

L'alto livello delle ricerche di ottica degli elettroni svolte nel gruppo diretto da Ugo Valdré è ben noto, ma non è forse altrettanto noto che il primo esperimento che rivela l'interferenza di Young del singolo elettrone con sé stesso, e quindi dimostra la validità dell'interpretazione probabilistica della Meccanica Quantistica è nato in quel gruppo ad opera di Merli, Missiroli e Pozzi. A loro è stato chiesto di ricordare questo evento, che realizza un esperimento definito da Feynman "esperimento concettuale", in connessione con il fatto che proprio l'esperimento dell'interferenza dei singoli elettroni è stato votato dai lettori di "Physics World" come il più bello della Fisica.

G.F. Bassani

L'ESPERIMENTO DI INTERFERENZA DEGLI ELETTRONI SINGOLI

P. G. Merli*

LAMEL, CNR Bologna, Italy

G.F. Missiroli**

Dipartimento di Fisica, Università di Bologna

G. Pozzi***

Dipartimento di Fisica, Università di Bologna

Lo scorso anno il Prof. R. Crease (Dipartimento di Filosofia dell'Università di New York a Stony Brook) esperto di storia della scienza chiese ai lettori di "Physics World", una rivista dell'Institute of Physics (UK), quale fosse l'esperimento di fisica più bello. Risposero più di 200 lettori e la graduatoria risultante, riportata nel numero di settembre 2002 di "Physics World", fu la seguente:

1. Esperimento della doppia fenditura di Young applicata all'interferenza di singoli elettroni
2. Esperimento di Galileo sulla caduta dei corpi (1600)
3. Esperimento di Millikan con le goccioline di olio (1910)
4. Scomposizione da parte di Newton della luce solare con un prisma (1665-66)
5. Esperimento di Young di interferenza della luce (1801)

6. Esperimento con la bilancia di torsione di Cavendish (1798)
7. Misura della circonferenza della terra di Eratostene (3° secolo AC)
8. Esperimento di Galileo con sfere che scendono lungo un piano inclinato (1600)
9. Scoperta del nucleo da parte di Rutherford (1911)
10. Pendolo di Foucault (1851).

Come si vede il primo della lista risultò l'esperimento della doppia fenditura di Young applicato all'interferenza di un singolo elettrone. A proposito di questo esperimento R. Crease ha scritto:

"L'esperimento illustra la dualità onda corpuscolo e permette di capire immediatamente il significato fisico della funzione d'onda associata all'elettrone. Esso contiene l'essenza della meccanica quantistica. Ha tutte le caratteristiche che permettono di definire un esperimento bello.

È di importanza strategica nel senso che è capace di convincere anche il più scettico sui fondamenti della meccanica quantistica.

È semplice, facile da capire nonostante i risultati siano rivoluzionari.

Il mondo della meccanica quantistica è e rimarrà assolutamente lontano dal nostro intuire indipendentemente da quanto si conosca la teoria.

L'esperimento di interferenza di elettroni con elettroni singoli pone la realtà dinanzi ai nostri occhi in modo semplice, chiaro e coinvolgente. È quindi presumibile che rimarrà nel pantheon degli esperimenti meravigliosi per molti anni a venire."

Nello stesso numero della rivista dove il Prof. Crease illustra i risultati della sua inchiesta l'Editore, Prof. P. Rodgers, riporta un'analisi storica degli esperimenti di interferometria elettronica e attribuisce il merito del primo esperimento con elettrone singolo al Dr. Akira Tonomura e collaboratori della Hitachi che lo pubblicarono nel 1989.

In realtà il primo esperimento fu realizzato quindici anni prima dagli estensori della presente nota come riconosciuto nel numero di maggio 2003 di "Physics World", in cui sono state pubblicate a chiarimento e a conclusione del contendere tre lettere: una di un eminente fisico inglese John Steeds (che sollevava il problema della priorità), una nostra e una di A. Tonomura. Le ultime due lettere riportano an-

* merli@lotto.lamel.bo.cnr.it

** f.missiroli@tin.it

*** Giulio.pozzi@bo.infm.it

che le foto dei risultati sperimentali (ottenuti, i nostri, nel 1974 e pubblicati nel 1976; e, quelli di Tonomura e del suo gruppo, nel 1987 e pubblicati nel 1989).

In particolare, nella lettera di Tonomura, l'autore, fra l'altro, dice testualmente: "A mia conoscenza, storicamente, il gruppo di Bologna è stato il primo a pubblicare questi esperimenti che mostrano la formazione delle figure di interferenza" (*Physics World*: Vol. 20, n. 5 (2003), pag. 20).

A questo punto ci sembra opportuno riportare alcune informazioni di carattere storico che permettono anche di cogliere la ragione di quelle lettere.

I primi esperimenti di interferometria elettronica sono stati fatti da due di noi (GFM e GP) presso il Centro di Microscopia Elettronica, diretto dal Prof. Valdrè, dell'Istituto di Fisica di Bologna a partire dal 1971. Il dispositivo interferometrico messo a punto da noi riproduceva quello ideato da Möllenstedt e Düker nel 1955 e consisteva in un sottile filo conduttore, (diametro inferiore al micrometro al quale viene poi applicato un potenziale dall'esterno) che si trova posto fra due lamine al potenziale di terra.

Questo dispositivo, schematizzato in fig. 1, ha la proprietà di deflettere gli elettroni di un angolo a proporzionale al potenziale applicato e, in prima approssimazione, indipendente dalla distanza della traiettoria elettronica dal filo. È in pratica l'equivalente elettro-ottico del biprisma di Fresnel e viene per questo chiamato biprisma elettronico.

È questo un metodo interferometrico basato sulla divisione del fronte d'onda, come l'esperimento con due fenditure rimpiazzate dalle due sorgenti virtuali.

Queste prime applicazioni dell'interferometria elettronica a carattere didattico hanno portato ad una pubblicazione sull'*"American Journal of Physics"*, Vol. 41 (1973) pp. 639-44 e ad un premio (nel 1972) al 58° Congresso SIF a Cagliari quale miglior lavoro presentato al concorso bandito dalla SIF per esperienze di fisica a carattere didattico.

Era comunque chiaro che questa metodologia permetteva di evidenziare, tramite lo spostamento delle frange di interferenza, gli effetti di fase dovuti a microcampi magnetici od elettrici presenti in un campione sottile osservato al microscopio. Le prime applicazioni si riferirono allo studio di domini magnetici, successivamente l'interesse applicativo si estese allo stu-

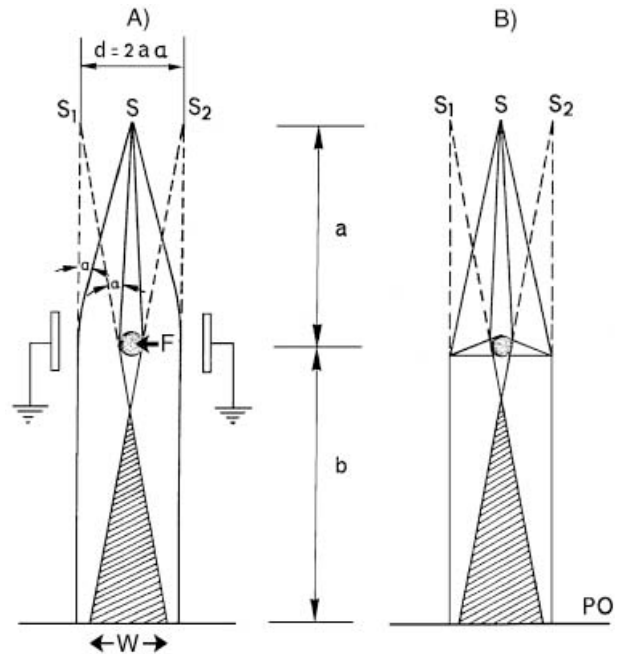


Fig. 1. - A) Biprisma elettronico convergente. B) Biprisma ottico convergente. S sorgente di elettroni; S_1, S_2 sorgenti virtuali distanti tra di loro d ; a angolo di deflessione degli elettroni quando al filo F è attribuito un potenziale positivo; a distanza fra sorgente S e il filo F ; b distanza fra il filo F e il piano ove si formano le frange PO ; W larghezza della zona di sovrapposizione sul piano PO .

dio dei microcampi elettrostatici associati a giunzioni p-n in dispositivi elettronici.

Quest'ultima attività era portata avanti presso l'Istituto LAMEL del CNR di Bologna da PGM, anch'egli laureatosi presso il Centro di Microscopia Elettronica, con il Prof. U. Valdrè.

L'Istituto LAMEL disponeva di un microscopio di ultima generazione, un Siemens Elmiskop 101, che venne opportunamente tarato ed adattato per operare in microscopia elettronica interferenziale. (P.G. Merli, G.F. Missiroli, G. Pozzi: *Electron interferometry with the Elmiskop 101 electron microscope. J. Phys. E - Scient. Instr.* Vol. 7 (1974) pp. 729-32).

Alcuni anni prima i ricercatori della Siemens avevano sviluppato un intensificatore di immagini che permetteva di mettere in evidenza il segnale corrispondente all'arrivo sullo schermo di un elettrone singolo. Alcuni risultati erano stati presentati dal Prof. Hermann alla prima Scuola Internazionale di Microscopia Elettronica di Erice (1971), cui partecipavano P.G.M. e G.P., che ne furono molto impressionati. Verso la fine del 1973 sapemmo che l'Istituto di Anatomia Umana dell'Università di Milano, diretto dal Prof. Angelo Bairati, dove era

già operante un microscopio Elmiskop 101 eguale a quello del LAMEL, aveva installato sullo strumento l'intensificatore in questione che era stato reso commerciale e venduto come accessorio.

Avevamo sviluppato un interferometro che operava su di un banco elettro-ottico ben noto e tarato: l'Elmiskop 101. Su uno strumento analogo c'era un intensificatore di immagini che lasciava intravedere la possibilità di realizzare l'esperimento ideale riportato nelle famose lezioni di Feynman (o in testi equivalenti). Col senno di poi ci appare scontato che chiedessimo al Prof. Angelo Bairati il permesso di fare l'esperimento presso il suo Istituto. Il permesso ci fu concesso e all'inizio del 1974 l'esperimento fu fatto e filmato.

Il filmato riprendeva la formazioni delle frange di interferenza a partire dai primissimi stadi quando su ogni fotogramma erano presenti uno o pochi elettroni sino allo stadio finale in cui venivano registrati in un fotogramma un numero relevantissimo di elettroni.

Due sono stati gli approcci sperimentali:

1) mantenere costante il tempo di integrazione (tipicamente un venticinquesimo di secondo) e variare con continuità l'intensità del fascio elettronico;

2) mantenere costante l'intensità del fascio a valori tanto bassi da avere il passaggio di un elettrone alla volta ed eseguire una successione di fotogrammi a tempi di integrazione via via crescenti.

Nessuna apprezzabile differenza era visibile nella formazione del sistema di frange operando nei due modi. Alcuni dei fotogrammi del film sono stati usati per un paio di articoli didattici pubblicati sul "Giornale di Fisica" (*Diffrazione e interferenza di elettroni: Diffrazione*, Vol. 15 (1974) pp. 163-87; *Interferenza*, Vol. 17 (1976) pp. 83-101) e sull'"*American Journal of Physics*" (*On the statistical aspect of electron interference phenomena*, Vol. 44 (1976), pp. 306-7).

I fotogrammi qui riprodotti in fig. 2 sono quelli già comparsi sul "Giornale di Fisica".

Questi risultati sono stati favorevolmente re-

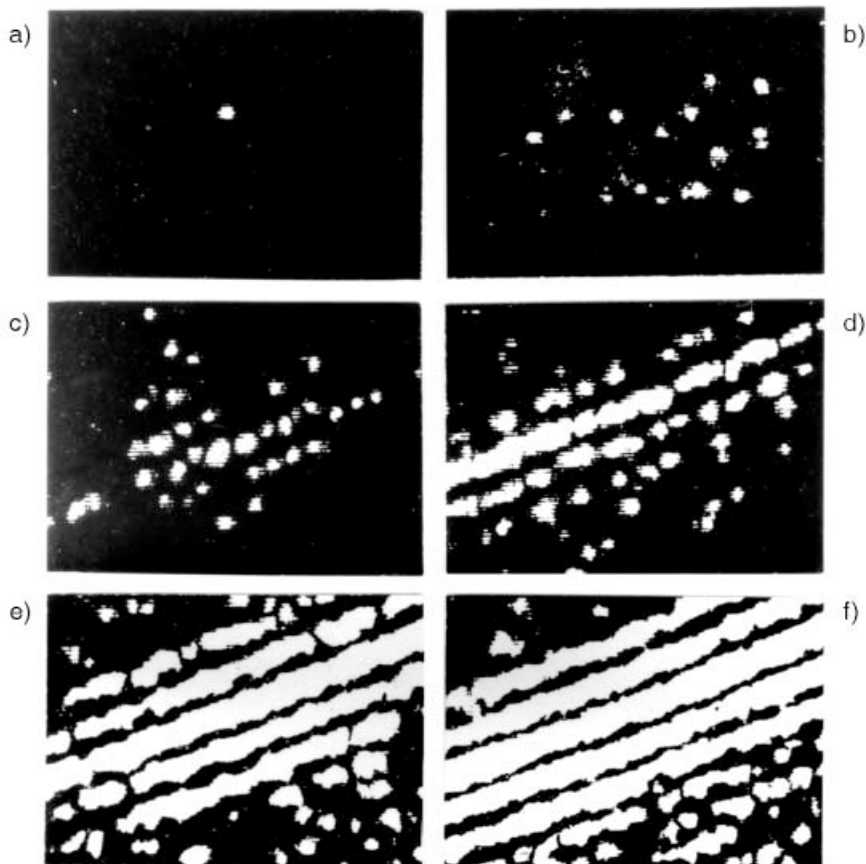


Fig. 2. - Frange di interferenza per valori crescenti della corrente del fascio (da a) ad f)) e tempo di registrazione costante. Si osservano frange di interferenza anche con tempi molto lunghi di registrazione ed elettrone singolo passante.

cepirati dalla comunità scientifica, e la figura pubblicata sull'*Am. J. Phys.* che mostra sei fotogrammi ottenuti con flusso di elettroni crescente è stata riprodotta, a partire dal 1976, in numerosi libri di testo a livello universitario.

Confinare i risultati dell'esperimento nei pochi fotogrammi pubblicati sulle due riviste ci appariva molto riduttivo, ragion per cui abbiamo pensato di realizzare un film dove riportare tutto il materiale girato facendolo precedere da una illustrazione di fenomeni di interferenza con onde meccaniche (nei fluidi) e con onde elettromagnetiche (luce). Una serie di animazioni integrava gli schemi degli esperimenti mostrati.

È stato possibile affrontare questa impresa grazie al finanziamento reso disponibile dall'Istituto LAMEL che, nelle persone del Prof. A. Laghi, Direttore dell'Istituto e del Prof. D. Nobili, Direttore del reparto Chimico Fisico a cui afferriva uno di noi (P.G.M.), ha dimostrato una grande sensibilità ed attenzione nei confronti dei risvolti più squisitamente culturali dell'attività di ricerca. L'impresa si è comunque rivelata molto più impegnativa del previsto ed è giunta a buon fine anche grazie all'impegno del Prof. L. Morrettini, incaricato di ricerca del LAMEL, e alla importante collaborazione e supporto di D. Nobili che figurano fra gli autori del film.

Nel 1975 uno di noi (P.G.M.) ha vinto una borsa di studio della NATO per uno stage di alcuni mesi presso il Laboratorio di Microscopia Elettronica del Dipartimento di Fisica dell'Università di Bristol. Il Laboratorio era diretto dal Prof. J. W. Steeds, ora Direttore del dipartimento. In quell'occasione il film fu proiettato al corpo docente del dipartimento. La presentazione e traduzione simultanea (non avevamo ancora fatto una versione in inglese) fu fatta dal Dr. A. Eades, un ricercatore del dipartimento, attualmente Professore alla Lehigh University in Pennsylvania (USA) e quest'anno presidente di *Microscopy and Microanalysis*, la Società di Microscopia Elettronica degli Stati Uniti. Il film fu molto apprezzato.

Il film, successivamente doppiato in Inglese, ha poi vinto il premio per la sezione di Fisica al Festival Internazionale del Film Scientifico di Bruxelles nel 1976. Esso, prodotto e distribuito dall'istituto LAMEL del CNR è stato diffuso in un centinaio di copie, ed è attualmente disponibile in rete al sito: <http://www.lamel.bo.cnr.it/educational/educational.html>.

Nel 1989 venne pubblicato sempre *sull'Am.*

J. Phys. da parte di A.Tonomura *et al.* un lavoro dal titolo: "*Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern*". Il lavoro arrivato il 17/12/87 venne accettato per la pubblicazione il 22/3/88 e direttamente pubblicato nel febbraio dell'89 senza che i censori facessero notare come in bibliografia non compariva la citazione del nostro lavoro del 1976 (peraltro pubblicato sempre sull'*Am. J. Phys.*).

Tonomura faceva invece riferimento ad un generico nostro filmato con indicazioni bibliografiche errate. Il lavoro di Tonomura apparso 13 anni dopo il nostro si candidava così ad essere presentato come il primo lavoro che riportava l'esperimento con "singolo elettrone".

Ovviamente facemmo pervenire all'Editore Prof. R. Romer una lettera di precisazione. Con molta correttezza l'Editore si dichiarò disponibile a pubblicarla: chiariva però che la stessa duplicava in parte quella inviata dal Prof. G. Gilson (Physics Department Submicron Structures, Nashua, NH, USA) e che era stata pubblicata nella rubrica "Lettere all'Editore" nel volume 8 dell'agosto 1989 dell'*Am. J. Phys.* Ci ritenemmo soddisfatti delle precisazioni presenti nella lettera di G. Gilson, consapevoli che la maggioranza degli "addetti ai lavori" conosceva le nostre pubblicazioni. Ci sbagliammo giacché ben pochi sono coloro che leggono le lettere di precisazione. Esse sono certamente sfuggite all'editore di "*Physics World*" che nell'articolo di settembre 2002 attribuisce la priorità dell'esperimento a Tonomura.

Anche in questo caso, con nostra soddisfazione, non siamo stati noi a sollevare il problema ma il Prof. J.W. Steeds che, dopo averci sentito per rinfrescarsi la memoria, ha segnalato la "svista" all'editore della rivista. Quest'ultimo, dopo numerosi controlli ha deciso con grande serietà professionale di pubblicare nel numero di maggio 2003 le lettere del Prof. Steeds, nostra e del Dr. A.Tonomura.

Una curiosità. Nella nostra lettera all'editore abbiamo concluso dicendo che l'esperimento di interferometria elettronica con singolo elettrone può essere considerato il prodotto collaterale dell'attività di ricerca sull'osservazione di microcampi elettrici e magnetici. Questa attività è estremamente attuale e con strumenti aggiornati (sia microscopi che modelli fisici) ritrova impegnati due di noi (P.G.M. e G.P.) in un progetto con finanziamento FIRB.