

Onde Anticipate e Meccanica Quantistica

Ulisse Di Corpo¹ e Antonella Vannini²

Abstract

Il modello delle onde anticipate che nasce dalla duplice soluzione dell'equazione di Klein-Gordon riesce nel "miracolo" di risolvere i misteri e gli enigmi della meccanica quantistica, 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. In questo breve articolo si sostiene che il mistero della dualità onda particella, della quantizzazione e della non località possano nei fatti essere dimostrazioni del modello delle onde anticipate.

Introduzione

La formula $E=mc^2$, da sempre associata all'immagine e al lavoro di Albert Einstein, fu in realtà pubblicata per la prima volta da Oliver Heaviside nel 1890 e successivamente perfezionata da Henri Poincaré (1900) e da Olinto De Pretto (1903), divenendo poi famosa con la relatività ristretta di Einstein (1905), il quale la integrò con il momento nell'equazione energia/momento/massa:

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$$

Relazione energia/momento/massa

dove l'energia totale (E), in qualsiasi forma essa si manifesti, è il risultato della somma del momento (p) e della massa (m), moltiplicate per la velocità della luce (c).

Poiché l'equazione è di secondo ordine (elevata al quadrato), per ricavare la quantità di energia totale presente nell'oggetto misurato, ossia il valore di E , è necessario calcolare la radice quadrata che, come è noto, produce sempre due soluzioni, una positiva ed una negativa:

- la soluzione positiva ($+E$) descrive energia che si propaga nel verso a noi familiare, cioè dal passato verso il futuro;
- la soluzione negativa ($-E$) descrive energia che si propaga a ritroso nel tempo, dal futuro verso il passato.

¹ ulisse.dicorpo@syntropy.org

² antonella.vannini@syntropy.org

L'atteggiamento dei fisici è quello di escludere come "non fisiche" tutte quelle soluzioni che violano la causalità classica, cioè tutte quelle soluzioni in cui diventa possibile che un segnale sia inviato da qualche evento nel passato di quel medesimo evento. Per questo motivo negli anni 30 la soluzione negativa dell'energia venne ritenuta impossibile. Però, quando si relativizza la funzione d'onda di Schrödinger (ψ):

$$E\psi = \sqrt{p^2 + m^2}\psi$$

Equazione di Klein-Gordon

è necessario considerare tutte e due le soluzioni della radice quadrata come una possibilità, 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).

Quantizzazione, costante di Planck e tempo unitario

Verso la fine del diciannovesimo secolo Lord Rayleigh e Sir James Jeans cercarono di estendere il principio statistico di equiripartizione, utilizzato per la descrizione delle proprietà termiche dei gas (particelle), alle radiazioni termiche (onde).

Il Teorema di Equiripartizione, dedotto matematicamente dai principi newtoniani della Meccanica, afferma che *"l'energia totale contenuta in un gas si ripartisce ugualmente (in media) fra tutte le particelle."*

Il teorema di equiripartizione, applicato alle onde, portava però a prevedere che le radiazioni termiche si sarebbero concentrate nelle frequenze più elevate, la frequenza ultravioletta dello spettro, dando luogo a picchi infiniti di energia termica, causando così una catastrofe ultravioletta.

La catastrofe ultravioletta prevista dal teorema di equiripartizione non si manifestava in natura e questo paradosso venne risolto il 14 dicembre 1900 quando Max Planck presentò, ad un raduno della Società tedesca di fisica, un lavoro secondo il quale i livelli di energia sono *quantizzati*. Ovvero, l'energia non cresce o diminuisce in modo continuo, ma sempre per multipli di un "quanto di base", una quantità che Planck definì come il prodotto $h\nu$ dove ν è la frequenza caratteristica del sistema preso in considerazione e h è una costante fondamentale, oggi nota come costante di Planck e che corrisponde a $6,6262 \cdot 10^{-34}$ joule·secondo. Planck aveva concettualizzato la trasmissione dell'energia in forma di pacchetti discreti, alcuni grandi, altri piccoli, in funzione della frequenza di oscillazione del sistema. Al di sotto della frequenza minima del pacchetto di energia, l'intensità della radiazione veniva meno, impedendo così che questa crescesse agli altissimi livelli previsti dalla catastrofe ultravioletta.

Il 14 dicembre 1900 è oggi ricordato come la data in cui è nata la meccanica quantistica. Tuttavia lo stesso Planck rimase sconcertato dalla propria scoperta, non riuscendo a dare una risposta alla domanda *"perché il quanto?"*; ancor oggi fisici e filosofi continuano a porsi questa domanda, senza essere in grado di darvi una risposta.

La duplice soluzione dell'equazione di Klein-Gordon suggerisce che nell'universo agiscono due forze contrapposte:

1. la prima espansiva, che porta il tempo a muoversi in avanti;
2. la seconda coesiva che porta il tempo a muoversi all'indietro.

Nel nostro universo in espansione prevalgono le forze del primo tipo, quindi il tempo si muove in avanti, mentre nei sistemi in equilibrio tra questi due tipi di forze, come sarebbero per l'appunto gli atomi, si dovrebbe osservare una successione di fasi espansive e coesive. Durante la fase espansiva il tempo si muove in avanti, durante la fase coesiva il tempo si muove all'indietro. Secondo questo modello dell'atomo fatto di cicli infiniti di espansione e di contrazione:

- l'atomo può emettere energia solo nella fase di espansione e non in quella di contrazione, portando quindi l'emissione dell'energia ad essere quantizzata;
- l'atomo può assorbire energia solo nella fase di contrazione e non in quella di espansione portando l'assorbimento ad essere quantizzato;
- il ciclo di espansione e contrazione coinciderebbe ad una unità fondamentale sotto la quale non è possibile andare (costante di Planck);
- nella fase di espansione il tempo si muoverebbe in avanti, mentre nella fase di contrazione il tempo si muoverebbe all'indietro. Un osservatore al di sopra della costante di Planck vedrebbe il tempo, nel livello subatomico, unitario: passato, presente e futuro coinciderebbero.

Secondo questo modello la quantizzazione dell'energia può essere considerata come una evidenza del fatto che nell'atomo si susseguono cicli di espansione e di coesione.

Dualità onda-particella

Il 24 novembre 1803 Thomas Young presentò presso la Royal Society di Londra l'esperimento della doppia fenditura, giungendo così alla dimostrazione della natura ondulatoria della luce:

“L'esperimento di cui sto per parlare (...) può essere ripetuto con grande facilità, purché splenda il sole e con una strumentazione che è alla portata di tutti”.

L'esperimento di Young era molto semplice, un raggio di sole veniva fatto passare attraverso un foro, una fenditura, di un cartoncino, quindi raggiungeva un secondo schermo, con due fori. La luce che attraversava i due fori del secondo schermo finiva infine su uno schermo, dove creava una figura di luci e ombre (Fig. 1) che Young spiegò come conseguenza del fatto che la luce si diffonde attraverso i due fori come *onde*. Queste onde danno origine, nei punti dove si sommano, a fasce chiare (*interferenza costruttiva*), mentre nei punti dove non si sommano a fasce scure (*interferenza distruttiva*).

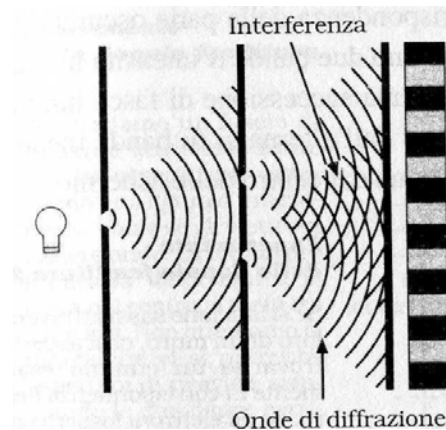


Fig. 1 - *Esperimento della doppia fenditura di Young*

L'esperimento di Young venne accettato come dimostrazione del fatto che la luce si irradia per mezzo di onde. Infatti, se la luce fosse stata costituita da particelle, non si sarebbero osservate alternanze di luci e ombre, ma si sarebbero osservate solo due bande luminose, una per foro. Nell'esperimento della doppia fenditura la banda più luminosa si colloca tra i due fori, in corrispondenza della parte oscurata dallo schermo (Fig. 2).

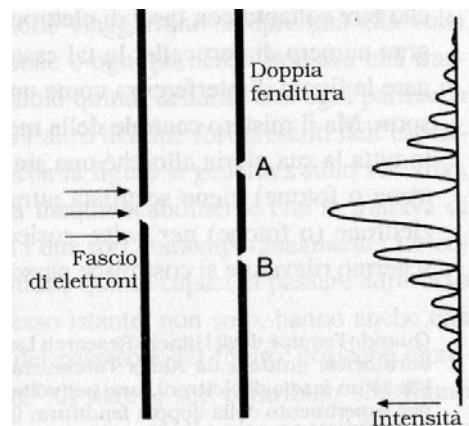


Fig. 2 – *Intensità luminosa nell'esperimento della doppia fenditura di Young*

L'esperimento di Young, sulla natura ondulatoria della luce, ha rappresentato un caposaldo della fisica fino a quando, a partire dal lavoro di Max Planck agli inizi del '900, la scienza andò sempre più scoprendo ciò che è oggi noto come *dualismo onda/particella* e che rappresenta uno dei principi fondamentali della meccanica quantistica.

L'esatto equivalente dell'esperimento di Young può oggi essere condotto servendosi di un fascio di elettroni.

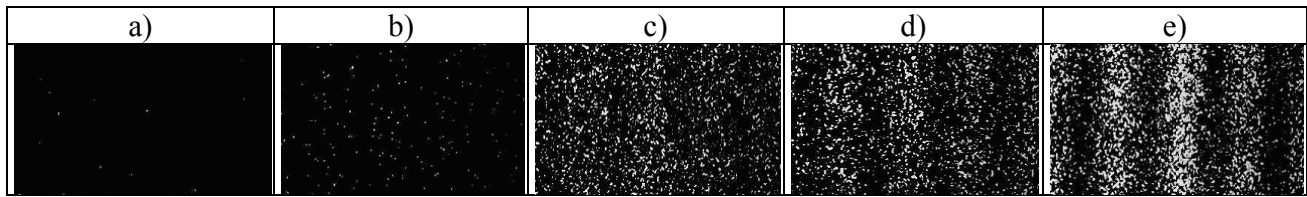


Fig. 3 – *Esperimento della doppia fenditura realizzato con elettroni*
 a) dopo 10 elettroni; b) dopo 100 elettroni; c) dopo 3.000 elettroni; d) dopo 20.000; e) dopo 70.000.

Gli elettroni lanciati in un esperimento della doppia fenditura producono una figura d'interferenza sullo schermo rivelatore (in questo caso uno schermo simile a quello di un televisore) e devono quindi muoversi sotto forme d'onde. Tuttavia, all'arrivo, generano un solo punto di luce, comportandosi quindi come particelle. Si è quindi portati a concludere che gli elettroni viaggino come onde, ma giungono come particelle!

Se l'elettrone fosse una particella potremmo dedurre che ogni particella passa attraverso uno o l'altro dei due fori presenti nell'esperimento; tuttavia, la figura d'interferenza che si genera sullo schermo dimostra che si tratta di onde che attraversano i due fori contemporaneamente. Le entità quantistiche si dimostrano quindi capaci di passare attraverso le due fenditure nello stesso istante; non solo, hanno anche una sorta di consapevolezza del passato e del futuro, cosicché ognuna di esse può scegliere di dare il suo contributo alla figura d'interferenza nel punto corretto, quello che contribuisce alla creazione della figura, anziché alla sua distruzione.

Secondo le parole di Richard Feynman nell'esperimento della doppia fenditura è racchiuso il “mistero centrale” della meccanica quantistica. Si tratta di un fenomeno *“in cui è impossibile, assolutamente impossibile, trovare una spiegazione classica, e che ben rappresenta il nucleo della meccanica quantistica. In realtà, racchiude l'unico mistero. Le peculiarità fondamentali di tutta la meccanica quantistica”* (Feynman, 2001)

Richard Feynman ha considerato questo risultato sperimentale – delle due fenditure, nel caso in cui esso si manifesta con elettroni e con altre entità quantistiche che possono essere localizzate – tanto importante da dedicargli buona parte del primo capitolo del terzo volume del suo celebre libro di testo “La fisica di Feynman”. Nella sua Fisica amava mettere in risalto il contrasto tra l'idea d'interferenza di onde e quella di non interferenza di particelle sostituendo alle onde luminose dei proiettili.

Come mostrato da Cramer (1986), nella sua Interpretazione Transazionale della meccanica quantistica, la duplice soluzione dell'equazione di Klein Gordon prevede la duplice manifestazione onda/particella come conseguenza della duplice causalità passato/futuro: mentre una particella può essere intesa come una causa, ormai determinata (ad esempio proveniente dal passato) l'onda può essere intesa come una causa ancora non determinata (ad esempio proveniente dal futuro). L'equazione di Klein Gordon mostra che dal passato provengono onde divergenti (emettitori), mentre dal futuro provengono onde convergenti (assorbitori) e descrive la realtà fisica come una continua interazione tra emettitori ed assorbitori. In assenza di una di queste due forme di causalità, non vi potrebbe essere il passaggio di materia o di energia. Un esempio, se vigesse solo la causalità classica, cioè la parte emettitrice, una batteria potrebbe avere un unico polo, che emette elettroni. Al contrario, sono necessari due poli, uno

che emette e l'altro che assorbe. In assenza di questa dualità, toccando solo il polo emettitore (-) o solo il polo assorbitore (+), non si ha passaggio di elettricità.

Secondo l'Interpretazione Transazionale, questo continuo gioco di causalità e retrocausalità (emettitori/assorbitori) fa sì che la materia si debba presentare sempre nella duplice manifestazione onda/particella. Il fatto che la materia si presenti effettivamente sempre in questa duplice forma può essere considerato una dimostrazione della validità della duplice soluzione dell'equazione di Klein-Gordon.

Nonlocalità

L'Interpretazione di Copenhagen della MQ, ispirata ai lavori svolti da Niels Bohr e Werner Heisenberg, spiegò la dualità onda/particella affermando che la particella si propaga come onda e che quando l'onda viene osservata collassa in una particella. Questa interpretazione giunge così alla conclusione che l'atto di osservare crea la realtà, in quanto fa collassare l'onda in una particella. Secondo questa spiegazione il collasso della funzione d'onda (collasso dell'onda in una particella) avviene nello stesso istante in tutti i punti dell'onda. Ciò richiede una propagazione istantanea dell'informazione, violando in questo modo il limite della velocità della luce che Einstein aveva individuato come velocità massima di propagazione dell'informazione e la legge della causalità.

Einstein fu un critico feroce dell'Interpretazione di Copenhagen proprio perché non poteva accettare che la natura funzionasse al di fuori delle leggi della causalità. Per questo motivo si convinse che mancasse qualcosa all'Interpretazione di Copenhagen, che esistessero delle "variabili" nascoste. Per Einstein la nozione di località era fondamentale; secondo questa nozione ciò che accade in un luogo non può influenzare qualcosa che stia accadendo in un luogo molto distante, a meno che, ovviamente, non venga spedito in questa regione distante un segnale che possa influenzare ciò che sta succedendo in quella regione dello spazio.

Per tutta la vita Einstein tenne fede ad alcuni principi che riteneva dovessero far parte di qualsiasi buona descrizione della natura, tra i quali:

- il livello di base della natura dovrebbe essere descritto, per principio, da una teoria causale;
- la teoria dovrebbe essere locale: quello che accade qui dipende da elementi della realtà che sono localizzati qui.

Nel 1934 Einstein formulò un esperimento mentale che prese il nome di esperimento EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) e che rimase irrisolto fino agli anni '80. In pratica Einstein si chiedeva: "*Supponiamo che due particelle siano correlate tra loro (entangled). Consideriamo ora un osservatore che si occupi di una delle due particelle in una zona molto distante dal punto in cui hanno interagito e che misuri la quantità di moto; allora, questo osservatore sarà ovviamente in grado di dedurre anche la quantità di moto dell'altra particella. Se, viceversa, egli scegliesse di misurare la posizione della prima particella, sarebbe comunque in grado di dire dove si trova esattamente l'altra. Come può lo stato finale della seconda particella venire influenzato da una misurazione effettuata sulla prima, dopo che ogni interazione fisica tra le due è cessata?*"

L'EPR era stato presentato come un "esperimento mentale", inteso a dimostrare l'assurdità della Interpretazione di Copenhagen ponendo una contraddizione logica; in realtà, nessuno chiedeva che l'esperimento venisse realmente eseguito. Ma nel 1952 David Bohm propose una variazione dell'EPR che riguardava il comportamento dei fotoni, e nel 1964 John Bell dimostrò che la variazione di Bohm poneva le basi, in linea di principio, per un autentico esperimento.

A quell'epoca, in realtà, neppure lo stesso Bell riteneva che quel esperimento potesse davvero essere eseguito. Ma gli sperimentatori accettarono quasi subito la sfida. Nel giro di vent'anni diversi gruppi erano arrivati vicini all'esecuzione delle misurazioni richieste con la precisione richiesta. E' comunemente accettato che sia stato proprio il risultato ottenuto dall'équipe di Aspect, pubblicato nel 1982, a sancire definitivamente che Einstein dovevano arrendersi alla realtà della non località del mondo quantistico.

La proprietà quantistica misurata da Aspect è la polarizzazione del fotone, che può essere immaginata come una freccia che punti o verso l'alto o verso il basso. E' possibile stimolare un atomo in modo che produca simultaneamente due fotoni, i quali si dirigono in due direzioni diverse. Nel complesso, le polarizzazioni dei due fotoni devono cancellarsi: se la freccia del primo è su, l'altra deve essere giù. Ogni fotone nasce con una polarizzazione definita, e il suo partner con la polarizzazione opposta, ed entrambi mantengono tale caratteristica originaria nel loro viaggio nello spazio. Tuttavia, secondo l'interpretazione di Copenhagen, qualsiasi entità quantistica che abbia la possibilità di una scelta del genere esiste in una condizione di sovrapposizione di stati, ovvero una miscela delle due possibilità, finché (in questo caso) la sua polarizzazione non viene misurata. A quel punto, e solo a quel punto, vi è ciò che viene definito "collasso della funzione d'onda", in seguito al quale viene fissata una delle due possibilità.

Tuttavia, la controparte del fotone che viene misurato deve anch'essa trovarsi in una sovrapposizione di stati, almeno fino al momento della misurazione. Poi, nel preciso istante in cui la misurazione del fotone A causa il collasso della funzione d'onda, la funzione d'onda del fotone B (che potrebbe, in linea di principio, trovarsi ormai dall'altra parte dell'universo) deve collassare nello stato opposto. La risposta istantanea del fotone B a ciò che accade al fotone A è proprio ciò che Einstein definì "azione fantasma a distanza".

L'effettivo esperimento realizzato da Aspect misura la polarizzazione in base ad un angolo, che può essere variato, rispetto alle frecce all'insù e all'ingiù. La probabilità che un fotone con una certa polarizzazione passi attraverso un filtro disposto con un certo angolo dipende dalla sua stessa polarizzazione e dall'angolo tra la sua polarizzazione ed il filtro. In una realtà non-locale mutare l'angolo con il quale si sceglie di misurare la polarizzazione del fotone A finirebbe per alterare la probabilità che il fotone B passi attraverso un filtro polarizzatore sistemato con un angolo diverso. Inoltre, l'esperimento non riguarda soltanto due fotoni, ma interi fasci di fotoni, ovvero serie di coppie correlate che sfrecciano attraverso l'apparecchiatura una dopo l'altra.

Bell aveva mostrato che se Einstein aveva ragione il numero di fotoni che passano attraverso il filtro polarizzatore B doveva essere inferiore a quello che passa attraverso il filtro A. Ciò prende il nome di disuguaglianza di Bell. Tuttavia, l'esperimento di Aspect dimostra l'esatto contrario, che il primo

valore (A) è in realtà sempre inferiore al secondo valore (B). Per dirla altrimenti, la disuguaglianza di Bell viene violata e il comune buonsenso incarnato da Einstein perde la sfida.

L'esperimento di Aspect rivela una delle verità fondamentali dell'universo, ovvero che ci sono rapporti di correlazione che hanno luogo istantaneamente, indipendentemente dal grado di separazione tra gli oggetti implicati, e che sembrano esistere segnali che possono viaggiare a velocità superiore a quella della luce.

La duplice soluzione dell'equazione di Klein-Gordon offre una spiegazione della nonlocalità che può conciliare le posizioni di Einstein con quelle della meccanica quantistica. Infatti viene descritta in modo del tutto causale, anche se retrocausale. Le onde anticipate si muovono infatti ad una velocità superiore a quella della luce e portano perciò alla creazione di collegamenti istantanei tra punti lontani dello spazio. E' tuttavia importante sottolineare che trattandosi di onde anticipate, cioè di onde provenienti dal futuro, non possono portare informazione, in quanto l'informazione è qualcosa che per definizione è associata al passato, cioè ad un evento, una condizione che si è determinata.

Conclusioni

In queste pagine si è voluta fornire una rapida suggestione di come alcuni tra i misteri fondamentali della meccanica quantistica possano essere spiegati in modo semplice ed elegante nel momento in cui si accettano come reali le onde anticipate. Ne deriva una visione del mondo subatomico totalmente diversa da quella del Modello Standard, ma compatibile con tutti i risultati sperimentali e le equazioni della meccanica quantistica.

John Cramer, dell'Università di Washington, ha sviluppato nel 1986 l'Interpretazione Transazionale della meccanica quantistica che si basa, per l'appunto, sulla duplice soluzione dell'equazione di Klein-Gordon. Questa interpretazione coincide sostanzialmente con il modello proposto da Luigi Fantappiè nel 1942 e mostra che, una volta che si estende il modello alle onde anticipate, le previsioni sugli esiti degli esperimenti rimangono esattamente analoghe a quelle delle altre interpretazioni quantistiche.

La duplice soluzione dell'equazione di Klein-Gordon riesce nel "miracolo" di risolvere i misteri e gli enigmi della meccanica quantistica, 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 e che nel livello subatomico il tempo sia unitario: passato, presente e futuro coincidano.

Bibliografia

- Aspect A. (1982) *Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedanken-experiment*, Physical Review Letters, vol. 49, 91, 1982;
- Cramer J.G. (1986) *The Transactional Interpretation of Quantum Mechanics*, Reviews of Modern Physics, Vol. 58: 647-688;
- De Beauregard C. (1977) *Time Symmetry and the Einstein Paradox*, Il Nuovo Cimento (42B);
- Einstein A. (1916) *Relatività, esposizione divulgativa*, Universale Bollati Boringhieri, Torino 1967;

- Fantappiè L. (1942) *Sull'interpretazione dei potenziali anticipati della meccanica ondulatoria e su un principio di finalità che ne discende*. Rend. Acc. D'Italia, n. 7, vol 4;
- Feynman R. (2001) *Meccanica Quantistica*, in La fisica di Feynman, Vol.III, Zanichelli, Bologna 2001;
- Poincaré H (1908) *Le raisonnement mathématique*, in *Scienze et méthode*, Flammarion, Paris.