

Dalla mente al laboratorio: come l'esperimento più bello divenne realtà

[...] vi avvertiamo subito di non cercare di montare questo esperimento [...]. Il guaio sta nel fatto che, per rivelare gli effetti che interessano, l'apparato dovrebbe essere costruito su una scala talmente piccola da rendere impossibile la cosa.

Richard Feynman, *The Feynman Lectures on Physics 3*.
Quantum Mechanics

Secondo Feynman, l'esperimento che Einstein aveva immaginato, semplice, ma capace di riassumere in sé la quintessenza del mistero quantistico, non si sarebbe mai potuto realizzare perché sarebbe servita un'apparecchiatura "*impossibly small*" (piccola in modo impossibile).

In questo capitolo vedremo come i fisici sperimentali superarono le difficoltà previste da Feynman, trasformando l'esperimento mentale in un'esperienza di laboratorio.

Abbiamo visto che il dualismo onda-particella riguarda allo stesso modo luce ed elettroni. Ci sono quindi due storie che si intrecciano: quella dell'interferenza di fotoni singoli e quella dell'interferenza di elettroni singoli. Si tratta, come ormai sappiamo, di esperimenti concettualmente simili, tuttavia ciascuno presenta particolari problemi di realizzazione. Partiremo quindi da una veloce carrellata su quanto è accaduto con i fotoni, per poi dedicarci con maggior dettaglio all'esperimento con gli elettroni.

6.1 L'interferenza di fotoni singoli

Nel 1909 Geoffrey Ingram Taylor (1886-1975) allestì un esperimento “alla Young”, in cui utilizzò la luce di una candela, fortemente attenuata con filtri di vetro anneriti dal nerofumo, e una lastra fotografica per registrare la figura di interferenza. La luce era debolissima: per impressionare una lastra servivano tempi di esposizione molto lunghi, addirittura mesi. Tanto che Taylor, scherzosamente, scrisse che si era organizzato per andare in vacanza in barca nel tempo tra una esposizione e l'altra.

Ma perché operare in modo così inusuale?

Come abbiamo visto nel Capitolo 3, a quell'epoca quasi nessuno credeva alla teoria corpuscolare della luce, proposta pochi anni prima da Einstein per spiegare l'effetto fotoelettrico. Ma quella non era l'unica teoria a mettere in discussione la struttura continua della luce. Per esempio, lo scopritore dell'elettrone e premio Nobel J. J. Thomson, che nel 1909 era il capo di Taylor, pensava che le onde luminose si propagassero all'interno di unità discrete di forma allungata, definite “tubi” di radiazione. Cosa accadrebbe se nell'esperimento di Young si usasse una sorgente debolissima che emette un solo tubo alla volta? Un tubo, localizzato nello spazio, potrebbe passare attraverso una sola delle due fenditure. Le onde che contiene non interferirebbero con le onde di un altro tubo che passasse nello stesso istante per l'altra fenditura. Pertanto, riducendo l'intensità luminosa, e quindi la probabilità che due tubi passino contemporaneamente attraverso le due fenditure, ci si dovrebbe aspettare un progressivo sbiadimento, fino alla completa scomparsa, delle frange di interferenza.

Taylor fu incaricato di fare l'esperimento e, nonostante la pazienza, non osservò quello che Thomson si aspettava. Il contrasto tra zone buie e zone luminose della figura di interferenza non cambiava, sia che questa fosse ottenuta con un fascio debolissimo in un tempo lunghissimo o con un fascio più intenso in un tempo più breve. Oggi sappiamo perché: la meccanica quantistica ci insegna infatti che l'interferenza non avviene a causa dell'interazione contemporanea tra due o più fotoni. Come abbiamo mostrato nel Capitolo 5 l'interferenza avviene (e qui sta l'aspetto sorprendente del fenomeno) anche se i fotoni interagiscono *uno solo alla volta* con le fenditure.

Nelle condizioni dell'esperimento di Taylor, sulla lastra arrivava in media un fotone ogni milionesimo di secondo. Dato che in questo tempo la luce percorre una distanza di 300 metri, sul tragitto, lungo 3 metri, doveva essere mediamente presente un solo fotone alla volta. Pur non avendo ancora la sensibilità necessaria a visualizzare i singoli "granuli" di luce, si potrebbe quindi concludere che quello di Taylor fosse già un esperimento di interferenza di fotoni singoli. Vedremo tra breve che non è così, ma prima procediamo ancora un po' con la storia.

Un esperimento concettualmente simile, in cui venne impiegato un flusso luminoso ancora più debole (un fotone ogni centesimo di secondo), fu realizzato nel 1927 da Arthur Jeffrey Dempster (1886-1950) e Harold F. Batho e portò al medesimo risultato.

Intanto, intorno alla metà degli anni Venti del secolo scorso la teoria dei quanti di luce di Einstein era stata finalmente accettata dalla comunità scientifica. Ancora parecchio tempo doveva però trascorrere prima che fosse possibile rivelare sperimentalmente i fotoni singoli¹. Ci provarono due fisici ungheresi, L. Jánossy (1912-1978) e Zs. Náray con un esperimento condotto nel 1958. Essi non utilizzarono due fenditure, ma un *interferometro di Michelson*, il cui schema è riportato nella Figura 6.1. In esso un debolissimo fascio di luce viene suddiviso in due parti da uno specchio *semiriflettente*, uno specchio cioè che riflette metà della luce e ne fa passare l'altra metà. Con l'ausilio di specchi ordinari, come illustrato in figura, le due parti sono poi portate a sovrapporsi su un rivelatore. La differenza di fase tra esse si può regolare facendo per esempio variare le distanze (d_r e d_t nella figura) tra ciascuno dei due specchi ordinari e lo specchio semiriflettente.

Un *fotomoltiplicatore*, dispositivo molto sensibile capace di contare gli eventi di arrivo dei singoli fotoni, veniva spostato passo dopo passo nella zona dove i fasci si sovrapponevano, così da delineare la distribuzione dei punti di arrivo dei fotoni sul rivelatore. Questa mostrava zone in cui arrivavano molti fotoni alternate a zone in cui ne arrivavano molto pochi: la classica figura di interferenza che abbiamo ormai imparato a conoscere.

1 Per dare un'idea della loro intensità debolissima, e della conseguente difficoltà a rivelarli, basti pensare che una normale lampadina per illuminazione della potenza di 60 watt, emette in un secondo qualcosa come 2 miliardi di miliardi (2×10^{18}) di fotoni!

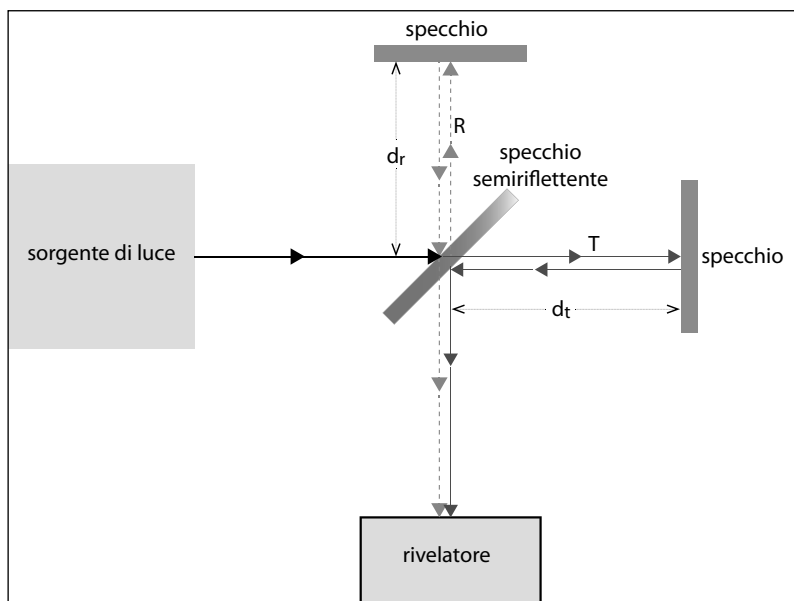


Figura 6.1 Disegno schematico di un interferometro di Michelson. Il fascio di luce emesso dalla sorgente viene scisso dallo specchio semiriflettente posto al centro dell'apparato in due componenti: una trasmessa (T , linea continua) e una riflessa (R , linea tratteggiata). I due specchi ordinari riflettono i fasci R e T rimandandoli verso lo specchio semiriflettente che li sdoppia nuovamente. Di questa ulteriore scissione abbiamo disegnato solo le componenti indirizzate sul rivelatore, dove si sovrappongono, generando interferenza.

Intanto, intorno a quegli anni, si scoprì che le usuali sorgenti di luce (candele, lampadine ecc.) tendono a emettere i fotoni a gruppi di due o più, vicinissimi l'uno all'altro. Il fenomeno è noto come *bunching* ("raggruppamento") e interessa i fotoni e altre particelle che rientrano nella classe dei cosiddetti *bosoni*. Alla luce di questa scoperta si comprese che buona parte degli eventi misurati da Jánossy e Náráy con un singolo segnale del rivelatore corrispondevano in realtà all'arrivo di due o più fotoni emessi pressoché contemporaneamente dalla sorgente. A rigore, non si può quindi dire che il loro risultato fosse rappresentativo del comportamento di fotoni singoli.

Sia l'esperimento precedente di Taylor, che diversi altri, fatti successivamente da vari gruppi, avevano tutti lo stesso problema:

le sorgenti utilizzate non garantivano l'emissione separata nel tempo di fotoni singoli.

Per risolvere il problema fu necessario attendere fino al 1986, anno in cui il fisico francese Alain Aspect (1947-) e collaboratori realizzarono un esperimento dove venne utilizzata una speciale sorgente atomica capace di emettere in modo controllato un solo fotone alla volta. L'esperimento fu la prima rigorosa dimostrazione dell'interferenza di singoli fotoni. Anche in quel caso non si trattò di un esperimento alla Young, ma fu condotto con una variante dell'interferometro di Michelson, l'*interferometro Mach-Zehnder*.

6.2 Interferenza di elettroni: i problemi pratici

La prima prova del comportamento ondulatorio degli elettroni si ebbe nel 1927 con gli esperimenti di diffrazione di Davisson e Germer e di G. P. Thomson, visti nel Capitolo 4. In quegli esperimenti i massimi e minimi di intensità della figura di diffrazione si osservavano abbastanza facilmente, perché la distanza tra gli atomi del cristallo che diffrangevano gli elettroni non era molto più grande della lunghezza d'onda degli elettroni stessi.

È invece più arduo realizzare un esperimento di interferenza “alla Young”. In questo caso serve infatti un sistema a due fenditure, o qualcosa di equivalente ad esse, che non esiste già fatto in natura, come un pezzo di cristallo, ma deve essere costruito appositamente. Per avere una figura di interferenza con massimi e minimi di intensità visibili a breve distanza dalle fenditure, la distanza che separa queste ultime e di conseguenza anche la loro larghezza, dovrebbe essere non molto più grande della lunghezza d'onda degli elettroni, cioè meno di un nanometro! Ma non esisteva al tempo di Feynman, e non esiste nemmeno oggi, una tecnologia che permette di fabbricare oggetti con dettagli tanto piccoli. Questo era in sostanza il problema del “troppo piccolo” a cui pensava Feynman.

In verità nel Capitolo 2 abbiamo visto che non è strettamente necessario che le fenditure siano così vicine e strette. Possono essere anche molto più distanti e larghe, ma in questo caso, per visualizzare le frange di interferenza, bisogna allontanare parecchio lo schermo rivelatore dalle fenditure, tanto di più quanto più è piccola la lunghezza delle onde con cui lavoriamo. Con gli elettroni, che

hanno lunghezza d'onda molto più piccola di quella della luce, la distanza necessaria sarebbe di decine o centinaia di metri.

Una sorgente di elettroni, a somiglianza di una sorgente di luce e a differenza delle punte e delle barrette oscillanti nell'ondoscopio, è *incoerente*. Come abbiamo visto nel Capitolo 2, in una sorgente di questo tipo la fase delle onde si mantiene costante solo per brevissimi intervalli di tempo, poi varia in modo casuale e incontrollabile. Questo pone delle limitazioni: per esempio è impossibile avere interferenza tra due sorgenti distinte, e quindi bisogna ricorrere per forza al metodo "alla Young" per operare con una sola sorgente, sdoppiandola.

Una sorgente reale di elettroni non è puntiforme, ha una estensione finita. Sappiamo dal Capitolo 2 che punti distanti di una sorgente incoerente emettono in modo scorrelato e quindi incoerente gli uni rispetto agli altri. Perché le fenditure siano, come si dice, "illuminate" in modo coerente e siano di conseguenza sorgenti secondarie coerenti in grado di produrre interferenza, la sorgente di elettroni deve essere più piccola della lunghezza di coerenza (1-2 micrometri nel caso degli elettroni), oppure deve essere tenuta abbastanza distante dalle fenditure, in modo da poter essere considerata come puntiforme, secondo i criteri che abbiamo visto nel Capitolo 2.

Nella Figura 6.2, abbiamo riportato l'esempio di una tipica sorgente di elettroni utilizzata in un microscopio elettronico e ne abbiamo brevemente descritto il funzionamento.

Per produrre e visualizzare il fenomeno dell'interferenza di elettroni, le distanze, in primo luogo tra fenditure e rivelatore e secondariamente tra sorgente e fenditure, devono essere molto grandi. Di conseguenza lo deve essere anche l'intero apparato sperimentale. Ciò presenta ovvie difficoltà pratiche, anche perché, come spiegato nella didascalia della Figura 6.2, il lunghissimo tragitto degli elettroni dovrebbe restare confinato in un ambiente totalmente privo d'aria e sigillato rispetto all'atmosfera circostante.

Per fare l'esperimento più bello c'è un altro punto importante da tenere in considerazione. Nel descriverlo concettualmente (Capitolo 5), abbiamo immaginato di inviare un solo elettrone alla volta verso le fenditure e di poter al tempo stesso *visualizzare* il suo impatto sul rivelatore. Sono *entrambe* queste condizioni che permettono di evidenziare il mistero di cui parla Feynman.

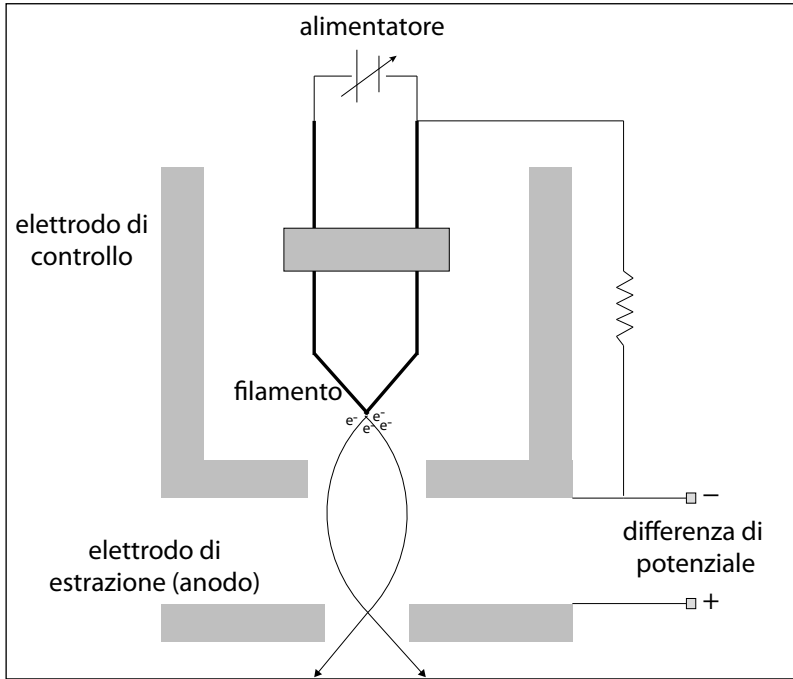


Figura 6.2 Schema di una tipica sorgente di elettroni in un microscopio elettronico (il disegno va pensato come sezione longitudinale di un oggetto che nella realtà ha la forma di un cilindro, per cui, ad esempio, l'elettrodo di estrazione è un disco circolare con un foro al centro). Il filamento (di solito un sottile filo di tungsteno) viene riscaldato fino a temperature comprese tra 1500 e 2500 gradi centigradi dalla corrente fornita da un alimentatore. A queste temperature gli elettroni acquisiscono un'energia sufficiente per superare la barriera di energia che li tiene confinati dentro il materiale e uscire nello spazio vuoto circostante. Ricordiamo che per poter percorrere lunghe distanze gli elettroni hanno bisogno di muoversi in un ambiente *vuoto*. Molto più leggeri delle molecole presenti nell'aria, gli elettroni, infatti, perderebbero rapidamente tutta la propria energia negli urti con queste ultime, fermandosi dopo aver percorso una distanza di soli pochi millimetri. Tra il filamento e l'elettrodo di estrazione (anodo) viene applicata una differenza di potenziale, in genere alcune migliaia di volt, con la polarità positiva sull'anodo, in modo da poter attirare e accelerare gli elettroni fuoriusciti dal filamento. L'elettrodo di controllo ha diverse funzioni, tra cui quella di favorire la stabilizzazione della corrente di emissione e di fornire una prima focalizzazione degli elettroni estratti.

Il fatto che l'arrivo di un elettrone dia origine a un puntino, come ci aspettiamo da una particella, mentre tanti puntini si distribuiscono in strisce di interferenza, come ci aspetteremmo da un'onda, ci mette infatti di fronte alla sorprendente contraddizione così difficile da razionalizzare. Perdiamo ancora un po' di tempo per capire bene l'importanza di questo punto.

Supponiamo di poter emettere un solo elettrone alla volta, ma di non avere uno strumento abbastanza sensibile da rivelarlo alla fine del suo percorso. Se non possiamo visualizzare il singolo impatto sul rivelatore, chi ci dice che un elettrone, al posto del puntino luminoso, non produca invece una debolissima figura di interferenza? La intensa figura a strisce che si vede dopo l'arrivo di tantissimi elettroni potrebbe quindi essere la somma di tante figure a strisce molto deboli, ciascuna dovuta a un solo elettrone. Se così fosse, potremmo dire che la natura ondulatoria si manifesta già nel singolo elettrone e quindi che questo si comporta a tutti gli effetti come onda. Per quanto inattesa, la scoperta sarebbe tuttavia meno sorprendente di quella che l'elettrone si comporta *sia* come particella *sia* come onda!

Tutto il precedente ragionamento vale anche per i fotoni. Dagli esperimenti di Young e Fresnel, infatti, in cui si vedevano le frange prodotte dall'accumulo di un numero enorme di fotoni, si poteva solamente concludere che la luce fosse un'onda, ma non c'era alcun indizio della sua struttura corpuscolare.

Ecco dunque perché, per riprodurre l'esperimento descritto da Einstein e Feynman e toccare con mano l'essenza del mistero quantistico, è indispensabile disporre di un sistema di rivelazione capace di identificare l'impatto dei singoli elettroni/fotoni.

Nel caso dei fotoni abbiamo visto che il problema più difficile da risolvere non fu tanto quello della sensibilità del rivelatore (rivelatori abbastanza sensibili di luce esistevano già alla metà del secolo scorso) ma piuttosto quello di realizzare una sorgente che emettesse un solo fotone alla volta.

Fortunatamente questo problema non sussiste per gli elettroni. Mentre i fotoni, infatti, sono soggetti al fenomeno fisico del *bunching*, gli elettroni sono soggetti a quello opposto dell'*anti-bunching*, che interessa le particelle facenti parte della classe dei cosiddetti *fermioni*. In parole povere ciò significa che, a differenza dei fotoni, non amano stare uno vicino all'altro. Al contrario, tendono a mantenere una distanza tra loro più grande di quella che

avrebbero se fossero emessi in modo del tutto casuale. Usando un fascio molto debole, tale cioè che la distanza media calcolata tra un elettrone e il successivo è molto più grande della distanza tra sorgente e rivelatore, saremo ragionevolmente certi che in massima parte gli elettroni compiono il loro tragitto da soli.

6.3 Interferenza di molti elettroni

Il primo passo importante sulla strada dell'esperimento più bello fu quello di mettere a punto un sistema sperimentale capace di realizzare l'interferenza di *molti* elettroni. Questo significava produrre frange che, per la scarsa sensibilità dei sistemi di rivelazione (si trattava essenzialmente di lastre fotografiche), si rendevano visibili solo dopo l'arrivo di un numero enorme di elettroni. Benché non fosse quindi possibile osservare le tracce dell'impatto dei singoli elettroni, queste esperienze furono comunque molto importanti, poiché dimostrarono che era possibile aggirare la difficoltà del "troppo piccolo", invocata da Feynman, e prepararono così la strada alla interferenza di elettroni singoli vera e propria.

6.3.1 I pionieri dell'interferenza elettronica

Il primo esperimento documentato dalla letteratura scientifica risale al 1953 e venne effettuato negli Stati Uniti da L. Marton e collaboratori. Esso rappresenta un caso unico tra quelli che vedremo nel seguito. Per realizzarlo Marton non utilizzò le fenditure, ma inventò l'equivalente di un interferometro Mach-Zehnder per elettroni.

L'interferometro, schematizzato nella Figura 6.3, è costituito da tre lamine ultra-sottili (circa 10 nanometri di spessore) di materiale cristallino, perfettamente parallele tra loro. Un fascio elettronico che incide su una lamina di questo tipo la attraversa, subendo diffrazione da parte dei piani atomici del cristallo. Il fascio si fraziona in diversi fasci che, all'uscita dalla lamella, prendono direzioni diverse. Come illustrato nella figura, per osservare l'interferenza si va a guardare a valle della terza lamella, nella posizione dove due dei fasci separati dalla prima lamella si sovrappongono.

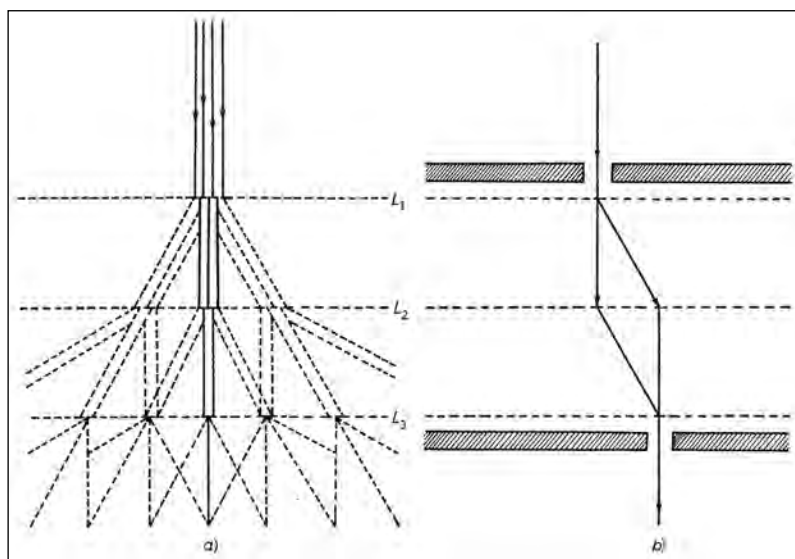


Figura 6.3 Sezione schematica dell'interferometro per elettroni di Marton. Un fascio di elettroni, proveniente dall'alto della figura, viene inviato attraverso un sistema composto di tre lamelle molto sottili (L_1 , L_2 e L_3) di materiale cristallino, perfettamente parallele tra loro. Ogni volta che gli elettroni attraversano una lamella, il fascio viene in parte trasmesso senza subire deviazioni, in parte diffratto a un certo angolo. Posizionando in modo opportuno uno schermo con una piccola apertura a valle delle tre lamelle, come schematizzato nella parte destra della figura, si può selezionare la posizione dove due fasci separati dalla prima lamella tornano a sovrapporsi, dopo aver subito ciascuno un processo di diffrazione e due di trasmissione. Questi due fasci sovrapposti formano la figura di interferenza. (Figura comparsa originariamente nel lavoro di Marton del 1952 e riprodotta nell'articolo di Merli, Missiroli e Pozzi sul *Giornale di Fisica*, vol. 15, settembre 1974, p. 83.)

L'esperimento fu condotto all'interno di un *microscopio elettronico in trasmissione*, strumento che occupa un ruolo molto importante nella storia dell'esperimento più bello e sul quale torneremo tra breve. Per registrare le frange venne usata una lastra fotografica sensibile agli elettroni. La realizzazione dell'esperimento fu estremamente complessa e le immagini di interferenza ottenute non particolarmente nitide. A causa di varie difficoltà sperimentali, prima tra tutte quella di mantenere un parallelismo estremamente accurato tra le lamine, esso fu fatto una volta sola e mai più ripetuto in seguito. L'ingegnosa idea di costruire un in-

terferometro usando dei cristalli ebbe comunque grande fortuna e diventò successivamente il metodo standard per costruire interferometri di raggi X e neutroni.

Il primo semplice esperimento di interferenza di molti elettroni “alla Young” fu condotto nel 1957 e si deve a due ricercatori francesi dell’Università di Tolosa, J. Faget e C. Fert. Essi utilizzarono un sottile strato di materiale colloidale ricoperto di metallo sul quale erano presenti fori, distribuiti casualmente e di dimensioni variabili. Ne andarono a cercare due del diametro di circa un micrometro, distanti tra loro circa due micrometri e puntarono lì il fascio elettronico. Osservarono in questo modo la formazione di frange di interferenza e ne registrarono l’immagine su una lastra fotografica. Non si può dire che questa immagine fosse spettacolare: le frange erano appena visibili, molto irregolari nella forma e sovrapposte all’immagine sfocata dei due fori. Ma, nonostante questi limiti tecnici, dovuti alla irregolarità dei fori e alle caratteristiche non ottimali della sorgente elettronica utilizzata, l’esperimento fu il primo esempio di interferenza di elettroni ottenuta con il metodo di Young. In una nota in appendice a uno degli articoli di Faget e Fert, Louis de Broglie in persona si complimenta con il direttore del laboratorio di Tolosa per i brillanti risultati ottenuti dai due ricercatori.

I lettori attenti avranno notato che la distanza tra i fori e il loro diametro erano parecchio più grandi della lunghezza d’onda degli elettroni. Come fu dunque possibile, nello spazio di alcune decine di centimetri, ingrandire la figura di interferenza perché fosse visibile a occhio nudo sulla lastra? In precedenza abbiamo detto che sarebbero necessarie parecchie decine di metri di separazione tra i fori e lo schermo rivelatore. Dove sta il trucco?

6.3.2 Lenti per elettroni e il microscopio elettronico

Nello schema dell’esperimento concettuale, tra sorgente e fenditure e tra fenditure e schermo rivelatore, non c’è in mezzo nulla. Se consideriamo l’apparato sperimentale utilizzato da Faget e Fert, in queste due zone troviamo invece delle *lenti elettroniche*. Questi dispositivi generano campi elettrici o magnetici sul percorso degli elettroni, esercitando una forza su di essi che ne modifica il percorso. Modellando forma e intensità di questi campi si può farli

funzionare come vere e proprie lenti, analoghe alle lenti di vetro nell'ottica della luce. Nella Figura 6.4 abbiamo riportato lo schema semplificato di una lente elettronica magnetica. Una disciplina, l'*ottica elettronica*, spiega come progettare e mettere assieme sorgenti elettroniche, lenti elettroniche e altri dispositivi *elettro-ottici*, per costruire strumenti, come per esempio un microscopio elettronico², che, usando elettroni al posto della luce, funzionano in modo analogo agli strumenti ottici tradizionali.

La Figura 6.5 schematizza come è possibile effettuare un'esperienza di interferenza di elettroni in un microscopio elettronico.

Un sistema di lenti, posto tra la sorgente di elettroni e le fenditure, crea un'immagine molto rimpicciolita (diametro di alcune decine di nanometri) della punta del filamento. Le sue dimensioni, molto inferiori alla lunghezza di coerenza, fanno sì che questa immagine funzioni da sorgente coerente per illuminare le fenditure.

Un altro sistema di lenti elettroniche, posto tra le fenditure e il rivelatore, è in grado di proiettare a poche decine di centimetri dalle fenditure un'immagine della figura di interferenza fortemente ingrandita, fino al punto da renderla visibile a occhio nudo.

L'utilizzo delle lenti elettroniche rappresenta quindi il primo fondamentale passo per la realizzazione in laboratorio dell'esperienza più bella della fisica, consentendo di aggirare la difficoltà del "troppo piccolo", sollevata da Feynman.

-
- 2 Il microscopio elettronico di cui parliamo qui è quello detto "in trasmissione" (indicato dall'acronimo TEM: *Transmission Electron Microscope*). In un TEM i preparati da osservare sono pellicole di materiale, assottigliate fino a spessori di poche decine di nanometri, che gli elettroni attraversano perdendo solo una piccola parte della loro energia. L'immagine si forma con gli elettroni che hanno attraversato la pellicola dopo aver interagito in vari modi con il materiale che la compone. Con un sistema di lenti elettromagnetiche, l'immagine viene ingrandita fino a diverse centinaia di migliaia di volte e visualizzata su un rivelatore. La più piccola distanza tra due particolari (per esempio due atomi) che è possibile distinguere nell'immagine (detta *potere risolutivo* del microscopio), è tanto più piccola quanto più piccola è la lunghezza d'onda della radiazione che usiamo. Da qui il vantaggio del microscopio elettronico, il quale permette di osservare dettagli di dimensioni inferiori al nanometro, ben oltre le potenzialità del più potente microscopio ottico. L'energia degli elettroni utilizzati in un TEM varia da circa 100.000 a 300.000 elettronvolt (che significa accelerati da una differenza di potenziale di 100.000a/300.000 volt). Dalla relazione di de Broglie, ricaviamo quindi che la loro lunghezza d'onda è compresa nell'intervallo da circa 2 a 4 centesimi di nanometro.

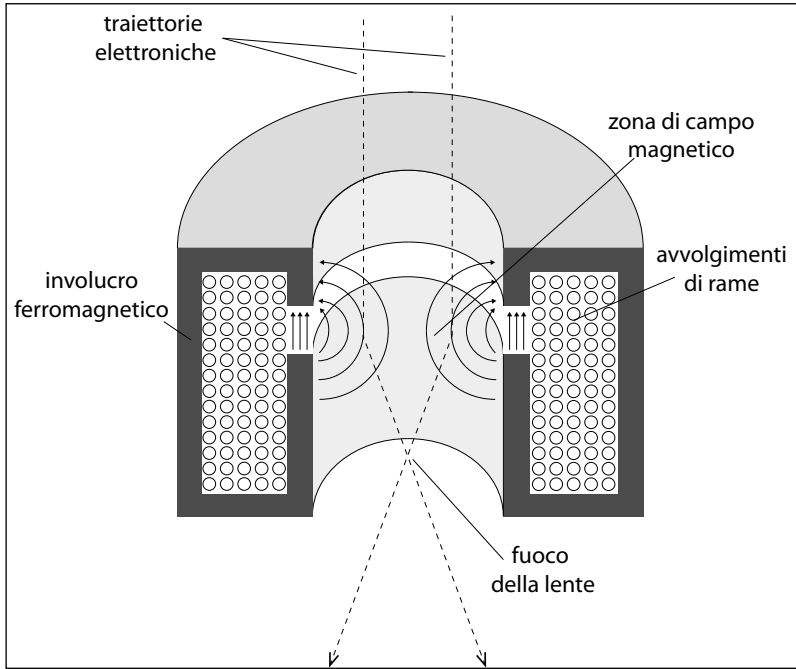


Figura 6.4 Sezione schematica di una lente per elettroni. La lente è in pratica un cilindro corto, con un'anima centrale vuota. Gli elettroni viaggiano nella regione vuota. Nella parte piena della lente è contenuto un filo di rame che gira attorno al corpo centrale, avvolto in numerose spire circolari (viste in sezione nello schema). Nel filo circola una intensa corrente elettrica che magnetizza l'involucro della lente, costituito di materiale *ferromagnetico*. L'involucro non è completamente chiuso attorno agli avvolgimenti, ma è interrotto lungo un anello nella parte che si affaccia verso l'interno. In questo modo il campo magnetico può fuoriuscire dall'involucro ed estendersi nello spazio dove passano gli elettroni. Le traiettorie di questi ultimi sono deviate dal campo magnetico. Data la simmetria della lente e del campo che essa produce, gli elettroni tendono tutti a essere deviati verso l'asse centrale. Si può dimostrare che traiettorie che entrano parallele nella lente tenderanno a essere *focalizzate* in un unico punto. Questa e altre proprietà delle lenti elettroniche fanno sì che esse svolgano per gli elettroni una funzione analoga a quella che le normali lenti ottiche svolgono per la luce.

Il prezzo da pagare è un'inevitabile complicazione dell'esperimento reale rispetto a quello concettuale. D'altronde, nel modo così semplice come Einstein e Feynman l'avevano schematizzato, l'esperimento sarebbe risultato estremamente arduo da realizzare.

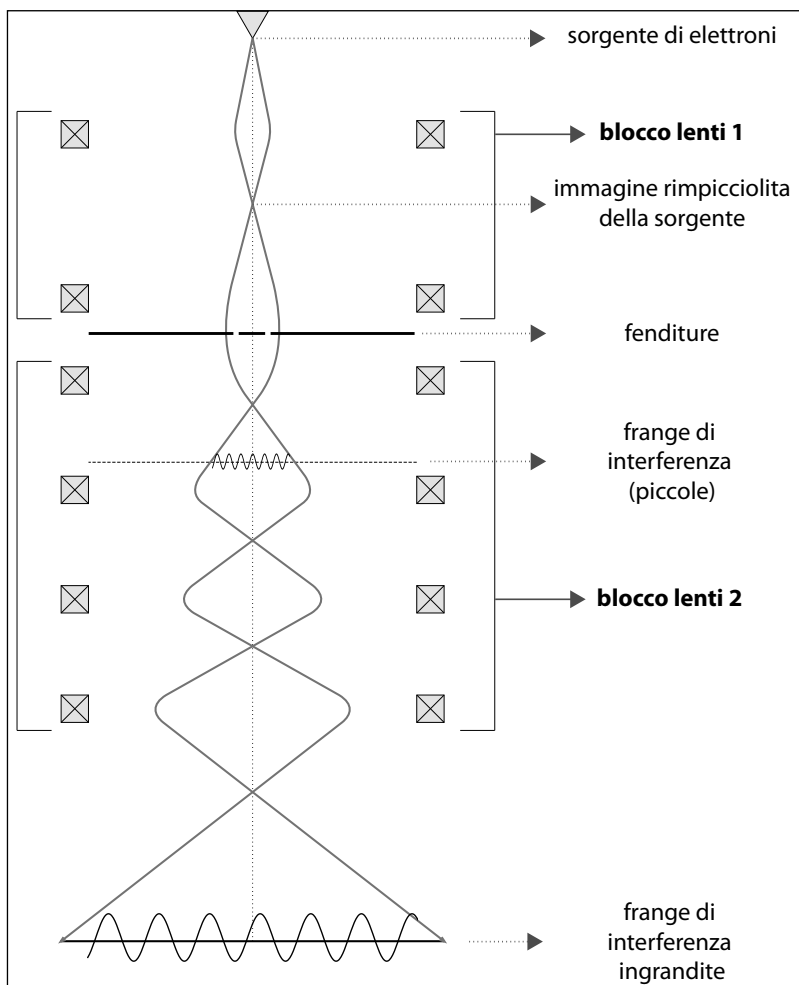


Figura 6.5 Spaccato schematico di un microscopio elettronico in trasmissione. Il punto dove sono posizionate le due fenditure è quello in cui di norma sono messi i preparati da osservare. Ogni lente elettronica è rappresentata da una coppia di quadratini posto uno a destra e uno a sinistra dell'asse centrale del disegno. Lungo l'asse centrale del microscopio passa il fascio elettronico, il cui profilo è schematizzato dalle due linee leggermente più chiare che partono dalla punta della sorgente e arrivano al rivelatore, posto in basso nella figura. Le lenti focalizzano il fascio. Nello schema l'effetto delle focalizzazioni successive è illustrato dal fatto che il profilo del fascio si allarga e si stringe alternativamente in vari punti del suo percorso dalla sorgente, attraverso le fenditure, fino al rivelatore. In un microscopio elettronico ci sono molte lenti e ciascuna di esse svolge una funzione particolare.

6.3.3 Le fenditure di Jönsson

Torniamo ora alla cronaca degli eventi, facendo un breve salto in avanti, al 1959. Qui ci imbattiamo in un altro esperimento con le fenditure, condotto presso l'Università tedesca di Tübingen da un giovane dottorando, Carl Jönsson, sotto la direzione di Gottfried Möllenstedt (1913-1997).

Jönsson usò tecniche di microincisione molto avanzate per il suo tempo, simili a quelle che vengono ancora oggi utilizzate per la fabbricazione dei microchip. Su un sottilissimo foglio di rame riuscì a ritagliare fenditure con bordi regolari, larghe pochi decimi di micrometro e distanti tra loro 2 micrometri. Ne produsse serie di due, tre, quattro e cinque vicine, per realizzare esperimenti di interferenza con due (e anche più) fenditure. Gli esperimenti furono condotti usando un sistema simile a quello della Figura 6.5. Non si trattava in realtà di un microscopio elettronico, ma di un prototipo costruito appositamente per gli esperimenti di interferenza. L'esperimento di Jönsson, in quanto ad accuratezza tecnica, controllo delle condizioni sperimentali e qualità delle figure di interferenza ottenute, rappresentò un notevole passo avanti rispetto al precedente esperimento di Faget e Fert.

6.3.4 Come semplificarsi la vita, ovvero l'invenzione del biprisma elettronico

Nel 1956, a Tübingen, tre anni prima dell'esperimento di Jönsson, G. Möllenstedt e H. Düker avevano inventato uno speciale dispositivo elettro-ottico: il *biprisma elettronico*. Il dispositivo funziona per gli elettroni come un *biprisma ottico* funziona per la luce. Vediamo di che si tratta.

Il biprisma ottico, utilizzato per primo da Fresnel, è composto da due prismi di vetro uguali, con sezione a triangolo rettangolo, attaccati tra loro lungo una base. Le cose funzionano come illustrato schematicamente nella parte sinistra della Figura 6.6. Una sorgente di luce S illumina il biprisma. La rifrazione, prodotta dalle due superfici diversamente inclinate, devia una verso l'altra le due parti del fascio che incidono sulle due metà del biprisma. Come conseguenza, esse si sovrappongono parzialmente al centro,

producendo frange di interferenza su uno schermo posto a una certa distanza dal biprisma.

Se dallo schermo prolunghiamo all'indietro le direzioni dei raggi luminosi rifratti dal biprisma, quelli deviati da una delle due metà si incontrano in un punto diverso da quelli deviati dall'altra metà. Nei due punti di incontro si trovano due immagini (V_1 e V_2 nella figura) della sorgente primaria³. Tutto avviene come se fossero quelle le sorgenti secondarie da cui provengono in linea diretta i fasci che interferiscono. Le immagini che il biprisma forma, "sdoppiando" otticamente la sorgente reale, svolgono quindi la stessa funzione delle due fenditure dell'esperimento di Young.

Il *biprisma elettronico* (Figura 6.6, a destra) è un dispositivo semplice e ingegnoso, costituito da un filo molto sottile conduttore di elettricità, posto trasversalmente alla direzione di propagazione del fascio elettronico, e collegato ad un generatore di potenziale elettrico. Applicandogli un potenziale positivo, esso genera un campo che devia una verso l'altra le porzioni del fascio che passano dai due lati del filo. Anche qui si formano due sorgenti-immagine e una zona di sovrapposizione sul rivelatore, al cui interno si osserva la figura di interferenza.

A questo punto possiamo pensare di sostituire un biprisma alle fenditure nell'esperimento schematizzato nella Figura 6.5. La sorgente, che viene "sdoppiata" in copie virtuali, è qui l'immagine reale della punta del filamento, rimpicciolita fino a dimensioni di pochi nanometri dalle lenti che stanno tra la sorgente e il biprisma. Le sorgenti V_1 e V_2 avranno dunque le stesse dimensioni di quella immagine.

Non siamo ancora vicini alla lunghezza d'onda degli elettroni, ma di certo sarebbe estremamente arduo, anche con le tecnologie odierne, fabbricare fenditure tanto sottili.

Per ottenere le necessarie condizioni di coerenza, il diametro del filo del biprisma deve essere piuttosto piccolo, non più di pochi micrometri. La sua fabbricazione, pur non essendo banale, è tuttavia notevolmente più semplice di quella delle fenditure.

3 Queste immagini si definiscono "virtuali" perché rispetto alla lente (o, in questo caso, il biprisma) stanno dalla stessa parte dell'oggetto (la sorgente), a differenza di quelle cosiddette "reali" che stanno dalla parte opposta.

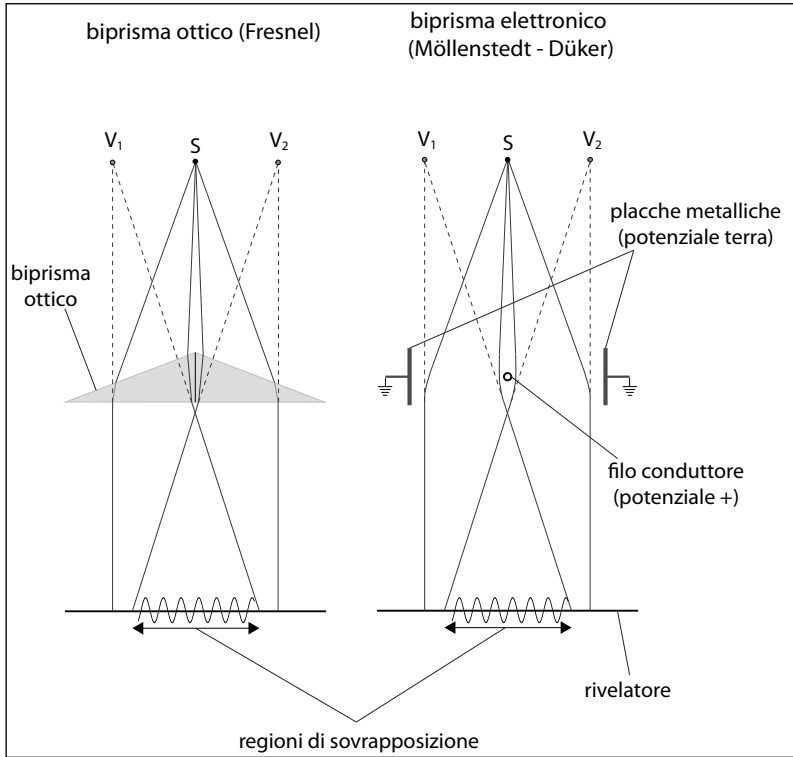


Figura 6.6 Schemi di funzionamento del biprisma ottico ed elettronico. Il biprisma di vetro funziona attraverso il meccanismo fisico della *rifrazione*, per cui la direzione di propagazione della luce cambia quando questa attraversa il confine tra due mezzi (in questo caso aria e vetro) con *indice di rifrazione* differente. Il biprisma elettronico, dal canto suo, devia gli elettroni per effetto del campo elettrico generato tra il filo a potenziale positivo e le placchette a potenziale di terra. Nello schema, che è una sezione trasversale dell'apparato, il filo è allineato lungo la linea perpendicolare alla pagina e si vede in sezione. S indica la sorgente "vera", V_1 e V_2 le immagini virtuali di S prodotte dal biprisma. Le sorgenti V_1 e V_2 svolgono la funzione delle fenditure dell'esperimento di Young. L'interferenza si osserva nelle regioni di sovrapposizione dei due fasci, che si possono pensare come provenienti in linea diretta da V_1 e V_2 .

Nei loro esperimenti, Möllenstedt e Düker usarono fili di quarzo di diametro di 3 micrometri ottenuti dalla sublimazione di vapori di quarzo, successivamente ricoperti con un sottilissimo strato di oro per renderli conduttori di elettricità.

Esperimenti simili con il biprisma furono condotti nel 1957 a Tolosa da Faget e Fert. Una particolarità da menzionare è che essi operarono in alcuni casi con una corrente di elettroni estremamente bassa. In quelle condizioni calcolarono che la distanza media tra gli elettroni che attraversavano l'apparecchiatura sperimentale era molto maggiore della distanza tra la sorgente e la lastra. Si può quindi dedurre che si trattasse già di interferenza di elettroni singoli. A questi, e a tutti gli altri esperimenti a cui abbiamo accennato fin qui, mancava però ancora un aspetto essenziale: la possibilità di visualizzare sul rivelatore l'effetto dell'impatto di ogni singolo elettrone.

6.3.5 Bologna: prime esperienze all'Istituto di Fisica

Pier Giorgio Merli e Giulio Pozzi si laurearono a Bologna alla fine degli anni Sessanta nel laboratorio di microscopia elettronica dell'Istituto di Fisica dell'Università, diretto dal Professor Ugo Valdrè. Qui incontrarono Gian Franco Missiroli, già da alcuni anni docente di Esperimentazione di Fisica.

Dopo la laurea Merli si trasferì presso il Laboratorio di Materiali e Componenti per l'Elettronica (LAMEL) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR). Con Missiroli e Pozzi continuò ad avere stretti rapporti, che si trasformarono in collaborazione ufficiale nel 1972.

Le prime esperienze di interferenza di elettroni furono intraprese all'Istituto di Fisica nel 1971 da Missiroli e Pozzi. Inizialmente la motivazione fu soprattutto didattica. Missiroli pensava che sarebbe stato molto efficace, per introdurre le proprietà ondulatorie degli elettroni ai suoi studenti, mostrare loro, dopo il classico esperimento di interferenza con la luce laser, l'analogo esperimento fatto con gli elettroni.

A Tübingen e a Tolosa erano state costruite apparecchiature con lo specifico scopo di fare esperimenti di interferenza elettronica. A Bologna Missiroli e Pozzi seguirono una strada diversa. Decisero di montare, su un normale portapreparati per il microscopio elettronico in trasmissione, un biprisma di Möllenstedt e Düker. Il filo avrebbe intercettato il fascio laddove di solito veniva messa la lamina sottile del materiale da osservare. Questa soluzione avrebbe consentito, a chiunque possedesse un microscopio elettronico

e un portapreparati opportunamente modificato, di ripetere nel proprio laboratorio le esperienze di interferenza, senza dover necessariamente costruire un'intera apparecchiatura, con sorgente di elettroni, lenti elettroniche e tutto il resto.

Il successo di questa strategia fu reso possibile dalla tradizione bolognese di eccellenza nella progettazione, costruzione e modifica di dispositivi portapreparati per il microscopio elettronico in trasmissione. Qui, nel corso degli anni, Valdrè, coadiuvato da un team di valenti tecnici, progettisti, meccanici e chimici, ne aveva realizzati parecchi modelli, ciascuno con funzionalità particolari, come ad esempio quelle di poter riscaldare il preparato, applicargli tensioni meccaniche o campi elettrici e magnetici durante l'osservazione al microscopio. Ciò rendeva possibile studiare in tempo reale l'effetto di queste sollecitazioni sulla struttura microscopica dei materiali⁴.

Un laureando, Oriano Donati, a cui si unì successivamente Giorgio Matteucci, allora tecnico di laboratorio, si occupò di mettere a punto tutti i passaggi necessari a fabbricare il biprisma. Il filo era ricavato da fibre di quarzo stirate a caldo su una fiamma, ricoperto successivamente di oro per renderlo conduttivo e incollato infine su un supporto che veniva montato su un porta-preparati.

Nella Figura 6.7 è illustrato uno dei tanti modelli equipaggiati con biprisma elettronico realizzati nel corso degli anni presso i laboratori del Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna. La Figura 6.8 mostra come viene inserito nel microscopio elettronico in trasmissione.

Nel 1972 il gruppo del Dipartimento di Fisica realizzò il suo primo esperimento di interferenza di molti elettroni utilizzando il biprisma elettronico. Esso fu presentato al congresso di Cagliari della Società Italiana di Fisica e premiato come migliore esperienza didattica dell'anno. Un resoconto fu pubblicato nel 1973 sull'*American Journal of Physics*, la prestigiosa rivista internazionale dedicata a argomenti teorici e sperimentali particolarmente rilevanti per la didattica della fisica.

4 Il team di Valdrè progettò e costruì il primo portapreparati che poteva essere inclinato attorno a due assi meccanici indipendenti, innovazione che ebbe un'importanza notevole nell'evoluzione della microscopia elettronica, facilitando notevolmente lo studio della struttura dei materiali cristallini.

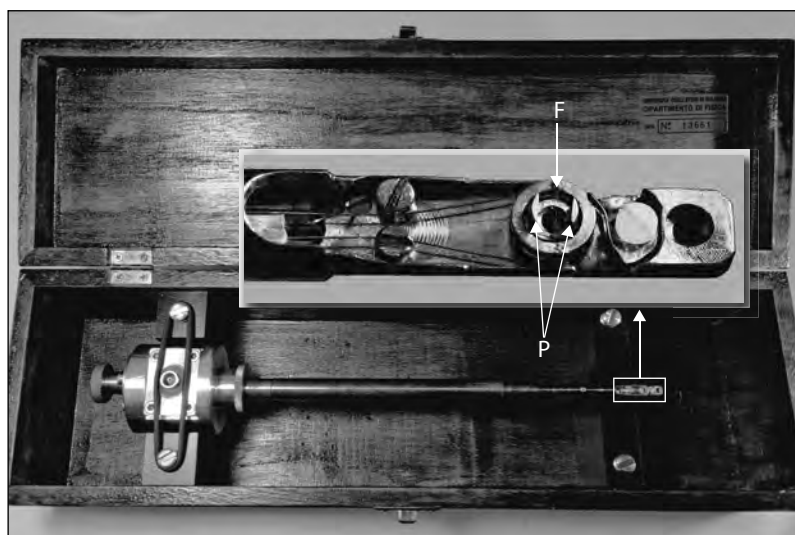


Figura 6.7 Dispositivo portapreparati per microscopio elettronico in trasmissione, in cui, nella posizione dove di solito viene posto il preparato da osservare, c'è un biprisma elettronico di Möllenstedt e Düker. I dettagli di quest'ultimo sono visibili nell'immagine ingrandita: *F* indica il filo metallico, che durante un esperimento di interferenza di elettroni viene mantenuto a potenziale elettrico positivo, *P* le due placchette che sono invece tenute al potenziale di terra. Il portapreparati mostrato in figura è stato realizzato presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna, e si trova attualmente in carico all'Istituto IMM (ex LAMEL) del CNR.

6.4 Interferenza di elettroni singoli

Come Faget e Fert nel loro articolo del 1957, Donati, Missiroli e Pozzi riportarono sull'*American Journal of Physics* un semplice calcolo, dal quale risultava che, data la debole intensità del fascio utilizzato, la distanza che in media separava un elettrone dal successivo era circa 200 metri.

Sul percorso dalla sorgente alla lastra doveva quindi essere presente un solo elettrone alla volta. Anche qui, però, sulla lastra fotografica, esposta e sviluppata, si vedeva la figura a strisce continue prodotta da tantissimi elettroni, ma non le tracce dovute all'impatto dei singoli elettroni. Per riuscire a visualizzare queste ultime e compiere quindi il passo che avrebbe completato la realizzazione

dell'esperimento di Einstein-Feynman, sarebbe servito un rivelatore di tipo diverso, molto più sensibile di una lastra fotografica.

Intanto, nel 1972 era stata ufficializzata la collaborazione con Pier Giorgio Merli e con il laboratorio CNR-LAMEL che, nel frattempo, aveva acquistato un microscopio elettronico di ultima generazione: il Siemens Emiskop 101.



Figura 6.8 Operazione di inserimento di un portapreparati, come quello della Figura 6.7, all'interno del microscopio elettronico in trasmissione.

6.4.1 La collaborazione Istituto di Fisica – CNR-LAMEL

Un motivo che accomunava Missiroli, Pozzi e Merli nell'interesse per l'interferenza di elettroni era la possibilità di sfruttare questo fenomeno per studiare alcune particolari proprietà dei materiali, non accessibili alle osservazioni con la microscopia elettronica "standard".

Per esempio, all'interno di un materiale si possono trovare campi elettrici o magnetici, che sono invisibili con le tecniche usuali di osservazione. Questi campi producono però un cambiamento nella fase di un'onda elettronica che li attraversa. Ciò offre

la possibilità di renderli visibili e ricavare informazioni sulle loro proprietà, utilizzando proprio l'interferenza di elettroni.

In parole semplici, la microscopia elettronica cosiddetta "interferenziale" funziona come segue. Supponiamo di separare il fascio in due, con un biprisma, o due fenditure, oppure un interferometro come quello di Marton. Uno dei fasci attraversa un sottile preparato di materiale al cui interno è presente, per esempio, una zona di campo elettrico. Gli elettroni che attraversano questa zona avranno la fase modificata in funzione dell'intensità e dell'estensione del campo che hanno attraversato.

Tutto il fascio che ha attraversato il preparato viene poi portato a sovrapporsi sul rivelatore con l'altro fascio, detto "di riferimento", che invece non ha attraversato il campione e quindi ha mantenuto dappertutto la sua fase inalterata. Nella figura di interferenza che risulta si vedranno frange regolari laddove si sovrappongono elettroni dell'uno e dell'altro fascio che hanno mantenuto la stessa fase, o che al più hanno subito una variazione costante della fase. Ma nella zona dove si sovrappongono il fascio di riferimento e gli elettroni che hanno avuto la fase modificata dall'attraversamento del campo, le frange saranno distorte. Questa distorsione, misurata e decodificata in modo opportuno, permette di risalire alle proprietà del campo. Un esempio di come appare un interferogramma elettronico è visibile nella Figura 6.9.

Le prime esperienze di interferometria elettronica condotte da Pozzi e Missiroli riguardarono l'osservazione di micro-campi magnetici in materiali metallici. Con la collaborazione tra Istituto di Fisica e CNR-LAMEL, l'attività venne estesa allo studio di campi elettrici nei dispositivi al silicio che il CNR-LAMEL iniziava a fabbricare nei suoi laboratori di tecnologia microelettronica. I primi risultati di questa collaborazione furono pubblicati da Merli, Missiroli e Pozzi nel 1973.

Le promettenti applicazioni dell'interferometria elettronica alla scienza dei materiali furono dunque un'altra motivazione fondamentale, accanto a quella didattica, che spinse i tre ricercatori alla realizzazione dell'esperimento più bello della fisica.

Non meno importanti tra le motivazioni furono la curiosità e la passione per la fisica. La meccanica quantistica, con i suoi misteri e le sue sfide intellettuali, esercitava un grande fascino sui tre ricercatori.

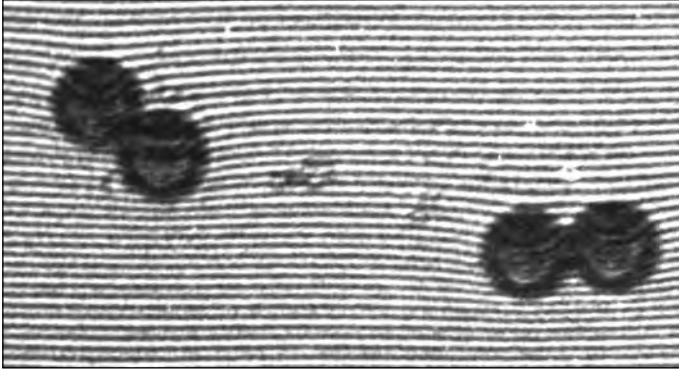


Figura 6.9 Interferogramma elettronico ottenuto da piccole particelle di latex (diametro 0,3 micrometri), elettricamente cariche, appoggiate su un sottile supporto di carbonio. Le frange sono dritte e regolari dove il fascio di riferimento (che non ha attraversato il preparato) interferisce con elettroni che hanno attraversato il preparato, ma lontano dalle particelle. Le frange sono invece curvate dove il fascio di riferimento interferisce con elettroni che hanno attraversato la zona del campo elettrico prodotto dalle particelle. L'intensità di quest'ultimo si può calcolare dalla curvatura delle frange distorte. *(Immagine di Andrea Migliori)*

Merli in particolare, che aveva seguito il famoso corso di Fisica Teorica del Prof. Ferretti, si era appassionato fin da studente a quegli aspetti di interpretazione della teoria quantistica che, come vedremo meglio nel prossimo capitolo, trovano un terreno di discussione privilegiato proprio nell'esperimento di interferenza di elettroni singoli.

6.4.2 Il rivelatore di elettroni singoli

A questo punto è necessario un breve *flashback*, che ci riporta per un momento al 1970. In quell'anno Merli e Pozzi, freschi di laurea, si recarono a una scuola internazionale di microscopia elettronica, diretta da Valdrè, che si svolse nel famoso centro E. Majorana di Erice⁵. Uno dei docenti della scuola fu K.-H. Hermann, ingegnere tedesco della Siemens, l'azienda che negli anni Trenta aveva per

⁵ Prestigioso centro, sede di importanti scuole internazionali di fisica, fondato e diretto da Antonino Zichichi.

prima commercializzato i microscopi elettronici. Nella sua lezione Hermann mostrò un dispositivo che aveva da poco messo a punto. Si trattava di un rivelatore in grado di amplificare il segnale prodotto dall'impatto di un singolo elettrone sulla sua superficie, visualizzandolo come punto luminoso su uno schermo a raggi catodici. Come caso illustrativo per dimostrarne il funzionamento, Hermann mostrò la figura di diffrazione che si formava per effetto del passaggio di un fascio di elettroni attraverso un foro molto piccolo. Nei fotogrammi pubblicati sugli atti della scuola, si distinguono i puntini luminosi che, accumulandosi, formano una figura nella quale si riconoscono zone concentriche chiare e scure alternate, tipiche del fenomeno della diffrazione dal bordo del foro. Si tratta a tutti gli effetti del primo caso di esperimento di diffrazione in cui vengono visualizzati gli eventi dovuti ai singoli elettroni.

Considerando gli eventi a posteriori, il passo da un esperimento di diffrazione di elettroni singoli prodotti da un solo foro, a uno di interferenza vera e propria (con due fori, fenditure, o con il biprisma) era a quel punto breve e ci si deve forse meravigliare del fatto che nessuno lo fece. In quegli anni c'erano già alcuni laboratori che disponevano di sistemi per realizzare esperienze di interferenza di elettroni. Lì si sarebbe potuto, usando il dispositivo di Hermann, fare immediatamente quello che i bolognesi avrebbero fatto qualche anno più tardi. Ma ciò non avvenne.

6.4.3 Colpo di fortuna

Nel 1974 il microscopio Siemens Elmiskop 101 del CNR-LAMEL era attrezzato e calibrato per le esperienze di interferenza. Nonostante ciò, non sarebbe stato realistico pensare di acquistare uno strumento costoso come il rivelatore di Hermann solo per fare un bell'esperimento di fisica fondamentale.

Caso volle che il laboratorio di microscopia elettronica dell'Istituto di Anatomia Umana dell'Università di Milano, diretto dal Professor Angelo Bairati, ne acquistasse un esemplare⁶ e lo instal-

6 Quel tipo di rivelatore consentiva di ottenere immagini con flussi elettronici molto bassi, cosa di particolare utilità nell'osservazione di campioni medico-biologici, che tendono facilmente a deteriorarsi se soggetti a irraggiamento elettronico prolungato.

lasse su uno dei microscopi elettronici che aveva in dotazione, dello stesso identico modello di quello del CNR-LAMEL.

Merli colse al volo la possibilità che si apriva con questa fortunata coincidenza e propose a Missiroli e Pozzi di imbarcarsi nell'ultimo passo dell'impresa: chiedere cioè a Bairati di poter utilizzare il microscopio elettronico del suo laboratorio e recarsi là, con il biprisma messo a punto a Bologna, per completare l'esperimento di interferenza di elettroni singoli.

Merli fu molto determinato nel perseguire questo obiettivo. Giovane ricercatore quale egli era, non ebbe né timori né esitazioni a contattare il più anziano e titolato Bairati e a proporgli il progetto. E Bairati, verosimilmente convinto dall'entusiasmo di Merli, concesse l'uso del suo laboratorio.

Dario Nobili, responsabile del gruppo di ricerca di cui Merli faceva parte, e Antonio Laghi, allora direttore del CNR-LAMEL, manifestarono interesse per il progetto e, dando prova di ampiezza di vedute e sensibilità culturale, sostennero l'iniziativa con i fondi del laboratorio. Un tale sostegno non era affatto scontato. L'interferenza di elettroni singoli era infatti un esperimento sicuramente bello e interessante, ma di tipo fondamentale, e poteva apparire piuttosto lontano dalle attività istituzionali di ricerca del CNR-LAMEL, centrate sui dispositivi microelettronici al silicio.

6.4.4 “Interferenza di elettroni”: l'esperimento e il film

A quell'epoca collaborava con il CNR-LAMEL Lucio Morettini, un ricercatore che aveva da poco iniziato a occuparsi di cinematografia scientifica. Merli gli chiese di collaborare per filmare il risultato dell'esperimento di interferenza di elettroni. Quello che ci si aspettava di vedere era la formazione della figura a frange per effetto dell'accumulo di singoli puntini luminosi. La ripresa cinematografica avrebbe potuto catturare in tempo reale l'evoluzione del fenomeno. Sarebbe stato il modo più efficace di mostrare il risultato dell'esperimento, anziché mettere una dietro l'altra una serie di immagini scattate con una macchina fotografica. Le tecnologie digitali di oggi renderebbero ovvia e di facile realizzazione la documentazione video di un esperimento del genere, ma allora le apparecchiature necessarie e le competenze per usarle non erano alla portata di tutti. Le sequenze che furono filmate costarono per-

ciò molto lavoro e molta pazienza agli sperimentatori bolognesi, e non si sarebbero potute ottenere senza la collaborazione di un esperto di cinematografia come Morettini.

Ma ne valse la pena. Le sequenze filmate mostrarono in modo evidente il fenomeno, a partire dalle condizioni in cui sullo schermo del rivelatore si vedevano uno o pochi punti luminosi, distribuiti in modo apparentemente casuale, fino alla situazione in cui se ne potevano vedere un migliaio, chiaramente distribuiti nelle frange di interferenza. Per la prima volta in un esperimento di interferenza era possibile distinguere i segnali dei singoli elettroni, caratteristici di un comportamento da particelle e, al tempo stesso, si poteva vedere come questi formassero una distribuzione tipica dell'interferenza delle onde.

Di queste belle riprese solamente 6 fotogrammi scelti comparvero sull'articolo che venne pubblicato dall'*American Journal of Physics* nel 1976.

Si pose dunque il problema di come valorizzare le riprese di Morettini. A ragionare su questo, oltre Merli, Missiroli, Pozzi e, ovviamente, Morettini stesso, si aggiunse anche Nobili. Nobili era convinto che la ricerca avesse come compito importante anche quello di sviluppare il linguaggio e i mezzi per comunicare alla società i propri risultati. Per questo motivo vedeva con grande favore la creazione di un gruppo di Cinematografia Scientifica all'interno del CNR-LAMEL.

Il materiale filmato dell'esperimento di interferenza di elettroni singoli rappresentava un nucleo attorno al quale si poteva costruire un vero e proprio documentario scientifico, che facesse conoscere questo esperimento chiave a un pubblico molto più ampio dei lettori di riviste scientifiche come l'*American Journal of Physics*.

La realizzazione di un documentario breve, simile nello stile e negli intenti ai famosi documentari americani del PSSC (Physical Science Study Committee)⁷, rispondeva in pieno alla motivazione didattica che qualche anno prima all'Istituto di Fisica aveva mosso l'interesse per l'interferenza di elettroni. L'esperimento era di complessa realizzazione e non si poteva certo pensare di farlo ripetere direttamente agli studenti durante il corso. Il filmato, proiettato

7 Serie di documentari didattici realizzati negli Stati Uniti, su temi di fisica generale, molto utilizzati negli anni Sessanta e Settanta nelle scuole e nelle università.

durante una lezione, poteva perciò funzionare come valido sostitutivo dell'esperienza di laboratorio.

Nacque in questo modo il film *Interferenza di elettroni*, della durata di circa 14 minuti. Gli autori (Merli, Missiroli e Pozzi, Nobili e Morettini) furono coadiuvati nella realizzazione da molte altre persone: Renato Angelucci, Leonello Dori, Riccardo Lotti, Arturo Maggi, Ivano Vecchi (tecnici CNR-LAMEL), Giorgio Matteucci (all'epoca tecnico dell'Istituto di Fisica), Giovanni Boninsegna e Diego Vergonbello (ingegneri della Siemens SpA) e infine Angelo e Aurelio Bairati (Professori dell'Istituto di Anatomia Umana dell'Università di Milano). Il film fu realizzato tra il 1974 e il 1975, in cascata alla realizzazione dell'esperimento, e vide la luce all'inizio del 1976. Dopo un primo riscontro non particolarmente brillante a un festival di cinematografia scientifica italiano, dove i selezionatori non ne compresero l'importanza, il film ebbe un importante successo, vincendo il primo premio per la fisica al festival internazionale del cinema scientifico di Bruxelles del settembre 1976.

Non ci dilungheremo oltre sul film e sulla sua storia: i lettori potranno trovare materiale e link nella sezione "Riferimenti e approfondimenti". A tanti anni di distanza si può comunque affermare che il film abbia prodotto alcuni risultati importanti.

In primo luogo, fare conoscere l'esperimento di interferenza di elettroni singoli, dandogli quindi popolarità e quindi anche maggiore possibilità di essere votato nella classifica del *Physics World*. Ricordiamo che in quella classifica si trova a confronto con grandi esperimenti "classici", condotti da scienziati famosissimi, che posseggono tutti una notorietà sicuramente più ampia.

In secondo luogo, come vedremo tra breve, il film fu, ancora più della pubblicazione sull'*American Journal of Physics*, un riferimento importante che consentì a Merli, Missiroli e Pozzi di essere riconosciuti come gli autori della prima esperienza di interferenza di singoli elettroni.

Ma quello che ha più importanza, nonostante siano passati più di 35 anni dalla sua realizzazione, è che il film sia ancora considerato uno strumento didattico attuale, utilizzato nei corsi introduttivi alla meccanica quantistica, sia negli ultimi anni delle scuole superiori che in molti corsi universitari di Fisica⁸.

8 Nel 2004 il film è stato inserito in una raccolta in DVD, edita da Zanichelli, insieme con tutti i prestigiosi documentari didattici del PSSC. Nel 2011, dopo rimasterizzazione digitale da pellicola curata dalla Cineteca di Bologna, *Interferenza di*

6.4.5 Gli esperimenti successivi

Altri esperimenti, simili a quello di Merli, Missiroli e Pozzi, furono condotti negli anni successivi (in particolare dal 1977 al 1988) all'Università di Tübingen. Uno di questi lavori, pubblicato da F. Hasselbach nel 1988, mostrò un risultato molto simile a quello di Merli Missiroli e Pozzi, anche se l'articolo di questi ultimi non venne citato tra le referenze bibliografiche.

Un esperimento che ebbe notevole popolarità fu quello pubblicato nel 1989, sempre sull'*American Journal of Physics*, da un gruppo giapponese dell'Hitachi, diretto da Akira Tonomura (1942-2012).

Nell'esperimento di Tonomura vennero utilizzati un biprisma elettronico e un rivelatore di elettroni singoli, quest'ultimo molto più sofisticato di quello usato 15 anni prima da Merli, Missiroli e Pozzi. L'intensità del fascio elettronico utilizzato era bassissima, corrispondeva a una distanza media tra elettroni successivi di circa 150 km. In queste condizioni la figura di interferenza si veniva a delineare in un tempo di circa 20 minuti. Una breve animazione dell'esperimento, ottenuta dal montaggio di moltissime fotografie, rendeva visibile il processo di accumulo dei singoli elettroni, a partire dalla fase in cui sembrano distribuiti in modo casuale fino a quella in cui comincia a delinearsi la figura di interferenza.

Il bell'esperimento di Tonomura rappresentò un perfezionamento tecnico di quello del 1976, soprattutto per quanto riguarda la rivelazione dei singoli elettroni. Peccato che nella bibliografia il lavoro di Merli, Missiroli e Pozzi non venisse citato⁹. Questo fu probabilmente all'origine dell'errore dell'editore del *Physics World*, che in un primo momento attribuì proprio a Tonomura la primogenitura dell'esperimento.

Pur stimando molto il lavoro di Tonomura, ritengo che l'omissione nella bibliografia dei lavori precedenti sia un punto criticabile. Va ricordato che questa fu immediatamente notata da Greyson Gilson, ricercatore americano dell'Università del New Hampshire.

elettroni è stato ripubblicato nuovamente in DVD con un documentario che narra la storia dell'esperimento del 1976. Per informazioni vedi: <http://1-esperimento-piu-bello-della-fisica.bo.imm.cnr.it/promodvd.html>.

9 Nell'articolo compare un generico e incompleto riferimento al filmato "Interferenza di elettroni", nel quale, tra gli autori, non vengono menzionati Merli, Morettini e Nobili.

Gilson, dopo che comparve l'articolo di Tonomura, inviò una lettera all'editore della rivista *American Journal of Physics*, pubblicata l'8 agosto del 1989, in cui si criticava la rivendicazione del gruppo giapponese di aver fatto per primo l'esperimento e si citavano i precedenti articoli dei ricercatori bolognesi (Donati, Missiroli, Pozzi, Merli e Matteucci) che erano stati ignorati da Tonomura.

Nella discussione che avvenne nel maggio 2003 sulle colonne del *Physics World*, l'intervento determinante a stabilire la priorità dell'esperimento di Merli Missiroli e Pozzi fu di John Steeds, dell'Università di Bristol, che conosceva molto bene il lavoro dei fisici bolognesi. Egli infatti dirigeva il Laboratorio di microscopia elettronica dell'Università di Bristol quando, nel 1975, Merli vi trascorse un periodo in seguito alla vincita di una borsa di studio NATO. Merli portò a Bristol una delle prime copie disponibili del film *Interferenza di elettroni*, che fu molto apprezzato dai colleghi inglesi. Tanto che Steeds lo fece tradurre e si occupò personalmente di promuoverne la diffusione a livello internazionale.

Tonomura, intervenendo nella discussione, riconobbe che a Bologna era stato fatto un esperimento molto prima che in Giappone, ma sostenne che le condizioni nelle quali aveva operato il suo gruppo davano maggiore certezza che un solo elettrone alla volta transitasse nel microscopio durante la formazione delle frange di interferenza. Per chiarire un po' meglio questo aspetto, approfondiremo brevemente qualche dettaglio tecnico sui due esperimenti.

6.4.6 Chi ha fatto per primo l'esperimento più bello della fisica?

La differenza sostanziale tra i due esperimenti fu nel rivelatore di elettroni singoli utilizzato. Quello che ebbero a disposizione Merli, Missiroli e Pozzi fu uno dei primi prototipi esistenti e di conseguenza molto più rudimentale di quello utilizzato 15 anni dopo da Tonomura e collaboratori.

La visualizzazione avveniva su un monitor a fosfori, sul quale gli spot luminosi dovuti all'impatto dei singoli elettroni erano piuttosto grandi, poiché il rivelatore aveva una risoluzione spaziale limitata. Ognuno di essi aveva un tempo di persistenza sul monitor di circa un decimo di secondo, poi spariva e il rivelatore non era in grado di memorizzarlo.

Un altro limite tecnico era la velocità di rivelazione, per cui non si potevano distinguere temporalmente due eventi di impatto separati meno di 4 centesimi di secondo uno dall'altro. Se si voleva che sullo schermo del rivelatore apparisse un solo spot alla volta, si doveva quindi diminuire la corrente fino al punto che arrivasse non più di un elettrone ogni quattro centesimi di secondo. Con questo bassissimo flusso di elettroni la distanza media tra elettroni successivi era enorme, circa seimila chilometri! Se ci fosse stata la possibilità di registrare elettronicamente gli eventi, si sarebbe potuto memorizzare la posizione di arrivo di qualche migliaio di spot, sufficienti a delineare le frange di interferenza, e ricostruire queste ultime *a posteriori*. Ma l'elettronica piuttosto rudimentale del dispositivo non consentiva tale procedura.

L'unica possibilità che avevano i ricercatori bolognesi era aumentare il flusso di elettroni, fino al punto di visualizzarne contemporaneamente un migliaio in ciascun fotogramma. In questo modo le frange si potevano osservare *in tempo reale*, come nel fotogramma mostrato nella Figura 6.10.

Si potrebbe obiettare che questa non è più interferenza di elettroni singoli. Ma l'apparenza inganna. Infatti con il flusso utilizzato per ottenere sullo schermo l'immagine della Figura 6.10, cioè circa diecimila elettroni al secondo, la distanza media tra elettroni successivi risulta di alcuni chilometri. Siamo quindi ancora nella condizione in cui gli elettroni attraversano il microscopio e colpiscono il rivelatore uno solo alla volta. Ne vediamo tanti tutti assieme solo perché il tempo di persistenza delle immagini sullo schermo a fosfori (un decimo di secondo) è mille volte più lungo del tempo che intercorre tra l'arrivo di un elettrone e l'altro.

Il vantaggio del gruppo di Tonomura fu quello di poter usare un rivelatore più moderno e sofisticato, con una risoluzione spaziale molto migliore (i segnali dei singoli elettroni erano puntini molto piccoli e meglio distinguibili tra loro nelle immagini), un tempo di rivelazione più veloce, meno rumore, e la possibilità di registrare elettronicamente istante di arrivo e posizione di ogni singolo evento. Le immagini, memorizzate lavorando con un bassissimo flusso di elettroni, potevano quindi essere in seguito sovrapposte, una dopo l'altra, in una sequenza che ricostruiva la formazione della figura di interferenza, punto dopo punto.

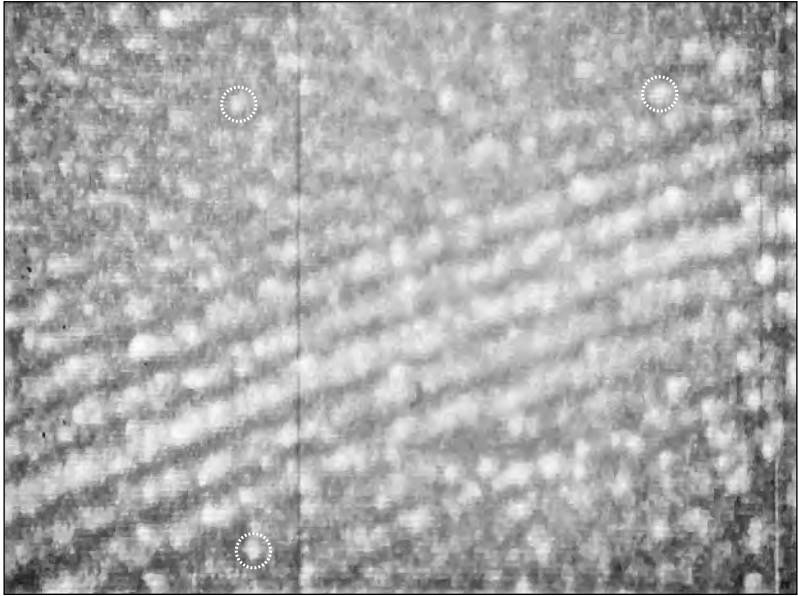


Figura 6.10 Immagine dello schermo rivelatore nell'esperimento di Merli Missiroli e Pozzi, nel quale si vedono contemporaneamente gli spot luminosi, ciascuno dei quali individua l'impatto di un singolo elettrone, e le frange di interferenza formate dall'accumulo di molti spot. Questi, anche se visibili tutti insieme a causa del lungo tempo di persistenza dell'immagine sullo schermo, corrispondono in realtà a eventi di impatto di elettroni che hanno attraversato il microscopio separatamente, uno solo alla volta. Con i circoletti tratteggiati abbiamo evidenziato alcuni degli spot dovuti all'impatto di un singolo elettrone.

Da un punto di vista coreografico e didattico questa ricostruzione è molto efficace, ma non aggiunge nulla di sostanzialmente nuovo al risultato dell'esperimento di Merli, Missiroli e Pozzi.

In entrambi i casi l'interferenza è prodotta con un microscopio elettronico attrezzato con un biprisma di Möllenstedt e Düker. In entrambi i casi si evidenzia sia il comportamento corpuscolare, visibile nelle tracce dei singoli elettroni, sia quello ondulatorio, visibile nella figura di interferenza prodotta da alcune migliaia di elettroni. In entrambi i casi si opera in condizioni in cui, nella stragrande maggioranza dei casi, un solo elettrone alla volta attraversa il microscopio.

Possiamo dunque concludere che furono effettivamente Merli, Missiroli e Pozzi, pur con le limitazioni tecnologiche del tempo in cui operarono, i primi a mostrare il duplice comportamento corpuscolare e ondulatorio degli elettroni in un esperimento di interferenza di singoli elettroni, e a realizzare in questo modo l'esperimento di fisica che nel 2002 i lettori del *Physics World* scelsero come il più bello di tutti i tempi.

6.4.7 Bologna: dagli anni Settanta a oggi

Dagli anni Settanta a oggi l'attività di ricerca che riguarda l'interferenza di elettroni è proseguita a Bologna, sia all'Università che al CNR.

Da una parte è continuata l'attività applicativa sull'interferometria elettronica. Pozzi è attualmente uno degli specialisti più competenti a livello internazionale in questo campo. Pozzi e Merli hanno collaborato a varie riprese sul tema, fino a poco tempo prima della scomparsa di Merli (2008). Quest'ultimo dal canto suo svolse, a partire dagli anni Ottanta, un ruolo di primo piano nella microscopia elettronica nazionale e internazionale. Come presidente della Società Italiana di Microscopia Elettronica (SIME), incarico che ricoprì dal 1984 al 1987, si dedicò alla diffusione della microscopia elettronica e in particolare alla formazione delle giovani leve, facendosi promotore di numerose scuole da cui è passato un numero consistente dei microscopisti elettronici operativi oggi in Italia. Dopo la sua prematura scomparsa, la scuola di microscopia elettronica da lui fondata, che si tiene ogni due anni presso l'Istituto IMM (ex LAMEL) del CNR, è stata intitolata al suo nome, a riconoscimento dell'attenzione e del generoso impegno da lui sempre dedicati alla formazione dei giovani microscopisti.

D'altra parte è proseguita la tradizione di realizzare esperimenti di carattere fondamentale e didattico sui fenomeni quantistici utilizzando il microscopio elettronico. Questa attività è stata portata avanti in parte da Pozzi che, accanto alle tradizionali collaborazioni all'interno del Dipartimento di Fisica di Bologna con Missiroli e Matteucci, si è avvalso in anni recenti della collaborazione di ricercatori dell'Università di Modena e Reggio Emilia e dell'Istituto CNR-NANO-S3 di Modena, in particolare Stefano Frabboni e Giancarlo Gazzadi.

Giorgio Matteucci, che contribuì come giovane tecnico di laboratorio alla realizzazione dell'esperimento e del film del 1976, una volta divenuto ricercatore e poi docente di Esperimentazione di Fisica, ha condotto in prima persona una intensa attività nel settore. Dall'inizio degli anni Novanta a oggi ha pubblicato una lunga serie di esperimenti didattici con il microscopio elettronico, in parte realizzandoli da solo, in parte con altri, come ad esempio Andrea Migliori, microscopista elettronico del CNR-IMM di Bologna e allievo di Merli.

Un segno del riconoscimento internazionale delle ricerche condotte a Bologna nel settore didattico-fondamentale con gli elettroni, arrivò nel 1991, ancora 12 anni prima del sondaggio del *Physics World*. In quell'anno l'*American Journal of Physics* stilò, sulla base dell'opinione dei lettori, una lista degli articoli "memorabili" comparsi sulla rivista nel periodo dal 1933 al 1990. In quella lista, tra i pochissimi italiani, due dei quali sono i premi Nobel Enrico Fermi (1901-1954) ed Emilio Segrè (1905-1989), compaiono Donati, Missiroli, Pozzi, Merli, Matteucci, tutti coloro, insomma, che abbiamo citato nel nostro racconto.

Recenti esperimenti di interferenza elettronica, condotti al Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna in collaborazione con altre istituzioni, hanno impiegato fenditure vere e proprie al posto del biprisma elettronico. Queste sono state prodotte nel laboratorio CNR-NANO-S3 di Modena, con un'apparecchiatura che utilizza un sottilissimo fascio di ioni energetici per compiere scavi di dimensioni nanometriche sulle superfici dei materiali. Le fenditure realizzate con questa tecnica su una lamella di nitruro di silicio, spessa 500 nanometri, hanno una larghezza di circa 30 e una spaziatura di circa 200 nanometri, perciò sono circa 10 volte più piccole di quelle fabbricate da Jönsson nel 1959.

Perché questo "revival" delle fenditure? Oltre a rendere l'apparato sperimentale più simile a quello dell'esperimento mentale di Einstein-Feynman, le fenditure facilitano la realizzazione di alcune varianti dell'esperimento stesso, come ad esempio quelle denominate "*which path?*". Si tratta in sostanza di esperimenti in cui si cerca di conoscere da quale fenditura ogni elettrone sia passato nel suo tragitto dalla sorgente al rivelatore. Pozzi, Frabboni e Gazzadi hanno di recente realizzato un esperimento di interferenza a molti elettroni di questo tipo. Torneremo in maggior dettaglio sull'affascinante tema degli esperimenti "*which path?*" nel prossimo capitolo.

Alla data della scrittura di questo libro, l'esempio più recente dell'ulteriore raffinamento dell'esperimento più bello è del 2011. Si tratta del risultato di una collaborazione tra Giorgio Matteucci, Giulio Pozzi (Università di Bologna) Stefano Frabboni, Giancarlo Gazzadi (Università di Modena e Reggio Emilia, CNR-NANO-S3), Alessandro Gabrielli, Filippo Giorgi, Nicola Semprini Cesari, Mauro Villa, Antonio Zoccoli (Istituto nazionale di Fisica Nucleare, INFN, di Bologna), Pietro Marcati, Michele Pezzi (laureandi, Università di Bologna), Gianluigi Abregghi (dottorando, Università di Bologna), Gabriele Balbi, Mauro Lolli (tecnici, INFN-Bologna), Raffaele Berti (tecnico, Università di Bologna). In questo esperimento sono state usate le nano-fenditure fabbricate presso il CNR-NANO-S3 e un rivelatore di singole particelle, sviluppato dall'INFN per gli esperimenti al CERN di Ginevra. Si tratta di una lastra di silicio di pochi millimetri di lato, ricoperta da un gran numero di microdispositivi a stato solido, ciascuno dei quali può localizzare con una precisione di poche decine di micrometri e registrare gli eventi di impatto di elettroni singoli. Grazie all'elevatissima velocità di risposta dei dispositivi, è possibile registrare separatamente l'arrivo di ciascun elettrone e misurare il tempo che intercorre tra l'arrivo di due elettroni successivi. Ulteriori dettagli su questo esperimento si possono trovare sul sito web dedicato all'esperimento più bello.

Si conclude così il viaggio attraverso le vicende che hanno trasformato in realtà la geniale idea dell'esperimento di interferenza di elettroni singoli. Viaggio che, a giudicare da quanto accaduto in tempi recentissimi, non dà ancora segno di essere concluso. Abbiamo visto che alla realizzazione di questa esperienza hanno contribuito molte persone, gruppi, laboratori, in molti luoghi diversi del mondo. Abbiamo visto confluire nell'esperimento motivazioni e interessi diversificati, dalla passione per la fisica fondamentale, all'interesse per lo studio applicativo dei materiali, all'attenzione per la didattica e la divulgazione della scienza. L'esperienza bolognese, sulla quale ci siamo soffermati maggiormente, è l'esempio più significativo di questa ricchezza e molteplicità di interessi.

Il prossimo (e ultimo) capitolo della storia si apre sull'aspetto più squisitamente culturale dell'esperimento, quello che ha generato interminabili e mai risolte discussioni sulla natura dello strano mondo degli oggetti microscopici. In questo caso il percorso sarà attraverso le idee elaborate dai fisici per tentare di spiegare l'esperimento più bello e di chiarire (o almeno tentare di chiarire) quel "mistero" che secondo Feynman nasconde.