

FISICA/ MENTE

LA FISICA NELL' OTTOCENTO

PARTE VIII: KIRCHHOFF E BUNSEN

Roberto Renzetti

BIOGRAFIA SCIENTIFICA DI KIRCHHOFF

Gustav Robert Kirchhoff nacque a Königsberg (oggi Kaliningrad), allora capitale della Prussia, nel 1824. Si laureò in quella Università nel 1847 e tra i suoi professori vi erano Franz Ernst Neumann (1798 - 1895), Carl Gustava Jacob Jacobi (1804 - 1851) e **Carl Friedrich Gauss** (1777 - 1855). Prima della laurea, nel 1845, nel risolvere un problema che gli aveva assegnato Neumann, ricavò le sue due leggi sui circuiti elettrici, la seconda delle quali rappresenta un'estensione fondamentale della Legge di Ohm⁽¹⁾ ricavata nel 1841. La memoria, *Über die Auflösung der Gleichungen auf Welche man beider Untersuchen der linearen Vertheilung galvanischer Ströme geführt wird* (Sulla soluzione dell'equazione che fornisce la distribuzione lineare della corrente galvanica, *Annalen der Physik und Chemie*, **72**, 497-508)⁽²⁾ venne pubblicata nel 1847. E' utile osservare che queste leggi furono elaborate quando Kirchhoff non sapeva che Ohm le aveva trovate nell'ipotesi, allora comune, che un flusso di corrente fosse analogo ad un flusso di calore e che questa ipotesi aveva portato lo stesso Ohm a degli errori. In particolare Ohm credeva che, allo stesso modo che il calore fluisce solo se esistono differenze di temperatura, nel caso elettrico, il flusso di corrente non può esistere senza differenza di *forza elettroscopica* (o elettromotrice), come Ohm chiamava la differenza di tensione o di potenziale, con la conseguenza che dell'elettricità statica non può esistere in un conduttore non alimentato. Come vedremo un poco oltre, due anni dopo Kirchhoff si accorse di quest'errore e lo comunicò allo stesso Ohm. C'è da dire anche che in questa memoria del 1849 Kirchhoff riuscì a mostrare che la tensione di cui parlava Volta e il vecchio potenziale elettrostatico di Lagrange, Laplace e Poisson erano numericamente identici in un conduttore e potevano quindi essere ridotti ad un concetto unico. Ed aggiunse anche un concetto estremamente importante perché associò

le grandezze tensione o potenziale a quella di energia elettrica.

L'anno successivo, 1848, ancora sugli *Annalen der Physik und Chemie* (**75**, p. 189, 1848) pubblicò un'altra memoria di contenuto elettrico di grande importanza. Kirchhoff estese la conduzione lineare, presente nella legge di Ohm, in tre dimensioni ed in questo fu favorito proprio dall'analogia con il flusso di calore. Nella sua memoria un sistema era pensato come formato da conduttori tridimensionali percorsi da corrente continua. Si doveva poi considerare ogni punto del circuito elettrico soggetto ad una tensione (o forza elettrostatica) V , grandezza allora poco comune in fisica e non completamente compresa, grandezza che all'interno del conduttore doveva soddisfare l'equazione di Laplace

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0$$

mentre all'esterno, sulla superficie, la derivata di V fatta lungo la normale,

$$\frac{\partial}{\partial N}$$

doveva essere nulla. Kirchhoff passava poi a studiare la discontinuità che la V ha in corrispondenza del contatto fra conduttori costituiti da materiali diversi e trovava che sarebbe stata garantita la continuità della corrente se fosse stata continua la funzione

$$k \frac{\partial V}{\partial N}$$

(con k che è la conducibilità ohmica della superficie di contatto).

Dopo altre elaborazioni che riguardavano il calore che si sviluppa in un circuito in un conduttore, con la dimostrazione che la corrente elettrica continua si distribuisce in un conduttore in modo da rendere minimo l'effetto Joule, Kirchhoff passò ad accordare le leggi trovate per l'elettrostatica con le problematiche che si ponevano con le leggi di Ohm. Alcune delle cose elaborate e sperimentate da Kirchhoff furono trovate contemporaneamente (*Annalen der Physik*, **75**, p. 220, 1848) da Rudolph Kohlrausch (1809 - 1858) il quale mostrò che la differenza di tensione elettrica alle estremità di una cella voltaica, misurata elettrostaticamente a circuito aperto, era per diverse celle proporzionale alla forza elettromotrice misurata mediante gli effetti elettrodinamici che la cella provocava nel circuito quando veniva chiuso. Oltre a ciò, l'anno seguente (*Annalen der Physik*, **78**, p. 1, 1849), Kohlrausch provò che quando veniva chiuso il circuito, la differenza delle tensioni misurata elettrostaticamente in due punti qualunque del circuito chiuso era proporzionale alla resistenza ohmica esistente tra essi. Ma nonostante questi lavori ancora vi era confusione tra tensione, forza elettromotrice, forza elettroscopica, potenziale. Lo stesso Ohm aveva aiutato a confondere i concetti facendo confusione tra forza elettroscopica e densità di carica elettrica.



Kirchhoff

Questa confusione fu eliminata da Kirchhoff nel 1849 (*Annalen der Physik*, **78**, p. 506 pubblicato anche come *On a deduction of Ohm's laws in connection with the theory of electrostatics*, *Phil Mag*, **37**, pp. 463-468, 1850) quando definitivamente identificò la forza elettroscopica di Ohm con il potenziale elettrostatico. Per dimostrare questa identità si servì delle relazioni trovate da Helmholtz nella sua memoria del 1847, *Sulla conservazione della forza* nel paragrafo *L'equivalente meccanico dei processi elettrici*, e da Joule nella sua memoria del 1841, *On the heat evolved by metallic conductors of electricity, and in the cells of a battery during electrolysis*. Helmholtz aveva mostrato che l'energia per unità di carica in ogni punto di un circuito è proporzionale al valore del potenziale elettrostatico in quel punto e Joule aveva fatto vedere che l'energia liberata da una unità di carica nel passare da un punto ad un altro di un circuito è proporzionale alla differenza delle tensioni elettriche tra i due punti. Da ciò Kirchhoff trasse le sue conclusioni e cioè che potenziale e tensione sono la stessa cosa.

NASCE IL SODALIZIO CON BUNSEN

Subito dopo la laurea Kirchhoff si trasferì a Berlino dove nel 1847 ottenne la libera docenza. In questa città ebbe modo di assistere ai molti rivolgimenti del 1848 dai quali si tenne lontano preoccupato solo della sua carriera. Nel 1850 passò a Breslau dove conobbe e divenne molto amico del chimico Robert Bunsen (1811 - 1899).

Nel 1854 Bunsen, che insegnava ad Heidelberg, convinse Kirchhoff a passare ad insegnare fisica in quella Università, e fu lì che iniziò il sodalizio tra i due in un prestigioso centro. Furono Kirchooff e Bunsen che ottennero nel 1858 una cattedra ad Heidelberg per il loro amico Helmholtz. Il sodalizio tra i due produsse le fondamentali ricerche che aprirono la strada alla spettroscopia ed allo studio della radiazione termica.

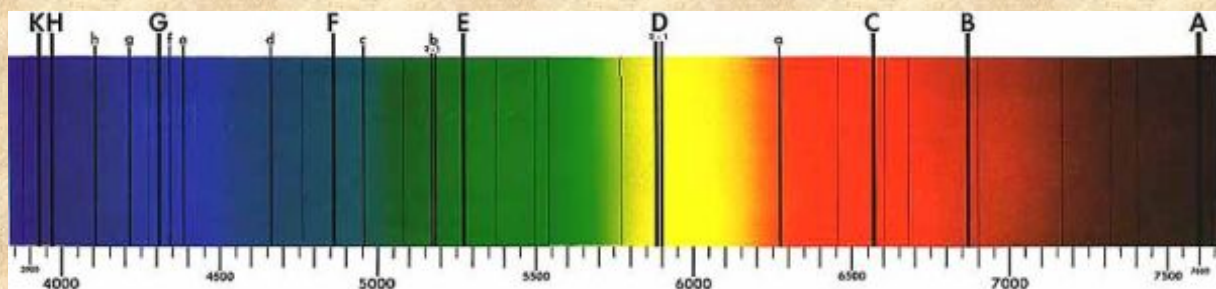
Nel 1857 Kirchhoff era impegnato su ricerche analoghe a quelle che altrove portavano avanti Weber e Kohlraush. Si trattava della misura della velocità di una corrente in un filo conduttore, impresa nella quale gli altri due raggiunsero importantissimi risultati, ma che Kirchhoff abbandonò per iniziare a dedicarsi ad altri campi della fisica inesplorati che si aprivano in quell'epoca.

La tecnologia, a metà dell'Ottocento aveva fatto passi da gigante ed aveva permesso la costruzione di strumentazione sempre più raffinata. Kirchhoff riprese alcuni studi ed esperienze realizzati nel 1814 dal fisico ed astronomo tedesco Joseph von Fraunhofer⁽³⁾ (1787–1826) e nel 1802 dal chimico-fisico inglese William Hyde Wollaston (1766 - 1828). Osservando lo spettro del Sole con un prisma perfezionato Wollaston aveva osservato in esso delle righe scure che solo



La semplice osservazione di Wollaston mediante un solo prisma.

annotò senza studiarle in modo particolare. Fraunhofer inventò il reticolo di diffrazione, uno strumento molto più perfezionato per osservare e studiare lo spettro solare. Con tale strumento arrivò a notare varie (570) sottili linee nere che lo attraversavano, ancora oggi note come linee di Fraunhofer, e le studiò sistematicamente, classificandole (chiamandole con lettere maiuscole e minuscole a seconda dell'intensità) e misurandone la lunghezza d'onda. E' da notare che Fraunhofer osservò che l'introduzione di un sale (come il sodio) nella fiamma faceva comparire nello spettro delle righe brillanti e che la riga gialla caratteristica del sodio che brucia si divideva in due linee quando la radiazione era fatta passare attraverso un prisma con migliori caratteristiche. Successivamente Fraunhofer cercò queste due righe gialle nello spettro solare ma non le trovò: al loro posto vi erano invece due linee nere che chiamò D. La cosa lo colpì ma non riuscì a comprendere cosa accadeva.



Le righe nere di Fraunhofer che solcano lo spettro solare (da pil.phys.uniroma1.it/.../CorsoStrutturaAtomi)

Altri studi, che però passarono abbastanza inosservati, furono del medico statunitense David Alter (1807 - 1881), *On Certain Physical Properties of Light Produced by the Combustion of Different Metals in an Electric Spark Refracted by a Prism* (1854), che iniziò

la vera spettroscopia scoprendo che certe linee con determinati colori appartengono a definiti elementi, ed il fisico svedese Anders Jonas Ångström (1814 - 1874) che nella sua *Optiska Undersökningar*, presentata alla Royal Swedish Academy of Sciences nel 1853, avanzò l'ipotesi che le radiazioni che vengono emesse dai gas incandescenti devono avere la stessa frequenza di quelle che sono assorbite. In quegli anni il chimico francese Louis Daguerre (1787 - 1851) aveva scoperto un particolare metodo diretto di fotografia (daguerréotype) e lo statunitense J.W. Draper (1811-1882) lo applicò a studi spettroscopici. Quest'ultimo, tra l'altro, scoprì che alcune sostanze solide portate all'incandescenza emettono degli spettri.



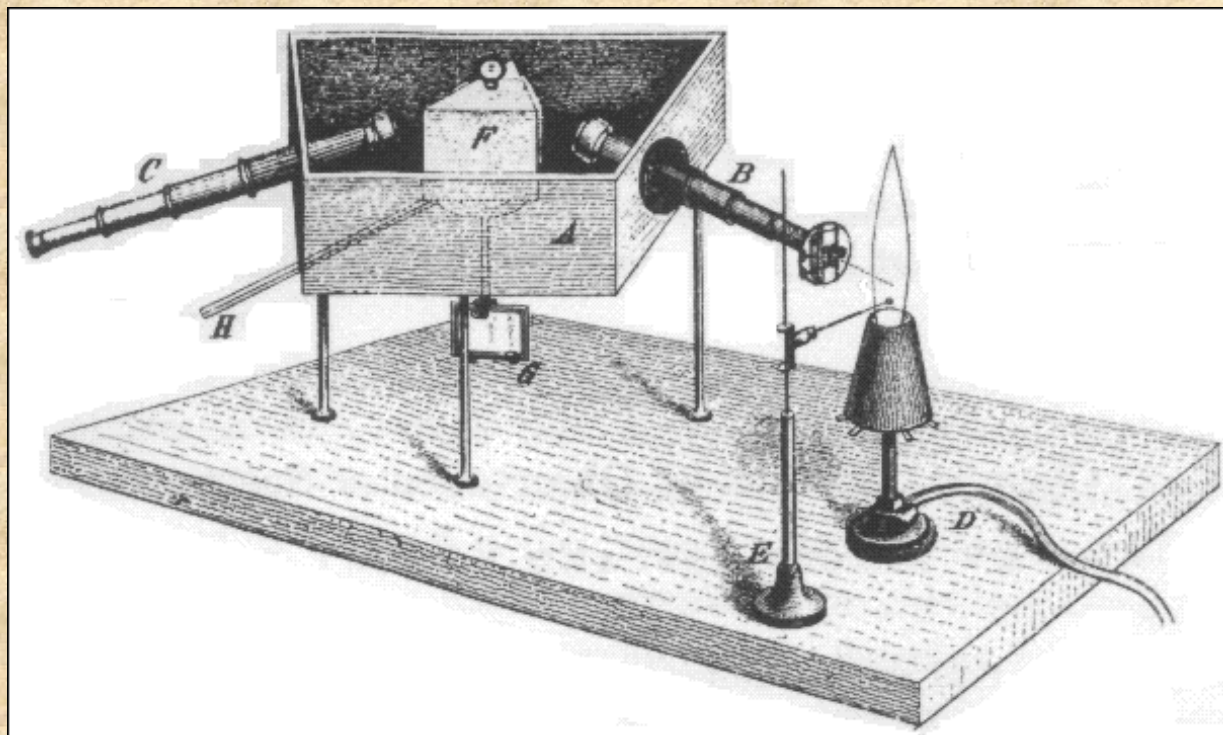
Kirchhoff (a sinistra) e Bunsen

Queste le basi da cui iniziarono gli studi di Kirchhoff e Bunsen.

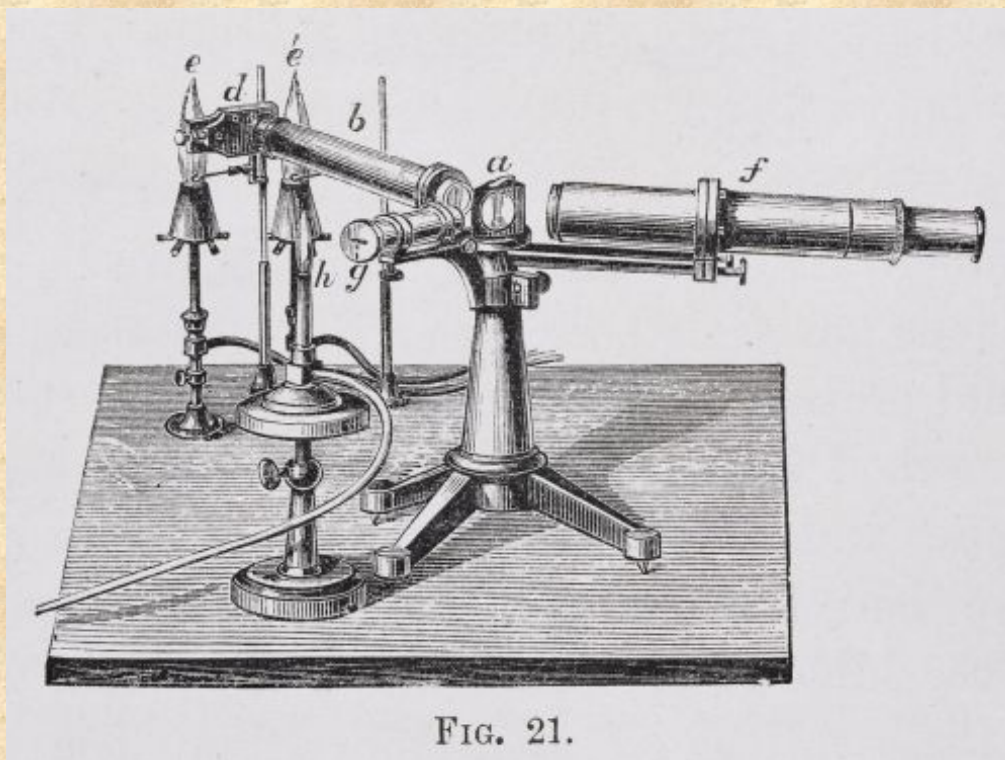
All'inizio degli anni Cinquanta il chimico Bunsen si rese conto che per studiare gli spettri emessi da alcune sostanze quando erano bruciate, occorreva rendere minima la luce emessa dalla fiamma. Già vi era un bruciatore ideato da Faraday, utilizzante una miscela di gas ed aria, che migliorava quanto offerto da un fornello ordinario (si trattava di un tubo metallico, che alla sua cima aveva un diffusore. Dentro questo tubo era immesso del gas che veniva incendiato nella parte alta del diffusore) ma Bunsen lo migliorò ulteriormente. Nel 1855, appena dopo l'installazione del gas illuminante nel suo laboratorio, egli, con l'aiuto del meccanico dell'università, Carl Desaga, realizzò un fornello in cui si mescolavano gas ed aria **prima** della combustione (senza provocare esplosioni !) e non proprio nel punto di combustione. Il suo fornello consentiva così la combustione con un doppio effetto: fiamma molto calda e poco luminosa (massima combustione) ma anche priva di impurezze come garantiva il gas illuminante più dell'alcool. Disponendo poi di una reticella è possibile bruciare delle sostanze ed ottenere gli spettri dei soli corpi portati all'incandescenza senza

interferenze da parte della fiamma che non ha un proprio colore specifico. Si deve osservare che dal *becco* è anche possibile ottenere una fiamma meno calda e più luminosa (minima combustione) operando nella quantità d'aria immessa. Lo strumento è illustrato in una memoria di Bunsen (*Ann. der Physik*, **100**, p. 84-5, 1857), scritta insieme con il chimico britannico Henry Roscoe (1833 - 1915), uno dei chimici stranieri attratti ad Heidelberg per la fama degli scienziati e delle ricerche in quella Università⁽⁴⁾. Da notare che i due chimici si erano resi conto che le righe brillanti emesse da sostanze incandescenti (o vapori metallici) che osservavano erano indipendenti dalla temperatura, indipendenti dalle altre sostanze con le quali erano combinate tali sostanze e caratteristiche tipiche delle sostanze chimiche presenti, anche in minima quantità, nella sostanza considerata (questa scoperta ne permise subito delle altre, come quella di nuovi elementi come il rubidio ed il cesio che Bunsen fece nel 1860 e 1861).

Risolto il problema della fiamma, Bunsen cercava di studiare gli spettri di alcune sostanze per identificarle chimicamente. Il suo *strumento di misura* era la tonalità del colore emesso dai sali che bruciavano sulla fiamma del suo becco. Qui si scontrò con un'altra difficoltà perché i colori emessi risultavano non perfettamente definiti. Egli tentò di capirne meglio la tonalità filtrando la luce emessa dalla sostanza che bruciava mediante dei vetri colorati. Fu a questo punto che intervenne l'amico Kirchhoff che partì con il consigliare l'uso di materiali già esistenti per lo studio spettroscopico⁽⁵⁾ (prismi, spettroscopi, e più tardi reticoli) e



Il primo sistema di visione degli spettri (spettroscopio) di Kirchhoff e Bunsen. Sul *becco Bunsen D* viene fatta bruciare una sostanza sistemata su un sostegno *E*; un oculare *B* (collimatore) raccoglie la radiazione emessa e, tramite un prisma o un reticolo *F* o *G*, la invia ad un secondo oculare *C* (cannocchiale) da cui si può osservare (o registrare con carta fotografica) lo spettro ottenuto. Il sistema contenente prisma è sistemato in una scatola che può essere chiusa per evitare ingresso di luce dall'ambiente.



Lo spettroscopio utilizzato in successive esperienze da Kirchhoff e Bunsen. Si può notare che in questo strumento, oltre al collimatore *b* ed al cannocchiale *f*, si è introdotto un terzo tubo *g* (proiettore). Il *proiettore* reca a un estremo una lente e all'altro una scala di riferimento per le lunghezze d'onda *h* (generalmente incisa su di una lastrina di vetro) che, opportunamente illuminata, va a sovrapporre la propria immagine a quella dello spettro in esame, consentendo dunque l'esecuzione delle misurazioni.

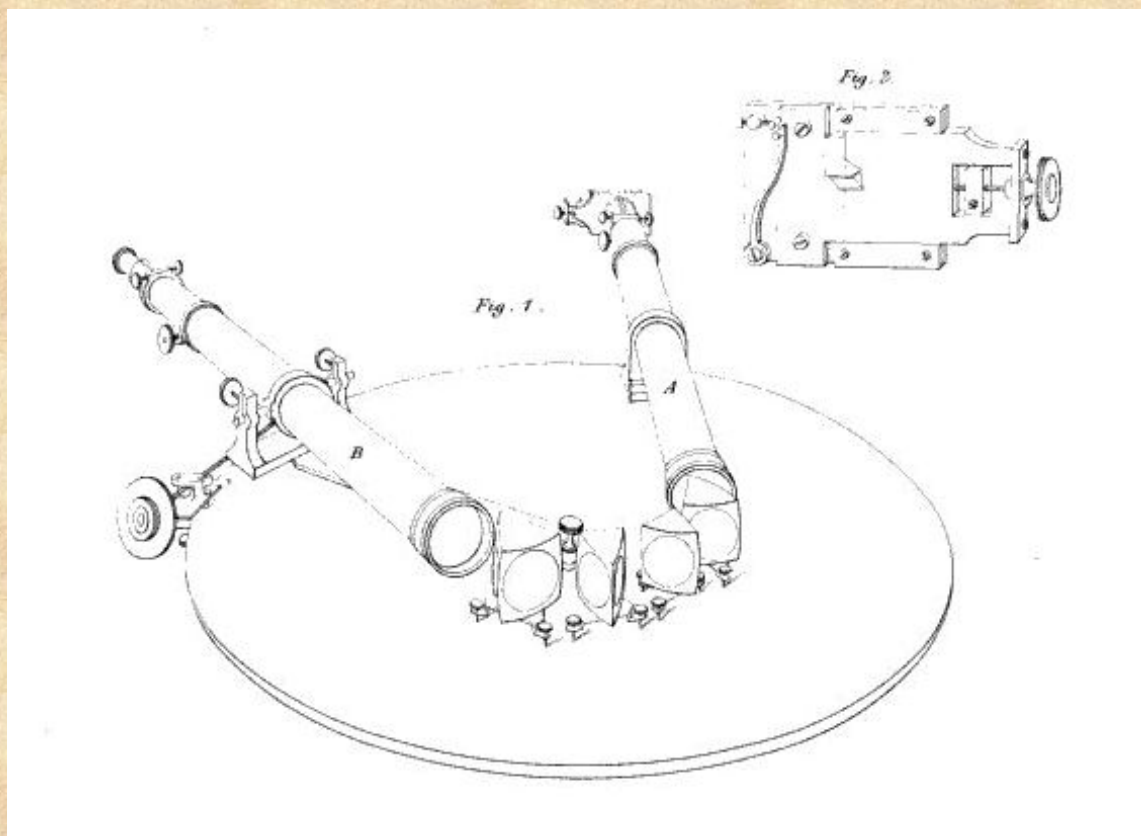


Immagine dello spettroscopio utilizzato, riportata in Kirchhoff, *Researches on the solar spectrum, and the spectra on chemical elements*, Mac Millan and Co. 1862

quindi, sul finire degli anni Cinquanta, si mise a lavorare insieme a Bunsen⁽⁶⁾ con la novità

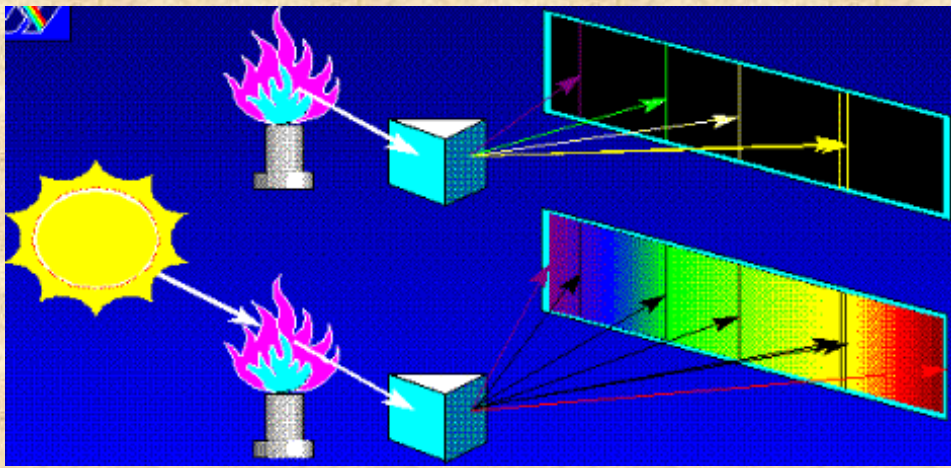
di dirigere lo spettroscopio verso il cielo, un poco come aveva fatto Galileo con il cannocchiale. In breve tempo furono pubblicate varie memorie, alcune del solo Kirchhoff, altre dei due che riguardavano le linee spettrali osservate. Lo studio di tali righe permise a Kirchhoff di capire molte cose degli spettri ancora totalmente ignote. Intanto egli capì la sostanziale differenza tra emissione e assorbimento di luce. A tale proposito, nella sua seconda memoria del 1859, riuscì a stabilire che *per raggi della stessa lunghezza d'onda alla stessa temperatura, il rapporto tra potere emissivo e potere assorbente è lo stesso per tutti i corpi.*

Se sul becco Bunsen si fa bruciare del sodio, lo spettro osservato presenta due righe gialle che coincidono esattamente con le più brillanti delle linee oscure dello spettro del Sole (riga D di Fraunhofer); osservando poi lo spettro della luce solare lungo la cui traiettoria è interposto il becco Bunsen con del sodio che brucia, non appare più la riga D nello spettro solare ed *al suo posto* vi sono le righe gialle del sodio; questo ultimo fenomeno si verifica solo quando la luce solare è molto attenuata, in caso contrario si continua a vedere la linea D; lo stesso fenomeno si può ottenere mantenendo costante l'intensità della luce solare e aumentando o diminuendo la temperatura della fiamma del becco. La stessa cosa può essere ottenuta in laboratorio. Kirchhoff utilizzò una intensa fiamma che generava uno spettro continuo; nel tragitto di questa radiazione sistemò un becco su cui bruciavano sali di sodio che originavano le caratteristiche due linee gialle; a questo punto le brillanti linee gialle si trasformarono nelle linee nere D identiche a quelle individuate sullo spettro solare; se invece del sodio faceva bruciare sul becco del cloruro di litio, sparivano le linee D e compariva in luogo della linea rossa del litio una linea nera. Da ciò Kirchhoff capì il significato dello spettro solare ed in particolare delle sue linee scure: la superficie del Sole emette radiazioni (fotosfera) di tutti i colori e l'atmosfera di gas incandescenti del Sole (cromosfera e corona), molto meno calda della fotosfera, assorbe una parte delle radiazioni emesse dal Sole, ed assorbe quelle che sono emesse dagli elementi componenti l'atmosfera solare. Come diceva Kirchhoff:

le fiamme colorate nei cui spettri si presentano linee brillanti e marcate [spettro di emissione], indebolisce talmente i raggi del colore di queste linee quando passano attraverso di esse, che in luogo delle linee brillanti compaiono linee scure [spettro di assorbimento] quando si colloca dietro la fiamma una fonte di luce di sufficiente intensità e nel cui spettro mancano queste linee. Concludo quindi che le linee scure dello spettro solare, che non sono prodotte dall'atmosfera terrestre, nascono dalla presenza nella infuocata atmosfera del Sole, di quelle sostanze che nello spettro di una fiamma presentano le linee brillanti nella stessa posizione.

Ed in questo modo Kirchhoff e Bunsen riuscirono a stabilire la presenza sul Sole di alcuni elementi: confrontando le righe che compongono lo spettro solare con quelle, ottenute in laboratorio, per elementi noti (all'esistenza di un dato insieme di righe nello spettro corrisponde sempre la presenza di un dato elemento).

Ma vi è di più. Kirchhoff aveva scoperto che basta *proiettare* una sorgente di linee colorate (ottenute bruciando qualche sostanza) su uno spettro continuo di sfondo per trasformare quelle linee colorate in linee nere. Ciò lo convinse che le



Un'esemplificazione degli spettri di emissione (in alto) che diventano di assorbimento (in basso). Da www.thespectroscopy.net/History_1.html

fiamme assorbono le radiazioni della stessa lunghezza d'onda che emettono ed introducono al loro posto nello spettro delle linee nere. Nell'articolo dell'ottobre 1859 scriveva Kirchhoff:

Concludo che le linee scure dello spettro solare che non sono prodotte dall'atmosfera terrestre, si originano per la presenza nella calda atmosfera solare di quelle sostanze che nello spettro di una fiamma presentano linee brillanti nello stesso posto. Possiamo ammettere che le linee brillanti nello spettro di una fiamma, che coincidono con le linee D, si devono sempre al contenuto di sodio nelle stesse. Le linee oscure D nello spettro solare permettono di concludere, per esso, che si trova del sodio nell'atmosfera del Sole.

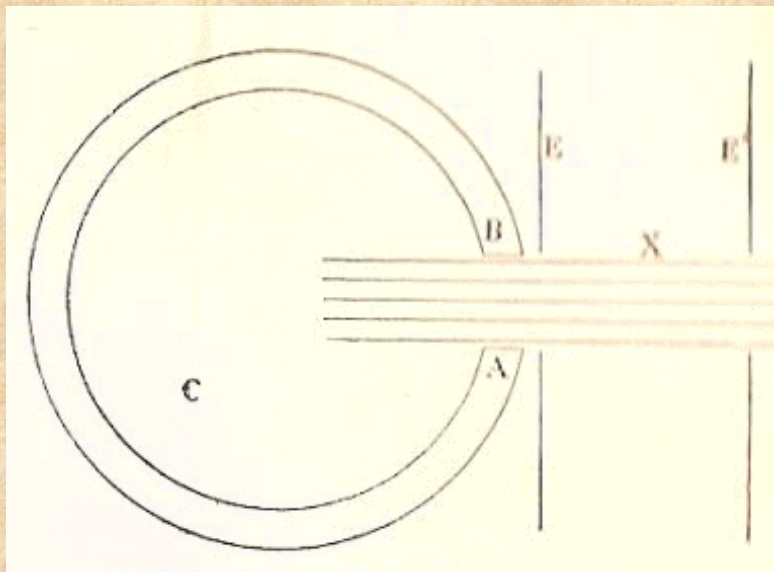
Poiché i gas dell'atmosfera solare sono più freddi di quanto non lo sia la parte più interna del Sole, un dato elemento dell'atmosfera solare è incapace di rimpiazzare con la sua propria radiazione i raggi che ha assorbito. Ed è in questo modo che nascono le linee oscure nell'atmosfera solare e ciò spiega anche l'assenza nella luce di radiazioni di elementi dati e la loro presenza nel Sole.

In definitiva Kirchhoff aveva scoperto alcune cose di grande importanza. Ed egli era partito da osservazioni apparentemente semplici come quella che non si possono distinguere gli oggetti contenuti in un recipiente a temperatura uniforme usando la radiazione emessa dal recipiente stesso. Se, ad esempio, guardiamo l'interno di un forno in cui vengono cotti dei vasi di colori diversi, si vede una colorazione rossastra uniforme. Come nasce tale fenomeno? Consideriamo due vasi, A e B, nel forno. Se l'intensità della luce che lascia A in direzione di B fosse maggiore di quella che va da B ad A, si avrebbe come risultato che dell'energia va da A a B con la conseguenza che B aumenterebbe di temperatura. E ciò, in assenza di lavoro fatto dall'esterno, risulta essere una violazione del Secondo Principio della termodinamica. Con queste premesse Kirchhoff immaginò il Sole come un corpo sferico caldo avvolto da successivi strati di gas che in qualche modo filtravano la radiazione proveniente da tale corpo e descrisse il trasferimento di energia dall'interno all'esterno in base alla termodinamica.

I risultati qui esposti possono essere considerati il fondamento dell'astrofisica e della fisica teorica. Da questo momento si iniziò lo studio sistematico degli spettri di varie stelle ed il risultato di queste osservazioni portò a riconoscere che tutti gli elementi in esse presenti sono gli stessi che conosciamo sulla Terra. Ma su quest'ultimo punto tornerò più oltre.

EMISSIONE ED ASSORBIMENTO. CORPO NERO

Solo due mesi dopo, nel dicembre 1859, Kirchhoff estendeva e generalizzava quanto trovato con in più l'introduzione di un nuovo concetto che avrebbe fatto storia nella fisica, quello di *corpo nero*, un corpo cioè in grado di assorbire completamente i raggi di tutte le lunghezze d'onda e di non rifletterne nessuno. Un tale corpo era un qualcosa che non esisteva, una invenzione teorica di Kirchhoff che fu poi realizzata abbastanza fedelmente nel 1895 da Wilhelm Wien e Otto Richard Lummer (1860 - 1925) praticando un foro in una sfera cava.



Una rappresentazione del corpo nero realizzato da Wien e Lummer. Nello spazio C, impermeabile al calore raggiante, mantenuto ad una temperatura T costante, in cui l'irraggiamento non dipende dalla forma di C e dalla natura dei corpi che in C sono contenuti, l'irraggiamento è lo stesso che si avrebbe se la materia che costituisce C fosse perfettamente nera. Nella figura X rappresenta la radiazione entrante in C attraverso il foro AB. Prima di entrare in C la radiazione passa attraverso due fori circolari fatti su due schermi opachi. La radiazione che entra in C, si rifletterà successivamente su tutte le pareti della sfera cava restando ivi intrappolata. Se disponiamo di uno spettroscopio e studiamo la minima frazione di energia che riesce ad uscire da C avremo lo spettro di emissione del corpo nero.

E' da notare che Kirchhoff non fece voli interpretativi agganciando le sue scoperte a qualche nuova teoria da avanzare. Egli ancorò le sue scoperte sul terreno sicuro della termodinamica.

Kirchhoff iniziava con il definire un corpo nero legandolo a concetti di termodinamica. Riporto l'intero lungo brano perché non è appesantito da formule ed è chiaro:

La radiazione termica ha la medesima natura della radiazione luminosa; questa costituisce una classe speciale della prima. I raggi termici invisibili si distinguono dai raggi luminosi solo per il periodo di vibrazione o la lunghezza d'onda. Tutti i raggi termici nella loro propagazione seguono le stesse leggi note per i raggi luminosi. Un corpo luminoso nello spazio emette raggi di luce

che sono indipendenti dai corpi sui quali cadono; similmente tutti i raggi termici che un corpo emette sono indipendenti dai corpi che lo circondano. Dei raggi termici che sono inviati ad un corpo da quanto lo circonda, parte sono assorbiti, gli altri sono inviati in direzioni mutate per riflessione e rifrazione. I raggi rifratti e riflessi da esso si propagano insieme a quelli da esso emessi, senza che abbia luogo alcun disturbo reciproco. Attraverso le radiazioni che un corpo emette, la quantità di calore che esso contiene subisce, secondo la legge, una perdita equivalente alla vis viva di quei raggi e, attraverso i raggi termici che esso assorbe, un aumento che è equivalente alla vis viva dei raggi assorbiti. Ma in certi casi si può verificare un'eccezione a questa regola, in quanto l'assorbimento e l'irraggiamento producono altri cambiamenti nel corpo, come per esempio in corpi che vengono modificati chimicamente dalla luce, e mezzi che assorbono la luce i quali perdono la loro capacità di scintillare attraverso l'irraggiamento della luce che essi hanno assorbito. Questi casi dovrebbero essere esclusi con l'assunzione che né per mezzo dei raggi che esso irraggia od assorbe, né per mezzo di altre influenze a cui esso sia esposto, il corpo sia in grado di subire un cambiamento, se la sua temperatura è mantenuta costante fornendogli o sottraendogli calore. In queste condizioni, per la legge dell'equivalenza tra calore e lavoro, la quantità di calore che deve essere fornita ad un corpo in un dato tempo per impedirne il raffreddamento, che avverrebbe in conseguenza del suo irraggiamento, è equivalente alla vis viva dei raggi emessi; e la quantità di calore che deve essere sottratta per bilanciare il riscaldamento derivante dall'assorbimento di radiazione, è equivalente alla vis viva dei raggi assorbiti. Un corpo che soddisfa queste condizioni sia circondato da una cavità, avente la stessa temperatura, attraverso la quale nessun raggio termico può penetrare, la cui temperatura è mantenuta costante e che soddisfi le medesime condizioni. Il corpo emette raggi termici ed è colpito da quei raggi termici i quali, in parte, provengono dalla cavità, in parte, sono rimandati indietro per riflessione dalla stessa, che ne assorbe una parte. La sua temperatura deve perciò rimanere la stessa, a meno che non gli si tolga o non gli si fornisca calore come segue dal principio da cui deriva la legge di Carnot. Per questa ragione, la vis viva dei raggi, che esso emette in un certo tempo, deve essere uguale alla vis viva dei raggi che esso assorbe nello stesso tempo. La dimostrazione che si basa su questa conclusione esige lo studio accurato dei raggi che viaggiano avanti e indietro tra il corpo e la cavità. Questo studio verrà molto semplificato se immaginiamo che la cavità sia composta, interamente o in gran parte, da corpi che, per spessori infinitamente piccoli, assorbano completamente tutti i raggi che cadono su di essi. Chiamerò tali corpi perfettamente neri, o più brevemente neri. Un corpo nero, in questo senso della parola, deve avere lo stesso indice di rifrazione del mezzo in cui ha luogo l'irraggiamento; non vi sarà allora nessuna riflessione alla sua superficie, e tutti i raggi incidenti saranno totalmente assorbiti. Vapore di iodio denso in contatto con aria, o pece in contatto col vetro, possono essere trattati come corpi neri, approssimativamente, ma non vapori di iodio in contatto con vetro o pece in contatto con aria. Successivamente, studieremo l'irraggiamento nello spazio vuoto; i corpi neri cui ci siamo riferiti devono perciò avere un indice di rifrazione che differisce infinitamente poco da 1. L'assunzione che tali corpi neri siano concepibili costituisce un ausilio importante nella dimostrazione che presenteremo. Inoltre, assumeremo che siano concepibili corpi perfettamente diatermani, tali cioè da non assorbire nessuno dei raggi termici incidenti qualunque sia la loro natura, e infine, che sia concepibile uno specchio perfetto, cioè un corpo che riflette completamente

tutti i raggi termici. Uno specchio perfetto, come qualunque corpo diatermano, non può esso stesso emettere nessun raggio; perché se lo facesse (racchiuso in una cavità della stessa temperatura) riscalderebbe sempre più questa cavità e si raffredderebbe sempre più. [...]

A questo punto, Kirchhoff proseguiva passando a fare alcune premesse che gli saranno utili per discutere i fenomeni di emissione ed assorbimento della radiazione:

*Se si colloca cloruro di sodio o cloruro di litio nella fiamma non luminosa della lampada di Bunsen, si ottiene un corpo incandescente che solo emette luce di una determinata lunghezza d'onda e solo assorbe luce della stessa lunghezza d'onda [...] Non sappiamo come si comporta questo corpo rispetto ai raggi calorifici oscuri [i raggi infrarossi, ndr] in relazione all'emissione e assorbimento; ma non sembra difficile pensare che un corpo possa emettere raggi calorifici, visibili od oscuri, di una data lunghezza d'onda ed assorbire quelli che abbiano la stessa lunghezza d'onda. Se si accetta ciò e si considera inoltre come possibile uno specchio che rifletta completamente tutti i raggi, potremo provare molto facilmente, partendo dai principi generali della teoria meccanica del calore, che **per raggi della stessa lunghezza d'onda e della stessa temperatura, la relazione tra la capacità di emissione con la capacità di assorbimento è la stessa in tutti i corpi.***

Con questa premessa passava a stabilire la legge che legava emissione ed assorbimento di radiazione da parte di un corpo. Scriveva ancora:

Supponiamo di avere un corpo C che abbia la forma di una placca illimitata che emetta ed assorba solo raggi di lunghezza d'onda Λ ; che di fronte a questo corpo abbiamo un altro corpo c con forma di una placca analoga che emetta ed assorba raggi di ogni tipo di lunghezza d'onda; supponiamo che le superfici esterne di queste placche si trovino ricoperte con specchi perfetti R ed r. Una volta che in tale sistema si sia stabilita l'uguaglianza della temperatura, ognuno dei due corpi deve mantenere la stessa temperatura, deve cioè ricevere tanto calore per assorbimento di quanto ne perde per irradiazione. Consideriamo ora i raggi che emette c, iniziando da quelli di lunghezza d'onda λ , diversa da Λ . Su questi raggi il corpo C non ha alcuna influenza: sono riflessi dallo specchio R come se C non esistesse. Una parte determinata di essi viene successivamente assorbita da c, i restanti arrivano per la seconda volta allo specchio R, sono riflessi ancora una volta da esso, assorbiti in parte da c e così successivamente. In tal modo tutti i raggi di lunghezza d'onda λ che emette il corpo, tornano ad essere assorbiti poco a poco dallo stesso. Poiché questo vale per tutti i valori di λ diversi da Λ , l'immutabilità della temperatura del corpo c fornisce come risultato che questo assorbe tanti raggi di lunghezza d'onda Λ come quelli che esso emette. Per questa lunghezza d'onda sia e la capacità di emissione, a la capacità di assorbimento del corpo c, E ed A i valori corrispondenti per il corpo C. Della quantità di raggi E che emette C, il corpo c assorbe la quantità aE e restituisce $(1 - a)E$; di questa, C assorbe la quantità $A(1 - a)E$ e restituisce verso c la quantità $(1 - A)(1 - a)E$ della quale assorbe $a(1 - A)(1 - a)E$. Se si stabilisce questo criterio e se poniamo $(1 - A)(1 - a) = k$, si vede che c prende da E una quantità di raggi uguale a

$$aE (1 + k + k^2 + k^3 + \dots)$$

cioè uguale a

$$\frac{\alpha E}{1 - k}$$

Della quantità di raggi e che c emette, lo stesso c assorbe, come si può mostrare con un ragionamento simile, la quantità

$$\frac{\alpha(1 - \alpha)e}{1 - k}$$

La condizione perché la temperatura di c non si modifichi è conseguentemente che valga l'uguaglianza:

$$e = \frac{\alpha E}{1 - k} + \frac{\alpha(1 - A)e}{1 - k}$$

cioè l'uguaglianza:

$$\frac{e}{\alpha} = \frac{E}{A}$$

*Si arriva alla stessa uguaglianza se si sviluppano le condizioni per cui la temperatura di C rimanga costante. Se supponiamo il corpo c rimpiazzato da un altro con la stessa temperatura, troviamo, ripetendo le considerazioni stabilite, lo stesso valore per la relazione esistente tra la capacità di emissione e la capacità di assorbimento di questo corpo per i raggi della stessa lunghezza d'onda Λ . La lunghezza d'onda Λ e la temperatura sono comunque arbitrarie. Sorge allora la proposizione che per i raggi della stessa lunghezza d'onda alla medesima temperatura, **la relazione che lega la capacità di emissione alla capacità di assorbimento è la stessa per tutti i corpi.** [...]*

Trovata analiticamente la relazione cercata, Kirchhoff passava a fare delle considerazioni:

Il rapporto tra la capacità di emissione e quella di assorbimento e/a comune a tutti i corpi è una funzione della lunghezza d'onda e della temperatura. A basse temperature questa funzione è uguale a zero per le lunghezze d'onda dei raggi visibili e differente da zero per valori maggiori della lunghezza d'onda; a temperature più elevate la funzione ha ancora valori finiti per le lunghezze d'onda dei raggi visibili. A quella temperatura in corrispondenza della quale la funzione lascia di essere uguale a zero per la lunghezza d'onda di un raggio visibile determinato, tutti i corpi iniziano ad emettere luce del colore di questo raggio, con l'eccezione di quelli che hanno per questo colore e per questa temperatura un potere di assorbimento estremamente piccolo; quanto più grande è la capacità di assorbimento di un corpo, quanta più luce esso fornisce. Il fatto empirico che i corpi opachi diventano incandescenti alla stessa temperatura, mentre i gas trasparenti hanno bisogno perché avvenga questo di una temperatura molto maggiore e che questi ultimi brillano sempre meno che quelli alla medesima temperatura, trova qui la sua spiegazione. Inoltre si spiega che quando un gas, che allo stato incandescente fornisce uno spettro discontinuo, si fa attraversare da raggi di sufficiente intensità che di per sé danno uno spettro senza righe scure o brillanti, allora appaiono linee oscure nei luoghi dello spettro dove si trovavano le righe brillanti del gas incandescente.

In definitiva Kirchhoff aveva stabilito che il rapporto e/a è una funzione della lunghezza d'onda e della temperatura ed è indipendente dalla natura del corpo:

$$\frac{e}{a} = f(\lambda, T)$$

Per un corpo che assorbe tutte le radiazioni, cioè un corpo nero, risulta $a = 1$ ed $e(\lambda, T)$ è una funzione universale. Si può intuire che da questo momento divenne cruciale trovare il valore di tale funzione sulla cui determinazione sperimentale vi furono varie difficoltà, come lo stesso Kirchhoff disse nella sua memoria del dicembre 1859.

Altro fondamentale risultato ottenuto da Kirchhoff in questa memoria è il cosiddetto *principio di inversione* secondo il quale, come visto, una sostanza assorbe le stesse radiazioni che è in grado di emettere.

ANALISI CHIMICA CON GLI SPETTRI

L'anno successivo Kirchhoff e Bunsen scrissero un'altra memoria, *Analisi chimiche mediante osservazioni spettroscopiche* (*Annalen der Physik*, **110**, pp. 161-189, 1860), questa volta comunicando il modo di utilizzare la spettroscopia per fare analisi chimiche.

Leggiamo alcuni brani di tale memoria, anch'essa discorsiva::

È ben noto che molte sostanze, quando sono esposte alla fiamma, hanno la proprietà di produrre certe righe brillanti nello spettro. Possiamo fondare su queste righe un metodo di analisi qualitativa che allarga enormemente il campo delle reazioni chimiche e porta alla soluzione di problemi finora irrisolti. Ci limiteremo qui solo all'estensione del metodo alla rivelazione dei metalli degli alcali e delle terre alcaline e all'illustrazione del suo valore in una serie di esempi.

Le righe suddette appaiono più facilmente, quanto più alta è la temperatura e più debole il potere illuminante naturale della fiamma. La lampada a gas descritta da uno di noi fornisce una fiamma di temperatura molto alta e luminosità molto bassa; essa è quindi particolarmente adatta alle ricerche su quelle sostanze caratterizzate da righe brillanti. [...]

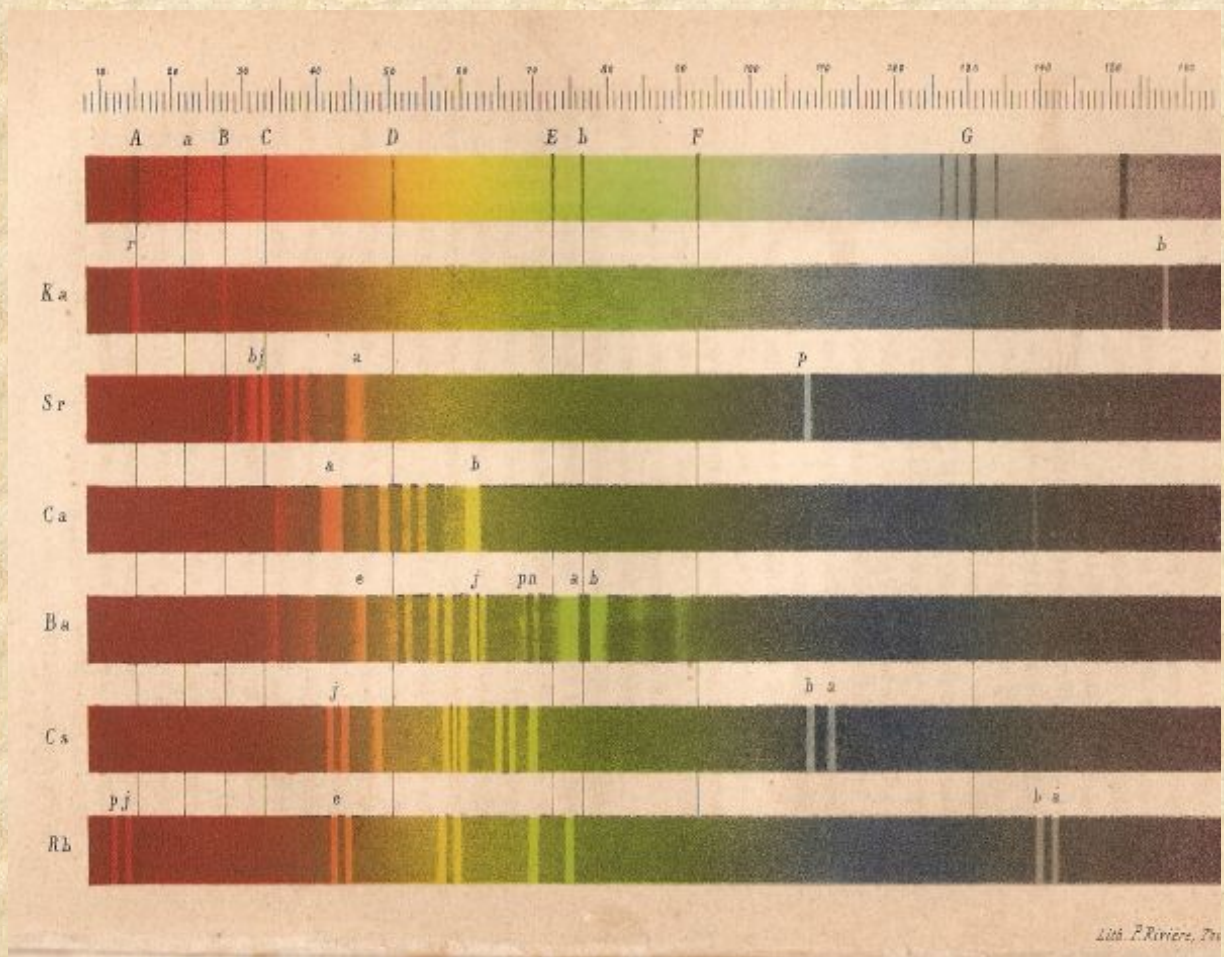
Da queste ricerche accurate e complete, i cui dettagli possono essere omessi, si deduce che la differenza delle combinazioni in cui i metalli sono usati, la molteplicità dei processi chimici nelle diverse fiamme, e le loro enormi differenze di temperatura non esercitano alcuna influenza sulla posizione delle righe spettrali corrispondenti ai singoli metalli. [...] Sembra indubbio quindi che le righe brillanti degli spettri indicati possano essere considerate prove sicure della presenza del metallo in questione. Esse possono servire come reazioni per mezzo delle quali questo materiale può essere rivelato con maggiore certezza, e più velocemente e in quantità più piccole che con qualsiasi altro metodo analitico. [...]

Per coloro che hanno familiarità con i singoli spettri mediante osservazioni ripetute non è necessaria una misura accurata delle singole righe; il loro colore, la loro posizione relativa, la loro caratteristica definizione e sfumatura,

la gradazione della loro brillantezza, sono criteri del tutto sufficienti per un sicuro riconoscimento anche per gli inesperti. [...]

Le posizioni che [le linee] hanno nello spettro determinano una caratteristica chimica di natura altrettanto inalterabile e fondamentale del peso atomico della sostanza, e perciò ci consente di determinarla con esattezza quasi astronomica. Ciò che, tuttavia, dà al metodo analitico spettrale un'importanza particolare, è il fatto che essa supera di gran lunga i limiti raggiunti dall'analisi chimica della materia prima d'ora. Essa ci consente di trarre le conclusioni più valide sulla distribuzione e la sistemazione delle sostanze geologiche nella loro formazione. Già le poche ricerche, che questa memoria contiene, conducono alla conclusione inaspettata che non solo il potassio ed il sodio ma anche il litio e lo stronzio devono essere annoverati tra le sostanze terrestri più largamente diffuse, sebbene solo in piccole quantità. L'analisi spettrale giocherà anche una parte non meno importante nelle scoperte di elementi non ancora rivelati. Giacché se vi sono sostanze che siano così irregolarmente disseminate in natura che i metodi di analisi usati prima d'ora per separarle ed osservarle falliscano, possiamo sperare di rivelare e di determinare molte di esse, mediante il semplice esame dei loro spettri alla fiamma, che sfuggirebbe ai metodi ordinari di analisi chimica. Abbiamo già avuto l'opportunità di mostrare che esistono realmente tali elementi prima d'ora sconosciuti. Pensiamo di essere quindi in grado di dichiarare con assoluta certezza, confortati dai risultati indiscutibili dell'analisi spettrale, che oltre al potassio, al sodio ed al litio, vi è ancora un quarto metallo appartenente al gruppo degli alcali che darà uno spettro altrettanto caratteristico del litio - un metallo che mostra, col nostro apparato spettroscopico, solo due righe, una riga blu debole, che quasi coincide con la riga SI' & dello stronzio ed un'altra riga blu, che giace solo un po' oltre verso l'estremità violetta dello spettro, paragonabile in intensità e nettezza con la riga del litio.

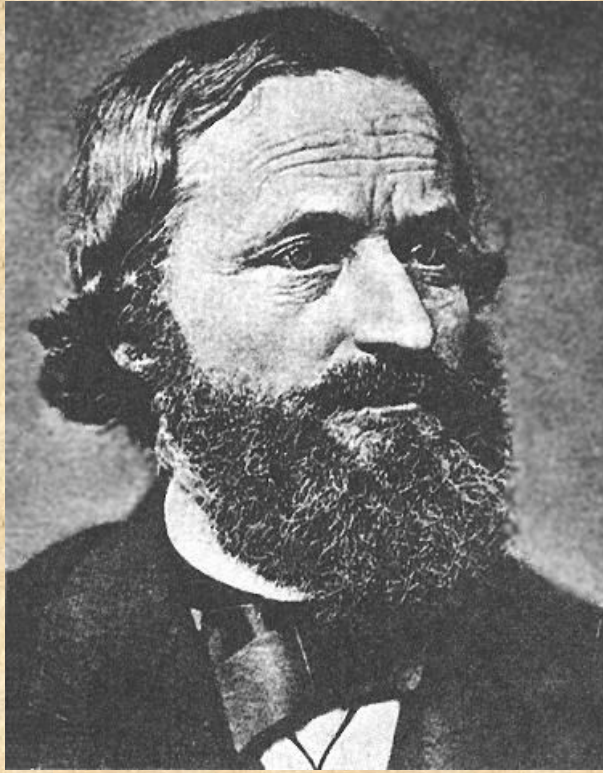
Da un lato l'analisi spettrale offre, come crediamo di aver già dimostrato, un mezzo di meravigliosa semplicità per rivelare le più leggere tracce di certi elementi nelle sostanze terrestri, e dall'altro essa dischiude alla ricerca chimica un campo completamente chiuso prima d'ora, che si estende ben al di là dei limiti della Terra anche al nostro stesso sistema solare. Giacché, col metodo di analisi che stiamo discutendo, è sufficiente semplicemente vedere il gas in uno stato incandescente per poter fare l'analisi, ne segue subito che lo stesso è applicabile pure all'atmosfera del Sole e delle più brillanti stelle fisse. Occorre qui introdurre una modifica rispetto alla luce che il nucleo di questi corpi celesti irradia. In una memoria Sulla relazione tra l'emissione e l'assorbimento dei corpi per il calore e la luce uno di noi ha mostrato, per mezzo di considerazioni teoriche, che lo spettro di un gas incandescente è invertito, cioè che le righe brillanti sono trasformate in righe nere quando una sorgente di luce di intensità sufficiente, che dia uno spettro continuo, è posta dietro lo stesso. Da ciò possiamo concludere che lo spettro solare, con le sue righe nere, non è altro che l'inverso dello spettro che l'atmosfera del sole stessa mostrerebbe. Quindi l'analisi chimica dell'atmosfera solare richiede solo l'esame di quelle sostanze le quali, quando siano poste in una fiamma, producono righe brillanti che coincidono con le righe nere dello spettro solare.



Nella figura, che compare nel lavoro di Kirchhoff e Bunsen *Analisi chimiche mediante osservazioni spettroscopiche* (*Annalen der Physik*, 110, pp. 161-189, 1860, Pl. II) sono rappresentati gli spettri di alcuni metalli alcalini confrontati con lo spettro solare e le sue linee oscure. Tratto da: Daguin, *Traité élémentaire de Physique*, Lagrave, Paris 1868, p 199.

Non posso fare a meno di aggiungere alcune considerazioni sull'importanza delle scoperte di Kirchhoff e Bunsen.

I lavori successivi di Kirchhoff furono anche dedicati a tracciare una mappa dello spettro solare assegnando ad un gran numero di linee gli elementi chimici che le generavano. Ångstrom fece altrettanto e fu il primo a descrivere le radiazioni solari in termini di lunghezze d'onda. Nello stesso anno di Ångstrom, 1868, fu l'astronomo inglese William Huggins (1824 - 1910) a dirigere lo spettroscopio verso Sirio ed altre stelle applicando a queste osservazioni l'effetto, scoperto dal fisico e matematico austriaco Christian Doppler (1803 - 1853) nel 1842. Con ciò scoprì che le linee spettrali si spostavano come conseguenza dello spostamento della stella Sirio della quale valutò una velocità di allontanamento di 47 Km/sec. Fu la prima volta che si riuscì a misurare la velocità radiale di una stella. Siamo in quel 1868 che vide altri successi astronomici. Una eclisse solare provò definitivamente le ricerche e teorie di Kirchhoff e Bunsen. Durante l'eclisse la fotosfera solare permise di vedere, in luogo delle consuete linee oscure, le linee brillanti dello spettro emesse dall'atmosfera solare. Era la nascita dell'astrofisica. Fino a pochi anni prima il cielo sarebbe stato impensabile capire, ad esempio, di quali elementi fossero composti Sole, stelle e pianeti. Ora con la spettroscopia diventava possibile descrivere l'universo in modo più compiuto e con l'effetto Doppler capirne meglio la meccanica. E si era capito che l'universo aveva una profonda unità materiale: sul Sole, su Sirio, sulla Luna vi erano gli stessi elementi terrestri. Trionfo ancora di Galileo, del suo *Nuncius Sidereus*. Non vi sono due mondi separati dal cielo della Luna, ma un solo mondo!



Kirchhoff

E questo è uno degli aspetti dei lavori di questi ottimi scienziati, ma ve ne sono altri. Tra questi l'apertura alle ricerche sull'emissione e l'assorbimento di un corpo nero che portarono, attraverso le ricerche di Stefan, Boltzmann e Wien, ai lavori di Planck. Ed ancora alla ricerca di comprensione di quelle linee che costituivano gli spettri degli elementi: cosa sono ? perché si generano ? L'ampio capitolo della fisica atomica iniziava ad aprirsi non più su basi eminentemente speculative.

Alla fine dell'Ottocento si accumulavano moltissimi dati sperimentali, si scoprivano fenomeni, come vedremo, che sempre più difficilmente erano riconducibili a spiegazioni meccaniciste, aumentava l'insoddisfazione per una fisica nata in un altro mondo, molto più lento. Quella fisica che era nata con Galileo e Newton stava mostrando le sue insufficienze. Si stavano preparando i profondi cambiamenti dell'inizio del Novecento.

La parte rilevante del lavoro del grande fisico Boltzmann, con la collaborazione importante di Bunsen, è stata raccontata. Ma i suoi lavori non terminano ai racconti che ho fatto perché egli lavorò alla frontiera di tutta la fisica del suo tempo. Era un positivista il nostro, addirittura di più di quanto chiedesse Comte perché affidava alla sola fisica il compito che Comte dava a tutte le scienze, includendo le sciocchezze delle pseudoscienze. Ed era dotato di un grande ed onesta personalità. Di lui diceva Boltzmann: *Nulla di eccezionale nella vita di Kirchhoff corrisponde all'eccezionalità del suo genio: la sua carriera è stata quella abituale di un professore universitario tedesco. I grandi avvenimenti della sua vita si sono svolti solo nel suo pensiero.* Ed aggiungeva Planck, che era stato suo alunno per un anno: *Kirchhoff ha esposto un corso di dispense universitarie redatte con scrupolo, nel quale ogni frase ben ponderata si trova al posto giusto.. Non una parola di troppo, né una mancante. Ma il tutto aveva l'effetto di una lezione recitata a memoria, asciutta e monotona. Ammiravamo l'oratore ma non quello che diceva.*

Una parte poco nota dei lavori di Kirchhoff riguarda la sua posizione critica riguardo alle basi fondanti della fisica. Era all'interno di un'[insoddisfazione](#) che, dopo Euler, D'Alembert e Lagrange, nell'ultimo quarto di secolo, riguardava molti scienziati: Barré de Saint-Venant, Reech, Perrin, Mach, Hertz, Poincaré ...

Kirchhoff era profondamente insoddisfatto del concetto di forza che egli addirittura voleva eliminare dalla meccanica. Nelle sue *Lezioni di matematica, fisica e meccanica* (Vorlesungen über Mechanik, 1874-1876), egli tentò di costruire una dinamica in cui i concetti di forza e massa fossero derivati dai concetti primitivi ed intuitivi di spazio, tempo e materia. Secondo Kirchhoff, la meccanica deve limitarsi a descrivere i movimenti disinteressandosi delle loro cause. Considerando la massa (concetto primitivo) come un coefficiente costante di una data particella, la forza risulta definita come il prodotto della massa per l'accelerazione. E poiché in meccanica non abbiamo mai a che fare con una forza, ma sempre con sistemi di forze che hanno come effetto il moto, noi, dallo studio di questo moto, non possiamo risalire al sistema di forze, ma solo alla loro risultante. Per questo la definizione di forza non può che essere incompleta. Osserva Dugas che, qualunque sia il valore della sintesi di Kirchhoff, la sua esposizione puramente logica della meccanica non fa che coronare un edificio già costruito da svariati altri contributi.

Egli introdusse questo suo testo con le seguenti parole:

La meccanica è la scienza del moto; il suo compito si definisce come segue: descrivere completamente e nel modo più semplice i movimenti che hanno luogo in natura.

Da qui si vede che, per Kirchhoff, occorre solo descrivere e non occuparsi delle cause del moto, cause che fino ad allora (ed ancora oggi) sono assegnate alle forze. Su questo aspetto è utile leggere quanto dice Max Jammer:

Contrariamente all'esposizione di Mach, la meccanica di Kirchhoff adotta il concetto di massa come se fosse intuitivamente dato, alla stessa stregua dei concetti di spazio e di tempo. Le masse sono infatti introdotte come coefficienti costanti caratteristici delle particelle prese in considerazione. L'esperienza mostra che l'introduzione di questi coefficienti è utile per una descrizione completa dei movimenti. La forza viene definita allora come il prodotto della massa per l'accelerazione, ed è pertanto una generalizzazione di ciò che Kirchhoff chiama "forze acceleratrici" X, Y e Z, definite dalle equazioni:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = X \qquad \frac{d^2y}{dt^2} = Y \qquad \frac{d^2z}{dt^2} = Z$$

Poiché "forza" non è altro che il nome della derivata seconda delle coordinate rispetto al tempo, se trascuriamo il coefficiente costante che denota la massa del corpo sorge un nuovo problema, del tutto legittimo: perché si tratta proprio della derivata seconda, e non della terza o della quarta? Che da queste considerazioni si dovesse escludere la derivata prima, risulta già in modo ovvio dalla legge d'inerzia. In effetti Kirchhoff solleva questo problema, per le derivate di ordine superiore, nella sezione 4 delle sue *Vorlesungen*. L'esperienza ci insegna, egli sostiene, che i movimenti che si verificano in natura sono tali che la loro rappresentazione mediante derivate di ordine superiore non contribuirebbe in

alcun modo a semplificare la loro descrizione; al contrario la complicherebbe perché, come mostra l'esperienza, le derivate seconde delle coordinate delle particelle di massa rispetto al tempo sono esse stesse funzioni delle coordinate. [...]

Secondo Kirchhoff un punto materiale è soggetto a un sistema di forze se il suo moto soddisfa le equazioni:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = X_1 + X_2 + \dots \quad \frac{d^2y}{dt^2} = Y_1 + Y_2 + \dots \quad \frac{d^2z}{dt^2} = Z_1 + Z_2 + \dots$$

Qualora il sistema comprenda due sole forze, queste equazioni sono la rappresentazione analitica del cosiddetto teorema del parallelogrammo delle forze. Se, continua Kirchhoff, il moto di un punto materiale è condizionato da varie forze, queste forze non possono essere determinate separatamente: solo la loro risultante è determinata. Tutte le forze $(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2), \dots$ possono essere scelte arbitrariamente, con l'eccezione di una singola forza, che può allora esser data in modo tale che la risultante finale sia eguale all'accelerazione sperimentalmente osservata. Orbene, poiché solo il moto è la fonte della formazione dei concetti in meccanica, sostiene Kirchhoff, la meccanica non può fornire una definizione completa del concetto di forza:

Ne segue che, una volta introdotti sistemi di forze in luogo di forze semplici, la meccanica non è più in grado di dare una completa definizione del concetto di forza. Tuttavia tale introduzione è della massima importanza. Ciò si fonda sul fatto che, come l'esperienza ha mostrato, nei moti naturali si possono trovare sempre sistemi tali che se ne possono più facilmente indicare le forze singole che non le loro risultanti

Non resta che accennare agli ultimi anni della vita di Kirchhoff. Nel 1871 Helmholtz fu chiamato ad insegnare a Berlino e ricambiò con Kirchhoff l'invito che questi gli fece ad Heidelberg, invitandolo ora ad occupare una cattedra di fisica teorica, una delle prime al mondo, in quella prestigiosa Università. Kirchhoff accettò ma non lo fece Bunsen che preferì restare ad Heidelberg. Tra i suoi alunni i due grandi Hertz e Planck che, come visto per Planck, apprezzavano il rigore di Kirchhoff ma non la sua perfezione formale. Sembra si annoiassero.

Nel 1857 Kirchhoff si era sposato con Clara Richelot dalla quale ebbe 5 figli. Quando nel 1869 Clara morì, egli si risposò con Luise Brömmel (1872). Si spense nel 1875 ed è sepolto nel cimitero di Berlino.



NOTE

(1) Le leggi di Kirchhoff sui circuiti elettrici sono, come detto nel testo, delle utilissime estensioni della legge di Ohm a circuiti più complessi di quelli normalmente utilizzati per discutere la legge di Ohm medesima. In generale un circuito elettrico è molto più complesso e risulta costituito da più conduttori ed, a volte, da più generatori di corrente. Qualunque sia il circuito è sempre possibile individuare in esso dei *nodi* e delle *maglie*. Definisco per comodità un *ramo* di circuito. Esso è un tratto qualsiasi di circuito in cui circola una corrente avente un solo e ben determinato valore. Ogni ramo potrà contenere uno o più generatori ed una o più resistenze; non tutti i rami, di solito, conterranno generatori e tutti i rami, invece, conterranno una resistenza nella quale, in genere, circolerà corrente; segue da ciò che in un circuito elettrico vi saranno tante correnti quanti sono i rami. Data questa definizione, in un circuito elettrico abbiamo le seguenti due situazioni: un nodo è il punto in cui convergono più di due rami; una maglia è un insieme di rami che costituisce un circuito chiuso (bastano due rami per fare una maglia). Le figure seguenti illustrano la situazione:

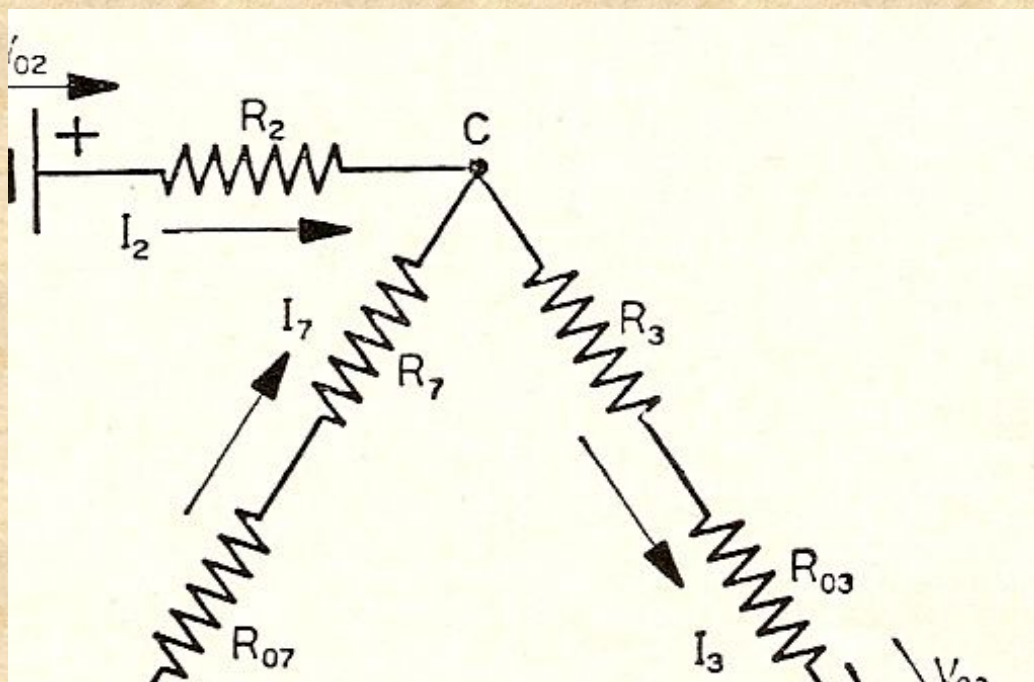


Fig. 1. Il punto C di questo disegno è un nodo. In esso convergono più rami ciascuno percorso da una determinata corrente.

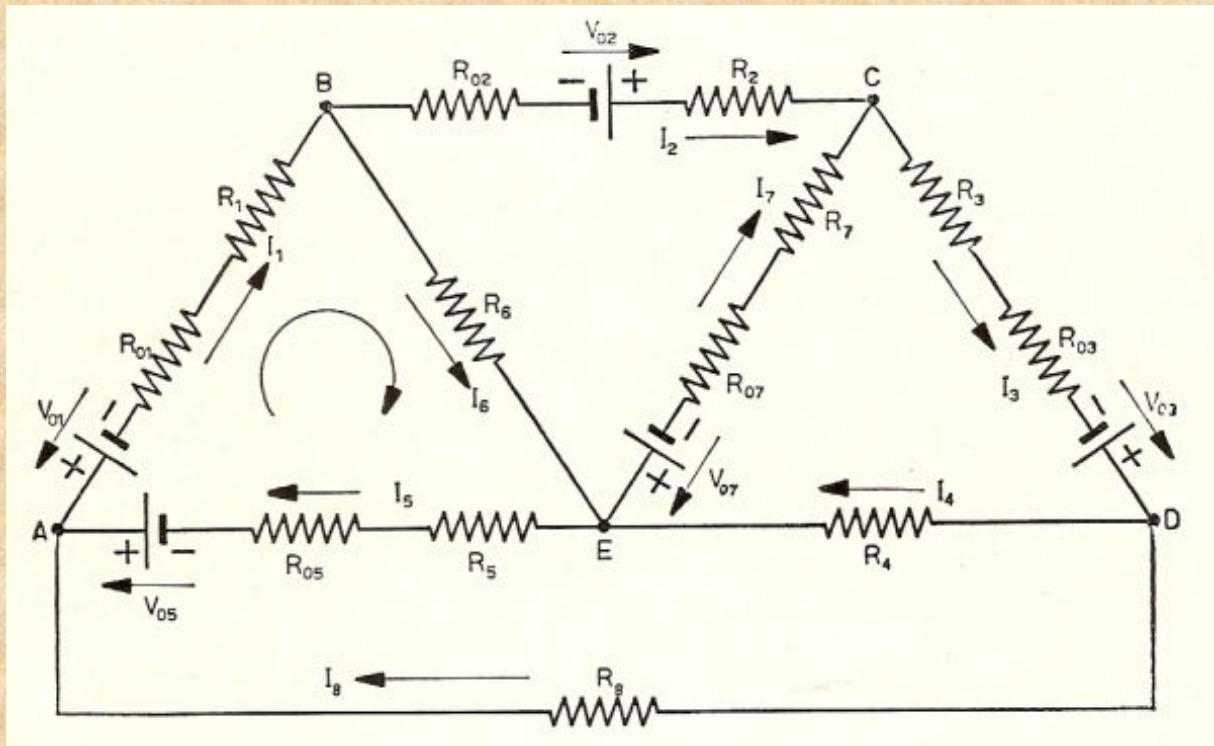


Fig. 2 - Nella figura sono rappresentate più maglie. Ad esempio sono maglie: ADE, BCE, ABCE, Le resistenze R_0 riportate sono le resistenze interne dei generatori mentre le R sono le resistenze degli utilizzatori.

Date queste definizioni, è possibile enunciare le leggi di Kirchhoff.

I legge - In ogni nodo di un circuito elettrico, la somma algebrica delle correnti è uguale a zero.

$$\Sigma I = 0$$

La legge è evidente perché dice semplicemente che in un punto in cui convergono più correnti, ad un dato istante, tanta è la corrente che entra quanta deve essere quella che esce.

II legge - In una maglia la somma algebrica delle tensioni è uguale alla somma algebrica del prodotto delle correnti per le resistenze dei conduttori.

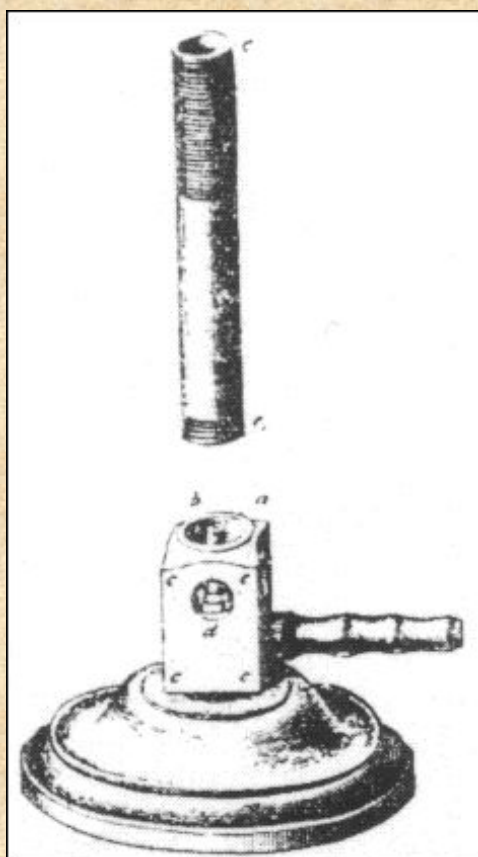
$$\Sigma V = \Sigma IR$$

Questa è proprio la legge di Ohm generalizzata. Per fare i calcoli occorre un minimo di accortezza. Nelle maglie si devono fissare a piacere i versi delle correnti (Fig. 2) scegliendo ad esempio il verso orario per tutte le maglie; questa scelta comporterà lo stabilire i segni delle tensioni che dovranno essere considerate positive se in quel ramo esse fanno circolare la corrente in accordo con il verso scelto arbitrariamente per la corrente e negative in caso contrario (nella Fig. 2, riferendoci alla maglia ABE ed avendo fissato il verso orario per la corrente, I_1 risulta positivo uazioni (che saranno algebriche !) che incognite e la cosa sarà facilmente risolvibile osservando che, ad un certo punto del sistema, si scopriranno equazioni che risulteranno linearmente dipendenti ed altre no. Riguardo infine ai versi convenzionali dati all'inizio alle correnti, alla fine della risoluzione del sistema si scopriranno correnti positive e negative. Quelle positive rappresenteranno i versi che sono corretti, quelle negative versi opposti a quelli da noi assegnati.

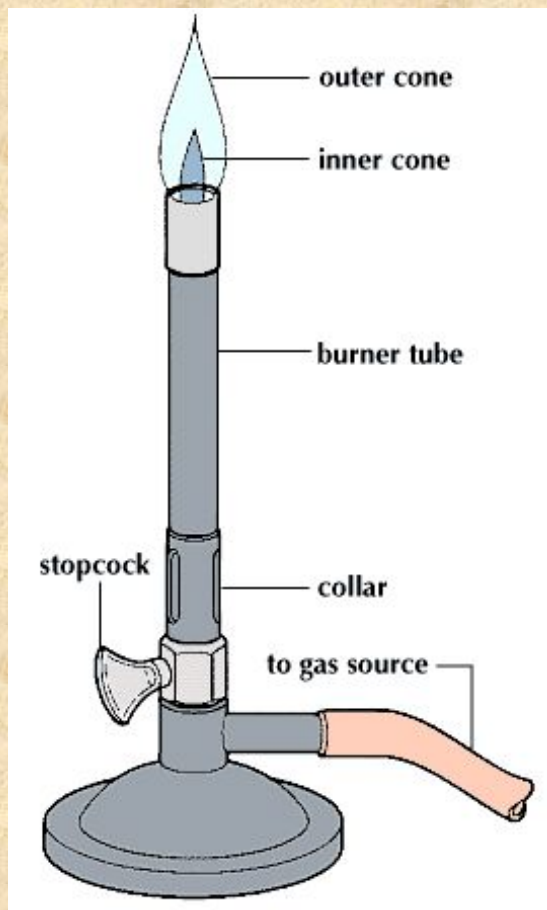
(2) Questa memoria di Kirchhoff è una delle esemplificazioni che oggi si fanno relative alla *teoria dei nodi* ed alla *teoria dei grafi*.

(3) J. Fraunhofer: *Bestimmung des Brechungsund Farbzerstreuungs-Vermögens verschiedener Glasarten* (Determinazione del potere di rifrazione e di dispersione di colore di molti tipi di vetro), in *Bezug auf die Vervollkommung achromatischer Fernrohre* (Rapporto sul perfezionamento di telescopi acromatici, *Denkschriften der Königlichen Akademie der Wissenschaften*, München, **5**, pp. 193–226, 1814).

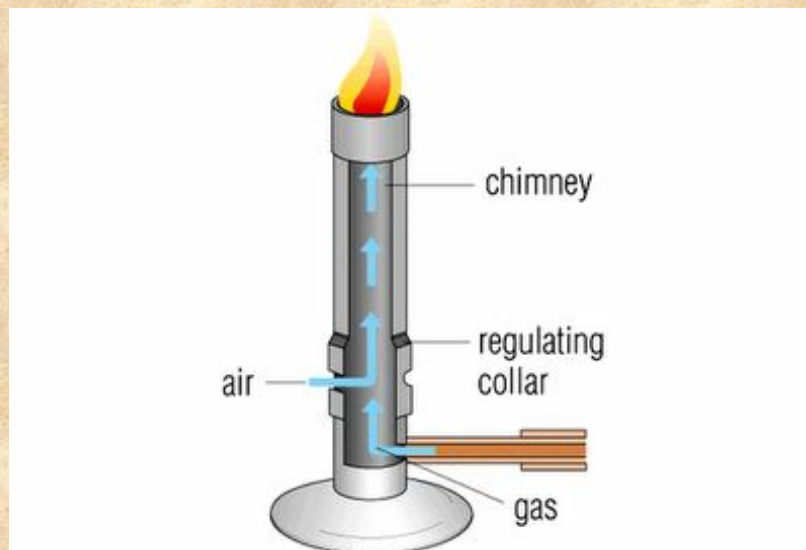
(4) Il fornello di Bunsen, detto *becco Bunsen*, noto e presente in tutti i laboratori ancora oggi, è quello illustrato nelle figure seguenti.



Disegno originale di Bunsen del suo becco.



Schema del becco. Si vede il collar che è un semplice anello che permette di regolare l'aria immessa nel tubo burner.



Sezione del becco.



La reticella sistemata sul becco per bruciare sostanze.

La seguente è invece la descrizione che Bunsen fornisce del suo *becco* nell'articolo in oggetto.

*. . . which one of us has devised and introduced in place of the wire gauze burners in the the laboratory here, and which is better suited than any other appliance for producing steady flames of different luminosity, color, and form. The principle of this burner is simply that city gas is allowed to issue under such conditions that by its own movement it carries along and mixes with itself precisely enough air so that the resulting air-bearing gas mixture is just at the limit where it has not yet acquired the ability to propagate the flame through itself. In Figure 6 [image to right] a is an ordinary cross cut burner rising in the center of the cylindrical space b to the same height as the cube cccc. The cylindrical space b, which is 15 mm. deep and has a diameter of 10 mm., communicates with the outside air through the four holes d, which are 7 mm. in diameter. If the tube ee, which is 8.5 mm. wide and 75 mm. long is screwed into the cylinder, it sucks in so much air through the openings d that it burns at the mouth of the tube e with a nonluminous, perfectly soot-free flame. The brightness of the gas thus mixed with air hardly exceeds that of a hydrogen flame. After the openings d are closed, the bright and sooting illuminating gas flame reappears. [Ann. der Physik, **100**, p. 84-5, 1857]*

La *figura 6* citata è la prima tra quelle riportate.

(5) Alcune semplici spiegazioni sullo studio degli spettri si possono trovare all'inizio dell'articolo [Un poco di fisica dei quanti](#). Lo *spettroscopio* fu ideato da Kirchhoff e Bunsen nel 1853 e realizzato da K. A. von Steinheil (famoso costruttore di strumenti ottici). Il reticolo di diffrazione fu invece introdotto con l'avanzare della tecnica. Fu il fisico statunitense Henry Rowland (1849 - 1901) nel 1881 (*The Physical Papers of Henry A. Rowland*, Johns Hopkins University Press, 1902, p. 525) a riuscire nell'impresa di realizzare i primi reticoli a riflessione che avevano fino a 800 righe parallele incise per ogni millimetro di materiale non trasparente utilizzato (reticoli primitivi erano stati usati precedentemente da Fraunhofer e Ångström). Uno dei migliori reticoli a riflessione che oggi può essere indicato come esempio è il CD-Rom (o DVD) con le sue scanalature.

(6) Un primo lavoro fu pubblicato nell'ottobre 1859 sul bollettino dell'Accademia delle scienze di Berlino, *Über die Fraunhoferschen Linien* (Sulle linee di Fraunhofer, *Monatsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, Oktober 1859, Ges. Abh. S. 564 e quindi ripubblicato sugli *Annalen der Physik*, **109**, pp. 148 - 150. 1860). Ad esso seguirono gli altri tre, pubblicati subito dopo, *Über den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption von Licht und Wärme* (Relazione tra emissione e assorbimento di luce e calore, *Monatsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, Dezember 1859, pp. 783-787 e quindi ripubblicato sugli *Annalen der Physik*, **109**, p. 275, 1860), *Über das Verhältnis zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht* (Rapporto tra il potere emissivo e il potere assorbente dei corpi per luce e calore, *Annalen der Physik*, **109**, pp. 275-301, 1860) ed infine *Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen* (Analisi chimiche mediante osservazioni spettroscopiche, *Annalen der Physik*, **110**, pp. 161-189, 1860). Un'altra memoria seguì nel 1861 ancora relativa alle linee spettrali di vari elementi: *Über zwei neue durch die Spectralanalyse aufgefundenene Alkalimetalle, das Caesium und Rubidium* (*Sitzungsberichte der kaiserl. Akademie der Wissensch. Mathematisch-naturwissenschaftl. Classe*, Bd. 43, Sitzung vom 10, Mai 1861).

BIBLIOGRAFIA

- (1) AA. VV. - *Scienziati e Tecnologi dalle origini al 1875* - EST Mondadori 1975
- (2) Emilio Segrè - *Personaggi e scoperte nella fisica classica* - EST Mondadori 1983
- (3) E. Whittaker - *A History of Theories of Aether and Electricity* - Nelson and Sons 1952
- (4) Articoli di Enrico Bellone in: Paolo Rossi (diretta da) - *Storia della scienza* - UTET 1988
- (5) Enrico Bellone - *I nomi del tempo* - Bollati Boringhieri, 1989
- (6) Enrico Bellone - *Le leggi della termodinamica da Boyle a Boltzmann* - Loescher 1978
- (7) A. Baracca, S. Ruffo, A. Russo - *Scienza e industria 1848 - 1915* - Laterza 1979
- (8) Mario Gliozzi - *Storia della fisica* - in: N. Abbagnano (diretta da) - *Storia delle Scienze*, UTET 1965
- (9) René Taton (diretta da) - *Storia generale delle scienze* - Casini 1965
- (10) Peter H. Herman - *Energia, forza, materia* - il Mulino 1984
- (11) Ciccotti, Cini, De Maria, Jona-Lasinio - *L'ape e l'architetto* - Feltrinelli 1976
- (12) Max Jammer - *Storia del concetto di forza* - Feltrinelli 1971
- (13) Ludwig Boltzmann - *Lectures on Gas Theory* - Dover 1995
- (14) Max Planck - *The Theory of Heat Radiation* - Dover 1991
- (15) Max Born - *Atomic Physics* - Blackie & Son, London 1962
- (16) Thomas S. Kuhn - *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity 1894-1912* - Oxford University Press 1978
- (17) E. Bellone - *Il mondo di carta* - EST Mondadori 1976
- (18) Piero Caldirola - *Lezioni di fisica teorica* - Viscontea, Milano, dopo 1950

[Torna alla pagina principale](#)

