

Luigi Cerruti

**A REASONABLE THEORY OF CHEMICAL COMBINATION.
INTENZIONI, PRATICHE E PROPOSTE DI J.J.THOMSON,
1910-1923**

*"I really have hopes of being able to work out a reasonable theory of chemical combination and many other chemical phenomena."*¹

Lettera di J.J.Thomson a Ernest Rutherford, 18 febbraio 1904

L'interesse di J.J.Thomson (1856-1940) nei confronti dei problemi posti dagli sviluppi delle teorie chimiche risale almeno alla sua prima notevole prova come fisico matematico, con la consegna alle stampe nel 1883 del saggio sugli atomi-vortice con cui aveva vinto il premio Adams. La citazione che dà il titolo alla mia comunicazione è tratta da una lettera del fisico inglese a Rutherford del 18 febbraio 1904. Il presente contributo, tuttavia, si limita a prendere in considerazione le intenzioni conoscitive, le pratiche sperimentali e le proposte teoriche di Thomson negli anni che vanno dall'inizio della collaborazione con F.W.Aston (1910) alla pubblicazione di *The Electron in Chemistry* (1923). Pur con il lungo 'intermezzo' della guerra il periodo 1910-1923 fu ricco di innovazioni sperimentali nel campo delle ricerche sui raggi positivi, e vide il consolidarsi nel fisico inglese di un modello statico degli elettroni presenti negli atomi e nelle molecole. Mentre sull'attività di Thomson nel settore dei raggi positivi esiste un'ampia e approfondita storiografia, sono state molto meno studiate le conseguenze che, nei confronti dei problemi chimici, egli traeva dalla nuova base sperimentale, e dalla crescente, personale interazione con la comunità dei chimici. Nell'agosto 1997 a Liegi, durante il XX Congresso Internazionale di Storia della Scienza, si tenne un interessante simposio sul tema 'obbligato' del centenario della cosiddetta 'scoperta dell'elettrone'. Il simposio era intitolato *The Many Faces of the Electron*, ma in nessuno dei numerosi contributi fu discusso il tema cruciale (per Thomson!) della funzione sperimentale e teorica della particella carica per una comprensione dei fenomeni chimici. I motivi di questo silenzio sono molteplici, e saranno qui discussi brevemente nelle conclusioni, anche se l'evidente, allarmante limite storiografico di un simile atteggiamento richiederebbe un maggiore approfondimento.

Una teoria ragionevole

Fra il 1912 e il 1913, mentre le ricerche sui raggi positivi erano al culmine, una serie di eventi - compreso il secondo Convegno Solvay - spostò sempre più l'interesse del fisico inglese verso la fenomenologia chimica, ma prima di considerare da vicino quella svolta epistemologica vorrei richiamare cosa Thomson intendeva per *reasonable theory*. A questo proposito si possono indicare molti riferimenti a partire dalle prime pagine delle *Recent Researches in Electricity and Magnetism*, pubblicate nel 1893. Nella prefazione viene discusso il rapporto fra l'analisi matematica ed "altri metodi più fisici (*more physical*)", e l'Autore mette a confronto l'indubbia potenza dell'approccio analitico, esemplificato dalle equazioni Maxwelliane del campo elettromagnetico, con

¹ Citato da E.A.Davis, I.J.Falconer, *J.J.Thomson and the Discovery of the Electron*, London: Taylor & Francis, 1997, p. 195.

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

l'interpretazione delle leggi dell'elettrostatica data da Faraday in termini di "tubi di forza". Thomson, eccellente fisico-matematico, ammette di buon grado che l'"analisi è indubbiamente la più grande macchina salva-pensiero mai inventata", e tuttavia:

"Accade frequentemente che si richiede maggiore riflessione, e si ottiene un'idea più vivida (*more vivid idea*) delle parti essenziali di un problema, mediante una soluzione grossolana (*rough solution*) mediante un metodo generale, che mediante una soluzione completa a cui si giunge attraverso i più recenti miglioramenti nell'analisi superiore".²

L'indicazione epistemologica di Thomson va oltre il contesto didattico in cui è volutamente collocata nella prefazione, infatti nell'*incipit* del testo mette ancora in evidenza l'utilità delle 'teorie descrittive', affermando che "i servizi che la vecchia teoria del fluido ha reso all'Elettricità [...] difficilmente possono essere sopravvalutati", e ne indica il merito principale:

"Una teoria descrittiva di questo tipo fa di più che servire come mezzo per esprimere chiaramente risultati ben noti, essa spesso rende importanti servizi suggerendo la possibile esistenza di nuovi fenomeni".³

Subito dopo la scoperta dei suoi 'corpuscoli' Thomson iniziò ad elaborare modelli di atomo e - contestualmente - modelli di legame chimico. Nelle Silliman Lectures del maggio 1903 spinge le congetture sulla natura delle "forze colleganti gli atomi nelle molecole dei composti chimici" fino ad una 'traduzione' della "teoria dei legami", "quasi identica alla teoria elettrica":

"se noi intendiamo il legame dei chimici come indicante un tubo di Faraday unitario, congiungente gli atomi carichi nella molecola, la formula di struttura dei chimici può essere tradotta immediatamente nella teoria elettrica".⁴

Nel febbraio 1904 Thomson scriveva a Rutherford la lettera citata nell'epigrafe di questo articolo. In essa il nostro Autore confidava che "da qualche tempo s[tava] lavorando duramente sulla struttura dell'atomo", con un modello che considerava "un certo numero di atomi in equilibrio o in moto stazionario sotto la loro mutua repulsione e un'attrazione centrale", e confessava: "è sorprendente che ne venga fuori una quantità di risultati. Spero veramente di essere in grado di elaborare una teoria ragionevole della combinazione (*combination*) chimica e di molti altri fenomeni chimici".⁵ Con Lodge, un paio di

² J.J.Thomson, *Notes on Recent Researches in Electricity and Magnetism, Intended as a Sequel to Professor Clerk-Maxwell's Treatise on Electricity and Magnetism*, Oxford: Clarendon, 1893, p. VII.

³ *Ib.*, p. 1.

⁴ J.J.Thomson, *Elettricità e materia*, Milano: Hoepli, 1905, pp. 144-146.

⁵ Thomson non fu l'unico a nutrire queste speranze. Le Silliman Lectures ebbero un impatto notevole sulla comunità dei chimici americani; per la letteratura primaria e secondaria sull'uso di teorie elettroniche negli Stati Uniti negli anni 1910 si veda: M.J.Nye, *From Chemical Philosophy to Theoretical Chemistry. Dynamics of Matter and Dynamics of Disciplines, 1800-1950*, Berkeley:

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

mesi dopo, discuteva la questione delicata dell'esistenza o meno di 'portatori' di cariche positive all'interno dell'atomo, e accennava ad una possibile 'soluzione': "Rispetto all'elettrificazione positiva sono stato solito usare la cruda (*crude*) analogia di un liquido con un certo valore di coesione"⁶. Molti degli obbiettivi che Thomson si poneva erano racchiusi nel termine ambiguo *combination*, che può indicare sia la reazione che trasforma una sostanza in un'altra, sia il rapporto di 'legame' fra due atomi in una molecola. Quest'ultimo senso di *combination* fu discusso ampiamente nel corso tenuto alla Royal Institution nella primavera del 1906, e dato alle stampe nel luglio 1907 con il titolo *The Corpuscular Theory of Matter*. In una ventina di pagine sono qui riprese e approfondite le ipotesi già avanzate nel 1903, e in particolare la natura direzionale, polare del legame chimico.⁷ Ma ancora una volta la valutazione più interessante per noi si trova nella prefazione,⁸ laddove Thomson presenta il suo modello atomico popolato da una moltitudine di corpuscoli, in moto vorticoso all'interno di una sfera carica positivamente:

"Si dimostra che le proprietà di un atomo di questo tipo assomigliano in molti aspetti a quelle degli atomi degli elementi chimici. Penso che una teoria, che ci mette in grado di raffigurare una specie di atomo modello e di interpretare i risultati fisici e chimici nei termini di un tale modello, possa essere utile anche se i modelli sono crudi (*crude*), perché se ci raffiguriamo come l'atomo modello possa comportarsi in alcuni particolari processi fisici o chimici, noi otteniamo non solo una concezione vividissima (*very vivid*) del processo, ma spesso anche indicazioni che il processo considerato deve essere connesso con altri processi, e così con questo metodo si promuovono ulteriori ricerche; esso ha anche il vantaggio di mettere in evidenza l'unità dell'azione elettrica e chimica".⁹

Il valore euristico di una buona teoria fisica è quindi confermato con parole simili a quelle usate quasi quindici anni prima, e così sarà per il grande fisico inglese fino al termine della sua carriera scientifica. Ma oltre all'insistenza sulla validità conoscitiva di una teoria che unifichi la fenomenologia fisica con quella chimica, va ricordato un tratto 'spregiudicato' del teorizzare di Thomson nella *Corpuscular Theory*.

Nel periodo trascorso fra le lezioni alla Royal Institution e la pubblicazione della *Corpuscular Theory*, Thomson era giunto alla conclusione che il numero di corpuscoli 'contenuti' in un atomo era, in un certo senso,

University of California Press, 1993, p. 132. Nye dedica due ottimi capitoli allo sviluppo in Gran Bretagna delle teorie elettroniche in chimica organica.

⁶ "Rispetto all'elettrificazione positiva sono stato solito usare la cruda (*crude*) analogia di un liquido con un certo valore di coesione"; lettera di Thomson a Oliver Lodge, 11 aprile 1904, cit. dal rif. 1, loc. cit.

⁷ J.J.Thomson, *The Corpuscular Theory of Matter*, London: Constable, 1907, pp. 120-141; in realtà il volume è presentato da Thomson come "un'espansione del corso di conferenze", ib. p. V.

⁸ Sulla rilevanza della prefazione, in quanto "discorso prodotto a proposito del testo che lo segue", si veda: G.Genette, *Soglie. I dintorni del testo*, Torino: Einaudi, 1989; rif. alla p. 158. Genette dedica alle forme e alle funzioni delle prefazioni tre capitoli del suo libro sul paratesto.

⁹ Rif. 7, p. V-VI.

ATTI DEL XVIII CONGRESSO DI STORIA DELLA FISICA E DELL'ASTRONOMIA

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

drammaticamente basso.¹⁰ Nella prefazione che ho appena citato egli prendeva atto che “non si può considerare la massa di un atomo come dovuta principalmente o apprezzabilmente alla massa dei corpuscoli”,¹¹ e d'altra parte, pubblicando nel maggio precedente il primo lavoro sui raggi positivi,¹² aveva già dimostrato di aver concentrato il proprio interesse sperimentale sui ‘raggi canale’. Malgrado questo ‘impegno ontologico’, sia teorico, sia sperimentale, nel sesto capitolo della *Corpuscular Theory* Thomson riprende integralmente i risultati del suo contributo puramente fisico-matematico del 1904,¹³ quando l'intera massa atomica era attribuita alla presenza di migliaia di corpuscoli, ed anzi li enfatizza pubblicando una tavola in cui sono riportate le configurazioni assunte in anelli successivi da un numero di corpuscoli variabile da 1 a 100.¹⁴ Thomson non è affatto turbato dal fatto che le proprietà periodiche degli atomi comincino ad apparire quando nel suo modello sono presenti da 59 a 67 corpuscoli, in quanto ha tentato di descrivere certe proprietà degli atomi “considerando un caso speciale [dell'arrangiamento dei corpuscoli], scelto solo sulla base della semplicità”. Numerosi e diversi modelli sono disponibili per far meglio corrispondere “il numero di corpuscoli a qualsiasi particolare proprietà”.¹⁵ Così, subito dopo questo atto di fiducia nella potenza della fisica matematica, affronta il problema della *chemical combination* con il ‘vecchio’ modello atomico:

“Un argomento di ricerca molto importante e interessante è la natura delle forze che si eserciterebbero fra gruppi di corpuscoli e la sua applicazione alla teoria della combinazione chimica.

Cominceremo considerando le forze fra due gruppi in qualche semplice caso. Cominciamo con il più semplice di tutti quando abbiamo un singolo corpuscolo al centro di una sfera di elettrificazione positiva”.¹⁶

È evidente che nell'epistemologia di Thomson dati sperimentali, modelli fisico-matematici, e teorie descrittive giocano ruoli diversi e rilevanti, tali da rendere piuttosto elusivo il suo impegno ontologico sulla struttura degli atomi.

Aston e la nuova situazione sperimentale, 1910-1912

Le ricerche di Thomson sui raggi positivi sono stati oggetto di un'ampia indagine storiografica, con robusti contributi da parte di Isobel Falconer,¹⁷ e di

¹⁰ J.J.Thomson, “On the Number of Corpuscles in an Atom”, *Phil. Mag.*, (6) **11**, 769-781 (1906).

¹¹ Rif. 7, p. VI.

¹² J.J.Thomson, “On Rays of Positive Electricity”, *Phil. Mag.*, (6) **13**, 561-575 (1907).

¹³ J.J.Thomson, “On the Structure of the Atom”, *Phil. Mag.*, (6) **7**, 237-265 (1904).

¹⁴ Rif. 7, pp. 109-110.

¹⁵ *Ib.*, pp. 117-119.

¹⁶ *Ib.*, p. 120.

¹⁷ (a) I.Falconer, *Theory and Experiment in J.J.Thomson's Work on Gaseous Discharge*, Ph.D. thesis, University of Bath, 1985, 517 pp.; (b) *Id.*, “J.J.Thomson's work on positive rays, 1906-1914”, *Hist.Stud.Phys.Sci.*, **18**: 2, 265-310 (1988).

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

un'analisi minuziosa da parte di Per F. Dahl.¹⁸ In questa sede possiamo quindi limitarci ad una 'presa d'atto' che per un lungo periodo i risultati furono piuttosto modesti: fra il primo articolo del maggio 1907,¹⁹ e il quarto apparso sul *Philosophical Magazine* nel marzo 1910,²⁰ non vi sono sensibili progressi nella comprensione della complessa fenomenologia sperimentale, che vede affollarsi sulle lastre fluorescenti a base di willemite²¹ tracce di raggi con varie curvature, positivi, negativi, primari, secondari.²² Thomson sembra credere che la spiegazione dello stesso evento primario della ionizzazione possa fornire la chiave per entrare nei segreti della costituzione atomica, ed elabora un modello di 'doppietto' tale per cui "il primo stadio" della ionizzazione "possa essere la separazione dalla molecola non di un singolo corpuscolo ma di un doppietto (*doublet*) elettricamente neutro, consistente di un corpuscolo elettrificato negativamente in rapida rotazione attorno ad una particella molto più massiccia (*massive*) con una carica positiva".²³ Questo meccanismo avrebbe spiegato anche l'ubiqua, sovrabbondante presenza (o addirittura produzione) di idrogeno ionizzato. A questo proposito va anche ricordato quanto tutti gli storici hanno già messo in evidenza, e cioè che era lo stesso metodo di rilevamento - basato come si è detto sulla fluorescenza indotta dagli urti su schermi di willemite - ad esaltare la presenza di ioni leggeri.

Nel 1910 la situazione sperimentale mutò radicalmente con l'arrivo al Cavendish Laboratory di Francis Aston, in qualità di assistente personale del nostro fisico. Aston aveva avuto un meticoloso addestramento sperimentale come chimico organico nel laboratorio di P.F.Frankland; dopo aver trascorso tre anni come chimico in una fabbrica di birra, era stato *physics research student* con J.H.Poynting²⁴ a Birmingham. Nei cinque anni trascorsi con Poynting si era dedicato principalmente allo studio degli spazi oscuri che si creano nelle scariche a bassa pressione nei tubi catodici. Aston, che era un ottimo costruttore di strumenti ed un abile soffiatore, era stato in grado di mettere a frutto queste sue capacità ottenendo buoni risultati quantitativi nello studio del cosiddetto 'spazio oscuro' di Crookes.²⁵

Le innovazioni sperimentali introdotte da Aston furono immediate e notevoli. Un primo salto di qualità si ebbe con le misure condotte fra il giugno e

¹⁸ P.F.Dahl, *Flash of the Cathode Rays. A History of J.J.Thomson's Electron*, Bristol: Institute of Physics Publishing, 1997.

¹⁹ Rif. 12.

²⁰ J.J.Thomson, "Rays of Positive Electricity", *Phil. Mag.*, (6) **19**, 424-435 (1910).

²¹ La schermo su cui urtavano gli ioni era costituito da una lastra di vetro, prima spalmata di silicato di sodio, e poi 'spolverata' di polvere di willemite; cfr. rif. 18, p. 272. La willemite è un minerale di zinco, e precisamente un ortosilicato anidro.

²² J.J.Thomson, "Positive Rays", *Phil. Mag.*, (6) **16**, 657-691 (1908).

²³ J.J.Thomson, "The Carrier of Positive Electricity", in: *The Royal Institution, Physical Sciences*, vol. 6, Elsevier, 1970, pp. 314-344, cit. alle pp. 338-339. La conferenza fu tenuta il 10 aprile 1908.

²⁴ Poynting era amico intimo di Thomson.

²⁵ W.H.Brock, "Aston, Francis William", in: *Dictionary of Scientific Biography*, vol. I, New York: Scribner, 1970, pp. 320-322.

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

l'agosto 1910,²⁶ con un apparato modificato sia nel recipiente in cui avveniva la scarica, le cui dimensioni erano notevolmente aumentate, sia in un nuovo disegno delle fenditure catodiche, sia negli schermi la cui sensibilità era stata migliorata. Complessivamente si operava con un vuoto più elevato, e - finalmente - Thomson fu in grado di osservare le parabole previste dal calcolo, e caratterizzate ciascuna da una costante e/m dipendente in modo inversamente proporzionale dal peso atomico o molecolare dello ione (H^+ , H_2^+ , He^+ , C^+ , O^+). Un primo resoconto fu letto il 1° settembre alla riunione annuale della British Association for the Advancement of Science (BAAS), e il lavoro completo fu pubblicato nel fascicolo di ottobre del *Philosophical Magazine*. I nuovi dati sperimentali, e in particolare la presenza accertata di ioni molecolari, spinsero Thomson ad ampliare subito le sue intenzioni di ricerca affermando di avere ormai a disposizione “un valido mezzo per analizzare i gas nel tubo [di scarica] e determinare i pesi atomici”.²⁷

Il secondo salto di qualità sperimentale avvenne quasi subito dopo, e fu causato da diverse innovazioni che risultarono decisive per ottenere nuovi, complessi, inaspettati fenomeni. Già da tempo si era provato sporadicamente l'uso di carbone di legna portato alla temperatura dell'aria liquida come adsorbente dei gas residui, ma solo nell'estate del 1910 divenne una pratica costante; fu ancora una volta modificata l'evacuazione della camera di deflessione e fu introdotto l'impiego di una pompa a motore Gaede.²⁸ Tutto questo migliorò notevolmente il vuoto prodotto all'interno dell'apparato, rendendo distinguibili e nitide le tracce paraboliche, ma fu il metodo stesso di rilevazione delle tracce ad essere radicalmente cambiato. Aston era un provetto fotografo, e dopo diversi tentativi mise a punto un accessorio che permetteva il rilevamento su lastra fotografica di due o più serie di tracce.²⁹ Il nuovo apparato e i risultati 'fotografici' furono presentati sul *Philosophical Magazine* del febbraio 1911,³⁰ ma Thomson esibì in pubblico per la prima volta le fotografie ricche di nette parabole durante un incontro per il giubileo della sua cattedra a Cambridge, una vera festa che si tenne il 12 novembre 1910 al Cavendish Laboratory. Durante la parte colta dell'incontro venne fatte dimostrazioni sperimentali, e Rayleigh, che era in un capannello di spettatori, ricordò dopo molti anni che Thomson si era fatto loro incontro con le lastre in mano e “il suo caratteristico raggianti sorriso di piacere sul volto”.³¹

Il sorriso era pienamente giustificato non solo dalla conferma che il nostro fisico-matematico aveva ricevuto dai dati sperimentali (in fin dei conti era

²⁶ Rif. 18, p. 424.

²⁷ J.J.Thomson, “Rays of Positive Electricity”, *Phil. Mag.*, (6) **20**, 752-767 (1910); la parola *molecule*, in riferimento allo ione molecolare H_2^+ , è in corsivo nel testo (p. 766).

²⁸ Rif. 18, p. 284.

²⁹ Thomson descrive l'accessorio fotografico e ne attribuisce la paternità ad Aston in: J.J.Thomson, *Rays of Positive Electricity and their Application to Chemical Analyses*, London: Longmans, 1913, pp. 22-23.

³⁰ J.J.Thomson, “Rays of Positive Electricity”, *Phil. Mag.*, (6) **21**, 225-249 (1911).

³¹ Rif. 18, pp. 286-285; vi fu un 'ritardo' tipicamente accademico nei festeggiamenti rispetto alla data del 25° anniversario della cattedra, che si era compiuto l'anno precedente, il 12 dicembre 1909.

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

Professor of experimental physics, come sottolineava nei frontespizi dei suoi numerosi libri), ma anche dal fatto che l'apparato messo a punto da lui stesso, dall'inseparabile tecnico E.Everett,³² e da Aston gli aveva aperto un accesso privilegiato nel campo controverso dei 'meccanismi fisici' che dovevano essere alla base dei 'legami chimici'. Quanto Thomson fosse consapevole di questa nuova apertura risulta dalla conferenza tenuta alla Royal Institution³³ il 7 aprile 1911, e significativamente intitolata *A New Method of Chemical Analysis*. L'Autore propone lunghi elenchi di ioni individuati attraverso le "misurazioni delle fotografie", e fra questi vengono presentati con una certa enfasi i risultati ottenuti con il metano CH₄:

"Lo spettro di CH₄ [...] è interessante, perché le misurazioni di queste linee mostrano che i loro pesi atomici (*atomic weights*) sono 12, 13, 14, e 15, 16, e così che noi abbiamo qui C, CH, CH₂, CH₃, CH₄. Se non erro, questa è la prima occasione in cui gli atomi (*atoms*) CH, CH₂, CH₃, sono stati osservati in uno stato libero".³⁴

L'inaccuratezza lessicale³⁵ del nostro Autore si accompagna ad una certa indifferenza rispetto al fatto che ciò che ha registrato sono le tracce di ioni CH⁺, CH₂⁺, etc., e che quindi non ha affatto osservato i radicali CH, CH₂, CH₃, "in uno stato libero". Tuttavia anche a livello lessicale Thomson sta inaugurando un uso importante del termine *spectrum*, riferendolo all'insieme degli ioni generati dalla frammentazione di una molecola. Nell'ultima parte della conferenza il nostro fisico tratta ancora una volta la questione della *chemical combination*, giungendo a conclusioni molto interessanti. La prima è indicativa dell'orientamento di Thomson verso un modello statico di 'atomo chimico', ovvero degli elettroni (che qui chiama ancora corpuscoli) di valenza:

"la combinazione di atomi per formare molecole, sia di composti sia di elementi, fissa i corpuscoli che erano precedentemente mobili e converte gli atomi da conduttori di elettricità in isolanti con piccola capacità induttiva specifica".³⁶

Più che conclusioni le parole finali della conferenza sono in realtà progetti di ricerca, analitica e chimico-fisica:

"abbiamo ora nuovi metodi che sono capaci di trattare quantità di materia molto minori che i metodi ora usati dai chimici, metodi che sono capaci di rilevare

³² Ebenezer Everett lavorava per Thomson fin dal 1886; un giudizio (sgradevole) su Everett è citato in rif. 18, p. 422.

³³ Thomson era professore di *Natural Philosophy* presso questa storica istituzione londinese fin dal 1905.

³⁴J.J.Thomson, "A New Method of Chemical Analysis", in: The Royal Institution, *Physical Sciences*, vol. 7, Elsevier, 1970, pp. 184-194; cit. alla p. 187.

³⁵ Quando gli pare necessario Thomson distingue atomi e molecole; ib., pp. 184, 192, etc.

³⁶ Ib., p. 194. Nel 1906, discutendo il problema della rifrazione atomica e molecolare nelle conferenze alla Royal Institution, Thomson aveva espresso un'opinione diametralmente opposta: "dal momento che i corpuscoli di valenza sono quelli che si muovono più facilmente, essi sono quelli che producono il maggiore effetto sull'indice di rifrazione", rif. 7, p. 154.

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

fasi transienti nel processo di combinazione chimica, e che io spero possano servire a gettare luce su uno dei più interessanti e misteriosi problemi in fisica come in chimica - la natura della combinazione chimica".³⁷

Un passo sperimentale decisivo nella direzione indicata da queste conclusioni fu compiuto nei mesi successivi; esso fu reso noto sul *Philosophical Magazine* dell'agosto 1912. L'innovazione consisteva nell'uso di un rivelatore in grado di misurare quantitativamente, al variare del campo magnetico, le cariche portate in successione dai fasci di particelle.³⁸ I *metrical results*, come li definì Thomson, furono ottenuti con un metodo già utilizzato nel febbraio 1908, quando il nostro fisico aveva descritto alcuni esperimenti in cui aveva usato un cilindro di Faraday, isolato e connesso ad un elettroscopio di Wilson, per misurare le cariche trasportate da fasci di ioni.³⁹ Il passaggio dal riconoscimento qualitativo alla determinazione quantitativa degli ioni aveva avuto un esito inaspettato e sorprendente, che in effetti realizzava già una parte delle aspettative espresse nella conferenza alla Royal Institution, e che fu amplificato in un volume dato alle stampe nell'ottobre 1913. Nella nuova opera sono presentati in forma diagrammatica gli spettri (che noi diremmo 'di massa') dell'ossido di carbonio, di misture di idrogeno e ossigeno, del fosgene. Nel commento allo spettro dell'ossido di carbonio Thomson sottolinea la differente sensibilità degli apparati che aveva utilizzato a partire dal 1906:

"Sulla fotografia le linee più forti sono quelle corrispondenti all'atomo e alle molecole di idrogeno. La curva mostra che il numero di particelle di idrogeno è solo una piccola frazione del numero di particelle di CO. [...] Ma per quanto sia grande la discrepanza nel caso della lastra fotografica fra gli effetti prodotti dagli atomi di idrogeno e da un egual numero di atomi più pesanti, non è nemmeno paragonabile a quella che esiste per lo schermo di willemite: un simile schermo può mostrare delle linee dell'idrogeno molto brillanti mentre la linea del CO è appena visibile, mentre le misure fatte con l'elettroscopio [...] mostrano che il numero di particelle di idrogeno è solo una piccola percentuale del numero delle particelle di CO".⁴⁰

Nel contesto di questo stesso lavoro Thomson ritorna ancora una volta sul meccanismo di ionizzazione e sulle "forze elettriche che tengono insieme gli atomi in una molecola". Entrambi i fenomeni sono regolati dalla presenza di 'doppietti' interni agli atomi, per cui due atomi non sono attratti per l'essere l'uno carico positivamente e l'altro negativamente, ma "ciascun atomo agisce come un doppietto elettrico, e attrae un altro atomo nello stesso modo in cui due magneti si attraggono l'un l'altro". Nell'articolo dell'agosto 1912 questo modello di legame

³⁷ Loc. cit.

³⁸ J.J.Thomson, "Further Experiments on Positive Rays", *Phil. Mag.*, (6) 24, 209-253 (1912), alla p. 245.

³⁹ Rif. 22.

⁴⁰J.J.Thomson, *Rays of Positive Electricity and Their Application to Chemical Analysis*, London: Longmans, 1913, pp. 59-60; con questi spettri Thomson inaugura la spettroscopia di massa delle molecole organiche, una tecnica che sarà ripresa solo durante la seconda guerra mondiale negli Stati Uniti, e che ora ha una funzione essenziale nei laboratori chimici.

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

chimico è descritto anche graficamente; ⁴¹ esso, comunque, avrà una vita piuttosto effimera.⁴²

Questo lavoro del gruppo del Cavendish Laboratory ebbe un'accoglienza entusiastica da parte di Frederick Soddy. Dopo aver ottenuto eccellenti risultati nelle ricerche sulla radioattività prima con Rutherford in Canada e poi con Ramsay a Londra, nel 1912 era *lecturer* di chimica fisica all'Università di Glasgow. Come uno dei maggiori esperti della radioattività Soddy curava la *review* su questo tema per gli *Annual Reports on the Progress of Chemistry*, un'autorevole pubblicazione della Chemical Society inglese. Nel contributo per il 1912 egli discute gli ultimi dati sperimentali sulla ionizzazione, e in questo contesto colloca il modello di legame proposto da Thomson l'anno precedente. Un aspetto della posizione di Soddy ci interessa particolarmente, perché è rappresentativo dell'apertura verso modelli di materia non convenzionali che la fenomenologia della radioattività aveva suscitato in molti scienziati: "Che la ionizzazione non sia fondamentalmente atomica, ma dipenda entro certi limiti dalla combinazione chimica, è riconosciuto come uno dei pochissimi punti di contatto fra i nuovi temi trattati in questo rapporto [sulla radioattività] e le più vecchie scienze molecolari (*older molecular sciences*)". Per quanto riguarda l'articolo di Thomson così commenta Soddy: "I risultati straordinari ottenuti dallo studio dei raggi positivi in tubi a vuoto, in cui è stata riconosciuta un'intera schiera di nuovi tipi di aggregazioni molecolari, appartengono propriamente al tema dell'Analisi dei Gas e non possono essere trattati nei dettagli".⁴³

Gli *extraordinary results* non erano finiti. Già nell'articolo del febbraio 1911 - il settimo della serie⁴⁴ - Thomson aveva segnalato la presenza di uno ione il cui rapporto e/m era un terzo di quello dello ione H^+ . Cominciava così, con una traccia che apparve subito singolare, la caccia ad una specie 'molecolare' che Thomson battezzò X_3 , appena velata mascheratura di un troppo deciso H_3 . Il fascino che il Direttore del Cavendish provava per questa specie era in parte legato al suo tentativo, piuttosto tradizionale, di connettere i pesi atomici degli elementi a semplici serie aritmetiche ($4n$ e $4n + 3$),⁴⁵ ma ancora più misterioso appariva il fatto che essa veniva 'prodotta' in continuità mediante il "bombardamento con raggi catodici di varie sostanze", e che "nei gas rilasciati da certi metalli quando sono bombardati da raggi catodici [si era trovata] un'inesauribile sorgente (*unfailing source*) della sostanza". Queste citazioni sono

⁴¹ Rif. 38, p. 235; l'illustrazione è ripresa in rif. 17(b), p. 303.

⁴² Qui, di sfuggita, posso ricordare che Bohr aveva lasciato Cambridge per Manchester nel marzo 1912, e che il famoso Memorandum scritto dal giovane danese per esporre le sue idee a Rutherford è datato "giugno e luglio 1912". I rapporti fra Thomson e Bohr sono stati oggetto di numerose, commentate analisi; cfr. la bibliografia citata in rif. 18, pp. 444-445.

⁴³ F.Soddy, "Radioactivity", *Ann.Rep.Progr.Chem.*, **10**, 289-328 (1913), cit. alle pp. 304-305. Alla luce di quanto scrisse Soddy è singolare il giudizio di George L.Trigg: "È notevole che Soddy a quel tempo [settembre 1913] abbia fatto tanto poco caso a Thomson quanto Thomson ne fece a lui "; G.L.Trigg, *Landmark Experiments in Twentieth Century Physics*, New York: Dover, 1975, p. 25.

⁴⁴ Rif. 30.

⁴⁵ La storia delle opinioni di Thomson a proposito di questa traccia è stata già raccontata da Falconer: rif. 17(a), pp. 425-428, e rif. 17(b), pp. 305-308.

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

tratte da una conferenza tenuta alla Royal Institution il 17 gennaio 1913,⁴⁶ quando Thomson e Aston avevano individuato anche la traccia di uno ione che - nel caso di carica unitaria - avrebbe avuto massa 22. Nella sua esposizione Thomson dedica gran parte della sua attenzione a X_3 piuttosto che alla "linea 22",⁴⁷ però non riesce ad assegnare la traccia né ad una specie molecolare inedita (H_3), né ad un nuovo elemento, intermedio nella tavola di Mendeleev fra l'idrogeno e l'elio.⁴⁸ La conferenza si conclude con la promessa di Thomson di "ulteriori esperimenti", per continuare una "ricerca che si era [già] dimostrata lunga e tediosa",⁴⁹ ma l'anno che era appena iniziato non sarebbe stato affatto 'tedioso'.

Anni cruciali, 1913-1914

Dopo l'emozionante successo della Conferenza del 1911 Hendrik Lorentz aveva convinto Solvay a fondare un Istituto Internazionale di Fisica, ben dotato con un milione di franchi belgi. L'Istituto divenne una realtà il 1° maggio 1912.⁵⁰ In una lettera datata 22 novembre 1912 Lorentz invitò Thomson a partecipare alla seconda Conferenza Solvay che si sarebbe tenuta nell'ottobre dell'anno successivo, sul tema più d'attualità: *la structure de la matière*.⁵¹ A Bruxelles Thomson avrebbe dovuto fornire il primo 'rapporto', proprio sulla "struttura dell'atomo", e non si può dubitare che la preparazione per questo importante appuntamento abbia impegnato notevolmente il nostro fisico. Il 1913 fu in realtà un anno ricco per l'attività scientifica di Thomson. Della conferenza del 13 gennaio ho già riferito; il 22 maggio tenne la Bakerian Lecture alla Royal Society, e di questa posso ricordare che a proposito della specie corrispondente alla linea 22 venne confermata l'attribuzione ad un (improbabile) composto NeH_2 , anche se già a gennaio aveva rilevato che fino ad allora "non era stata trovata nessuna evidenza diretta della combinazione dei gas inerti".⁵²

I primi incontri veramente rilevanti - al di là del prestigio della Bakerian Lecture - avvennero a Birmingham, alla riunione annuale della BAAS. In quell'occasione si tenne una sessione speciale su "radiazione, emanazioni radioattive, e struttura dell'atomo", a cui partecipò un pubblico d'eccellenza, quasi un'anticipazione dell'incontro di Bruxelles. Erano infatti presenti oltre a Thomson, Rutherford, Jeans, Curie, Lorentz, nonché Bohr - non ancora invitato alle Conferenze Solvay. Fin da luglio il *Philosophical Magazine* aveva pubblicato il primo articolo della 'trilogia' del ventisettenne fisico danese,⁵³ e non c'è dubbio che la comunicazione di Bohr rubò la scena a Thomson, che aveva lavorato

⁴⁶J.J.Thomson, "Some Further Application of the Method of Positive Rays", in: The Royal Institution, *Physical Sciences*, vol. 7, Elsevier, 1970, pp. 295-305; cit. alle pp. 298-299.

⁴⁷ Noi sappiamo che puntigliose ricerche condurranno Aston ad assegnare questa linea all'isotopo 22 del neon.

⁴⁸ Rif. 46, pp. 304-305.

⁴⁹ Ib., pp. 305 e 298.

⁵⁰ J.Mehra, *The Solvay Conferences on Physics. Aspects of the Development of Physics since 1911*, Dordrecht: Reidel, 1975, p. 75.

⁵¹ Rif. 17 (a), p. 398.

⁵² Rif. 46, p. 296.

⁵³ Gli altri due articoli furono pubblicati nei fascicoli di settembre e novembre.

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

intensamente al suo nuovo modello atomico. Come i calcoli del danese partivano da assunzioni *ad hoc*, così anche la proposta del fisico di Cambridge presentava 'singolarità' fisiche, ma certamente essa era meno affascinante e innovativa, e - più di ogni altra cosa - non era in grado di fare previsioni quantitative con la stessa 'naturalità' dell'argomentazione di Bohr, il quale, dopo un paio di paginette punteggiate da *if we assume*, otteneva trionfalmente "valori dello stesso ordine di grandezza delle dimensioni lineari degli atomi, delle frequenze ottiche, e dei potenziali di ionizzazione".⁵⁴

La sessione speciale si tenne l'11 settembre, il 16 settembre Thomson riconquistò l'attenzione del convegno attirando alla sessione dei fisici anche molti chimici, interessati, secondo il resoconto di *Nature*, "ad ascoltare questa recente invasione del loro territorio da parte di Sir J.J.Thomson". In effetti il Direttore del Cavendish presentò i suoi dati su "X₃ e l'evoluzione di elio" mentre in un'altra sala Soddy si affrettava a terminare la sua conferenza in cui presentava la 'legge dello spostamento' del decadimento radioattivo, e la conseguente conferma teorica dell'esistenza di 'isotopi'.⁵⁵ Per quanto riguarda la comunità dei fisici l'esito di immagine dell'incontro di settembre a Birmingham rimase incerto per Thomson, ma era solo il preludio di quanto doveva avvenire a Bruxelles il mese successivo.

Il rapporto di Thomson partiva da una disamina dei principali fenomeni fisici il cui studio sperimentale poteva gettare luce sulla costituzione degli atomi, e fra questi citò - come fatto accertato - l'evoluzione di elio da metalli sotto l'impatto di raggi catodici. Attraverso questa analisi Thomson giungeva alla conclusione che all'interno degli atomi esistevano particelle positive e negative in moto su traiettorie sferiche, secondo una legge della forza che variava secondo l'inverso del quadrato della distanza. Ne risultava una distribuzione spaziale di cariche positive e negative piuttosto complessa, e nell'approssimazione bidimensionale il modello risultava costituito da una sequenza di anelli concentrici, essendo fortemente negativa al centro.⁵⁶ Proponeva quindi un'elaborazione del modello, basato ora sulla presenza di due forze radiali, una attrattiva secondo l'inverso del quadrato della distanza dal centro, e limitata nella sua azione in un certo numero di tubi radiali nell'atomo, ed una repulsiva secondo l'inverso del cubo della distanza dal centro. Era il modello già presentato a Birmingham, ritenuto da Thomson adatto a descrivere anche le proprietà chimiche degli atomi, e la cui ammissibilità era impostata su un criterio eminentemente pragmatico:

"Il solo criterio che dobbiamo applicare alle forze interne all'atomo è che le proprietà che l'atomo dovrebbe possedere in virtù di queste forze corrispondano

⁵⁴ N.Bohr, "On the Constitution of Atoms and Molecules", *Phil. Mag.*, (6) 26, 1-25 (1913), cit. alla p. 5. Come si vede dalla paginazione l'articolo di Bohr apriva il fascicolo e il volume del *Philosophical Magazine*; al termine della nota il fisico danese sottolineava che "la fondazione della [sua] ipotesi era stata cercata interamente nella sua relazione con la teoria della radiazione di Planck", *ib.*, p. 25.

⁵⁵ Rif. 18, pp. 290-291, 425.

⁵⁶ Rif. 50, pp. 77-79.

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

alle reali (*actual*) proprietà dell'atomo".⁵⁷

La proposta di Thomson trovò a Bruxelles interlocutori su posizioni che variavano dalla rispettosa prudenza di Rutherford ad una forte perplessità (Nernst, Langevin, Rubens), fino alla decisa opposizione di Curie e Lorentz. Curie attaccò Thomson su due punti. In primo luogo l'emissione di particelle sotto l'azione dei raggi catodici sarebbe dovuta avvenire con energie in gioco molto minori di quelle presenti nei fenomeni radioattivi; in secondo luogo (e qui Curie imperversò) la legge esponenziale che riguardava la disintegrazione radioattiva era completamente indipendente dalla temperatura, cosa non vera per il modello di Thomson. Le obiezioni di Lorentz furono ancora più radicali perché si muovevano su piano della coerenza fisico-matematica del modello; secondo i suoi calcoli un modello basato su due forze radiali non avrebbe mai permesso ad un corpuscolo di essere espulso dall'atomo, lasciando il 'tubo' in cui risiedeva. D'altra parte, sostenne Lorentz, l'uso della sola meccanica classica rendeva dubbio che il modello di Thomson potesse spiegare la radiazione del corpo nero.⁵⁸ La sconfitta epistemologica di Thomson fu radicale ed irreversibile, almeno per quanto riguardava la comunità dei fisici.⁵⁹

Ben diversa fu la vicenda dei numerosi modelli Thomsoniani sul versante contiguo della fenomenologia 'chimica'. Già nella prefazione alla prima edizione dei *Rays of Positive Electricity* Thomson si era rivolto direttamente ai chimici:

"Ho descritto piuttosto ampiamente l'applicazione dei Raggi Positivi all'analisi chimica; una delle principali ragioni per scrivere questo libro fu la speranza di poter indurre altri, e specialmente i chimici, a provare questo metodo di analisi. Sono sicuro che vi sono in Chimica molti problemi che potrebbero essere risolti con facilità di gran lunga maggiore con questo metodo che con qualsiasi altro".⁶⁰

Se i *Rays of Positive Electricity* non vanno molto oltre il riordino delle numerose precedenti pubblicazioni di Thomson, molto più penetrante fu il successivo sforzo di diradare l'oscurità delle forze agenti fra gli atomi e responsabili dell'affinità chimica.

Il fascicolo del *Philosophical Magazine* del maggio 1914 presentava come primo contributo un ampio articolo di Thomson, le cui primissime parole lasciano intravedere tutto lo scetticismo dell'autore rispetto ad un rigoroso, definitivo, impegno ontologico sulla costituzione degli atomi: "Se l'atomo è una mistura (*mixture*) di corpuscoli elettrificati negativamente e di elettricità positiva, esso produrrà nelle sue vicinanze un campo si forza elettrica".⁶¹ Questo perché anche

⁵⁷ J.J.Thomson, "On the Structure of the Atom", *Phil. Mag.*, (6) 26, 792-799 (1913), cit. alla p. 793. Il titolo ha un richiamo in nota, dove si legge: "Letto alla *British Association*, 11 settembre 1913".

⁵⁸ Rif. 50, pp. 80-81.

⁵⁹ Thomson mantenne un ruolo di primo piano nella direzione e organizzazione della comunità dei fisici inglesi; cfr. rif. 1, pp. 209-211.

⁶⁰ Rif. 29, p. V.

⁶¹ J.J.Thomson, "The Forces between Atoms and Chemical Affinity", *Phil. Mag.*, (6) 27, 757-789 (1914). Si noti che la *positive electricity* non ha un substrato

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

quando un atomo contiene quantità eguali di cariche opposte gli effetti non sono perfettamente bilanciati, dato che le cariche risiedono in parti diverse dell'atomo. Le forze agiranno anche su atomi appartenenti ad altre molecole dando così origine ad una moltitudine di "fenomeni fisici", "la pressione intrinseca e la tensione superficiale dei liquidi, il calore latente di evaporazione, la coesione di solidi e liquidi, la rigidità dei solidi, e così via", "mentre l'affinità chimica e i fenomeni chimici sono in generale gli effetti di forze che hanno la stessa origine ma che agiscono fra gli atomi in una medesima molecola". Anche se qui Thomson sembra totalmente trascurare la questione della reattività chimica (che implica l'azione reciproca fra molecole) la sua conclusione è recisa:

"La considerazione della mutua azione fra atomi è forse la parte più importante di qualsiasi teoria atomica, perché da essa dipende la spiegazione della maggioranza dei fenomeni chimici e di quelli fisici".⁶²

Nell'articolo vi sono diversi punti che indicano come Thomson si sia inoltrato nell'universo di discorso dei chimici pur mantenendo una forte autonomia - quasi idiosincrasia - rispetto a certi canoni accettati del pensiero chimico. Un aspetto di significato generale è l'insistenza dell'Autore sulla necessaria presenza negli atomi di 'doppietti' (noi diremmo dipoli), e sul fatto che la misurazione delle 'capacità induttive specifiche' (noi diremmo costanti dielettriche) permette la classificazione delle sostanze gassose in due categorie, a seconda della presenza o meno all'interno della molecola di cariche separate: "in composti di elementi in violento contrasto (*violently contrasted elements*) alcuni atomi della molecola sarebbero carichi di elettricità positiva, altri di elettricità negativa. [...] chiamerò ioniche le molecole di questo tipo [...] chiamerò ionizzazione intra-molecolare il processo mediante il quale gli atomi diventano carichi".⁶³ Questa insistenza sul comportamento come dielettrici delle sostanze troverà una precisa eco oltre atlantico, nella trattazione di un efficacissimo modello atomico da parte di G.N.Lewis (*vide infra*). Qui Thomson giunge a suddividere le sostanze gassose a seconda che rispettano o meno la relazione Maxwelliana fra costante dielettrica e quadrato dell'indice di rifrazione; troviamo così le molecole di metano e di benzene fra quelle in cui non c'è ionizzazione intramolecolare (molecole apolari); acqua e cloroformio fra quelle in cui c'è separazione di cariche (molecole polari).⁶⁴

Le ultime dieci pagine di questo lungo saggio sono dedicate ad una indagine "sulle condizioni per l'esistenza di un composto chimico e sulla valenza". All'inizio di questa parte Thomson discute la dipendenza dalla temperatura della stabilità delle molecole, affermando che "la questione se una sostanza è 'saturata' o meno dipende essenzialmente dalla temperatura".⁶⁵ Per quanto riguarda gli atomi la transizione del modello di Thomson verso un atomo statico è quasi

ontologico definito; verso il termine dell'articolo, discutendo un modello di legame chimico Thomson attribuirà agli atomi un *positive core*; ib. p. 782.

⁶² Ib., p. 757.

⁶³ Ib., p. 761.

⁶⁴ Ib., p. 764; sono tabulate venti sostanze. Nel 1912 Peter Debye aveva già sviluppata una *Dipoltheorie*, in riferimento alle differenze fra rifrazione e polarizzazione di molti composti; cfr. S.Neufeldt, *Chronologie Chemie, 1800-1980*, Weinheim: VCH, 1977, p. 127.

⁶⁵ Ib., p. 780.

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

completa: “possiamo considerare un atomo in cui tutti i corpuscoli sono fissati (*fixed*) come incapace di esercitare una grande attrazione su altri atomi intorno [...] un atomo in questo stato è ciò che i chimici chiamano saturo”:

“Consideriamo i corpuscoli elettrificati negativamente disposti in un atomo in una serie di strati consecutivi; supponiamo quelli negli strati interni fermamente fissati [...]. Vi può essere, tuttavia, vicino alla superficie un anello di corpuscoli che sono mobili e che debbono essere fissati se l'atomo ha da essere saturato. Supponiamo, inoltre, che il numero di corpuscoli di questo tipo possa variare da 0 a 8, ma che quando il numero raggiunge 8 l'anello sia così stabile che i corpuscoli non siano più mobili e che l'atomo sia per così dire auto-saturato.”⁶⁶

A questo punto Thomson collega il numero di “corpuscoli mobili” alla posizione dell'elemento nel sistema periodico, così che gli atomi dei metalli alcalini ne hanno uno, gli alcalino-terrosi due, e così via fino agli alogenuri che ne hanno sette; “elio e neon non hanno corpuscoli liberi”. Quando esistono corpuscoli mobili essi non possono essere fissati all'interno dell'atomo cui appartengono, perché “in questo caso il tubo di forza che parte da un corpuscolo dell'atomo ritorna su una carica positiva nello stesso atomo e possiede mobilità considerevole, poiché il corpuscolo al termine di esso può muoversi liberamente nell'atomo”. Per essere fissato il tubo di forza deve essere ancorato (*anchored*) a qualcosa che non sia nell'atomo stesso, ovvero “deve terminare su un altro atomo”. Thomson giunge così ad un modello di legame chimico tale che “se vi sono n corpuscoli liberi nell'atomo, per fissarli, e quindi per saturare l'atomo, gli n tubi di forza che partono dagli n corpuscoli devono tutti terminare su altri atomi”; quando poi “gli atomi sono elettricamente neutri [...] per ciascun tubo di forza che esce da un atomo un altro deve rientrarvi” proveniendo da un atomo diverso.⁶⁷

Con questo modello descrittivo Thomson si avvicina al concetto (fondamentale) che il legame chimico è dato da un doppietto di elettroni, e tuttavia lo ‘manca’, arrivando a pronosticare la stabilità della molecola H_3 (un suo *desideratum*), mentre “nell'usuale teoria della valenza H_3 non è possibile”. Ma accanto a ciò che poteva suonare ad un orecchio chimico come sciocchezza o svista,⁶⁸ si trovava un gioiello, e cioè una formula del benzene tale che “l'anello benzenico [era] completamente simmetrico” e che il legame fra gli atomi di carbonio aveva caratteristiche diverse dai legami nell'etano, nell'etilene e nell'acetilene, in quanto tre elettroni partecipavano a ciascuno dei sei legami dell'anello.⁶⁹

Fra la pubblicazione di questo notevole articolo, programmaticamente dedicato ad una tematica chimico-fisica, e lo scoppio della Guerra Europea passarono meno di tre mesi. La mobilitazione degli scienziati fu totale, in Gran

⁶⁶ *Ib.*, p. 781.

⁶⁷ *Ib.*, p. 782.

⁶⁸ Thomson richiama in vita composti del tipo $AgCl_n$ (p. 784) in cui sarebbero presenti quelle catene di atomi di cloro che fin dal 1893 Alfred Werner aveva dimostrato essere pura finzione; a questo proposito si potrebbe vedere: L.Cerruti, “Werner's *Beitrag*, 1893: A Linguistic and Epistemological Analysis”, in: G.B.Kauffman (Ed.), *Coordination Chemistry. A Century of Progress*, Washington, DC: ACS, 1994, pp. 43-56.

⁶⁹ *Rif.* 61, p. 784.

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

Bretagna come altrove, e la produzione scientifica di Thomson si ridusse ad un esile rivolo. Per mera curiosità noto che nel saggio che ho appena finito di commentare il nostro fisico discute ancora in termini di 'corpuscoli'; il 26 marzo 1915, in una conferenza sui raggi catodici 'lenti' consegna i *corpuscles* all'oblio e parla di *electrons* - quasi non fosse più tempo di scherzare.⁷⁰

Dalle due parti dell'Atlantico: Lewis, Thomson et al.

Nel gennaio 1916 il chimico-fisico americano Gilbert Newton Lewis pubblicava sul *Journal of the American Chemical Society* un articolo fondamentale nella storia delle teorie chimiche. L'articolo si basava su un modello di atomo il cui tratto più caratteristico era un 'guscio' esterno cubico in grado di accogliere fino ad otto elettroni, ottenendo così la configurazione, stabile e non reattiva, dei gas nobili. Il modello si dimostrava subito di grande efficacia esplicativa, per di più nel suo saggio Lewis proponeva e argomentava con chiarezza un concetto destinato a diventare un assioma nella comunità dei chimici: al 'trattino' rappresentativo di un legame semplice è possibile sostituire "due punti [...] per rappresentare i due elettroni che agiscono come i legami fra i due atomi".⁷¹ Lewis forniva così un principio teorico in grado di 'funzionare' egregiamente nei contesti più diversi, dalla descrizione del legame a idrogeno, allo studio della reattività in chimica organica, all'interpretazione della teoria quantistica del legame di valenza. L'approccio euristico di Lewis era simile a quello di Thomson; il suo obiettivo, infatti, era di "provare a trovare, al di fuori di ogni considerazione *a priori*, proprio quella struttura atomica che può spiegare meglio i fatti chimici noti".⁷² L'attacco del chimico-fisico americano al problema della valenza non solo era epistemologicamente analogo a quello del fisico inglese, ma si muoveva in un ambito di considerazioni sulla polarità delle molecole che presentava qualche somiglianza con le argomentazioni di Thomson nell'articolo del 1914.

Lewis cita esplicitamente l'articolo, definendolo "estremamente interessante", e affermando che in esso "Sir J.J.Thomson "aveva raggiunto conclusioni in sorprendente accordo" con quelle che lui stesso aveva già espresso in un contributo del 1913, evidentemente rimasto ignoto al collega inglese.⁷³ Nell'articolo a cui Lewis rinvia il lettore era stata proposta una nuova classificazione delle sostanze, suddivise in polari e non polari, indipendentemente dal loro essere 'organiche' o 'inorganiche',⁷⁴ e d'altra parte i modelli descritti dalle due parti dell'Atlantico trovavano un riferimento comune in un importante contributo di Richard Abegg, risalente al 1904 e citato da entrambi gli Autori.⁷⁵ Per quanto riguarda i rapporti fra l'elaborazione di Lewis e quella di Thomson

⁷⁰ J.J.Thomson, "Experiments on Slow Cathode Rays", in: The Royal Institution, *Physical Sciences*, vol. 7, Elsevier, 1970, pp. 487-491.

⁷¹ G.N.Lewis, "The Atom and the Molecule", *J.Am.Chem.Soc.*, **38**, 762-785 (1916), cit. alla p. 777.

⁷² *Ib.*, p. 774.

⁷³ *Ib.*, p. 763.

⁷⁴ G.N.Lewis, "Valence and Tautomerism", *J.Am.Chem.Soc.*, **35**, 1448-1455 (1913).

⁷⁵ Rif. 61, p. 786; rif. 71, p. 767.

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

una differenza piuttosto significativa è l'insistenza dell'Autore americano a proposito dell'influenza della "forza dell'ambiente polare" sulla polarità effettiva delle molecole della sostanza in esame, insistenza dovuta all'esperienza di Lewis come elettrochimico,⁷⁶ e tuttavia, proprio quando egli enuncia i sei postulati su cui basa il modello, il richiamo a Thomson è ineludibile. Il primo postulato viene così enunciato da Lewis:

"In ogni atomo c'è un *nocciolo* essenziale che rimane inalterato in tutti gli usuali mutamenti chimici e che possiede un eccesso di cariche positive corrispondenti in numero al numero ordinale del gruppo nella tavola periodica a cui l'elemento appartiene".⁷⁷

E avviando la discussione dei postulati Lewis chiarisce: "Il primo postulato tratta con le due parti dell'atomo che corrispondono all'incirca (*roughly*) agli anelli interni ed esterni dell'atomo di Thomson".⁷⁸ Iniziava così il rapporto a distanza fra i due Autori che venne reso più esplicito nell'agosto del 1919, quando il chimico-fisico statunitense inviò al fisico britannico *reprints* di suoi articoli sull'atomo cubico.⁷⁹ Lewis notava la "straordinaria somiglianza" fra le sue idee e quelle presentate dal fisico inglese nell'articolo dell'aprile precedente sull'origine degli spettri e la legge di Plack.⁸⁰ Non si trattava di un'iniziativa di pura cortesia. Il fascicolo di giugno del *Journal of the American Chemical Society* aveva pubblicato un poderoso (ponderoso) articolo di 66 pagine, a firma di Irving Langmuir.⁸¹ Ricercatore della General Electric, e futuro premio Nobel per la chimica (1932), Langmuir cominciava così una vasta campagna, fra lo scientifico e il promozionale, in favore dell'atomo cubico - e di se stesso. L'ampiezza del saggio e le intenzioni onnicomprensive dell'Autore giustamente preoccuparono Lewis, che ebbe subito la sensazione di vedere sepolto il proprio contributo fondante sotto una valanga di arbitrarietà; di qui il tempestivo tentativo di sottoporre ai competenti il suo pensiero autentico.

In effetti l'attività di Langmuir nel campo della modellistica 'cubista' fu assai intensa. Oltre a tenere numerose conferenze divulgative, nel giro di tre anni Langmuir pubblicò più di una dozzina di articoli, con un esito che dal punto di vista della disciplina (la chimica-fisica) potremmo definire ambiguo. Da una parte attirò l'attenzione di molti ricercatori sul modello di Lewis, dall'altra l'estensione arbitraria del modello, che ora si basava su ben 11 postulati, fu successivamente contraddetta, sia per quanto riguarda le proprietà fisiche degli atomi, sia per

⁷⁶ Rif. 71, pp. 763-76, cit. alla p. 765; in questa stessa pagina è ancora richiamato Thomson. Per chi volesse approfondire i rapporti fra i diversi modelli atomico-molecolari proposti nei primi due decenni del '900 rinvio ad un mio lavoro: L.Cerruti, "Il sistema e i modelli: l'atomo fra chimica e fisica (1871- 1916)", in: G.Michelon (a cura di), *La formazione scientifica nella scuola media superiore*, Venezia: Facoltà di chimica industriale, 1988, pp. 110-156.

⁷⁷ Rif. 71, p. 768; *kernel* è in corsivo nel testo.

⁷⁸ Loc. cit.

⁷⁹ Rif. 5, p. 135.

⁸⁰ Si veda il successivo rif. 90.

⁸¹ I.Langmuir, "The Arrangement of Electrons in Atoms and Molecules", *J.Am.Chem.Soc.*, **41**, 868-934 (1919).

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

quelle chimiche, con una possibile complessiva svalutazione dell'intera teoria.⁸² Nella particolare vicenda dei rapporti fra Thomson e la comunità internazionale dei chimici l'entrata a piedi giunti di Langmuir nel campo della modellistica portò, comunque, a risultati positivi. L'attenzione che lo scienziato americano attirò sulla propria opera teorica fu tale da essere invitato ad attraversare l'Oceano per tenere una conferenza in occasione dell'incontro della BAAS a Edimburgo, nel settembre 1921. Per molti chimici inglesi si trattò di un incontro fatale,⁸³ in particolare per quanti stavano lavorando sui problemi della reattività delle molecole organiche, ma prima di considerare il debito della comunità inglese verso Thomson è opportuno ritornare alla sua produzione scientifica.

Proprio nel 1921 Thomson riavvia l'attività pubblicistica sul problema della combinazione chimica con due notevoli contributi, e in entrambi i casi si 'scusa' del ritardo con cui comunica i suoi risultati. In nota al titolo del saggio apparso sul fascicolo di marzo del *Philosophical Magazine* parla della "pressione di altri incarichi (*duties*)",⁸⁴ nella prefazione alla seconda edizione dei *Rays of Positive Electricity*, datata agosto 1921, è più esplicito: "Mi dispiace del grande ritardo nella pubblicazione di questa edizione; esso è dovuto alla Guerra (*War*) e alla pressione di molti incarichi (*duties*)".⁸⁵ In effetti erano trascorsi ben sette anni dall'ultimo articolo dedicato all'affinità chimica,⁸⁶ otto dalla prima edizione dei *Rays of Positive Electricity*, e a conclusione di questo lungo periodo di silenzio troviamo Thomson sempre più interessato ai fenomeni molecolari. L'ultima frase del volume dedicato ai raggi positivi suona come un impegno:

"Il raggi positivi sembrano fornire un promettente metodo di indagine della struttura delle molecole, un argomento di importanza non minore di quello della struttura dell'atomo".⁸⁷

Questa frase è un'eco dell'apertura dell'articolo sul *Philosophical Magazine*:

"Da molti punti di vista la struttura della molecola è ancora più importante di quella dell'atomo. Perché la struttura della molecola coinvolge il modo (*method*) secondo il quale gli atomi sono legati insieme per formare sistemi stabili di differenti specie, ed è così alla radice della questione enormemente importante della combinazione chimica".⁸⁸

⁸² W.B.Jensen, "Abegg, Lewis, Langmuir, and the Octet Rule", *J.Chem.Ed.*, **61**, 191-200 (1984), alle pp. 195-197.

⁸³ *Fateful meeting* è il giudizio di Martin D. Saltzman, che ha dato molti contributi alla storia delle teorie elettroniche in chimica organica; cfr. M.D.Saltzman, "Benzene and the Triumph of the Octet Rule", *J.Chem.Ed.*, **51**, 498-502 (1974), alla p. 501.

⁸⁴J.J.Thomson, "On the Structure of the Molecules and Chemical Combination", *Phil. Mag.*, (6) **41**, 510-544 (1921).

⁸⁵J.J.Thomson, *Rays of Positive Electricity and their Application to Chemical Analyses*, London: Longmans, 1921, p. V.

⁸⁶ Rif. 61.

⁸⁷ Rif. 85, p. 234.

⁸⁸ Rif. 84, p. 510.

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

Le 33 pagine di questo contributo costituiscono un'ampiezza notevole, anche per Thomson, e una loro analisi dettagliata chiarirebbe lo sforzo compiuto dall'Autore per penetrare nel territorio tipicamente chimico del 'legame' e della teoria strutturale delle molecole. Qui mi limiterò ad alcuni punti, necessari per comprendere meglio l'efficacia del discorso teorico del nostro Autore nei confronti della comunità dei chimici.⁸⁹

Per ciò che riguarda il modello atomico-molecolare impiegato da Thomson siamo ancora una volta di fronte a delle varianti interessanti, sia per le forze chiamate in gioco, sia per il modello in quanto tale. Già nell'aprile 1919, in un articolo "Sull'origine degli spettri e la legge di Planck",⁹⁰ il sistema di forze invocato dal nostro fisico-matematico era notevolmente mutato. Le forze sono ancora sia repulsive, sia attrattive, ma mentre le prime agiscono secondo l'usuale legge dell'inverso del quadrato della distanza, quelle attrattive sono più complesse, dipendendo da una costante c (una certa lunghezza critica) in modo tale che quando la distanza r dell'elettrone dalla carica positiva è molto grande o molto piccola rispetto a c la dipendenza si riduce a $1/r^2$, mentre quando r è comparabile con c la forza svanisce a certe distanze, cambiando da attrazione a repulsione o *vice versa*. Nell'articolo che stiamo commentando Thomson considera diverse configurazioni di equilibrio in funzione della carica centrale e del numero di elettroni, e per il numero magico otto ottiene un duplice risultato: la carica centrale ha un valore quasi eguale alla somma delle cariche degli otto elettroni, e i risultati sono indipendenti dal valore di c . Tutto questo però si realizza mediante una certa fantasia geometrica perché il poliedro ai cui vertici si devono collocare gli otto elettroni è piuttosto particolare: gli otto elettroni sono posti ai vertici di due quadrati, posti su piani paralleli e ruotati di 45° l'uno rispetto all'altro, così che la loro proiezione su uno dei due piani è un ottagono. L'Autore confronta anche il suo poliedro con il cubo, rilevando con una certa soddisfazione che "Mentre tutte le facce piane di un cubo hanno quattro lati, il poliedro ruotato (*twisted*) ha otto facce triangolari così come due con quattro lati, così che due poliedri simili possono essere piazzati in modo tale da avere 2, 3 o 4 vertici in comune".⁹¹

Individuata la geometria della 'cella' (*cell*) fondamentale, Thomson è ora in grado di 'costruire' i modelli molecolari che lo interessano utilizzando un paio di condizioni ulteriori: "Le celle devono essere in numero sufficiente affinché il nucleo (*core*) di ogni atomo che possiede quattro o più elettroni sia piazzato all'interno di una cella separata. La ragione per cui ogni cella deve avere un nucleo (*nucleus*) pesantemente carico all'interno è di assicurare la stabilità".⁹² In realtà per 'cella' Thomson intende la distribuzione più esterna degli elettroni di una molecola, in quanto una 'cella' può comprendere al suo interno anche due

⁸⁹Nella quarantina d'anni dal 1883 al 1921 i modelli di legame chimico utilizzati da Thomson sono stati così numerosi e vari da richiedere un'indagine a parte.

⁹⁰ J.J.Thomson, "On the Origin of Spectra and Planck's Law", *Phil. Mag.*, (6) 37, 419-446 (1919).

⁹¹ Rif. 84, pp. 514-515; il poliedro discusso da Thomson è rappresentato in fig. 1, p. 515. La soddisfazione per la presenza di facce triangolari nasceva dal fatto che così il modello permetteva la realizzazione di 'legami' con tre elettroni.

⁹² *Ib.*, pp. 532-533.

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

nuclei, come quando si uniscono due atomi con cinque elettroni ciascuno.⁹³ Tuttavia, a proposito di questo modello *twisted*, ciò che interessa particolarmente Thomson è la possibilità di avere disposizioni fra atomi contigui con la messa in comune di una 'faccia' triangolare, e cioè di tre elettroni: "Non c'è nulla nell'ordinaria teoria della valenza analogo alle celle che hanno tre elettroni in comune". Il gusto della novità rispetto alla *ordinary valency theory* portò l'Autore a indulgere verso 'composti' come il carburo di neon (C.Ne, connessione quadrupla fra le celle), l'azoturo di neon (N.Ne, connessione tripla), e l'ossido di neon (O.Ne, connessione doppia), ma almeno in un caso fondamentale le facce triangolari del modello *twisted* permettevano una struttura non convenzionale che tutti i chimici potevano apprezzare, quella del benzene: "Il modo più semplice e più simmetrico per ottener[la] è di avere le sei celle in contatto intorno ad un anello con un contatto triplo fra ogni due".⁹⁴

Non è certamente un caso che Thomson trova modo di citare Lewis (e Langmuir) subito dopo aver esteso il suo modello al benzene e al naftalene: "Il punto di vista che gli elettroni sono disposti in insiemi di otto forma la base di articoli sulla combinazione chimica recentemente pubblicati dal Professor Lewis e dal Signor Langmuir, la loro opinione par quanto riguarda l'origine di questi insiemi differisce da quella data in questo lavoro".⁹⁵ Il 'Professor Lewis' non deve essere stato molto soddisfatto di quest'unica citazione che lo accumulava 'alla pari' con Langmuir, però - come vedremo - dopo un paio di anni i suoi meriti di teorico furono pienamente riconosciuti proprio là dove lavorava Thomson, ed in una manifestazione tenuta in onore dello scienziato inglese.

Robert Robinson, uno dei maggiori chimici organici dell'epoca, era stato uno degli 'illuminati' dalla conferenza di Langmuir a Edimburgo, nel settembre 1921. Un mese dopo il suo amico e collega Arthur Lapworth era stato orientato verso i più recenti modelli elettronici dell'atomo da un altro chimico organico, Julius Cohen, che da tempo era interessato a questo tipo di approccio ai problemi chimici.⁹⁶ Robinson e Lapworth non solo studiarono a fondo quanto era stato prodotto dalle due parti dell'Atlantico, ma iniziarono una traduzione/trasformazione delle loro teorie, basate fino ad allora sulle 'valenze parziali' proposte da Johannes Thiele nel 1899. Il loro lavoro fu così rapido e fertile che già nel gennaio del 1922 erano in grado di inviare al *Journal of the Chemical Society* due articoli, separati ma coordinati, che rappresentarono un vero 'manifesto' per la nascente chimica organica fisica.

Lapworth inizia il suo contributo con le fonti del nuovo indirizzo teorico, e cita fin dalla prima frase Thomson, Lewis e Langmuir (in quest'ordine), richiamando di Thomson le Sillman Lectures e l'articolo del 1921 sulla struttura delle molecole.⁹⁷ Nel corpo dell'articolo l'Autore dimostra che il rinvio alle Sillman Lectures non era un mero esercizio filologico, e di non essere un lettore occasionale di Thomson. La parte finale del lavoro è dedicata alle "interpretazioni basate sul moderno punto di vista elettronico della valenza", e in essa Lapworth

⁹³ *Ib.*, p. 529, fig. 9.

⁹⁴ *Ib.*, pp. 534-535.

⁹⁵ *Ib.*, p. 536.

⁹⁶ La lettera di Cohen a Lapworth è dell'ottobre 1921; Lapworth stesso ne parla in rif. 98, p. 423.

⁹⁷ Rif. 4 e rif. 84.

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

non solo parla della sua 'vecchia' identificazione dei "legami interi o parziali [con] un certo numero di tubi di Faraday", ma dichiara che "per interpretare le manifestazioni estreme dei fenomeni di polarità indotta" ritiene utile "non abbandonare completamente la concezione di una linea di valenza parziale come denotante tubi di forza".⁹⁸

L'articolo di Robinson era stato ricevuto dalla redazione londinese del *Journal of the Chemical Society* nello stesso giorno in cui era giunta la nota di Lapworth, e i due contributi vennero stampati di seguito. L'accento iniziale di Robinson è sull'estrema importanza che nelle procedure conoscitive dei chimici hanno le formule di struttura delle molecole, e segnala un 'vento di crisi' su una tradizione che sul *Journal* poteva vantare quasi sessanta anni di vita:

"In tempi recenti è diventato sempre più evidente che le formule grafiche impiegate dai chimici organici per rappresentare la costituzione di individui chimici sono espressioni che simboleggiano inadeguatamente le proprietà delle sostanze"

La sensazione di inadeguatezza veridittiva era grave, perché le 'formule grafiche' erano (e sono) uno strumento indispensabile per la stessa pratica di laboratorio in quanto è su queste mappe molecolari che i chimici organici elaborano le strategie di sintesi.⁹⁹ Di qui il riconoscimento pieno del contributo di Thomson:

"nello sviluppo del moderno punto di vista elettronico sulla natura della valenza l'operatore (*worker*) di gran lunga più influente è stato Sir Joseph Thomson [...] la cui teoria della natura del legame chimico comprende tutti gli aspetti che sono effettivamente essenziali per l'interpretazione dei simboli impiegati dai chimici organici. La formula del benzene data [nel presente lavoro] è già stata proposta da Thomson"¹⁰⁰

In quest'ultima citazione ho ommesso i riferimenti bibliografici di Robinson che rinviavano alle Silliman Lectures, al modello del 1904, all'articolo del 1906 sul numero di corpuscoli per atomo, e all'articolo del 1921 sulla struttura delle molecole.¹⁰¹ L'elogio di Thomson e questi riferimenti giungono dopo che l'Autore ha sottolineato che i suggerimenti di Abegg "sgombrarono il terreno per il successivo riconoscimento della stabilità dell'ottetto elettronico", così che il riferimento al contributo del 1906 rende il percorso di lettura suggestivo, in quanto sembra voler ricordare la parsimonia del chimico tedesco, che nel 1904 metteva in gioco al massimo otto elettroni quando Thomson e altri fisici come

⁹⁸A.Lapworth, "Theoretical Derivation of the Principle of Induced Alternate Polarities", *J.Chem.Soc.*, **121**, 416-427 (1922), alle pp. 422-423.

⁹⁹ Sulla abilità semiotica dei chimici si veda: Stephen J. Weininger, "Contemplating the Finger: Visuality and the Semiotics of Chemistry", *HYLE* 4, n. 1, maggio 1998, all'indirizzo:

<http://rz70.rz.uni-karlsruhe.de/~ed01/Hyle/Hyle4/weinin.htm>

¹⁰⁰W.O.Kermack, R.Robinson, "An Explanation of the Property of Induced Polarity of Atoms and an Interpretation of the Theory of Partial Valencies on an Electronic Basis", *J.Chem.Soc.*, **121**, 427-440 (1922), pp. 427-428.

¹⁰¹ Rif. 4, rif. 13, rif. 10, rif. 84, rispettivamente.

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

Lodge invocavano la presenza negli atomi di migliaia di 'corpuscoli'. Ma quest'ultima mia valutazione è irrilevante rispetto all'assegnazione di un valore totalizzante (*all the features*) alla proposta teorica del fisico di Cambridge.

Il 1923, ovvero incontri ravvicinati

Gli storici sanno che ogni anno è un buon anno per gli anniversari, ma anche gli scienziati non sono da meno. Per quanto ci interessa qui il 1923 fornì due ricorrenze adatte per ricordare eventi fondanti della scienza contemporanea: il giubileo della scoperta dell'elettrone e il primo decennio della teoria atomica di Bohr. Va anche ricordato che il fisico danese era stato laureato con il premio Nobel per la fisica nel 1922, portando ad un vero trionfo la fisica dei quanti, che aveva già ottenuto l'assegnazione a Planck nel 1918 per il quanto d'azione, e ad Einstein nel 1921 per la legge dell'effetto fotoelettrico. Su questo sfondo è interessante confrontare diverse iniziative in onore di Bohr e di Thomson.

Fra le celebrazioni del fisico danese ricordo solo quella che nel 1923 portò ad un numero speciale di *Naturwissenschaften*, in cui fu pubblicata una dozzina di contributi dedicati all'atomo di Bohr. Il primo, introduttivo e con un ritratto del fisico danese, era opera di Planck, seguiva un saggio di Born sulla teoria quantistica e il calcolo delle perturbazioni, uno di Kramers sul principio di corrispondenza, e così via teorizzando, con James Franck, Gustav Ludwig Hertz ed altri, fino ad una discussione di Kossel sulla relazione fra la teoria di Bohr e la spiegazione delle reazioni chimiche.¹⁰² Diverso fu il contesto scientifico che Thomson stesso contribuì a creare negli Stati Uniti e in Inghilterra.

Attraversato l'Atlantico, nell'aprile 1923 Thomson tenne una serie di cinque conferenze al Franklin Institute di Philadelphia; nel giugno successivo consegnava alla Chapman & Hall il testo delle lezioni, che venivano pubblicate con un titolo incisivo: *The Electron in Chemistry*. È ancora una volta la prefazione a spiegarci l'orientamento conoscitivo dell'Autore che, innanzi tutto, sentì la necessità di giustificare la propria scelta tematica: "La scelta della chimica come argomento di conferenze da parte di uno il cui lavoro si è svolto principalmente in fisica sembra richiedere qualche spiegazione":

"Nel corso dell'ultimo quarto di secolo i fisici [...] sono giunti a concezioni dell'atomo e della molecola che indicano il modo con cui una specie di atomo differisce da un'altra e come un atomo si unisce ad un altro per formare molecole. Questi sono proprio i problemi che sono trattati dai chimici e così se la moderna concezione dell'atomo è corretta la barriera che separava la fisica dalla chimica è stata rimossa"

Potremmo forse definire questo un atteggiamento da riduzionismo metodologico, confermato in un passo successivo che chiarisce anche un aspetto significativo del fascino che la chimica esercitava sul nostro Autore:

"Da molti punti di vista il versante chimico sembra essere quello su cui si possono aspettare gli sviluppi più clamorosi della fisica più recente. In primo luogo i problemi sono della massima importanza intrinseca e, secondariamente, nella vasta massa di informazioni accumulata dai chimici rispetto alla combinazione degli atomi abbiamo un mezzo senza pari per saggiare la verità

¹⁰² *Chemical Abstracts*, 17, p. 3128 (1923).

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

(*testing the truth*) di qualsiasi conclusione a cui ci possa portare la teoria”¹⁰³

Un programma di ricerca che aveva come obbiettivo la comprensione di una *vast mass of information* deve aver visto Thomson studiare in profondità molta chimica, e non solo di quella specie denominata chimica-fisica. Non sarebbe qui utile che mi dilungassi sulla 139 pagine di testo delle conferenze di Philadelphia, mi limiterò perciò a pochi cenni. Innanzi tutto il modello atomico presentato a livello fisico-matematico è sì quello del 1921,¹⁰⁴ ma in questa nuova fatica Thomson con una tattica per lui tipica compie una duplice mossa: da una parte approfondisce il modello già proposto estendendone l'applicazione ad una moltitudine di problemi, dai potenziali di ionizzazione ai volumi atomici,¹⁰⁵ dall'altra nel corso delle lezioni valorizza questo modello nel caso critico dell'anello benzenico,¹⁰⁶ ma, subito dopo, 'sacrifica' il suo cubo *twisted* per il più 'normale' cubo di Lewis.¹⁰⁷ Le applicazioni 'chimiche' spaziano da un tentativo di qualificare meglio il numero di coordinazione di Werner (cap. III), allo studio del meccanismo della combinazione chimica (cap. IV); in questa parte Thomson affronta (con atomi cubici) un luogo già classico della teoria elettronica della valenza, la tautomeria cheto-enolica.¹⁰⁸ Nel complesso il lettore dell'*Electron in Chemistry* incontra una cultura chimica adeguata alle ambizioni dell'Autore, ma di lì a pochi mesi Thomson doveva dimostrare ancora maggiore penetrazione nell'epistemologia chimica, affrontando il *sacta sanctorum* dei chimici organici, la 'sostituzione benzenica'.

Artefice di questo nuovo incontro fu un collega di Thomson, Thomas Martin Lowry, uno scienziato di vasta esperienza che accumulava le doti di chimico organico con quelle di chimico-fisico, era stato chiamato a Cambridge nel 1920 come primo professore di chimica-fisica. Tre anni dopo, in occasione del 25° anniversario della scoperta dell'elettrone organizzò nella sua Università un convegno della Faraday Society, dedicato ad una discussione sulla teoria elettronica della valenza. La presidenza della *General Discussion* fu affidata ad un impeccabile Thomson mentre una platea accaldata¹⁰⁹ seguiva la conferenza introduttiva di Lewis, giunto per l'occasione dagli Stati Uniti. Lewis insistette sul concetto fondamentale che il legame chimico era dovuto all'accoppiamento delle orbite di due elettroni, e sviluppò in dettaglio una teoria elettronica della tautomeria, il fenomeno chimico che già l'aveva spinto nel 1913 a pubblicare le

¹⁰³ J.J.Thomson, *The Electron in Chemistry, Being Five Lectures Delivered at the Franklin Institute, Philadelphia*, London: Chapman & Hall, 1923, pagina non numerata.

¹⁰⁴ Rif. 84.

¹⁰⁵ Rif. 103, pp. 3-27.

¹⁰⁶Ib., pp. 40-41; Thomson assicura che non vi sono eccessive tensioni nell'anello: "Sulla base di questo principio sono stati fatti dei modelli dell'anello benzenico ed anche di quello del nafatalene".

¹⁰⁷Ib., p. 37, fig. 11, e sempre più spesso da qui in poi. La fig. 11 rappresenta il coluro d'ammonio con due cubi.

¹⁰⁸Ib., p. 91.

¹⁰⁹Si era a luglio, e il termometro segnava 86 °F all'ombra (25.5 °C); Thomson invitò i presenti a togliersi la giacca perché, come è noto, gli inglesi mal sopportano un tenue aumento della temperatura. Cfr. rif. 5, pp. 189-190.

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

sue riflessioni sulla polarità delle molecole.¹¹⁰ Dopo l'apertura del chimico-fisico americano l'atomo di Bohr viene fortemente richiamato - anche nel convegno di Cambridge¹¹¹ - da una comunicazione di R.H.Fowler sulla relazione fra l'atomo quantistico e il problema della covalenza. Ma al centro dell'attenzione furono tre chimici: Lowry, l'organizzatore dell'incontro, Lapworth e Robinson. I contributi di Lowry, in particolare, furono sovrabbondanti, tanto da essere pubblicati in tre distinti articoli sulle *Transactions* della Faraday Society, ed in parte sul *Philosophical Magazine*; Robinson (che otterrà il Nobel per la chimica nel 1947) presentò due comunicazioni, una in comune con Lapworth, ed una seconda da solo dal titolo "Stabilità dell'ottetto in relazione all'orientamento e alla reattività nei composti del carbonio".¹¹² Oltre ai chimici che ho appena citato intervennero alla *General Discussion* anche altri scienziati che ebbero un ruolo notevole nello sviluppo delle teorie chimiche, come N.V.Sidgwick, ma nel 1923 Lowry, Lapworth e Robinson rappresentavano al più alto livello l'impegno dei chimici nel penetrare nell'intimo dei meccanismi delle reazioni organiche. In questo terzetto Robinson era la punta di diamante, e non ci pare strano ritrovare nella letteratura tracce notevoli dei rapporti fra le proposte del chimico Robinson e quelle del fisico Thomson.

In effetti l'incontro personale a Cambridge proseguì sulla stampa scientifica nei mesi successivi. Thomson pubblicò in settembre degli "studi nella teoria elettronica della chimica",¹¹³ in cui affrontava il problema cruciale per i chimici organici della previsione dell'andamento delle reazioni di sostituzione sull'anello benzenico. Tutta l'argomentazione è basata sui momenti di dipolo che si creano o variano nel processo di sostituzione di atomi di idrogeno in diverse molecole con radicali multielettronici (F, Cl, Br, I, OH, CH₃, CN). Più che i dettagli sono qui da mettere in rilievo un paio di fatti interessanti. Per l'aspetto puramente teorico, Thomson sembra essere perfettamente a suo agio in un universo di discorso complesso ed esoterico, quale quello dell'interpretazione delle regole di sostituzione nelle molecole organiche, fino ad allora riservato ai (pochi) chimici organici in vena di teorizzazione. Per l'aspetto del supporto sperimentale, il fisico fa sempre riferimento, quando possibile, ai (pochi) dati disponibili sulle costanti dielettriche delle sostanze, e proprio al termine dell'articolo lamenta il fatto che "non sembra che vi sia nessuna misura della capacità induttiva specifica dei benzeni bisostituiti"; questo è un peccato, perché esse "sarebbero di notevole interesse" in quanto permetterebbero la verifica di una possibile additività dei

¹¹⁰Rif. 74.

¹¹¹ Va appena ricordato che dal 1918 Thomson aveva dato le dimissioni da Cavendish Professor (pur mantenendo un proprio laboratorio) e che gli era succeduto Rutherford. Nel 1923 l'Università di Cambridge onorò Bohr con la laurea *honoris causa*; cfr. N.Blaedel, *Harmony and Unity. The Life of Niels Bohr*, Madison: Science Tech, 1988, p. 258.

¹¹² R.Robinson, "Octet Stability in Relation to Orientation and Reactivity in Carbon Compounds", *Trans. Faraday Soc.*, **19**, 506-507 (1923).

¹¹³ J.J.Thomson, "Studies in the Electron Theory of Chemistry. On the changes in chemical properties produced by the substitution of one element or radicle by another, with applications to benzene substitutions", *Phil. Mag.*, (6) **46**, 497- 514 (1923).

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

momenti di dipolo (*doublets*), e forse anche la “determinazione se il secondo sostituito è andato nella posizione para, orto o meta”.¹¹⁴

L'articolo conteneva anche una sezione sulla “polarizzazione del doppio legame”, con certe previsioni sull'addizione di HCl sul cloruro di vinile.¹¹⁵ La congettura di Thomson era contraddetta dai dati sperimentali, e Lapworth e Robinson con una lettera a *Nature* oltre a riferire di questa difficoltà, esponevano una loro consolidata teoria sull'azione dell'induzione elettrostatica lungo le catene di atomi di carbonio. Thomson rispose sullo stesso giornale a giro di posta, opponendosi a sua volta all'obiezione di Lapworth e Robinson, e lo scambio di opinioni fu fedelmente registrato dal *Chemisches Zentralblatt*, il ‘foglio’ che diffondeva in tutto il mondo gli sviluppi delle discipline chimiche.¹¹⁶

Nel complesso l'articolo sulla “teoria elettronica della chimica” ebbe un effetto rilevante e duraturo, perché non solo fu richiamato più volte nella letteratura ma diversi ricercatori si impegnarono nella verifica sperimentale della congettura sull'additività dei momenti di dipolo. Il risultato di queste ricerche fu che non sussisteva “una relazione *accuratamente* additiva”,¹¹⁷ come lo stesso Thomson aveva sospettato nel momento in cui aveva ricavato la relazione fra i momenti “trascurando la deflessione fra i due dipoli (*doublets*) dovuta alla loro azione reciproca”.¹¹⁸ Ma dopo un decennio di sviluppo teorico, in una *review* che sarebbe rimasta per molti anni il testo fondamentale della chimica organica fisica, Ingold poteva citare il lavoro pionieristico di Thomson, e asserire che “l'interazione elettrica intramolecolare [...] non solo è una proprietà necessaria del modello molecolare, ma anche un meccanismo indispensabile nella teoria delle reazioni organiche”.¹¹⁹

Il 1923, un anno di intense relazioni fra Thomson e la comunità dei chimici, si presta ad essere un discreto *terminus ad quem*, così che possiamo rivolgere la nostra attenzione agli aspetti più generali dell'attività multidisciplinare del nostro Autore.

Visualizzazione e procedure conoscitive

Come ho ricordato nell'introduzione il forte interesse di Thomson per la chimica e le sue teorie può essere fatto risalire almeno al 1883, quando pubblicò per i tipi della Macmillan il lungo saggio fisico-matematico con cui aveva vinto il premio Adams per il 1882. Nella prefazione si legge: “alla quarta parte [del saggio], che tratta una teoria dell'azione chimica basata sugli atomi vortice, ho fatto alcune aggiunte nella speranza di *rendere la teoria più completa*”.¹²⁰ Si trattava dei paragrafi finali: il 58 (“Sunto di una teoria chimica”) e il 59 (“Teoria della quantivalenza”) erano stati modificati; il sessantesimo e penultimo

¹¹⁴ *Ib.*, pp. 513-514.

¹¹⁵ *Ib.*, pp. 509-511.

¹¹⁶ *Chemisches Zentralblatt*, 1924, I, p. 1170.

¹¹⁷ C.K.Ingold, “Principles of an Electronic Theory of Organic Reactions”, *Chem. Rev.*, 15, 225-274 (1934), p. 227; corsivo nel testo.

¹¹⁸ *Rif.* 113, p. 513.

¹¹⁹ *Rif.* 117, loc. cit.

¹²⁰ J.J.Thomson, *A Treatise on the Motion of Vortex Rings*, London: Macmillan, 1883, pagina non numerata, enfasi mia.

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

(“Valenza dei vari elementi”) era completamente nuovo.¹²¹ All’inizio di questa parte della ricerca il ventisettenne fisico scriveva: “Proseguiremo ora con un’applicazione dei risultati precedenti al caso della combinazione chimica; si deve intendere che nelle osservazioni che seguono ci si riferisca solo a corpi allo stato gassoso”.¹²² Nella presente ricerca abbiamo visto che l’impegno di applicare i modelli atomici ai problemi della combinazione chimica (nell’approssimazione dello stato gassoso) durò per tutta la vita scientifica di Thomson. Le componenti di un simile, duraturo impegno furono sicuramente molteplici; Heilbron, ad esempio, ha sottolineato che, in generale, “[Thomson] raramente ha abbandonato un’idea, una volta sviluppata”.¹²³ Per gli interessi chimici, più in particolare, si possono individuare almeno tre motivazioni.

Nato a Manchester, il nostro fisico studiò - in condizioni economiche non facili - all’Owens College, una importante istituzione della sua città in cui insegnavano scienziati di primo ordine come Osborne Reynolds ed Henry Roscoe. Roscoe era un chimico d’eccellenza, aveva lavorato per molti anni a Heidelberg con Bunsen, e aveva condiviso con il suo maestro e con Kirchhoff l’entusiasmo per le prime applicazioni della spettroscopia atomica; si era poi impegnato sulla reattività fotochimica fra cloro e idrogeno. Eccellente docente, fornì di certo al giovane Thomson un quadro aperto delle conquiste e dei problemi della chimica del tempo. Per questa disciplina erano infatti tempi entusiasmanti, e nel 1876, quando Thomson si trasferì al Trinity College con una piccola borsa di studio, erano in piena fioritura due teorie chimiche di grande potenza conoscitiva: la teoria strutturale della chimica organica e il sistema periodico degli elementi. Una specifica debolezza dell’impianto teorico complessivo della chimica era altrettanto evidente, in quanto non vi era nessuna chiara connessione fra le due teorie. La chimica poteva quindi offrire ad un giovane ed ambizioso fisico un’area applicativa privilegiata.

Ma se si guarda allo stile di ricerca di Thomson si possono individuare motivazioni ad un livello più profondo del semplice prestigio disciplinare. I concetti cardine della chimica del tempo (valenza, struttura, periodicità) confermavano costantemente il loro valore esplicativo e predittivo senza dispiegare alcun formalismo matematico; le teorie chimiche erano palesemente potenti - anche in senso applicativo - e tuttavia erano fenomenologiche ed euristiche. Abbiamo visto nelle pagine precedenti la preoccupazione che i chimici interessati all’aspetto teorico della disciplina avevano nei confronti della ‘completezza’ delle formule grafiche. Essi si attendevano che le rappresentazioni strutturali fossero in grado di descrivere/suggerire il maggior numero possibile di fenomeni chimici, a partire da quelli cruciali della reattività.

È evidente che, oltre al forte valore euristico assegnato alle teorie, l’atteggiamento teorico di Thomson aveva in comune con quello tradizionale dei chimici anche un altro aspetto (almeno). I suoi contributi contengono spesso una valorizzazione di tutto ciò che possa permettere una visualizzazione dei processi fisici. Limitandoci agli ultimi lavori che abbiamo incontrato nella presente ricerca possiamo individuare un paio di ‘luoghi’ assai significativi per la diversità del

¹²¹ *Ib.*, pp. 114-124.

¹²² *Ib.*, p. 114.

¹²³ J.L.Heilbron, “Thomson, Joseph John”, *Dictionary of Scientific Biography*, vol. XVII, New York: Scribner, 1976, pp. 362-372; alla p. 362.

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

contesto in cui sono collocati. Nel 1920, mentre stava riprendendo a pieno il suo ruolo attivo nella comunità scientifica, Thomson pubblicò un saggio teorico dal titolo estremamente impegnativo: *Mass, Energy and Radiation*. Qui ci interessano proprio le prime parole dell'articolo:

“Scopo di questo lavoro è tentare di fornire un metodo di rappresentare nei termini di concezioni fisiche i processi che avvengono nei fenomeni fisici. È un tentativo per aiutare chi ama integrare (*to supplement*) un trattamento puramente analitico dei problemi fisici con uno che li rende in grado di visualizzare i processi fisici come il funzionamento di un modello; chi, in breve, ama ragionare per mezzo di immagini oltre che con simboli”.¹²⁴

Un anno dopo il suo orientamento teorico è ormai decisamente a favore di un atomo 'statico', e il nostro fisico giustifica la scelta con un ragionamento (per noi) esemplare:

“Quando dobbiamo considerare molecole che forse contengono dozzine di elettroni, se essi dovessero tutti descrivere queste grandi orbite il moto sarebbe così inesorabilmente (*hopelessly*) intricato e confuso che, a parte la fondamentale difficoltà della stabilità, il modello ci darebbe scarso aiuto nella formazione di un quadro mentale (*mental picture*) di ciò che succede nella combinazione chimica”.¹²⁵

Un ragionamento simile, e *key-words* identiche si ritrovano dopo qualche anno nelle conferenze di Philadelphia, che abbiamo visto essere state dedicate quasi integralmente all' applicazione ai problemi chimici del modello atomico statico. Nel presentare il suo approccio cubico-statico al mondo microscopico Thomson affermava:

“Questa ipotesi porta ad un quadro mentale (*mental picture*) semplice e le sue conseguenze sono in stretto accordo con i fatti della chimica”.¹²⁶

Qui Thomson esprime sinteticamente, in modo quasi assiomatico, il proprio atteggiamento epistemico, la cui costanza dal 1883 al 1923 potrebbe essere confermata con numerose, e forse eccessive, incursioni da parte nostra in altri lavori del fisico di Cambridge. Ma con questa ultima citazione possiamo terminare la lettura dei testi del nostro Autore.

Conclusioni e riflessioni

Se si considera l'atteggiamento verso la chimica tenuto dai fisici che si sono succeduti sulla cattedra di Cambridge, da Maxwell a Rutherford, si vede subito che Thomson rappresenta una notevole eccezione. Maxwell, più volte sollecitato e coinvolto dalla comunità dei chimici, mantenne un'aristocratica indifferenza

¹²⁴ J.J.Thomson, “Mass, Energy and Radiation”, *Phil. Mag.*, (6) **39**, 678-689 (1920).

¹²⁵ Rif. 84, p. 511; si ricordi che al momento di scrivere questa frase Thomson aveva già ricevuto il *reprint* dell'articolo di Lewis, in cui nitidi 'atomi cubici' spiegavano una moltitudine di fenomeni chimici.

¹²⁶ Rif. 103, p. 4.

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

rispetto ai fondamenti della chimica, che forse avrebbero potuto essere utili per i suoi lavori di fisica molecolare. Rayleigh uscì ironicamente disgustato dall'intimità con la chimica in cui era caduto per via del *flirt* con l'ipotesi di Prout. Rutherford, un fisico sperimentale insuperabile, trovò insolente, e in un certo modo punitivo, l'essere stato laureato con il Nobel per la chimica e non con quello per la fisica. Per di più, nei primi trenta anni di vita del Cavendish Laboratory, fu vivissima nella cultura scientifica inglese la presenza di Sir William Thomson prima, e di Lord Kelvin poi. Qualunque fosse il titolo onorifico di questo grandissimo fisico, la sua avversione per la chimica - in quanto chimica - rimase ferma ed esplicita. Ho qui cercato di avanzare alcune congetture sulla 'vocazione chimica' di J.J.Thomson. Esse andranno confermate con una ricerca più approfondita sul suo modo di 'far scienza', e sul contesto culturale all'interno del quale operò, ma mi pare che qualche risultato possa essere dato per acquisito.

La concezione che Thomson aveva di una *reasonable theory* si atteggiava quasi perfettamente a molte 'teorie locali' della chimica, potenti nel loro ambito, e quasi sempre senza 'giustificazione' oltre la coerenza interna, l'ampia copertura sperimentale e l'efficacia predittiva. Il fatto evidente, che i chimici si lasciavano letteralmente guidare nelle pratiche sperimentali dalle rappresentazioni grafiche delle molecole, non era sicuramente passato *unnoticed* ad uno scienziato così interessato ad ottenere una visualizzazione dei fenomeni fisici.¹²⁷ Nel corso degli anni di ricerca sui raggi positivi, e ancor più dopo il secondo Convegno Solvay, Thomson si trovò ad essere nelle condizioni di dare contributi alle pratiche sperimentali e alle teorie chimiche non estemporanei ed 'esterni', ma di prospettiva ed accolti all'"interno" della comunità dei chimici. Al di là dei possibili risvolti epistemologici cui ho accennato, mi pare indiscutibile che gli interventi di Thomson a proposito della teoria della combinazione stabilirono un intenso rapporto di reciproco interesse fra il nostro fisico e i chimici più coinvolti nello sviluppo teorico della loro disciplina.

In chiusura di questa parte della mia ricerca sui confini fra fisica e chimica¹²⁸ mi permetto una riflessione storiografica, tinta di qualche sfumatura etica. In effetti, per un rigurgito di falsa coscienza, sono molto di moda i discorsi 'etici', e non vorrei annoiare più che tanto il possibile lettore, per cui porrò senza preamboli la questione: trovo inaccettabile che un buon numero di storici abbia deciso di pensionare Thomson come scienziato all'indomani del suo insuccesso alla seconda Conferenza Solvay. Non sto sollevando il problema (un po' piagnone) della storia degli sconfitti, in quanto credo di aver dimostrato che, guerra permettendo, l'attività scientifica di Thomson rimase intensa e, per certi aspetti, eccellente. Sono evidentemente proprio questi 'certi aspetti', che da una parte rendono la vicenda di Thomson così interessante per una 'storia dei confini', e dall'altra risultano irrilevanti per una storiografia che considera "come prototipo

¹²⁷ Falconer ha insistito molto su questo aspetto dello stile di ricerca di Thomson; cfr. rif. 17.

¹²⁸ Per una differenziazione (che ritengo cruciale) fra le epistemologie regionali della fisica e della chimica si potrebbe consultare un mio contributo: L.Cerruti, "Chemicals as Instruments. A Language Game", HYLE 4, n. 1, maggio 1998, all'indirizzo: <http://rz70.rz.uni-karlsruhe.de/~ed01/Hyle/Hyle4/cerruti.htm>

Luigi Cerruti A reasonable theory of chemical combination. Intenzioni, pratiche e proposte di J.J.Thomson, 1910-1923

della scienza solo una determinata categoria del sapere tramandato".¹²⁹ Se siamo coinvolti solo nella genealogia di una parte del presente, la fisica degli anni 1920 è la fisica dei quanti, e quindi Thomson è veramente andato in pensione nell'ottobre 1913. Se invece vogliamo comprendere il pensiero scientifico di Thomson, la sua vita scientifica non può essere arbitrariamente amputata sulla base di una nostra definizione di scienza, e si deve seguire compiutamente il suo percorso conoscitivo, anche quando pare entrare in una zona d'ombra. Di qui la sfumatura etica (di etica della conoscenza) che mi pare emerga da una semplice constatazione di disinteresse storiografico.

¹²⁹La citazione più completa suona: "la moderna metodologia acquisisce un potere pseudonormativo per il fatto di considerare come prototipo della scienza solo una determinata categoria del sapere tramandato, per poi generalizzarne i modi di procedimento che rendono possibile una ricostruzione di questo sapere e per trasporli in una definizione di scienza"; v.: J.Habermas, *Conoscenza e interesse*, Bari: Laterza, 1990, p. 17.

