

I coniugi Pierre e Marie Curie

Marco Fontani, Mariagrazia Costa
Dipartimento di Chimica "Hugo Schiff"
Università di Firenze
marco.fontani@unifi.it

QUEL RAMO, IN OMBRA, DELLA DINASTIA CURIE

"Curie" è uno dei quei nomi fortunati che dice qualcosa anche al grande pubblico, la cui conoscenza non è rimasta circoscritta a coloro che si occupano di chimica, fisica o storia della scienza. Esso è associato ad un membro "acquisito" di questa famiglia, Maria Salomea Skłodowska, la quale sposandosi nel 1895 con Pierre Curie prese da quest'ultimo il cognome. Fu una storia di reciproco scambio intellettuale e simbiosi scientifica ma anche "dinastica": la giovane polacca immortalò il cognome del marito e al tempo stesso (tras)mutò il proprio nome nel più francese Marie. Pierre Curie non era l'unico figlio di Jaques Curie (1827-1910); era infatti il secondogenito, nato quattro anni dopo Paul-Jaques Curie (1855-1941), che diverrà in seguito un celebre fisico e sarà padre di Maurice (1888-1976) e nonno di Daniel (1927-2000), fisici anch'essi.

Paul-Jaques Curie nacque a Parigi il 29 Ottobre 1856^a, primogenito del medico Eugene Curie (1827-1910) e di sua moglie Sophie-Claire Depouilly (1832-1897). Assieme al fratello Pierre (1859-1906) fu educato dai genitori e non frequentò regolari corsi scolastici. Durante gli studi superiori ebbe modo di collaborare con Alfred Riche (1829-1908) ed Émile Clément Jungfleisch (1839-1916). A ventitrè anni interruppe gli studi presso l'École de Pharmacie per passare a Mineralogia e divenire preparatore presso il laboratorio di Charles Friedel (1832-1899). Friedel, eminente chimico, insegnava anche alla Sorbona e all'École Municipale de Physique et de Chimie Industrielle di Parigi (MCT) e si interessava con vivacità alle più svariate tematiche della cristallografia. Fu senza dubbio per l'influenza di Friedel, patron di Jacques, che gli interessi dei due fratelli furono indirizzati verso lo studio della simmetria nei cri-

stalli. Nel 1886 sposò Virginie Masson (1856-1945), dalla quale ebbe due figli: Madeleine^b, nata a Parigi, il 7 novembre del 1886 e Maurice, nato due anni più tardi, il 12 di ottobre del 1888. Anche quest'ultimo divenne professore universitario.

Durante la collaborazione con fratello, Jacques inventò un elettroscopio, che poi sarebbe servito a Pierre e Marie Curie nelle indagini che li portarono a scoprire il polonio e il radio. Tuttavia le ricerche che gli procurarono maggior fama furono quelle nel campo della piezoelettricità, cioè legate a quel fenomeno per cui la compressione di un cristallo genera potenziali elettrici.

I fratelli Curie furono in grado di spiegare tale fenomeno e produrre in laboratorio anche l'effetto opposto: i cristalli possono venir deformati, quando sono sottoposti ad una differenza di potenziale. Inoltre i due giovani scienziati scoprirono la "temperatura Curie", temperatura oltre

^aEsiste una certa confusione circa la data di nascita di Paul-Jaques Curie. Il necrologio apparso sul quotidiano locale "Éclair de Montpellier" riporta la data 1855 senza per altro menzionare il giorno di nascita; il Poggendorff Biographisches Woerterbuch Band IV, A-L, (1904) a pagina 286 riporta per esteso: 29 ottobre 1856. Analogamente il necrologio apparso sui Cahiers de Physique, 1941, 1, 1, trascrive unicamente l'anno, 1855.

^bLa figlia maggiore di Jacques, come la cugina Eve Curie (1904-2007) fu molto longeva, infatti morì a centodieci anni nel 1988.

FLASHBACK

PAGINE DI STORIA

la quale un corpo ferromagnetico si comporta come un materiale paramagnetico. La collaborazione tra i due cessò nel 1889 quando Jacques fu chiamato a lavorare presso l'Università di Montpellier e abbracciò lo studio della mineralogia. Nel mentre, il 30 giugno del 1888, egli aveva discusso la tesi di dottorato, avente per argomento le recenti scoperte nel campo della piezoelettricità.

Del parallelismo tra fenomeni elettrici e fenomeni meccanici pare che non si fosse accorto nessuno prima dell'abate René-Just Haüy (1743-1822), il quale nel 1817 dette segnalazione che lo spato calcareo si elettrizza quando si comprime: così una semplice compressione (non un comune strofinio) può produrre elettricità. Questo fenomeno ha luogo solo in certi cristalli poiché è in relazione con ben determinate strutture cristalline.

Nel 1880 i fratelli Pierre e Jacques Curie fornirono le leggi scientifiche di questo fenomeno e lavorarono i successivi quindici anni precisando e approfondendo queste leggi. Secondo lo stesso racconto dei fratelli Curie, essi erano stati guidati nei loro primi studi da un altro fenomeno, che va sotto il nome di piroelettricità. Già da molto si era osservato che la tormalina riscaldata era in grado di attrarre la cenere. Questa straordinaria proprietà della pietra "attira cenere" aveva generato non poche leggende ed intorno ad essa sorsero molte fantasticherie pseudoscientifiche. Il poeta Novalis (1772-1801) giunse addirittura a personalizzare, in uno slancio di idealismo magico, la "dolce e fedele Tormalina". I fenomeni piroelettrici furono studiati da Antoine-César Becquerel (1788-1878) nel 1828 e chiariti da Pierre e Jacques Curie molti anni dopo. Nel 1881 avanzarono l'ipotesi secondo la quale le leggi della piroelettricità potessero essere confrontate con quelle della piezoelettricità. I fenomeni elettrici o termici possono essere ricondotti alla stessa causa: contrazione o dilatazione del cristallo.

Il quarzo è invece responsabile del fenomeno della piezoelettricità. A differenza della tormalina esso si trova un po' dappertutto nelle sabbie o cristallizzato a formare il "cristallo di rocca" e molte altre "pietre dure": agate, onici, diaspri ed altri. I cristalli di quarzo naturale, sono spesso bellissimi, ma il più delle volte scarsamente utili all'industria.

Il biossido di silicio può cristallizzare, variando temperatura e pressione, in differenti "habitus" cristallini. Nell'industria la configurazione richiesta è quella chiamata α , stabile fino a 573 °C. La storia di questo cristallo è ammantata di leggenda, come quella della tormalina: Plinio il Vecchio (ca. 23-79 d.C.) parla di questa sostanza come ghiaccio generato dall'intenso raffreddamento dell'umidità celeste.

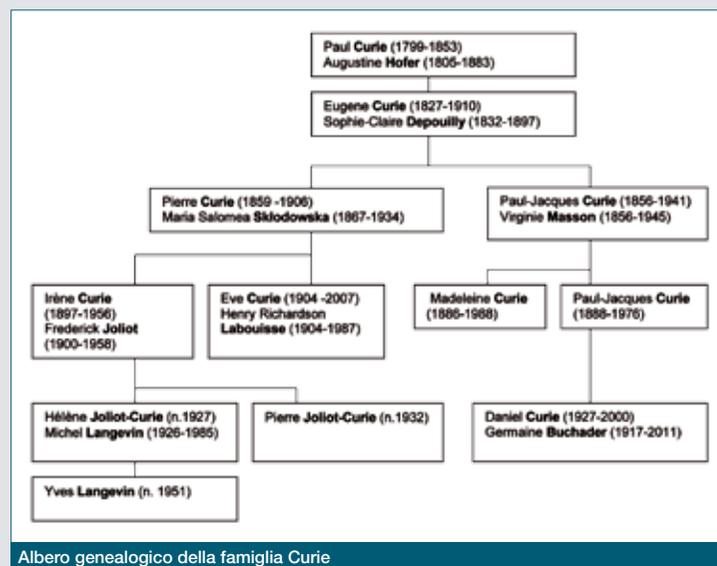
Nel 1880 i fratelli Curie, mentre eseguivano delle misure di conducibilità elettrica del quarzo, osservarono che l'ago dell'elettrometro deviava quando si esercitava sul quarzo una pressione. Fu così scoperto il fenomeno della piezoelettricità - principale caratteristica del quarzo α - che ha trovato largo impiego e applicazione industriale. Un cristallo di quarzo si presenta come un prisma esagonale allungato che termina alla due estremità con due piramidi. Jacques e Pierre Curie scoprirono che attraverso l'asse principale del prisma esagonale, asse Z, passano 6 piani tre dei quali detti "piani elettrici" - e perpendicolari a Z - e tre piani perpendicolari alle facce del prisma

detti "assi meccanici". Immaginando di tagliare nel cristallo una lamina sottile le cui facce siano parallele agli "assi elettrici", comprimendo le facce opposte di questa lamina, esse si caricano elettricamente. Sottoponendo le facce di questa lamina ad una tensione alternata, essa vibra e l'ampiezza delle vibrazioni risulta essere funzione delle caratteristiche geometriche del cristallo e più precisamente della sua forma e dimensione.

Le applicazioni delle scoperte dei fratelli Curie hanno avuto un'importante risvolto nella misurazione del tempo. Walter Guyton Cady (1874-1974) nel 1922 creò delle oscillazioni piezoelettriche e cinque anni più tardi un altro americano Marison ideò il primo orologio a cristallo di quarzo. Il fenomeno infatti riveste la massima importanza negli orologi elettronici ed è il seguente: quando i cristalli vengono attivati da energia elettrica, l'energia meccanica che ne consegue può assumere la forma di vibrazioni molto alte (frequenza elevata) e - cosa assai importante - molto stabili.

Nel 1895 per la scoperta della piezoelettricità Jacques, unitamente al fratello, ricevette il premio Gaston Plante dall'Accademia delle Scienze. Tra il 1887 ed il 1890 Jacques Curie condusse delle campagne mineralogiche allo scopo di studiare le rocce ignee e la geografia stratigrafica dell'Algeria; i risultati di questo appassionato lavoro furono pubblicati assieme a George-Barthélemy Médéric Flamand. Tornato a Montpellier, trascorse due anni insegnando mineralogia e geologia nella locale università, fino a quando nel 1904 fu nominato professore ordinario di mineralogia. Dalla tesi di dottorato, Paul Jacques Curie non pubblicò più alcun saggio scientifico: una sordità precoce e molto pronunciata gli rese difficili i rapporti con gli studenti e persino con il ristretto cerchio delle amicizie. Cominciò a disertare il laboratorio e a chiudersi sempre più assiduamente nella biblioteca dove seguiva con immutato interesse i progressi della fisica.

Nel 1911 entrò a far parte del Consiglio all'Università e al termine della prima guerra mondiale fu nominato "Chevalier de la Légion d'Honneur". Nel 1925 fu eletto professore emerito ma preferì ritirarsi a

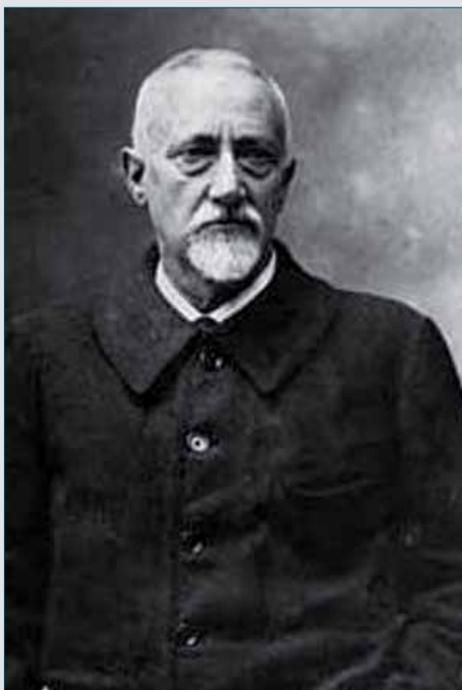


Albero genealogico della famiglia Curie

vita privata per raggiunti limiti di età. Cominciò in quegli anni a studiare coloro che chiamava i "Primitifs de la Science" ed a questo scopo intraprese lo studio del greco antico per leggere i testi originali dei filosofi greci. Nel 1934 l'età avanzata e la salute malferma gli impedirono di presenziare al funerale della celebre cognata Marie la quale, ormai quasi cieca e profondamente debilitata, era morta di leucemia nel sanatorio di Sancellemoz di Passy in Alta Savoia.

Paul-Jacques fece comunque in tempo a vedere, quasi ottantenne, la nipote Irène Joliot-Curie (1897-1956) ricevere il premio Nobel per la chimica 1935 per la scoperta veramente epocale della radioattività artificiale. Il 19 febbraio 1941 a circa ottantacinque anni Paul-Jacques Curie si spense nella cittadina di Montpellier [1].

Maurice Curie era nato a Parigi il 12 ottobre 1888. Fin da giovanissimo entrò nel laboratorio della zia Marie. All'epoca non era ancora il celebre Institut du Radium ma un locale angusto, posto in via Cuvier n. 12, dove Maurice Curie occupava la posizione di assistente personale di Madame Curie. Oltre ai due membri della famiglia Curie si trovava il chimico André Debierne (1874-1949) e un affollato gruppo di sette giovani ricercatori. La figlia della principale, Irène Curie (1897-1956), una volta cresciuta entrò nell'entourage dell'Institut du Radium e fu presentata al cugino di circa nove anni maggiore. Sul principio la ragazza, molto introversa, parve che si preoccupasse dell'ascendente che suo cugino Maurice aveva su sua madre: era il preferito di Madame Curie e, a quanto sembrava, avrebbe potuto far coppia con André Debierne e con molta probabilità marginalizzare la ragazza da un futuro ruolo di prestigio. Al contrario i due ragazzi, dopo un'iniziale diffidenza, divennero buoni colleghi e strinsero una forte amicizia. Per un certo tempo qualcuno in famiglia ipotizzò che avessero tessuto perfino una relazione sentimentale: infatti come Pierre e Marie, molti anni prima, Maurice e Irène trascorrevano molto del loro tempo libero insieme. L'esperienza di laboratorio di Maurice fu di brevissima durata poiché allo scoppio della prima guerra mondiale fu richiamato al fronte. Come testimoniano le pubblicazioni scientifiche di Maurice, egli non poté far ritorno nel laboratorio fino al 1919 e la prima pubblicazione vide la luce solamente nel 1921. Come annotò Madame Curie nel suo diario, l'affetto per il giovane nipote impegnato al fronte era costante, al pari delle preoccupazioni per la sua salute. Saputo infatti da Irène che Maurice, in qualità di ufficiale di artiglieria, era stato dislocato nei pressi di Verdun, dove si stava consumando la più spaventosa carneficina di tutta la guerra, Marie Curie, la quale prestava la sua opera come radiologa, fermava ogni ambulanza che vedeva transitare e metteva "il naso" all'interno dell'abitacolo alla ricerca del nipote.



Paul-Jacques Curie

Il lavoro di maggior originalità e gravido di conseguenze, svolto da Maurice Curie poco prima del primo conflitto mondiale, testimonia quale ingegnosità sperimentale (anche se va detto che egli aveva una guida del tutto eccezionale) e precocità intellettuale lo contraddistinguessero. Il decadimento radioattivo che ha origine dall'uranio, dal torio o dall'attinio è un processo che porta ad una fine. Giunti ad un elemento apparentemente sconosciuto, i ricercatori non misuravano più radiazioni ionizzanti di alcun genere. Ciò suggeriva che le catene di decomposizione terminassero con prodotti "inattivi". Quale sarebbe stato questo elemento? Nel 1905 Bertram B. Boltwood (1870-1927) propose che esso fosse il piombo [2], adducendo come motivazione "the persistent appearance of lead as constituent of uranium-radium minerals". Le misurazioni del contenuto del Pb nei giacimenti di uranio rafforzarono questa intuizione. Applicando

la legge dello spostamento chimico, Kasimir Fajans (1887-1975) e Frederick Soddy (1877-1956) mostrarono sperimentalmente che il prodotto finale della decomposizione dell'uranio altro non fosse che piombo. Risolto questo dilemma ne sorse immediatamente un altro: sottraendo il peso delle particelle alfa espulse durante la decomposizione, il peso del prodotto finale, il piombo, appariva leggermente inferiore di quello di provenienza non radioattiva. Come mai il piombo originato dalla decomposizione dell'uranio era inferiore al piombo ordinario? Gli scienziati si precipitarono a testare questa osservazione: era il 1914. Tutti invariabilmente osservarono i risultati fin qui predetti. Tra i contendenti troviamo radiochimici del calibro di Otto Hoenigschmid (1878-1945), Stephanie Horowitz [3] (1887-1940), il premio Nobel Theodore W. Richards (1868-1928), Max E. Lemberg e ovviamente il giovane Maurice Curie. L'anno dello scoppio della grande guerra, Maurice Curie dimostrò che l'uranio produceva un isotopo del piombo [4], dando così conferma ad una semplice predizione, e che adesso sappiamo essere divenuta un pilastro della teoria della trasmutazione atomica.

Al rientro dal fronte Maurice Curie iniziò ad interessarsi all'azione delle radiazioni infrarosse sulle sostanze foto luminescenti [5], frequentando il laboratorio del premio Nobel Jean Perrin (1870-1942). Successivamente riprese lo studio delle sostanze radioattive [6] interrotto durante la guerra; in particolare pubblicò un rendiconto dei lavori condotti sugli isotopi del piombo. In questo lavoro trovano spazio considerazioni teoriche sulle quattro famiglie di decadimento radioattivo, sui pesi atomici nonché sui metodi di separazione fisici e chimici. Oltre questo unico lavoro di radioattività, per oltre un decennio Maurice Curie si interessò di spettri di scintilla e dell'effetto fotoelettrico, del quale rivelò l'indipendenza dalla temperatura [7]: sco-

FLASHBACK

PAGINE DI STORIA

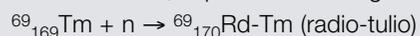
perta relativamente importante da meritarsi le pagine dei "Comptes Rendu de l'Académie des Science". Studiò altresì un'altra importante applicazione dell'effetto fotoelettrico, sfruttandolo [8] per misurare le proprietà fosforescenti del solfuro di calcio "drogato" con bismuto, al fine di testare la teoria dell'origine dei fenomeni di fosforescenza e di fluorescenza. L'entità dell'effetto fotoelettrico fu registrato con un elettrometro, dopo aver illuminato la superficie del solfuro di calcio con una lampada al tungsteno in atmosfera di azoto.

Le ricerche sui fenomeni luminosi furono una breve parentesi nella ricerca condotta da Maurice Curie, finché nella prima metà degli anni Trenta, essi furono nuovamente indirizzati verso le sostanze radioattive. Nella seduta del 24 marzo 1933 Georges Urbain (1872-1938) presentò all'Accademia delle Scienze di Parigi una nota di Maurice Curie e di Serge Takvorian su la "radioactivité d'un fractionnement neodyme-samarium-l'element 61". Gli autori, uno dei quali, presumibilmente Takvorian, aveva già da tempo lavorato all'identificazione dell'elusivo elemento 61, riferirono di aver operato sopra cinque chilogrammi di Nd_2O_3 e Sm_2O_3 contenenti tracce di La_2O_3 e Pr_2O_3 , provenienti dall'attacco di una monazite delle Indie. Frazionando con metodi classici ottennero circa 50 grammi di ossidi in trenta frazioni, sulle quali l'analisi spettrale e roentgenografica non riuscì a svelare la presenza dell'elemento di numero atomico 61, sebbene le frazioni comprese tra la 6° e la 22° mostrassero una radioattività diversa da quella osservata da George von Hevesy (1885-1966) e Willard Libby (1908-1980) per il samario. La notizia fu divulgata in America il 29 marzo 1933 cambiandone sostanzialmente i risultati [9] tant'è che essa fu sfruttata come conferma delle ricerche di un connazionale: "Illinium, known as element sixty-one, has been isolated by Maurice Curie, nephew of Madame Pierre Curie, codiscoverer of radium and polonium, and Mr. Takvorian of the Radium Institute of Paris. The element was discovered by Prof. B.S. Smith Hopkins, of the University of Illinois, in 1926".

A maggior enfasi erano state vergate a mano sul testo le seguenti parole: "Announced in Paris by Prof. G. Urbain, before Academy of Sciences at Sorbonne". Alcuni anni più tardi, più precisamente nel 1942, un'altra rivista [10] riportò la notizia accrescendone la portata scientifica: "the French scientist Maurice Curie believed he had isolated an isotope of illinium and noted its radioactivity. Three other elements, numbers 43, 85 and 87, are considered in the same doubtful class".

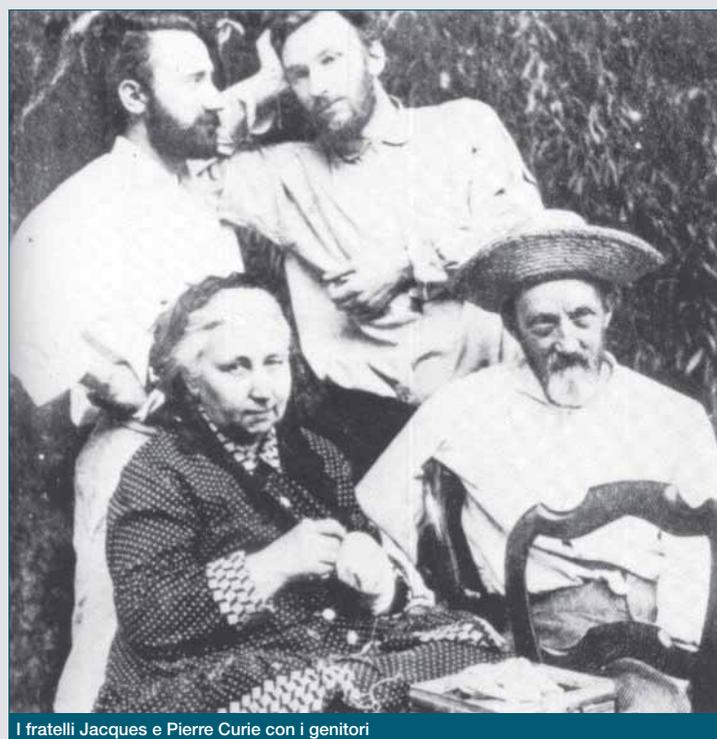
Maurice Curie non si interessò più alla ricerca dell'elemento di numero atomico 61, mentre il suo collega Takvorian [11] proseguì fino al 1947 [12] - anno della sua scoperta ufficiale del promezio; dopo aver esaminato i precedenti tentativi di isolare l'elemento 61, descrisse un nuovo approccio sistematico per risolvere questo intricato problema. Utilizzando sabbia monazifera egli estrasse delle frazioni arricchite sulle quali condusse ricerche di assorbimento ed emissione con raggi X, spettri alla fiamma e un completo studio della radioattività delle frazioni dove avrebbe dovuto concentrarsi l'elemento 61. Con grande rammarico per le "scuole" dove aveva condotto le ricerche,

l'Institut du Radium e il laboratorio delle terre rare un tempo di Urbain, egli non fu in grado di isolarne la benché minima traccia. L'anno seguente Maurice Curie assieme al cognato di Madame Curie, Frederic Joliot-Curie (1900-1958) intraprese lo studio sistematico della radioattività naturale del samario [13], scoperta risalente ad un paio di anni prima e fonte di molte improprie considerazioni. Con l'ausilio di una camera a nebbia, dell'ossalato di samario finemente polverizzato mostrò parte di quello che oggi sappiamo, ossia che il samario in natura si compone di 4 isotopi stabili: ^{144}Sm , ^{150}Sm , ^{152}Sm , ^{154}Sm e di 3 isotopi radioattivi, ^{147}Sm (emivita di $1,06 \cdot 10^{11}$ anni), ^{148}Sm (emivita di $7 \cdot 10^{15}$ anni), ^{149}Sm (emivita di $2 \cdot 10^{15}$ anni). Passarono due anni e l'eco della scoperta dei neutroni lenti da parte di Enrico Fermi (1901-1954) a Roma, presentò l'occasione di studiare l'attivazione neutronica di un elemento delle terre rare che il fisico romano non aveva irraggiato poiché non lo possedeva. Maurice Curie e Pierre Preiswerk (1907-?), forti di un purissimo campione di ossalato di tulio $Tm_2(C_2O_4)_3$ fornito loro da G. Urbain, lo irradiarono per tre giorni con la classica sorgente di neutroni: un preparato di Be + Rn in paraffina, con una attività di 500 mCi [14]. Maurice Curie ed il suo collega osservarono due prodotti: uno con vita media di $3 \pm 0,5$ ore, dovuto a delle impurità di Dy presenti nel campione; l'altro, con un'emivita di circa otto mesi, rispondeva alla seguente reazione nucleare:



il quale per "ri-arrangiamento nucleare" perde un elettrone per formare l'omologo di numero atomico superiore $^{70}_{170}Yb$.

I lavori di Maurice Curie all'approssimarsi e durante la guerra si concentrarono sempre più sui fenomeni studiati in gioventù: la fluorescenza e la fosforescenza. Nell'immediato dopoguerra Maurice Curie



I fratelli Jacques e Pierre Curie con i genitori

cercò di dare una spiegazione all'incomprensibile fenomeno che va sotto il nome di triboluminescenza [15]. Tale termine deriva dal verbo greco *τριβείν* (stropicciare, sfregare) e dal latino *lumen* (luce). La triboluminescenza è un particolare tipo di luminescenza che si manifesta in alcuni materiali che, sottoposti a sforzi meccanici (ad esempio schiacciandoli, graffiandoli o sfregandoli), emettono parte dell'energia assorbita sotto forma di onde elettromagnetiche. Il fenomeno fu scoperto accidentalmente nel XVII secolo durante la raffinazione dello zucchero. In particolare, vennero notate piccole scintille di luce visibile durante la frantumazione di grossi cristalli di zucchero. La prima registrazione del fenomeno è attribuita allo studioso inglese Francis Bacon (1561-1626), che annotò nel volume "The Advancement of Learning" di aver notato un bagliore quando aveva frantumato un blocco di zucchero di canna nel 1605.

L'effetto non è ancora stato spiegato completamente, ma la teoria di Curie e Prost, basata sui risultati di esperimenti di cristallografia e spettroscopia, ipotizza che durante la rottura di materiali asimmetrici avvenga una separazione di carica e, quando le cariche si ricombinano, la derivante scarica elettrica ionizza l'aria causando il lampo di luce. Oggi sappiamo che affinché tale ipotesi sia vera è necessario che i cristalli che presentano questo effetto abbiano difetti di simmetria (per consentire la separazione della carica), tuttavia esistono sostanze che pur non possedendo tali qualità sono soggette al fenomeno della triboluminescenza. È curioso notare un fatto per nulla accidentale per cui le ultime ricerche di Maurice Curie chiudono un ipotetico cerchio con gli studi intrapresi dal padre oltre sessant'anni prima. Infatti la triboluminescenza ha numerosi punti di contatto con la teoria della piezoelettricità. Con l'andar del tempo nelle pubblicazioni di carattere scientifico il suo nome comparve sempre più spesso associato a quello del figlio Daniel [16], che era nato a Parigi il 27

luglio 1927. Maurice Curie morì ad ottantotto anni di età nel 1976. Come ha riportato la professoressa Héléne Langevin Joliot-Curie le notizie d'archivio su Daniel Curie sono molto scarse^c ed anche quelle conservate presso l'antico fondo della Sorbona. Daniel, coetaneo della lontana cugina Héléne, divenne professore in età relativamente giovane e il suo campo di studio è stato la luminescenza: mosse i primi passi seguendo le orme del padre.

In seguito elaborò la "teoria degli effetti della pressione sulle transizioni radiative delle impurità nei cristalli" [17]: gli effetti della pressione portano a ridefinire le impurità - per mezzo della meccanica quantistica - e così ottenere le energie delle transizioni vibroniche. La teoria di Daniel Curie, David E. Berry e Ferd Williams è stata però motivo di controversia con i fisici H.G. Drickamer, W.C. Frank e C.P. Slichter, i quali imputarono a Daniel Curie di aver impropriamente applicato il principio di Franck-Condon^d. Professore all'Université Pierre et Marie Curie, nonché autore di volumi nel campo della luminescenza [18], Daniel Curie è mancato una dozzina d'anni fa a circa 73 anni. Sua moglie - Germaine Curie-Buchader - è deceduta il 7 dicembre 2011, all'età di 94 anni [19]. Non avevano figli o parenti stretti; delle esequie si sono interessati Héléne Langevin Joliot-Curie (n. 1927) assieme al fratello Pierre Joliot-Curie (n. 1932), gli unici membri ancora in vita della prestigiosa dinastia Curie.

Ringraziamenti: Desideriamo ringraziare Patrick Boissé, Direttore della Facoltà di Fisica dell'Università Pierre e Marie Curie; Natalie Pigeard-Micault, Responsabile degli Archivi del Musée Curie; la prof. Héléne Langevin-Joliot, nipote di Madame Curie e lontana cugina di Daniel Curie; François Gendron dell'Institut des Nanosciences de Paris, nonché Bernard Clerjoud dell'Università Pierre et Marie Curie.

Bibliografia

- [1] C. Fabry, *Cahiers de physique*, (1941), June issue, N. 1, 1-65; *Éclair de Montpellier*, 20th and 21st February 1941; Les Curie: deux couples radioactifs, Radvanyi Pierre, Paris, Ed. Pour la Science, 2001.
- [2] B.B. Boltwood, *Philosophical Magazine*, 1905, Series 6, Volume 9, Issue 52, 599-613.
- [3] M.F. Rayner Canham, G. W. Rayner Canham, *Bull. Hist. Chem.*, 2000, **25**(2), 103.
- [4] M. Curie, *Compt. Rend.*, 1914, **158**, 1676.
- [5] M. Curie, *Journal de Chimie Physique et de Physico-Chimie Biologique*, 1923, **20**, 292.
- [6] M. Curie, *Revue Generale des Sciences Pures et Appliquees*, (1923), 34, 576-80.
- [7] M. Curie, *Compt. Rend.*, 1924, **179**, 105.
- [8] M. Curie, *Compt. rend.*, 1924, **178**, 2244.
- [9] *Anon.*, *Popular Mechanics*, **59**(6), 208.
- [10] *Anon.*, *Science news*, 1942, **41-42**, 38.
- [11] S. Takvorian, *Annali di Chimica Applicata*, 1945, **20**, 113.
- [12] S. Takvorian, *Compt. Rend.*, 1947, **224**, 124.
- [13] M. Curie, F. Joliot, *Compt. Rend.*, 1934, **198**, 360.
- [14] M. Curie, P. Preiswerk, *Compt. Rend.*, 1936, **203**, 787.
- [15] M. Curie, M. Prost, *Compt. Rend.*, 1946, **223**, 1125.
- [16] M. Curie, D. Curie, *Cahiers de Physique*, 1955, **55**, 1; *ibid.*, *Cahiers de Physique*, 1955, **56**, 29; *ibid.*, *Cahiers de Physique*, 1955, **57-58**, 57; *ibid.*, *Cahiers de Physique*, 1955, **57-58**, 77.
- [17] D. Curie, D.E. Berry, F. Williams, *Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics*, 1979, **20**(6), 2323.
- [18] D. Curie, *Luminescence Cristalline*, Paris Dunod, 1960; D. Curie, *Luminescence in Crystals*, London Methuen, 1963; D. Curie, *Champ Cristalline et Luminescence, applications de la théorie des groupes à la luminescence cristalline*, Paris Guathier-Villars, 1968.
- [19] *Le Monde*, mercredi 14 décembre 2011, carnet 31, décès.

^cComunicazione personale di Héléne Langevin a Marco Fontani.

^dEsso è un principio basilare della chimica-fisica e permette di spiegare l'intensità delle transizioni vibroniche, ovvero i cambiamenti dei livelli energetici vibrazionali ed elettronici.