:

- **L'Energia** E = h*v: avrà le dimensioni del reciproco del tempo [*1/T*]. Possiamo ritenere che: la **conservazione dell'energia** derivi dalla **conservazione del vuoto quantomeccanico nel tempo** (isotropia del tempo).

  Ad esempio: Se lo spazio-tempo rimane costante nel tempo l'onda non varia; se invece esso viene modificato (ad esempio dal campo gravitazionale) viene a variare la lunghezza d'onda λ, la frequenza e quindi l'energia.

- **La Quantità di moto** P = h/λ avrà le dimensioni del reciproco dello spazio [*1/L*]. Possiamo ritenere che: la **conservazione della quantità di moto** derivi dalla **conservazione del vuoto quantomeccanico nello spazio** (isotropia dello spazio);

  Ad esempio: se la luce viaggia in un mezzo isotropo la velocità e la lunghezza d'onda non variano; se invece essa passa in un mezzo non isotropo (con indice di rifrazione diverso), la sua velocità (quantità di moto) varia proporzionalmente all'indice di rifrazione e alla sua lunghezza d'onda λ, mentre la sua frequenza rimane costante (vedi la seconda legge della rifrazione di Snell: $\text{sen}\alpha/\text{sen}\gamma = \lambda_1/\lambda_2 = v_1/v_2 = n$).

- **Il Momento angolare** M = m*v*x = h sarà adimensionale [1]. Possiamo ritenere che: la **conservazione del momento angolare** derivi dalla **conservazione del vuoto quantomeccanico alla rotazione** (isotropia rotazionale); Dalla conservazione del quanto *h* possiamo fare scaturire il *principio di minima azione*. In uno spazio-tempo isotropo la luce conserva lunghezza d'onda e frequenza.

Si può ipotizzare che la luce percorra piccoli tratti uguali alla lunghezza d'onda e che per ogni tratto sia esplorata e scelta la direzione per cui è minima l'azione m*c*λ;

- **La Massa** m = h/λv ha le dimensioni del reciproco dello spazio*velocità [*1/L*V*]. Possiamo ritenere che: la conservazione della massa corrisponde alla conservazione dello **spazio*velocità** (= costante h). Per determinare/identificare la massa (materia) occorre cioè conoscenza la sua posizione (lunghezza d'onda) e la sua velocità (con l'approssimazione di un'onda o quanto *h)*.
  Di una particella/massa, per sua stessa definizione, è possibile calcolare con precisione solo il prodotto: *posizione*velocità,* e non separatamente *posizione* e *velocità*.
  Con questa ridefinizione della massa si ritrova, cioè, il *Principio d'Indeterminazione di Heisenberg.*
  Da quanto sopra si può ipotizzare che non sia necessario il concetto di massa (inerziale o gravitazionale che si voglia), ossia di materia e quindi di antimateria. Tutto viene ridefinito con una deformazione dello spazio-tempo.
- **La Forza** F = h*v/λ ha le dimensioni del reciproco di spazio*tempo [1/L*T]. Cioè i campi di forza possono essere rappresentati da deformazioni dello spazio-tempo:
  - lo spazio-tempo ha curvatura nulla (non deformato), se il campo di forze è nullo (F = 0);
  - lo spazio-tempo ha curvatura non nulla (deformato), se sono presenti forze di campo.

Se riprendiamo, adesso, la Relatività Ristretta (R.R.) ricordiamo che il prodotto spazio*tempo è un invariante Δt * Δx = cost, cioè non varia con la velocità del corpo.
Se paragoniamo lo spazio*tempo ad un volume possiamo dire che nessun fenomeno fisico può comprimere o espandere tale volume ma solo cambiarne la forma.

Si può ritenere che la R.R. e la R.G. derivi dall'nvarianza dello spazio*tempo.

É possibile ritenere che, mentre a basse velocità si ha la conservazione dell'energia e della quantità di moto, a velocità paragonabili a quelle della luce si abbia la conservazione dell'*energia*quantità di moto.* Ponendo $\gamma = 1/\sqrt{(1-v^2/c^2)}$, $E = \gamma m c^2$, $P = \gamma m v$ si ottiene la relazione:

$$\boldsymbol{E*P = v*(\gamma mc)^2 = cost.}$$

Essa rappresenterebbe l'invarianza spazio*tempo valida anche per i sistemi di riferimento non inerziali.

Esistono diversi campi di forza che possono deformare lo spazio-tempo, il campo gravitazionale con la <u>*Teoria della relatività Generale*</u> è un caso particolare. Tale teoria geometrizza lo spazio-tempo ed elimina le masse e le altre cariche che generano campi di forza.

Ricordiamo a proposito il <u>Secondo il Principio di Equivalenza</u> (fondamento della teoria sulla Relatività Generale e formulato da Einstein nel 1911): *gli effetti di un'accelerazione costante su un osservatore sono equivalenti a quelli di un campo gravitazionale uniforme sullo stesso osservatore supposto in quiete*; cioè al campo di forza viene sostituita una struttura deformata dello spazio-tempo.

Ipotizzando *h* adimensionale si perviene, pertanto, alle stesse deduzioni della Relatività Generale, cioè viene conferito allo spazio-tempo una consistenza (proprietà intrinseca) di tipo meccanico, dove la materia (massa) può essere considerata come un "grumo" spazio temporale.

Quindi, penso che in fisica si possa fare a meno del concetto di *massa* (per citare Einstein: "Quel che abbiamo chiamato materia è energia, la cui vibrazione è stata cosi abbassata da essere percepibile ai sensi. Non c'è

materia.”). I corpi materiali, considerati come particolari onde di energia, possono considerarsi immersi in uno spazio-tempo deformato da campi di forze.
Da quanto sopra detto, si presume di potere di fare discendere le caratteristiche di tutte le interazioni fondamentali dalle proprietà geometriche dello spazio-tempo ossia dalle sue proprietà di simmetria.

ANALISI GRANDEZZE FISICHE
per *h* adimensionale

$E = h*\nu = h/T$	$P = h/\lambda = h/S$
Energia → 1/Tempo	Massa → 1/Vel.*Spazio
P (quant. moto) → 1/Spazio	Princ. Indet. → Massa
Mom. Ang. → [1]	R.R. → Spazio-Tempo
Forza → 1/Spazio*Tempo	R.G. → Spazio*Tempo = k

Riassumendo, ipotizzando la costante *h* (l'onda) una grandezza adimensionale si ricava che:

a) la conservazione di alcune grandezze fisiche (*energia*, *quantità di moto*, *momento angolare*) derivi dalla conservazione dello spazio, del tempo e dello spazio-tempo;

b) la *massa* ha le dimensioni della *velocità*spazio,* per cui l'Indeterminazione di Heisenberg è insita nella sua nuova struttura dimensionale. Presumo quindi che la massa non abbia una propria struttura dimensionale cioè che essa non esista, ma sia stata concepita per la comprensione dei fenomeni fisici. Nè consegue che la dinamica debba essere sostituita dalla parametrizzazione dello spazio-tempo (vedi punti c) e d));

c) la *Relatività Ristretta* può essere ridefinità come la conservazione dello spazio-tempo;

d) la *Relatività Generale* può essere ridefinita con l'identificazione della forza con la deformazione spazio-tempo;

e) il *principio di minima azione* si può identificare con la traiettoria avente il minimo numero di onde *h* .

Risulta infine elementare ricavare la famosa equazione $\mathbf{E = mc^2}$ se si evidenzia la corrispondenza tra l'energia cinetica di un onda $E=1/2mc^2$ e l'energia cinetica di un'onda stazionaria costituite da 2 onde, (le due onde accoppiandosi annullano le loro velocità ma oscillano in loco con ampiezza doppia).

Nota Abbiamo visto che l’equazione ***h = E *T*** può essere letta: *Più è piccola l’energia E utilizzata più è lungo il tempo necessario per creare l’onda h.* Inoltre l’equazione ***p = hν/c*** rivela che le perturbazioni nello spaziotempo si propagano sempre con velocità *c*. Esse rivelano le proprietà quantomeccaniche del vuoto (spaziotempo).

Quanto descritto dimostrerebbe che le proprietà: simmetria - omogeneità del tempo, isotropia e omogeneità dello spazio; sono correlate ai principi di conservazione (dell'energia, del momento angolare,

della quantità di moto). In altri termini, le leggi che descrivono l'andamento dei fenomeni sono invarianti per l'omogeneità del tempo e l'isotropia e omogeneità dello spazio.

Il quanto d'azione *h* con lo spaziotempo (vuoto quantomeccanico), risulta allora una "grandezza fisica" privilegiata per lo studio delle leggi fisiche.

Spazio*Tempo corrisponde ad Energia*Q. di Moto **

7. Onde stazionarie e Pacchetto d'onde

7.1 L'onda stazionaria e lo Spazio Tempo

Nel paragrafo *4.3 Punto Onda* si è rilevata la simmetria: tra *frequenza* e *onda nello spazio*, e tra *punto nello spazio* e *onda di frequenze*; ossia, la simmetria tra spazio (onda) e tempo (frequenza).

Con l'equazione (5) abbiamo descritto la *particella* come un *pacchetto d'onde armoniche stazionarie* (coppie di onde in moto con direzione opposte aventi lunghezze d'onda $\lambda_i = 2L/i$, i = 1, 2, …).

In alcune circostanze prevale l'aspetto spaziale (corpuscolare) in altre l'aspetto temporale (ondulatorio).

Un'onda stazionaria può essere descritta:

$$f(x,t) = \sin 2\pi(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}) + \sin 2\pi(\frac{x}{\lambda} + \frac{t}{T}) = 2 * \sin kx * \cos \omega t$$

se l'onda stazionaria è in moto con velocità $u = \lambda * v = \lambda / T$ essa può essere riscritta:

$$f(x,t) = \sin 2\pi(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} + \frac{u*T}{\lambda}) + \sin 2\pi(\frac{x}{\lambda} + \frac{t}{T} + \frac{u*T}{\lambda}) = 2*\sin(kx')*\cos(\omega t')$$

Si osserva che la velocità *u* modifica lo spazio λ ed il tempo t.

Notare che il tempo *t* sta a numeratore e lo spazio λ al denominatore.

Se dell'equazione suddetta consideriamo: *sin(k*x)* la componente spaziale *e cos(ω*t)* la componente temporale, per quanto detto sulla legge di conservazione, ritengo che il prodotto spazio*tempo, al variare della velocità *u,* debba rimanere invariato cioè:

$$sin(k*(x'')) * cos(\omega*t'') = \text{cost.}$$

Considerato il pacchetto costituito da coppie di onde uguali provenienti da opposte direzioni, quando le onde progressive si incontrano con le onde retrograde le loro velocità si "annullano" mettendosi ad oscillare e creare le onde stazionarie.

In tale fase ritengo che la frequenza spaziale (onda in moto con velocità c), si trasformi in una frequenza temporale (onda stazionaria ferma).

Presumo cioè che **la *creazione* dell'onda stazionaria generi lo spazio ed il tempo della particella.**

Tale modifica del tipo di frequenza spiegherebbe che lo scorrere del *tempo interno* della particella sia scandito dalla frequenza temporale dell'onda stazionaria.

Secondo alcuni fisici (tra cui Schrödinger), la funzione d'onda è una sorta di vibrazione della struttura spazio-tempo.

Si rilevano alcune similitudini:

1. La somma di due numeri complessi coniugati crea un numero reale, similmente la somma di due onde opposte produce un'onda stazionaria (particella),

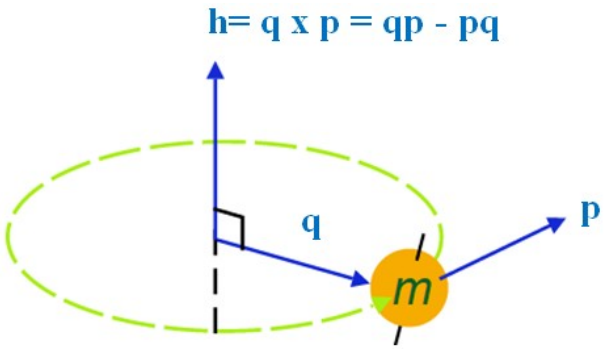
$$(a + ib) + (a - ib) = 2a \quad \leftrightarrow \quad \text{OndaAnt.} + \text{OndaRit.} = \text{Particella}$$

2. Se si sostituisce nell'espressione delle onde anticipate e ritardate, rispettivamente il *tempo reale t* e il *tempo immaginario it* tali onde possono essere paragonate a due numeri complessi coniugati ossia onde immaginarie, la cui somma da vita ad un'onda stazionaria cioè ad un'onda reale.

3. Il *commutatore* quantistico [q,p] , definito [q,p] = pq – qp :

a. Born e Jordan scoprirono una notevole semplificazione nei calcoli se si osserva che, la matrice *qp−pq* della posizione *q* con il suo impulso coniugato *p* ha la forma assai semplice: ***qp – pq = i*ħ*** che ricorda l'unione di due onde uguali (di lunghezza q=λ) provenienti da opposte direzioni (+p e -p) che creano un'onda stazionaria spaziale;

b. Pauli, indicata con E l'energia, dava la relazione (in formalismo matriciale): ***t*E- E*t = -i* ħ*** Questa ricorda l'unione dell'onda *anticipata* e *ritardata* che costituisce l'onda stazionaria temporale.



4. La relazione **qp – pq = i*ħ** esprime il prodotto vettoriale tra quantità di moto p e braccio q, avente direzione ortogonale al piano definito dai vettori q e p. Si ritiene che il quanto *h* abbia momento angolare L = *ħ,* qualunque sia la sua frequenza *v*.

Nel capitolo 6 si è visto che un *quanto h* è costituito da un'onda e che: minore è l'energia E (utilizzata), maggiore è il tempo T necessario per creare l'onda h. Mentre al paragrafo 6.4 Leggi di conservazione e analisi dimensionale si è ipotizzato il quanto d'azione h una grandezza fisica adimensionale.

Abbiamo visto che se si da al quanto *h* una struttura adimensionale si conferisce al "vuoto quantomeccanico" ovvero allo *spazio-tempo* la struttura fisica granulare del quanto h stesso. Inoltre, le grandezze fisiche conservative diventano lo *spazio* ed il *tempo* e, più in generale, lo *spazio-tempo*.

D'altra parte la Teoria della Relatività Generale, ipotizza che lo spazio-tempo sia deformato dalla materia.

Il vuoto quanto-meccanico è simile alla superficie del mare: Come il vento crea un'onda nel mare, così un quanto *h* crea un'onda nel vuoto quanto-meccanico.

Rilevato che ciò che accade viene percepito dai nostri sensi un pò in ritardo, in quanto la luce impiega un po' di tempo ad arrivare sino a noi (più lontano guardiamo nell'universo più indietro scrutiamo nel tempo); per l'onda stazionaria in moto, si può ipotizzare che l'onda proveniente da dietro sia percepita in *ritardo* mentre quella proveniente di fronte sia percepita in *anticipo,* e che l'onda stazionaria in moto sia come l'intersezione tra onde del passato e onde del futuro.

Poiché l'onda ha una dimensione spaziale Δx = λ: anche l'intersezione tra il passato e il futuro non è un punto ma un intervallo temporale Δt. Di una particella, non sarebbe pertanto possibile definire il punto o l'istante, ma un intervallo spazio-temporale (Principio d'Indeterminazione).

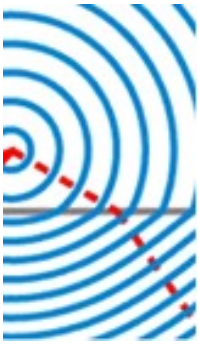
Nota: In merito all'ipotesi che la particella sia costituita da un pacchetto d'onde armoniche stazionarie (onde provenienti da direzioni opposte) occorre ricordare l'equazione ***di Klein-Gordon,*** *(creata dalla modifica dell'equazione di Schrödinger e formulata per tenere conto dell'aspetto relativistico della funzione d'onda). Tale equazione contiene due soluzioni descriventi due onde. Secondo l'interpretazione transazionale: una soluzione descrive il flusso di energia dal passato al futuro* ***(onde ritardate****) e una soluzione descrive il flusso di energia dal futuro al passato (****onde anticipate****).*

Secondo la nuova ipotesi le due onde (soluzioni), a differenza dell'*interpretazione transazionale,* sono costituite da onde provenienti da due direzioni opposte.

7.2 Pacchetto d'onda e frequenze.

Come sopra detto dall'equazione (1) si possono creare onde (cioè quanti *h)* sia facendo scorrere il tempo *t* (onda in oscillazione) che lo spazio *x* (onda in moto):

$$f(x,t) = a * \sin 2\pi(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}) \quad (1)$$

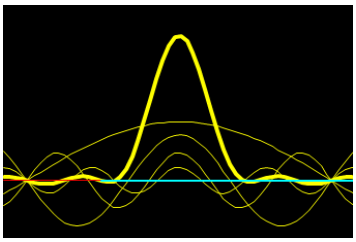


Ritengo allora che per calcolare l'energia $\boldsymbol{E = h * v}$, cioè il numero di quanti *h* nell'unita di tempo *T*, occorra considerare sia la frequenza di oscillazione $v = 1/T$ che la velocità di traslazione $v = \lambda / T$ dell'onda.
Onde con uguale $\omega = (x/\lambda - t/T)$ hanno lo stesso numero di quanti nello spazio-tempo.
Nella rifrazione, ad esempio, la luce passando da un mezzo ad un altro con indice di rifrazione maggiore rallenta la sua velocità da c a v in quanto diminuisce la sua lunghezza d'onda da λ *a* λ'. In tal modo la sua frequenza di oscillazione *v* rimane costante: $v = c/\lambda = v/\lambda'$. *La luce quindi, anche se varia la sua velocità , non varia il suo numero di quanti h nell'unità di tempo,* né la sua l'energia $E = h*v = cost.$
Ritengo che nel pacchetto d'onda avvenga un fenomeno analogo alla *rifrazione* in cui le onde assumono velocità $v_i < c$, lunghezze d'onda $\lambda_i < \lambda$ e frequenza $v = \mathbf{v_i / \lambda_i = cost}$.
Poichè a basse velocità v corrispondono piccole lunghezze d'onda λ_i, è possibile confinare in uno spazio molto piccolo un elevato numero di quanti h (onde) quindi energia.
Suppongo allora che: *L'onda possa modificare la sua frequenza (spaziale) e la sua velocità a condizione che rimanga costante la sua frequenza (temporale) e quindi la sua energia;*
Poichè in tale fenomeno l'energia si conserva, credo che il pacchetto d'onda possa cambiare forma, in funzione del campo a cui viene sottoposto, variando le velocità e le lunghezze d'onda che lo compongono.

Se si confronta la velocità della luce alla velocità di propagazione di un'onda su una corda $v=(T/\mu)^{1/2}$, in cui T è la tensione della corda e μ la densità, si dovrebbe concludere, paradossalmente, che la *tensione* del vuoto sia maggiore della *tensione* all'interno dei corpi.

[Nota: Se consideriamo un elettrone con un'energia di 100 eV = 1,602 x 10^{-17} J, posto che la costante di Planck h = 6,624× 10^{-34} J*s, il numero di quanti *h* (numero di oscillazioni) al secondo che lo costituirebbero sarebbe dell'ordine di 1× 10^{17}]

7.3 Pacchetto d'onde e particella



Per quanto sopra si ipotizza l'elettrone un pacchetto d'onde di materia-energia, distribuito nello spazio secondo l'equazione d'onda di Schrödinger. La funzione d'onda esprime cioè la densità di materia/onda e non la probabilità di trovare la particella.

Tale pacchetto si ritiene costituito da *onde stazionarie* con frequenze multiple della frequenza fondamentale che , come già detto, si muovono con velocità proporzionale alla loro lunghezza d'onda così da oscillare con la stessa frequenza ed avere un pacchetto d'onda stabile.

Le onde del pacchetto si ipotizza abbiano quindi stessa frequenze (temporale) $\boldsymbol{\nu = c/\lambda = c*p/h}$ ed energia quantizzata:

$$E = \Sigma\, h*\nu = n*h*\nu$$

Ricapitolando, ritengo che:

- La massa sia: $m = E/c^2 = nh\nu/c^2 = nh/c\lambda = np/c$
- *Velocità* e *posizione* della particella non possano essere determinate perché essa è costituita da un *pacchetto d'onde* (è rispettato il *principio d'indeterminazione)*;
- Due particelle intrecciate (*entangled*) abbiano dell'onde in comune. Nell'*entangled* (intreccio) ciò che si propaga istantaneamente è la forma ψ dell'onda (frequenza, fase, ampiezza)*(non-località)***;**
- Il "vuoto" quantistico non sia pieno di particelle virtuali ma di onde che, nello spazio-tempo mediamente si elidono;
- La *pressione* del vuoto quantistico influenzi la forma al pacchetto d'onde.

7.4 Considerazioni sulla particella/pacchetto d'onda

Ritengo allora che, invece di considerare quantizzata la materia o l'energia, occorra considerare quantizzata l'azione *S* sopra indicata. In pratica la traiettoria di un corpo non può variare con continuità, ma deve differire, almeno, di un quanto d'azione $S_2 - S_1 = h$.

Si deduce che lo *spazio-tempo* ha una struttura granulare e non continua. Lo *spazio-tempo* si può rassomigliare allo schermo di un televisore costituito da pixel.

I pixel infatti hanno dimensioni spazio temporali piccole ma finite.

Per lo *spazio - tempo* questi pixel sono la *lunghezza* e il *tempo* di Panck cioè le dimensioni di Planck. Esse si ricavano dalle costanti: *G gravitazione universale*, *h costante di Panck* e *c velocità della luce*.

Ritengo allora che l'elettrone, ricordando la sua descrizione matematica, per esistere in un'infinita di punti lungo la sua orbita, debba avere una natura ondulatoria. Ritengo, cioè, che la stessa funzione d'onda ψ (ossia la ψ^2) costituisca l'elettrone. In particolare presumo che la particella si possa rappresentare con il *pacchetto d'onde* e la *linea d'onda* (composta dai punti in cui le onde del pacchetto si annullano per interferenza), la quale si identifica con la traiettoria del pacchetto.

Cioè le onde, che compongono la particella, si curvano secondo il **principio di minima azione**.

Possiamo paragonare la particella (pacchetto d'onde) all'insieme *treno-binario* (come il treno si muove sui binari, così la particella si muove lungo la *linea d'onda)* in cui riusciamo a rilevare solo il treno.

La *linea d'onda* può essere ricavata con il *Principio di Minima Azione* e "costituisce" la funzione d'onda. Penso che la particella non sia isolata ma, con la sua *linea d'onda,* si estenda su tutto lo spazio definito dalla funzione d'onda ψ.

L'ipotesi della *linea d'onda* per le particelle e per i fotoni spiegherebbe l'intreccio quantistico e la traiettoria della luce (traiettoria di minimo tempo) .

Ritengo che l'orbitale (dell'equazione di Scrodinger) sia il luogo dei punti in cui l'azione S è costante e, per tale motivo, valga il Principio di esclusione di Pauli; cioè che due elettroni di uno stesso orbitale abbiano onde in comune (la funzione d'onda ψ è unica per tutte e due le particelle), così che se un elettrone cambia una sua proprietà con la modifica di alcune onde, cambia contemporaneamente anche l'altro elettrone dell'orbitale. Cioè, all'interno dell'orbitale, lo *spazio-tempo* ha una costituzione particolare: ogni fenomeno fisico, avviene istantaneamente in tutta l'area.

Nell'intreccio quantistico, la funzione d'onda ψ dei due elettroni è unica, così come ritengo sia nell'orbitale atomico. Nello spazio compreso tra le particelle suppongo che le onde interferiscano annullandosi e per tale ragione non è possibile interagire con esse.

8. L'Effetto Doppler nell'onda stazionaria e la Relatività Ristretta

Sappiamo che una sorgente in moto in avvicinamento/allontanamento, a causa dell'effetto Doppler, ha una frequenza maggiore/minore.

Poichè il suono si propaga nell'aria, se ci avviciniamo alla sorgente la nostra velocità si somma/sottrae a quella del suono (la frequenza è più alta/bassa).

Nel caso della luce, essa si propaga nel vuoto con la stessa velocità *c*, qualunque sia il suo moto di avvicinamento/allontanamento; si rileva comunque un effetto Doppler (frequenze più alta o più bassa). Cioè osservatori in moto relativo fra loro (in sistemi inerziali) osservano la luce con frequenze diverse.

Si può ipotizzare che il tempo vari in relazione alla frequenza di oscillazione della luce e che la Teoria della Relatività Ristretta sia un fenomeno Doppler. Approfondiremo di seguito tale ipotesi.

8.1 L'effetto Doppler nel suono

Indichiamo: con S la **sorgente**, con O l'**osservatore**, con v e **λ** la velocità e la lunghezza d'onda del suono; con v_s ed f_s la velocità e la frequenza della sorgente; con v_o ed f la velocità e la frequenza dell'osservatore. Si ha $f_s = v/\lambda$

1) **Sorgente ferma** e osservatore in avvicinamento: $f_o = (v + v_o)/\lambda = f_s * (v + v_o)/v$ **1.a**

e osservatore in allontanamento: $f_o = (v - v_o)/\lambda = f_s * (v - v_o)/v$ **1.b**

in questo caso le onde arrivano all'osservatore con velocità $v \mp v_o$;

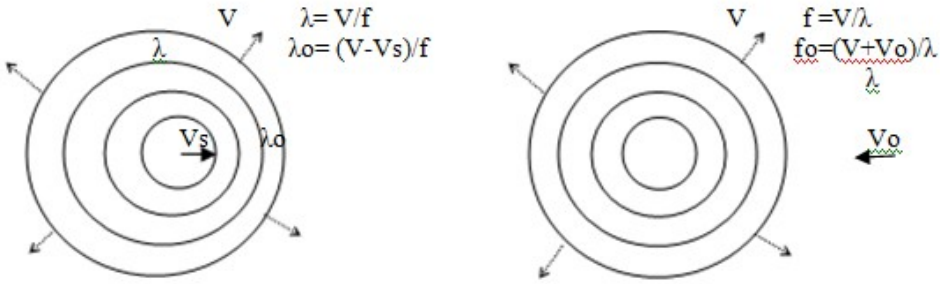
2) **Osservatore fermo** e sorgente in avvicinamento: $f = v/\lambda' = v/((v - v_s)*T) = f_o * v/(v - v_s)$ **2.a**

e sorgente in allontanamento: $f = v/\lambda' = v/((v + v_s)*T) = f_o * v/(v + v_s)$ **2.b**

in questo caso le onde arrivano all'osservatore con lunghezza d'onda $\lambda' = (v \mp v_s)*T$;

3) Osservatore e sorgente in avvicinamento: $f = f_s * (v + v_o)/(v - v_s)$ *composizione dei casi 1.a) e 2.a).*

Osservatore e sorgente in allontamento: $f = f_s * (v - v_o)/(v + v_s)$ *composizione dei casi 1.b) e 2.b)*



Si fare notare che i casi 1.a) e 2.a) , anche con $v_s = v_o$, non hanno ugluali frequenze; ossia sorgente ferma e osservatore in avvicinamento non è equivalente a sorgente in avvicinamento e osservatore fermo, ciò perché il suono per propagarsi ha bisogno di un mezzo (aria, acqua, …).

8.2 L'effetto Doppler nella luce

La luce di velocità c, diversamente dal suono, non ha bisogno di un mezzo per propagarsi, ossia non esiste un sistema di riferimento privilegiato; non è possibile stabilire se è in moto la *sorgente* o l'*osservatore*. Nelle equazioni dell'effetto Doppler per il suono, dobbiamo quindi sostituire alla velocità del suono la velocità della luce: v = c; ed alle velocità della sorgente e dell'osservatore la velocità relativa u: $\mathbf{v_s = v_o = u}$.

Sorgente ferma e osservatore in avvicinamento: $f_o = (c + u)/\lambda = f_s * (c + u)/c$ **1.a**

e osservatore in allontanamento: $f_o = (c - u)/\lambda = f_s * (c - u)/c$ **1.b**

in questo caso le onde arrivano all'osservatore con velocità $v \mp v_o$;

Osservatore fermo e sorgente in avvicinamento: $f = c/\lambda' = c/((c - u)*T) = f_o * c/(c - u)$ **2.a**

e sorgente in allontanamento: $f = c/\lambda' = c/((c + u)*T) = f_o * c/(c + u)$ **2.b**

Per osservatore e sorgente in avvicinamento si deve avere una frequenza '*ibrida'* che, ipotizzo, **media geometrica** delle due frequenze dei casi 1.a) e 2.a), **cioè per osservatore e sorgente in avvicinamento**:

$$f = (f_s * (c + u)/c * f_s * c/(c - u))^{1/2} = f_s * ((c + u)/(c - u))^{1/2}$$

poichè $f_s = c/\lambda_s$ e $f_o = c/\lambda_o$ si ha: $\lambda_o = \lambda_s * ((c - u)/(c + u))^{1/2}$

Si fa osservare che, con tale ipotesi (***media geometrica* delle due frequenze**) (osservatore in avvicinamento e sorgente in avvicinamento), la lunghezza d'onda '**coincide**' con quella dell'*effetto Doppler relativistico* osservatore e sorgente in avvicinamento.

Altro esempio: Consideriamo un tubo vuoto in cui all'interno viaggia dal punto A al punto B un raggio di luce.

Caso a) Supponiamo di avere 2 osservatori: il 1° solidale con O, il 2° solidale con A, cioè col tubo. Per l'osservatore solidale col tubo, indicato t' il tempo impiegato dal raggio per andare da A a B, lo spazio percorso è c*t' . Per l'osservatore solidale con O il tubo è in moto con velocità u ortogonale al raggio, indicato con O il punto in cui parte il raggio, esso percorre il tratto OB = ct per il teorema di Pitagora $c^2t^2 = u^2t^2 + c^2t'^2$ da cui si ottiene la:

$$\mathbf{t' = t * (1 - u^2/c^2)^{1/2}}.$$

Cioè un fenomeno ha una durata diversa per i 2 osservatori, in moto fra loro con velocità *u*.

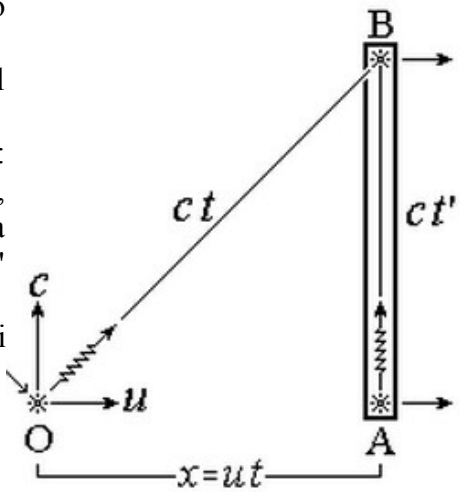
Si fa osservare che mentre accade tale fenomeno il 1° osservatore si muove di uno spazio $x = ut$ rispetto al tubo e che maggiore è tale spazio, maggiore è la differenza temporale tra t e t'. Detto in altri termini: una variazione della distanza spaziale tra osservatore-oggetto implica una distanza temporale (tempi diversi) osservatore-oggetto.

Caso b) Se il moto *u* avviene lungo la direzione del tubo calcoliamo lo spazio percorso dal raggio andata e ritorno: da A a B e da B ad A.

Per l'osservatore solidale col tubo non si ha alcun moto per cui il percorso di andata è uguale a quello di ritorno: L = c*t.

Per l'osservatore esterno, invece, il tubo è in moto con velocità u: Con la velocità *c* discorde con *u,* mentre il raggio si muove da A a B, il punto B si sposta di u*t' per cui il raggio deve percorrere la distanza c*t' + u*t': Se equipariamo gli spazi dei due osservatori: c*t' + u*t' = ct e **t' = ct/(c+u)**;

Ripetendo il ragionamento con la velocità *c* discorde con *u* si ottiene: ct'' – ut'' = ct e **t'' = ct/(c-u)**.



Per l'osservatore esterno si trovano due tempi di percorrenza t' e t'' diversi.
Se consideriamo t^0 la **media geometrica** di t' e t'':

$t'*t'' = c^2t^2/(c^2-u^2) = t^2/(1-u^2/c^2)$ si ritrova la relazione relativistica: $\mathbf{t = t^0*(1-u^2/c^2)^{1/2}}$

Negli esempi sopra descritti si trova che la **media geometrica** di tempi e frequenze 'coincide' con le equazioni relativistiche.

8.3 L'effetto Doppler nell'onda (di luce) stazionaria

Ripetiamo il suddetto ragionamento per un'onda stazionaria in moto con velocità *u.* Ricordiamo che l'onda stazionaria è composta di un'onda che viaggia con velocità +c ed una che viaggia con velocità –c.

Supponiamo che l'onda stazionaria si muova con velocità *u* avente la stessa direzione di c*;* avremo allora l'*onda di avvicinamento* (onda anticipata) che ha velocità opposta ad u e l'*onda di allontanamento* (onda ritardata) con velocità di verso uguale ad u.

Riscriviamo, adesso, la relazione dell'effetto Doppler per le due onde (casi 1) e 2) per la luce):

1) **Sorgente/particella in moto Osservatore fermo**:

onda in avvicinamento: $f_o = f_s * c/(c- u) = f_s * 1/(1- u/c)$ **1.a**

onda in allontanamento: $f_o = f_s' * c/(c+ u) = f_s' * 1/(1+ u/c)$ **1.b**

la frequenza "*ibrida*": *media geometrica* delle due frequenze: 1.a) e 1.b) vale:

$$fo=\sqrt{f*f'}=f_s*\sqrt{\frac{1}{(1-\frac{u}{c})}*\frac{1}{(1+\frac{u}{c})}}=f_s/\sqrt{(1-\frac{u^2}{c^2})}=f_s/\alpha \qquad (7.1)$$

2) **Sorgente/particella ferma Osservatore in moto:**

onda in avvicinamento: $f_s = f_o * (c + u)/c = f_0 * (1 + u/c)$ **2.a**

onda in allontanamento: $f_s = f_o' * (c - u)/c = f_o' * (1 - u/c)$ **2.b**

la frequenza "*ibrida*": *media geometrica* delle due frequenze: 2.a) e 2.b) vale:

$$\mathbf{f_s = (f_o*f_o' * (1 + u/c)* (1 - u/c))^{1/2} = f_o * (1 - u^2/c^2)^{1/2}}$$

Osservazioni:

- Con l'aumento della velocità *u* la frequenza *f* (media geometrica della frequenza dell'onda anticipata e dell'onda ritardata) diminuisce. Ritengo che il *tempo* della particella sia scandito dalla propria oscillazione, come se ogni particella abbia un orologio interno il cui battito corrisponde a una oscillazione.
- Poiché $c = \lambda*\nu = \text{cost.}$ si ha inoltre $\lambda = c/\nu = c/(\nu_o/\alpha) = \lambda_o*\alpha$.
- Se si cambia il punto di vista: 1) Osservatore fermo Sorgente in moto; 2) Osservatore in moto Sorgente ferma, si osserva che la contrazione diventa dilatazione; in accordo con la R.R. secondo cui, se esiste una velocità u tra due corpi, è una convenzione stabilire chi dei due è in moto (con la dilatazione del tempo e la contrazione delle lunghezze) e l'altro fermo.

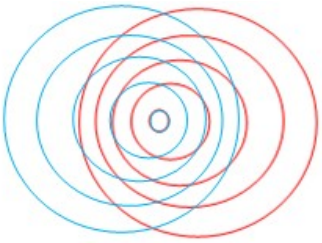
Se consideriamo infine la relazione relativistica $ds^2 = dx^2 - c^2 dt^2 = \text{cost.}$ (ipotizzato il moto lungo x) valida per tutti i sistemi di riferimento inerziali, essa può essere scritta nella forma $ds^2 = (dx - c\,dt) * (dx + c\,dt)$, la quale può essere letta: la dimensione spaziotemporale ds è *media geometrica* delle dimensioni di due onde che provengono da direzioni opposte *+c* e *-c*.

Con l'ipotesi della *media geometrica* l'onda stazionaria descive la dilatazione del tempo e la contrazione della lunghezza ovvero le equazioni di Lorentz e quindi la Relatività Ristretta.

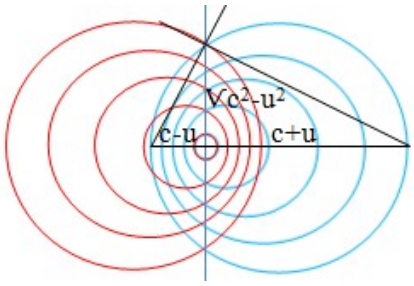
In altre parole ritengo che il pacchetto con le sue onde stazionarie in moto crei, lungo la direzione del moto, un "doppio effetto Doppler" con una deformazione dello spazio-tempo.

Ricordando, inoltre, le leggi di conservazioni e l'isotropia dello spazio-tempo, per sistemi inerziali (con velocità v = cost. e forza F = 0) deve essere: $\Delta x * \Delta \tau$ = cost., cioè il prodotto spazio*tempo deve rimanere costante (invarianza dello spaziotempo).

Deduco allora che: nell'onda stazionaria in moto una parte della sua *frequenza temporale* si trasformi in *frequenza spaziale.* Le due frequenze devono essere cioè in relazione.



Sotto l'aspetto geometrico: Se la velocità u = 0 l'effetto Doppler è nullo e le onde rimangono concentriche.
All'aumentare della velocità aumenta l'effetto Doppler, le coppie di onde tendono a separarsi e la parte in cui le onde si intersecano si riduce.
(*Nella figura le onde anticipate sono rappresentate rappresentate con un effetto Doppler di avvicinamento, le onde ritardate con un effetto Doppler di allontanamento. Le coppie di onde risultano simmetrici rispetto all'asse verticale passante per il centro della particella*).
Si osserva che, aumentando la velocità *u*, la riduzione dell'intersezione è uguale alla contrazione della lunghezza della particella.
Infatti, posto il tempo t = 1 , r = c*1, e considerato il triangolo rettangolo costruito nella metà superiore delle onde *vedi figura* (ricordando il 2° teorema di Euclide): *l'altezza di tale triangolo è media proporzionale* $(c^2-u^2)^{1/2}$ *alle proiezioni dei cateti sull'ipotenusa c-u e c+u*.



Si può ipotizzare, in qualche modo, che l'area in cui i cerchi si intersecano:

- rappresenti la particella che si contrae con la velocità;
- sia percorsa dall'onda temporale, cioè che tempo scorre proporzionalmente alla dimensione della particella;

Si può immaginare che il tempo proprio della particella scorra proporzionalmente al tempo Δt che impiega la luce c ad attraversare la particella di dimensione Δd, cioè $\Delta t = \Delta d/c$.

Si può ipotizzare, quindi, che la R.R. sia un fenomeno prettamente ondulatorio in cui le onde del pacchetto si deformano nello spazio (con la variazione delle lunghezze d'onda) e nel tempo (con la variazione delle frequenze di oscillazione).

Come già detto il prodotto spazio*tempo ($x*\tau$), deve rimanere costante al variare della velocità *u* per mezzo del coefficiente adimensionale α (che lega lo spazio tempo della particella a riposo e lo spazio tempo della particella in moto).

Per la *Relatività Ristretta si ha:*

$$\Delta t' = \Delta t/\alpha \quad e \quad \Delta x' = \Delta x * \alpha \qquad \text{per cui} \qquad (\Delta x*\alpha)*(\Delta t/\alpha) = \Delta x * \Delta t = cost.$$

Si ricorda, inoltre, che le Equazioni di Maxell (per le onde elettromagnetiche) sono invarianti per i sistemi di riferimento inerziali, così come le trasformazioni di Lorentz.

L'universo con tutta la materia (onde stazionarie) può considerarsi un mare di onde. Si può ipotizzare allora che:

I fenomeni fisici descritti con il principio di *Relatività Ristretta* possono essere descritti con il fenomeno dell'*effetto Doppler* che si verifica nel pacchetto d'onde stazionario in moto. Si coglie allora un legame molto stretto tra Relatività e Meccanica Quantistica.

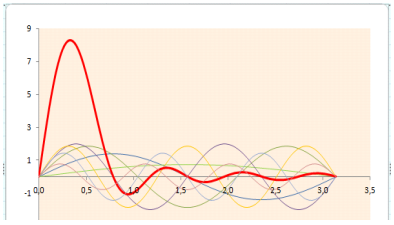
La media geometrica delle frequenze: 1.a) e 1.b)

(osservatore in moto) vale: $$f = \sqrt{f * f'} = f_0 * \sqrt{(1+\frac{u_o}{c})*(1-\frac{u_o}{c})} = f_o * \sqrt{(1-\frac{u_o^2}{c^2})} = f_0 * \alpha \qquad (7.2)$$

Osservazioni: *La geodetica risulta una curva che, tra tutte le curve aventi estremi fissati, ha lunghezza minima. Le geodetiche sono punti stazionari sia per la lunghezza che per l'energia. Intuitivamente, ciò può essere compreso con l'esempio di un elastico teso fra due punti, esso minimizza la traiettoria per ridurre la propria energia potenziale elastica; la traiettoria risultante dell'elastico è cioè una geodetica.*

****

9. Il Pacchetto d'onde



Riassumendo la $\psi^2(x,t)$ (con ψ funzione d'onda di Schrödinger) viene scomposta come somma di onde armoniche stazionarie tridimensionali di ampiezze *bi*, con modi normali di oscillazione $\lambda_i = 2L/i$, con $i = 1, 2, \ldots$

L'insieme di tali onde "**pacchetto d'onde"** definisce fisicamente la particella. Presumo che *la particella venga a spalmarsi con diversa densità di onde di materia (e non di probabilità) in $\psi^2(x,t)$.*

Queste onde, definite con la (*5a*):

$$f_s(x,t) = \Psi^2(x,t) = \sum_i b_i * (\sin(\frac{P_i x}{\hbar} - i * \frac{Et}{\hbar}) + \sin(\frac{P_i x}{\hbar} + i * \frac{Et}{\hbar})$$

hanno *quantità di moto P* ed *energia cinetica E* quantizzate.
Nella figura a fianco è rappresentata la particella-punto con le prime 7 onde stazionarie.

Nelle figure a fianco è rappresentato con una curva gaussiana un **pacchetto d'onde (particella)** con *le onde stazionarie che la compongono.*

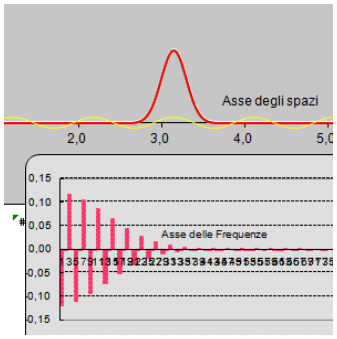
Si fa rilevare che:

Il *pacchetto d'onda* è definito in un intervallo spazio-temporale, per cui:

- Se aumentano le frequenze (onde) il pacchetto (particella) si compatta ;
- Se diminuiscono le frequenze (onde) il pacchetto (dimensione particella) si espande;

Al limite, per una sola frequenza il pacchetto diventa un'onda.

Si ipotizza la particella definita in un intervallo in cui lo spazio ed il tempo hanno entrambi una distribuzione gaussiana.



9.1 Quantizzazione del campo elettromagnetico

La carica q dell'elettrone produce a una distanza r un campo elettrostatico $E = k*q/r^2$, il quale produce su una carica generica q una forza $\boldsymbol{F = q*E}$. Se consideriamo la costante h adimensionale, il campo elettrostatico E ha dimensioni [1/(q*L*T)] cioè, considerata la carica q unitaria, **il campo elettrico *E* corrisponde ad una deformazione unitaria dello spazio tempo**.

La formula di Lorentz $\boldsymbol{F = q(E + \mathbf{v}\mathbf{x}B)}$ associa ad ogni punto P(x,y,z) ed istante t i vettori E e B che determinano una forza F se in quel punto fosse presente una carica q.

Da essa si ricava che il campo magnetico B ha dimensione [E*T/L]. Si deduce altresì che il campo elettrico E è dato dalla velocità (nello spazio tempo) del campo magnetico *B*, ossia **il campo magnetico *B* corrisponde alla velocità (nello spazio-tempo) della deformazione unitaria dello spazio tempo**.

La definizione di *E* e *B* definisce il concetto di campo. Occorre rilevare che la più piccola carica *q* è costituita dalla carica unitaria dell'elettrone: e^- pertanto ritengo che la carica e^- ed il quanto *h* del fotone siano strettamente correlati.

Nota: La gravità quantistica a loop

Nellagravità quantistica, i gravitoni svolgono lo stesso ruolo che svolgono i fotoni nell'ambito dell'elettrodinamica quantistica. Ogni oggetto presente nell'universo influisce sullo spaziotempo e quindi su tutte e quattro le dimensioni che lo compongono: per esempio il Sole, attraverso la sua gravità, influenza sulle tre dimensioni dello spazio contraendolo, e influisce sul tempo rallentandolo. Il vuoto quantomeccanico subisce cioè una deformazione spaziotempo tale che: l*t= cost. *Redshift_gravitazionale* Contrazione temporale gravitazionale = costante.*

Nota: **spaziotempo relativistico**

Secondo Einstein spazio e tempo considerati singolarmente sono relativi mentre lo spaziotempo e' un'entita' assoluta. *Secondo la relativita' ristretta: la velocita' combinata del moto di un corpo nello spazio e nel tempo e' sempre uguale alla velocita' della luce*. Quando un oggetto si allontana, **parte del moto complessivo viene sottratto al moto nel tempo a favore del moto nello spazio** e questo implica che il moto nel tempo rallenta. Se si osserva il tempo di un oggetto in movimento si puo' constatare che tale tempo diminuisce.

Nota: **Il campo di Higgs**

Tale campo non è per niente immobile, le sue fluttuazioni sono provocate da bosoni di Higgs che compaiono e scompaiono. Il risultato è un mare in ebollizione di particelle che si spintonano a vicenda. Quando un elettrone, per esempio, entra in questo campo, attraversa con facilità il mare di bosoni di Higgs. Altre particelle, invece, vengono rallentate maggiormente dai bosoni e, rallentando, convertono molta della propria energia in massa. Più le particelle vengono rallentate dal campo di Higgs, più la loro energia viene condensata in una forma super-concentrata che chiamiamo massa. Il bosone di Higgs spiega dunque come mai tutte le particelle elementari che compongono la materia abbiano una massa e interagiscono formando la materia, anziché schizzare via alla velocità della luce.

9.2 Onde di diversa frequenza ma con uguale energia

La rifrazione: Quando un'onda passa da un mezzo, con indice di rifrazione n_1 a un altro con indice di rifrazione n_2, cambia velocità ($v_2 = v_1*n_2/n_1$) e lunghezza d'onda λ. Mentre la frequenza rimane costante: $\nu = v/\lambda$ = cost. Cioè il numero di onde h nel tempo T resta costante: h/T = cost., e poiché h/T= h*ν = E

anche l'energia rimane costante. Inoltre l'indice di rifrazione n varia con la frequenza dell'onda; un esempio di questo fenomeno è la scomposizione (dispersione) della luce bianca (contenente tutte le componenti spettrali) quando attraversa un prisma.

Si fa osservare che affinché il pacchetto d'onda non si disperda nel tempo è necessario che le onde stazionarie di diversa frequenza spaziale viaggino con velocità $\mathbf{v}_i$ proporzionale alla propria lunghezza d'onda. In tal modo le onde nel pacchetto oscillano tutte con la stessa frequenza temporale *v*. Ritengo allora che il pacchetto sia costituito da onde con diversa velocità.

Da tale condizione consegue che: **le onde del pacchetto hanno la stessa energia in un intervallo spazio-tempo *x-t* ma diversa velocità (quantità di moto)**.

Ciò è in accordo con la *descrizione matematica dell'elettrone*: **L'orbitale è un *autostato* per l'osservabile *energia*, ma non è un autostato per l'osservabile *posizione*, rispetto alla quale è invece uno "*stato di sovrapposizione*"**. Vale a dire l'elettrone in questo stato ha un'energia definita, ma non può avere una posizione definita e appare sparpagliato nello spazio, in altre parole appare come una "*nuvola elettronica*" la *funzione d'onda*.

Nella figura precedente le coppie di onde sottili dello stesso colore compongono le relative onde in grassetto.
Le onde gialle, che hanno una lunghezza d'onda doppia di quelle verdi, si muovono con velocità doppia.

Riassumendo, per trovare il pacchetto d'onde (la particella) che costituisce la funzione d'onda di Schrödinger ψ:

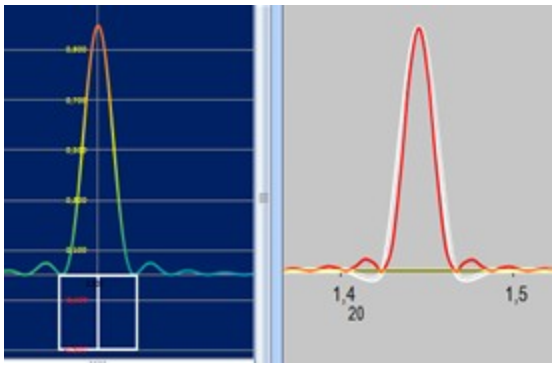
- Siamo partiti dalle onde per spiegare i fenomeni dell'interferenza e la funzione d'onda.
- Si sono scelte onde con frequenze multiple della fondamentale al fine di avere onde stabili.
- Con la serie di Fourier si sono trovate le onde sinusoidali (aventi frequenze multiple e quindi stabili) che descrivono la funzione d'onda ψ.
- Si sono considerate, quindi, coppie di onde stazionarie provenienti da direzioni opposte al fine di confinare l'energia (la particella) in una regione dello spazio.
- Si è posta la condizione che le coppie di onde viaggino con velocità proporzionali alle loro rispettive lunghezze d'onda, al fine di ottenere un pacchetto stabile nel tempo e con una sola frequenza di oscillazione.

******

10. Il pacchetto d'onde e i dati sperimentali

Considerando la particella come un insieme di onde stazionarie, proviamo ad esaminare e, possibilmente, spiegare gli strani fenomeni quantistici (effetto tunnel, doppia fenditura, intreccio quantistico tra particelle, collasso della funzione d'onda, significato della funzione d'onda, …).

<u>10.1 Il Principio di Indeterminazione e la diffrazione</u> (Vedi: L'onda e la Costante di Planck)



Il Principio di Indeterminazione di Heisenberg ci dice che le coppie: *–posizione-quantità di moto* (***x/P***) ed *energia-tempo*

(***E/t)*** – sono coppie di osservabili ***complementari*** o ***coniugate***, perché più accuratamente determiniamo il valore di un'osservabile della coppia di coniugate, meno accuratamente potremo conoscere il valore dell'altra osservabile. Per esempio, migliore è la misura della *posizione x* di una particella, peggiore è la misura della sua *quantità di moto*.

Il *principio d'indeterminazione* può essere scritto nella forma ***Δω*Δx*** dove ***Δω*** e ***Δx*** sono, rispettivamente, i numeri di onde componenti la particella e la posizione della particella.

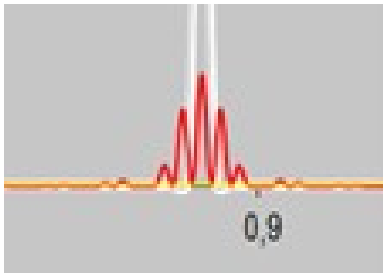
Consideriamo la particella come un pacchetto di armoniche (con lunghezze d'onda multiple della fondamentale) che si elidono in tutto lo spazio tranne che in un punto.

Sul lato sinistro della figura è riportata la diffrazione di una particella quando attraversa una fenditura.

Sul lato destro è riportata con la linea rossa la somma delle prime 300 armoniche (elevate al quadrato $y(x_i)^2$) che descrivono il punto isolato.

Quando il pacchetto passa attraverso la fenditura, le onde con lunghezza d'onda maggiore (rispetto alla fenditura) subiscono una maggiore diffrazione e si espandono, oltre la fenditura, quasi uniformemente per cui influiscono sulla figura di diffrazione. Le onde con lunghezza d'onda minore, viceversa, subiscono meno diffrazione, concentrandosi maggiormente al centro.Inoltre se la fenditura è abbastanza ampia tutte le onde che compongono la particella riescono ad attraversarla così da ottenere una figura nitida.

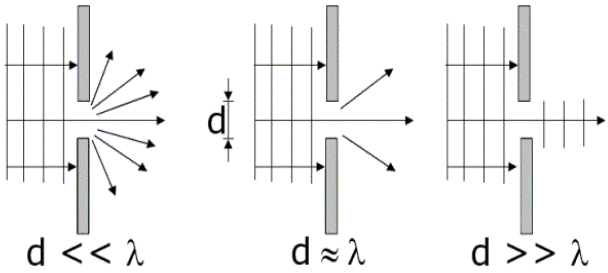
Diminuendo la larghezza della fessura, sempre meno onde (della particella) riescono a passare così da creare la diffrazione.

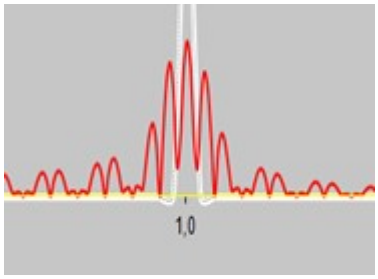


Premesso quanto sopra, si è simulata la particella che ha attraversato la fenditura con un pacchetto di armoniche in cui sono state eliminate quelle di lunghezza d'onda maggiore.

Nelle *figure*, con la linea bianca si è rappresentato un pacchetto di onde non perturbato (particella), composto da 100 armoniche (si osservi come la particella risulta concentrata).

Con la linea rossa si è rappresentato un pacchetto di onde perturbato (pacchetto che attraversa la fenditura) simulato togliendo le armoniche con maggiore lunghezza d'onda.





Per simulare il restringimento della fenditura vengono eliminate ulteriori armoniche. Si noti la similitudine con le frange di interferenza: diminuendo le armoniche aumenta la diffrazione. Diminuendo le onde di maggiore-lunghezza, il pacchetto si espande in un'area sempre più estesa. Al limite, con una sola armonica, la particella verrebbe a espandersi su tutto lo spazio. Ricordando che un pacchetto è costituito di onde con lunghezza d'onda diversa si deduce la formula ***Δω*Δx= h*** cioè il *principio di indeterminazione*: al diminuire del numero di onde Δω aumenta l'area Δx in cui si spalma la particella.

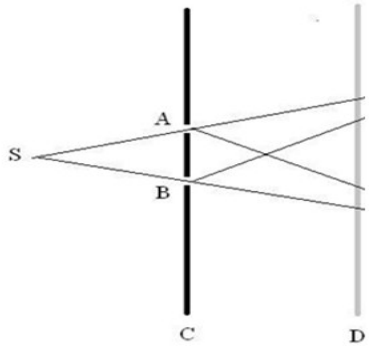
Presumo che se la particella non viene "disturbata", essa rimane concentrata in una regione dello spazio ben definito (**comportamento corpuscolare**); se viene "disturbata", influendo su alcune delle sue armoniche, essa (come risultante di armoniche) si espande nello spazio manifestando la sua consistenza ondulatoria (**comportamento ondulatorio**).

Presumo, comunque, che la figura di diffrazione sia composta di punti generati da particelle oscillanti.

Le figure riportate riguardanti la diffrazione sono ricavate con il programma excel: Fourier Diffraz3.

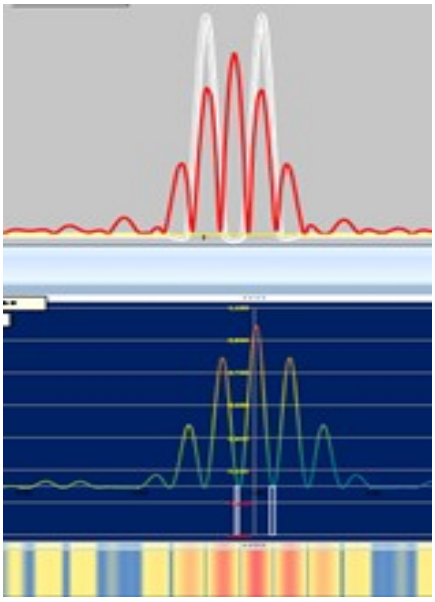
10.2 L'interferenza del fascio di particella attraverso 2 fessure

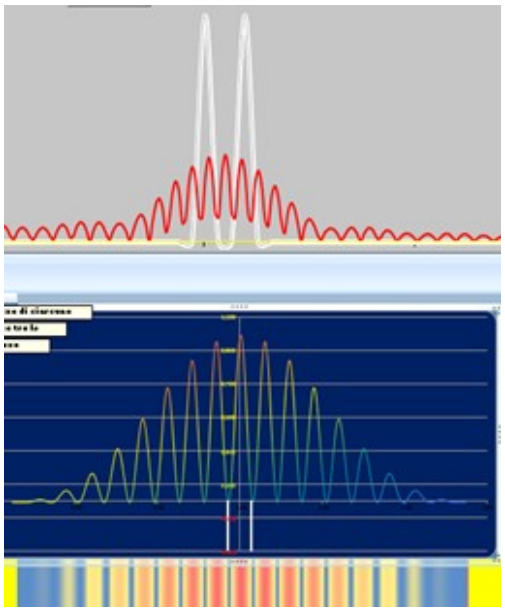
Consideriamo adesso la particella *s* che incontra lo schermo C con le due piccole fessure A e B,tale schermo diffonde la particella creando delle diffrazioni in ognuna delle due fessure. Ritengo che con piccole fessure solo le onde che hanno una piccola lunghezza d'onda riescono a entrare ed a propagarsi oltre, cioè più sono piccole le fessure meno onde riescono ad attraversarle più aumenta la diffrazione.



Queste 2 diffrazioni interferiscono fra loro creando l'interferenza.

Nelle 2 figure sono messe a confronto il comportamento della particella 'simulata' quando attraversano 2 fessure e della luce.





Nella parte superiore sono riportate, simulate con la somma delle prime 100 armoniche $y(x_i)^2$ (elevate al quadrato), 2 particelle/punti vicini, in cui sono state tolte le onde di bassa frequenze per simulare l'interferenza dovuta alle 2 fessure;

Nella parte inferiore è riportata la diffrazione della luce. Si osserva che diminuendo la larghezza delle fessure la luce si affievolisce e le frange si allargano;

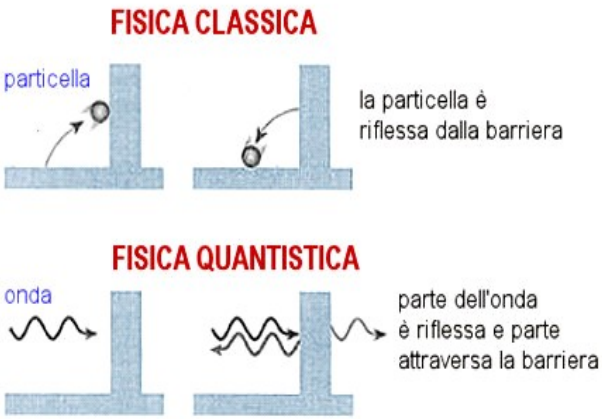
Nella prima figura delle 100 armoniche sono state eliminate le prime 40, nella seconda le prime 70.

Si noti la similitudine delle frange d'interferenza con la somma delle armoniche che rappresentano i punti.

10.3 L'effetto tunnel

La meccanica quantistica prevede che una particella abbia una probabilità diversa da zero di attraversare spontaneamente una barriera arbitrariamente alta.

Infatti, applicando i postulati della meccanica quantistica al caso di una barriera di potenziale in una dimensione, si ottiene che la soluzione dell'equazione di Schrödinger all'interno della barriera è rappresentata da una funzione esponenziale decrescente. Dato che le funzioni esponenziali non raggiungono mai il valore zero, si ottiene che esiste una piccola probabilità che la particella si trovi dall'altra parte della barriera dopo un certo tempo *t*.



È interessante notare che, per il *principio di indeterminazione di Heisenberg*, non è mai possibile osservare una particella mentre attraversa tale barriera, ma solo prima e dopo tale transizione.

Con la nostra ipotesi possiamo paragonare il comportamento del pacchetto d'onda all'onda sonora.

Così come il suono, composto di varie armoniche, incontrando una parete in parte viene riflesso ritornando indietro ed in parte viene rifratto propagandosi dall'altra parte attenuato.

Allo stesso modo si ha il fenomeno di riflessione e rifrazione del pacchetto d'onde (particella) quando incontra una barriera di potenziale. Cioè la particella come il suono viene a trovarsi contemporaneamente dentro e fuori la barriera.

10.4 L'intreccio quantistico

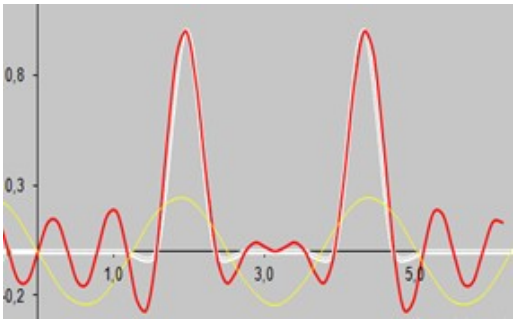
Con uno storico esperimento effettuato in laboratorio nel 1982, il fisico francese Alain Aspect osservò che se di 2 particelle intrecciate**, (**ad esempio 2 elettroni che si trovano nello stesso orbitale), ad una di esse si cambiava una proprietà (come ad esempio lo spin o la polarizzazione) anche la proprietà dell'altra cambiava istantaneamente.

Questo cambiamento avviene semplicemente all'atto della misura, dove sulla scala quantistica, l'osservatore interagisce inevitabilmente con l'osservato: *l'atto della misura perturba la prima particella e istantaneamente influenza anche la particella con cui è legata*.

Tale termine indica uno stato fisico di legame indissolubile tra due particelle elementari che hanno interagito almeno una volta. Il legame è di natura quantistica e significa che entrambe le particelle si comportano come un tutt'uno.

"*E' sperimentalmente provato che un atomo. se sufficientemente isolato dal resto dell'universo, può restare in uno stato eccitato per un tempo indefinito. .... Il meccanismo che genera una transizione atomica non è quindi presente nell'atomo isolato; è il risultato dell'accoppiamento con il resto dell'universo*." Carver A. Mead.

I fotoni, quindi, non vengono emessi a casaccio in tutte le direzioni ma vanno sempre da un elettrone ad un altro, vicino o lontano che sia.



Presumo pertanto che due particelle intrecciate devono avere alcune armoniche in comune. La modifica di una delle due particelle comporta la modifica di qualcuna di queste armoniche, quindi anche dell'altra particella.

Con le onde stazionarie, considerando le 2 particelle legate costituite da onde stazionarie che provengono da direzioni opposte, si ritiene che alcune di queste onde siano contenute nei due elettroni intrecciati. Se si interviene su una particella modificando una di queste armoniche, nello stesso istante anche l'altra particella ne risente. Si ipotizza che la perturbazione su un'onda venga percepita istantaneamente su tutte e due le particelle.

Si ricorda, infatti, che due elettroni per essere intrecciati devono provenire da una funzione d'onda comune (stesso orbitale).

Ritengo che il *principio di esclusione di Pauli* (in un orbitale non vi possono essere elettroni con gli stessi numeri quantici, cioè su uno stesso livello energetico vi possono essere al massimo due elettroni con spin opposti) sia un fenomeno di non località, cioè un caso particolare di intreccio quantistico.

Da ciò si può ipotizzare che le armoniche riempiano lo spazio: *In quasi tutti i punti dello spazio le armoniche non hanno frequenze uguali per cui si elidono a vicenda; solo in pochi punti dello spazio entrano in risonanza costruttiva rivelandosi come particelle.*

Ritengo che l'intreccio quantistico tra particelle sia una dimostrazione del legame tra tutte le particelle.

Poiché è possibile fare interagire a distanza due particelle, si deve ritenere che "il vuoto quanto - meccanico" non sia una fluttuazione di fotoni che compaiono e scompaiono casualmente in tempi brevissimi, ma un fenomeno deterministico di onde. Ritengo, cioè, che il principio d'indeterminazione non sia un fenomeno casuale ma causale. **

10.5 Il Collasso della funzione d'onda

Si parla di collasso della funzione d'onda quando l'insieme di tutti gli stati possibili da essa descritti (i cosiddetti "*autostati*") si riduce drasticamente e istantaneamente a uno solo. Se ad esempio stiamo studiando la posizione di un elettrone, il collasso della funzione d'onda rappresenta il passaggio dalla "*superposizione*" (dove l'elettrone occupa effettivamente molteplici posizioni) all'unica posizione dove l'abbiamo trovato all'atto dell'osservazione/misura.

Quando si compie un'osservazione l'elettrone compare in un punto esatto; gli scienziati dicono che la sua funzione d'onda *collassa*, ossia che la sua localizzazione nello spazio: *invece di essere "spalmata" per tutta l'orbita intorno al nucleo, si stabilizza in un punto specifico*.

In seguito ad una misura effettuata sul sistema fisico lo stato che lo rappresenta non sarà più una sovrapposizione di *autostati* della grandezza misurata, bensì uno solo degli autostati relativi a tale grandezza fisica.

Se si considera fisicamente la particella come l'insieme di onde: *"pacchetto d'onde",* il collasso della funzione d'onda ritengo che possa essere interpretato come segue: Ipotizzando, per semplicità, la funzione d'onda ψ (in giallo) costituita dalla somma di 2 sole onde (autostati), (*vedi figura),* se facciamo un'osservazione in un punto x solo l'onda che ha maggiore ampiezza(probabilità) viene rilevata (la funzione d'onda collassa in quella più probabile). Nel caso dell'esempio se osservassimo la particella (identificata con l'onda gialla): nei punti di ascissa in cui tale onda è positiva troveremmo l'autostato onda verde, mentre nei punti dove è negativa troveremmo l'autostato onda nera.

Suppongo che l'osservazione rilevi una sola onda mentre distrugge gli autostati meno probabili.

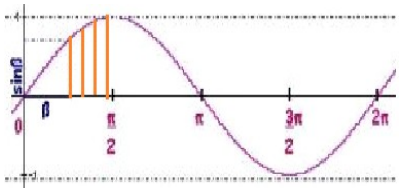
Si può descrivere questo fenomeno con un altro esempio: *Supponiamo di abitare in un universo a due dimensioni e, pertanto, di non conoscere la terza dimensione. Non potremmo percepire correttamente un oggetto a 3 dimensioni (ad esempio il dado). L'unico modo per comprendere l'oggetto è di eseguire più osservazioni per conoscere i numeri ed i valori delle facce. L'oggetto può essere identificato allora come l'insieme delle facce osservate.*

Ritengo che quando si lancia il dado (quando si effettua una osservazione), ad ogni lettura è possibile "guardare" solo un numero, anche se i restanti numeri rimangono reali.

Come non è possibile rilevare l'onda che corrisponda al colore bianco, in quanto costituita da più colori, similmente non è possibile *vedere* la particella nel suo insieme di onde.

Come per leggere il numero del dado occorre "bloccarlo", allo stesso modo per leggere l'autostato dobbiamo "bloccare" la particella. Presumo che, così come l'operazione di "bloccare" (misurare) il dado ci fa perdere la capacità di visualizzare gli altri numeri, analogamente avviene il <u>collasso della funzione d'onda</u>.

Se riuscissimo a non interagire con il sistema al momento dell'osservazione, potremmo rilevare contemporaneamente più onde (autostati).



Noi conosciamo con precisione i valori delle onde, tuttavia non sappiamo quali tra queste 'uscirà'. La probabilità sta in questo.

Ritengo cioè che per conoscere la funzione d'onda occorrano diverse osservazioni in modo da potere ricostruire la curva di probabilità. A tal proposito richiamo l'esperimento dell'interferenza di elettroni singoli.

Gli elettroni, anche se passano uno per volta attraverso le 2 fenditure sufficientemente strette, producono una figura d'interferenza. Presumo che le particelle, attraversino le due fenditure con valori di fase φ diversi e tali da subire una deviazione diversa e interferire in maniera costruttiva o distruttiva.

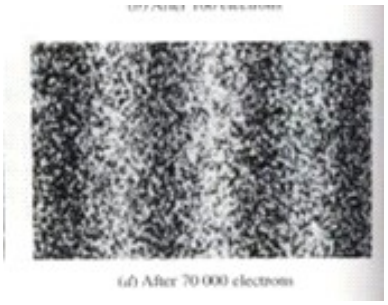
<u>Ritengo che questo esperimento dimostri la struttura ben definita della funzione d'onda (particella)</u>. <u>Così come per conoscere un dado (i suoi numeri) dobbiamo effettuare numerosi lanci, analogamente per avere l'*immagine* completa di un elettrone si devono *fotografare* un elevato numero di elettroni</u>.

Ritengo che il pacchetto d'onda, pur essendo confinato in una regione piccolissima "particellare", abbia una composizione ondulatoria che si manifesta quando il pacchetto viene "scomposto". Per tale motivo non è possibile osservare contemporaneamente l'aspetto particellare e ondulatorio della "particella", come non è possibile osservare la luce bianca dopo che essa viene scomposta nelle sue componenti.

Poiché le figure di diffrazione, interferenza, ecc. sono composte da punti costituiti dai pacchetti d'onda, suppongo che le 2 onde (che si creano quando attraversano le 2 fenditure) si ricompongano in un pacchetto a causa della "pressione" del vuoto quantistico.

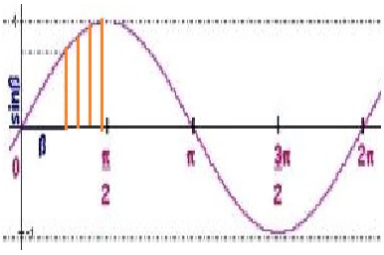
<u>10.6 Interferenza di particelle singole</u>

Consideriamo il cannone elettronico che spara un solo elettrone per volta, al ritmo abbastanza basso perché in ogni tempo attraverso le 2 fenditure non passi mai più di un elettrone. Ora è impossibile che si verifichino collisioni fra elettroni. Quando mettiamo in azione il cannone elettronico, gli elettroni cominciano lentamente ad accumularsi dall'altro lato.

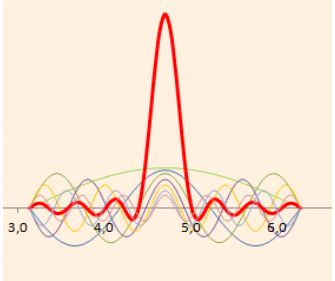

(d) After 70 000 electrons

Dapprima gli elettroni sembrano distribuirsi sulla superficie in modo casuale. Al crescere dei dati, però, si ha la sorpresa di vedere formarsi una figura d'interferenza! Ogni elettrone passa contemporaneamente attraverso le due fenditure, come un'onda, ma colpisce il rivelatore in un singolo punto, come una particella. Ogni elettrone interferisce solo con se stesso.

Con questo esempio si può di nuovo dedurre che (per attraversare contemporaneamente le due fenditure) l'elettrone non abbia una natura corpuscolare.



Pertanto, considerando l'elettrone di natura ondulatoria*: pacchetto d'onde stazionarie che si elidono in tutto lo spazio tranne che in un punto in cui è percepita la particella*, si può comprendere come le onde possano contemporaneamente attraversare le due fenditure e dopo, superata la barriera, ricomporsi in un punto e colpire il secondo schermo.



Com'è possibile, allora, spiegare la figura d'interferenza che l'insieme di questi punti producono sul secondo schermo?

Per questo fenomeno occorre ricordare che il pacchetto d'onde, per le ipotesi fatte, compie delle oscillazioni nel tempo T.

Pertanto, quando il pacchetto d'onde (l'elettrone) attraversa le 2 fenditure, interferisce con se stesso ogni volta con valori di fase φ diversi, tali da produrre deviazioni diverse.

Inoltre, essendo il pacchetto composto da onde di diversa lunghezza λ, possiamo considerare questo evento come un fenomeno di *diffrazione* dell'onda con un ostacolo: le onde con una lunghezza d'onda λ maggiore vengono deviate di più di quelle che hanno una λ minore.

Per avere, allora, una rappresentazione completa dell'elettrone occorre considerare un numero elevato di particelle, con valori diversi di fase φ, che verranno a comporre la figura d'interferenza sul secondo schermo.

Si fa rilevare che la frequenza $v = E/h$ di oscillazione della particella è molto elevata e tale da fare apparire la particella costante nel tempo (come un'immagine creata in uno schermo video).

La lunghezza d'onda Compton dell'elettrone con $\lambda = 2\times10^{-12}$ metri ha una frequenza:

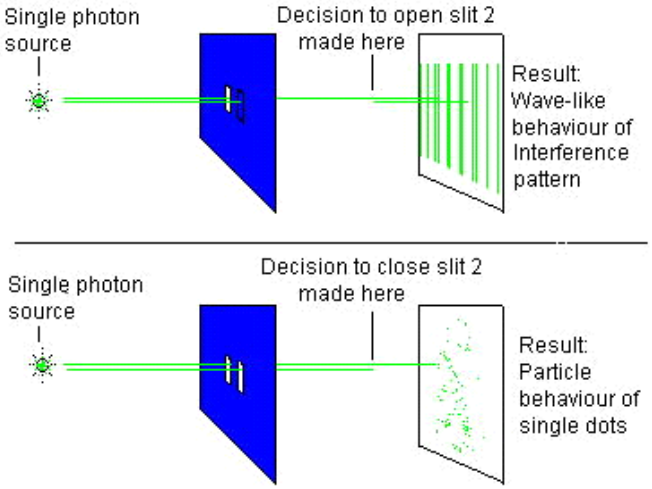
$$v = c / \lambda = 3\times 10^{8} / 2\times 10^{-12} = 1{,}5\times 10^{20} \text{ al secondo.}$$

Ritengo che se potessimo osservare la particella in diversi istanti, essa mostrerebbe fasi φ diverse.

10.7 L'esperimento a scelta ritardata di Wheeler.

Le entità quantistiche hanno una sorta di consapevolezza del passato e del futuro?

Nel 1978 John A. Wheeler propose una geniale versione mentale dell'esperimento, della doppia fenditura denominata l'esperimento della *scelta ritardata* partendo dagli esperimenti che mostrano che, quando si colloca un rilevatore sulle fenditure e si analizza da quale fenditura passa il fotone, la figura d'interferenza scompare.



Nell'esperimento della scelta ritardata il rilevatore viene collocato in un punto intermedio tra le due fenditure e il rilevatore finale, in modo da osservare quale traiettoria viene assunta da ogni singolo fotone dopo il passaggio tra le due fenditure, ma *prima* di giungere al rilevatore finale. La teoria quantistica dice

che: *se si spegne il rilevatore intermedio e non si analizzano le traiettorie dei fotoni, questi formeranno una figura d'interferenza. Se però si osservano i fotoni per determinare da che fenditura sono passati, anche se l'osservazione è compiuta dopo che l'hanno attraversata, non ci sarà figura d'interferenza*. La "scelta ritardata" entra in gioco appunto perché è possibile decidere se analizzare il fotone *dopo* che il fotone è passato attraverso la/le fenditura/e. La decisione, secondo la teoria quantistica, sembra influenzare il modo in cui il fotone si comporta nel momento in cui passa per la/le fenditura/e, ossia una frazione infinitesimale di tempo prima dell'osservazione.

Nelle parole di Wheeler: "*Così si decide se il fotone è venuto da una rotta o da entrambe le rotte dopo che ha già fatto il suo viaggio*".

L'enorme importanza concettuale dell'esperimento di Wheeler ha stimolato una serie di esperimenti per realizzarlo, il più conclusivo dei quali è stato realizzato dal gruppo di Ottica Quantistica del CNRS guidato da Alain Aspect con tecniche interferometriche utilizzando laser a singoli fotoni.

Immaginiamo un fotone che passa attraverso i due fori, come un'onda, e fa interferenza con se stesso. Come abbiamo visto, per distruggere la figura di interferenza, è sufficiente osservarlo "subito dopo" che è passato da un foro: in tal caso esso non è più un'onda ma una particella e quindi non può passare anche dall'altro foro. E poiché non può passare dall'altro foro la figura di interferenza scompare.

Perciò noi possiamo "decidere" se osservare il fotone come particella o se permettergli di fare la figura di interferenza come un'onda.

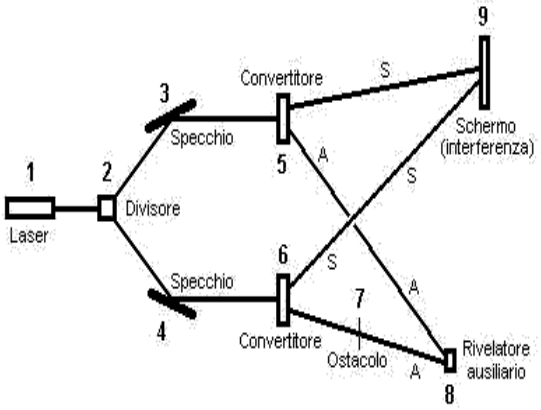
Abbiamo detto che riveliamo il fotone "subito dopo" che è transitato dal primo foro. "Subito dopo" significa che è passato pochissimo tempo dal transito nel foro. Ma per quanto piccolo sia il tempo trascorso, il fotone comunque ha già oltrepassato il foro; inoltre fino a questo momento esso è rimasto un'onda perché non l'abbiamo ancora rivelato. Perciò nel frattempo l'onda ha già imboccato anche l'altro foro e lo ha oltrepassato. E allora come fa il fotone ad essere rivelato "tutto intero" vicino al primo foro? Che fine fa il fronte d'onda che aveva appena oltrepassato il secondo foro? Scompare nel nulla? Sembra proprio di sì, ma com'è possibile?

Per chiarire questo punto, Wheeler propose di fare così: lasciamo che il fotone passi attraverso la maschera, come un'onda, passando da entrambi i fori. A questo punto, *dopo* che il fronte d'onda ha superato la maschera, inseriamo un rivelatore non lontano dal primo foro, ma neanche tanto vicino (cioè quanto basta per essere sicuri che nel frattempo tutto il fronte d'onda sia già sicuramente transitato dalla maschera). In pratica vogliamo effettuare la *scelta* di osservare il fotone come particella, però *dopo* che esso è transitato da entrambi i fori come un'onda. Infatti l'esperimento è chiamato "a scelta ritardata".

L'esperimento è stato realmente effettuato da alcuni scienziati dell'Università del Maryland. Ebbene, inserendo il rivelatore *dopo* che l'onda è transitata dalla maschera, esso individua il fotone come particella e perciò la figura d'interferenza *non* si crea. Ma allora che fine fa la parte dell'onda già transitata dal secondo foro?!

Scompare nel nulla, poiché il fotone viene rivelato interamente vicino al primo foro! Eppure, diciamo noi, l'onda era transitata sicuramente anche dal secondo foro: infatti, se *non* si inserisce il rivelatore (lasciando inalterato tutto il resto), si forma la figura di interferenza (che può formarsi solo se l'onda transita da *entrambi* i fori). E allora com'è possibile?!

La cosa che a noi appare incredibile è che ciò che il fotone ha deciso di fare sulla maschera (passare da un foro solo o entrambi) dipende da una scelta *successiva* al transito stesso! Infatti, il rivelatore viene inserito dopo che il fronte d'onda è transitato dalla maschera. Come dice Wheeler, la "scelta" di far passare il fotone da un solo foro o da entrambi è "ritardata", cioè avviene *dopo* che il fotone è passato!



Riportiamo ancora l'incredibile esperimento di Mandel

Vediamo che cosa succede se si inserisce appunto un ostacolo nel punto 7. Una volta che i percorsi sono stati divisi, ci aspettiamo che essi siano indipendenti: perciò l'ostacolo nel punto 7 non dovrebbe alterare la figura di interferenza nello schermo (9) poiché il punto 7 si trova su un altro percorso, che porta al rivelatore ausiliario (8) e non allo schermo (9).

Se inseriamo l'ostacolo nel punto 7, interrompendo così il percorso di un fascio ausiliario, la figura di interferenza dei fasci segnale nello schermo (9) scompare! Eppure non abbiamo effettuato misure sui fasci segnale (che finiscono sullo schermo, 9), ma solo su un fascio ausiliario (che finisce nel rivelatore, 8)! Anche se allontaniamo moltissimo i due fasci (A e S) tra di loro, quando operiamo sui fasci A incredibilmente produciamo un'influenza sui fasci S.

Descrizione del fenomeno a scelta ritardata di Wheeler con le onde stazionarie.

Cerchiamo di fare un esempio del fenomeno.

Il comportamento dell'elettrone quando attraversa due fessure si può descrivere con il seguente esempio. Supponiamo un veicolo a 4 ruote che si possa trasformare in 2 veicoli a 2 ruote. Esso quando incontra 2 gallerie affiancate si comporta come segue:

a) Se dietro una delle gallerie è presente un rivelatore il mezzo attraversa una sola galleria;

b) Se dietro una delle gallerie non è presente il rivelatore, il mezzo si divide e attraversa le due gallerie.

Per la spiegazione del fenomeno si può ipotizzare:

1) Che il mezzo faccia una scelta *ritardata* dopo avere attraversato le gallerie (un ritorno indietro nel tempo)??? L'interpretazione transazionale considera la transazione tra onde ritardate, provenienti dal passato, e onde anticipate, provenienti dal futuro, che danno luogo all'onda/particella.

2) Che il mezzo sappia della presenza del rivelatore prima di attraversare le gallerie.

Poiché non riesco a comprendere la prima ipotesi, opto per la seconda ipotesi ovvero che il veicolo sappia in anticipo della presenza del rivelatore.

Per spiegare in che modo il mezzo è a conoscenza della presenza del rivelatore occorre ricordare l'ipotesi che: *la particella è costituita da un pacchetto di onde stazionarie, ognuna di esse costituita da 2 onde uguali che provengono da opposte direzioni*.

Possiamo cioè paragonare le due onde (che compongono l'onda stazionaria) a due persone, provenienti da opposte direzioni, che si sono date appuntamento in un determinato luogo ed ora. Ciascuno conosce un lato del percorso e arrivati all'appuntamento si combinano assieme (creano la particella) e si scambiano le informazioni, così da sapere '*in anticipo*' della presenza del rivelatore.

Il tale modo si spiegherebbe la capacità 'premonitrice' della particella.

Occorre evidenziare che il rivelatore (per funzionare) deve essere posto lungo il percorso della particella/onda. Questo avvalora l'ipotesi che la particella sia costituita anche dalla "*linea d'onda",* cioè dai punti dello spazio in cui le onde del pacchetto si annullano per interferenza.

Si ritiene pertanto che la particella, nel suo movimento, segua la traiettoria della *linea d'onda*. Si può cioè immaginare la particella (pacchetto d'onde) come l'insieme treno-binario: come il treno si muove sui binari, così la particella percorre la linea delle onde che la compongono.

La particella, allora, non si può considerare isolata poiché, con la sua linea d'onda, si estende sullo spazio circostante.

Ritengo che il *fenomeno fisico della scelta ritardata* costituisca una prova dell'esistenza della linea d'onda. La linea d'onda spiegherebbe inoltre la traiettoria della luce (principio di Fermat).

11. Confronto delle tre interpretazioni

Considero interessante *l'interpretazione di Bohm* riguardo la funzione d'onda universale non locale che permette a particelle lontane di interagire istantaneamente, mentre non condivido l'ipotesi dell'esistenza sia delle onde che delle particelle.
Ancora più interessante si presenta *l'interpretazione transazionale*. Essa riuscirebbe a spiegare quei fenomeni strani della m.q. con onde del passato e del futuro.
La mia interpretazione della m.q. ipotizza la *funzione d'onda* ψ un'onda reale (come aveva ipotizzato Schrödinger) non locale, composta dalla somma di onde stazionarie (ipotesi De Broglie).

Per introdurre quindi l'argomento saranno illustrate: le proprietà delle onde; la serie di Fourier e le onde stazionarie.
Sotto, accanto alle due interpretazioni, ho inserito la mia.

Interpretazione	Deterministica	Onda reale	Storia singola	Variabili nascoste	Collasso	Ruolo dell'osservatore
di De Broglie-Bohm (Approccio *onda-pilota)*	Si	Si	Si	Si	No	Nessuno
Transazionale	No	Si	Si	No	Si	Nessuno
Mia	Si	Si	Si	No	No	Nessuno

Com'è possibile che le onde (che compongono la particella) provengano da direzioni opposte?
Quando abbiamo ipotizzato la particella come somma di onde, abbiamo considerato che le onde si annullassero tra loro in tutto lo spazio, tranne che in una piccolissima regione in cui è presente la particella. Nella regione in cui le onde si annullano, si può rilevare solamente una *fluttuazione quantistica* (per tempi e spazi piccolissimi), dovuta al non perfetto annullamento delle onde. Le particelle pertanto si possono considerare come delle increspature nel mare di onde (vuoto quantistico). Tali onde dovrebbero avere la peculiarità di modificarsi simultaneamente lungo tutta la loro estensione (ad esempio mediante una traslazione rigida), così da potere spiegare la *non località* dei fenomeni quantistici.
La particella/pacchetto con le sue onde si estenderebbe ben aldilà della sua dimensione classica, in modo da poter interagire (intreccio) con altre particelle. Essa farebbe, quindi, parte di un sistema più complesso che, se sollecitato, reagisce come un insieme unico e in maniera immediata in ogni suo punto (non località).
In tal modo la particella sembra conoscere quello che gli succederà così da potere decidere in anticipo.

Se osserviamo un fulmine esso sembra seguire un percorso casuale in effetti esso segue il percorso di minor resistenza elettrica. Cioè è la caratteristica dello spazio (*minor resistenza elettrica)* a determinare il percorso.
La particella (considerando le sue onde) si estende lungo la geodetica dello spazio-tempo in cui il vuoto non è costituito da particelle virtuali, che compaiono e scompaiono casualmente, ma da onde ben determinate che seguono le *geodetiche,* le quali sono definite dalle forze di campo agenti in esso.

Il quadrato del tempo è un numero negativo. La mattonella di tempo è una lacuna del pavimento di spazio.
Questo significa che il tempo non può essere rappresentato da un numero reale perché nessun numero reale al quadrato è negativo.

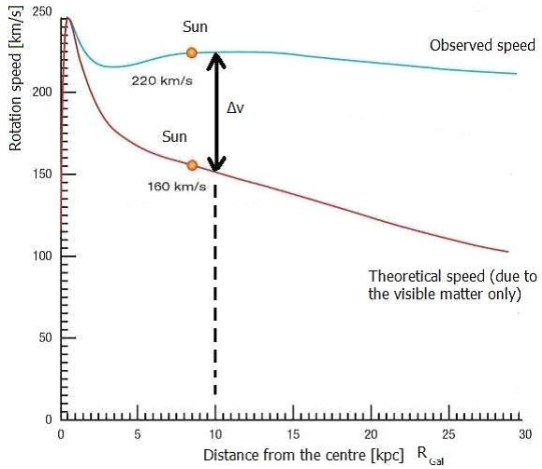
Posto $\Delta x_4^2 = - \Delta t^2$ abbiamo

$$x_4 = \pm\, i\, \Delta t$$

Ok , la dimensione tempo è immaginaria e si presenta subito in due versioni: positiva o negativa (a ritroso nel tempo).
A questo punto si aprono due strade : o prendiamo atto che la Natura ama i quadrati e cerchiamo di riscrivere tutta la fisica basandoci solo sulle superfici oppure adottiamo l'ipotesi del tempo immaginario. La fisica ufficiale ama la prima strada e preferisce considerare i numeri immaginari come un *trick* matematico.

Energia, materia oscura e vuoto quantistico

Di recente si è scoperto che solo il 4% dell'universo è composto dalla materia che conosciamo (pianeti, stelle galassie,), il 26% è composto di materia oscura ed il 70% di energia oscura. La materia oscura non emana radiazioni, per questo sfugge ai nostri occhi, ma fortunatamente è "percepibile" indirettamente... La sua presenza è stata rilevata in particolare nel moto di rotazione delle galassie.



Ad esempio, la velocità di rotazione del sole osservata è maggiore di quella prevista ipotizzando un universo composto solo dalla materia conosciuta.
In effetti, una stella che si muove con velocità V attorno al centro della galassia "si sente" sottoposta a due forze: la forza centripeta e la forza centrifuga.

Dunque, per rimanere sempre alla stessa distanza dal Sole, bisogna che le due forze si equivalgano e che il risultato netto sia nullo, cioè: Fg = -Fc

con

Affinché la velocità (in modulo) si mantenga costante al variare di *r* è necessario che sia **M(r) k*r**.

$$M(r) = \int dM(r) = 4\pi \int r^2 \rho(r) dr \qquad \text{ponendo } \boldsymbol{\rho(r) = k/r^2}$$

$$M(r) = 4\pi \int r^2 (k/r^2) dr = 4\pi k \int 1\, dr = k*r\,,$$

per cui, sostituendo $\mathbf{M_g}$ con **M(r)** nell'equazione si ottiene

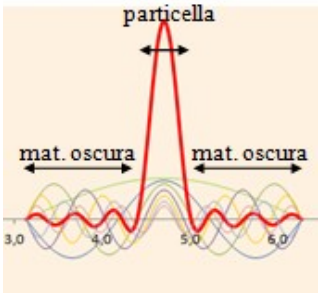
La densità di materia $\boldsymbol{\rho(r) = k/r^2}$ cioè si dovrebbe ridurre con il quadrato della distanza.

Le "incongruenze" vengono risolte ipotizzando la presenza della materia oscura.

Occorre rilevare che il sole ruota (anche se con maggiore velocità di quella prevista) attorno al centro della galassia, nonostante la materia oscura sia preponderante.

Ciò fa ritenere che la materia oscura sia associata a quella ordinaria. Ovvero che la materia oscura non sia distribuita in maniera casuale nell'universo ma *sia* "legata" alla materia conosciuta. Ritengo, perciò, che la materia oscura possa essere costituita da "*onde di fondo"* delle particelle. Considerando le particelle costituite da pacchetti d'onda, presumo che:

- la *particella* si possa identificare con il *nucleo* del pacchetto (zona di onde con interferenza costruttiva);
- la *materia oscura* si possa identificare nella parte circostante il nucleo (zona di onde con interferenza distruttiva). In tale zona le onde hanno una energia*tempo complessiva inferiore al *quanto h*, tali da non potere essere rilevate.



Nella figura a fianco la particella è stata rappresentata con un picco di onde. Ai lati di tale picco l'energia è piccola ma non nulla, per la presenza di onde residue che non possono essere osservate in quanto tale energia è inferiore alla costante h di Planck. Tali onde, tuttavia, ricoprendo un grande spazio fanno sentire la propria presenza su grande scala.

Con l'ipotesi del pacchetto d'onde è possibile spiegare il fenomeno dell'intreccio quantistico, cioè il legame tra le particelle elementari.

La suddetta interpretazione si avvicina a quella postulata da David Bohm. In tale interpretazione si ipotizza l'esistenza di una funzione d'onda universale e non locale ψ, che permetterebbe a particelle lontane di interagire istantaneamente. Tuttavia, a differenza dell'interpretazione di Bohm che considera reali sia l'onda che la particella, la presente ipotesi ritiene reale solo l'onda.

Si deve allora cogliere un legame tra la costante gravitazionale $G = 6{,}67 \times 10^{-11}$ m^3/M*s^2 e la costante di Planck $h = 6{,}626 \times 10^{-34}$ M*m^2/s.

Divagazioni sul concetto di Universo. [15]

E' possibile descrivere l'Universo, costituito da diverse particelle e diverse forze: gravità, elettrica, nucleare, con le sole onde? Ipotizzare che ad ogni tipo di forza corrisponda un tipo di onda?
Formuliamo l'ipotesi che tutto l'universo sia composto di onde quantizzate *h*. La più grande oscillazione possibile deve essere contenuta nell'universo ed avere il diametro d_u dell'universo.
Indicata la velocità della luce $c = \mathbf{3}*10^8$ m, con $h = 6{,}62*10^{-34}$ J*s, e il diametro dell'universo 20 miliardi di anni luce $d_u = 2*10^{10}*9{,}4*10^{15} = 2*10^{26}$ metri si ricava:

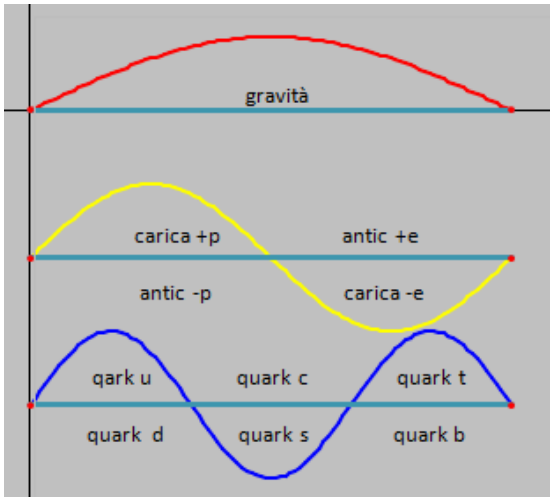
a) La frequenza fondamentale dell'universo vale: $v_u = c/d_u = \mathbf{3}*10^8/\ 2*10^{26} = 1{,}5*10^{-18}$;
b) Il periodo T = $6{,}7*10^{17}$ sec. $= 6{,}7*10^{17}/3{,}155*10^7 = 2*10^{10}$ *anni*
c) L'onda di minima energia $E = h*c/2d_u = 6{,}62*10^{-34}*\mathbf{3}*10^8*/(2*\ 2*10^{26}) = 4{,}97*10^{-52}$ J

Si osserva che la forza gravitazionale è positiva in tutto l'universo tranne ai suoi confini dove si annulla (l'intensità infatti diminusce con il quadrato della distanza). E' possibile così rappresentarla con una semionda (tridimensionale) nulla agli estremi.

Messe a confronto le dimensioni: dell'universo $d_u = 2*10^{26}$ metri; dell'atomo 10^{-10} metri, del nucleo di un atomo circa 10^{-14} metri, tali dimensioni sono paragonabili alle costanti di accoppiamento delle forze. Questi numeri caratterizzano le intensità di interazioni tra particelle.

Considerato quanto detto sulle onde stazionarie, si può supporre che nell'universo le onde stabili devono avere una frequenza multipla della frequenza fondamentale.

Premesso ciò ipotizziamo che:



- La <u>prima armonica</u> (semionda), estesa su tutto l'universo con dimensione L. e avendo unico segno, costituisca la forza gravitazionale di attrazione. Essa deforma lo spazio-tempo dell'universo secondo quanto calcolato dalla teoria della Relatività Generale.
- La <u>seconda armonica</u>, composta da 2 semionde di lunghezza L/2 costituisca le forze elettromagnetiche e le particelle (elettroni e positroni) con carica 1, che si distribuisce sull'atomo. Ritengo che tale seconda armonica si sia frammentata in tante onde (*raggi d'azione)* quante sono le coppie di cariche positive e negative nell'universo. Si ritiene che i *raggi d'azione* di tali forze siano molto piccoli in quanto ogni coppia (+ e –) di cariche "monopolizzi" una porzione di spazio dell'universo: *raggio d'azione = raggio univ./ n° cariche*
- La <u>terza armonica</u> composta da 3 semionde di lunghezza L/3, assieme all'onda speculare all'asse *x,* costituisca i 6 quark. Si noti che il quark (terza armonica) ha carica -1/3 e +2/3 della carica elettrica (seconda armonica) cioè il rapporto tra le lunghezze della 2ª e della 3ª armonica è uguale al rapporto delle cariche: L/2:L/3 = 1:2/3.

Nella figura a fianco possiamo identificare l'onda inferiore con la carica elettrica1, l'onda superiore con le cariche dei quark -1/3 e +2/3.

Si noti che la prima armonica contiene la seconda armonica e questa, a sua volta, la terza armonica, analogamente come la forza di gravità interessa tutto l'universo, la forza elettromagnetica interessa l'atomo, e la forza nucleare forte i nuclei dell'atomo.

A differenza della gravità che ha una "carica" unica cioè unico segno, ed è estesa su tutto l'universo, le altre forze hanno "cariche" con segni opposti (+ e -) .

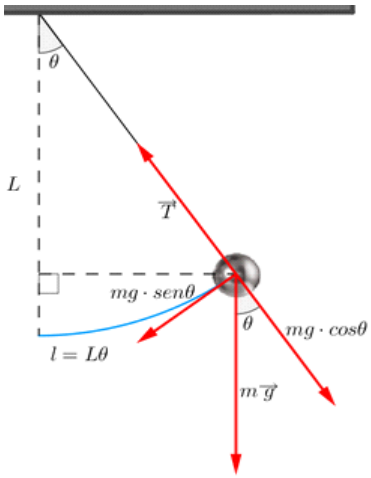
atomo (elettrone – protone); nucleo (3 quark).

E' possibile che, a sua volta, il quark sia composto da 4 elementi (quarta armonica)?

Se si ipotizza che l'ampiezza della prima armonica sia proporzionale alla *costante* gravitazione G, si deve supporre che la "costante" G oscilli con l'*onda universo* tra un valore positivo ed un valore negativo (attrazione/repulsione) cioè un **Universo oscillante** '*Big Bounce'* .

Appendice

Analisi dimensionale



In un fenomeno fisico l'analisi dimensionale permette di trovare la relazione che lega le grandezze fisiche. Supponiamo, ad esempio, di volere sapere come è legato dimensionalmente il periodo t [T] del pendolo con le altre grandezze fisiche: h [L], g[$L*T^{-2}$] deve essere [T] = $[L]^a * [L*T^{-2}]^b$

per L: a+b=0; per T: 1 = -2b, quindi b = -½ a = -b = 1/2 , cioè

$$[T] = [L]^{1/2} * [L/T^2]^{-1/2} = [L]^{1/2} / [L/T^2]^{1/2} \quad \text{cioè } t = [h/g]^{1/2}$$

In effetti il periodo è: $t = k\,[h/g]^{1/2}$ con costante $k = 2\pi$.

$k' = (h/g*t^2)^{1/2}$

Principio di minima azione

Tale principio si può esprimere con la formula $S = l * mv = minima$, essa lega la quantità di moto con lo spazio percorso e dimensionalmente è eguale a $\Delta mv*\Delta x = h$ che manifesta il *quanto d'azione*. Sappiamo che dall'*azione* (principio di minima azione) sono scaturite le equazioni di Eulero-Lagrange, cioè le equazioni del moto.

Essendo tali equazioni deterministiche e non probabilistiche dobbiamo ritenere che anche la formula $\Delta mv*\Delta x = h$ debba avere una essenza deterministica. Bisognerebbe considerare altre grandezze fisiche misurabili al posto di quelle attuali (posizione, velocità, energia, tempo). Considerare, ad esempio, la grandezza fisica spazio-tempo.

Ritengo che le grandezze fisiche usuali siano inadeguate per la descrizione della fisica quantistica.

Dobbiamo considerare la particella come un pacchetto di onde stazionarie, in particolare di onde di diversa lunghezza λ_i multiple della fondamentale e velocità $\mathbf{v}_i$.

Si può definire per l'onda *l'azione S*:

$$S_i = m v_i * \lambda_i \quad \text{e per il pacchetto } S_t = \Sigma_i (m v_i * \lambda_i) \quad (i = 1, 2, \ldots)$$

Il *principio di minima azione* è valido anche per il pacchetto, in altre parole l'Azione S_t della particella deve rimanere minima $S_t = min$. Questa equazione esprime la funzione d'onda della particella.

Il *principio d'indeterminazione* $\boldsymbol{\Delta m v*\Delta x = h}$ rimane insito (valido) nell'azione S_t del pacchetto, cioè all'interno del pacchetto la variazione dell'Azione S deve essere quantizzata

$$S_i - S_j = \Delta S = \Delta mv*\Delta\lambda = n*h \qquad con\ n=0, 1, 2, \ldots$$

Cioè gli autostati λ_i si devono differenziare di $\Delta S = n*h$.

Considerando la formula $\Delta mv*\Delta x = h$ (*principio di indeterminazione)* sotto l'aspetto della trasformazione di un'onda, si coglie un legame fra il suddetto principio e quello di *non-località* (variazione istantanea dell'onda nello spazio).

Per quanto sopra ritengo che il *principio d'indeterminazione* mostri l'inadeguatezza delle grandezze fisiche che utilizziamo per lo studio della natura. Ad esempio non possiamo determinare la posizione di un'onda, oppure a misurare la velocità e la frequenza di oscillazione di un pacchetto d'onde, viceversa, si può calcolare il quanto d'azione h.

Ritengo per quanto sopra che la formula $\Delta mv*\Delta x = h$ deponga a favore di una particella composta da onde.

Assiomi sullo spazio-tempo

1° Assioma - Indipendenza: Le proprietà dello spazio-tempo sono indipendenti dalle proprietà delle interazioni.

Questo assioma si applica compiutamente alla Meccanica, alla Relatività Ristretta, alla Meccanica Quantistica includendo la sua evoluzione nel cosiddetto *modello standard* che descrive interazione elettrica e leptonica.

2° Assioma - Solidarietà.: Lo spazio-tempo è solidale con le interazioni cosicché le loro rispettive proprietà si influenzano reciprocamente.

Questa è la versione secondo Finzi del principio di solidarietà come lo enunciò nel contesto della Relatività Generale (ovvero della interazione gravitazionale); è lecito qui domandarsi se esso possa avere un valore generale ed applicarsi a tutte le interazioni, nel qual caso comporterebbe una sorta di conseguenza o lemma: ogni interazione con le sue peculiari caratteristiche determina localmente la sua propria struttura spazio-temporale.

3° Assioma - Causalità.:La causalità è il postulato il quale afferma che una situazione fisica dipende dall'altra (univocamente) e la ricerca causale si propone la scoperta di questa dipendenza (identificazione).

Tutto ciò rimane vero anche nella fisica (meccanica) quantistica sebbene gli oggetti dell'osservazione, siano costituiti dalla probabilità di eventi elementari, non dai singoli eventi in sé.

Questa è la formulazione secondo Born della causalità e nella sua prima parte si applica in modo formidabile a tutte le teorie fisiche. La seconda parte è costruita molto saggiamente per tenere conto del 3° assioma della meccanica quantistica nella formulazione data da Born stesso, per dare un qualche significato fisico allaψ necessaria alla dualità, ma anche per prevenire da violazioni della causalità dovute alla identificazione univoca della dipendenza.

Il 3° assioma apre il problema dell'identificazione della dipendenza univoca tra almeno due situazioni fisiche; questo problema è stato storicamente risolto per via fenomenologica, come era inevitabile e come era stato preannunciato, e viene qui enunciato nel seguente assioma.

4° Assioma - Identificazione.: La velocità causale massima per tutte le teorie fisiche è la velocità della radiazione elettrica in assenza di materia ed in presenza dei soli campi elettrico e gravitazionale.

Questo assioma è stato esteso agli altri due campi noti quello dell'interazione adronica (o nucleare forte) e quello dell'interazione leptonica (o nucleare debole).

Per Einstein il vuoto è pieno di campo, mentre per Heisenberg e la QED il vuoto è pieno di oggetti virtuali (rinormalizzabili secondo la QED). Ovviamente le concezioni di vuoto alla Einstein ed alla Heisenberg (o se si preferisce alla Feynman) pur in contrasto tra di loro si scontrano entrambe con la necessità di determinare il livello di energia del vuoto, avendo anche conseguenze sull'*invarianza di Lorentz*.

Equazione d'onda di Schrödinger

La prima pubblicazione di Schrödinger contiene la formulazione matematica dell'analogia, ispirata da de Broglie, tra il principio di minima azione e una condizione per la formazione di onde stazionarie.
Schrödinger propose un'interpretazione "classica" della ψ, trattando l'elettrone come un pacchetto d'onde di carica totale −e.
Questa idea, tuttavia, non resse ad un esame critico: un pacchetto d'onde non possiede la coesione necessaria a giustificare l'indivisibilità della carica; è una struttura fragile, che si spande in tutte le direzioni. Per queste ragioni, ha prevalso l'interpretazione "statistica" della funzione ψ, proposta da Max Born, come densità di ampiezza di probabilità: basta ammettere che la probabilità al tempo t di trovare l'elettrone entro un elemento di volume dτ intorno al punto x sia |ψ(x, t)|2 .
Il fatto che tale probabilità sia diversa da zero in diversi punti dello spazio simultanea-mente, significa che la posizione dell'elettrone, ad un fissato istante, non è ben definita. Queste sono limitazioni alla descrizione classica del moto, che saranno codificate nel noto principio di indeterminazione di Heisenberg.

Se partiamo **dall'equazione classica** delle **onde stazionarie**, $\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = \psi(x)$ e teniamo conto del risultato di De Broglie, la lunghezza d'onda λ di una particella in presenza di potenziale è:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m(E-V)}} \qquad \text{da cui} \qquad -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = (E-V)*\psi(x)$$

L'equazione è stata ricavata per un sistema analogo a quello dell'**onda stazionaria, e non contiene quindi nessuna dipendenza dal tempo**. Vuol dire che noi possiamo usare questa equazione quando il potenziale *V* del nostro sistema è costante.

Equazione d'onda di **Schrödinger** dipendente dal tempo

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2\psi(x,t)}{\partial x^2} + V\psi(x,t) = i\hbar\frac{\partial\psi(x,t)}{\partial t}$$

La funzione d'onda soluzione dell'equazione sopra sarà quindi una funzione sia della coordinata spaziale sia del tempo: ψ(x,t).

Se l'energia potenziale della particella **non dipende** dal tempo, la funzione si può scrivere come prodotto di una funzione di *x* e di una di *t* : ψ(*x,t*)= ψ(*x*)*.

La ψ(*x*) è la soluzione dell'equazione d'onda per l'onda stazionaria.

De Broglie associa a ogni particella un *pacchetto d'onda* del tipo:

che si propaga con velocità di gruppo: $v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{dE}{dp} = \frac{p}{m} = c^2\frac{k}{\omega}$

La *velocità di gruppo* è spesso considerata la velocità cui l'energia o l'informazione sono trasportate dall'onda. In molti casi questa è una visione accurata, e la velocità di gruppo può essere pensata come la velocità di segnale della forma d'onda.
In fisica il **pacchetto d'onda** contiene un numero arbitrario di onde. In meccanica quantistica, in particolare, il suo modulo al quadrato descrive la probabilità che una particella o più particelle in un determinato stato (specificato dal pacchetto in questione) abbia una data *posizione* nello spazio o una data *quantità di moto*.

Riassumendo: *la particella è costituita da un insieme di onde stazionarie (**pacchetto d'onda),** che interferiscono costruttivamente in una piccola regione dello spazio e distruttivamente nel resto dello spazio*.

Tale pacchetto ha una distribuzione di tipo gaussiana. Queste condizioni ci fanno ottenere un'entità fisica, pur essendo costituita da onde, stabile e confinata in una piccola area da sembrare una particella.

Nota l'equazione d'onda $\psi(x)$ con le formule del tipo (3) e (3a) si possono trovare le onde stazionarie che compongono tale funzione. L'elettrone, in moto all'interno dell'atomo, viene a spalmarsi secondo l'equazione d'onda $\psi(x)^2$. *La* $\psi(x)^2$ non rappresenta più la probabilità di trovare la particella nel punto x, ma *costituisce la distribuzione della particella nello spazio.*

Fenomeni quantistici con le onde stazionarie.

Ritengo che le onde stazionarie, che compongono il fotone, si estendano aldilà di essa e formano un percorso: *la linea d'onda*, che coincide con la traiettoria della luce. Tale traiettoria corrisponde con la "geodetica" nello spazio-tempo.

La luce seguirebbe cioè la *linea d'onda*, ciò spiegherebbe in che modo la luce riesca a "trovare" il percorso più breve di tempo tra due punti. Questo ci porta a rivedere: il principio di Fermat, la *legge di Snell* il (*problema del bagnino),* il *principio di minima azione*. Fenomeni fisici in cui è la *traiettoria* ad avere il ruolo da protagonista.

Sappiamo che per i sistemi di riferimento inerziali si riesce a interpretare la costanza della velocità della luce (le equazioni di Maxwell) con le *equazioni di Lorentz,* cioè con una nuova concezione dello spazio-tempo.

Si nota infatti che le *equazioni di Lorentz* legano lo spazio e il tempo mediante la velocità della luce *c*:

$x' = \Upsilon * (x - v * t)$ con .

Non si ritiene un caso che anche *l'azione* lega lo spazio, la velocità e il tempo. Ritengo che le grandezze: quanto *h* e *spazio-tempo* siano più idonee a descrivere la meccanica quantistica.

Ritengo cioè, che quando consideriamo una *funzione d'onda* (orbitale) dobbiamo avere in mente una distorsione dello *spazio-tempo* dove *h* è costante. All'interno di tale regione spazio-temporale, essendo *h* costante (e quindi $dh=0$), ogni modifica avviene in tutto lo *spazio/tempo* contemporaneamente.

Cioè il *vuoto* non è vuoto ma è pieno di onde (che costituiscono le particelle) che mediamente si annullano e che generano una fluttuazione. Tale fluttuazione non è casuale (indeterminata) ma è determinata dalle particelle presenti.

Si fa osservare che i coefficienti *bi* delle armoniche $sen(i*x)$ (con $i = 1, 2, ...$) che descrivono un punto isolato, sono anch'esse delle armoniche $\boldsymbol{bi = sen(i*\omega)}$

In definitiva una **particella può ritenersi costituita come risultante di infinite armoniche che si elidono in tutto lo spazio tranne che in un '*punto*'**. La frequenza di oscillazione di tale particella e uguale alla frequenza dell'onda fondamentale $\boldsymbol{\lambda = h/p}$ con *h* costante di Planck e *p* quantità di moto della particella.

La particella pulsa/oscilla da un valore nullo (o quasi) ad un valore con lunghezza d'onda $\lambda = \hbar/m_0 v$.

Per un <u>elettrone</u> con bassa velocità $\lambda = 2\times10^{-10}$ metri.

La lunghezza d'onda Compton è una rappresentazione fisica della massa che è stata convertita in energia $\lambda_c = \hbar/m_0 c$.Per un <u>elettrone</u>λ_c è $2{,}42631\times 10^{-12}$ metri.

Per un <u>elettrone</u> con $\lambda = 2\times10^{-10}$ metri si ha una frequenza:

$$v = c / \lambda = 3\times 10^8 / 2\times 10^{-10} = 1{,}5\times 10^{18}$$

Bibliografia e sitografia

[1] http://it.wikipedia.org/wiki/Interpretazione_della_meccanica_quantistica
[2] http://www.spaceandmotion.com/Physics-David-Bohm-Holographic-Universe.htm
[3] http://it.wikipedia.org/wiki/Ipotesi_di_de_Broglie
[4] http://www.treccani.it/enciclopedia/teoria-dei-quanti_(Enciclopedia_del_Novecento)/
[5] http://it.wikipedia.org/wiki/Integrale_sui_cammini
[6] https://sites.google.com/site/ilfantasmadelletere/matematica
[7] http://www.lifeenergyscience.it/italiano/2010-it-1-2.pdf
[8] http://www.google.it/url?sa=t&source=web&cd=1&ved=0CCQQFjAA&url=http%3A%2F%2Fit.wikipedia.org%2Fwiki%2FSerie_di_Fourier&ei=TLB0ToHbDsSUOuSE1KMM&usg=AFQjCNF2IhvASdw5ol2JZ1Qd8jqcOuD5Nw
[9] http://www.quantummatter.com/beyond-point-particle
[10] http://fisicaondemusica.unimore.it/
[11] https://it.wikipedia.org/wiki/Equazione_della_corda_vibrante
[12] http://www.mat.unimi.it/users/carati/didattica/dispense/campi.pdf
[13] http://it.wikipedia.org/wiki/Equazione_di_Schr%C3%B6dinger
[14] http://online.scuola.zanichelli.it/amaldi-files/Cap_16/OndeStazionarie_Cap16_Par4_Amaldi.pdf
[15] http://ray.tomes.biz/maths.html
[16] www.credfed.it/ossino.htm