

Il contributo di Franck ed Hertz all'affermazione del modello atomico di Bohr

M. Grazia Ianniello¹

Riassunto

Viene analizzato il caso degli esperimenti di Franck ed Hertz, nei quali, mediante urto elettronico controllato, viene provocata l'eccitazione di una riga di data frequenza nei vapori di mercurio osservata spettroscopicamente. Gli esperimenti, ritenuti da Bohr già nel 1915 e dai fisici americani nel 1916 una conferma immediata al nuovo modello atomico, vennero al contrario interpretati in tal senso dagli stessi autori solo nel 1919. La conferma piena alla teoria di Bohr, senza più ambiguità rispetto al modello atomico di riferimento, giunse inoltre solo circa cinque anni dopo. Si affrontano nel seguito le possibili motivazioni sperimentali, teoriche, e non solo, che giocarono un ruolo importante nel leggere o meno negli stessi risultati una conferma al modello atomico di Bohr.

1 - La cinetica degli elettroni: il contesto alla Townsend

Nel seguito affronteremo le vicende legate all'esperimento di J. Franck e G. Hertz "Sull'eccitazione della riga di risonanza 253,6 nm del mercurio mediante urti elettronici"², che presenta molte singolarità: l'esperimento viene accreditato nella manualistica e nella storiografia³ come una delle conferme più brillanti e immediate della teoria atomica di Bohr. Per questo esperimento del 1914 e "per la scoperta delle leggi che governano l'urto di un elettrone con un atomo"⁴, Franck ed Hertz ricevettero il premio Nobel per la fisica nel 1925. Ma non si trattò di un riconoscimento tardivo quanto piuttosto di un caso di attribuzione precoce al contributo sperimentale del 1914 del ruolo di 'crucialità': l'esperimento in questione

¹ Dipartimento di Fisica, Università La Sapienza di Roma. Ringrazio vivamente per i suggerimenti F. Sebastiani e M. De Maria, senza naturalmente coinvolgerli in quanto di impreciso possa essere contenuto in questo articolo.

² J. FRANCK, G. HERTZ, *Über die Erregung der Quecksilberresonanzlinie 253,6 nm durch Elektronenstöße*, "Verh. d. D. Phys. Ges.", 16, 1914, pp. 512-517. Con la notazione mm venivano indicati i mm, ovvero gli attuali nm.

³ Nella letteratura specialistica, gli esperimenti di Franck ed Hertz, e in particolare i loro metodi di indagine basati sull'urto elettronico, vengono ampiamente discussi almeno fino agli anni Quaranta. Cfr. per es., J. FRANCK, P. JORDAN, *Anregung von Quantensprüngen durch Stöße*, Berlin, Springer, 1926; G. JOOS, in W. WIEN, F. HARMS, *Handbuch der Experimental Physik*, Leipzig, Akad. Verlagsgesellschaft m. b. H Leipzig, 1928-33, vol. XXI, Spektroskopie I; F.L. ARNOT, *Collision processes in gases*, London, Methuen & Co., 1933; L.B. LOEB, *Fundamental processes of electrical discharges in gases*, Univ. of California Press, New York, 1939. Nei manuali più recenti il riferimento al contributo di Franck ed Hertz, per altro ormai ricostruito razionalmente, si riduce a pochi cenni. Rappresenta una eccezione E.V. SPOLSKIJ, *Fisica atomica*, Nauka, Mosca, 1984, tr. it. Edizioni Mir, 1986. In ambito storiografico l'argomento viene affrontato per es. da J.L. HEILBRON, *Lectures on the history of atomic physics, 1900-1922* in C. WEINER (a cura di), *Storia della fisica del XX secolo* (Rendiconti della Scuola intern. di Fisica E. Fermi, Varenna, 1972), New York 1977, pp. 75-77; G. TAGLIAFERRI, *Storia della fisica quantistica*, Franco Angeli, Milano, 1985, pp. 193-198; GIORA HON, *Franck & Hertz versus Townsend: a study of two types of experimental error*, "Hist. St. in Phys. Sc.", 20, I, 1990, pp. 79-106. H. KRAGH, in *Quantum generations: a history of physics in the twentieth century*, Princeton U. P., 1999, tocca appena l'argomento. In H.A. BOORSE, L. MOTZ (a cura di), *The world of the atom*, Basic Books Inc. Publ., New York, 1966, vol. I, viene riportata la tr. ingl. dell'articolo di Franck ed Hertz, *op. cit.* in nota 1; cfr. anche D. TER HAAR, *The old quantum theory*, Oxford, Pergamon Press, 1967, p. 40 e pp. 160-166.

⁴ C.W. OSEEN, in *Nobel Lectures Physics, 1922-1943*, Elsevier, Amsterdam 1965, p. 95.

non poteva infatti essere assunto a sostegno del modello atomico di Bohr poiché i risultati conclusivi a favore della esistenza dei livelli discreti di energia nell'atomo e della condizione di frequenza furono ottenuti da Franck ed Hertz parecchi anni dopo. Inoltre gli stessi autori, quando eseguirono l'esperimento, benché convinti sostenitori delle ipotesi quantistiche alla Planck, ignoravano la teoria di Bohr e anche quando ne vennero a conoscenza non la compresero a pieno, almeno fino al 1919. I risultati conseguiti nell'articolo del 1914 erano per di più inevitabilmente sbagliati, dal momento che Franck ed Hertz identificarono a lungo i potenziali di eccitazione dei vapori di mercurio con un potenziale di ionizzazione. E neppure il metodo dell'urto elettronico era una novità assoluta, essendo già stato affrontato da Ph. Lenard e da J. Stark. Franck ed Hertz, tuttavia, come vedremo ne modificheranno radicalmente il significato trasformando il metodo in un potente strumento d'indagine man mano che il quadro teorico, all'inizio oscuro e incompleto, si andrà gradualmente chiarendo.

Quando Franck ed Hertz⁵, nel 1913, su suggerimento di E. Warburg iniziarono a condurre presso l'Istituto Fisico dell'Università di Berlino, una campagna di misure sugli urti tra elettroni e molecole, le tecniche per produrre e rivelare i raggi catodici erano in pieno sviluppo, con un settore di ricerca esplicitamente dedicato allo studio del passaggio di un fascio di elettroni in un gas come mezzo per sondare la sua struttura atomica. Lenard⁶ era stato il primo che a partire dal 1895 aveva studiato in modo sistematico l'assorbimento di un fascio elettronico in un gas. Gli elettroni venivano prodotti per effetto fotoelettrico⁷ facendo incidere luce ultravioletta su un catodo, davanti al quale erano poste una o più griglie metalliche che consentivano agli elettroni di passare e di colpire un "elettrodo collettore" o "di cattura". Tutto il sistema era chiuso in un tubo in cui era contenuto a bassa pressione il gas in studio e la rilevazione dei "raggi catodici fotoelettrici" veniva effettuata con un elettrometro sensibile collegato all'elettrodo collettore. La sorgente di elettroni era stata sostituita, nei primi anni del Novecento, da un filo incandescente con il vantaggio di conoscere, all'epoca dei primi esperimenti di Franck ed Hertz, sia le leggi dell'intensità della corrente termoelettronica formulate da O. W. Richardson, sia la relazione di I. Langmuir tra corrente e tensione applicata per accelerare gli "elettroni caldi".

Dal punto di vista sperimentale si sapeva che sia i raggi catodici che i raggi canale potevano ionizzare per urto le molecole e provocare una scarica nel gas che, sotto condizioni opportune, si automanteneva anche in assenza degli agenti ionizzanti esterni. In proposito Lenard, e indipendentemente Stark e J.J. Thomson, avevano stabilito che gli elettroni per ionizzare per urto il gas, dovevano possedere una velocità "minima" (o "critica") in corrispondenza della quale si aveva una "tensione di ionizzazione". Lo stesso Lenard aveva condotto le prime misure dirette

⁵ J. FRANCK, G. HERTZ, *Über Zusammenstöße zwischen Gasmolekülen und langsamen Elektronen*, "Verh. d. D. Phys. Ges.", 15,1913, pp. 373-390. Per ulteriori dettagli sulle varie procedure sperimentali impiegate da Franck ed Hertz, cfr. M. G. Ianniello, *Quando finiscono gli esperimenti: il caso di Franck ed Hertz (1913-1925)*, in pubblicazione su "Physis", 2002.

⁶ Cfr. in partic. PH. LENARD, *Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht*, "Ann. d. Phys.", 2,1900, 359; *Über die lichtelektrische Wirkung*, 8,1902, pp. 149-198; *Über die Absorption von Kathodenstrahlen verschiedener Geschwindigkeit*, 12,1903, p. 449, pp. 714-744.

⁷ La sorgente di elettroni sfruttava l'effetto fotoelettrico benché all'epoca, come è noto, nulla ancora si sapesse della teoria che sta alla base del fenomeno (Einstein, 1905). La velocità massima degli elettroni emessi è data dalla relazione $(1/2)mv^2 = eV = hn - P$, con P lavoro di estrazione del metallo di cui è costituito l'elettrodo. Poiché la maggior parte dei metalli presenta lavoro di estrazione maggiore di 3 V, per produrre effetto fotoelettrico era richiesta luce ultravioletta. L'impiego di metalli con lavoro di estrazione più basso era d'altra parte sconsigliato perché tali metalli reagiscono chimicamente con il gas in esame.

dei potenziali di ionizzazione e aveva trovato, per una serie di gas, che quando il potenziale acceleratore si approssimava a 11 V l'elettrometro rilevava una corrente positiva sull'elettrodo collettore che veniva attribuita alla formazione di ioni positivi nel gas. Il metodo di Lenard "a tre elettrodi" è schematizzato in Fig. 1: tra filo caldo F, sorgente degli elettroni, e griglia G veniva applicato il potenziale acceleratore V_1 mentre tra elettrodo collettore P e griglia G agiva una tensione di frenamento V_2 che impediva agli elettroni primari di raggiungere P. Solo quando l'energia degli elettroni, legata a V_1 , diventava così grande da ionizzare gli atomi del gas, il galvanometro iniziava a rilevare corrente perché in questa situazione V_2 spingeva gli ioni positivi verso l'elettrodo collettore e il galvanometro segnava il passaggio di una corrente positiva. O almeno così si credeva all'epoca: in realtà, come si scoprirà in seguito, l'elettrodo collettore poteva caricarsi positivamente anche a causa dei fotoelettroni espulsi dalla sua superficie quando veniva investita dalla radiazione ultravioletta emessa dagli atomi eccitati del gas.

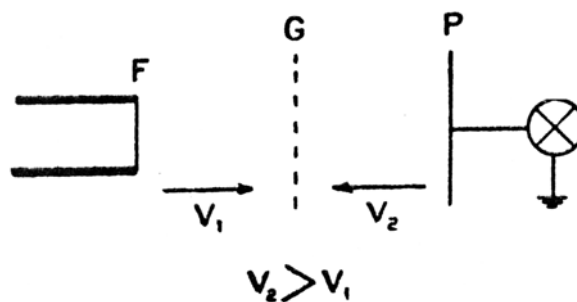


Figura 1 - Metodo di Lenard a 3 elettrodi, per misurare la tensione di ionizzazione di un gas (schema tratto da F.L. Arnot., *Collision processes in gases*, London, 1933, p.15). Qui e nel seguito le frecce indicano il verso del moto degli elettroni.

L'unica teoria in grado di interpretare, all'epoca, i processi di scarica nei gas e la ionizzazione per urto era stata formulata da Townsend⁸. La teoria spiegava abbastanza bene, dal punto di vista fenomenologico, la tipica curva tensione-corrente in cui, all'aumentare della differenza di potenziale applicata agli elettrodi del tubo a scarica la corrente aumentava fino ad arrivare al regime di saturazione (plateau nella curva), per poi risalire decisamente alla ionizzazione e divergere alla scarica vera e propria. La scarica era attribuita agli urti di 'ioni negativi primari' con le molecole di gas che, a loro volta, producevano altri 'ioni negativi' innescando così dei processi moltiplicativi⁹. Townsend aveva formulato in merito una legge semiempirica che legava il "primo coefficiente di Townsend" a (numero di coppie di ioni prodotte da uno 'ione negativo' per unità di percorso) al campo elettrico ridotto alla pressione p del gas (E/p). Dalla curva a/p vs. E/p si deduceva poi, in modo indiretto, il valore della tensione di ionizzazione del gas. Il metodo, impiegato anche da J.J.Thomson,

⁸ J. TOWNSEND, *The theory of ionization of gases by collision*, Clarendon Press, London 1910.

⁹ L'equazione di Townsend verrà corretta intorno al 1940, tra gli altri, da L. Loeb, J.M. Meek e G. Raether e i meccanismi di produzione della scarica totalmente ridefiniti. È opportuno osservare che il settore di ricerca della conduzione dell'elettricità nei gas era in grande evoluzione. Loeb, facendo il confronto tra il suo libro del 1939, *Processes of electrical discharge in gases*, op. cit. in nota 2, e il suo libro *Basic processes of gaseous electronics*, del 1955, affermerà che "the old book laid many ghosts of the past which require no comment today", p. IX.

portava a valori più alti fino al 50% dei valori dedotti con il metodo diretto alla Lenard ma conduceva, come nel caso di Lenard, allo stesso valore della tensione critica per gas diversi. Gli urti tra 'agenti ionizzanti' (elettroni o ioni negativi primari) e gli atomi e le molecole del gas erano inoltre supposti da Townsend tutti anelastici indipendentemente dalla loro energia cinetica, anche alle basse velocità, con l'inevitabile conseguenza che un elettrone che deve ionizzare per urto deve guadagnare l'energia necessaria su un unico cammino libero medio. Queste ipotesi erano però incompatibili con quanto avveniva realmente nei gas inerti e, come si scoprirà più tardi, nei vapori di metallo: nei gas in questione, gli elettroni collidenti non si 'legavano' agli atomi per formare ioni negativi ma restavano liberi, anche ad alte pressioni, sicché veniva meno la funzione degli agenti ionizzanti ipotizzata da Townsend. La presenza anche di tracce minime di altri gas causava al contrario la cattura repentina degli elettroni e la comparsa degli ioni negativi 'normali' previsti da Townsend. Infine, per questi gas "senza affinità elettronica" la scarica era stata osservata nelle condizioni più diverse, anche ad alte pressioni e basse differenze di potenziale agli elettrodi. La teoria di Townsend, formulata nell'ambito della teoria cinetica e dell'elettrodinamica classiche, era inoltre del tutto estranea alle nuove concezioni quantistiche che soprattutto dopo il primo Congresso Solvay (1911) si andavano lentamente affermando. Al riguardo andavano rivisti, già dalle fondamenta, il concetto stesso di urto tra 'sfere solide' e le modalità di trasferimento di energia negli urti elettrone-atomo. Da queste premesse teoriche e sperimentali presero avvio le ricerche di Franck ed Hertz sulla "cinetica degli elettroni", con l'obiettivo di misurare la tensione di ionizzazione nel caso di elio, idrogeno e ossigeno, gas per i quali erano noti dagli esperimenti di Lenard i valori dei cammini liberi medi degli elettroni per varie pressioni. La scelta di convergere sugli "elettroni lenti"¹⁰ come proiettili per bombardare l'atomo, per tensioni dell'ordine delle decine di V, era dettata dalla esigenza di prevenire nel gas gli effetti di luminescenza e di ionizzazione, considerati all'epoca inscindibili, per poter fare osservazioni controllate dal regime senza 'ionizzazione' al regime con ionizzazione.

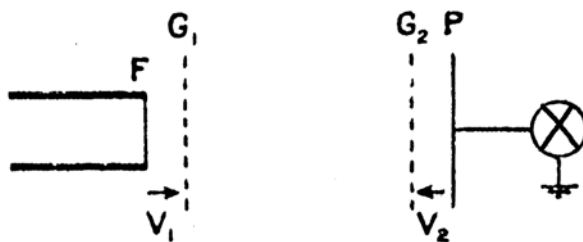


Figura 2a - Metodo di Lenard perfezionato a 4 elettrodi (da Arnot, p. 17);

¹⁰ L'unità di energia per gli elettroni è l'eV. Per un elettrone di massa m e carica e , accelerata da una differenza di potenziale V , l'energia cinetica è $(1/2)mv^2 = eV$. Nella letteratura si era diffuso l'uso di abbreviare l'unità di energia eV in V e di usare in modo equivalente i termini "velocità" v e "tensione" V per riferirsi all'energia degli elettroni.

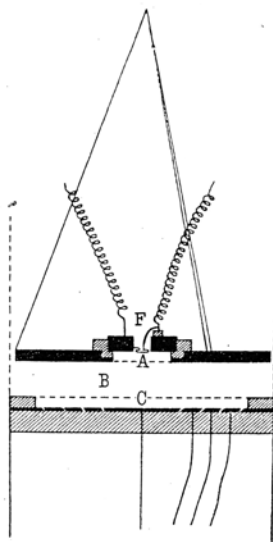


Figura 2b - Sezione del dispositivo usato da Franck ed Hertz per studiare la cinetica degli elettroni emessi da F e immessi nel gas. I due fili avvolti a elica servono a tenere sospesa la parte superiore dell'apparato all'interno del tubo in cui è contenuto il gas; la distanza x tra i due piatti A e C è regolabile dall'esterno. Franck ed Hertz, *Verh.*, 15 (1913) 373-390.

La disposizione sperimentale di Lenard venne modificata da Franck ed Hertz con l'aggiunta di una seconda griglia G_2 (Fig. 2a); gli elettroni vengono accelerati da V_1 e immessi nello "spazio degli urti", compreso tra le due griglie, e successivamente frenati dalla tensione V_2 in grado di respingere gli elettroni meno energetici e di funzionare così da filtro delle velocità degli elettroni. Le misure furono ripetute variando la velocità degli elettroni, la pressione nel gas e la distanza tra le griglie, con il risultato che i cammini liberi medi degli elettroni lenti, con e senza controcampo, nel limite degli errori risultarono uguali. Un altro risultato notevole riguardò la natura degli urti, studiati mediante il dispositivo sperimentale di Fig. 3: D è il filamento, sorgente degli elettroni che vengono accelerati da un potenziale applicato tra D e la griglia di platino N_1 e immessi nella camera S. L'elettrodo ausiliario P può ruotare in modo da assumere la posizione di figura o essere spostato di lato. Quando P è posto davanti al filamento funziona da elettrodo collettore e consente, con l'aiuto di un galvanometro sensibile, di determinare il numero di elettroni "primari" che arrivano sul piatto in funzione del campo frenante applicato tra P e N_1 . Per misurare il numero degli elettroni diffusi dalle molecole del gas, o "secondari", si usa invece il condensatore formato dalla griglia N_2 e il piatto di cattura R collegato a un secondo galvanometro, con P spostato di lato mentre lo spazio S è lasciato privo di campo. Con un complesso procedimento di misura¹¹

¹¹ Per una data pressione del gas e per un dato potenziale acceleratore V_1 , vengono rilevati dai relativi galvanometri il numero degli elettroni n e n' che colpiscono, nell'unità di tempo, rispettivamente l'elettrodo P e il piatto R in funzione del potenziale di frenamento V_2 . Le misure vengono eseguite anche con $V_2 = 0$ (n_0 e n_0' indicano, con significato analogo, il numero di elettroni che urtano P ed R). Dalle

vengono costruite le curve di distribuzione dell'energia degli elettroni primari e secondari in funzione delle tensioni acceleratrici V_1 , con il risultato notevole che, nel caso dell'elio, le perdite di energia risultavano così piccole da avvalorare l'ipotesi che ciascun urto elettrone-molecola fosse praticamente elastico, in pieno disaccordo con la teoria di Townsend. Per l'idrogeno le risposte sperimentali erano state invece meno chiare a causa di effetti di disturbo mentre per l'ossigeno la forte affinità elettronica del gas aveva addirittura impedito le misure.

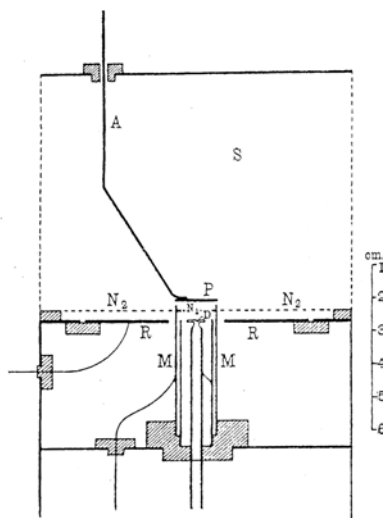


Figura 3 - Disposizione sperimentale per studiare gli urti elettrone-molecole, Franck ed Hertz, *Verh.*, 15 (1913) 373-390.

Nell'aprile del 1913, dunque, se pure veniva parzialmente chiarita, nell'ambito della "cinetica degli elettroni", la natura degli urti prima della ionizzazione, l'eventuale trasferimento di energia per quanti era ben lontano dall'essere chiarito. Venne comunque smentito da Franck ed Hertz l'assunto di Lenard di un valore della tensione di ionizzazione comune per tutti i gas che, al contrario, fu immediatamente riconosciuta, grazie anche al miglioramento del grado di vuoto nei tubi a scarica, una grandezza caratteristica per ciascun gas.

Nel luglio del 1913, Franck ed Hertz pubblicarono la seconda parte dell'articolo sugli urti tra molecole di gas ed elettroni lenti¹². Nel caso dell'elio¹³, vengono rilevate con l'apparato di Fig. 2b due curve di distribuzione di velocità degli elettroni per due diverse distanze x tra i piatti, di 4 e 18 mm. Nonostante che, nel secondo caso, il numero di collisioni sia enormemente più grande, gli andamenti delle curve coincidevano in modo sorprendente, confermando l'ipotesi di urti elastici per una energia degli elettroni di 18 eV (Fig. 4).

curve n/n_0 in funzione di V_2 vengono poi costruite, per differenziazione grafica, le curve di distribuzione delle energie in funzione di V_1 .

¹² J. FRANCK, G. HERTZ, "Verh. d. D. Phys. Ges.", 15, 1913, pp. 613-620.

¹³ Per l'elio viene assunto un potenziale acceleratore massimo di 18 V e poi di 25 V. Quest'ultimo valore viene scelto poiché Franck ed Hertz ritengono che il potenziale di ionizzazione dell'He sia, erroneamente, 20,5 V (in realtà è di 24,5 V), valore misurato in un precedente lavoro pubblicato su "Verh. d. D. Phys. Ges.", 15, 1913, p. 34.

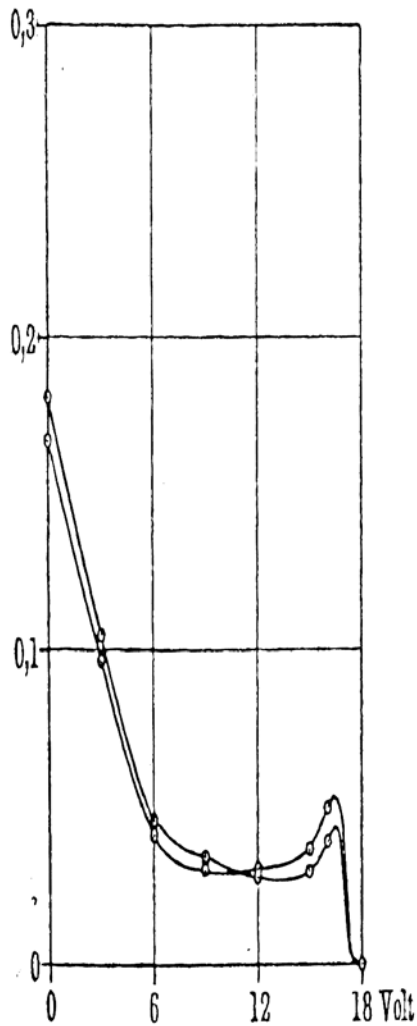


Figura 4 - Curve di distribuzione delle velocità di elettroni in elio a $p = 1,3$ mm di Hg e $V_1 = 18$ V. La curva superiore corrisponde a una distanza tra i piatti di 4 mm, l'inferiore a 18 mm: gli andamenti praticamente identici delle due curve confermano l'ipotesi di urti elastici tra gli elettroni e le molecole di gas (il massimo a destra è dovuto probabilmente a un effetto di correlazione delle direzioni delle velocità degli elettroni quando attraversano la griglia inferiore). Franck ed Hertz, *Verh.*, 15 (1913) 613-620.

La conclusione fu dunque che nell'elio, per tensioni inferiori al potenziale di ionizzazione, l'energia di ionizzazione può essere acquisita in un numero arbitrario di

urti praticamente elastici¹⁴. La questione verrà ripresa in occasione della riunione a Vienna dei Deutscher Naturforscher und Aertze del 22 settembre 1913, dove Franck terrà nella sezione fisica una relazione "Sul nesso tra ionizzazione per urto e affinità elettronica"¹⁵: se fosse valida l'ipotesi di Townsend che tutti gli urti sono anelastici, l'elettrone collidente dovrebbe acquistare l'energia necessaria a ionizzare in un unico cammino libero medio. In base a tale ipotesi, il comportamento anomalo dei gas nobili potrebbe essere spiegato solo ammettendo cammini liberi medi degli elettroni molto grandi oppure lavori di ionizzazione estremamente piccoli. Ma l'indagine sperimentale aveva escluso sia la prima ipotesi, rilevando cammini liberi medi del tutto in accordo con la teoria cinetica dei gas, sia la seconda, poiché le tensioni di ionizzazione dei gas inerti, benché note all'epoca in modo assai approssimativo, sembravano essere decisamente più alte. La teoria di Townsend per la cinetica degli elettroni lenti e i gas privi di affinità elettronica andava pertanto rigettata.

2 - Gli urti elettrone-atomo nei vapori di mercurio

Nel maggio del 1914, Franck ed Hertz pubblicarono un articolo su un nuovo metodo di rilevazione dei potenziali di ionizzazione, il metodo dell'urto anelastico tra elettroni e atomi di vapore di mercurio¹⁶. L'apparato è a simmetria cilindrica, con il filamento di platino F per l'emissione degli elettroni disposto lungo l'asse del cilindro (Fig. 5a); il filamento è circondato da una griglia G di platino, attorno alla quale si avvolge una lamina P dello stesso metallo, che funziona da elettrodo collettore, collegata a terra mediante un galvanometro. Tra F e G è applicato un potenziale acceleratore V_1 , mentre tra G e P può essere prodotto un controcampo (cfr. Fig. 5b). L'apparato sperimentale è inserito in un tubo a vuoto, collegato alla pompa e a un tubo a U che contiene il mercurio da vaporizzare. Tutto il sistema viene riscaldato elettricamente e immerso in un bagno di paraffina che mantiene la temperatura intorno ai 110 °C, mentre la pressione è di circa 1 mm di Hg.

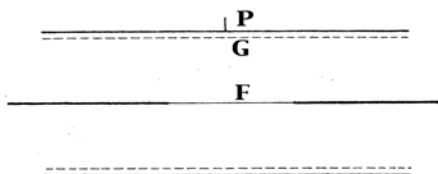


Figura 5a - Apparato per misurare i potenziali di 'ionizzazione' nei vapori di mercurio, Franck ed Hertz, *Verh.*, 16 (1914) 457-467.

¹⁴ Gli urti sono praticamente elastici perché la massa dell'elettrone è molto più piccola della massa degli atomi urtati, sicché la quantità di moto trasferita dall'elettrone all'atomo bersaglio è trascurabilmente piccola.

¹⁵ J. FRANCK, G. HERTZ, *Über den Zusammenhang zwischen Stossionisation und Elektronenaffinität*, "Verh. d. D. Phys. Ges.", 15, 1913, pp. 929-934; "Phys. Zeits.", 14, 1913, pp. 1115-1117.

¹⁶ J. FRANCK, G. HERTZ, *Über Zusammenstöße zwischen Elektronen und den Molekülen des Quecksilberdampfes und die Ionisierungsspannung desselben*, "Verh. d. D. Phys. Ges.", 16, 1914, pp. 457-467, conferenza tenuta il 24 aprile 1914.

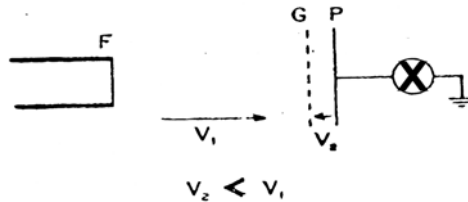


Figura 5b - Schema di funzionamento (da Arnot, cit., p. 15),.

Franck ed Hertz mantengono costante il potenziale di frenamento V_2 (di $\approx 0,5$ V) e misurano la corrente I rilevata dal galvanometro in funzione del potenziale acceleratore V_1 . Al crescere di V_1 , gli elettroni subiscono urti elastici con gli atomi del gas e I aumenta al crescere dell'energia cinetica degli elettroni che raggiungono l'elettrodo collettore. Non appena gli elettroni raggiungono una velocità critica, corrispondente alla tensione 'di ionizzazione' V_J , iniziano a subire urti anelastici in prossimità della griglia, perdono energia e sono ostacolati dal potenziale di frenamento a raggiungere P, causando così una diminuzione brusca della intensità di corrente. Gli elettroni primari che hanno perso energia, vengono rispinti verso regioni più vicine al filo F. All'aumentare di V_1 , gli elettroni acquistano di nuovo energia fino a che, per $V_1 = 2 V_J$ subiscono per la seconda volta vicino alla griglia urti anelastici e una "seconda ionizzazione", con una seconda brusca diminuzione di I .

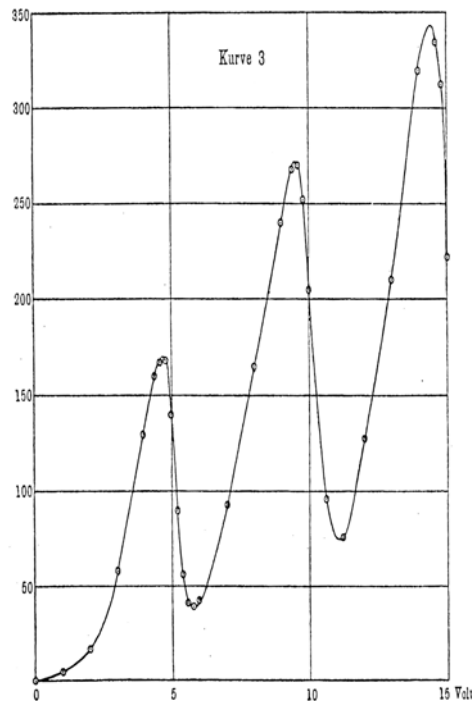


Figura 6 - Curva tensione-corrente per il vapore di mercurio (metodo puramente elettrico), Franck ed Hertz, *Verh.*, 16 (1914) 457-467.

Il processo può essere ripetuto e la curva risultante (Fig. 6) presenta dei massimi pronunciati e sempre crescenti perché gli elettroni coinvolti nel processo aumentano via via di numero. La distanza tra i massimi consecutivi corrisponde, secondo gli autori, alla tensione di 'ionizzazione' che risulta essere, con le dovute correzioni, di 4,9 V. Franck ed Hertz hanno in realtà individuato il primo potenziale di eccitazione ottica (o "potenziale di risonanza") del mercurio ma continuano a identificarlo con un "lavoro di ionizzazione".

Nel caso dell'elio, anche se i massimi sono meno evidenti, Franck ed Hertz possono trarre una analoga conclusione e $V_J = 20,5$ V. Nel tentativo di chiarire se il trasferimento di energia alla 'ionizzazione' avvenga per quanti, Franck ed Hertz verificano la relazione quantistica e $V_J = hn$ tra tensione di ionizzazione e frequenza propria n dell'elettrone entrato in oscillazione nell'atomo in seguito a un urto anelastico. Tale relazione era stata già impiegata dopo il 1909 da Stark nel corso dei suoi studi, nei quali aveva ipotizzato un nesso tra righe spettrali e ionizzazione di atomi soggetti a collisione. E proprio per i vapori di mercurio R.W. Wood aveva misurato la "riga di risonanza"¹⁷ corrispondente a $\lambda=253,6$ mm, e quindi a una frequenza nota. Dal calcolo, il prodotto hn corrispondeva esattamente a una energia di 4,84 eV, "un accordo così buono con il valore da noi ottenuto che a stento si può pensare a un caso"¹⁸. Gli autori si trovano a dover concludere che, quando gli elettroni collidenti hanno raggiunto la velocità critica necessaria a 'ionizzare', "l'energia di un raggio di 4,9 V è esattamente uguale a un quanto di energia della riga di risonanza del mercurio a 253,6 mm". Nel contesto della teoria quantistica "alla Planck-Einstein" Franck ed Hertz ipotizzano che l'elettrone collidente, non appena ha raggiunto una energia hn , possa trasformare energia cinetica in radiazione luminosa della lunghezza d'onda corrispondente alla riga di risonanza come in una sorta di effetto fotoelettrico inverso. Ma dovendo tener conto della ionizzazione, che a loro giudizio interveniva a valori non inferiori a 4,9 V, l'ipotesi più probabile sembrò essere che entrambi i processi, di emissione e di ionizzazione, dovessero avvenire affiancati: quando cioè gli elettroni trasferiscono per urto alle molecole 4,9 V, una parte di energia ionizza mentre un'altra parte sembra provocare eccitazione di luce "che sospettiamo consistere nella emissione della riga 253,6 mm"¹⁹.

Con il senno di poi, i risultati di Franck ed Hertz, pur essendo fondamentali in quanto rappresentavano la prima misurazione della tensione di eccitazione del mercurio per via puramente elettrica, furono inevitabilmente fraintesi dagli autori. Né l'andamento della curva di Fig. 6 li aiutò: la curva denunciava infatti solo il primo livello di eccitazione del vapore di mercurio (4,9 V), mentre non comparivano potenziali critici più alti; non figurava inoltre alcun indizio di ionizzazione mentre Franck ed Hertz credettero di vederne più d'una. La causa di ciò era da attribuirsi alla pressione del gas (pari a circa 1 mm di Hg), troppo alta. A questa pressione i cammini liberi medi degli elettroni sono troppo corti perché un elettrone possa avere una probabilità sufficiente per guadagnare una energia superiore a 4,9 V necessaria a eccitare il livello più alto (a 6,7 V) e tanto meno i livelli successivi. La bassa sensibilità dell'apparato, al contrario, li mise al riparo da un possibile rischio: quello di osservare a 4,68 V un altro potenziale di eccitazione rilevabile solo per via elettrica perché associato a uno "stato metastabile" del mercurio (scoperto da Franck nel 1919), e quindi a una riga non osservabile otticamente. Lo stesso Hertz osserverà a molti anni di distanza che la mancata rilevazione di questo potenziale critico "fu in

¹⁷ R. W. WOOD, "Phys. Zs.", 13,1912, p. 353. Gli atomi di un gas irradiato con luce di data frequenza possono riemettere radiazione della stessa frequenza, comportandosi come un oscillatore classico in risonanza con la radiazione luminosa incidente. La riga emessa è detta "riga di risonanza".

¹⁸ FRANCK ed HERTZ, 1914, *op. cit.*, p. 465.

¹⁹ *Ibid.*, p. 467.

effetti una circostanza fortunata poiché a quel tempo non saremmo stati in grado di associare questo quanto di energia allo spettro atomico del mercurio”.²⁰

3 - Le parabole di Gehrcke e Seeliger

L'ipotesi che energia meccanica potesse essere trasferita dagli elettroni agli atomi costringendoli a emettere luce, sembrava quanto mai seducente. A favore di questa ipotesi Franck ed Hertz citarono una serie di “interessanti e importanti esperimenti sull'eccitazione di luce in elio mediante raggi catodici”, condotti nel 1912 da due fisici del Physikalisch-Technische Reichsanstalt di Charlottenburg, E. Gehrcke e R. Seeliger²¹, che contribuirono a far maturare la mossa successiva, e cioè l'idea di osservare otticamente la riga spettrale del mercurio in corrispondenza di una tensione ben precisa.

In continuità con le osservazioni di Lenard e di Stark sugli spettri di emissione nelle scariche dei gas e nelle fiamme, Gehrcke e Seeliger intendono studiare le diverse emissioni di luce che gas diversi presentano in funzione delle velocità degli elettroni di un fascetto di raggi catodici che li attraversa. Il dispositivo sperimentale (Fig. 7) è costituito da un catodo caldo K che emette elettroni per effetto termoelettronico e due griglie parallele, A e K₁. Tra catodo caldo K e griglia A (anodo), è applicato un campo elettrico che accelera gli elettroni facendoli entrare tra le due griglie, dove agisce un controcampo a cui corrisponde la tensione frenante applicata tra K₁ e A.

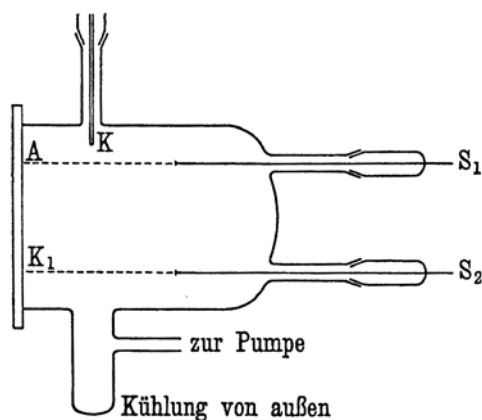


Figura 7 - Da Gehrcke e Seeliger, *Verh.*, 15 (1912), 335-343.

Regolando in modo opportuno l'angolo di incidenza a del fascio catodico e i valori delle tensioni di accelerazione e di frenamento, il fascio subisce una deflessione e in analogia con il caso 'balistico' descrive una parabola che entra ed esce dalla griglia A (Fig. 8). Entrambe le tensioni vengono variate tra 70 e 240 V, mentre i valori di pressione vengono mantenuti sufficientemente bassi da rendere visibile la traiettoria

²⁰ G. HERTZ, *Max Planck zum Gedenken*, Berlin, 1959.

²¹ E. Gehrcke, R. Seeliger, *Über das Leuchten der Gase unter dem Einfluss von Kathodenstrahlen*, "Verh. d. D. Phys. Ges.", 15, 1912, pp. 335-343.

dei raggi catodici. La parabola mostra una colorazione simmetrica: nel caso dell'aria, per esempio, nel primo tratto è blu, poi diviene rossa e in corrispondenza del vertice non è più visibile. Dei gas esaminati (oltre all'aria, azoto, argon, elio, idrogeno, vapori di sodio, vapori di mercurio) l'elio è l'unico ad assumere un colore diverso dal blu nella prima parte della traiettoria (verde) per divenire giallorosso prima del vertice, mentre i vapori di mercurio sono gli unici a mostrare una doppia variazione di colore prima del vertice (da bianco giallo a verde scuro).

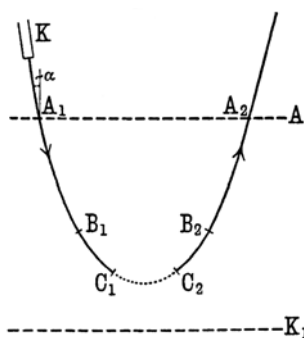


Figura 8 - Da Gehrcke e Seeliger, *Verh.*, 15 (1912), 335-343.

Con considerazioni del tutto analoghe al caso del moto del proiettile, Gehrcke e Seeliger trovano una relazione tra velocità iniziale V_0 , angolo di incidenza α e velocità in corrispondenza del vertice. Inoltre individuano empiricamente due velocità limite, V_a e V_b , corrispondenti a due diversi angoli di incidenza, che indicano, la prima, la tensione a partire dalla quale il colore del fascio cambia verso le l più lunghe, la seconda, la tensione minima alla quale gli elettroni non riescono più a eccitare nel gas la luminosità.

Con una particolare geometria del catodo, Gehrcke e Seeliger riescono a modificare in modo spettacolare l'esperimento facendo produrre al cannone elettronico un ventaglio di fasci di diverso angolo di incidenza che tra le due griglie danno luogo contemporaneamente a un insieme di parabole di diversa larghezza: la traiettoria centrale ($\alpha = 0$) e le parabole più strette in prossimità del vertice sono rosse mentre le più esterne (α_{\max}) sono blu. I valori rilevati per V_a e V_b danno, nel caso dell'elio, rispettivamente 63 e 26 V; nel caso dei vapori di mercurio 30 e 10 V. Gli autori osservano che i valori di V_b si accordano con le tensioni di ionizzazione dei gas esaminati, sia pure nelle condizioni sperimentali non proprio rigorose in cui hanno operato²². Gehrcke e Seeliger concludono che il fenomeno osservato è molto simile alla scarica a bagliore e presenta analogie tra "bagliore negativo" in prossimità del catodo e parte blu della parabola, con elettroni urtanti molto energetici, e tra "colonna positiva", in corrispondenza della caduta anodica, e parte rossa della parabola, con velocità elettroniche più basse. Tra la natura spettrale della scarica a bagliore e la natura spettrale delle parabole di Gehrcke e Seeliger sembra dunque esserci analogia stretta, nonostante la diversità dei metodi impiegati per eccitare il gas e, comunque, per eccitare il gas a emettere luce deve esistere un limite inferiore per la velocità degli elettroni urtanti.

²² In effetti, il valore 'vero' della prima energia di ionizzazione dell'He è di circa 24,6 V, quella dei vapori di mercurio è di 10,4 V. I 30 V del mercurio potrebbero rappresentare la terza energia di ionizzazione, di 34,5 V, mentre i 63 V dell'elio la seconda energia di ionizzazione, di 54,4 V.

4 - L'esperimento cruciale sull'eccitazione per urti elettronici della riga 2536 del mercurio

La coincidenza numerica tra ciò che Franck ed Hertz ritengono sia il potenziale di ionizzazione e il prodotto hn , relativo alla frequenza della riga di risonanza del mercurio, insieme alle evidenze sperimentali ottenute da Gehrcke e Seeliger li spingono a pubblicare un articolo²³ che passerà alla storia come l' "esperimento di Franck ed Hertz" e verrà considerato "la prima osservazione di una riga spettrale in corrispondenza di una certa tensione [di eccitazione]"²⁴, come richiesto dalla teoria di Bohr. L'idea di Franck ed Hertz è semplice ed elegante: se si bombardano gli atomi di mercurio con elettroni di energia $E = 4,9$ eV, gli atomi assorbono tale energia e riemettono radiazione di frequenza $n = E/h$ osservabile spettroscopicamente:

"La velocità critica [degli elettroni] è una costante caratteristica per ogni gas e nei casi finora studiati è uguale al lavoro di ionizzazione. Questo risultato risponde alla teoria quantistica, perché in base a tale teoria l'energia può essere trasferita alle oscillazioni degli elettroni negli atomi non in quantità arbitrarie ma solo in determinati quanti. La questione se, come segue ancora dalla teoria quantistica, il minimo contributo di energia da trasferire sia proprio uguale al prodotto della costante di Planck h e della frequenza n di quell'elettrone che riceve l'energia, l'abbiamo finora potuta risolvere con una certa sicurezza solo per il vapore di mercurio. [...] Per poter concludere con certezza dai nostri risultati che i processi studiati hanno un andamento che corrisponde alla teoria quantistica non ci possiamo limitare a mostrare che l'energia viene trasferita solo in certi quanti ma è ancora necessario dimostrare che l'intero quanto di energia hn viene ceduto ad un unico elettrone oscillante alla frequenza n "²⁵.

Poiché tale frequenza cade nell'ultravioletto, l'apparato usato per osservare l'emissione di radiazione di lunghezza d'onda di 2536 Å deve avere pareti di quarzo, con la parte inferiore piena di mercurio riscaldato a 150 °C per produrre i vapori (Fig. 9). Al di sopra del mercurio è fissato il filamento di platino D per l'emissione degli elettroni. Affacciata al filamento c'è la griglia N, messa a terra attraverso un galvanometro. La tensione V_1 che accelera gli elettroni viene variata per gradi e contemporaneamente vengono fatte osservazioni della luce emessa dal gas con uno spettrografo di Füss per l'ultravioletto. Franck ed Hertz ottengono, per varie tensioni massime di accelerazione, una serie di fotografie dello spettro continuo causato dall'emissione del filamento a cui si sovrappone lo spettro del mercurio, costituito da una unica riga nell'ultravioletto che, confrontata con lo spettro d'arco di questo elemento, corrisponde esattamente a 2536 Å (Fig. 10).

²³ J. FRANCK, G. HERTZ, *op. cit.* in nota 1; pervenuto il 21 maggio 1914.

²⁴ Cfr. per esempio, G. JOOS, "Anregung der Spektren", in W. WIEN, F. HARMS (a cura di), *Handbuch der Experimental Physik, op. cit.* in nota 2, p. 61.

²⁵ FRANCK ed HERTZ, *op. cit.*, pp. 512 e 513.

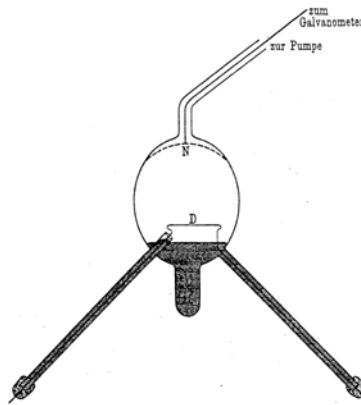


Figura 9

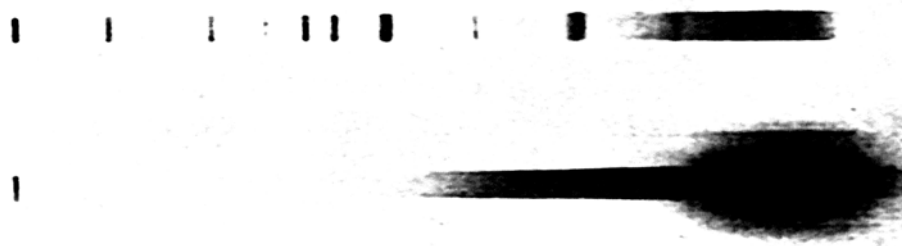


Figura 10 - Sopra, spettro d'arco dei vapori di mercurio e, sotto, spettro ottenuto con il metodo dell'urto elettronico con la riga 2536 Å.

Sfortuna aveva voluto però che in nessun caso (neppure con una tensione acceleratrice di 8 V) fosse osservabile “il minimo accenno alle altre righe del mercurio che, nello spettro d'arco, in parte superano in intensità la riga di risonanza”²⁶. Questa circostanza aveva avvalorato ancora di più la convinzione che 4,9 V fosse un potenziale di ionizzazione a cui corrispondeva la riga 2536 Å. La confusione tra potenziale di eccitazione, concetto sconosciuto prima di Bohr, e potenziale di ionizzazione era per altro inevitabile a quel tempo. Ma non si trattava solo di una confusione concettuale bensì l'indistinguibilità sperimentale tra i due potenziali derivava anche dal fatto che, con il metodo di Lenard, le corte lunghezze d'onda emesse nella maggior parte dei casi dagli atomi di gas che si diseccitavano, provocavano effetto fotoelettrico sull'elettrodo collettore. In queste condizioni, il potenziale di frenamento rallentava gli elettroni primari ma accelerava i fotoelettroni e il galvanometro segnava una corrente positiva come se fossero stati rilasciati ioni positivi per ionizzazione. Lo strumento dava cioè la stessa risposta sperimentale in entrambi i casi.

Un aspetto interessante del contributo di Franck ed Hertz riguardava la possibilità di risalire, a partire dal quanto trasferito hn dall'elettrone urtante all'“elettrone oscillante” nell'atomo di mercurio, alla determinazione di h con la stessa precisione di misura ottenibile per la velocità critica degli elettroni. In questo modo gli autori calcolarono per $h = 6,59 \cdot 10^{-27}$ erg s, con un errore possibile (del 2%),

²⁶ *Ibid.*, p. 515

inferiore a quello ottenuto a quel tempo da altri ricercatori con metodi diversi. Questo risultato rappresentava, nel 1914, la stima migliore della costante di Planck. Un tale accordo numerico incoraggiò fortemente i nostri protagonisti a esplorare le nuove strade aperte dalla teoria quantistica, grazie al metodo degli urti elettronici che poteva essere impiegato per risalire dal quanto trasferito alle lunghezze d'onda emesse e consentiva così una nuova spettroscopia "elettrica".

5 - Bohr a sostegno della sua teoria

Dopo la pubblicazione della "trilogia"²⁷ Bohr aveva steso un lungo articolo su "La teoria quantistica della radiazione e la struttura dell'atomo"²⁸ in difesa del suo modello atomico, sottoposto a critiche nonostante emergessero da più parti evidenze sperimentali favorevoli. Soprattutto nel caso dell'elio Bohr denunciava un disaccordo sensibile tra valori sperimentali della tensione di ionizzazione e valori teorici dedotti dalla sua teoria:

"Questo disaccordo apparente può forse essere spiegato assumendo che il potenziale di ionizzazione misurato non corrisponde alla rimozione dell'elettrone dall'atomo ma solo a una transizione dallo stato normale dell'atomo a qualche altro stato stazionario dove un elettrone ruota esternamente all'altro, e che la ionizzazione osservata è prodotta dalla radiazione emessa quando l'elettrone ricade nella sua posizione originaria. Questa radiazione avrebbe una frequenza sufficientemente alta per ionizzare qualche impurità eventualmente presente nel gas elio, e quindi per liberare elettroni dalla parte metallica dell'apparato".

Analoghe considerazioni per Bohr potevano essere estese ai "recenti notevoli esperimenti di Franck ed Hertz sulla ionizzazione nel vapore di mercurio. Questi esperimenti mostrano sorprendentemente che un elettrone non perde energia per collisione con un atomo di mercurio se la sua energia è minore di un ben determinato valore, di 4,9 V, ma non appena l'energia è uguale a questo valore l'elettrone ha una grande probabilità di perdere tutta la sua energia per urto con l'atomo. E' stato inoltre dimostrato che l'atomo, come risultato di un tale urto, emette una radiazione che consiste solo nella riga UV del mercurio di lunghezza d'onda 2536 [Å] e si è sottolineato come, se la frequenza di questa riga è moltiplicata per la costante di Planck, si ottenga un valore che, nel limite degli errori sperimentali, è uguale all'energia acquistata da un elettrone che attraversa una differenza di potenziale di 4,9 V. Franck ed Hertz assumono che 4,9 V corrisponda all'energia necessaria per rimuovere un elettrone dall'atomo di mercurio ma sembra che *i loro esperimenti possano forse essere consistenti con il postulato che questa tensione corrisponde solo alla transizione dallo stato normale a qualche altro stato stazionario dell'atomo neutro*. Alla luce dell'attuale teoria ci dovremmo aspettare che il valore dell'energia necessaria a rimuovere un elettrone dall'atomo di mercurio possa essere calcolata dal limite delle serie delle righe singole di Paschen²⁹ 1850, 1403, 1269. Poiché il vapore di mercurio assorbe luce di lunghezza d'onda 1850³⁰, le righe di questa serie così come la riga 2536 devono corrispondere a una transizione dallo stato normale dell'atomo ad altri stati stazionari dell'atomo neutro. *Un tale calcolo dà 10,5 V per il potenziale di ionizzazione invece di 4,9 V*. Se le considerazioni precedenti sono corrette si vedrà che le misure di Franck ed Hertz danno un sostegno molto forte alla

²⁷ N. BOHR, *On the constitution of atoms and molecules*, "Phil. Mag.", 26,1913, pp. 1-25, pp. 476-502, pp. 857-875; 27, 1914, p. 506. I contributi vengono pubblicati rispettivamente nel luglio, settembre e novembre del 1913.

²⁸ N. BOHR, *On the Quantum theory of radiation and the structure of the atom*, "Phil. Mag.", 30,1915, pp. 392-415, agosto 1915.

²⁹ F. PASCHEN, "Ann. d. Phys.", 35,1911, p. 860, nota di Bohr.

³⁰ J. STARK, "Ann. d. Phys.", 42,1913, p. 239, nota di Bohr.

teoria considerata in questo articolo. Se, al contrario, il potenziale di ionizzazione del mercurio si dovesse dimostrare così basso come quello assunto da Franck ed Hertz ciò costituirebbe una seria difficoltà per l'interpretazione della costante di Rydberg, comunque per lo spettro del mercurio poiché esso contiene righe di frequenza più grande della riga 2536³¹.

Lo stesso Bohr, l'anno prima aveva cercato di far ripetere a Manchester gli esperimenti di Franck ed Hertz per misurare la tensione di ionizzazione dei vapori di mercurio e tentare di distinguere, per via sperimentale, tra "corrente fotoelettrica" e "corrente ionica" ma il tubo a scarica si era rotto e lo scoppio della guerra aveva impedito la ripresa dell'esperimento³².

Fu dunque Bohr a individuare nel contributo di Franck ed Hertz una conferma evidente alla sua teoria quando questi ultimi erano ancora ben lontani dal leggere nei propri risultati un nesso con il nuovo rivoluzionario modello atomico. Nel 1916 a Franck ed Hertz venne richiesto di stendere un report di ricerca sulla "Cinetica di elettroni e ioni nei gas"³³. Forse anche nel tentativo di rivendicare la priorità di risultati che, sebbene in parte oscuri, promettevano di essere notevoli, i due fisici si misero all'opera. L'esperimento del 1914 non aveva infatti attirato solo l'attenzione di Bohr, direttamente coinvolto nell'impresa, ma anche quella di alcuni fisici, soprattutto statunitensi, che si occupavano a quel tempo di conduzione dell'elettricità nei gas³⁴. Ma Franck ed Hertz, benché nel frattempo fossero venuti a conoscenza delle obiezioni di Bohr, si limitarono a riassumere accuratamente i loro risultati sperimentali e a continuare a dibattersi intorno al dilemma emissione di radiazione-ionizzazione:

"Si potrebbe ipotizzare che nel trasferimento di energia con raggi di 4,9 V [dagli elettroni] agli atomi di mercurio questi non ionizzano affatto e viene piuttosto eccitata solo emissione di luce. In passato abbiamo creduto di dover escludere questa idea perché dal comportamento della scarica nel vapore di mercurio credevamo che il primo urto anelastico che l'elettrone subisce, dovesse essere anche un urto ionizzante. Ci eravamo ripromessi di ripetere le misure della tensione di ionizzazione secondo il nostro vecchio procedimento ma non lo abbiamo più fatto e nel frattempo a colmare questa lacuna è arrivato Newman³⁵ che con il nostro vecchio metodo di misura ha trovato per la tensione di ionizzazione del mercurio 5 V. Né ci sembra valida l'ipotesi avanzata di recente da Bohr che nell'elio raggi di 20,5 V e nel mercurio di 4,9 V provochino ionizzazione secondaria di impurità nel gas o non appena luce di lunghezza d'onda corta produca un effetto fotoelettrico sugli elettrodi, perché i massimi netti mostrano che i nuovi elettroni sono prodotti dove avviene urto anelastico"³⁶.

³¹ BOHR, 1915, *op. cit.*, pp. 410-411. Corsivi aggiunti.

³² N. BOHR, *On the interaction between light and matter*, 1920, in *Collected Works*, vol. II, J.R. NIELSEN (a cura di), Amsterdam 1976, p. 239.

³³ J. FRANCK, G. HERTZ, *Über Kinetik von Elektronen und Ionen in Gasen*, "Phys. Zeits.", 17, 1916, pp. 430-440, pervenuto nel luglio del 1916.

³⁴ Cfr. per es. R.A. MILLIKAN, *Theoretical considerations relating to the single-lined and the many-lined spectrum of mercury*, "Phys. Rev.", 9, 1917, pp. 378-382, dove Millikan dichiara di aver sollevato la questione del "single-lined spectrum", trovato da Franck ed Hertz, già nel convegno della Physical Society di Chicago, del nov. 1914; B. DAVIS, *Application of a theory of ionization by impact to the experiments of Franck and Hertz*, "Phys. Rev.", 5, 1915, pp. 118-125; K.T. COMPTON, *The theory of ionization by collision*, "Phys. Rev.", 7, 1916, pp. 489-517.

³⁵ F.H. NEWMAN, *Note on the ionization potential of mercury vapour*, "Phil. Mag.", 28, 1914, pp. 753-756.

³⁶ FRANCK ed HERTZ, 1916, *op. cit.*, p. 438.

Nel passo appena citato compare dunque il cenno all'ipotesi avanzata da Bohr nel 1915. Ma le obiezioni del fisico danese (per altro non accompagnate da alcun riferimento bibliografico) non vengono colte da Franck ed Hertz, sicché la presunta conferma del modello atomico è ancora totalmente estranea alle intenzioni degli autori.

6 - Un cambiamento radicale di rotta: la conversione di Franck ed Hertz alla teoria atomica di Bohr

Fu solo nel 1919 che Franck ed Hertz si convertirono finalmente alle idee di Bohr con un articolo dal titolo esplicito su "La conferma della teoria atomica di Bohr nello spettro ottico mediante l'indagine di urti anelastici di elettroni lenti con molecole di gas"³⁷. A guerra finita, "nel tempo trascorso, che non ci ha consentito di condurre in proprio esperimenti", commentano Franck ed Hertz, "il settore è stato affrontato e ampliato soprattutto da parte dei fisici americani, con il risultato che la teoria atomica di Bohr è stata confermata splendidamente qui come negli spettri Röntgen e nelle ricerche sulla struttura fine delle righe dell'elio"³⁸.

Tra i fisici americani che costrinsero Franck ed Hertz a staccarsi dal vecchio contesto alla Townsend e a reinterpretare i propri esperimenti alla luce della teoria di Bohr vengono citati J.T. Tate dell'università del Minnesota, H.J. van der Bijl della compagnia Western Electrical di New York, B. Davis e F.S. Goucher della Columbia University, tutti esplicitamente a favore del nuovo modello atomico. Tate³⁹, che aveva ripetuto gli esperimenti di Franck ed Hertz ma a pressioni più basse, aveva trovato per la tensione di ionizzazione un valore attorno a 10 V, in ottimo accordo con il valore teorico deducibile dal modello di Bohr. In corrispondenza dello stesso valore, anche Goucher e collaboratori avevano trovato un aumento sensibile della corrente anche se non erano in grado di spiegare quante e quali ionizzazioni avvenissero nel gas. Van der Bijl⁴⁰, a proposito dell'esperimento cruciale del 1914, in una breve nota aveva subito centrato il problema:

"È" chiaro che l'esperimento di Franck ed Hertz non mostra necessariamente che la ionizzazione ha luogo sotto l'influenza di raggi catodici di 4,9 V ma che gli urti sono elastici fino a che gli elettroni collidenti hanno acquistato una energia corrispondente a 4,9 V. Questo indica piuttosto che quando l'elettrone urta una molecola con 4,9 V di energia, cede la sua energia alla molecola ma se questa energia è trasformata sia in ionizzazione sia in radiazione, come Franck ed Hertz hanno assunto, o in sola radiazione, non si può decidere dal loro esperimento"⁴¹.

Il motivo della indistinguibilità nella risposta sperimentale era stato individuato senza preamboli da van der Bijl nell'effetto fotoelettrico sugli elettrodi, con la conclusione che il potenziale di ionizzazione doveva essere di circa 10 V e non di 4,9 V, "un risultato che se venisse corroborato sperimentalmente dovrebbe essere in grado di spiegare la teoria di Bohr"⁴². Van der Bijl aveva affrontato l'argomento in un

³⁷ J. FRANCK, G. HERTZ, *Die Bestätigung der Bohrschen Atomtheorie in optischen Spektrum durch Untersuchungen der unelastischen Zusammenstösse langsamer Elektronen mit Gasmolekülen*, "Phys. Zeits.", 20,1919, pp. 132-143.

³⁸ FRANCK ed HERTZ, 1919, *op. cit.*, p. 133.

³⁹ J.T. TATE, *The low potential discharge spectrum of mercury vapor in relation to ionization potentials*, "Phys. Rev.", 7,1916, pp. 686-687; *The passage of low speed electrons through mercury vapor and the ionizing potential of mercury vapor*, "Phys. Rev.", 10, 1917, pp. 77-81.

⁴⁰ H.J. VAN DER BIJL, *Note on the ionizing potential of metallic vapors*, "Phys. Rev.", 9, 1917, pp. 173-175.

⁴¹ VAN DER BIJL, *ibid.*, p. 173.

⁴² VAN DER BIJL, *ibid.*, p. 175.

lavoro successivo⁴³ dove aveva ribadito che l'eccitazione della riga 2536 forniva una sorgente di luce ultravioletta nel tubo a scarica, in grado di liberare fotoelettroni sull'elettrodo collettore che favorivano così la ionizzazione. Aveva inoltre sollevato la questione dello spettro a una riga trovata da Franck ed Hertz, compatibile con la teoria di Bohr solo in caso di eccitazione e non di ionizzazione, avanzando anche una possibile spiegazione della mancata eccitazione dell'intero spettro all'aumentare della tensione di accelerazione, addebitandola alla presenza di pochi elettroni lenti piuttosto che di un "fascio denso" di elettroni più energetici.

Il quadro concettuale, dunque, nel 1919 muta radicalmente per Franck ed Hertz: i lavori di ionizzazione sono piuttosto potenziali di eccitazione, che corrispondono a transizioni quantistiche da uno stato stazionario all'altro; nel caso dei vapori di mercurio, a 4,9 V si aveva pertanto solo la transizione tra lo stato fondamentale e la "traiettoria" quantistica successiva con ritorno allo stato fondamentale e riemissione della riga 2537. Il potenziale di ionizzazione, come previsto dalla teoria di Bohr, corrispondeva invece alla riga 1188 Å, individuata da Paschen⁴⁴ qualche anno prima, e che implicava un prodotto $hn(1188) \cong 10,4$ V. Una analoga correzione di rotta andava fatta per l'elio, per il quale Franck ed Hertz avevano misurato una tensione critica di 20,5 V che corrispondeva dunque a una tensione di eccitazione e non di ionizzazione. C'era poi l'altra questione, suggerita sempre da Bohr e, indipendentemente, da van der Bijl, del rilascio di fotoelettroni sull'elettrodo collettore ogni qualvolta l'atomo, eccitandosi per vari potenziali critici, emetteva radiazione ultravioletta, circostanza che costringeva a rileggere gli esperimenti tenendo in conto sia la comparsa di corrente fotoelettrica sia l'innescò della corrente di ionizzazione. Quando si verificava effetto fotoelettrico sull'elettrodo collettore, P perdeva cariche negative, si caricava positivamente e per ogni comparsa di una riga "attiva fotoelettricamente", nella curva tensione-corrente doveva presentarsi una inflessione (denominata da Franck ed Hertz *Knick*). A partire dalle conclusioni di van der Bijl, Davis e Goucher⁴⁵, con un abile artificio nei collegamenti del circuito nella disposizione alla Lenard a 4 elettrodi (Fig. 11), erano riusciti già nel 1917 a distinguere, sempre nel caso dei vapori di mercurio, la ionizzazione indotta fotoelettricamente dalla ionizzazione per urto vera e propria, realizzando l'esperimento che lo stesso Bohr avrebbe voluto far condurre a Manchester nel 1914.

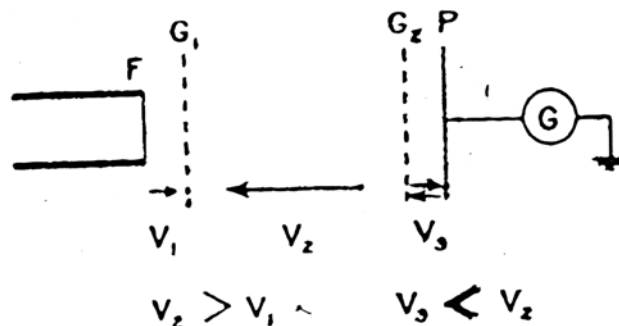


Figura 11 - Metodo di Lenard, modificato da Davis e Goucher per distinguere tra corrente fotoelettrica e corrente ionica (da Arnot, cit. p.18).

⁴³ H.J. VAN DER BIJL, *Theoretical considerations concerning ionization and single-lined spectra*, "Phys. Rev.", 10,1917, pp. 546-556.

⁴⁴ F. PASCHEN, "Ann. d. Phys.", 42,1913, p. 840.

⁴⁵ B. DAVIS, F.S. GOUCHER, *Ionization and excitation of radiation by electron impact in mercury vapor and hydrogen*, "Phys. Rev.", 10,1917, pp. 101-115.

Il metodo consisteva nell'applicare tra l'elettrodo collettore P e la griglia G_2 una tensione V_3 commutabile, in modo da rendere P positivo rispetto a G_2 o viceversa. Se la tensione V_1 che accelera gli elettroni emessi da F viene aumentata fino a raggiungere il valore del primo potenziale critico (4,9 V), gli atomi diseccitandosi emettono radiazione ultravioletta che investendo gli elettrodi G_2 e P può provocare il rilascio di fotoelettroni. Se per esempio V_3 è tale che P sia positivo rispetto a G_2 , i fotoelettroni emessi da P sono frenati dal controcampo mentre quelli emessi da G_2 sono attratti da P e il galvanometro segna una corrente I_{galv} negativa. Se ora, all'aumentare di V_1 si raggiunge la tensione di ionizzazione, nello spazio tra G_1 e G_2 vengono prodotti vicino a G_1 ioni positivi che vengono accelerati verso G_2 e se hanno sufficiente energia riescono a superare V_3 arrivando su P. In tal caso, la corrente del galvanometro cambia segno e denuncia il passaggio dalla eccitazione alla ionizzazione del gas. Invertendo V_3 , i fotoelettroni prodotti in G_2 sono frenati dal controcampo e non raggiungono l'elettrodo collettore, mentre i fotoelettroni prodotti in P sono accelerati verso G_2 di modo che la corrente I_{galv} ora è positiva e ha un andamento speculare rispetto al caso precedente.

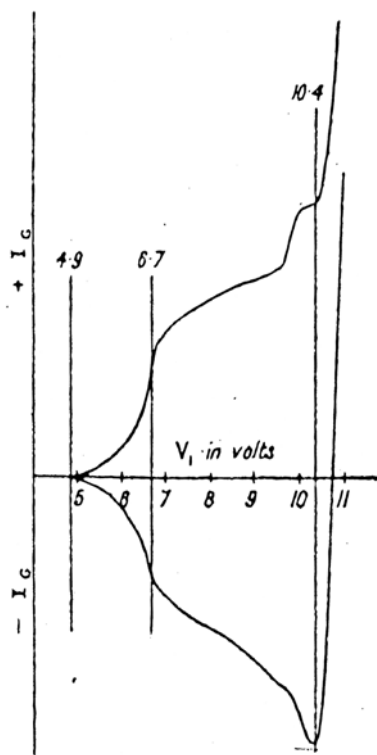


Figura 12 - Curva tensione-corrente per i vapori di mercurio ottenuta con il metodo di Davis e Goucher, con gli andamenti della corrente fotoelettrica e ionica (da Arnot, cit., p. 19).

Quando V_1 raggiunge il valore del potenziale di ionizzazione, la corrente I_{galv} (indipendentemente dal verso di V_3) è ancora positiva e aumenta bruscamente (Fig. 12). Con il loro metodo, Davis e Goucher avevano dunque individuato senza più ambiguità sia i due potenziali di risonanza, con sola emissione di radiazione, sia il

potenziale di ionizzazione, risultati “di interesse considerevole dal punto di vista della teoria dell’atomo di Bohr”⁴⁶.

7 - Oscillatori di Planck o atomo di Bohr?

Occorre dire che neppure nel 1919 Franck ed Hertz erano riusciti a fornire una prova sperimentale univocamente a favore del modello atomico di Bohr, precisamente per i casi nei quali la relazione $V_{\text{ris}}e = h\nu_{\text{ris}}$, valida per la frequenza di risonanza, veniva meno. Il metodo dell’urto elettronico aveva consentito di stabilire la natura quantistica del trasferimento di energia dall’elettrone all’atomo ma non era in grado di dare indicazioni sperimentali sulla struttura interna dell’atomo. I risultati fino allora prodotti riguardavano infatti una conferma sperimentale che poteva essere interpretata anche a favore della condizione di eccitazione di un oscillatore di Planck o, come avevano ipotizzato inizialmente Franck ed Hertz, della relazione di Einstein per l’effetto fotoelettrico, ma non necessariamente del modello atomico di Bohr. Il vero esperimento cruciale in grado di discriminare tra i due modelli consisteva quindi nello stabilire se l’atomo potesse emettere anche energie inferiori a quella assorbita, mostrando transizioni da uno stato eccitato a uno stato intermedio senza ritorno allo stato fondamentale.

Nel frattempo le strade di Franck ed Hertz si erano separate: nel 1920 Franck si era trasferito all’università di Göttingen come professore di fisica sperimentale mentre Hertz si era spostato a Eindhoven, come ricercatore nel laboratorio di fisica della Philips Glühlampenfabrik. L’attenzione di Franck e collaboratori si era spostata verso l’elio⁴⁷, del quale erano riusciti finalmente a misurare il giusto potenziale di ionizzazione con un nuovo procedimento di misura che combinava la disposizione di Lenard a quattro elettrodi con il metodo di Davis e Goucher e che aveva consentito a Franck di scoprire anche l’esistenza degli stati metastabili, non rilevabili per via spettroscopica. Quanto ai vapori di mercurio, la nuova disposizione sperimentale aveva permesso al gruppo di ricerca⁴⁸ la rilevazione di una curva (Fig. 13) con ben 18 potenziali di eccitazione prima della ionizzazione, alcuni dei quali mai osservati prima con la spettroscopia ottica. Venne inoltre calcolato dai dati sperimentali un valore medio per la costante di Planck di $6,589 \cdot 10^{-27}$ erg s che rappresentò di nuovo la determinazione più precisa di h nel campo delle l ottiche.

Hertz dal canto suo preferì tornare nel 1923⁴⁹ alla disposizione sperimentale che impiegava il metodo dell’urto elettronico anelastico applicato a neon e argon, con curve tensione-corrente che invece di mostrare *Knicke* denunciavano massimi netti in corrispondenza di velocità quasi nulle degli elettroni che hanno subito urti anelastici. Il metodo inoltre consentiva, con l’introduzione di un secondo filamento, di studiare in successione eccitazione e ionizzazione senza lo svantaggio di avere, come con il metodo di Davis e Goucher, ad alti livelli energetici una sovrapposizione di effetti causata dagli urti anelastici che avvengono a tensioni critiche più basse.

⁴⁶DAVIS, GOUCHER, *ibid.*, p. 110.

⁴⁷J. FRANCK, P. KNIPPING, *Die Ionisierungsspannungen des Heliums*, “Phys. Zeits.”, 21, 1919, pp. 481-488, pervenuto il 26 giugno 1919.

⁴⁸J. FRANCK, E. EINSPORN, *Über die Anregungspotentiale des Quecksilbersdampfes*, “Zeits. f. Phys.”, III, 1, 1920, pp. 18-29.

⁴⁹G. HERTZ, *Über die Anregungs- und Ionisierungsspannungen von Neon und Argon und ihren Zusammenhang mit den Spektren dieser Gase*, “Zeits. f. Phys.”, 18, 1923, pp. 307-316.

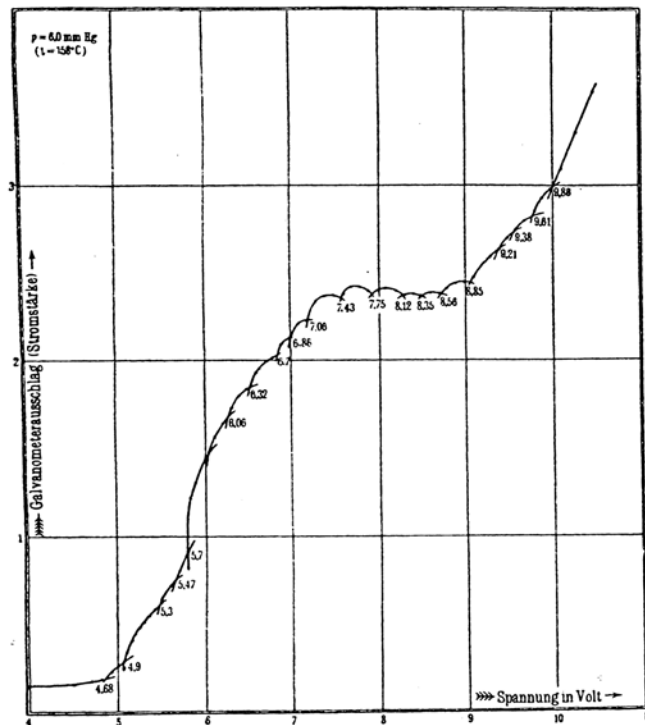


Figura 13 - Curva tensione-corrente per i vapori di mercurio, ottenuta con il metodo fotoelettrico, Franck e Einsporn, *Zeits. f. Phys.*, III, 1 (1920) 18-29.

Per il neon, le tensioni misurate, sia di eccitazione sia di ionizzazione, risultarono in ottimo accordo con lo schema dei livelli costruito secondo Bohr e le osservazioni di Paschen (1919). Per l'argon Hertz non riuscì invece a fare un confronto perché lo schema dei livelli ottenuto per via ottica era ancora sconosciuto.⁵⁰ L'ultimo contributo decisivo di Hertz in grado di verificare in modo completo il modello atomico di Bohr venne pubblicato tra il 1924 e il 1925⁵¹:

“Dal punto di vista sperimentale, la determinazione di una singola tensione di eccitazione è stata dimostrata finora con sicurezza solo per le righe di risonanza dei metalli alcalini, alcalinoterrosi e dei metalli dello stesso gruppo del sistema periodico. Anche il valore della tensione di eccitazione si è mostrato in accordo con il valore previsto dalla teoria quantistica. *Mentre il carattere quantistico del processo si è potuto dimostrare sperimentalmente in modo diretto, i risultati relativi a queste righe, al contrario, nulla dicono rispetto al modello atomico di Bohr poiché per tutte le righe di assorbimento dell'atomo non eccitato, e quindi anche per le righe di risonanza, la tensione di eccitazione si ottiene in modo equivalente, sia per l'atomo di Bohr sia per l'oscillatore di Planck, dalla frequenza data dalla relazione hn .* Per la

⁵⁰ Analoghe misure verranno condotte da Hertz e R.K. Kloppers anche per i gas nobili più pesanti, krypton e xenon. G. HERTZ, R.K. KLOPPERS, *Anregungs- und Ionisierungsspannungen der Edelgase*, “*Zeits. f. Phys.*”, 39,1925, pp. 463-469.

⁵¹ G. HERTZ, *Über die Anregung von Spektrallinien durch Elektronenstoss*, parte I, “*Zeits. f. Phys.*”, 22,1924, 18-26; G. HERTZ, J.C. SCHARP DE VISSER, parte II, *ivi*, 31,1925, pp. 470-474.

verifica sperimentale dell'interpretazione di Bohr dei termini di serie come valori di energia, erano perciò necessarie osservazioni sull'eccitazione di righe di serie più elevate⁵².

Questo compito era stato già affrontato da Franck e collaboratori per il mercurio e l'elio, combinando il metodo dell'urto elettronico con le osservazioni spettroscopiche dirette, e da altri ricercatori. Nessuno però, stranamente, era riuscito a ottenere risultati convincenti e tra loro consistenti. L'emissione di righe spettrali relative ai termini più alti per le varie tensioni di eccitazione, cioè, non si verificava e a volte si verificava tutta insieme solo dopo la ionizzazione. Hertz contava di superare l'ostacolo, convinto del fatto che le discordanze derivassero da una disposizione sperimentale non ottimale. E aveva ragione, poiché le differenze tra una tensione di eccitazione e la successiva erano così piccole che bastavano piccole disuniformità nelle velocità del fascio degli elettroni per perdere la condizione critica. Le principali fonti di errore furono individuate da Hertz nella caduta di tensione che si verificava lungo il filamento e che non consentiva di avere elettroni "di velocità uniforme" (ovvero con lo stesso spettro di velocità), nelle maglie troppo larghe della griglia che favorivano la scarica ad arco e in particolare nella carica spaziale che si formava attorno al filamento, quando la densità di corrente elettronica aumentava. Per evitare questi disturbi, Hertz modificò la forma del catodo caldo in modo da fargli emettere elettroni 'monocromatici' ("catodo equipotenziale"), scelse una griglia a maglie più strette, aggiunse al gas in esame, tracce di un gas estraneo con una tensione di ionizzazione più bassa (per esempio, tracce di vapore di mercurio in neon), in modo tale che gli ioni positivi prodotti alla ionizzazione, potessero annullare la carica spaziale senza perturbare l'eccitazione delle righe del gas in studio. Con questa disposizione sperimentale migliorata ottenne così una serie di spettrogrammi per i vapori di mercurio, per l'elio e il neon, per diverse velocità elettroniche (Fig. 14). Calcolò poi, per le righe trovate, le tensioni di eccitazione dalla tensione di ionizzazione e dai termini di serie. Il risultato notevole fu che per ogni riga esisteva una determinata tensione di eccitazione che l'elettrone collidente doveva possedere per eccitare l'atomo a emettere quella riga e che tali tensioni erano calcolabili dai termini di serie, esattamente come previsto da Bohr.

Nella seconda parte del lavoro, condotto in collaborazione con Scharp de Visser, venne scelto il neon, del quale erano note le tensioni di eccitazione e di ionizzazione misurate con il metodo elettrico, per fare un controllo incrociato con le misure fotometriche delle intensità di diverse righe in funzione della velocità degli elettroni collidenti. Il valore calcolato della tensione di ionizzazione attraverso i termini di serie risultò in ottimo accordo con il valore misurato con il metodo elettrico.

Grazie al raffinamento degli apparati sperimentali, Hertz era così finalmente riuscito a dare conferma completa al modello atomico di Bohr e a chiarire anche quel disaccordo inspiegabile, trovato per la prima volta da Franck ed Hertz nell'articolo 'cruciale' del 1914, nel quale si erano imbattuti tutti i ricercatori dopo di loro: quando si eccitava un gas mediante urto elettronico, al crescere della velocità degli elettroni, secondo Bohr dovevano comparire in successione diverse righe che al contrario comparivano simultaneamente solo per valori del potenziale maggiori del potenziale di ionizzazione.⁵³ Un tale disaccordo aveva portato perfino a dubitare delle ipotesi di Bohr che, al contrario, con la nuova disposizione sperimentale, che consentiva in particolare di rimuovere la carica spaziale, vennero pienamente confermate.

⁵² G. HERTZ, 1924, *op. cit.*, p. 19. Corsivi aggiunti.

⁵³ Questo spiegava in particolare perché, nel famoso esperimento del 1914 non ci fosse traccia della riga 1849 Å a 6,7 V con una tensione di eccitazione di 8 V.

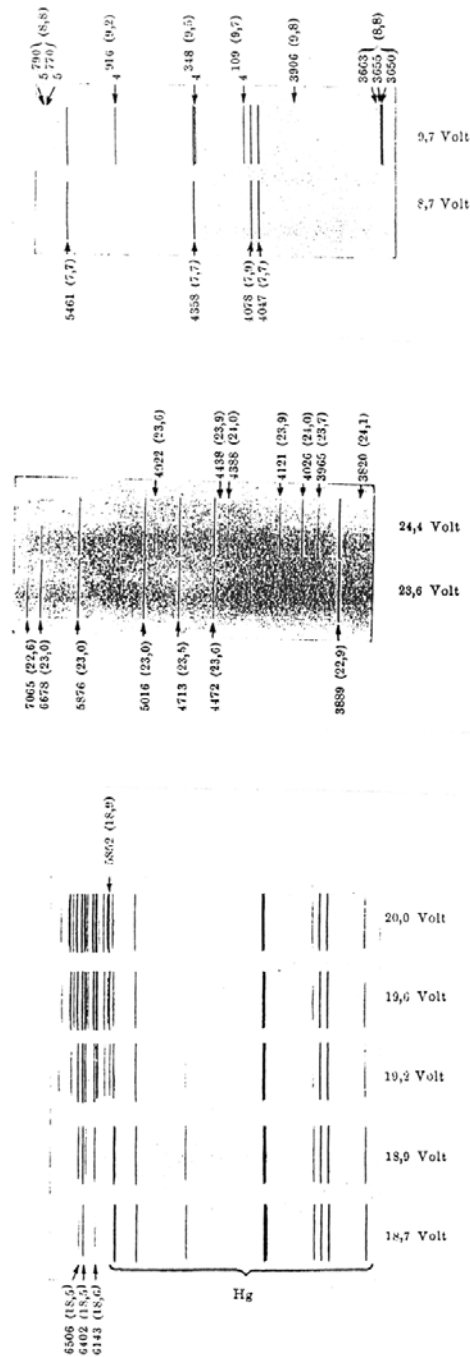


Figura 14 - Spettrogrammi ottenuti da Hertz (con il catodo equipotenziale) per il mercurio, l'elio e il neon (dall'alto verso il basso), eccitando elettroni di diversa velocità. I valori in parentesi indicano le tensioni di eccitazione calcolate dalla tensione di ionizzazione e dai termini di serie, Hertz, *Zeits. f. Phys.*, 22 (1924) 18-26.

Conclusioni

Nel 1925 Franck ed Hertz vennero insigniti del premio Nobel per la fisica. Il riconoscimento venne a coronare un processo lungo e laborioso, durato dal 1913 al 1925, che portò per raffinamenti successivi delle tecniche sperimentali, a confermare senza più ambiguità la validità del modello atomico di Bohr. Gli esperimenti di Franck ed Hertz accompagnarono così il decollo e il consolidarsi della teoria di Bohr fino al suo superamento intorno al 1925. Quanto al riconoscimento della crucialità dell'esperimento del 1914, ciò avvenne a opera dello stesso Bohr e dei suoi primi fermi sostenitori, e nella piena iniziale inconsapevolezza di Franck ed Hertz. C. W. Oseen, membro della Commissione di Fisica dell'Accademia Reale Svedese delle Scienze, che presentò le motivazioni del premio in occasione della sua assegnazione nel dicembre del 1926, non mancò di rilevare il ruolo di sostegno al modello di Bohr giocato dalle esperienze di Franck ed Hertz proprio rispetto a quelle ipotesi di base che nonostante la crisi della vecchia fisica quantistica continuavano a restare valide: "i metodi per verificare queste ipotesi sono il lavoro di James Franck e di Gustav Hertz"⁵⁴. Hertz, nella conferenza⁵⁵ tenuta durante la cerimonia di assegnazione del premio, su "I risultati dei test di collisione elettronica alla luce della teoria dell'atomo di Bohr", riconobbe che "il significato delle ricerche sulla ionizzazione di atomi per urto elettronico è dovuto al fatto che esse hanno fornito una prova sperimentale diretta delle assunzioni di base della teoria dell'atomo di Bohr". Franck⁵⁶, che aveva avuto il compito di presentare il metodo di eccitazione di atomi per urto elettronico in una prospettiva storica, fu molto esplicito nell'illustrare anche l'evoluzione del loro programma di ricerca che, dopo aver seguito "una falsa e tortuosa via"⁵⁷, fu alla fine illuminato dalla teoria di Bohr. Dopo aver esposto le tecniche per rilevare le curve tensione-corrente per i vapori di mercurio che, con le dovute modifiche, davano "una prova visiva del trasferimento discontinuo di energia degli elettroni per urto", con dei massimi ben pronunciati che consentivano di risalire al valore esatto del potenziale di risonanza (4,9 V), giustificò così il loro percorso di ricerca nel 1914:

"Abbiamo preso questo valore per la tensione di ionizzazione (lo stesso abbiamo fatto per l'elio, con la tensione misurata con lo stesso metodo che era di circa 20 V). Cionondimeno, il carattere quantistico del trasferimento di energia non poteva aiutare ma poteva far pensare a noi, che praticamente fin dall'inizio fummo testimoni da vicino degli sviluppi della teoria quantistica di Planck, di impiegare la teoria formulata da Einstein per spiegare l'effetto fotoelettrico! Poiché qui energia luminosa è convertita in energia cinetica degli elettroni, non poteva forse essere nel nostro caso che energia cinetica degli elettroni fosse convertita in energia luminosa? Se questo era il caso sarebbe stato facile dimostrarlo nel caso del mercurio per l'equazione $(1/2) mv^2 = hn$ riferita a una riga di 2537 Å che è facilmente accessibile nella regione ultravioletta. Questa riga è la riga di assorbimento di lunghezza d'onda più grande del vapore di mercurio. E' spesso citata come riga di risonanza-Hg poiché R.W. Wood ha condotto su di essa importanti esperimenti sulla fluorescenza di risonanza. Se la conversione ipotizzata di energia cinetica in luce per urto poteva avere luogo, allora bombardando con elettroni di 4,9 eV doveva apparire la riga 2537 Å e solo questa di tutto lo spettro di righe del mercurio"⁵⁸.

⁵⁴ C.W. OSEEN, in *Nobel Lectures Physics, 1922-1943, op. cit.*, p. 96.

⁵⁵ G. HERTZ, *The results of the electron-impact tests in the light of Bohr's theory of atoms, ibidem*, pp. 112-129.

⁵⁶ J. FRANCK, *Transformations of kinetic energy of free electrons into excitation energy of atoms by impacts, ibidem*, pp. 98-111.

⁵⁷ FRANCK, *ivi*, p. 108.

⁵⁸ J. FRANCK, *ivi*, p. 104.

E a proposito del mancato riconoscimento al modello atomico di Bohr aggiunte:

“In seguito mi è sembrato totalmente incomprensibile il fatto che mancammo di riconoscere il significato fondamentale della teoria di Bohr al punto che non l'abbiamo mai menzionata neppure una volta nell'articolo in questione [del 1914]. Sfortunatamente non abbiamo potuto rettificare il nostro errore (in parte a causa di circostanze esterne) chiarendo noi stessi le incertezze che ancora sussistevano sperimentalmente”⁵⁹.

A molti anni di distanza, Franck dichiarò più semplicemente di non conoscere il contributo di Bohr, pubblicato sei mesi prima del loro⁶⁰ mentre nel necrologio⁶¹ del grande fisico danese, morto nel novembre del 1962, sceglierà di trattare come esempio dei contributi di Bohr proprio l'articolo del 1913 sull'atomo di idrogeno, accolto da principio da diffidenza e ostilità. E citerà, tra i fisici in disaccordo con le idee di Bohr proprio sé ed Hertz ammettendo però, questa volta, di avere letto e volutamente ignorato il primo articolo della trilogia:

“In Germania il lavoro di Bohr nel primo anno dopo la sua pubblicazione non venne letto molto. Si sorvolò la letteratura e poiché in generale a quel tempo c'era una diffidenza esplicita verso i tentativi di costruire, con lo stato delle conoscenze di allora, modelli atomici pochi si diedero la pena di leggere con cura il lavoro. C'è in particolare da sottolineare che anche Gustav Hertz e l'estensore di queste righe erano all'inizio incapaci di capire il grande significato del lavoro di Bohr. Noi avremmo avuto realmente tutti i motivi di leggerlo esattamente poiché avevamo appena finito il nostro lavoro sull'eccitazione della riga 2537 Å del mercurio causata da urti elettronici. Abbiamo letto il lavoro di Bohr prima che il nostro manoscritto andasse in stampa ma decidemmo di spedirlo senza citare il lavoro di Bohr, poiché trovammo la difficoltà apparente di capire la forte ionizzazione nell'arco del mercurio se, come Bohr richiedeva, l'energia necessaria alla ionizzazione dell'atomo superava sensibilmente l'energia necessaria all'eccitazione. La difficoltà si poteva in realtà presentare se gli elettroni acquistavano la loro energia nell'arco luminoso solo attraverso il campo elettrico. Ora sappiamo che nel plasma dell'arco domina la ionizzazione di temperatura. Che noi credessimo a una contraddizione può apparire comprensibile perché della teoria del plasma non si sapeva nulla. Ma che noi lo ritenessimo sufficiente per non accettare le idee di Bohr, dimostra l'incomprensione del loro significato”⁶².

Al di là delle contraddizioni che emergono nei ricordi sfumati, a tanti anni di distanza, degli stessi protagonisti della vicenda, divengono più chiari i motivi del perché Franck ed Hertz giunsero così tardi a 'vedere' nei loro risultati la conferma alle idee di Bohr. Non si trattò solo di difficoltà legate ai risultati sperimentali quanto piuttosto di un condizionamento dovuto alla scarsa credibilità di cui soffrì il programma di ricerca di Bohr nei suoi primi anni di vita negli ambienti tedeschi. I fisici americani avevano infatti già nel 1916 riconosciuto nei risultati di Franck ed Hertz indizi a favore del modello di Bohr mentre gli stessi protagonisti arrivarono a questa conclusione solo nel 1919. Certamente, le gravi "circostanze esterne" legate alla guerra avevano fortemente penalizzato i due fisici tedeschi ma a loro sfavore avevano giocato anche motivazioni legate all'autorevolezza faticosamente conquistata dalla teoria di Bohr, che aveva contribuito a determinare una situazione

⁵⁹ J. FRANCK, *ivi*, pp. 105-106.

⁶⁰ Cfr. G. HOLTON, On the recent past of Physics, "Am. J. of Phys.", 29 (1961), pp. 805-810, che riporta una conversazione di J. Franck, Educational Services, Inc., Watertown, Mass., 1961.

⁶¹ J. FRANCK, *Niels Bohrs Persönlichkeit*, "Naturwiss.", 9, 1963, pp. 341-343.

⁶² *Ibid.*, p. 341.

M. Grazia Ianniello - Il contributo di Franck ed Hertz all'affermazione del modello atomico di Bohr

in cui, citando Holton, “la mancanza di plausibilità di una teoria diviene un ostacolo serio quasi come la mancanza di buoni risultati sperimentali”.⁶³

⁶³ G. HOLTON, *op. cit.*, p. 808.