

COMPRENDERE LA FISICA QUANTISTICA: BREVE INTRODUZIONE PER PRINCIPIANTI

**Angela Savasta
Salvatore Savasta**

Dipartimento di Scienze Matematiche e Informatiche, Scienze Fisiche e Scienze della Terra.
Università di Messina, Italy

<http://dx.doi.org/10.17060/ijodaep.2016.n1.v2.305>

*Fecha de Recepción: 1 Enero 2016
Fecha de Admisión: 15 Febrero 2016*

RIASSUNTO

La fisica quantistica, rappresenta una delle maggiori scientifiche e culturali nella storia umana. Gran parte della moderna tecnologia e della nostra comprensione della realtà fisica si basano su di essa. La fisica quantistica rappresentò una reale rivoluzione culturale in quanto prevede un comportamento delle particelle che contraddice radicalmente il nostro modo di comprendere la realtà quotidiana e i presupposti su cui è stata fondata tutta la fisica precedente. Eppure, a distanza di un secolo dalla sua fondazione, a causa principalmente del formalismo matematico astratto e complesso su cui si basa, rimane per i non addetti ai lavori e per gli studenti di liceo qualcosa di misterioso e bizzarro. In questo lavoro illustriamo un approccio didattico, che prende spunto da recenti tentativi di riformulare questa teoria sulla base di principi fisici elementari. Tale approccio ha il vantaggio di non utilizzare il formalismo matematico degli spazi di Hilbert e degli operatori Hermitiani, e di ricavare in modo intuitivo e ragionevole i concetti fondamentali di indeterminazione ed entanglement. Ci auguriamo che questo approccio possa contribuire ad una maggiore diffusione e comprensione di questo patrimonio scientifico e culturale.

Parole chiave: Fisica Quantistica, didattica, percezione, coscienza, media statistica.

INTRODUZIONE

La fisica quantistica (FQ), rappresenta una delle maggiori rivoluzioni scientifiche e culturali nella storia umana. Essa ha esteso notevolmente la nostra comprensione della realtà fisica. Una grande parte della fisica del XX secolo è il risultato di nuove esplorazioni ed applicazioni derivate dalla meccanica quantistica. La FQ ha permesso la comprensione della fisica atomica, della fisica nucleare, della fisica delle particelle, della fisica della materia condensata e ha permesso la realizzazione dei laser, dei computer, dell'optoelettronica. Ed oggi i principi della meccanica quantistica promettono nuove rivoluzionarie applicazioni come ad esempio i computer quantistici⁽¹⁾ i quali saranno in grado

di elaborare l'informazione con un'efficienza esponenzialmente maggiore rispetto ai computer basati sui bit classici.

Si trattò comunque anche di una rivoluzione culturale, in quanto la FQ prevede un comportamento delle particelle che contraddice radicalmente il nostro modo di comprendere la realtà quotidiana e i presupposti su cui è stata fondata tutta la fisica precedente. I padri fondatori^[2] stessi furono sconcertati da diversi aspetti di questa teoria come ad esempio l'indeterminazione e l'entanglement. In particolare secondo la FQ le singole osservazioni sperimentali su un sistema fisico possono non essere riproducibili anche se il sistema viene preparato esattamente nello stesso modo. La realtà naturale quindi presenta un certo grado di imprevedibilità intrinseca, ovvero che non dipende da una imprecisione dell'apparato di misura e non è quindi eliminabile. Inoltre un sistema quantistico può trovarsi sospeso tra due o più stati differenti di realtà. È interessante riportare a tal proposito alcune frasi celebri sulla FQ di alcuni premi Nobel per la fisica per aver contribuito allo sviluppo di questa teoria:

"Più la teoria dei quanti ha successo, più sembra una sciocchezza" Albert Einstein^[9];

"Dio non gioca a dadi con il mondo" Albert Einstein^[4]

"Chiunque non resti sbalordito dalla teoria quantistica, sicuramente non l'ha capita." Nielsen Bohr;

"Penso di poter affermare che nessuno capisce la meccanica quantistica" Richard Phillips Feynman.

Negli ultimi anni si è anche compreso che questi comportamenti bizzarri non sono necessariamente confinati a sistemi microscopici, ma è possibile realizzare sistemi anche visibili ad occhio nudo, come circuiti superconduttori o oscillatori meccanici^[5] che seguono le più bizzarre leggi quantistiche. Oggi si sta facendo strada anche l'idea che gli aspetti peculiari di questa fisica possano essere alla base di processi della mente non ancora compresi come la percezione e la coscienza^[6].

Per tutto ciò riteniamo che una conoscenza, anche solo degli aspetti principali, della fisica quantistica debba far parte del bagaglio culturale di chi vuole realmente vivere nel suo tempo, indipendentemente dagli interessi lavorativi e culturali. Al contrario la FQ appare ai non addetti ai lavori come qualcosa di misterioso ed incomprensibile, che può essere compreso solo acquisendo conoscenze matematiche avanzate. Questa percezione non è purtroppo infondata e nasce dal fatto che, come osservato da uno dei principali fisici quantistici sperimentali, Anton Zeilinger^{[7][8]} questa teoria a differenza ad esempio della teoria della relatività, si basa su principi (postulati) e su un formalismo matematico (spazi di Hilbert, operatori Hermitiani) piuttosto astratti.

Finalmente, anche grazie alla riforma scolastica Gelmini degli istituti di secondo grado, la FQ, come parte centrale della fisica moderna, sta iniziando faticosamente a far parte del bagaglio culturale degli studenti. Secondo le indicazioni ministeriali^[9] "l'insegnante dovrà prestare attenzione ad utilizzare un formalismo matematico accessibile agli studenti, ponendo sempre in evidenza i concetti fondanti".

In questo articolo mostreremo come sia possibile spiegare alcuni aspetti fondamentali della FQ senza utilizzare il consueto formalismo matematico complesso e astratto. Non si tratta di mera divulgazione, ma di una introduzione che consente, con un apparato matematico semplice e con concetti fisici elementari, di introdurre i concetti di misura e di probabilità e di formulare anche previsioni quantitative sui sistemi quantistici più elementari: i sistemi a due stati, tra i quali possiamo annoverare lo spin. L'idea è quella di offrire uno strumento didattico efficace per introdurre la FQ agli studenti e più in generale a tutti coloro che vogliono confrontarsi con questa rivoluzione culturale senza essere in possesso di strumenti matematici avanzati.

Per questo nuovo approccio ci siamo ispirati ai lavori di Lucien Hardy^{[10][11]} che ha mostrato come il formalismo della FQ possa anche essere derivato senza partire da assiomi astratti, ma basandosi

su postulati ragionevoli e con un significato chiaro. In particolare ricaveremo alcuni concetti fondamentali della FQ basandoci sui concetti elementari di bit (l'unità di informazione) e di vettori^[12], quelli, per intenderci che ci consentono di descrivere in fisica le forze, la velocità, l'accelerazione.

LA PROBABILITÀ QUANTISTICA DA BIT E VETTORI

Una delle proprietà fondamentali delle particelle è lo spin, ovvero il momento angolare intrinseco di una particella. In generale il momento angolare è un vettore ortogonale al piano di rotazione e descrive lo slancio con cui un corpo gira intorno al proprio asse. A differenza del momento angolare della fisica classica, lo spin ha la caratteristica che può essere rivolto solo in su o in giù lungo una qualsiasi direzione prefissata. Quindi, la sua misura lungo una qualsiasi direzione fornisce solo due possibili risultati, up (+) e down (-), ovvero un bit d'informazione.

In questo articolo, quindi, mostreremo come gli aspetti più interessanti e peculiari della meccanica quantistica ed in particolare l'emergere della probabilità quantistica possano essere derivati dai seguenti due principi:

- 1. lo spin è un vettore e come tale è soggetto a trasformazioni continue di rotazione;**
- 2. se si misura una sua componente lungo un asse arbitrario si ottiene uno tra due soli possibili esiti.**

Per fissare le idee assumiamo che i due possibili valori siano con a numero reale positivo. Immaginiamo di aver eseguito una misura dello spin lungo una direzione prefissata che indichiamo con il vettore unitario (versore) \mathbf{n} e di aver ottenuto $+a$. Subito dopo la misura, il vettore di spin che indichiamo con \mathbf{J} risulterà allineato lungo l'asse di misurazione: $\mathbf{J} = a \mathbf{n}$. Infatti, per le proprietà di rotazione dei vettori, se così non fosse, una rotazione potrebbe dare origine ad un'ampiezza del vettore di spin superiore ad a in contasto con il principio 2. A questo punto immaginiamo di eseguire una misura lungo una direzione diversa da \mathbf{n} indicata dal versore \mathbf{m} . Ovvero vogliamo misurare la componente del vettore \mathbf{J} lungo l'asse \mathbf{m} . Il risultato previsto dalle proprietà dei vettori sarà $v = \mathbf{J} \cdot \mathbf{m} = a \mathbf{n} \cdot \mathbf{m} = a \cos q$, dove q è l'angolo compreso tra i due versori \mathbf{n} ed \mathbf{m} . La misura prevista ($v = \mathbf{J} \cdot \mathbf{m} = a \cos q$) è tuttavia in conflitto con il principio 2, poiché il $\cos q$ è un numero (reale) compreso tra -1 e 1 . Visto che gli esperimenti sul momento angolare di spin mostrano come la misura fornisca effettivamente solo due possibili risultati, sembrerebbe che, pur avendo a che fare con un momento angolare (un chiaro esempio di vettore), il concetto di vettore debba essere abbandonato. Esiste tuttavia una via d'uscita per salvare capra e cavoli! Vedremo che questa via d'uscita è proprio quella seguita dalla natura che porta alla fisica quantistica. Il concetto di probabilità e in particolare di media statistica ci vengono in aiuto. Infatti in una teoria probabilistica, in presenza di due sole uscite ammesse ($\pm a$), è possibile ottenere tutti i valori v compresi nell'intervallo $[-a, a]$ come risultato di una media statistica. Quindi lo spin, non potendo obbedire alle note proprietà di rotazione dei vettori in maniera deterministica, può obbedirvi soltanto in senso statistico. Quindi in base all'angolo q , ripetendo più volte la misura, il risultato sarà a volte $-a$, a volte $+a$, in modo che alla fine la media $\langle v \rangle = -a P(-a) + a P(a)$ sia uguale a quanto previsto: $\langle v \rangle = a \cos q$. Dove abbiamo utilizzato la definizione di media statistica e $P(-a)$ e $P(a)$ rappresentano le probabilità di ottenere (in seguito alla misura) il valore $-a$ e $+a$ rispettivamente. Ecco quindi la comparsa della probabilità quantistica. Questo approccio mostra come partendo da 2 principi fisici ragionevoli, il primo dei quali derivato dall'evidenza sperimentale ed il secondo dal concetto di vettore, emerga inevitabilmente la probabilità come l'unica possibilità in grado di riconciliare i due principi. Ricordando che la somma delle probabilità deve valere 1 ($P(-a) + P(a) = 1$), dalla relazione $-a P(-a) + a P(a) = a \cos q$, è possibile ottenere con passaggi elementari le probabilità di transizione. Ovvero siamo in grado di rispondere alla domanda: Avendo preparato il sistema nello stato $+a$ lungo l'asse \mathbf{n} , volendo misurare la componente dello spin lungo un diver-

COMPRENDERE LA FISICA QUANTISTICA: BREVE INTRODUZIONE PER PRINCIPIANTI

so asse di misura \mathbf{m} che forma un angolo q con \mathbf{n} , qual è la probabilità, di trovare come risultato $+a$ oppure $-a$? Con semplici passaggi matematici si ottiene: e .

Osserviamo che queste probabilità corrispondono esattamente alle probabilità quantistiche per lo spin che si ricavano utilizzando tutto il formalismo matematico della FQ. Risultati analoghi possono naturalmente essere ottenuti partendo dallo stato $-a$ lungo l'asse \mathbf{n} . In questo caso i valori delle due probabilità vengono scambiati.

CONCLUSIONI

Ci si potrebbe dilungare parecchio sulle implicazioni concettuali ed epistemologiche di questo tipo di approcci. Qui ci limitiamo a osservare: i) questo tipo di approcci innovativi consentono di introdurre il concetto di probabilità quantistica in maniera naturale, come una necessità inevitabile, non come una bizzarria della natura, come potrebbe apparire dagli approcci tradizionali. Essa è il frutto della coesistenza del discreto (misure che possono fornire valori discreti come nel caso dello spin) e del continuo (le proprietà di simmetria come la rotazione implicano trasformazioni continue); ii) questo approccio permette di introdurre alla FQ chi può essere scoraggiato dal formalismo matematico astratto e complesso.

Concludiamo osservando come questa impostazione possa essere facilmente estesa a due particelle per descrivere l'entanglement quantistico. Uno dei fenomeni più interessanti e bizzarri della FQ.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Nielsen, M.A. Chuang, L. (2010). *Quantum computation and quantum information*. Cambridge.
- [2] Einstein, A. (1948) Quantum mechanics and reality. *Dialectica*.
- [3] Da una lettera a Heinrich Zangger 20 maggio 1912.
- [4] Camejo, S. A. (2008). *Il dibattito tra Bohr e Einstein*. Il bizzarro mondo dei quanti. Springer.
- [5] (2010.) Quantum ground state and single-phonon control of a mechanical resonator. *Nature* 464, 697-703.
- [6] Hameroff, S. Penrose, R. (1996) Orchestrated reduction of quantum coherence in brain microtubules: A model for consciousness- *Mathematics and computers in simulation*, – Elsevier.
- [7] Zeilinger, A. (1999) – A Foundational Principle for Quantum Mechanics. *Foundations of Physics*, Vol. 29, N^o.4.
- [8] Doumeester, D. Zeilinger, A. (2000). *The Physics of Quantum Information: Basic concept*. Springer
- [9] archivio.pubblica.istruzione.it/riforma_superiori/.../index.html.
- [10] Hardy, L (2001). Quantum theory from five reasonable axioms arXiv preprint quant-ph/0101012-arxiv.org.
- [11] Hardy, L. (2002). *Why quantum theory? Non-locality and modality*-Springer.
- [12] Savasta, S. (2008). Quantum effects in interacting electron system: the role of spin in the interaction and entanglement in mesoscopic system: *Magnetic nanostructures in modern technology*- Springer. 307-313.