

Dal Quark al Quasar

Pensieri di Fisica, sulla Natura e sull'Universo

L'esperimento di Davisson e Germer

Martedì 11 ottobre 2005

Caro Amico,

nell'intento di presentarti alcune delle idee sorprendenti che hanno portato, all'inizio del XX secolo, alla comprensione dei fenomeni fisici del mondo microscopico attraverso l'interpretazione teorica nota come *Meccanica Quantistica*, ti introduco oggi l'esperimento che Davisson e Germer hanno condotto nel 1927, i cui risultati saranno molto utili a noi, come lo sono stati all'epoca, per iniziare a comprendere la complessità della Natura, e la sua diversità dall'esperienza fisica quotidiana, che abbiamo sulle scale degli atomi.

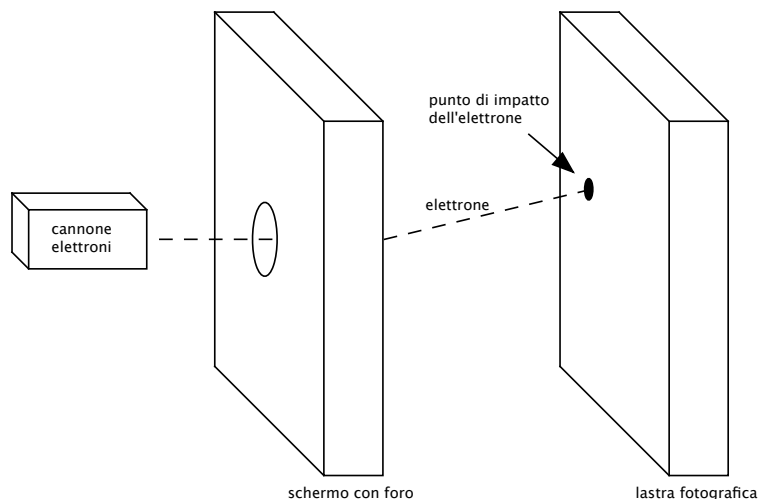
L'esperimento, almeno concettualmente, è di una semplicità disarmante. Immagina uno schermo (sottile) di un qualche materiale. Davisson e Germer hanno usato il Nickel, cristallino. Su questo schermo è prati-

cato un piccolo forellino, molto piccolo. Un cannone elettronico spara elettroni verso lo schermo, indirizzandoli verso il forellino; oltre ad esso, dall'altra parte rispetto al cannone elettronico, una lastra fotografica è pronta a registrare, con un puntino che risulterà annerito, il punto in cui ogni elettrone che attraversa il forellino colpisce la lastra.

Quando un numero sufficiente di elettroni avranno oltrepassato il forellino nello schermo e colpito la lastra, un'immagine si formerà su di essa, rivelando il risultato dell'esperimento. In realtà, la presenza del forellino nello schermo è un'idealizzazione: lo schermo di Nickel è molto sottile e gli elettroni sparati dal cannone possono, in una certa misura, attraversarlo passando negli spazi vuoti esistenti tra i vari nuclei atomici che costituiscono il cristallo (in alternativa, è possibile pensare all'esperimento anche sfruttando la riflessione degli elettroni sullo schermo, ma non è qui rilevante discutere dei dettagli delle diverse implementazioni). L'esperimento è un po' più complesso rispetto allo schema ideale presentato, perché bisogna tenere conto della periodicità del reticolo cristallino dello schermo, e il risultato dell'esperimento andrà interpretato tenendo conto dell'energia degli elettroni incidenti, ma sono dettagli che qui non aiutano a focalizzare meglio il problema.

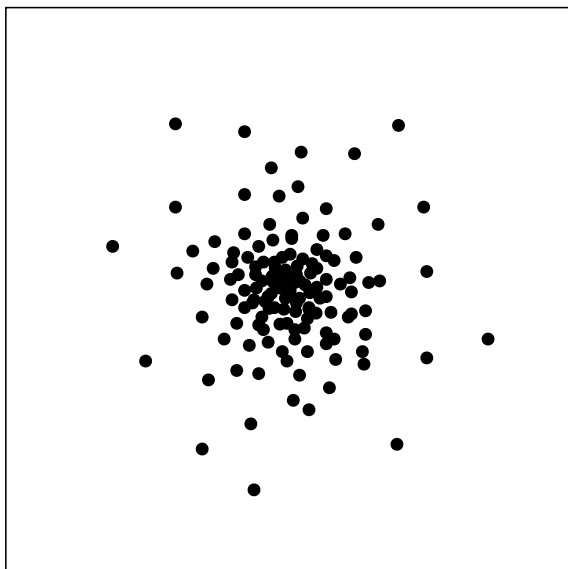
Ma in che cosa consiste quest'immagine? Almeno inizialmente, pensiamo all'elettrone come ad una sferetta. Non è così, naturalmente, ma ancora non abbiamo modo di saperlo. Nella nostra immaginazione, l'elettrone modellizzato come una sferetta rigida attraversa il forellino (un po' come un proiettile) e va incontro a due possibili destini:

1. l'elettrone non urta contro il bordo del forellino; la sua traiettoria prosegue allora indisturbata fino alla lastra fotografica, che impressionerà in corrispondenza del suo punto di impatto, grosso modo lungo l'asse del forellino stesso;
2. l'elettrone urta contro il bordo del forellino; la sua traiettoria resterà deviata (come schematizzato in figura), ed andrà ad impressionare la lastra fotografica in un punto lontano dall'intersezione dell'asse del forellino con la lastra stessa. Va precisato che anche qualora assumessimo che il cannone sia in grado di sparare elettroni tutti rigorosamente con la stessa energia e lungo la stessa direzione, l'urto



col bordo del forellino (estremamente piccolo) sarebbe comunque possibile per via dell'agitazione termica degli atomi che costituiscono le pareti del forellino stesso; dal momento che nell'esperimento reale non c'è nessun forellino, ma ci sono solo gli spazi interatomici all'interno del cristallo, appare chiaro che anche un cannone di elettroni ideale non impedirebbe una dispersione degli elettroni sulla lastra dopo che essi abbiano attraversato lo schermo.

Immaginiamo che il nostro cannone elettronico possa sparare un elettrone per volta, di modo che un elettrone venga sparato verso lo schermo solo *dopo* che l'elettrone precedente ha *già colpito* la lastra fotografica. Questa "lentezza" del nostro esperimento è fondamentale, come vedremo più avanti. In queste condizioni, che cosa ci aspettiamo che avvenga? La

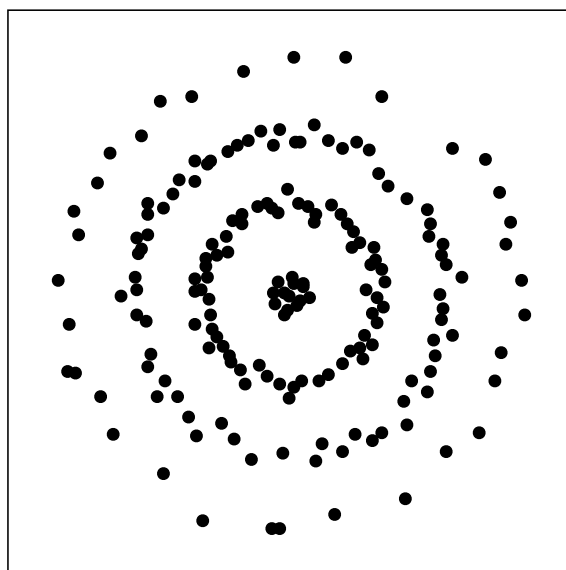


maggioranza degli elettroni che attraversano lo schermo colpiranno la lastra nel cono di luce individuato dal forellino nello schermo. Sulla lastra troveremo quindi una regione particolarmente annerita (dai "puntini" impressionati dagli elettroni che impattano sulla lastra) in una regione circolare in corrispondenza del forellino sullo schermo; poi, allontanandosi dal suo asse, la lastra sarà colpita solo dagli elettroni che avranno precedentemente urtato (senza essere riflessi all'indietro verso il cannone) il bordo del forellino; allontanandosi dall'asse, quindi, sulla lastra compariranno puntini anneriti sempre più radi, a formare una sorta di zona di "penombra" che, lentamente, svanirà all'aumentare del raggio. È quanto rappresentato, in maniera molto grossolana, nella figura qua di fianco, che vorrebbe dare un'idea dell'aspetto che dovrebbe avere la lastra fotografica dopo essere stata colpita da numerosi elettroni, nell'ipotesi che essi seguano i due destini sopra descritti. La regione

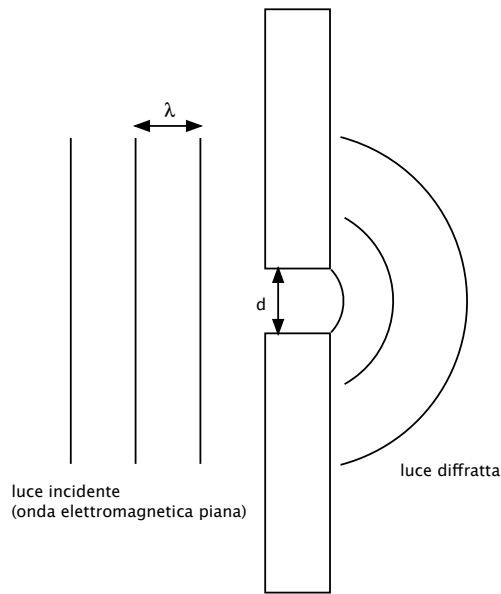
centrale maggiormente annerita si trova in corrispondenza del forellino, mentre a mano a mano che ci si allontana dal centro gli elettroni che impattano contro la lastra si fanno sempre più radi, in quanto con sempre minore probabilità un elettrone urterà il bordo del forellino deviando la traiettoria di un angolo grande rispetto alla direzione di incidenza.

Questo sarebbe l'esito dell'esperimento di Davisson e Germer se gli elettroni non obbedissero alle leggi della Meccanica Quantistica. Ma questo, come avrai capito, non è l'esito dell'esperimento che Davisson e Germer hanno condotto. I risultati da loro ottenuti sono molto più sconcertanti, ma anche molto più interessanti. E getteranno una luce nuova, inaspettata e per alcuni persino un po' inquietante sulle leggi della Fisica nel mondo degli atomi (e anche più giù).

L'esito dell'esperimento di Davisson e Germer è rappresentato, di nuovo in maniera un po' grossolana, nella figura qui di fianco, che ancora una volta schematizza la lastra fotografica con i puntini anneriti dagli elettroni che l'hanno impressionata urtandola dopo aver attraversato il forellino. L'aspetto della figura risultante è completamente diverso! Che cosa può essere successo?



Innanzitutto notiamo che la figura che appare sulla lastra ha un che di familiare: c'è un forellino circolare nello schermo, e ci sono delle aree annerite circolari, concentriche, sulla lastra. Ricorda un po' le creste dell'onda che si genera quando si getta un sasso in uno stagno, o, se preferisci, ricorda un po' delle *figure di diffrazione*, ovvero quegli anelli che si creano su uno schermo quando un raggio di luce (un'onda elettromagnetica, dovremmo dire) attraversa un forellino circolare di dimensioni confrontabili con la lunghezza dell'onda stessa.



Forse è il caso di approfondire. Un'onda elettromagnetica piana (un raggio di luce) colpisce uno schermo su cui è praticato un forellino, come indicato nella figura qui di fianco. L'onda piana è rappresentata dai suoi fronti d'onda (pensa alle creste delle onde del mare), spaziate di una lunghezza λ (la *lunghezza d'onda*). Lo schermo presenta una fenditura di lunghezza d , ed è fondamentale che $d \approx \lambda$. Solo in queste condizioni, infatti, è particolarmente evidente l'effetto di *diffrazione* della luce schematizzato nella figura: l'onda luminosa piana che incide sullo schermo attraversa il forellino, ma poiché la sua lunghezza d'onda è confrontabile con le dimensioni del forellino stesso il suo fronte d'onda viene deformato, assumendo una forma curvata; il forellino diventa una sorta di sorgente di onde "sferiche" che si propagano al di là dello schermo. Questo non avviene se $d \gg \lambda$ come sappiamo dall'esperienza quotidiana: la luce che passa attraverso il vano di una porta aperta illumina la parete di fronte disegnando, in maniera netta, la sagoma del vano della porta stessa; questo perché la lunghezza d'onda della luce è di alcune

centinaia di nm, a fronte delle dimensioni laterali del vano della porta che sono di alcune decine di cm, quindi enormemente più grandi. Nel caso invece in cui $d \approx \lambda$, se dall'altra parte del forellino, nel semispazio in cui si propaga la luce diffratta, mettessimo una lastra fotografica, la figura che risulterebbe impressionata su di essa sarebbe molto simile a quella dell'esperimento di Davisson e Germer. Infatti, bisogna pensare a che cosa succede quando la luce diffratta incide sulla lastra fotografica: i fronti d'onda della luce non sono più piani, ma sferici, mentre la lastra fotografica è piana. Le onde elettromagnetiche diffratte interferiranno tra di loro, annullandosi dove sono in opposizione di fase, rinforzandosi dove sono in fase. Stante la simmetria del forellino (circolare), sulla lastra compariranno figure o *anelli* di interferenza circolari, ovvero regioni circolari annerite dove le onde diffratte si sono sommate con interferenza costruttiva, e regioni circolari non annerite dove le onde diffratte si sono sommate con interferenza distruttiva. La presenza di figure di interferenza è caratteristica di tutti i fenomeni ondulatori; se per la luce (che sappiamo essere un'onda) questo non sorprende, per gli elettroni dell'esperimento di Davisson e Germer la cosa sconcerta un po' di più, visto che intuitivamente li immaginiamo come particelle. Ma allora che cosa sta succedendo?

Quando un'onda elettromagnetica piana incide su uno schermo con un forellino e poi di qui, una volta diffratta, raggiunge la lastra fotografica, io implicitamente faccio delle ipotesi che sembrano scontate, ma che sono fondamentali: genero continuamente e costantemente la mia onda elettromagnetica (la luce), affinché si possa avere un *treno d'onde* sufficientemente lungo da poter adeguatamente impressionare la lastra fotografica là dove l'interferenza costruttiva è in grado di annerirla. Sulla lastra fotografica ottengo quindi gli anelli di interferenza perché ho sempre, per tutta la durata dell'esperimento, delle onde elettromagnetiche che interferiscono tra di loro.

Nell'esperimento di Davisson e Germer, invece, succede qualche cosa di completamente diverso. Ricordi quando dicevo che facciamo l'ipotesi che il cannone elettronico invii un elettrone per volta, e che l'elettrone successivo sia sparato solo dopo che quello precedente ha già colpito la lastra fotografica? Ecco, con questa ipotesi (che non è esattamente quella dell'esperimento reale realizzato dai nostri due protagonisti, ma è invece stata rigorosamente rispettata in un esperimento simile condotto nel 1948 da Fabrikant, Biberman e Sushkin) stiamo escludendo che due o più elettroni, qualunque cosa essi siano, possano interferire l'uno con l'altro, perché durante l'esperimento non avrò mai più di un elettrone per volta che attraversa il mio forellino e raggiunge la lastra fotografica. E infatti, almeno da un certo punto di vista, le cose tornano abbastanza: sulla lastra fotografica dell'esperimento posso individuare un gran numero di puntini neri corrispondenti alle zone di impatto dei singoli elettroni; ogni elettrone, quindi, sembra attraversare il forellino nello schermo ed impattare contro la lastra fotografica *singularmente*, come un'entità a sé, come una *particella*. Eppure, se mando tanti elettroni, uno per volta, senza che possano interferire tra di loro, la figura annerita che si crea sulla lastra fotografica non è quella che ci saremmo aspettati da un fascio di particelle (di proiettili materiali), ma assomiglia alla figura di interferenza di un'onda elettromagnetica che attraversa un forellino. È *come se* ogni elettrone mantenesse la sua individualità nel colpire la lastra fotografica, ma la perdesse a favore di una sua natura ondulatoria quando attraversa il forellino. È un fatto sconcertante, ma è e resta un fatto. L'esperimento parla chiaro: la figura di interferenza è costituita dai tanti puntini anneriti da ogni elettrone; ogni elettrone sembra impattare sulla lastra fotografica in un punto

ben preciso, ma con una *probabilità* diversa rispetto a quella che avrebbero dei normali proiettili materiali. Vale la pena sottolinearlo ancora: che l'elettrone mantenga la sua individualità quando colpisce la lastra fotografica è confermato dal fatto che il punto di impatto è individuato da un puntino annerito; il singolo elettrone non produce sulla lastra una seppur debole figura di interferenza, come farebbe se fosse un'onda; invece è solo la collettività degli elettroni che costruisce, punto per punto, la figura di interferenza; eppure l'esperimento può essere condotto in modo tale da escludere un'interazione diretta tra più elettroni, così che il comportamento ondulatorio dell'elettrone assume solo un carattere probabilistico.

Questo aspetto è ancora più evidente se si considera che in realtà l'esperimento di Davisson e Germer, come dicevamo, è un po' più complesso della schematizzazione semplificata che abbiamo discusso. Infatti, nello schermo di Nickel non c'è nessun forellino, ma gli elettroni lo attraversano (in virtù del fatto che è molto sottile) sfruttando la gran quantità di spazio vuoto che c'è tra un nucleo atomico e un altro (e vincendo, grazie alla loro energia cinetica, la repulsione elettrostatica con gli elettroni che orbitano attorno ai nuclei di Nickel dello schermo). Gli elettroni sparati dal cannone, quindi, non hanno davanti a loro un solo forellino, ma una molteplicità di forellini, poiché il cristallo è grande ed è costituito da tanti atomi. Immaginiamo ancora una situazione semplificata, in cui ci sono due forellini. Se ne copriamo uno per volta, e ripetiamo due volte l'esperimento, sulla lastra compariranno due figure di interferenza, sostanzialmente identiche (e simili a quella mostrata nella figura di due pagine fa) e centrate sull'asse dei due forellini. La ripetizione consecutiva dell'esperimento, due volte, la prima con un forellino aperto e l'altro chiuso, la seconda col primo forellino chiuso e l'altro aperto, senza cambiare lastra fotografica, porta ad un'immagine impressa su di essa che è la somma delle due figure di interferenza prodotte, singolarmente, da ogni esperimento. Ma se ripetiamo l'esperimento un'altra volta, ora con entrambi i forellini simultaneamente aperti, sempre nell'ipotesi che un solo elettrone per volta venga sparato dal cannone, la figura che si delinea puntino per puntino sulla lastra fotografica non è la somma delle figure di diffrazione generate dai singoli forellini, ma è una *figura diversa*, data dall'interferenza delle onde diffratte generate da ognuno dei due forellini. In pratica, di nuovo, il singolo elettrone impatta la lastra fotografica come una particella, ma nell'attraversare i forellini si comporta come un'onda. Nell'esperimento reale i "forellini" non sono solo due ma tanti, e la figura impressionata sulla lastra è esattamente quella compatibile con la distanza dei "forellini" presenti nello schermo, ovvero col passo reticolare del cristallo di Nickel.

Siamo sconcertati, ma non così come lo erano Davisson e Germer, i quali stavano cercando una conferma sperimentale a questo *dualismo onda-particella* già teorizzato da DeBroglie nel 1924. Però è evidente che c'è qualche cosa di strano nel come si comporta la Natura con questi elettroni; sono particelle, eppure sembra che "sappiano" in anticipo che attraversando un forellino devono comportarsi come delle onde, così da generare, uno per volta e in gran numero, degli anelli di interferenza sulla lastra fotografica posta al di là del forellino. Tutto questo senza mai avere la possibilità di interagire l'uno con l'altro, tutto questo da soli, ognuno per sé.

Lo sconcerto non passerà, ma dovremo farci l'abitudine; se questo è un risultato sperimentale certo, ad esso dovremo conformare il nostro modo di pensare, e ad esso dovremo adattare le spiegazioni teoriche che riusciremo a formulare. E da esso, e da tanti altri risultati ancora di cui magari parleremo in futuro, estrarremo le idee fondamentali che ci condurranno, la prossima volta, a seguire le orme di Schrödinger nel formulare la *Meccanica Ondulatoria* o *Meccanica Quantistica*.

A presto,

Marco