

FRANCESCA TURCO* – LUIGI CERRUTI*

The facts were too much for us
Rayleigh, Ramsay e la scoperta dell'argo

The facts were too much for us Rayleigh, Ramsay and the argon discovery

Summary – The events bound to the discovery of argon allow to highlight an interesting relation of collaboration/contest between two great scientists, Rayleigh, the physicist, and Ramsay, the chemist. A meaningful aspect of this relationship is that Rayleigh did much chemistry and, symmetrically, Ramsay did much physics. The unusual properties of the new element worsened the theoretical difficulties of contemporary physics and chemistry. The analysis of these difficulties leads to give a positive role to the incompleteness of scientific theories.

Keywords. Rayleigh, Ramsay, argon, scientific theory, incompleteness.

La scoperta dell'argo fu un episodio di grande rilievo nella storia della scienza, sia per la novità assoluta di un elemento chimicamente inerte, sia per l'intreccio intimo e significativo fra le procedure conoscitive della fisica e della chimica. Come è noto i protagonisti della scoperta furono il fisico John William Strutt, Lord Rayleigh (1842-1919), e il chimico William Ramsay (1852-1916). La ricchezza di fonti, primarie e secondarie, permette un'analisi storico-critica particolarmente interessante a diversi livelli. A livello di storia disciplinare si ha a che fare con un caso esemplare di collaborazione/competizione fra due ricercatori di eccezionale abilità e notorietà, ma forse è ancora più notevole il fatto che entrambe le discipline chiamate in causa mostrarono per l'occasione la loro debolezza in punti cruciali delle rispettive teorie fondamentali. Infine, a livello di sociologia della conoscenza si possono mettere in evidenza le diverse forme di 'contrarietà' espresse dai chimici (e da altri ricercatori ...) nei confronti del nuovo, insolito elemento.

* Dipartimento di Chimica Generale ed Organica Applicata, Università di Torino. E-mail: francesca.turco@unito.it luigi.cerruti@unito.it

Il nostro racconto inizierà con una breve presentazione dei due protagonisti, seguita dall'esposizione degli eventi relativi alla scoperta dell'argo e al suo impatto immediato sulla comunità scientifica inglese. Dopo aver riferito dei dubbi avanzati verso l'esistenza stessa del nuovo elemento, entreremo più in profondità considerando sia le pratiche sperimentali messe in atto da Rayleigh e da Ramsay, sia la situazione conoscitiva complessiva in cui i due scienziati e l'intera comunità scientifica si trovavano ad operare. Nelle conclusioni, richiameremo l'inadeguatezza delle epistemologie normative e, infine, tesseremo un elogio dell'incompletezza disciplinare e dell'incertezza conoscitiva.

I PROTAGONISTI

Nel 1904 Rayleigh e Ramsay furono insigniti di quello che già allora era considerato il massimo onore per uno scienziato. Rayleigh ebbe il premio Nobel per la fisica con questa motivazione: "Per le sue ricerche sulle densità dei più importanti gas e per la sua scoperta dell'argo in connessione con questi studi". Ramsay ebbe il premio Nobel per la chimica con una motivazione che non menzionava l'argo: "Come riconoscimento dei suoi servizi nella scoperta degli elementi gassosi inerti nell'aria, e per la sua determinazione della loro collocazione nel sistema periodico". Gli accademici svedesi devono aver calibrato con cura le parole che illustravano le ragioni della loro scelta; i motivi di questa cautela diventeranno chiari fra qualche pagina, e in ogni modo li metteremo in evidenza nelle conclusioni. Nel caso di Rayleigh la motivazione del Nobel introduce molto bene il suo profilo biografico.

John William Strutt, Lord Rayleigh

John William Strutt nacque in una famiglia di recente nobiltà, ma di ampie risorse. Solo in un periodo di crisi economica il nostro fisico si integrò per pochi anni nella vita accademica, mentre la quasi totalità delle ricerche che lo resero famoso furono condotte nel laboratorio privato, collocato in un'ala del *manor* di famiglia. Da questo punto di vista egli appartiene alla particolare tradizione della scienza inglese che aveva visto molti grandi scienziati operanti al di fuori delle Università. Il titolo fu ereditato nel 1873, alla morte del padre, però noi lo richiameremo sempre come Lord Rayleigh, o, più semplicemente, come Rayleigh.

Nell'ottobre 1861 Rayleigh inizia gli studi a Cambridge, entrando al Trinity College come *fellow-commoner*, ed ottenendo la laurea nel 1865. In ambito scientifico il clima culturale dell'Università di Cambridge era totalmente dominato dalla matematica e dalle sue applicazioni in fisica. Gli studenti non avevano alcun rapporto diretto con le pratiche sperimentali, e Rayleigh poté soltanto assistere – con grande interesse – agli esperimenti di ottica eseguiti a lezione da George Stokes (1819-1903). Il nostro (futuro) fisico terminò gli studi con risultati di eccellenza nel campo della fisica-matematica, tuttavia Rayleigh, che da tempo si dedicava alla

fotografia, era attratto anche dalla chimica e dopo la laurea seguì il corso di chimica analitica tenuto da George Downing Liveing (1827-1924) [8]. Quello di Liveing fu l'unico laboratorio frequentato da Rayleigh, e questo *imprinting* sperimentale è stato trascurato da quasi tutti i biografi, mentre diventa piuttosto significativo proprio alla luce delle sue successive ricerche.

Rayleigh fu un ottimo fisico-matematico, e se per questo aspetto si colloca pienamente all'interno della ricchissima scuola britannica di fisica-matematica, per un altro aspetto se ne distacca nettamente per l'intensa attività sperimentale. In ogni caso il nostro fisico si affermò come grande studioso di acustica ed elettricità, al punto di essere chiamato nel 1879 a dirigere il Cavendish Laboratory, come successore di Maxwell. Il periodo di vita accademica terminò abbastanza rapidamente, e nel 1884 Rayleigh lasciò il pur prestigioso incarico, e tornò a far ricerca a Terling, dove, come si è detto, aveva attrezzato un laboratorio privato, fatto su misura sulle sue necessità sperimentali in fisica e in chimica. Nel 1887 Rayleigh accettò di succedere a John Tyndall (1820-1893) come Professore di fisica alla Royal Institution. È in questa veste che Rayleigh entrerà nel pieno del nostro racconto.

Sir William Ramsay

William Ramsay nacque nel 1852 a Glasgow in una famiglia di tradizioni scientifiche e tecnologiche. Il padre era ingegnere civile e uno zio paterno professore di geologia. Precocissimo, si dimostra poliglotta fin da bambino. Nel 1866 inizia gli studi all'Università di Glasgow, dapprima orientato verso lo studio dei classici (per diventare sacerdote), poi si interessa sempre più di argomenti scientifici, ed oltre a seguire i corsi di chimica e di fisica dal 1869 lavora per 18 mesi come chimico apprendista presso un analista professionista. Si può ricordare che il corso di fisica era allora tenuto, ad altissimo livello, da un didatta straordinario di nome William Thomson, poi più noto come Lord Kelvin (1824-1907). Nell'aprile del 1871 Ramsay entra nel laboratorio di chimica organica di Rudolf Fittig (1835-1910) a Tübingen. È in questa Università che Ramsay prende a 19 anni il Dottorato in chimica, sempre sotto la direzione di Fittig.

Ritornato in Scozia, è assistente di chimica presso l'Università di Glasgow fino al 1880, quando ottiene la cattedra di chimica al University College di Bristol. Nel 1887 è chiamato a ricoprire la cattedra di chimica al University College di Londra, come successore di Alexander Williamson (1824-1904). Nella nuova sede Ramsay allestisce un laboratorio privato dove sarà attivo per venticinque anni, fino al suo pensionamento nel 1912. Il titolo di *Knight Commander of the Order of Bath* gli fu conferito nel 1902, data in cui divenne Sir William Ramsay.

Dato il maestro incontrato a Tübingen, la tesi di dottorato di Ramsay non poteva essere che di chimica organica, e di chimica organica si interessa durante gli anni di assistentato trascorsi a Glasgow. Un netto ri-orientamento si verifica con il trasferimento a Bristol, dove si occupa essenzialmente degli stati critici e della ten-

sione di vapore di solidi e liquidi. Entra quindi decisamente nel campo della chimica fisica, in un settore che nelle pratiche sperimentali sembra preludere alle successive ricerche sui gas nobili. Tra l'altro Ramsay divenne anche un abilissimo soffiatore, un 'mestiere' indispensabile per chiunque volesse lavorare con linee a vuoto, pressioni esigue e piccole quantità di gas. La linea di ricerca iniziata a Bristol è proseguita anche a Londra, dove inizia anche un'indagine sui rapporti tra tensione superficiale e temperatura per studiare i fenomeni di associazione nei liquidi.

Proprio al momento dei primi interrogativi sul nuovo elemento presente nell'atmosfera la notorietà internazionale di Ramsay fu confermata da un invito a tenere una conferenza alla Société de Physique et d'Histoire Naturel di Parigi. Durante il soggiorno ebbe modo di incontrarsi con molte delle stelle del ricco firmamento scientifico francese, da Marcellin Berthelot a Louis Pasteur, Charles Friedel, Henri Le Chatelier. Era il marzo del 1894 [16].

GLI EVENTI

La sequenza di eventi che portò alla scoperta dell'argo si può ricostruire dettagliatamente colmando le amplissime lacune temporali lasciate dalle fonti primarie con le generosissime informazioni offerte da uno dei protagonisti [5] e da parte dalle fonti secondarie. Qui si deve fare riferimento in particolare ai lavori del figlio di Rayleigh, Robert [13], e a quelli dei biografi e colleghi di Ramsay [14-16].

Rayleigh, il fantasma di Prout e le ricerche sulla densità dei gas

Con due brevi note pubblicate nel 1815 e 1816 il medico e chimico inglese William Prout (1785-1850) propose una congettura affascinante, e cioè che il peso atomico di qualsiasi elemento dovesse essere un multiplo intero del peso atomico dell'elemento con il peso atomico minimo – l'idrogeno, quindi. Già al momento della prima proposta l'ipotesi di Prout era clamorosamente falsificata dal peso atomico di elementi fondamentali come il cloro, però il costante accrescersi della piccola folla di elementi disturbava l'immagine fisicalista di una presunta semplicità della natura, e così l'ipotesi di Prout sopravvisse ad ogni confutazione sperimentale. Nel 1882 anche Rayleigh subì il fascino di questa fantasmatica ipotesi, ed essendo in quell'anno il Presidente della Sezione A della British Society for the Advancement of Science (BAAS) scelse di parlarne nel suo discorso inaugurale al Convegno di Southampton. Il contesto generale del discorso è quello del rapporto fra la teorizzazione fisico-matematica, il lavoro sperimentale e la necessità di precisione nelle misure. Il testo è ricco di osservazioni epistemologiche, con un certo contrasto proposto dall'Autore a proposito del valore maggiore o minore attribuito agli aspetti deduttivi delle scienze fisiche. Verso la fine del discorso Rayleigh si intrattiene sulla "legge di Prout", e divide piuttosto arbitrariamente i chimici in due categorie: quelli che rifiutano incursioni *a priori* nel loro dominio, e si basano solo sui dati

sperimentali, e quelli che “pensano che l’evidenza sperimentale contro i numeri semplici sia di carattere alquanto esile, bilanciato se non superato dall’argomento a priori in favore della semplicità”. Al Presidente della Sezione fisico-matematica il tema sembrava essere “specialmente adatto per ulteriori esperimenti”, più precisi dei precedenti: “È forse giunto il momento che sia desiderabile una rideterminazione della densità dei principali gas” [9].

Nel 1882 erano noti soltanto quattro elementi gassosi a temperatura ambiente: idrogeno, azoto, ossigeno e cloro (il fluoro sarà isolato solo nel 1886), e di questi i ‘principali’ erano i primi tre. Tre soli elementi sulla settantina allora nota potrebbero sembrare un po’ pochi per una ‘verifica’ convincente, tuttavia Rayleigh avviò effettivamente l’indagine sperimentale promessa a Southampton. Il nostro fisico aveva la consuetudine di fare molte e diverse ricerche contemporaneamente, e forse per questo il primo articolo sulla densità relativa di ossigeno e idrogeno fu pubblicato solo nel 1888. A questo punto Rayleigh iniziò le ricerche sulla densità dell’azoto.

Ovviamente un punto cruciale della determinazione dei pesi atomici, indipendente dalla tecnica usata, è quello della purezza delle sostanze utilizzate nelle pratiche sperimentali. Questo aspetto non fu affatto trascurato da Rayleigh, ma tutti i suoi ragionamenti nei primi lavori sulle densità dei gas sembrano adombrare che la determinazione dei pesi atomici attraverso l’applicazione della legge di Avogadro sia più ‘fisica’ della determinazione mediante pesate su sostanze solide. In ogni caso nel corso della ricerca sull’azoto si accorse che la densità del gas isolato dall’atmosfera era sensibilmente maggiore di quella dell’azoto ottenuto per via chimica. Di qui uno specifico appello ai chimici, pubblicato su *Nature* sotto forma di lettera il 29 settembre 1892. Il chiarimento richiesto non giunse, e Rayleigh riprese l’argomento solo l’anno dopo, in un lavoro riassuntivo delle ricerche “Sulla densità dei principali gas”, presentato alla Royal Society. Rispetto al successivo intervento di Ramsay, è interessante sottolineare che l’attenzione del nostro fisico era allora appuntata più sulla ‘leggerezza’ dell’azoto ricavato da composti, che sulla ‘pesantezza’ dell’azoto isolato dall’atmosfera:

“Sembra certo che la leggerezza (*lightness*) anormale non può essere spiegata da contaminazione da idrogeno, o da acqua, e tutto suggerisce che la spiegazione deve essere cercata in uno stato dissociato dello stesso azoto” [10].

Malgrado la sicurezza dei dati sperimentali portati da Rayleigh l’anomalia nelle densità rimase a lungo un fatto privato del nostro fisico, che guardava all’intera faccenda “con disgusto e impazienza” [13]. La situazione mutò nell’aprile 1894, quando Rayleigh presentò alla Royal Society una nuova comunicazione, più specifica, dal titolo “Su una anomalia incontrata nelle determinazioni della densità del gas azoto”.

La ‘collaborazione’ fra Rayleigh e Ramsay

Ramsay era stato eletto membro della Royal Society nel 1888 ed era fra gli ascoltatori della comunicazione di Rayleigh, che espose ancora una volta i dati spe-

rimentali, arricchiti da nuove esperienze fra cui alcune rivolte a verificare l'eventuale presenza di azoto dissociato: "Ho fatto qualche esperimento per provare se le densità erano influenzate dall'esposizione del gas a scariche elettriche silenti" [11]. Secondo la testimonianza di Ramsay, fu dopo questa comunicazione che il nostro chimico ebbe una breve conversazione con Rayleigh: "Gli chiesi se gli sarebbe dispiaciuto che provassi a risolvere il mistero" [16]. Secondo le fonti disponibili rimane insoluto se Rayleigh abbia dato o meno il 'permesso' esplicito a Ramsay. È possibile che i due gentiluomini si siano lasciati con un tacito consenso del fisico, costretto da un inevitabile fair play ad accettare il non richiesto aiuto del chimico.

Rayleigh aveva comunicato quale fosse lo stato dell'arte sulle densità anomale il 19 aprile 1894, senza fare cenno alcuno alla presenza di un nuovo elemento. Quattro giorni dopo, il 23 aprile, Ramsay scrisse alla moglie: "Tra l'altro, mi sono messo inaspettatamente (*curiously*) a lavorare sull'azoto, ma non dal punto di vista commerciale". Dopo questo cenno alle sue precedenti ricerche sulla sintesi dell'ammoniaca, Ramsay prosegue con qualche dettaglio sul problema delle densità e conclude con una frase profetica:

"È del tutto possibile che nell'azoto ci sia qualche gas inerte che non è stato rilevato. Così Williams [l'assistente] sta ora combinando l'azoto dell'aria con il magnesio per vedere se c'è qualcosa – qualcosa che non sia azoto. Noi possiamo scoprire un nuovo elemento" [4].

Inizìò così una collaborazione/competizione fra i due scienziati che, in realtà, seguirono linee di ricerca distinte. Su queste linee di ricerca riferiremo più avanti, ora possiamo anticipare che l'aspetto collaborativo consistette essenzialmente in un frequente scambio di lettere [5, 14], e in qualche rara visita nei rispettivi laboratori di Terling e di Londra. Fra le lettere di Ramsay almeno una va citata. Il 24 maggio, un mese dopo l'avvio della 'collaborazione', il nostro chimico scriveva a Rayleigh in questi termini: "Vi è venuto in mente che c'è spazio per elementi gassosi alla fine della prima colonna della tavola periodica?". All'interrogativo Ramsay faceva seguire un abbozzo di tavola periodica con tre x (gli elementi incogniti) collocati dopo il fluoro, nell'ottavo gruppo [16]. Si vede quindi che dopo appena un mese Ramsay si sentiva in grado di comunicare la sua principale ipotesi di lavoro ad uno scienziato esigente e cauto come Rayleigh. Da parte sua il grande fisico si rese conto rapidamente che il suo aristocratico isolamento era decisamente giunto a termine – almeno in questo caso. Durante tutta la sua lunga carriera scientifica Rayleigh ebbe rarissimamente dei collaboratori il cui livello scientifico andasse oltre quello del suo fedelissimo tecnico di laboratorio, ma in questo caso non poté sottrarsi alla 'presa' dei risultati ottenuti da Ramsay.

Il 4 agosto Ramsay determinò la densità del nuovo gas, ottenendo il valore 19,085 (ossigeno molecolare = 16); nello stesso giorno scrisse a Rayleigh per comunicargli l'importante risultato [16]. La risposta non si fece attendere. In una lettera a Ramsay del 6 agosto Rayleigh scrisse che anche lui aveva isolato il nuovo gas "sebbene in quantità miserabilmente piccole". Questo scambio di battute rimanda ad un

punto focale della collaborazione/competizione fra i due scienziati: Ramsay operò la separazione dell'argo dall'azoto utilizzando la reazione a caldo dell'azoto con magnesio, mentre Rayleigh si ostinò ad eliminare l'azoto mediante scariche elettriche in una atmosfera mista di ossigeno e azoto, e successiva eliminazione degli ossidi di azoto con una soluzione caustica. Dato il diverso 'stato dell'arte', nella sua risposta Rayleigh esprimeva sì l'intenzione di fare una comunicazione sul gas all'imminente incontro di Oxford della BAAS, e però giungeva alla conclusione che dato l'intreccio delle loro ricerche "la sola soluzione" fosse "una pubblicazione congiunta" [16]. A stretto giro di posta, il 7 agosto il nostro chimico rispose che era d'accordo per una pubblicazione in comune, e aggiungeva una quantità ordinata di dati, quasi una bozza d'articolo. Tutto era pronto per un primo annuncio pubblico.

L'argo entra in società

La presentazione dell'argo in società iniziò in sordina per concludersi nel più smagliante dei modi. Alla riunione della BAAS, il 13 agosto, la comunicazione fu inserita all'ordine del giorno solo all'ultimo momento; la mancata preparazione del pubblico può spiegare la scarsa reazione all'annuncio, descritta successivamente da Ramsay come lieve incredulità:

“L'esposizione fu accolta con sorpresa e interesse, i chimici erano naturalmente un po' increduli che l'aria, una sostanza la cui composizione era stata studiata così a lungo e così attentamente, potesse fruttare qualcosa di nuovo” [5].

Ben diversamente andarono le cose nel gennaio successivo. Prima di descrivere la riunione della Royal Society del gennaio 1895 vale la pena di riferire come mai, in questa storia di fulminee risposte e rapidissimi avanzamenti, trascorsero ben cinque mesi fra l'annuncio esplorativo e quello in grande stile. La necessità di presentarsi con un apparato sperimentale più robusto davanti alla Royal Society fu accentuata da un piccato intervento di Dewar, di cui si dirà nel prossimo paragrafo, che complicò non poco le cose, inducendo a una cautela ancora maggiore. I due scienziati effettuarono quindi nuove determinazioni fra le quali quella, cruciale per poter sostenere la scoperta di un nuovo elemento, della determinazione del peso atomico. Più caratteristiche distintive vengono mostrate più un nuovo ente acquisisce realtà: furono determinati anche alcuni dati chimico fisici come il punto di fusione e di ebollizione, queste misure richiedevano l'impiego di ossigeno liquido e il malcontento di Dewar fu probabilmente acuito dalla decisione di Ramsay di chiedere la collaborazione di Karol Olszewski (1846-1915), un collega polacco, per eseguirle. La motivazione ufficiale della scelta di Ramsay fu di carattere tecnico, ma costituì comunque uno strappo all'etichetta accademica; in ogni modo Dewar fu uno dei pochi assenti alla riunione di gennaio della Royal Society. La querelle aveva contribuito a suscitare un interesse senza precedenti, tanto che il regolamento della Società venne modificato per permettere la presenza di esterni e per la prima volta

la riunione venne effettuata nell'anfiteatro della London University, che poteva ospitare 800 persone e che non fu comunque sufficiente ad accogliere tutti gli interessati [16]. La presentazione, fatta da Ramsay, si articolò su tre punti principali: la assoluta inerzia chimica dell'argo, la determinazione del peso molecolare a partire dalla densità e la determinazione della monoatomicità del nuovo gas, eseguita con una tecnica brillante ed elegante di cui parleremo a lungo più avanti. Monoatomicità significa peso atomico pari al molecolare, e cioè circa 40 [6]. Questa volta le reazioni andarono ben oltre la lieve incredulità.

LA ECO PUBBLICA DELLA SCOPERTA

La scoperta di un elemento a dir poco insolito come l'argo non poteva non suscitare dubbi e polemiche, con un ampio spettro di argomentazioni, deduzioni e controdeduzioni. La letteratura secondaria ha perpetuato l'opinione che fossero i chimici ad opporsi alla scoperta, mentre i fisici sarebbero stati unanimi nel difendere il valore della scoperta [1]. La situazione era alquanto più complessa, e dal punto di vista storiografico appare inestricabilmente intrecciata con un altro aspetto della vicenda: la valutazione dei rispettivi 'meriti' di Rayleigh e Ramsay nella scoperta dell'argo. A noi pare che sia interessante proprio questo intreccio delle considerazioni scientifiche disciplinari con la competizione fra le stesse discipline, tuttavia nella presente comunicazione non vi è lo spazio per un simile approfondimento. Piuttosto prenderemo in considerazione tre fra le tante risposte dei chimici, portandole come esempi delle condizioni al contorno all'interno delle quali si mosse l'intera comunità disciplinare.

Le prime due reazioni alle proposte di Rayleigh e Ramsay, veramente al limite della decenza accademica, sono quelle di due importanti esponenti della comunità dei chimici inglesi.

Il primo fu naturalmente Sir James Dewar (1842-1923) che quando fu annunciata la scoperta era uno stretto collega di Rayleigh, in quanto Professore di chimica alla Royal Institution. La comunicazione sul nuovo elemento era stata fatta ad Oxford il 13 agosto, e al dibattito aveva partecipato anche Dewar; tre giorni dopo, il 16 agosto, a stampa su *The Times* di Londra compare una acidula presa di posizione di Dewar, che nega l'esistenza del nuovo elemento. Questa prima lettera al Direttore è seguita il 18 agosto da una seconda, che avanza una più ampia argomentazione che propone come soluzione del problema della densità anomala l'esistenza di molecole N_3 , una forma allotropica dell'azoto. Fin qui si è nei limiti della normale dialettica scientifica, ma ciò che colpisce è altro. Esperto delle basse temperature, Dewar era allora l'unico ricercatore nel Regno Unito in grado di liquefare l'azoto, sarebbe stato quindi il collaboratore ideale di Rayleigh e Ramsay, che, come abbiamo visto, preferirono invece ricorrere al polacco Olszewski. Contro la contiguità accademica all'interno della Royal Institution, e la sua stessa competenza professionale, giocarono dei fattori esclusivamente personali. È stato sottolineato che

Dewar non ebbe mai buoni rapporti con Ramsay [3], e d'altra parte quale studioso importante delle proprietà dell'aria si deve essere sentito messo fuori gioco dalla scoperta di un nuovo componente dell'atmosfera, presente per di più con una certa abbondanza.

La seconda reazione estrema fu quella di Henry Edward Armstrong (1848-1937). Nel periodo che ci interessa era professore di chimica alla Central Technical Institution di Londra, incarico che tenne fra il 1884 e il 1914. Chimico organico di vaglia, aveva portato dei contributi significativi nel campo delle sostituzioni sugli anelli naftenici, ma nel prosieguo della sua interminabile carriera si oppose strenuamente a molte importanti teorie, da quella della dissociazione elettrolitica a quella del legame a idrogeno. Era amico personale di Dewar, e quando fu annunciata la scoperta dell'argo ricopriva il ruolo istituzionale più importante nella comunità dei chimici inglesi in quanto era Presidente della Chemical Society per il triennio 1893-1895. Le sue reazioni esagitate contro l'esistenza dell'argo non si espressero soltanto nelle riunioni pubbliche e dall'alto della sua carica istituzionale, ma anche in modo più velenoso in quanto pubblicò sulle *Chemical News* diverse lettere ostili a Rayleigh e Ramsay, mascherandosi sotto lo pseudonimo *Suum Cuique*. Il culmine dell'ostilità personale nei confronti di Ramsay fu raggiunto nel marzo del 1895, due mesi dopo l'affollata seduta della Royal Society. Il 27 marzo, in occasione dell'Assemblea annuale della Chemical Society fu assegnata a Rayleigh la medaglia Faraday, un onore fino ad allora riservato a chimici stranieri (fra cui Cannizzaro). L'esclusione di Ramsay non era senza significato, ma anche il nostro chimico aveva qualche sostenitore. Così l'andamento della cerimonia ebbe uno scarto inusuale e fu data la parola a Ramsay che poté trionfalmente annunciare la scoperta dell'elio in un campione di cleveite. Ramsay aveva avuto la conferma spettroscopica dell'esistenza dell'elio in un campione terrestre tre giorni prima, il 24 marzo [14].

La discussione della terza risposta esemplare, di Raffaello Nasini e di tutt'altro segno, va posticipata, e sarà ripresa dopo aver indagato quali siano stati i contributi sperimentali di Rayleigh e Ramsay.

PRATICHE SPERIMENTALI A CONFRONTO

Uno degli aspetti più interessanti del rapporto scientifico fra Rayleigh e Ramsay è una sorta di capovolgimento dei ruoli, con il fisico che si muove in laboratorio come un chimico, e il chimico che fa (anche) della buona fisica. Questo capovolgimento è significativo anche perché dopo un incontro avvenuto a Terling il 23 settembre 1894 i due scienziati si erano lasciati con una divisione dei compiti: Rayleigh avrebbe indagato le proprietà fisiche del nuovo gas, mentre Ramsay avrebbe studiato le proprietà chimiche [7]. In questa sezione tutti i riferimenti lasciati impliciti rimandano al comune contributo pubblicato sulle *Philosophical Transactions* della Royal Society [6].

Le pratiche chimiche di un fisico

Le 55 pagine dell'articolo che sigillò l'incontro dei due scienziati sono di per sé una imponente prova del valore della loro collaborazione, e nello stesso tempo ne mettono in evidenza anche il carattere competitivo. Infatti una parte cospicua dell'articolo è occupata da una dettagliata presentazione dei tre diversi apparati utilizzati da Rayleigh per l'isolamento dell'argo.

Si è già detto che Rayleigh seguì sempre il metodo di isolamento che già era stato di Cavendish. Nel primo apparato il recipiente in cui avveniva la reazione fra azoto e ossigeno sotto l'effetto di scariche elettriche era una semplice provetta. Probabilmente era ciò che Rayleigh aveva messo a punto prima che Ramsay gli annunciasse trionfante di aver determinato con precisione la densità del nuovo gas. La 'miserabile' quantità isolabile aveva convinto il nostro fisico che doveva ampliare la scala dell'apparato. In ogni caso Rayleigh difese l'utilità di questa sua prima creatura: "l'apparato si è dimostrato conveniente per la purificazione di piccole quantità di argo, e per la determinazione della quantità di argo presente in campioni differenti di gas, ad es. nei gas espulsi dalla soluzione in acqua".

Il secondo apparato aveva un recipiente di reazione costituito da un matraccio del volume di circa sei litri, con un incremento di capacità di quasi due ordini di grandezza rispetto al primo. Al momento della presentazione pubblica nella seduta straordinaria del 31 gennaio nel laboratorio di Terling era all'opera questo apparecchio, ma Rayleigh non era ancora soddisfatto e sottolineò che esso non poteva essere considerato "come se avesse assunto una forma finale". La 'forma finale' fu ottenuta solo più tardi, ma in tempo perché Rayleigh potesse inserirne la descrizione nelle bozze. Il terzo apparato descritto nell'aprile aveva un recipiente di reazione di circa 20 litri.

La rincorsa di Rayleigh si commenta da sé, in quanto nello spirito di una effettiva collaborazione Rayleigh avrebbe potuto benissimo utilizzare campioni di gas preparati da Ramsay. Forse il nostro fisico avrebbe potuto esercitare le sue eccellenti capacità sperimentali in altre direzioni. Di queste capacità se ne ha una riprova nello stesso testo che stiamo commentando. Una delle obiezioni avanzate contro il neo-nato elemento è che fossero i metodi stessi di separazione a 'produrlo' come un artefatto, un evento, non certo insolito, delle pratiche analitiche nella fase preliminare [6]. Una delle risposte sul piano sperimentale di Rayleigh fu particolarmente elegante. Lavorando con un battente acquoso per raccogliere il prezioso gas incognito, Rayleigh si era presto accorto che perdeva una buona quantità di argo, semplicemente perché era piuttosto solubile in acqua. Questa osservazione lo portò a controllare quale fosse la densità dell'aria disciolta nell'acqua piovana. Non vi era qui nessun pericolo di produrre un artefatto: i gas raccolti dall'acqua piovana erano significativamente più densi di quanto ci sarebbe potuto aspettare dai valori di solubilità noti per i 'principali' gas dell'atmosfera. I gas disciolti si arricchivano effettivamente di argo.

Le misure fisiche di un chimico

Come si è detto, mentre Rayleigh caparbiamente proseguiva la costruzione di apparati di volume crescente per separare l'argo, Ramsay mise a punto un'apparecchiatura basata su una differente sequenza di reazioni. La miscela azoto-argo veniva fatta passare ripetutamente su un letto di magnesio riscaldato in grado di catturare l'azoto, ottenendo una miscela sempre più ricca in argo. Questo metodo porta a un prodotto gassoso e uno solido, e quindi separabili con estrema semplicità, non richiede alcuna purificazione in bagno basico ed è dunque molto più veloce e pulito rispetto alle scariche elettriche di Rayleigh; non stupisce quindi sia stato il chimico a isolare l'argo in quantità sufficiente a determinarne la densità, quel famoso 19.075 comunicato a Rayleigh nell'agosto del 1894. È invece per lo meno curioso che sia stato ancora il chimico a volere ed effettuare la misura, di natura squisitamente fisica, della velocità del suono nel gas, parametro in grado di portare alla fondamentale determinazione del peso atomico. La metodologia adottata era tutt'altro che consolidata, e infatti quello fu un terreno molto battuto dalla polemica, ma sicuramente non nuova, esistendo il precedente della determinazione della monoatomicità del mercurio da parte di August Adolph Kundt (1839-1894) ed Emil Gabriel Warburg (1846-1931), esperienza che Ramsay conosceva molto bene e che assunse come modello. La misura è di estrema eleganza ed il risultato scosse in profondità le due comunità dei chimici e dei fisici, vale quindi la pena di vederla meglio in qualche dettaglio, come premessa ad una discussione più generale della situazione conoscitiva in cui operavano i nostri scienziati.

Nella sua opera sui *Gases of The Atmosphere* Ramsay discute a lungo lo statuto conoscitivo dei calori specifici dei gas, e ripercorre la lunga strada che dalle ricerche di Newton sulla velocità del suono nei gas porta all'esperienza di Kundt e Warburg. I due fisici tedeschi avevano ricavato la relazione $\gamma = C_p/C_v = c^2 d/p$, dove C_p e C_v sono i calori specifici rispettivamente a pressione e a volume costante, c è la velocità del suono nel gas considerato, d e p la densità e la pressione del gas. I due scienziati tedeschi avevano poi determinato sperimentalmente la lunghezza d'onda di un certo suono propagato in aria e in vapore di mercurio; conoscendo la densità dei due mezzi e il valore di γ per l'aria si poteva applicare una formula che dava il valore di γ per il mercurio. Con le notazioni di Ramsay, si può dire che per un suono di frequenza n valgono (nelle condizioni dei gas ideali) le relazioni:

$$n\lambda_{\text{aria}} = c_{\text{aria}} \quad n\lambda_{\text{argo}} = c_{\text{argo}}$$

Il valore di c_{aria} è ben conosciuto, e nella pratica di laboratorio l'esperimento consiste nel determinare i due valori di λ con un opportuno strumento (v. Fig. 1). Un tubo di vetro, con una bacchetta infissa ad una estremità, è adagiato orizzontalmente su una scala graduata di vetro, con il fondo ricoperto uniformemente di finissima polvere di licopodio. Il tubo è riempito del gas in esame e, come si vede

in Fig. 1, la nota viene emessa strofinando l'estremità esposta della bacchetta, le vibrazioni sono trasmesse all'interno del tubo. Il tubo è ovviamente chiuso alle due estremità, si creano delle onde stazionarie e la polvere di licopodio si raccoglie dove maggiore è la pressione del gas. La distanza fra due 'picchi' corrisponde alla metà di λ [5]. Per valutare meglio la correttezza delle misure Ramsay non limitò l'esperimento all'aria e all'argo, ma lo estese anche all'idrogeno e all'anidride carbonica [16]. Per un gas monoatomico il rapporto teorico è $\gamma = C_p/C_v = 1,67$; il dato sperimentale di Ramsay è quasi perfetto: $\gamma = 1,66$.

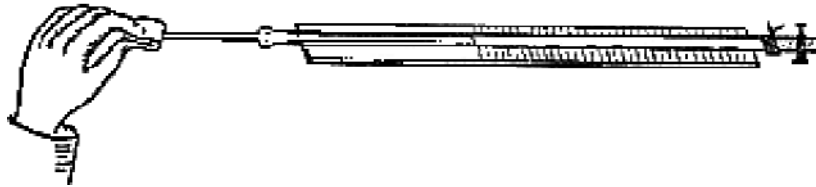


Fig. 1. Apparato per la determinazione della velocità del suono in un gas. Rif. [5], p. 205.

LA SITUAZIONE CONOSCITIVA

La scoperta di una sostanza totalmente inerte, priva di qualsiasi reattività, fu certamente sorprendente, in un certo senso inverosimile, anzi, inverosimile al punto che un scienziato famoso come il francese Marcelin Berthollet (1827-1907) prese un abbaglio clamoroso e mentre era ancora in atto la discussione sull'esistenza o meno del nuovo elemento affermò di avere ottenuto in laboratorio un composto fra argo e benzene [2]. Le critiche rivolte agli scopritori della nuova sostanza erano però appuntate su due punti importanti delle argomentazioni di Rayleigh e Ramsay. I due punti erano strettamente legati fra di loro.

Nel 1895 il sistema periodico di Mendeleev e Meyer si era da tempo affermato come una struttura teorica di riferimento, fondamentale per la comprensione della natura degli elementi chimici. Era quindi indispensabile per gli scopritori determinare il peso atomico del nuovo elemento per poterlo collocare in un posto vacante della tavola periodica, ma in assenza di reattività la questione era ancora più difficile del solito. L'unico metodo disponibile richiedeva l'applicazione della legge di Avogadro, e questa applicazione esigeva a sua volta la conoscenza della atomicità delle molecole dell'argo. Nel 1858 il nostro Stanislao Cannizzaro (1826-1910) aveva ricavato elegantemente l'atomicità delle molecole gassose di molti elementi, fra cui ossigeno, azoto, fosforo, mercurio. Però la legge degli atomi di Cannizzaro non poteva essere usata nel caso dell'argo, proprio per la mancanza di composti di questo elemento. L'atomicità delle molecole dell'argo doveva quindi essere ottenuta altrimenti.

Abbiamo visto che Rayleigh e Ramsay scelsero di seguire la strada aperta nel 1876 dai tedeschi Kundt e Warburg, che avevano confermato la proposta di Can-

nizzaro della monoatomicità del mercurio in fase vapore. Secondo la teoria cinetica dei gas l'atomicità delle molecole di un gas poteva essere dedotta dal rapporto $\gamma = C_p/C_v$. Kundt e Warburg avevano ottenuto un valore di γ molto vicino al rapporto teorico $C_p/C_v = 1,67$, valido per le molecole monoatomiche. Nella comunicazione alla Royal Society Rayleigh e Ramsay avevano usato il rapporto sperimentale $C_p/C_v = 1,66$ per sostenere la monoatomicità dell'argo, ma è a questo punto che si verificava una specie di catastrofe conoscitiva. La monoatomicità portava ad un peso atomico dell'argo che nella progressione 'naturale' dei pesi atomici collocava il nuovo elemento fra il potassio e il calcio, una collocazione già di per sé insostenibile. Per di più la collocazione 'chimica' dell'argo era più arretrata, fra il cloro e il potassio, creando così una vistosa anomalia nel sistema periodico. La malasorte del risultato si rifletteva pure sulla teoria che aveva permesso di ricavarlo, e indebolì notevolmente lo statuto epistemologico, già incerto, del teorema dell'equipartizione dell'energia, che era (ed è) il fondamento teorico di tutta la teoria cinetica dei gas.

Come già abbiamo detto per la rivalità disciplinare fra chimici e fisici sui 'meriti' di Rayleigh e Ramsay (*vide supra*), anche per quanto concerne la valutazione contemporanea del teorema dell'equipartizione dell'energia siamo di fronte a questioni storiografiche troppo intricate per essere trattate compiutamente in una comunicazione come l'attuale. Ci limiteremo quindi a dei tratti essenziali. Innanzi tutto va detto che era debole la base sperimentale del rapporto γ ricavato dal teorema dell'equipartizione. L'unico caso conosciuto di molecole monoatomiche era quello del mercurio, e il rapporto teorico $C_p/C_v = 1,40$ per le molecole biatomiche non era rispettato in casi importanti come quello dell'idrogeno a cui si attribuiva $\gamma = 1,376$. Dovremmo inoltre cercare di guardare ai sistemi molecolari con gli occhi dei chimici e dei fisici di allora, e qui è utile menzionare il giudizio del grande fisico irlandese George Fitzgerald (1851-1901) che espone liberamente i suoi dubbi a Rayleigh, affermando recisamente che la conclusione che si poteva trarre dai rapporti dei calori specifici era questa: "non che sia monoatomico, ma che i suoi atomi siano così legati insieme nella sua molecola che la molecola si comporta come un tutto (*whole*) come se fosse monoatomica" [2].

Si è detto che nel 1895 il sistema periodico era accreditato nella comunità scientifica come 'legge' fondamentale della chimica. Vi era comunque una 'eccezione' accertata/accettata all'ordinamento secondo il peso atomico crescente, ed era quella del tellurio rispetto allo iodio. Per decenni i chimici si erano impegnati in nuove determinazioni del peso atomico del tellurio per ricondurlo alla *ratio* della tabella periodica. Se l'esito di queste ricerche era stato incerto, l'introduzione di una nuova eccezione avrebbe fatto vacillare l'intero sistema; di qui la grande e comprensibile cautela di molti chimici.

Possiamo ora considerare la presa di posizione di Raffaello Nasini, cui avevamo accennato dopo aver riportato le reazioni, animate, di Dewar e Armstrong. In un articolo del marzo 1895 Nasini scrive:

“pel mercurio la monoatomicità si era ammessa basandosi sopra leggi fondamentali della chimica; la determinazione del rapporto k fu una conferma, e certo splendida, di quelle deduzioni. Per l’argo invece unica ragione per ammettere questa monoatomicità è il valore del rapporto k ”.

È chiaro che il “rapporto k ” di Nasini è il rapporto C_p/C_v , ed è altrettanto chiaro che il maestro della chimica-fisica italiana era alquanto scettico sulla funzione conoscitiva autonoma delle deduzioni tratte dalla teoria cinetica dei gas. L’encoraggio all’epistemologia disciplinare era forte, persino eccessivo se nello stesso articolo si legge:

“il sistema del Mendelejeff [...] che è appoggiato da tutto ciò che sin qui sappiamo sugli elementi, soltanto dal fatto che l’argo avesse il peso atomico di 40 verrebbe completamente debolito. Nel dubbio io non esito, sino a che altri fatti di ordine chimico non ci avranno detto qualche cosa di positivo, a ritenere che 40 non può essere il peso atomico del nuovo elemento” [4].

Nasini, anche se era lontano dalle beghe personalistiche di Dewar e Armstrong, non si scosta dall’atteggiamento di rifiuto di molti chimici. Per altro la dichiarata attesa di “altri fatti di ordine chimico” rispetto all’argo lascia intendere la ripugnanza percepita dai chimici di fronte ad una sostanza dotata di tutte le proprietà fisiche dei gas ma completamente priva di qualsiasi proprietà chimica. Il comportamento chimico anomalo dell’argo aveva spostato di fatto verso la fisica la determinazione di una costante fondamentale per i chimici, ma anche l’anomalia del suo peso atomico faceva forse presagire che la palese regolarità delle proprietà chimiche dovesse essere ‘spiegata’ altrove – nel dominio delle proprietà fisiche degli atomi.

CONCLUSIONI

In una conferenza tenuta alla Royal Institution nell’aprile 1895 Rayleigh così si era espresso sulla determinazione del rapporto fra i calori specifici dell’argo:

“Il risultato è, senza dubbio, molto imbarazzante (*awkward*). Infatti ho avuto diverse indicazioni che le proprietà anomale dell’argo sono portate come una specie di accusa contro di noi. Ma noi sulla questione abbiamo avuto le migliori intenzioni. I fatti erano troppo grandi per noi; e tutto ciò che possiamo fare ora è di chiedere scusa, per noi e per il gas” [12].

L’ironia esibita da Rayleigh non riesce a nascondere il fastidio dello scienziato di fronte alle reazioni un po’ scomposte di alcuni colleghi. Tuttavia la frase che abbiamo assunto come titolo della nostra comunicazione assume un significato contestuale che va ben oltre l’irritazione di Rayleigh. *The facts were too much for us*: nella situazione conoscitiva della fisica e della chimica di allora i fatti, le proprietà, dell’argo erano veramente ingombranti, e non solo per i due scopritori.

Elogio dell'incompletezza

Ogni tanto, dopo qualche grande ondata progressiva, le discipline scientifiche entrano in una fase di stanca, che non significa certo inattività ma che si avvicina di molto al modello Kuhniano della 'scienza paradigmatica', dedita a completare le caselle di un cruciverba di cui ormai si conoscono il linguaggio e le definizioni. Se la storia della scienza può insegnare qualcosa agli scienziati è che la fase di stanca sarà seguita da una nuova ondata di piena, e – per continuare nella seconda metafora – il cruciverba si ripresenterà scritto in una nuova lingua e con definizioni ben diverse. Nella storia della scoperta dell'argo due grandi teorie si dimostrarono 'penosamente' incomplete.

Il nuovo elemento non si 'accomodava' facilmente nella struttura conoscitiva dei chimici, in particolare infrangeva senza appello la regola dei 'pesi atomici crescenti' che ordinava il sistema periodico degli elementi. Nello stesso tempo il sistema periodico dimostrava la sua validità perché lasciava 'vedere' a Ramsay l'esistenza di una intera famiglia di nuovi elementi, collocata in modo opportuno con valenza zero fra elementi fortemente elettronegativi ed elementi elettropositivi. Ciò che veniva messo in evidenza era – appunto – l'incompletezza del sistema periodico, con il rinvio a cause ancora sconosciute per una spiegazione plausibile del suo stupefacente ordinamento.

Il nuovo elemento non si 'accomodava' nemmeno nella struttura conoscitiva dei fisici. Qui, nella fisica molecolare, emergeva con grande chiarezza fino a che punto i fisici avessero ignorato i progressi della chimica rispetto alla conoscenza delle strutture molecolari. Nel 1895 erano un fatto compiuto da più di dieci anni la determinazione della struttura e la sintesi dell'indaco, con una descrizione dettagliata delle connessioni topologiche di 30 atomi. A partire dalla definizione di 'legame chimico' data da Frankland nel 1865 e dalla struttura del benzene proposta da Kekulé nel 1872 i chimici avevano una concezione dinamica del legame. Un fisico importante come George Fitzgerald poteva ancora ipotizzare far gli atomi di una molecola un vicolo rigido, di lunghezza invariabile. Però ciò che più metteva in luce il nuovo elemento, o meglio la sua monoatomicità, era una incompletezza del fondamento della teoria cinetica dei gas, il teorema dell'equipartizione dell'energia. Tutto andava per il meglio per i (pochi) sistemi gassosi monoatomici, ma le previsioni del teorema traballavano per i sistemi biatomici, e diventavano molto discutibili per i triatomici. Noi, in possesso da lungo tempo della fisica quantistica, sappiamo che alle temperature a cui venivano condotte le misure non erano eccitabili i gradi vibrazionali, e perfino quelli rotazionali, di molti sistemi molecolari. Di qui gli esiti sperimentali apparentemente discordanti con la teoria.

Lo statuto conoscitivo del teorema dell'equipartizione dell'energia divenne così incerto che fu al centro di un articolo critico e drammatico di Lord Kelvin, pubblicato nel 1900. Il 27 Aprile 1900, Lord Kelvin aveva tenuto una conferenza alla Royal Institution dal titolo: *Nineteenth-Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light*. Le due 'nuvole' erano la pericolante ontologia dell'etere

e l'incerta applicabilità del teorema dell'equipartizione ai calori specifici dei gas. Kelvin aveva esultato al momento della scoperta dell'argo, salvo scoprire che la deduzione della sua natura monoatomica si fondava su una teoria fisica incompleta, che, come l'evanescente etere, sembra rinviare ad altro.

Abbiamo detto che le due importanti teorie si dimostrarono 'penosamente' incomplete, perché da molti scienziati contemporanei, compresi Nasini, Rayleigh e Kelvin, l'incompletezza venne percepita con notevole disagio. Dalla nostra tarda postazione temporale possiamo invece affermare che è proprio l'incompletezza – una volta avvertita – a stimolare molte delle indagini più interessanti e avanzate.

Elogio dell'incertezza

Concludiamo con un'ultima osservazione di carattere epistemologico. La vicenda che abbiamo raccontato dimostra in modo inequivocabile che non furono previsioni teoriche che portarono alla scoperta dell'argo, ma le pratiche sperimentali: prima le indagini ostinate e un po' confuse di Rayleigh, poi le ricerche 'parallele' dello stesso Rayleigh e di Ramsay. Per di più esiti delle ricerche di laboratorio andavano contro l'ordinamento accettato del sistema periodico, un pilastro della chimica teorica. Questo clamoroso evento storico dimostra l'inadeguatezza di quelle epistemologie normative che privilegiano l'aspetto teorico della scienza rispetto alle pratiche osservative e sperimentali. Va da sé che il caso dell'argo non è l'unico ad eludere le epistemologie normative, così care ai seguaci di Popper. Nel 1911 la proposta dell'atomo nucleare da parte di Rutherford non solo aveva avuto come unica origine la nuova, inattesa base sperimentale del 'rimbalzo' delle particelle alfa diffratte da una lamina d'oro, ma andò decisamente contro le leggi dell'elettromagnetismo classico.

Il dominio incerto della teoria rispetto alla sua *integrale* base sperimentale pone lo scienziato di fronte a scelte epistemologiche cruciali. Stanislaw Cannizzaro fece finta di ignorare che il calore specifico del carbonio non seguiva la legge di Dulong e Petit, e applicò 'tranquillamente' la legge ai solidi che invece la rispettavano. Ramsay violò l'ordinamento del sistema periodico, privilegiando gli aspetti chimici degli elementi (la reattività) rispetto a quelli fisici (il peso atomico). È proprio la consapevolezza dell'incertezza della conoscenza e la capacità di affrontarla che rende grandi scienziati come Cannizzaro e Ramsay.

Riassunto – Le vicende legate alla scoperta dell'argo permettono di mettere in evidenza un interessante rapporto di collaborazione/competizione fra due grandi scienziati, il fisico Rayleigh e il chimico Ramsay. Un aspetto significativo di questo rapporto è che Rayleigh fece molta chimica, e, simmetricamente, Ramsay fece molta fisica. Sono inoltre analizzate le difficoltà teoriche della fisica e della chimica del tempo, difficoltà acute proprio dalle insolite proprietà dell'argo. Questa analisi porta ad assegnare un ruolo positivo all'incompletezza delle teorie scientifiche.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Brock, W.H., 1992. *The Fontana History of Chemistry*. Fontana Press, London, 744 pp.
- [2] Hiebert, E.N., 1963. Historical Remarks on the Discovery of Argon, the First Noble Gas. In: *Noble-Gas Compounds* (H. H. Hyman, ed.), The University of Chicago Press, Chicago, 3-20.
- [3] Hirsh, R.F. 1981. A Conflict of Principles: the Discovery of Argon and the Debate over its Existence. *Ambix*, 28, 121-130.
- [4] Nasini, R., 1895. Osservazioni sopra l'argo. *Gazzetta Chimica Italiana*, 25, II, 37-46.
- [5] Ramsay, W., 1896. *The Gases of The Atmosphere: the history of their discovery*, Macmillan, London, VIII, 240 pp.
- [6] Rayleigh, Lord, W. Ramsay, 1895. Argon, a New Constituent of the Atmosphere. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 186A, 187-241.
- [7] Russell, C., 2004. Nobel prizes and noble gases. *Chemistry World*, 1, 50-55.
- [8] Schuster, A., 1921. John William Strutt, Baron Rayleigh, 1842-1919. *Proceedings of the Royal Society*, 98A, I-L.
- [9] Strutt, J.W. 1882. Address to the Mathematical and Physical Science Section. Report of the British Association for the Advancement of Science, 52, 437-441.
- [10] Strutt, J.W., 1893. On the Densities of the Principal Gases. *Proceedings of the Royal Society*, LIII, 134-149.
- [11] Strutt, J.W. , 1894. On an Anomaly encountered in Determinations of the Density of Nitrogen Gas. *Proceedings of the Royal Society*, LV, 340-344.
- [12] Strutt, J.W., 1895. Argon, *Royal Institution Proceedings*, 14, 524-538.
- [13] Strutt, R.J., 1968. *Life of John William Strutt, third Baron Rayleigh*. The University of Wisconsin Press, Madison, XXVII, 439 pp.
- [14] Tilden, W.A., 1918. *Sir William Ramsay. Memorials of his life and work*. Macmillan, London, XVI, 311 pp.
- [15] Travers, M.W., 1928. *The Discovery of the Rare Gases*, Arnold, London, VII, 128 pp.
- [16] Travers, M.W., 1956. *A life of Sir William Ramsay : K.C.B., F.R.S.* Arnold, London, 308 pp.