

FISICA/ MENTE

LA FISICA ALLA FINE DELL'OTTOCENTO

di Roberto Renzetti

PARTE I: I RAGGI CATODICI

INTRODUZIONE

Abbiamo visto nei precedenti articoli vari aspetti e risultati della fisica dell'Ottocento. Non ho scritto sulla parte relativa all'elettromagnetismo perché in altri lavori presenti in Fisicamente vi sono abbondanti trattazioni che forse riprenderò sistemando il tutto in modo diverso, ma più avanti nel tempo. Il quadro che viene fuori è di un'accelerazione delle ricerche, di un aumento della complessità in relazione alla nascita ed alla piena affermazione della fisica teorica che vive ancora abbastanza legata alla fisica sperimentale ma che sta acquistando ali proprie e molto possenti. In quest'ambito il discorso diventerà solo per specialisti e difficilmente potranno trovare posto in Fisicamente le importanti elaborazioni teoriche che si serviranno di matematica molto avanzata. Ciò servirebbe solo a far giocare l'autore senza fornire veri strumenti di comprensione ai lettori.

Altro aspetto che emerge con chiarezza, e che si accompagna alle grandissime difficoltà dell'elettromagnetismo (o elettrodinamica) a fine

secolo, è la grande difficoltà in cui si dibatte la fisica cresciuta da Newton fino a Maxwell, Boltzmann, Helmholtz, Wien e tutti gli altri. Si sono accumulati risultati, si sono avuti moltissimi successi in diversi campi, si sono spiegate e comprese molte cose ma sfugge un quadro unitario, non si intravedono raccordi e se si tentano si inciampa in disaccordi con l'esperienza.

Alcune volte ho fatto cenno ai risultati sperimentali che si avevano in alcuni ambiti ma non mi sono mai soffermato su quanto la ricerca sperimentale produceva *in proprio*. Ed i fisici lavoravano anche in laboratorio producendo o incontrando vari fenomeni che poi i teorici avrebbero dovuto elaborare e comprendere. La messe di risultati sperimentali nell'Ottocento fu notevolissima, forse la più importante dalla nascita della fisica. L'intersezione tra ricerca scientifica, sviluppi tecnologici ed esigenze produttive funzionava come acceleratore.

Questo articolo intende occuparsi in modo speciale delle ricerche sperimentali che si svilupparono nella seconda metà dell'Ottocento a partire da alcune scoperte di Faraday fino alla scoperta dell'elettrone ed alla misura del rapporto della sua carica con la sua massa.

Gli scienziati coinvolti saranno sempre in numero maggiore e quindi è illusorio pensare di riuscire a dare la biografia scientifica di tutti. Questa parte del mio lavoro sarà sempre più carente, a meno di trovarmi in futuro a trattare di fortissime personalità scientifiche con importanti ricadute sociali come, ad esempio, Einstein o Bohr o Fermi o il gruppo degli scienziati nazisti o il gruppo dei guerrafondai di Los Alamos (Teller ed altri).

SCARICHE ELETTRICHE NEI GAS

Vi sono una mole di lavori che dovrebbero essere ricordati come antecedenti utili allo sviluppo di quanto vedremo. Citerò solo le cose più importanti.

Ho discusso ampiamente in precedenti lavori della scoperta del vuoto da parte di Torricelli e della costruzione da parte di [Otto von Guericke](#) (intorno al 1650) delle prime macchine da vuoto. Ebbene le pompe da vuoto sono state fondamentali per molti studi e ricerche ed anche nella costruzione dei tubi dentro cui, dopo aver fatto il vuoto⁽¹⁾, si facevano passare correnti elettriche. Questa operazione fu realizzata per la prima volta da Faraday nel 1838. Egli dedicò varie esperienze al fenomeno senza però ricavarne nulla. Nella *Thirteenth Series* delle sue *Experimental Researches in Electricity*, al

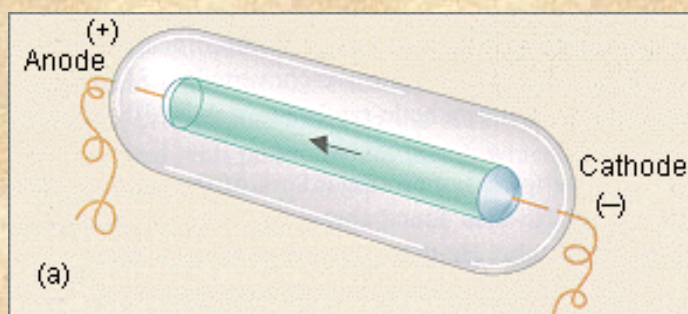
paragrafo *Relation of a Vacuum to Electrical Phenomena*, vi sono riportate tutte le sue esperienze e la descrizione degli apparati sulle scariche elettriche nell'aria e nel vuoto⁽²⁾. Faraday introdusse vari gas nel tubo in cui era stato fatto il vuoto e, lavorando a pressioni diverse e ad intensità diverse di scarica, notò varie colorazioni della scarica, spostamenti di zone colorate e zone oscure e vari altri fenomeni. Una delle cose che Faraday notò e descrisse era una sorta di arco di luce tra anodo e catodo ed una zona oscura presente intorno al catodo (per questo ancora chiamata *zona oscura di Faraday*, mentre il fascio di luce che parte dall'anodo assume il nome di *luce positiva*). L'insoddisfazione che egli provò per non essere riuscito a ricondurre tali esperienze ad una spiegazione in accordo con la sue teorie di campo è palese. Da una parte, in modo per lui inusuale, tentò la spiegazione mediante particelle cariche che si sarebbero spostate da luogo a luogo (non parlo di *poli* perché [Faraday](#) lavorò molto per sbarazzarsi di questo concetto e qui egli usava l'espressione *from place to place*), dall'altra riprese queste ricerche a partire dagli anni Cinquanta anche perché l'argomento era diventato *di moda*, perché vi era un nuovo potente strumento per generare le scariche, il rocchetto che il costruttore tedesco di strumenti Heinrich Daniel Ruhmkorff (1803-1877) aveva costruito nel 1851⁽³⁾, perché i tubi dentro cui si faceva il vuoto avevano avuto radicali perfezionamenti nel 1858 ad opera dell'altro costruttore di strumenti tedesco Heinrich Geissler (1814-1879) che era riuscito a fondere elettrodi di platino con il vetro in modo da realizzare una eccellente tenuta del vuoto⁽⁴⁾ ed infine perché lo stesso Geissler aveva realizzato una pompa da vuoto in grado di realizzare vuoti più spinti.

Nelle *Lezioni di Natale 1857-1858 sull'Elettricità Statica*, conferenze che Faraday usava dare ai giovani presso la Royal Society, parlando del fatto che nel fenomeno della scarica nei gas rarefatti sembrava come se del materiale fosse trasferito attraverso lo spazio, disse: *Questa trasferibilità è molto strana: perché sembra mostrare una sorta di esistenza di potenza indipendente e separata dal corpo ma niente è più difficile da concepire che proprietà o forze senza materia o materia senza forze*. Qui si capisce un poco meglio l'interesse di Faraday. Egli era un avversario delle spiegazioni occulte e *ad hoc*. Si stava occupando del supposto etere che, contrariamente a lui, quasi tutto il mondo della fisica ammetteva, compreso Maxwell, insieme alla concezione fluidistica dell'elettricità. Il passaggio di elettricità attraverso un vuoto poteva essere di sostegno alle sue idee ma, come Faraday aveva sempre fatto, non azzardava ipotesi se prima non aveva sufficienti basi sperimentali. Nello stesso periodo (1857) scriveva a Julius Plücker (1801-1868): *Quindi di nuovo il problema della trasmissione della scarica attraverso un vuoto perfetto è: ma tale vuoto esiste o no ? ho continuamente questo pensiero che è legato all'ipotesi dell'etere*.

Del fatto che Faraday proseguì le sue ricerche siamo informati dal volume 7 dei suoi *Diary*. Non si può comunque avanzare ulteriore ipotesi perché qui vi sono solo descrizioni di esperienze senza conclusioni di alcun

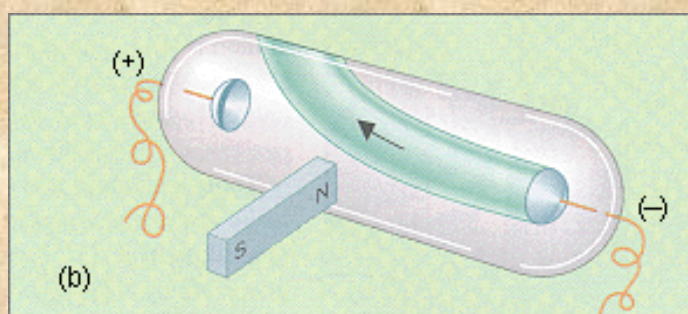
tipo e ciò vuol dire che Faraday chiuse la sua vita con questo problema irrisolto, almeno nel senso che lui auspicava.

Anche Plücker lavorava sulle scariche nei gas rarefatti ed aveva osservato le stesse cose di Faraday. Nel 1858 andò oltre e trovò che la zona oscura di Faraday aumenta di dimensioni, con la conseguente contrazione della luce positiva, al diminuire della pressione⁽⁵⁾ ma anche che vi era un aumento della luminosità rossastra intorno al medesimo catodo che seguiva l'andamento delle linee di forza di un campo magnetico *come se si trattasse di una catena di sottili fili metallici flessibili legati ad un estremo del catodo*. Se poi il catodo è fatto di platino, porzioni di vetro vicine ad esso risultano ricoperte di un sottile strato di questo metallo. Plücker scoprì infine un effetto di grande importanza: all'abbassare



Raggi catodici

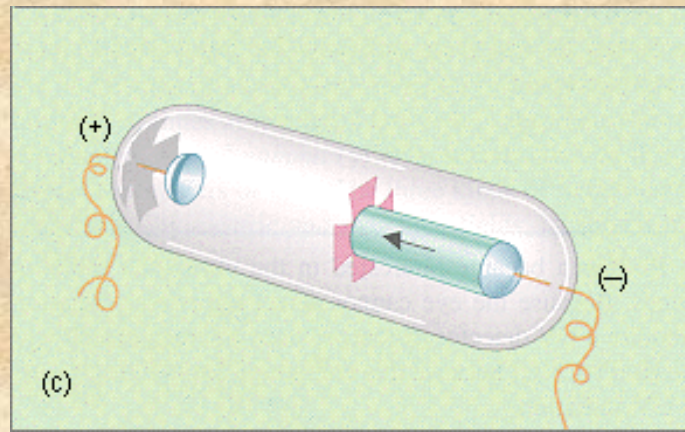
ulteriormente la pressione del gas, la luce positiva tende a sparire, con la zona oscura di Faraday che occupa quasi l'intero tubo, ma inizia ad apparire una notevole fluorescenza lungo quasi l'intero tubo. Questo fenomeno fu studiato a



Un campo magnetico provoca la deviazione dei raggi catodici

fondo nel 1869⁽⁶⁾ da un suo allievo, Johann Wilhelm Hittorf (1824-1914), che realizzò un tubo in cui era disposto un oggetto solido (in genere una croce di Malta) tra i due elettrodi nel tubo medesimo (questo oggetto, se metallico, poteva anche essere direttamente l'elettrodo positivo). A pressioni molto basse e con un rocchetto molto potente si vedeva proiettata sul fondo del tubo, sulla parete fosforescente opposta al catodo, l'ombra dell'oggetto in modo tale che questa ombra non poteva che essere originata da *raggi*

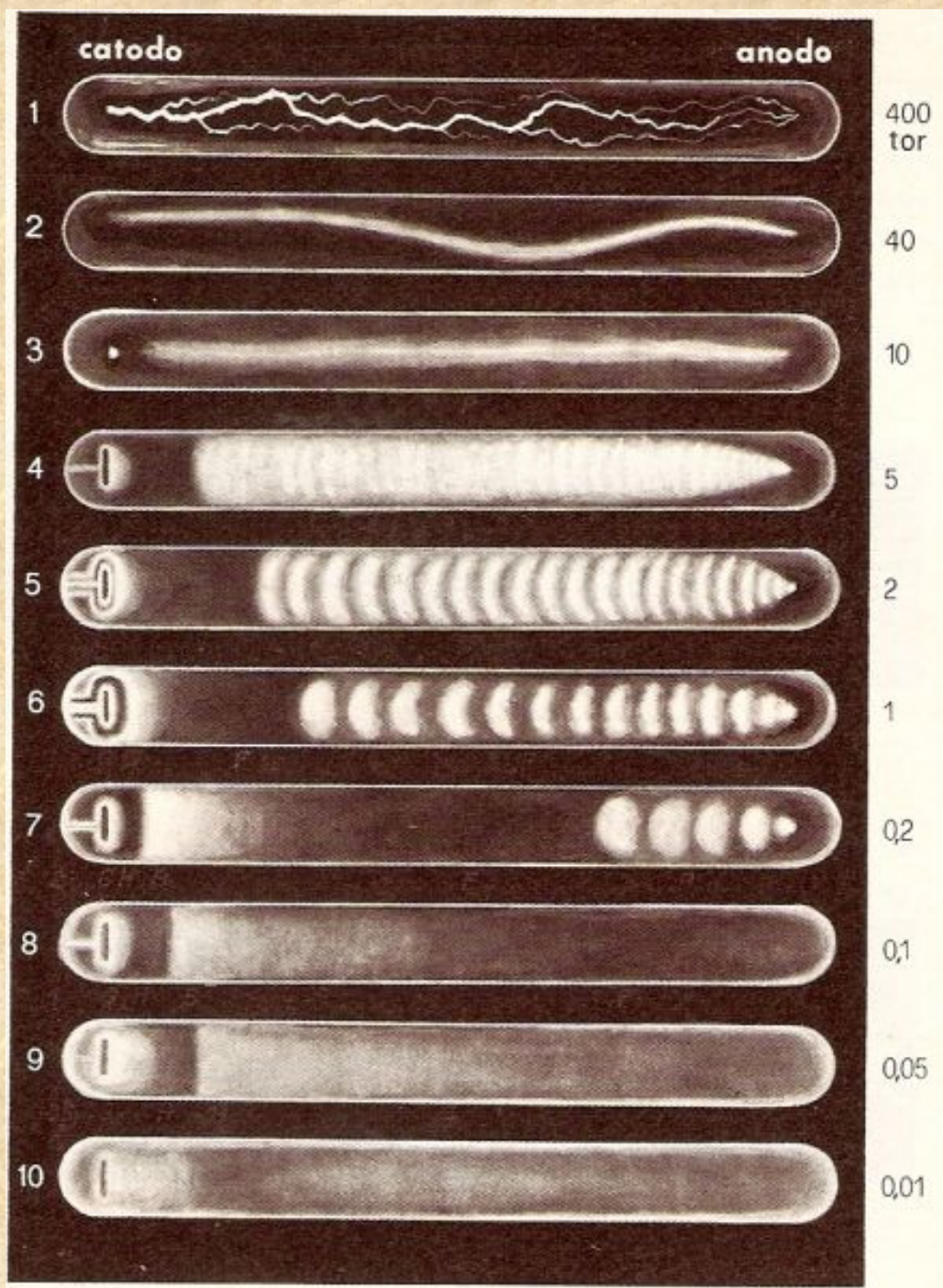
provenienti in linea retta dal



Un oggetto (una croce di Malta) posto nella traiettoria dei raggi catodici si trova proiettato sul vetro del tubo come un'ombra

catodo, raggi che, comunque, erano invisibili.

Un *riassunto* di cosa si osserva in un tubo contenente gas rarefatto, al diminuire della pressione [l'unità di pressione nel sistema SI è il *pascal* (Pa), che corrisponde a 1N/m^2 . Qui è riportata l'unità *tor* che equivale a 133,322 pascal], è riportato nelle figure seguenti:

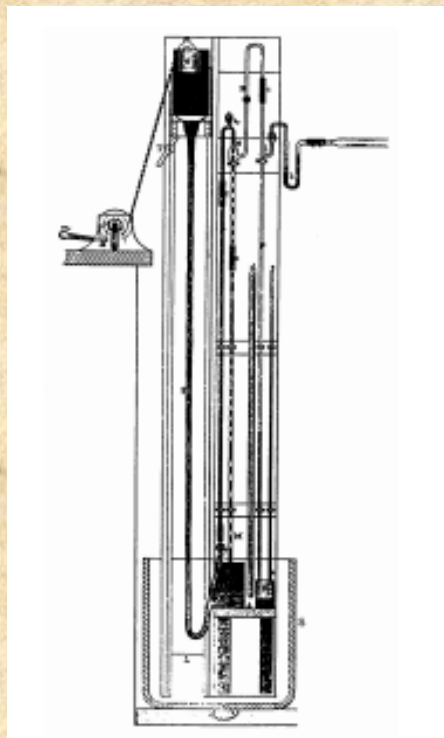


Nelle figure seguenti è invece riportata la nomenclatura introdotta (con qualcosa che dobbiamo ancora discutere):



Nel 1871 iniziò al lavorare su questi fenomeni il fisico tedesco Eugen Goldstein (1850-1930), allievo di Helmholtz a Berlino. Utilizzò catodi delle più svariate forme, dimensioni e materiali mostrando che i raggi, che egli chiamò *cathodenstrahlen* (*raggi catodici*) sono generalmente emessi perpendicolarmente alla superficie del catodo ma in modo diverso da ciò che fa la luce che si propaga dalla sorgente in tutte le direzioni mentre qui l'emissione è solo perpendicolare alla superficie del catodo ed in una sola direzione. Inoltre mostrò che le proprietà dei raggi sono indipendenti dalla natura del materiale con cui è fatto il catodo e che essi possono produrre reazioni chimiche⁽⁷⁾. Sempre nel 1871, l'ingegnere inglese Cromwell Varley (1828-1883), dal fatto che i raggi sono deviati da un campo magnetico, avanzò l'ipotesi che essi fossero costituiti da piccole particelle cariche negativamente⁽⁸⁾.

Nel 1879 il fisico e chimico inglese William Crookes (1832-1919), con la collaborazione del suo realizzatore di strumenti, Charles A. Gimingham, realizzò una varietà di tubi per i raggi catodici al fine di mostrare con facilità le proprietà di essi e di trovarne di nuove. A lato di ciò vi furono importantissimi miglioramenti della pompa da vuoto tanto che l'industria se ne interessò ed Edison ne acquistò per realizzare le sue lampade ad incandescenza.



Primo sistema per fare il vuoto usato da Crookes (1872)

Egli scoprì che i raggi catodici se focalizzati su una lamina metallica sottile sono in grado di scaldarla portandola al calor rosso e quindi mostrò che essi trasportano energia ma anche che sono in grado di esercitare una forza su una superficie. A proposito va ricordato il radiometro di Crookes (1874) sul quale ho scritto parlando della [pressione di radiazione](#)⁽⁹⁾. Egli credette di aver scoperto un quarto stato della materia, la *materia radiante*, e, anche se era in errore, aprì la strada allo studio dei plasmi⁽¹⁰⁾. Crookes sostenne che i raggi catodici potevano forse essere un *torrente di molecole*. Egli pensava che le molecole del gas residuo che restava nel tubo, urtando nel loro moto il catodo, acquistavano carica negativa quindi erano respinte con forza dal catodo negativo andando velocemente verso l'anodo. Gli urti di tali molecole sul vetro originavano la fosforescenza. Tra l'altro trovò che due fasci di raggi catodici si respingevano mutuamente. Egli nel suo lavoro (*Phil. Mag*, 1879) proseguì con queste argomentazioni del genere e la sua idea delle molecole che dal catodo andavano velocemente verso l'anodo restò come modello da cui partire per ulteriori spiegazioni. Non erano di questo parere né Goldstein né Hertz che pensavano questi raggi come onde elettromagnetiche di un tipo particolare poiché avevano tutte le proprietà della luce meno il fenomeno della deflessione mediante un campo magnetico e l'emissione in un'unica precisa direzione. Ma queste peculiarità potevano avere una qualche spiegazione che si trattava di trovare. E si cominciò a discutere se non fosse l'etere ad essere *disturbato* in tali condizioni, disturbato in modo tale da far acquistare queste proprietà alle onde elettromagnetiche in considerazione. Si poteva, ad esempio, pensare che l'emissione perpendicolare dei raggi catodici fosse una peculiarità di

quel tipo di emissione diversa da un'ordinaria fonte luminosa. Hertz, dopo aver sostenuto nel 1883 che i raggi catodici non erano particelle ma una radiazione di qualche nuova specie, nel 1889 scrisse un articolo in cui si proponeva di *produrre dei raggi di forza elettrica e di eseguire con essi gli esperimenti elementari che si era soliti eseguire con la luce e con il calore raggiante*. Si poteva così parlare di *raggi di elettricità* con l'ipotesi di una identità tra i domini dell'ottica, del calore e dell'elettricità che ebbe un certo peso sul finire del secolo. A questo proposito nota Bruzzaniti che

in quegli anni nel caso dei termini *raggio* e *radiazione*, la sottile superficie di contatto tra le parole e le cose si ispessì, arricchendosi di nuovi rapporti, nuove concatenazioni e unitarietà inattese. Ciò condusse a mettere in luce, al di là delle parole, una fitta trama semantica che rese il riferimento (ossia gli oggetti cui quei termini si riferivano) più ambiguo e, in un certo senso, più oscuro.

E' questo lo sfondo in cui va situato il lavoro di Röntgen del 1895 in cui veniva annunciata la scoperta di un nuovo tipo di radiazione capace di attraversare corpi opachi alla luce ordinaria e di impressionare lastre fotografiche.

Nel 1880 Tait avanzò l'idea che se le particelle dei raggi catodici si muovono con grande velocità, le vibrazioni luminose prodotte da esse dovrebbero essere soggette ad un misurabile effetto Doppler. Egli provò a misurare il fenomeno ma non vi riuscì. Può essere addotta come ragione di ciò la teoria di Crookes: se la luce viene emessa solo durante gli urti delle particelle, l'effetto Doppler non può realizzarsi.

I fisici avevano quindi due modelli da confrontare per la spiegazione del fenomeno dei raggi catodici: da una parte la scuola tedesca propendeva per le onde (con la grave difficoltà della deflessione magnetica) mentre quella britannica, con Kelvin e J.J. Thomson, per le particelle anche se molti pensavano che il modello di Crookes doveva essere rivisto. E negli ultimi anni del secolo vi fu un confronto e scontro tra queste due visioni.

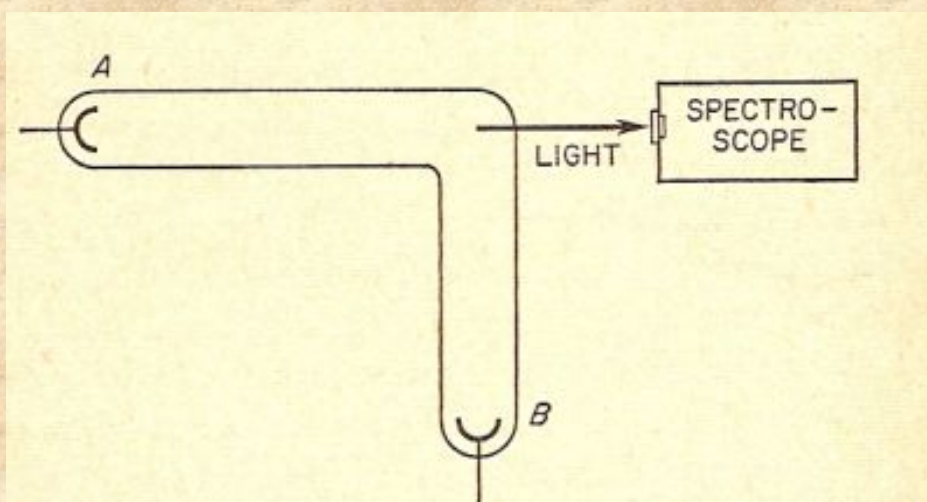
I LAVORI DI GOLDSTEIN E SCHUSTER

Nel 1880 vi furono lavori di G. H. Wiedemann (1832-1919) e Goldstein che attaccavano le teorie di Crookes su diversi fronti⁽¹¹⁾. Goldstein montò un'esperienza in modo tale che il cammino libero medio delle supposte molecole di Crookes fosse di circa 6 millimetri con una zona oscura estesa per circa 6 centimetri dal catodo. Il più efficace argomento di

Goldstein era relativo al fatto che, dalle sue misure risultava che, dopo aver attraversato la zona oscura, i raggi catodici percorrevano una distanza 150 volte superiore al loro cammino libero medio. Egli calcolò anche la probabilità di un tale evento, del percorrere cioè da parte del torrente di molecole una tale distanza senza collisioni, che risultava dell'ordine di un caso favorevole su 10^{65} possibili. In conseguenza solo *raggi* elettromagnetici avrebbero avuto la possibilità di percorrere una tale distanza attraverso un tubo, così *densamente* popolato di molecole, senza collisioni.

Nella stessa memoria Goldstein argomentava contro Crookes rispetto alla questione dell'emissione dei raggi catodici in una determinata direzione. Goldstein mostrava risultati di una estesa serie di esperimenti secondo i quali la macchia fluorescente prodotta dal catodo variava drasticamente di dimensioni e posizione quando la tensione applicata variava o la pressione residua del gas veniva modificata (su questa questione intervenne J. J. Thomson nel 1906 per fornire dei chiarimenti).

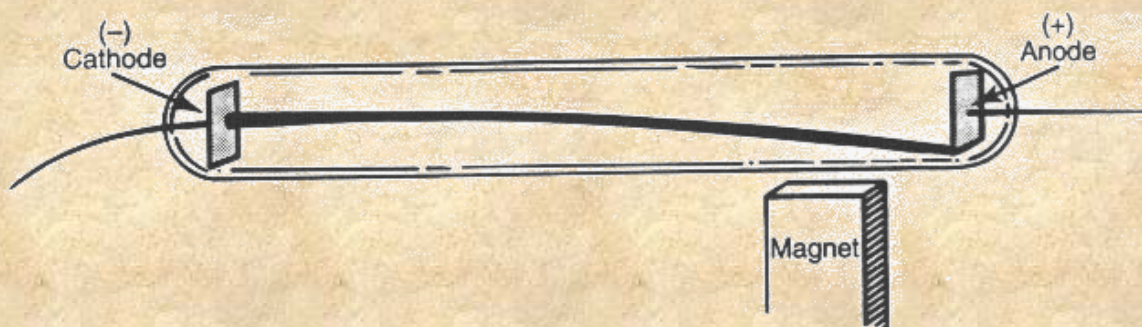
In tale memoria Goldstein si occupò anche di realizzare la misura dell'effetto Doppler tentata da Tait mediante la misura con uno spettroscopio della posizione delle linee spettrali emesse dal supposto *torrente molecolare*. Allo scopo si fece costruire un tubo a forma di L, come quello di figura in cui ciascun elettrodo poteva servire come catodo. Se A era usato come catodo allora la luce vista dallo spettroscopio sarebbe stata originata da un torrente in avvicinamento ad esso. Se



invece come catodo era fatto funzionare B, allora la luce sarebbe arrivata da un torrente che si muoveva perpendicolarmente alla linea dell'osservatore. Goldstein, cambiando i catodi, non osservò alcuno spostamento nelle linee spettrali e la sua precisione nelle misure era tale da essere certi che le molecole che producevano la luce non avrebbero dovuto avere una velocità superiore a circa 23 chilometri al secondo che è molto di più di ciò che ci si sarebbe aspettati dal modello di Crookes. A margine di ciò si cominciò a capire con chiarezza che i raggi catodici sono indipendenti dalla posizione

dell'anodo.

Nel 1884 vi fu un'altra esperienza⁽¹²⁾ da parte del fisico (tedesco ma con cittadinanza britannica dal 1875) Arthur Schuster (1851-1934). Nella sua memoria, Schuster sostenne che l'assenza di uno spostamento osservabile dello spettro a seguito dell'effetto Doppler era conseguenza semplicemente del fatto che qualunque luce sia emessa lungo la traiettoria di un raggio catodico è dovuta a molecole relativamente stazionarie che sono state colpite dalle particelle del raggio catodico in rapido movimento. Egli affermò che i raggi catodici sono costituiti da particelle cariche negativamente in rapido movimento ma in disaccordo con Crookes su come si erano originate. Le particelle negative dei raggi catodici dovevano avere origine dalla dissociazione delle molecole di gas in frammenti positivi e negativi, con i positivi catturati dal catodo ed i negativi respinti rapidamente da esso. Schuster cercò anche di conoscere quantitativamente, con qualche misura, i raggi catodici e per farlo si servì della possibilità di intervenire dall'esterno su di essi mediante la loro deflessione originata da un magnete. Disponendo un campo magnetico perpendicolarmente alla traiettoria dei raggi



catodici questi si muovono descrivendo un arco di cerchio. Ciò vuol dire che il campo magnetico deve esercitare una forza centripeta sulle particelle costituenti i raggi catodici. Assumendo che ciascuna delle particelle ha massa m , velocità v e carica q e che le particelle si muovono in un campo magnetico B lungo una traiettoria con raggio di curvatura R , si può scrivere la seguente equazione ottenuta eguagliando la forza magnetica (forza di Lorentz) alla forza centripeta che origina il moto circolare:

$$Bqv = mv^2/R$$

dalla quale si può ricavare:

$$q/m = v/BR$$

Dell'espressione ora scritta Schuster conosceva B ed R ⁽¹³⁾ ma non la velocità v dei raggi catodici; essa rimase quindi senza quei risultati che invece colse J.J. Thomson. Osservò però che la curvatura della traiettoria

rimaneva costante per una data tensione applicata al tubo catodico e per un dato B . In tali circostanze R era indipendente dalla corrente trasportata dal fascio di raggi catodici. Da ciò Schuster dedusse che la velocità delle particelle costituenti i raggi catodici dipende non dalla quantità di corrente nel fascio ma dal solo potenziale acceleratore (dalla tensione alimentatrice) che mantiene costante il rapporto q/m .

Un'altro fenomeno che mise in evidenza Schuster, nel prosieguo delle sue ricerche, era relativo alla scarica elettrica stessa. Egli scoprì che una corrente molto stabile può essere ottenuta fra elettrodi disposti in aria e con piccola differenza di potenziale tra essi, se a fianco di questa prima scarica se ne mantiene una seconda con elettrodi ausiliari nello stesso tubo. L'effetto veniva spiegato con la teoria avanzata sulla struttura delle particelle costituenti la scarica, cioè pezzi di molecole che, per semplicità, chiamo ioni. Gli ioni prodotti dalla scarica principale si diffondono nell'intero tubo e, muovendosi sotto l'influenza del campo prodotto dagli elettrodi ausiliari, aiutano la trasmissione della corrente degli elettrodi principali.

Più avanti, nel 1990, Schuster riuscì a stabilire un limite inferiore e superiore per i possibili valori del rapporto tra carica e massa. Egli suggerì che il massimo valore per l'energia cinetica che avrebbero potuto avere le particelle era Vq , con V valore della tensione acceleratrice applicata al catodo. In tal modo, ponendo l'energia cinetica $\frac{1}{2}mv^2$ della particella, uguale a qV e combinando questa equazione con quella ricavata nel 1984 ($q/m = v/BR$), trovò come massimo valore di q/m l'espressione $2V/B^2R^2$. Per determinare invece il limite inferiore per q/m , utilizzò nell'espressione $q/m = v/BR$ una velocità approssimativamente uguale a quella nota come tipica velocità molecolare nell'aria a temperatura ambiente.

I LAVORI DI HERTZ E LENARD

Anche Heinrich Hertz (1857-1894) si occupò della scarica nei gas a partire dal 1883⁽¹⁴⁾. Ho detto 'anche' perché il fisico tedesco aveva in mente lavori di elettrodinamica estremamente impegnativi e di enorme rilievo sulla [verifica sperimentale della teoria di Maxwell](#) su iniziali indicazioni di Helmholtz.

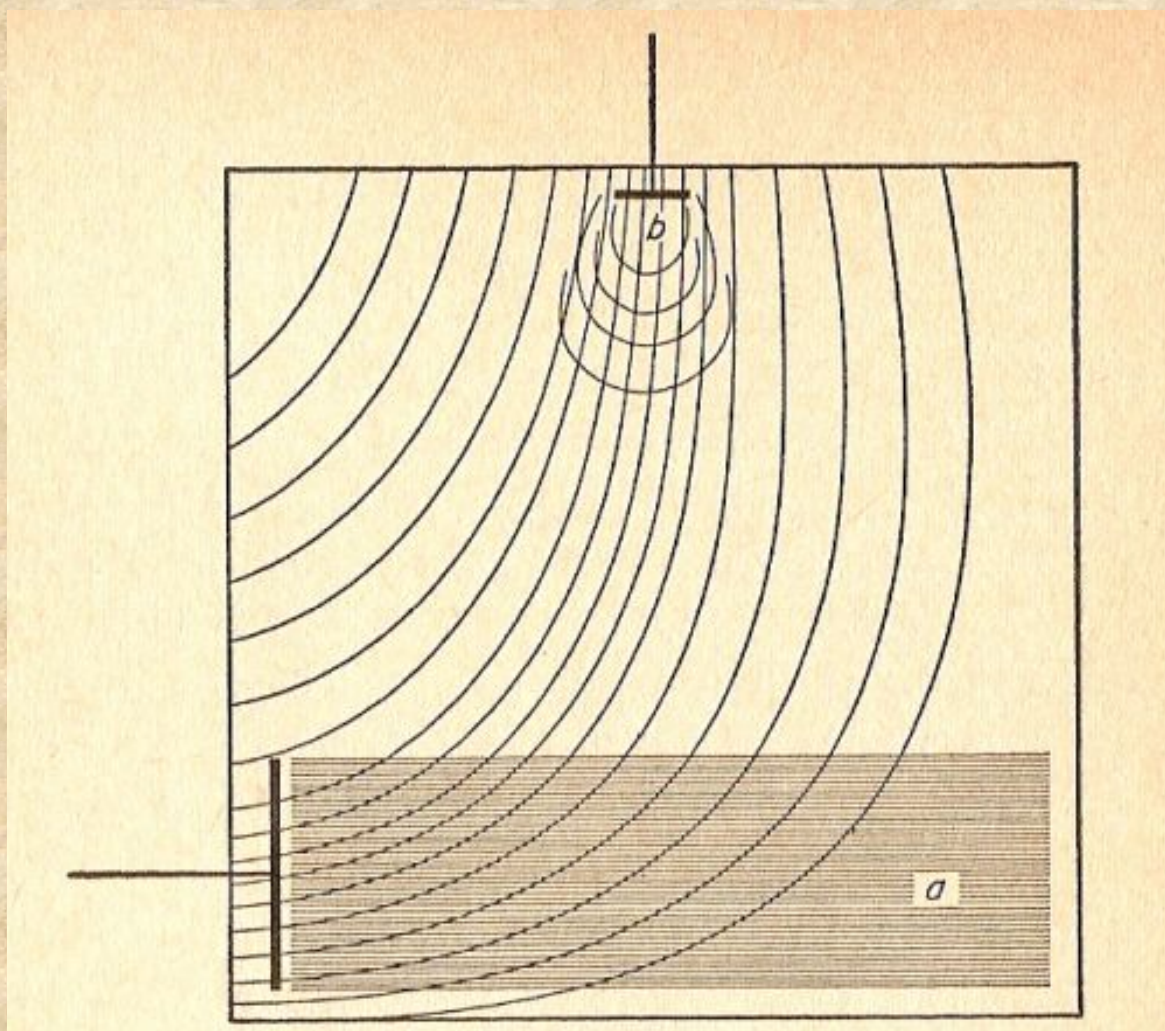
Questo grande fisico nacque ad Amburgo da una famiglia borghese. Studiò scienze ed ingegneria all'Università di Berlino, di Monaco e di Dresda essendo allievo di Kirchhoff e Helmholtz. Si laureò nel 1880 e subito entrò nella profonda stima di Helmholtz con cui rimase a lavorare

fino al 1883 quando fu nominato per l'insegnamento della fisica a Kiel. Nel 1885 ebbe una cattedra all'Università di Karlsruhe dove fece i suoi fondamentali lavori sulle onde elettromagnetiche⁽¹⁵⁾. A lui è dovuta anche la riformulazione delle equazioni di Maxwell fatta tra il 1889 ed il 1890⁽¹⁶⁾. Nel corso delle sue ricerche elettromagnetiche Hertz scoprì uno strano fenomeno, noto come [effetto fotoelettrico](#). Ne diede notizia⁽¹⁷⁾ ma non ebbe tempo di occuparsene anche perché morì a soli 37 anni. Mise comunque in relazione il fenomeno della seconda scarica che aiuta la prima, scoperto da Schuster, proprio con la luce ultravioletta emessa da questa seconda scarica. Egli notò infatti che la distanza attraverso cui può passare una scarica in aria aumenta fortemente quando della luce di lunghezza d'onda molto piccola è lasciata passare nello spazio occupato dalla scarica medesima⁽¹⁸⁾.

Le sue ricerche sui raggi catodici avevano come fine il mostrare la natura elettromagnetica dei raggi catodici e di negare quindi la loro natura corpuscolare. Il primo esperimento era studiato per mostrare che i raggi possono essere prodotti con continuità e non con impulsi discontinui; inoltre egli voleva mostrare che la traiettoria dei raggi non è necessariamente la stessa della traiettoria della corrente nel tubo.

Alcuni tra i primi studiosi di raggi catodici avevano utilizzato la tecnica degli specchi in rapida rotazione (la tecnica fu ad esempio utilizzata da [Foucault](#) nel 1850 per misurare la velocità della luce), specchi che possono essere utilizzati per fornire una visione stroboscopica di movimenti rotanti, vibranti, pulsanti. Tali osservazioni avevano mostrato che i raggi non avanzano in un flusso continuo ma ad impulsi successivi. Hertz suppose correttamente che gli impulsi erano dovuti semplicemente alla natura pulsante dell'alta tensione prodotta dai rocchetti d'induzione in uso. Egli allora si procurò una sorgente di differenza di potenziale continua realizzata mediante l'assemblaggio di 1000 piccole batterie. Usando questa sorgente che gli dava 2000 volt di tensione continua mostrò che sparivano gli impulsi nei raggi catodici così generati. Egli utilizzò questo risultato per mostrare che anche quell'indizio esistente, gli impulsi, che pareva favorevole ai corpuscoli in realtà svaniva in misure accurate.

Hertz mostrò poi che la corrente catodica che si stabilisce tra due elettrodi in un tubo non segue necessariamente il cammino del raggio catodico. Per mostrare questa proprietà si fece costruire un tubo catodico come quello di figura.



Il tubo consisteva di due placche di vetro piane; l'anodo ed il catodo potevano essere sistemati in differenti posizioni ai bordi dello spazio vuoto tra le due placche di vetro. In figura vi è una possibile disposizione degli elettrodi. Il raggio si muove, come ci si aspetta, perpendicolarmente dal catodo ed evidenzia questo suo tragitto producendo una debole colorazione blu nel gas residuo che Hertz indicò nel disegno con la lettera *a*. Vicino all'anodo vi era poi una morbida colorazione anodica, indicata con *b*. Le linee curve riportate nel disegno di Hertz forniscono la direzione e la grandezza del flusso di corrente che egli misurò con un ago magnetico sospeso delicatamente. Egli ne trasse la seguente conclusione:

Le figure mostrano senza alcun dubbio che la direzione di moto dei raggi catodici non coincide con la direzione della corrente.. In alcuni punti le linee di corrente sono quasi perpendicolari alla direzione dei raggi catodici. Alcune parti dello spazio gassoso sono illuminate in modo più brillante dalla luce del catodo, benché in esso la corrente praticamente si annulli. Parlando approssimativamente, la distribuzione della corrente nel suo fluire da polo a polo è simile a quella che si avrebbe in un conduttore solido o liquido. Da ciò segue che i raggi catodici non hanno niente in comune con il tragitto della

corrente.

Hertz fece molti altri esperimenti tutti tesi a mostrare che i raggi catodici sono di natura elettromagnetica. Alcuni sono molto elaborati e non aggiungono nulla a quanto abbiamo fin qui visto quindi non li riporto. E' invece utile accennare a qualche altra conclusione che Hertz trasse dalla sua scoperta dell'effetto fotoelettrico del 1891. E' noto che la luce è in grado di attraversare dei materiali solidi che risultano trasparenti ad essa mentre non risulta nulla di analogo per i raggi catodici. Ebbene, a margine delle sue ricerche Hertz scoprì che i raggi catodici possono penetrare in sottili strati metallici. Come rivelatore dei raggi egli prese una placca di vetro contenente alcuni composti dell'uranio. Questo vetro era noto perché diventava fortemente fluorescente quando era colpito da raggi catodici o luce ultravioletta. Egli sistemò su una parte della superficie di questo vetro delle foglioline d'oro e coprì alcune parti di queste foglioline con della mica. Quando questa placca era sistemata dentro un tubo a raggi catodici, perpendicolarmente al cammino dei raggi e con il lato del vetro cosparso d'oro affacciato al catodo, il vetro che si trovava sul cammino dei raggi diventava fluorescente anche al di là delle foglioline d'oro. I raggi riescono a superare le foglioline d'oro ma non lo strato di mica. Questa esperienza la ripeté con successo anche con l'argento, l'alluminio, e vari altri metalli o leghe mostrando che i raggi riescono ad attraversare anche più strati metallici sottili.

Nel 1894, quando Hertz era scomparso prematuramente, queste ricerche furono proseguite da un suo allievo, Philipp Lenard⁽¹⁹⁾. Egli montò una sottile foglia di alluminio (spesso tanto da impedire il passaggio dei raggi) su una piccola apertura alla fine di un tubo a raggi catodici, come frontiera tra il vuoto del tubo e l'aria esterna. Lenard, utilizzando l'alluminio come porta, fu capace di far uscire i raggi catodici dal tubo ed immetterli in aria trovando che essi ad ordinaria temperatura e pressione percorrono circa un centimetro in aria. I supposti atomi non avevano ancora una dimensione definita ma solo stimata intorno ai 10^{-8} centimetri di diametro. La foglia di alluminio deve essere capace di mantenere ogni tipo di gas da una parte con un buon vuoto rispetto alla parte dove non c'è vuoto. Poiché gli atomi erano le particelle più piccole note e poiché essi non riescono a penetrare tali fogli di alluminio, sembra molto improbabile che i raggi catodici siano costituiti da particelle. D'altra parte le onde elettromagnetiche non riescono ad attraversare sottili foglie d'oro o strati spessi di altri materiali come acqua o vetro.

DOVE SIAMO ?

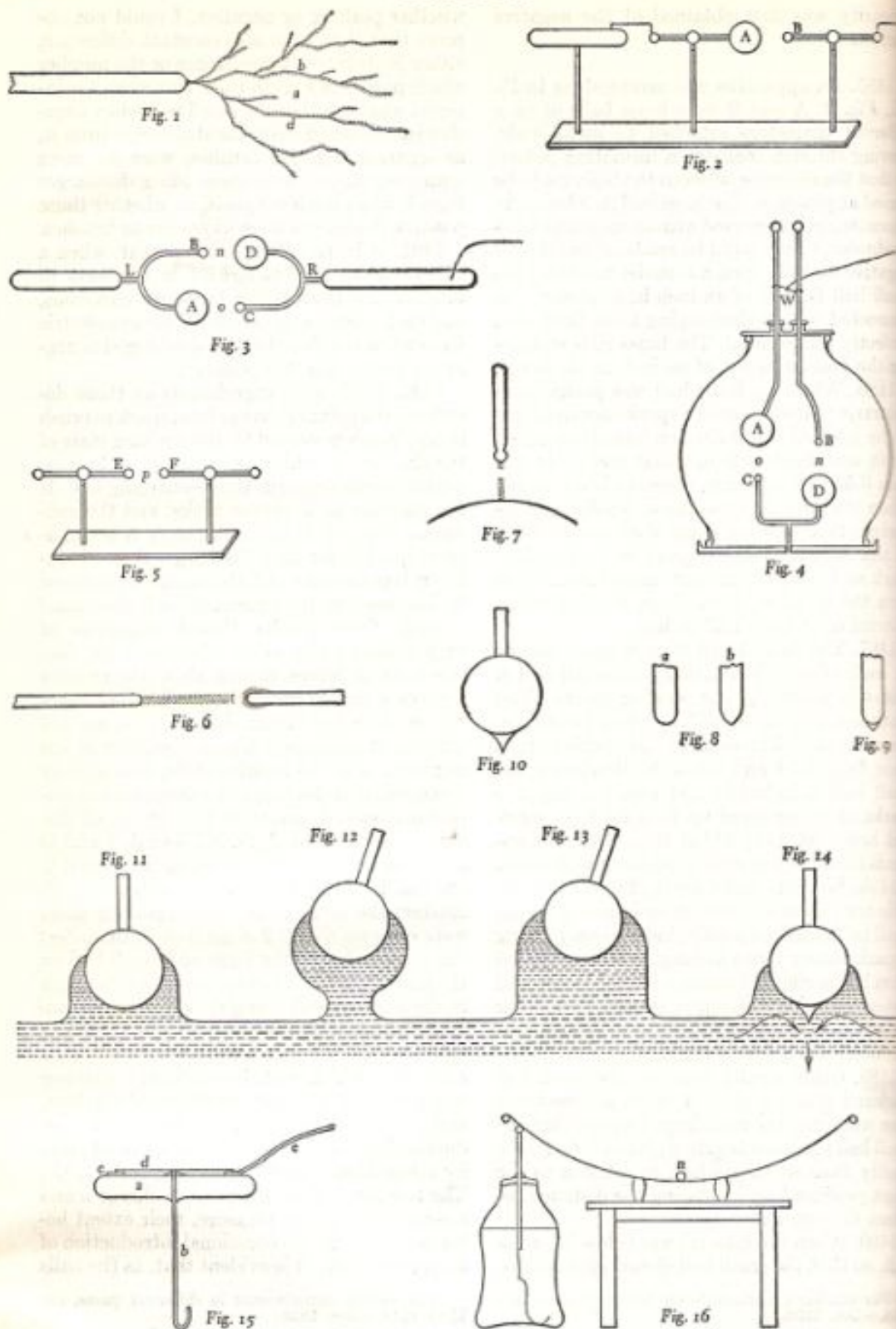
Siamo al 1894 ed abbiamo davanti tutto ciò che si era fatto in questo ambito di ricerche. Si era indagato dovunque con ogni sforzo e mezzo, ma non usciva niente di conclusivo e definitivo. Ricerche si susseguivano in ogni laboratorio e si era in attesa di capire, di riuscire a spiegare. Qualcosa accadde di estremamente importante l'anno successivo ed ancora 3 anni dopo. Si stavano aprendo questioni che avrebbero segnato profondamente la fisica del Novecento. Tutto questo lo vedremo nel prossimo articolo.

NOTE

(1) Debbo dire, a scampo di equivoci, che il vuoto totale o assoluto è impossibile da ottenere (almeno nei limiti delle nostre conoscenze attuali). Parlare di vuoto vuol dire rendere sempre più rarefatta l'aria. Vi sono quindi vari tipi di vuoto a seconda di quanta aria è stata tolta da un dato recipiente. A volte è stato utile, per gli scopi che ci si prefiggevano, immettere dentro il recipiente in cui era stato fatto il vuoto un dato gas.

(2) Faraday presenta la tavola seguente relativa alle sue ricerche:

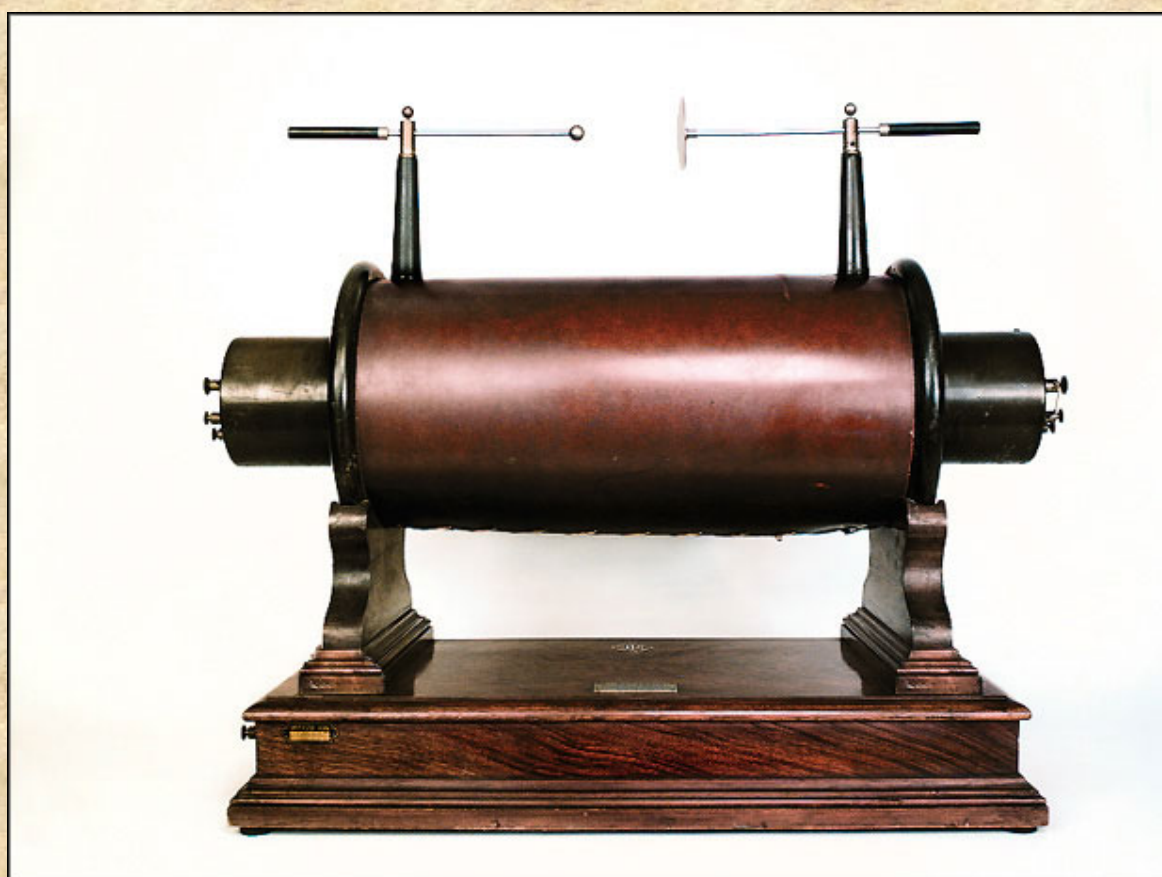
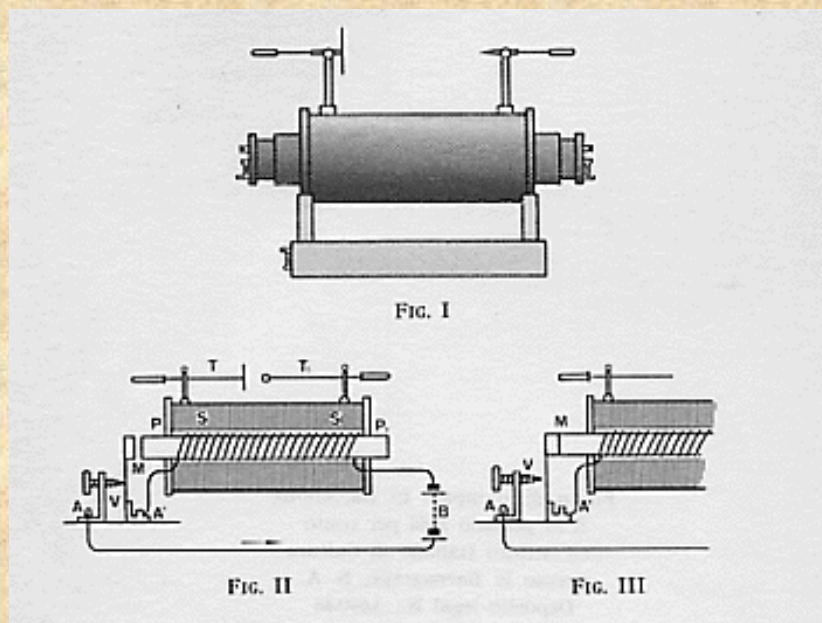
PLATE XI



496

(3) Un rocchetto di Ruhmkorf serve per la produzione di scariche elettriche ad alta tensione ed era un apparato di enorme interesse all'epoca perché non vi erano altro in circolazione per produrre tali scariche. Ebbe per circa 50 anni un ruolo fondamentale per lo sviluppo di almeno due campi della fisica, le onde elettromagnetiche e, appunto, la scarica nei gas. Lo

strumento, riportato in figura I (nella figura II vi è una sua sezione; nella figura III vi è un particolare della figura precedente), funziona nel modo seguente. Ricordando la legge di Faraday-Neumann-Lenz, la forza elettromotrice indotta E è data dalla velocità di variazione del flusso dell'induzione magnetica (preceduta da un segno meno). Quando circola corrente nel primario (PP' di figura II) si crea un grande campo elettromagnetico che va ad indurre una f.e.m. molto elevata nel secondario (SS di figura II). Questa f.e.m. indotta sarebbe solo istantanea se non vi fosse una variazione del campo inducente; a quest'ultima cosa provvede un interruttore V che, con estrema rapidità, porta a zero e quindi di nuovo al massimo il campo inducente.

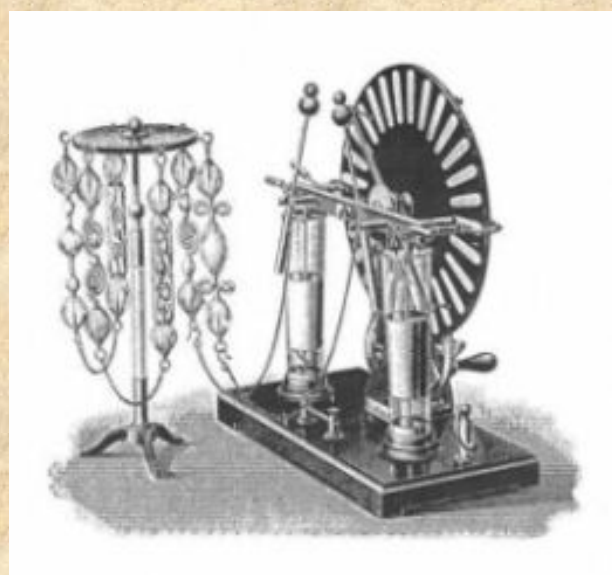


Dal Museo del Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma www.phys.uniroma1.it/DipWeb/museo/ruhmkorff.html

(4) Una figura che riporta vari tubi di Geissler:



alcuni tubi con scariche elettriche provocate da una macchina elettrostatica di Wimshurst:



e alcuni differenti colori che si ottengono a differenti pressioni:




Da [The Cathode Ray Tube site](#)


Geissler che lavorò anche con il matematico e fisico tedesco Julius Plücker che fu tra i primi a studiare i raggi catodici, per i suoi meriti scientifici ebbe la laurea in fisica nel 1868 ed una cattedra all'Università di Bonn.

I tubi di Geissler ebbero successo anche a livello popolare perché nelle fiere venivano mostrati, tra l'ammirazione del pubblico, questi tubi illuminati in varie colorazioni e con effetti diversi ma tutti spettacolari. I tubi venivano anche venduti al pubblico con annunci su vari periodici:

Geissler Tubes



E. I. Co. N. Y.
NOS. 1123-1124



NO. 1128

The Geissler tube is a distinct novelty on the American market. People who see Geissler tubes in action for the first time are so astonished by the beautiful effects obtained with same that they exclaim in wonder and amazement. The color effects of these tubes are so striking that it is impossible to describe them. One must see Geissler tubes in action to understand or appreciate their beauty. The tubes are filled with various gases forced in after a vacuum is obtained, and the glass, which itself contains fluorescent salts, is made luminant as soon as a high tension current flows through the tube. Every tube has a different pattern and combination of different colors, and if they are used in quantities for decorative purposes, the most wonderful color effects imaginable can be obtained. The more expensive tubes are filled with fluorescent liquids which still further enhance the beauty of the various color combinations, as the liquids themselves create new effects. Even the smallest spark coil will operate the largest tube.

We are at present the biggest importers of these tubes, and have always a large assortment in stock. We invite prospective customers to call at our stores

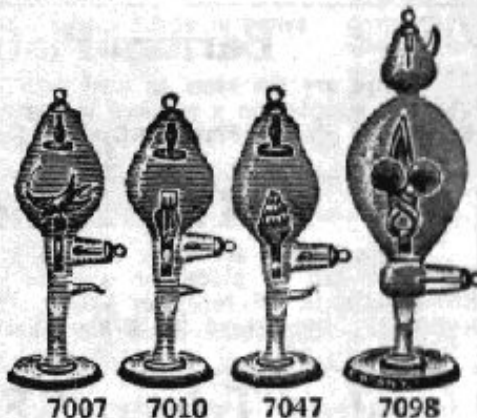
64

Fancy Tubes

If the regular Geissler tubes, which through our efforts in introducing them in the U. S., are wonders, our new fancy tubes are unheard of marvels in the fullest sense of the word. We vouch that you have never seen more beautiful color combinations than those of our fancy tubes in operation. The effect is really unusual and is well worth giving your eyes the exquisite color feast only possible through one of these tubes.

So striking and fairy-like is the effect that we will unhesitatingly refund your money if you can conscientiously say that when seeing one of these tubes in operation that it is not the most marvelous color effect your eyes ever witnessed.

Several kinds are now imported by us—one a mineral tube, another a flower or butterfly tube, a porous shell tube (the latter lighting in all the different colors), etc. The butterfly tubes have the property to glow for several minutes in the dark in a weird fluorescent color, giving a strange effect, AFTER the current is shut off. All fancy tubes stand vertically on glass pedestal. They work exactly like Geissler tubes; 6-8 may be run conveniently from a one-inch coil. There is nothing to burn or wear out in these tubes and they will last indefinitely.



No. 7007	Fancy tube, with butterfly	\$1.15
	Size 5 in. high	
No. 7010	Fancy tube, with minerals	\$1.15
	Size 5½ in. high	
No. 7047	Fancy tube, with porous shells	\$1.15
	Size 5½ in. high	
No. 7098	Fancy tube, with flowers (very striking)	\$1.35
	Size 6¼ in. high. Shipping weight of any of the above 1 lb.	

(5) Julius Plücker, *Ueber die Einwirkung des Magneten auf die elektrischen Entladungen in verdünnter Gasen* (Sull'azione di un magnete sulla scarica elettrica nei gas rarefatti, *Annalen der Physik und Chemie*, 103: 88-106, 151-157; 1858).

(6) J. W. Hittorf, *Ueber die Elektrizitätsleitung der Gase* (Sulla conduzione elettrica nei gas, *Annalen der Physik und Chemie*, 136: 1-31, 197-234; 1869).

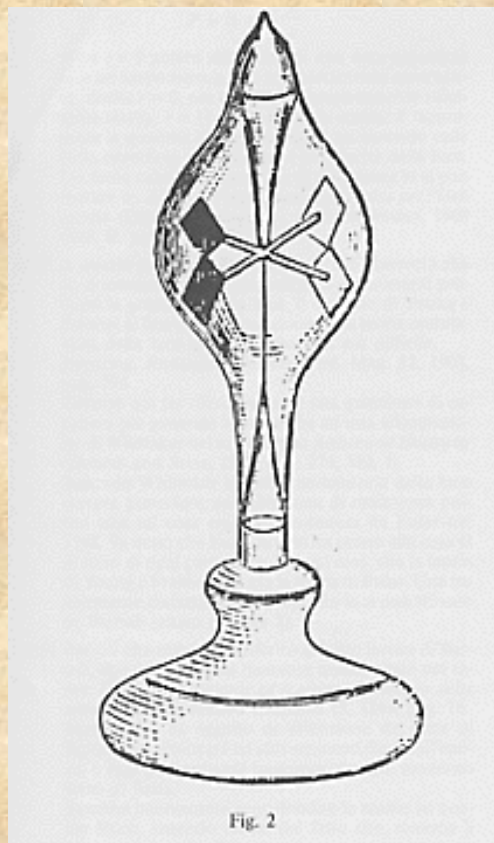


Un tubo di Hittorf. Il rocchetto si collegava alle due estremità mentre in basso si collegava la pompa da vuoto.

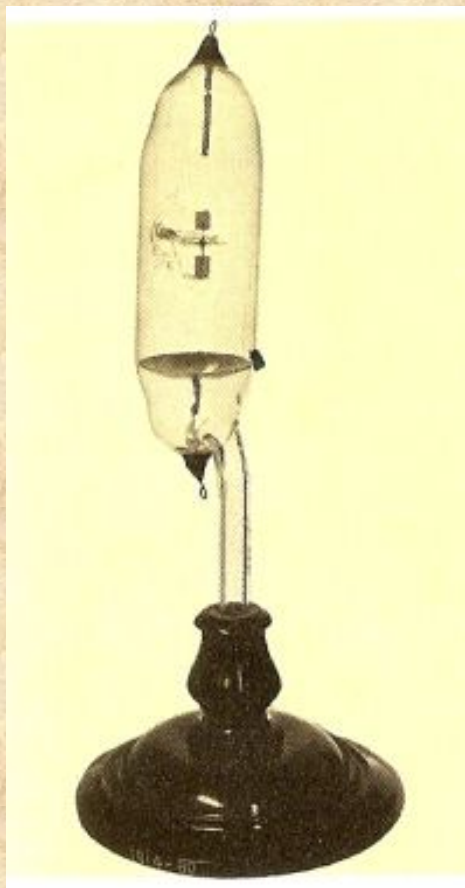
(7) E. Goldstein, *Über elektrische Entladungen in verdünnten Gasen* (Electrical discharges in rarified gases, *Monatsberichte Berlin Akad.*, 1876 con altri articoli sull'argomento pubblicati nel 1880 e 1881)

(8) Cromwell Fleetwood Varley, *Some experiments on the discharge of electricity through rarefied media and the atmosphere* (*Proc. Roy. Soc. London* 19, 236-242, 1871).

(9) Nel 1874 viene pubblicato un interessante lavoro di W. Crookes, *Attrazione e repulsione risultanti dalla radiazione* (*Phil. Trans. Roy. Soc.* 164, 1874, p. 501. *Ibidem*, 165, 1875, p. 519. *Ibidem*, 165, 1875, p. 547. *Ibidem*, 166, 1876, p. 350), a cui seguiranno svariati altri. Crookes afferma di essere riuscito a mostrare l'esistenza della pressione di radiazione con un apparato, il radiometro, da lui costruito. Contemporaneamente a Crookes (Gran Bretagna), anche in Germania era stato realizzato il radiometro ad opera di Geissler (1876). Lo strumento riportato in figura 1 è appunto quello di Geissler poiché è il più noto nella sua forma. Quello di Crookes differisce di molto poco ed è mostrato in figura 2. Si tratta di questo: delle palette molto leggere, una faccia delle quali è stata



Radiometro di Geissler



Radiometro di Crookes (Da Science Museum, Londra)

annerita mentre l'altra è argentata, sono fissate ad un piccolo cono di vetro. Quest'ultimo è sospeso su una punta sottile, in modo che il sistema possa ruotare liberamente. Il tutto è chiuso in un recipiente di vetro in cui è stato fatto il vuoto. Quando della luce è diretta verso le palette, esse si mettono a ruotare.

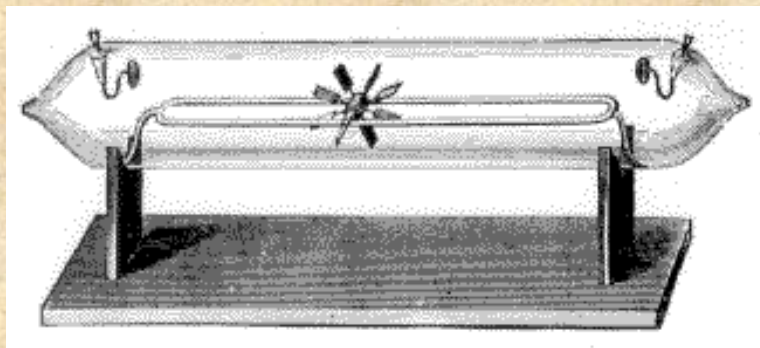
Crookes, nonostante da un anno sia apparso il *Trattato di elettricità e magnetismo* di Maxwell, ne trae subito la conseguenza che la teoria ondulatoria della luce si trova ora, definitivamente, di fronte ad una grossa difficoltà poiché il suo apparato dimostrerebbe, in modo inconfutabile, la pressione della radiazione. Egli aggiunge delle osservazioni sul moto delle palette: il movimento è molto veloce nelle condizioni iniziali di vuoto realizzate; man mano che si aumenta la pressione del gas contenuto nel recipiente in cui si trovano le palette, il movimento rallenta, fino a che non cessa del tutto. Questo fatto convince Crookes che l'effetto non è dovuto alle molecole d'aria residue nel recipiente in cui era stato fatto il vuoto: secondo il nostro, se l'effetto fosse dovuto alle molecole d'aria, mettendone di più sarebbe dovuto aumentare.

Il radiometro fu presentato nel 1873 alla Royal Society in una seduta nella quale era presente Maxwell. Quest'ultimo rimase profondamente colpito dal fenomeno. Pur non dubitando, inizialmente, del fatto che l'effetto fosse dovuto alla pressione di radiazione, egli rimase sconcertato (così si confessa in una lettera a Kelvin) poiché l'effetto era di gran lunga più grande

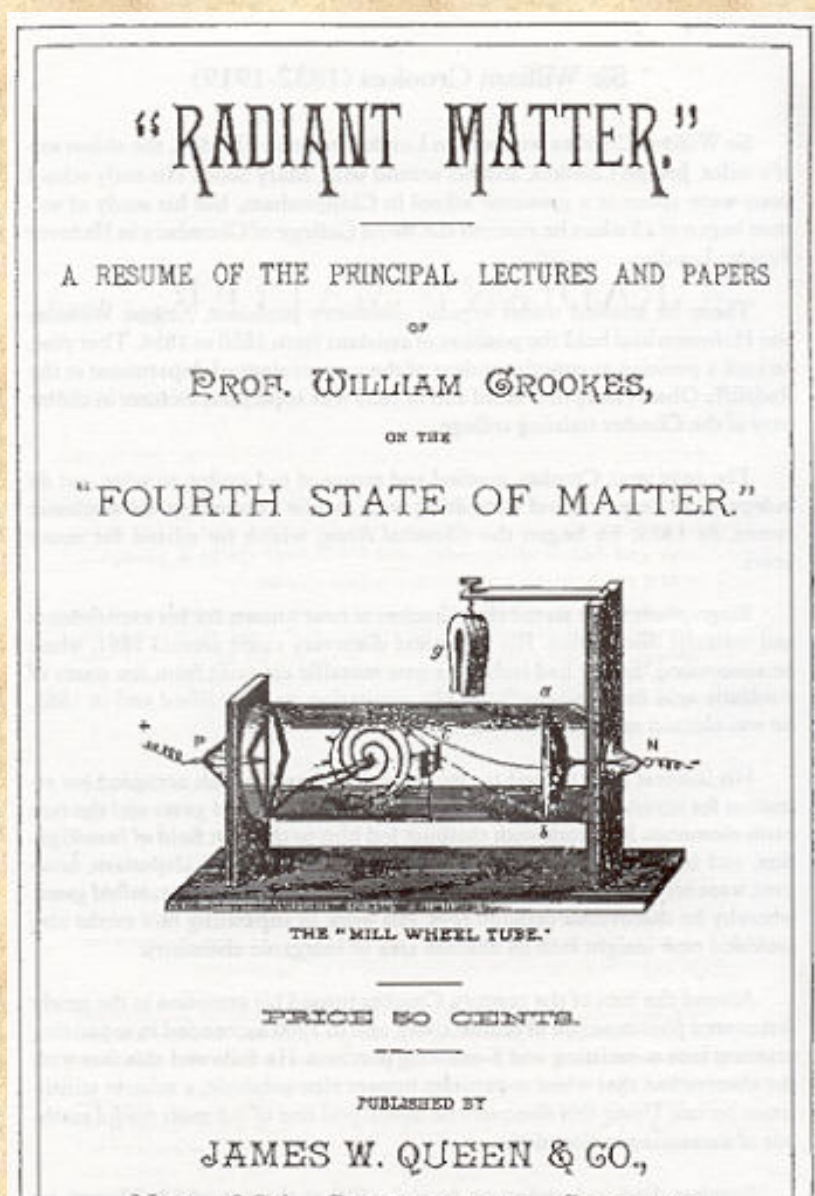
di quanto egli aveva previsto nei suoi lavori.

La cosa non era così semplice come pensava Crookes e come racconto nell'articolo su [La pressione di radiazione](#) citato.

La figura seguente mostra il mulinello di Crookes:



(10) W. Crookes, (*Phil. Mag.* 7, 57, 1879). Ancora nel 1879 in *On radiant matter*, una conferenza tenuta alla British Association for the Advancement of Science a Sheffield, Crookes presentò molte delle proprietà dei suoi tubi e discusse della *radiant matter* o plasma, il quarto stato della materia.



JAMES W. QUEEN & CO.,
 NO. 924 CHESTNUT STREET,
 PHILADELPHIA, PA.

Crookes, W., *The Bakerian Lecture: On the Illumination of Lines of Molecular Pressure, and the Trajectory of Molecules*, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol 170, pp. 135-164, (1879).

Crookes, W., *On a Fourth State of Matter*, *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. 30, pp. 469-472, (1879-1880).

Occorre solo accennare al fatto che Crookes si squalificò molto come scienziato per le sue posizioni sui fenomeni paranormali che lo portarono a dare credito a medium e ciarlatani.

(11) Wiedemann e Goldstein (*Monatsberichte Berlin Akad.*, gennaio 1880).

E. Goldstein, *On the Electric Discharge in rarefied gases*, *Phil Mag.* S 5 Vol. 10, n° 61, p. 173, 1880.

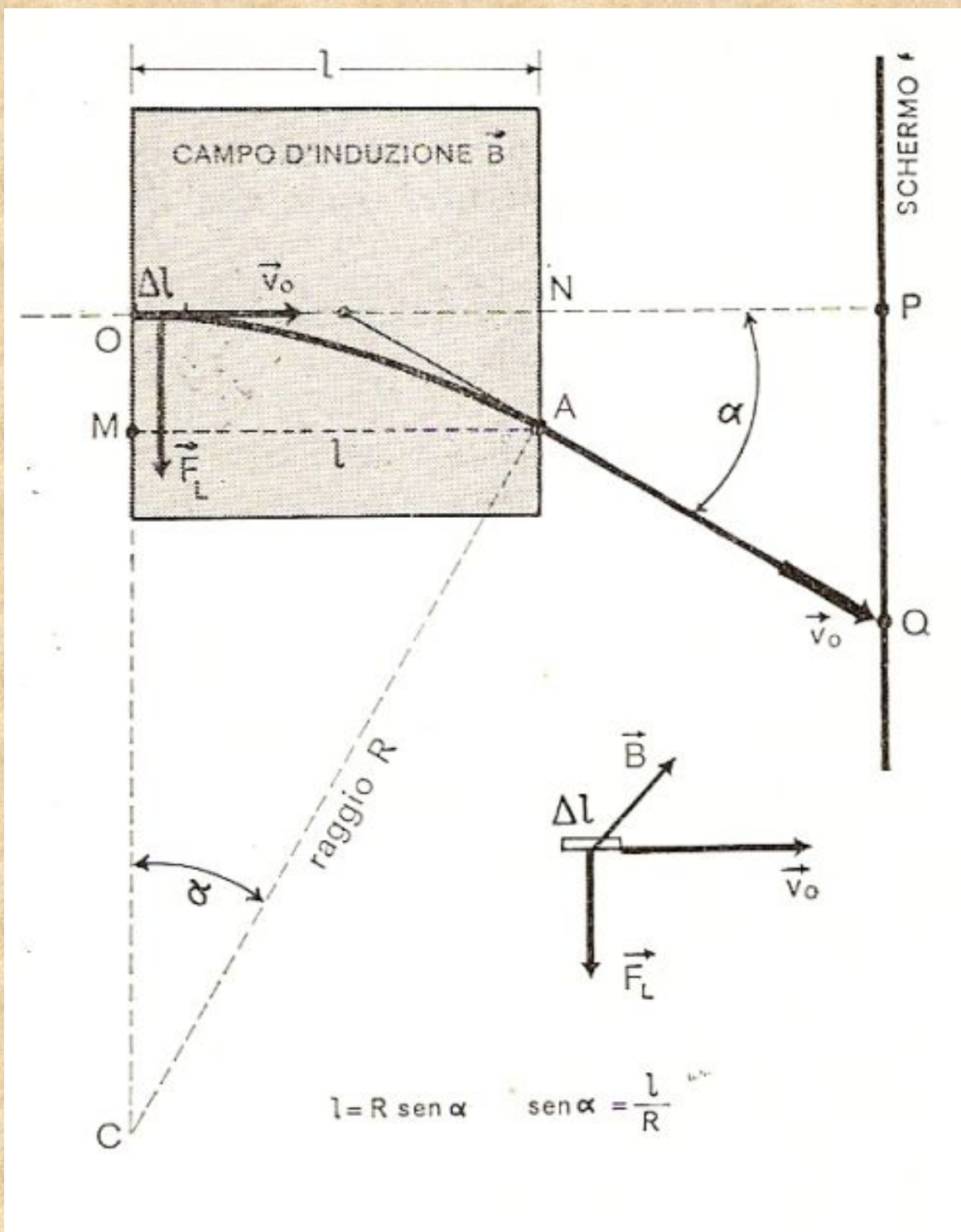
E. Wiedemann, *Phil. Mag.* 10, p. 357, 1880 (tradotto da *Ann. der Phys.* 10, p. 202, 1880).

(12) A. Schuster, *Proc. Roy. Soc. London* 37, 317, 1884.

A. Schuster, *Proc. Roy. Soc. London*, 42, 371, 1887.

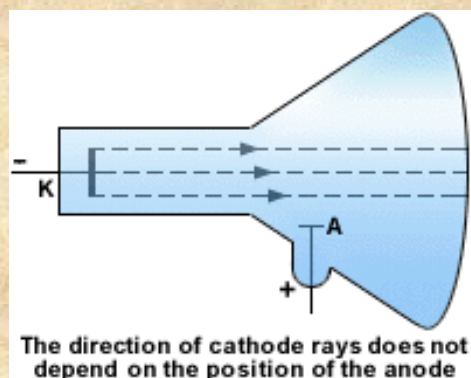
A. Schuster, *Proc. Roy. Soc. London*, 47, 526, 1890.

(13) Fornisco un disegno che è utile per comprendere come si calcola R a partire dalla geometria del sistema:



In questo disegno i raggi catodici viaggiano lungo la linea OP. Il quadrato colorato rappresenta la zona in cui agisce il campo magnetico B (per una lunghezza l) perpendicolarmente alla traiettoria dei raggi. Δl è un elemento di corrente costituito dai raggi nella zona del campo magnetico. Il tratto OA dei raggi deviati è l'arco di cerchio del quale occorre considerare il raggio R. Nel piccolo disegno a destra è rappresentata la regola della mano sinistra per stabilire i versi di: campo magnetico (B), forza di Lorentz (F_L) e corrente (l'elemento Δl e la sua velocità di spostamento v_0).

dove con *schermo* si deve intendere la superficie di vetro che si vede nel tubo seguente affacciata di fronte al catodo (e che da un certo punto è stato spalmato all'interno di una sostanza fosforescente per permettere una maggiore permanenza dell'immagine). Non è che ci stiamo avvicinando ai *tubi catodici* in uso per le TV).



(14) *Wiedemann's Annalen*, 19, pp. 782-816, 1883.

(15) *On the Finite Velocity of Propagation of Electromagnetic Action*, *Wiedemann's Annalen*, 34, 1888, p. 551.

On Electromagnetic Waves in Air and Their Reflection, *Wiedemann's Annalen*, 34, 1888, p. 610.

On Electric Radiation, *Wiedemann's Annalen*, 36, 1889, p. 769.

(16) *The Forces of Electric Oscillations, Treated According to Maxwell's Theory*, *Wiedemann's Annalen*, 36, 1889, p. 1.

On the Fundamental Equations of Electrodynamics for Bodies at Rest, *Wiedemann's Annalen*, 40, 1890, p. 577.

On the Fundamental Equations of Electrodynamics for Moving Bodies, *Wiedemann's Annalen*, 41, 1890, p. 369.

(17) L'effetto si presentava ad Hertz che cercava di sbarazzarsi di un disturbo sperimentale nei lavori che conduceva e che necessitavano di buio. Delle forti scintille che si generavano nel suo spinterometro illuminavano troppo il laboratorio. Egli cercò di oscurarle con uno schermo metallico. Successivamente Hertz si accorse che quel metallo si era elettrizzato. Lo descrisse in *Sull'effetto della luce ultravioletta sulla scarica elettrica*, *Wiedemann Annalen* 31, 1887, pag. 982.

(18) *Berl. Ber.*, p. 487, 1887.

Ann. der Phys., 31, p. 983, 1887.

Il fenomeno della doppia scarica, nella spiegazione di Hertz, suscitò molto interesse perché l'anno successivo anche Hallwachs se ne occupò (*Ann. der Phys*, 33, p. 30, 1888). Nel 1889 fu la volta di Rutherford (*Proc. Camb. Phil. Soc.*, 9, p. 401, 1889) e nel 1894 di J.J. Thomson (*Phil. Mag.*, 38, p. 358, 1894).

(19) *Ann. der Phys.* 51, 225 (1894) e *Ann. der Phys.* 52, 23, 1894.

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) Max Born - *Atomic Physics* - Blackie & Son, London 1962

(6) Max Born - *La sintesi einsteiniana* - Boringhieri 1969

(7) Guido Tagliaferri - *Storia della fisica quantistica* - Franco Angeli 1985

(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) John L. Heilbron - *I dilemmi di Max Planck* - Bollati Boringhieri 1988

(11) Piero Caldirola - *Lezioni di fisica teorica* - Viscontea, Milano, dopo 1950

(12) Samuel Tolansky - *Introduzione alla fisica atomica* - Boringhieri 1966

(13) Donald S.L. Cardwell - *Tecnologia, scienza e storia* - Il Mulino 1976

(14) A. Baracca, S. Ruffo, A. Russo - *Scienza e industria 1848 - 1915* - Laterza 1979

(15) Enrico Persico - *Gli atomi e la loro energia* - Zanichelli 1970

(16) Jean Perrin - *Les atomes* - Gallimard 1970

- (17) René Taton - *Causalités et accidents de la découverte scientifique* - Masson et Cie., 1967
- (18) Giorgio Cosmacini - *Röntgen* - Rizzoli 1984
- (19) Maurice de Broglie - *Atomes, radioactivité, transmutations* - Flammarion 1939
- (20) David L. Anderson - *The Discovery of the Electron* - D. van Nostrand Company 1964
- (21) William Bragg - *Il mondo della luce* - Tumminelli & C. 1935
- (22) Samuel Glasstone - *Sourcebook of Atomic Energy* - D. van Nostrand 1950
- (23) Graham Farmelo - *La scoperta dei raggi X* - Le Scienze 329, gennaio 1996
- (24) L. Pearce Williams - *Michael Faraday* - Chapman & Hall Limited 1965
- (25) Michael Faraday - *Experimental Researches in Electricity* - Encyclopedia Britannica 1952
- (26) Giuseppe Bruzzaniti - *Dal segno al nucleo* - Bollati Boringhieri 1993
-

[Torna alla pagina principale](#)

