**ALCUNE OSSERVAZIONI CRITICHE ED ESPERIENZE NUOVE
RELATIVE AI FONDAMENTI DELLA SPETTROSCOPIA CELESTE,**

del Dott. LUIGI PUCCIANTI.

Questo scritto, che è di fisica generale ¹⁾ e niente affatto di astronomia, ha principalmente il fine di far conoscere quanto di discusso, di cambiato e di nuovo vi sia nelle cognizioni generali su cui lo spettroscopista deve ora fondare l'interpretazione degli spettri solari e stellari, e di persuadere il lettore come su tal punto, dopo tanto lavoro sperimentale, vi sia ancora grande bisogno di nuove esperienze dirette secondo i concetti nuovi.

Chi scrive si è da qualche tempo dedicato a tal genere di esperienze, alcune delle quali sono già state descritte in tre note precedenti ²⁾, e le altre saranno riferite in questo lavoro e in altri che egli spera di fargli seguire.

I fondamenti della spettroscopia celeste consistono nella conoscenza :

- 1.^o *delle condizioni e proprietà dell'emissione dei gas,*
- 2.^o *delle modificazioni della luce che traversa i gas,*
- 3.^o *delle relazioni che passano tra questi due ordini di fenomeni.*

Sopra la emissione dei gas vi è una letteratura vastissima che io dovrei esporre in gran parte, se non fossero due larghe trattazioni riassuntive che me ne dispensano: il rapporto per il congresso di Parigi del 1900 di E. Pringsheim ³⁾ e le parti

1) È tolto per la maggior parte dalla tesi da me presentata alla commissione esaminatrice per la libera docenza in fisica.

2) *Metodo interferenziale per lo studio della dispersione anomala nei vapori.* Memorie degli Spettroscopisti italiani, vol. 33, p. 133, 1904.

Sulla fluorescenza del vapore di sodio. Rendiconti dei Lincei, vol. 13, (s. 5.) p. 433. — N. Cimento (s. 5.) vol. 8, pag. 427, 1904.

Spettri d'incandescenza dell'iodio e del bromo. Rend. dei Lincei, vol. 14, (s. 5.) p. 84, 1905.

3) Cong. Int. de Physique, vol. 2, p. 100 e seg.

che riguardano questo argomento nell' *Handbuch der Spectroscopie* di Kayser ¹⁾).

Questa seconda trattazione completa, ordinata, pregevolissima per critica e dottrina profonda, possiede anche un' assoluta obiettività senza preconcetti che forse fa difetto all'altra.

Per quel che riguarda la emissione dei gas, il dare un cenno storico, dopo l'opera del Kayser, ho giudicato fosse lavoro tanto facile, quanto inutile, e rimando il lettore, senz'altro ad essa.

Supponendo dunque nota la letteratura, cercherò di discutere e riassumere i punti più salienti della questione: se e come i gas emettono radiazioni di temperatura, e mi sforzerò di separare, per quanto è possibile, il certo dall'incerto, ritornando sopra alcune conclusioni del Pringsheim.

È molto interessante in sè e intimamente connessa con questa quistione l'analisi del concetto di temperatura per le fiamme e in generale pei miscugli di gas, che reagiscono chimicamente tra loro; e merita trattenervisi alquanto, specialmente perchè, mi pare, non sono state prese in giusta considerazione le osservazioni molto acute di A. Smithells ²⁾ su questo punto.

Questo stesso modo di vedere fu trasferito alla teoria degli ioni da Stark, e da lui ultimamente applicata alla luminosità elettrica dei gas.

Quanto alle modificazioni della luce che traversa i gas (o se si vuole, alle loro proprietà ottiche) e alla relazione tra esse e l'emissione, vi è da tener conto di molti fatti e concetti nuovi ³⁾ che attirano vivamente l'attenzione dello studioso, promettendo da un lato cognizioni profonde e sintetiche, minacciando dall'altro di capovolgere alcuni principii ritenuti stabili per molto tempo.

Certo è che non ci possiamo limitare allo studio dell'emissione e dell'assorbimento, perchè anche la *dispersione anomala* in vicinanza delle righe e i fenomeni che si presentano

1) H. Kayser. *Handbuch der Spectroscopie*. Leipzig.

2) Phil. Mag. vol. 37, p. 245, 1894.

3) R. Wood. Phil. Mag.; vol. 3, p. 128, 1902; p. 359, 1902; p. 396, 1902; vol. 4, p. 425, 1902.

come di *fluorescenza* devono esser presi pure in considerazione dallo spettroscopista.

Anzi in questi ultimi anni W. H. Julius, seguito da altri fisici, propugna alcune geniali e ardite teorie, che modificherebbero profondamente tutte le idee comunemente accettate sulla costituzione del sole, facendo della dispersione anomala il nuovo fondamento della spettroscopia celeste.

Sarebbe del tutto alieno dall'indole della presente monografia l'addentrarsi nel campo estesissimo delle ipotesi, poichè si tratta di assegnare fondamenti a indagini sperimentali, e tali fondamenti non possono essere *ipotetici*, ma devono essere *positivi*.

Solo è indispensabile qualche considerazione fondamentale sulla teoria degli ioni e qualche schiarimento sulla risonanza.

Del resto me ne starò il più possibile alle esperienze.

I. — Sulla legge di Kirchhoff.

1. Da essa deve cominciare ogni trattazione di spettroscopia, sebbene, come mostreremo in questo studio, non le spetti più l'importanza che le si attribuiva in passato.

Per essa :

Quando non intervengano altre forme di energia che la termica e la raggiante, vale tra il potere assorbente A di un corpo, il suo potere emissivo E, il potere emissivo del corpo assolutamente nero ϵ , la relazione

$$E = A \epsilon$$

per ciascuna lunghezza d'onda λ , a ciascuna temperatura Θ (scala assoluta).

E, A, ϵ sono tutte e tre funzioni di λ e di Θ .

Ora la funzione $\epsilon(\lambda, \Theta)$ rappresenta una delle più importanti leggi della natura, e quindi il suo studio è stato oggetto di moltissime ricerche teoriche e sperimentali, le quali se non sono riuscite ancora a precisarla in modo assoluto, si può dire che a ciò si siano molto avvicinate ¹⁾.

1) Cfr. O. Lummer. Rapp. Congrès. Int. d. Physique. Paris 1900.

$A(\lambda, \Theta)$ invece è essenzialmente connessa colla natura del corpo, ed è da notarsi che per essa ha in molti casi maggior peso la dipendenza da λ che quella da Θ . In altre parole si hanno per diverse temperature $\Theta_1, \Theta_2 \dots \Theta_n$ delle funzioni di λ

$$A_1(\lambda), A_2(\lambda) \dots A_n(\lambda)$$

che in molti casi sono quasi identiche tra loro ¹⁾.

2. La dimostrazione di Kirchhoff è assai complicata e, se si vuole, un po' artificiosa, ma sarebbe, io credo, assai difficile darne una più semplice e ugualmente rigorosa. Qui voglio notare che quella, semplicissima, data dal Pringsheim ²⁾ manca di ogni rigore matematico.

Per dimostrare la prima parte che è come il lemma della legge di Kirchhoff che cioè :

In ogni spazio chiuso da un invoglio impenetrabile al calore che si trovi a temperatura costante, la radiazione è indipendente dalla forma di questo spazio chiuso, e dalla natura dei corpi che vi sono contenuti, ma dipende solo dalla temperatura, il Pringsheim procede nel modo seguente :

Considera uno stesso corpo avente la temperatura Θ che venga portato successivamente in diversi di tali spazi chiusi, i quali si trovino pure tutti alla temperatura Θ , ed eguagliando (pel principio di Carnot) l'energia da esso assorbita con quella emessa in ciascuno, ne inferisce l'uguaglianza delle quantità d'energia ricevute dal corpo nei diversi spazi chiusi.

Cioè indicando con A il potere assorbente del corpo, e con $\epsilon_1 d\lambda, \epsilon_2 d\lambda, \dots \epsilon_n d\lambda$ l'energia incidente su di esso per unità di superficie in ciascuno degli spazi chiusi, nell'intervallo spettrale da λ a $\lambda + d\lambda$, ottiene :

$$\int_0^{\infty} A \epsilon_1 d\lambda = \int_0^{\infty} A \epsilon_2 d\lambda = \dots \int_0^{\infty} A \epsilon_n d\lambda.$$

Ora egli osserva che la scelta del corpo è in nostro arbitrio, e quindi (secondo lui) A è funzione arbitraria di λ , e con-

1) Ordinariamente si ammette che le variazioni di A con Θ sieno indizio di alterazioni nella intima costituzione della materia.

2) Pringsheim, l. c. pag. 101 e seg.

seguentemente, applicando un noto teorema di calcolo, da questa relazione tra gli integrali deduce senz'altro:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \dots = \varepsilon_n.$$

Ma non è esatto che $A(\lambda)$ sia una funzione arbitraria, poichè potremo bensì scegliere il corpo, ma non fabbricarlo in modo che $A(\lambda)$ abbia una forma preventivamente assegnata. Ora per la dimostrazione, e quindi per l'applicazione del teorema, è necessario ammettere che $A(\lambda)$ si possa rendere piccola ad arbitrio dappertutto, salvo che in un tratto piccolo ad arbitrio nell'intorno di un punto pure arbitrario. E ciò equivarrebbe a dire che esistesse un corpo il quale presentasse una sola riga nel suo spettro, e che si potesse, variando in modo conveniente il corpo, far percorrere alla riga tutto lo spettro visibile e invisibile; ma tali corpi non si conoscono.

Per dimostrare la seconda parte, considerando un corpo dato qualunque avente il potere emissivo E in uno di questi ambienti, scritta la relazione:

$$\int_0^{\infty} E d\lambda = \int_0^{\infty} A \varepsilon d\lambda$$

il Pringsheim ne deduce subito

$$E = A \varepsilon$$

dicendo che E ed A sono funzioni di λ *tout à fait quelconques*.

Ma che vuol dir ciò?

Qui poi non vi è niente in nostro arbitrio; perchè A ed E devono considerarsi come funzioni assegnate, e non da scegliersi convenientemente, perchè esse si riferiscono al corpo per cui vogliamo fare la dimostrazione, e quindi l'essere questo corpo qualunque, costituisce una difficoltà di più e non un elemento di dimostrazione.

Non si può con tali argomenti passare dalla eguaglianza degli integrali a quella delle quantità sotto il segno, ma bisogna per far ciò introdurre nella dimostrazione altri elementi; e questo faceva il Kirchhoff fondandosi sopra proprietà delle

radiazioni che discendono dalla loro natura ondulatoria; mentre nella dimostrazione del Pringsheim non è introdotta in effetto l'ipotesi che si tratti di ondulazioni, e λ potrebbe indicare un parametro qualunque invece che la lunghezza d'onda.

Voglio credere che il Pringsheim stesso non abbia preteso di dare una dimostrazione rigorosa; ma allora non ne capisco l'utilità, anzi mi pare che essa sia atta a generare confusione nel lettore.

3. Della legge di Kirchhoff non abbiamo nessuna verifica-zione sperimentale esauriente, ma solo delle esperienze incomplete.

Le molteplici *inversioni* dello spettro che si sono riguar-date in passato come la miglior prova sperimentale della legge di Kirchhoff, non possono essere altrimenti considerate come tali, poichè, come discuterò ampiamente in seguito, si possono avere indipendentemente da essa.

Vedremo allora che l'inversione dello spettro è da considerare come un fatto generale, e da spiegare col principio di risonanza, qualunque sia la specie dell'energia che si cambia in energia raggiante e viceversa. Esso è conseguenza della legge di Kirchhoff soltanto nel caso che questa energia sia termica, ossia si tratti di *radiazioni di temperatura*.

Per distinguere questo caso dagli altri prenderemo in esame i vari metodi ordinari usati per portare all'emissione i gas, affine di appurare, fin dove è possibile, quale parte abbia in essi la temperatura.

Qui voglio esaminare se e come si possa ottenere dai gas con mezzi speciali e opportuni una emissione dovuta esclusivamente alla temperatura.

II. — Emissione di temperatura dei gas.

1. Giova osservare che è quasi impossibile, per la maggior parte dei corpi gassosi, portarli ad un'altissima temperatura in condizioni tali, da escludere con certezza l'intervento di azioni chimiche o elettriche ecc., e affermare che la sola energia cambiantesi colla raggiante sia la termica; che certo per far ciò non bisogna ricorrere nè a fiamme nè a scintille

elettriche e simili, perchè con tali mezzi l'energia termica stessa è prodotta in seno al corpo da quella elettrica o chimica, ed è quindi sempre possibile e ragionevole pensare, anche quando ciò non si possa provare con certezza, che una parte almeno dell'energia raggiante provenga direttamente, senza l'intermediario della termica, da quelle stesse fonti.

Soltanto con gas contenuti in un recipiente e riscaldati dall'esterno, possiamo cercare di riprodurre le condizioni della legge di Kirchhoff; e in alcuni casi tutto fa credere che ci si riesca effettivamente.

2. In questo indirizzo di studiare le proprietà spettrali di gas riscaldati in recipienti dall'esterno, le esperienze più notevoli sono quelle del Pringsheim ¹⁾ e del Paschen ²⁾.

Il Pringsheim operava mediante una canna di porcellana posta in un fornello a gas, cercando di realizzare nell'interno di essa, ora il riscaldamento di vapori metallici in unione colla reazione chimica, ora il riscaldamento semplice. Egli ottenne sempre l'emissione o l'assorbimento delle righe, ma veramente assai più forte nei casi in cui l'azione chimica era più manifesta; e concluse che a questa sola fosse dovuto lo spettro a righe sia di emissione, sia di assorbimento, (perchè se si ammette che l'assorbimento sia termico, ossia l'energia assorbita si trasformi tutta in calore, si dovrebbe avere anche l'emissione di temperatura).

Effettivamente le conclusioni del Pringsheim sono parse a quelli scienziati che hanno trattato l'argomento dopo di lui affrettate e non pienamente giustificate dall'esperienza. Egli nel fatto non ci presenta un caso netto in cui si abbia vapore metallico semplicemente riscaldato, e non si veda la riga caratteristica che esso mostra alla stessa temperatura quando la reazione ha luogo.

Si tratta di righe che si indeboliscono bruscamente e molto quando si interrompe l'azione di riduzione che produce il vapore metallico. E resta sempre nel lettore il dubbio, che la

1) E. Pringsheim. Wied. Ann. vol. 45, p. 428, 1892; vol. 49, p. 347, 1893; vol. 51, p. 441, 1894.

2) F. Paschen. Wied. Ann. vol. 50, p. 409, 1893; vol. 51, p. 1, 1894; vol. 51, p. 40, 1894; vol. 52, p. 209, 1894.

vera causa non risieda nella cessazione del processo chimico in se stessa, ma nella diminuzione di densità del vapore metallico che ne consegue.

Il Pringsheim insiste molto sul fatto che la diminuzione (non mai scomparsa assoluta) avviene *bruscamente*, e non *gradualmente*, come se dovuta alla distillazione del vapore metallico verso la parte più fredda della canna. Ma confesso che questa distinzione fra *brusco* e *graduale* non mi pare abbia carattere abbastanza scientifico, per posarvi sopra una conclusione importante.

Le obiezioni di Bury ¹⁾, che attribuisce l'indebolimento delle righe a riossidazione del vapore, non sono prive di fondamento, perchè la presenza di un'azione ossidante dovuta a tracce di ossigeno, in piccola scala, anche in ambiente riduttore, non è assurda, come non lo è la presenza in piccola scala di un'azione riducente in ambienti in cui prevalga l'azione ossidante (come p. es. ben mostra lo stesso Pringsheim la riduzione dei sali di sodio e litio ecc. nella fiamma non luminosa del becco Bunsen).

Non sodisfa nemmeno pienamente la spiegazione che il Pringsheim dà delle righe che restano in alcuni casi assai intense. Invero nessuno potrà escludere in quelle condizioni la presenza, almeno in piccolo grado, di reazioni chimiche anche arrestata la principale, ma il Pringsheim vuole specificare troppo, e immagina reazioni chimiche come la seguente: Sodio in vapore reagisce con silicato di sodio, producendo dell'altro sodio in vapore (di quello del silicato) e dell'altro silicato.

Ora l'immaginare un tale scambio come causa della riga spettrale mi sembra un far forza al buon senso. È, come osserva argutamente A. Smithells,) « Un rubare a Paolo per pagare Pietro, piuttosto che la descrizione di un equilibrio chimico ».

Del resto in tutti i casi in cui il cambiamento chimico avvenga contemporaneamente nei due sensi in quantità uguali

1) Bury. Wied. Ann. vol. 52, pag. 205, 1894.

2) A. Smithells, l. c.

in modo da dar luogo a equilibrio, come per il caso di parziali scissioni di anidride carbonica, di vapori di iodio ecc. ... non vi è ragione di considerare la possibilità che la energia raggiante provenga dalla chimica, facendo un caso di eccezione alla legge di Kirchhoff; perchè a rigore la quantità complessiva di energia chimica che si trasforma è zero, e quindi le sole forme di energia presenti in modo da trasformarsi l'una nell'altra, sono la termica e la raggiante.

Solo bisognerebbe, se mai in questo caso, come pure faremo per le fiamme, discutere il concetto di temperatura.

Insomma il Pringsheim non dà prove certe della sua tesi, e conclude per la impossibilità di radiazioni pure di temperatura, solo perchè in alcuni casi la reazione è connessa colla presenza delle righe forti, e perchè egli non ha potuto realizzare un caso in cui non si possa, con un po' di buona volontà, invocare una reazione chimica per ispiegare la presenza delle righe.

Ma francamente, a me, come già al Paschen, sembra più probabile che in alcuni casi si trattasse di radiazioni di temperatura, ma sarebbe difficile darne una prova.

Con questa critica non voglio minimamente togliere al Pringsheim il merito di aver proposto e discusso con molto ingegno quistioni di grande interesse, e di avere coi suoi lavori, forse meglio di ogni altro, messo in guardia gli spettroscopisti contro applicazioni della legge di Kirchhoff abusive o non rigorose.

3. Al Paschen d'altra parte spetta il merito grande di avere per il primo messo in evidenza e fuori di dubbio dei casi di radiazione pura di temperatura data da corpi gassosi nella regione ultrarossa, descrivendo bolometricamente l'emissione dell'anidride carbonica e del vapor d'acqua, il loro assorbimento, le inversioni, le relazioni coll'emissione del nero fumo ecc. in una serie di ricerche delicatissime, nelle quali non saprei se sia maggiore la perfezione della tecnica sperimentale o l'interesse della materia.

Dopo lunga disputa fra il Pringsheim ed il Paschen, il primo pare abbia riconosciuto che veramente le radiazioni studiate dal Paschen fossero di temperatura; ma esse danno

spettri di bande, che non si sa dicerto se sieno risolvibili in righe. Ora il Pringsheim fa una grande distinzione fra tali spettri e quelli di righe, per i quali sostiene ancora nel suo *rapporto* al Congresso di Parigi la sola origine di luminescenza.

Voglio notare che quanto alla emissione del vapore d'acqua e dell'anidride carbonica nelle fiamme, dovremo tornare sulla questione, ma quanto alla emissione di questi gas riscaldati dall'esterno, la questione si può dire chiusa, risultandone la *possibilità dell'emissione di uno spettro a bande per temperatura*.

E per lo spettro visibile questa conclusione mi pare definitivamente messa al sicuro dalle ricerche del Konen e dalle mie ¹⁾ sugli spettri di incandescenza dell'iodio e del bromo ²⁾.

Ma con queste esperienze il problema dell'emissione di temperatura è ancora lontano dalla risoluzione. Perchè la parte più importante e più difficile della questione, cioè quella degli spettri di righe, non è risolta; e giova ripetere che se alcuni fisici hanno creduto di poterla risolvere in un senso, altri in un altro, volendo stare sul sicuro, bisogna dire *non esser certo che si possano avere spettri di righe per semplice effetto della temperatura, mentre che si possono con tal mezzo ottenere spettri di bande*.

4. La questione era a tal punto, quando è comparso recentemente un lavoro che se non la risolve, almeno le porta certo un contributo maggiore dei precedenti.

Nasini e Anderlini ³⁾ hanno riscaldato, a una temperatura elevatissima, in un tubo di carbone reso incandescente dalla corrente elettrica, aria con polvere di magnesio che era destinato a toglierle l'ossigeno; sicchè rimaneva l'azoto, mescolato però con una quantità piuttosto rilevante di vapore di magnesio e di altri metalli.

1) Io operavo con palloncini di quarzo fuso, materiale che a caldo è permeabile a parecchi gas il che potrebbe far pensare che qualche reazione chimica potesse effettuarsi nell'interno per penetrazione dei gas della fiamma; ma invero ciò mi pare impossibile trattandosi di bromo e iodio.

2) Vedi pag. 393, nota 2.

3) Rendiconti dei Lincei, vol. 13, p. 59, 1904.

Lo spettro, osservato con un mediocre strumento, mostrò parecchie righe, tra le quali tre presentano una coincidenza assai buona (relativamente allo strumento usato) con tre righe dell'azoto, quale si può produrre mediante le scariche elettriche. Gli autori della nota sostengono, e con ragione, che in questo caso l'invocare la luminescenza chimica od elettrica non sarebbe ragionevole; ma il punto della questione, a mio parere, più difficile, è se l'attribuzione delle righe all'azoto sia veramente sicura. Per due di esse si potrebbe trovare una coincidenza egualmente buona con righe del ferro, di cui, secondo gli autori, sono presenti già alcune righe.

Il dubitare di una coincidenza non è del resto, come potrebbe parere ad un inesperto di cose spettroscopiche, un imputare di poca accuratezza le misure, perchè spesso è necessario l'uso di spettroscopi estremamente potenti, per fare scomparire delle apparenti coincidenze, come quelle per esempio, su cui il Lockyer fondò la sua teoria delle *righe basiche*.

Prima di chiudere questo capitolo, voglio avvertire che avrei dovuto registrare qui una bella esperienza di Liveing e Dewar, in cui l'emissione era prodotta dai vapori metallici entro un tubo di carbone riscaldato elettricamente dall'esterno; ma preferisco lasciarla in compagnia di altre cui è naturalmente connessa, per parlarne nel capitolo sulla inversione dello spettro. Dirò soltanto che in queste esperienze in tubi di carbone per i vapori metallici, a differenza che per l'azoto, si potrebbe sempre pensare ad una reazione di riduzione come origine di luminescenza.

III. — Emissione delle fiamme.

1. Uno dei modi più semplici di studiare l'emissione dei corpi allo stato di vapore è quello di osservarli in seno alle fiamme, e comunemente in seno alla fiamma del becco Bunsen. In questo caso l'energia termica è fornita dall'energia chimica in seno al gas stesso emittente, e non vi è quindi ragione per ritenere *a priori* che sia soddisfatta la condizione della legge di Kirchhoff; e si presenta la quistione, se e quando l'emissione dipenda esclusivamente dall'alta temperatura, e

quando invece possa essere un' effetto diretto dell' azione chimica.

Che le azioni chimiche possano dar luogo a luce senza sviluppo di calore, o almeno di alta temperatura, è cosa notissima, e basta citare l' esempio del fosforo. Sono pure notissimi i fenomeni di luminescenza presentati da alcuni esseri viventi, specialmente da alcuni insetti, che hanno dato argomento a studi interessantissimi di Langley e Very; e tutti questi fenomeni sul cui meccanismo non si sa niente, mostrano che le cause da cui può esser prodotta la luce, oltre il riscaldamento, sono assai svariate.

Ora appunto niente ci induce a ritenere che in una fiamma in cui avvengono fenomeni chimici notevolissimi ed elettrici, la causa dell' emissione risieda nel solo riscaldamento.

Soltanto l' esperienza può dirci qualcosa su questo punto.

In oltre, la presenza delle reazioni chimiche porta alla necessità di modificare alquanto l' ordinario concetto di temperatura; tale modificazione fu proposta da A. Smithells nel secondo dei suoi belli studi sull' emissione delle fiamme ¹⁾. Ma già concetti simili erano stati accennati dai due più insigni spettroscopisti inglesi ²⁾. Io qui svolgerò questi concetti con linguaggio un po' più rigoroso, per non dar luogo ad obiezioni fondate più sulle parole che sui fatti.

2. *Concetto di temperatura nelle fiamme.* — Temperatura di un corpo è la sua forza viva molecolare media, concetto che non si può rendere intuitivo altro che nel caso dei gas, secondo l' ipotesi cinetica.

In un gas in cui non avvengano reazioni chimiche, la legge di Maxwell rappresenta il caso più probabile della distribuzione delle forze vive molecolari, cioè il caso a cui ci si approssima indefinitamente appena il gas sia abbandonato a se stesso.

Ma se avvengono reazioni chimiche, è facile persuadersi che la distribuzione maxwelliana non è più possibile perchè

1) A. Smithells, l. c. — J. Stark. Ann. d. Phys. vol. 14, p. 506, 1904 è giunto, pare indipendentemente, alle stesse conclusioni per miscugli di molecole neutre ed ioni di varie specie sottoposti al campo elettrico.

2) Liveing e Dewar. Proc. Roy. Soc. vol. 44, p. 241, 1888.

le molecole prodotte dalla reazione e quelle che la alimentano hanno forze vive che si aggruppano intorno a due medie diverse.

Per mostrare più particolarmente quale concetto ci si deve formare della distribuzione delle forze vive molecolari in una fiamma, prendiamo un caso semplice, p. es. idrogeno che bruci in seno all'ossigeno. L'idrogeno arriva in presenza dell'ossigeno, ma ciò non basta perchè cominci la reazione: abbisogna per questo una certa temperatura Θ_1 (temperatura di accensione) raggiunta la quale, e ammettiamo per i due gas insieme, nel cono più interno della fiamma (a cui il calore è comunicato in un modo qualunque dapprima, e poi fornito dal processo stesso di combustione) si cominciano a formare delle molecole di vapore d'acqua secondo la formula:

e queste posseggono, oltre all'energia cinetica che era in quelle d'idrogeno e d'ossigeno, ancora quella proveniente dalla trasformazione dell'energia chimica, il quale ammontare di energia è ben conosciuto in base alle esperienze termochimiche.

Se quindi reagissero solo O_2 e H_2 in quantità equivalenti, e se le molecole di acqua formate non andassero soggette a parziale riscomposizione, e se mantenessero inalterata dopo la reazione la energia cinetica acquistata, esse avrebbero una forza viva molecolare media corrispondente alla temperatura

$$\Theta_2 = \Theta_1 + \frac{\text{calore di combustione } ^1)}{\text{calore specifico di } \text{H}_2\text{O}}$$

che si può anche calcolare approssimativamente, ed è secondo lo Smithells 6.655°. E bisogna ammettere che nei primi istanti dopo la trasformazione, la forza viva molecolare corrispondente sia veramente posseduta dalle molecole di vapor d'acqua.

Ma tosto intervengono due fatti:

1° Le molecole formate cedono in parte la loro energia cinetica a quelle O_2 e H_2 che sopraggiungono, e altra ne per-

1) Riferito all'unità di massa di H_2O .

dono per altre vie, acquistando così forze vive corrispondenti a temperature sempre più basse;

2° Siccome la temperatura Θ_2 è superiore a quella a cui comincia la decomposizione del vapore d'acqua, così avviene che le molecole appena formate si decompongono in parte dando di nuovo molecole H_2 e O_2 con una diminuzione di energia cinetica corrispondente al calore assorbito nella reazione di scomposizione; cioè la loro forza viva media riprenderà all'incirca il valore corrispondente a Θ_1 .

Avremo insomma nella regione della fiamma dove la reazione è più viva, due condizioni di molecole:

l'una è quella sia delle molecole che non hanno ancora reagito, sia di quelle che provengono dalla scomposizione e che sono anch'esse pronte per reagire di nuovo; l'altra è quella delle molecole che si sono formate dalla reazione da pochissimo tempo.

La forza viva media di queste ultime sarà superiore a quella delle prime, e queste forze vive medie corrisponderanno approssimativamente alle due temperature Θ_1 e Θ_2 . Ma poi avremo ancora delle forze vive intermedie corrispondenti a molecole H_2 O che hanno perduto una parte della loro forza viva.

Infine, procedendo dal cono interno all'esterno e dalla parte inferiore o media alla superiore della fiamma, troveremo che le molecole H_2 scarseggiano sempre di più e quelle H_2 O avranno forze vive medie sempre più basse, finchè al di fuori della fiamma il prodotto di essa, in cui non avviene più alcuna reazione chimica, sarà costituito di molecole con distribuzione maxwelliana e con una temperatura non superiore a quella a cui si inizia la scomposizione pel vapor d'acqua.

La presenza dell'ossigeno in eccesso e dell'azoto, nel caso che la combustione avvenga nell'aria, non altera sostanzialmente il fenomeno: essi forniranno delle molecole la cui forza viva crescerà attraversando la fiamma per confondersi finalmente con quella che si ha nei prodotti della combustione.

Se per fissare le idee, consideriamo il caso di una fiamma con una sola reazione come la presente, la temperatura vera

nella regione di reazione più viva sarà data da

$$\Theta = \frac{K \left(\frac{\sum_{n_1}^{n_1} m_1 v_1^2}{2} + \frac{\sum_{n_2}^{n_2} m_2 v_2^2}{2} \right)}{n_1 + n_2}$$

ove m_1 e m_2 rappresentano le masse e v_1 e v_2 le velocità delle molecole dei corpi reagenti rispettivamente e dei prodotti della reazione in numero rispettivamente di n_1 e n_2 , K essendo un coefficiente che dipende dalle unità di misura.

Ma potremo astrattamente considerare ancora le due altre temperature

$$\Theta_1 = K \frac{\sum_{n_1}^{n_1} m_1 v_1^2}{2 n_1}$$

$$\Theta_2 = K \frac{\sum_{n_2}^{n_2} m_2 v_2^2}{2 n_2}$$

Le quali a tutto rigore non saranno temperature realmente sussistenti, ma corrisponderanno alle forze vive medie dei corpi reagenti e dei prodotti della reazione, e Θ_2 sarà molto più elevata di Θ_1 e rappresenterà il più alto valore che la forza viva media dei prodotti raggiunge nella fiamma.

3. Se ora noi immaginiamo per un momento che i prodotti della combustione si possano da soli col riscaldamento dall'esterno portare alla temperatura Θ_2 , e che essi siano capaci di una emissione di temperatura, è ragionevole pensare che essi emetterebbero in tali condizioni come emettono nella fiamma, e che alla temperatura Θ invece emetterebbero molto meno, e che anzi l'emissione potrebbe a questa temperatura non essere sensibile.

Ora, seguendo quest'ordine di idee, si giunge alla conclusione che si possono ripetere sulla temperatura Θ_2 le solite considerazioni termodinamiche, e dedurne, anche in questo caso, la legge di Kirchhoff con tutte le sue conseguenze.

Questo concetto che io dirò delle *temperature parziali*, proposto dallo Smithells, non è seguito dal Pringsheim, forse perchè la forma in cui fu da prima proposto, lasciava a desiderare dal punto di vista dell'esattezza del linguaggio

scientifico: perchè si parlava direttamente della temperatura delle molecole dell' una e dell' altra specie, come se queste temperature sussistessero effettivamente e nel senso ordinario della parola.

Ma mi pare di aver mostrato che si può facilmente liberare questa teoria da tale inesattezza di linguaggio, giungendo alle stesse conclusioni. E si può dire che una fiamma va considerata come un miscuglio di gas a temperatura diversa, facendo però la riserva che in tale locuzione si dà alla parola *temperatura* un significato diverso dall'ordinario, e relativo ai concetti svolti sopra.

E qui voglio notare che, se veramente l'emissione dei prodotti della fiamma fosse di temperatura, si potrebbe colla misura quantitativa di questa emissione, confrontata coll'emissione del corpo nero, dare un fondamento sperimentale a questa estensione del concetto di temperatura.

E non si tratterebbe di un procedimento del tutto nuovo in questo ordine di ricerche, perchè i concetti attinenti alla temperatura si sono venuti recentemente perfezionando nello studio dei loro rapporti coll'energia raggiante. Di modo che il progresso della conoscenza sulla legge della radiazione e la realizzazione del corpo nero, fanno pensare che questo possa fornire un mezzo di misura della temperatura assoluta capace di rivaleggiare col termometro a gas, presentando su questo il vantaggio di essere rigorosamente libero dalla influenza della materia termometrica. E veramente le considerazioni del Wien sulla *temperatura* e sull'*entropia* delle radiazioni, che hanno il loro germe in una classica ricerca del Bartoli, hanno dato a questi concetti, ormai familiari, un carattere di maggiore esattezza, liberandoli dalla connessione strettissima che avevano colla materia ponderale.

4. Ma, tornando alla questione che ci occupa, dirò che la teoria dello Smithells basterebbe da sola a spiegare i fatti che hanno spinto a ritenere come luminescenza chimica la luce delle fiamme completamente gassose, cioè che :

a) Si osserva soltanto lo spettro dei prodotti della combustione e non quello dei corpi che l'alimentano.

Per esempio nel becco Bunsen, si osserva col bolometro l'emissione dell'anidride carbonica e del vapor d'acqua, e non quella del metano che pure ha un'assorbimento forte nell'ultrarosso (Julius, Angström, Paschen).

b) Un miscuglio di aria, di anidride carbonica e vapor d'acqua a una temperatura all'incirca uguale a quella della fiamma del becco Bunsen e con spessore di 1,5 m. non dà emissione sensibile di radiazioni visibili secondo Siemens.

Basta ammettere che sia necessaria una temperatura elevatissima perchè l'emissione sia sensibile, e questa non possa esser raggiunta che come temperatura Θ , della fiamma.

In questo concetto *la radiazione è di temperatura; ma la temperatura è intesa diversamente dal solito.*

5. Si può invece dare l'altra spiegazione (più semplice ma che spiega meno) che cioè nella reazione che avviene nella fiamma vi sia sviluppo di luce, ossia che si abbia una vera e propria *luminescenza chimica*.

Le due interpretazioni in pratica si differenziano perchè la prima porterebbe ancora, in un certo senso, alla legge di Kirchhoff, la seconda no.

Noi non sappiamo se e quando sia il caso di ritenere giusta l'una o l'altra interpretazione, ma (se mi è lecito esprimere una mia impressione ricevuta dallo studio dei lavori di Paschen) mi pare che per l'emissione ultrarossa del becco Bunsen non vi sia ragione di ricorrere all'ipotesi della luminescenza.

Certo è soltanto questo, che colla sola considerazione della temperatura della fiamma nel senso ordinario della parola, e quale si può misurare colle pinzette termoelettriche e simili, non ci possiamo render ragione dei fatti esposti sopra e tanto meno delle fiamme fredde, ossia aventi una temperatura assai inferiore a quella di incandescenza, e che pure danno luce ¹⁾.

6. *Fiamme contenenti vapori metallici.* — Ma tutto ciò ha un'importanza indiretta, riguardo alla interpretazione degli spettri di fiamme, come essi sono adoperati nella spettroscopia.

Infatti in generale si tratta di osservare le righe di un vapore metallico, di cui solo piccole tracce si trovano diffuse

1) Pringsheim, l. c.

nella fiamma; quindi la questione è assai diversa, e bisogna distinguere prima di tutto i seguenti punti:

a) Sceverare i casi in cui l'emissione sia dovuta al sale stesso, o all'ossido, o al metallo, come fa bene lo Smithells per i sali di rame.

Ora questa distinzione nella maggior parte dei casi si fa agevolmente, tanto più che sappiamo gli spettri di righe essere necessariamente dati da elementi.

b) Ricercare se per la formazione del vapore metallico o per l'emissione intervenga una reazione di riduzione, o semplicemente una dissociazione in conseguenza dell'alta temperatura.

Riguardo a questo punto il Pringsheim sostiene che sia necessaria la riduzione, fondandosi sulla osservazione propria, che cloruro o carbonato di sodio portati a temperatura elevatissima in seno ad anidride carbonica o azoto, non danno le righe D nè per emissione nè per assorbimento, mentre queste righe si presentano vistosissime appena si introduca un gas riducente.

Tra le sue esperienze la meno attaccabile dalla critica è quella con cloruro di sodio in seno all'azoto, alla quale si potrebbe solo, volendo sottilizzare, obiettare che se l'azoto conteneva piccole tracce di ossigeno (il che non è difficile), questo poteva forse impedire la formazione del vapore di sodio dal cloruro per scissione. Ma tutto ciò è poco verosimile, e quindi l'ipotesi che l'azione riduttrice sia necessaria per produrre le righe, riesce molto confortata da questa esperienza.

Essa d'altra parte torna bene coi fatti osservati per le fiamme colorate, tra i quali ricordo i seguenti:

a) Il cono interno delle fiamme presenta le righe dei metalli, più facilmente della parte esterna.

b) Clorurando la fiamma si indeboliscono e si annullano anche le righe dei metalli alcalini date dai rispettivi cloruri.

Certo più difficili a spiegare sono le differenze notevoli che si ottengono a seconda che il metallo sia portato nella fiamma, o introducendovi una perla d'un suo sale fuso, o iniettandovi una soluzione acquosa di un sale, ridotta in minutissime goccioline col polverizzatore di Gouy. Questo secondo

metodo permette di vedere in certe regioni della fiamma alcune *serie* di righe che non si vedono col primo metodo¹⁾; nè credo che a spiegare la differenza basti invocare una maggiore densità del vapore metallico.

Senza trattenermi più a lungo su questo punto di secondaria importanza, concluderò senz'altro:

È molto probabile che la riduzione abbia una parte importante nella produzione delle righe metalliche nelle fiamme, ma non si sa se essa abbia per effetto immediato soltanto di produrre il vapore, o anche di dare la luminescenza.

Nell'ipotesi che il vapore, per esempio, di sodio emetta per temperatura essendo prodotto per riduzione, sorge la questione di sapere quale sia la *temperatura parziale* che gli va attribuita secondo il concetto dello Smithells.

Non ho trovato che questa questione sia stata discussa, e, francamente, mi sembra che non si saprebbe su che cosa fondare i ragionamenti per trattarla.

La emissione della fiamma corrisponderebbe per le righe del metallo (secondo tale ipotesi) ad una emissione di temperatura, ma la temperatura sarebbe del tutto sconosciuta.

Seguendo quest'ordine di idee, si giungerebbe a concludere che la questione della presenza o meno di luminescenza chimica nelle fiamme colorate sarebbe così complicata da disperare di risolverla.

Ma intanto l'esperienza potrebbe far conoscere forse leggi inaspettate.

Si potrebbe confrontare l'intensità delle righe con quella dell'emissione del corpo nero per la stessa lunghezza d'onda a varie temperature, e queste misure sarebbero in ogni modo di grande interesse, ma disgraziatamente mancano quasi affatto; e, per esempio, la conclusione che il Paschen trae da una sua esperienza, che cioè l'emissione del sodio nella fiamma sarebbe più intensa della corrispondente del corpo nero a uguale temperatura²⁾, è dal Kayser rigettata, perchè in essa

1) C. d. Watteville. C. R. de l'Ac. d. Sciences, vol. 135, p. 1329, 1902; vol. 138, p. 346, 1904.

2) Nel comune senso della parola.

il Paschen aveva assegnato alla temperatura della fiamma del becco Bunsen un valore troppo basso.

IV. Eccitazione elettrica.

1. *Arco voltaico*. — Esso ha in spettroscopia un uso vastissimo sotto varie forme.

La più comune è quella dell'arco tra bacchette di carbone, nel quale si introducono in qualche modo i metalli di cui si vogliono ottenere gli spettri.

Sarebbe superfluo fare una descrizione dell'arco e ricordare che in esso la temperatura è troppo elevata perchè si possa conoscere bene.

Molti sperimentatori hanno cercato di determinare la temperatura delle estremità dei carboni dalla loro emissione, e queste determinazioni sono per necessità fondate sopra qualche ipotesi non giustificata (che il carbone sia a quella temperatura simile al corpo nero ecc.) e sopra una forte estrapolazione per la dipendenza della emissione dalla temperatura.

Non è quindi da farsi meraviglia se i diversi sperimentatori, a seconda delle leggi per questa dipendenza di cui si son valse, hanno trovati valori differenti. Così per dare qualche esempio E. Becquerel indicò la temperatura 2070° per il carbone positivo, Rossetti 3900° per il carbone positivo e 3150° per il negativo, Abney e Festing 6000° per il positivo ecc. ...

I progressi delle cognizioni teoriche della legge dell'emissione fanno sì che al presente questa estrapolazione si possa effettuare in modo più razionale e meno arbitrario; e così Lummer ¹⁾ assegna per il cratere positivo i due limiti superiore e inferiore rispettivamente

$$4200 \quad \text{e} \quad 3750$$

della scala assoluta.

Ma vi è una strada del tutto diversa seguita dal Violle ²⁾ per determinare la temperatura del cratere: quella cioè di staccare improvvisamente l'estremo del carbone positivo e

1) Rapp. Cong. Int. de Physique, vol. 2, p. 96, 1900.

2) Journal de Physique, serie 3, vol. 2, p. 545, 1893.

lasciarlo cadere in un calorimetro, determinando così la quantità di calore che esso cede per raffreddarsi fino ad una temperatura nota. Si determina poi la massa del pezzetto distaccato, e, se si conoscesse bene il calore specifico, si potrebbe calcolare la temperatura con tutta sicurezza. Ma ecco che anche qui, in ultima analisi, è necessaria una estrapolazione, e il caso è complicato anche dal fatto che il carbone è uno dei corpi che seguono meno bene la legge di Dulong e Petit.

2. Violle ha studiato molto la questione, e il valore definitivo assegnato da lui ¹⁾ è 3600° dalla fusione del ghiaccio (equivalente a 3873° assoluti), che appunto è compreso tra i limiti assegnati da Lummer.

Si vede dunque che per il cratere positivo la temperatura si conosce con buona approssimazione.

È poi messo fuori di dubbio che essa non dipende dall'intensità della corrente, ma solo dal carbone; è cioè il punto di volatilizzazione o di *ebullizione*; (come dice Violle) sebbene questa espressione non sia molto felice perchè non vi è a quanto pare stato liquido, ma dal solido si passa direttamente al gassoso.

È pure certo che la punta del carbone negativo è di alcune centinaia di gradi meno calda.

Ma quel che più importerebbe conoscere si è la temperatura dell'arco, e su questo appunto bisogna confessare che non sappiamo niente di positivo.

Già Violle, dopo avere osservato che le righe metalliche presenti in esso staccano in chiaro sullo spettro continuo dato dal cratere, avvertiva che ciò non prova niente riguardo alla temperatura, perchè non si sa se queste righe siano effetto di una emissione soggetta alla legge di Kirchhoff. Nè molto profitto egli ricavò dalla introduzione di una sottile verghetta di carbone in seno all'arco; perchè essa fa da carbone positivo rispetto al negativo e da negativo rispetto al positivo, e non da scandaglio di temperatura.

Anche se l'arco è preso tra due verghe metalliche, la bacchettina di carbone presenta lo stesso comportamento, ma

1) C. R. vol. 120, p. 862, 1895.

veramente, nel caso dell'arco tra verghe di zinco, il forte splendore della bacchettina, quando essa è dal consumo ridotta quasi a un filamento, fa pensare che la temperatura del vapore sia elevatissima, più elevata assai del punto di ebullizione dello zinco. Ma su ciò qual parte può avere l'ossidazione del vapore metallico?

Tutto considerato, il Violle conclude ¹⁾ esprimendo l'opinione che l'arco sia più caldo del cratere, e credo che tale opinione sia generalmente accettata, e non solo per archi chiusi a modo di forno elettrico, come erano quelli su cui preferiva di operare il Violle, ma anche per archi all'aria libera.

3. Il Kayser nel suo Handbuch la dà come cosa certa, ma chi leggesse il libro *The electric arc* della signora Herta Ayrton (che è molto autorevole in materia) e stesse a quello, si formerebbe un concetto diverso, e, io credo, erroneo. Quindi non posso fare a meno di indugiarmi a discutere questo punto che, come vedremo tra poco, è di capitale importanza. La signora Ayrton, fondandosi sul fatto che la caduta di potenziale più repentina è nel primo strato dell'arco a contatto del cratere, e che è lì quindi anche la maggior produzione di calore, e volendo spiegare certe esperienze del Blondel che mostrerebbero lo splendore del cratere dipendere dalla lunghezza dell'arco, viene al concetto che il vapore di carbone che si sviluppa via via dal cratere, si raffreddi dopo un piccolo percorso, e si condensi (come fa il vapore di acqua che esce dalla bocca di un vaso bollente), formando così nel tratto che intercede tra il primo strato caldissimo accosto al cratere e la punta del carbone negativo, una nebbia finissima di particelle di carbone, che ella chiama *arc mist* ²⁾. Questo concetto è sostenuto dalla dotta signora in modo molto ingegnoso, ma poco persuasivo.

Per esempio, non è bene interpretato da lei il fatto che attraverso a una fiamma di candela non si possono distinguere dei caratteri altro che quando sieno molto vicini alla fiamma, o, se discosti, quando sieno fortemente illuminati.

1) C. R. vol. 119, p. 949, 1894.

2) *The electric arc*, p. 349 e seg.

Ciò in vero non dipende quasi per nulla dalla incompleta trasparenza della fiamma, sibbene dalla sua luminosità, che coprendo con un velo di luce uniforme la carta coi caratteri, rende insensibile il risalto se non è molto forte, cioè se la carta non è vivamente illuminata.

Quindi il ripetersi dello stesso fatto per l'arco non prova che questo sia poco trasparente, e anche se ciò fosse vero, resterebbe a vedere se non si trattasse, piuttosto che di una nebbia, di assorbimento corrispondente alle bande e righe che esso emette.

Nè il fatto noto della presenza dei corpuscoli nell'arco, che è bene messo in luce dall'esperienza di Herzfeld, che li attirava, e faceva deporre sopra lastre elettrizzate poste in vicinanza, non è da invocarsi qui, perchè manifestamente si tratta non di una fine nebbia di condensazione, ma di piccole faville staccatesi dai carboni.

Se la signora Ayrton avesse potuto eseguire l'esperienza che aveva pensata, di illuminare l'arco colla luce solare fortemente concentrata (metodo che serve così bene a mostrare la presenza del nero fumo nelle fiamme) credo che avrebbe ottenuto un risultato negativo, come l'ho ottenuto io dopo diversi tentativi fatti con una lente collettrice da lanterna per proiezioni e anche con un grande specchio concavo. Ma sono il primo a riconoscere che questo risultato negativo non prova niente, perchè neanche sul cratere positivo si riusciva a scorgere la macchia luminosa prodotta dai raggi solari, tanta è l'emissione e sì forte l'assorbimento del carbone a quella temperatura.

L'esperienza dell'ombra dell'arco (come la Ayrton stessa riconosce) non prova la presenza di questa nebbia; non solo, ma ripetendola mi sono piuttosto confermato nell'idea che la nebbia non esista.

L'esperienza si può fare nel modo ideato dal Mather, e indicato dalla signora Ayrton, colla luce della lampada stessa. A tal fine si ricevono sopra un piccolo specchio S, opportunamente disposto, i raggi del cratere di una lampada (coi carboni verticali e il positivo di sopra), e si rimandano indietro sulla loro strada (fig. 1).

Così l'ombra dei carboni e dell'arco si può ricevere in O sopra uno schermo di carta posto convenientemente in alto, che quindi è poco illuminato direttamente dalla lampada.

Fig. 1.

Del resto quando *c'* è il sole ho riconosciuto più vantaggioso proiettare l'ombra dell'arco coi raggi solari concentrati prima da una lente con distanza focale di 20 — 40 cm.

L'ombra dell'arco è una macchia oscura, ma orlata di chiaro che mostra cioè l'effetto come di una lente convessa a indice minore di *uno*. Essa è più estesa dell'arco vero e proprio, e comprende lo strato di aria calda che involge questo e i carboni, e non mostra nel suo interno nessuna parte più oscura del resto o di diverso colore, che possa far pensare all'*arc mist* (fig. 2).

Fig. 2

Se si colloca vicino all' arco una candela accesa, si vede sullo schermo la differenza tra le due ombre.

Quella della fiamma della candela mostra anch' essa un' orlo chiaro e un' estensione maggiore della vera fiamma, ma nel mezzo vi è una macchia oblunga terrea che corrisponde alla nebbia fumosa del cono luminoso della fiamma.

Insomma io non credo alla esistenza di questo vapore condensato in nebbia di particelle solide che costringerebbe ad ammettere nell' arco, tolto un sottile strato aderente al cratere, una temperatura non superiore al punto di volatilizzazione del carbone, cioè a quella del cratere stesso. E fino a prova in contrario, preferisco l' opinione più diffusa, che almeno il nucleo purpureo sia più caldo del cratere.

Bisogna però convenire che su questo punto non si può avere piena certezza.

4. Violle crede che la temperatura dell' arco non rimanga costante, come fa quella del cratere, ma aumenti colla intensità della corrente. Ciò è invero molto ragionevole, ma non certo, e non si può del tutto escludere l' opinione opposta sostenuta dal Rossetti ¹⁾, che anche questa temperatura sia costante.

In ispettroscopia si introducono, con opportuni mezzi che non istò a descrivere, nell' arco dei vapori metallici e conseguentemente si complica il fenomeno. Invero è probabile che con ciò si abbassi la temperatura, perchè colla stessa forza elettromotrice e intensità l' arco viene più lungo.

Spesso l' arco si prende addirittura tra due bacchette di metallo, ed anche in tal caso la temperatura è a quanto pare elevatissima; e, ad esempio, per lo zinco secondo Violle supererebbe di assai il punto di ebullizione di questo metallo. È probabile però che si abbiano sempre temperature inferiori a quella dell' arco tra carboni.

Alcuni spettroscopisti usano archi formati nell' interno di blocchi opportunamente perforati di sostanze refrattarie, come calce o magnesite; e in tal caso la temperatura del cratere è la stessa, ma quella dell' arco deve essere maggiore, perchè il

1) Nuovo Cimento, (3), vol. 7, p. 200, 1880.

calore si disperde meno. Aggiungiamo ancora, che, siccome in seno all'arco avvengono pure reazioni chimiche, bisognerebbe a tutto rigore fare sulla sua temperatura delle considerazioni simili a quelle che abbiamo fatte per le fiamme, ma ciò sarebbe superfluo anzi illusorio, a causa della incertezza sul valore stesso della temperatura, tanto più che qui le reazioni rappresentano una fonte secondaria di energia.

Ma anche dal punto di vista puramente elettrico entrano in giuoco le temperature parziali. E bisognerebbe distinguere quella delle molecole neutre, quella degli ioni positivi (ai quali secondo J. Stark sarebbe da attribuire ogni spettro di righe) e quella degli elettroni o elettroni negativi liberi.

Ma su queste considerazioni torneremo in seguito, poichè esse si applicano più chiaramente al caso dei gas rarefatti.

E ora voglio notare che le righe metalliche compariscono principalmente nella parte dell'arco più vicina al carbone negativo, specie per i metalli più elettropositivi, mentre le bande del carbonio sono più intense verso il cratere.

Vi è anzi trasporto di materia e specialmente di metalli dal positivo al negativo. Ciò suggerisce l'idea della conduzione elettrolitica, ma si può anche spiegare colla differenza di temperatura. Ad ogni modo il solo fatto che se uno dei carboni è impregnato, per esempio, di cloruro di sodio, l'arco è molto più conduttore, fa credere che quei vapori i quali dànno le righe, prendano parte attiva al meccanismo della conduzione.

5. Ma sarà questa partecipazione che direttamente produce la luminosità, oppure questa proverrà dalle reazioni chimiche che avvengono nell'arco, o solo dalla temperatura elevatissima? In altre parole, la emissione dell'arco è luminescenza elettrica, chimica o radiazione di temperatura?

Esaminiamo i fatti che militano in favore dell'una o dell'altra ipotesi:

Quelli che si possono invocare in sostegno della luminescenza sono i seguenti:

1° la grande intensità delle righe relativamente allo spettro continuo del cratere;

2° il rapido estinguersi di esse coll'interruzione della corrente;

3° la influenza che la presenza di un metallo esercita sulle righe di un' altro.

Il primo è quello che veramente ha peso maggiore, e ha spinto ad attribuire l' emissione alla luminescenza il Paschen e in passato anche il Kayser, ma questi ha poi mutato parere.

E veramente se le righe sono emesse per temperatura, la loro intensità non può mai superare quella di un corpo nero di uguale temperatura. Ora di quanto le righe superino di intensità la luce del cratere è mostrato con molta evidenza da questo esperimento del Kayser che trovo riferito e discusso dal Paschen ¹⁾.

Il Kayser prese con un grande reticolo di Rowland due fotografie colla stessa posa nella regione intorno a 3800 U. A., la prima proiettando sulla fenditura l' immagine del cratere, l' altra proiettandovi la luce dell' arco contenente anche vapore di magnesio.

Le due lastre sviluppate insieme lasciavano vedere appena un oscuramento che poteva essere effetto di uno spettro continuo. Inoltre la prima mostrava una banda del carbonio, e la seconda questa e una tripletta del magnesio, e ciò con passabile intensità.

Ora, se fosse vero ciò che sostiene la signora Ayrton, che cioè nell' interno dell' arco si condensino il vapore di carbonio appunto ove sono più appariscenti le righe metalliche, si potrebbe senz' altro ritenere decisa la questione che ci occupa, perchè non si può pensare che il cratere emetta molto meno del corpo nero anche per la sua forma incavata, e bisognerebbe ritenere che le righe fossero effetto di luminescenza.

Ma abbiamo già detto che la temperatura di tutto il nucleo dell' arco è con più ragione generalmente ritenuta maggiore di quella del cratere, e il Paschen è pure di questa opinione; ma non crede che ciò basti a spiegare la grande differenza di intensità, e quindi si pronunzia per la luminescenza.

Invece il Kayser più recentemente nel suo manuale ²⁾ giudica l' esperienza come non provante.

1) Wied. Ann. vol. 51, p. 40, 1894.

2) Handbuch der Spectroscopie, Bd. 2, p. 169.

Egli dice : « poichè l' arco è veramente più caldo, e la radiazione, come noi sappiamo dalle ultime ricerche, cresce straordinariamente presto colla temperatura, così una differenza di 500° o 1000° può spiegare la differenza di intensità ».

6. Egli pure giudica non provanti le esperienze che mostrano come le righe cessino pressochè istantaneamente appena che la corrente sia interrotta, perchè questo fatto si spiega ugualmente bene ammettendo (il che del resto è naturale) un molto rapido raffreddamento dei vapori emittenti.

Anzi recenti esperienze sono state fatte da C. de Watteville colla corrente alternata ¹⁾, ed hanno dato risultati molto interessanti. Esse consistono nel fotografare gli spettri corrispondenti a diverse fasi della corrente, il che riesce bene assicurando all' asse stesso dell' alternatore un disco portante alcune corone di fori che viene a trovarsi davanti alla fenditura dello spettroscopio. Or bene, confrontando gli spettri nel massimo e nel minimo, si vede che essi differiscono notevolmente, poichè nel minimo mancano le bande del cianogeno, e tra le righe metalliche rimangono con notevole intensità solo quelle che ordinariamente si sogliono chiamare *righe di bassa temperatura*; cioè quelle che più facilmente si producono con mezzi di riscaldamento meno energici.

C. de Watteville dice a ragione che tali fenomeni si spiegano bene col concetto di temperatura.

Credo che possa avere un certo interesse riprodurre una prova fotografica (Tav. II fig. 1) della parte più rifrangibile dello spettro ottenuta da me con questo metodo, usando carboni commerciali forati e rimpinzati di grafite con cloruro di stronzio. La corrente era prodotta da un convertitore rotante quadripolare Ganz, servito dalla corrente di città a 150 volta, sul cui asse era posto un disco di cartone con quattro fori che si poteva, senza arrestare la macchina, spostare a colpo di 45 gradi rispetto all' indotto. Così senza spengere l' arco, in pochi secondi ho preso su la stessa lastra le 4 fotografie alternativamente nella fase di massimo e di minimo o piuttosto (per esser rigorosi) nelle due fasi in cui lo spettro presenta la massima differenza.

1) C. R. vol. 138, p. 485, 1904.

Il lettore potrà da sè riconoscere che le variazioni alternative dello spettro sono in armonia con quanto è detto sopra.

Basta avvertire che sulla fenditura era proiettata un'immagine reale dell'arco, e che nella riproduzione furono tolti i due sottili spettri continui dovuti agli estremi dei carboni, e che la riga che rimane quasi invariata è quella dello stronzio di più bassa temperatura che si produce facilmente anche nella fiamma del becco Bunsen. Il fatto che alcune righe metalliche non si spengono e nemmeno s'indeboliscono molto nell'istante in cui la densità della corrente si annulla, mi pare che mostri la loro emissione esser dovuta, almeno in quell'istante, alla sola temperatura.

So benissimo che si possono invocare altre spiegazioni: che la luminosità persista per un piccolo tempo anche rimossa la causa, che intervengano azioni di riduzione, o che so io; ma la spiegazione più naturale sarà sempre quella data dalla temperatura più bassa, e purè sempre molto elevata.

7. Il Pringsheim, caldo sostenitore della luminescenza, dà molta importanza al terzo fatto citato che fu messo in chiaro da Liveing e Dewar nelle loro belle ricerche spettroscopiche.

Essi esaminano lo spettro dell'arco che si forma nell'interno di blocchi di calce o magnesia, raccogliendo i raggi nello spettroscopio attraverso a una perforazione, mentre un'altra serve a gettare nell'arco i sali o i metalli.

In queste condizioni si forma una massa assai densa di vapori a temperatura elevatissima, molto adatta alla osservazione spettroscopica.

Orbene, i due spettroscopisti osservano ¹⁾ tra le altre cose, questo fatto interessante: alcune righe di un metallo compariscono o si rinforzano notevolmente quando viene introdotto nell'arco un'altro metallo; per esempio, il ferro ravviva alcuni gruppi di linee del calcio; il ferro e il cromo ravvivano alcune righe del nichelio e del titanio ecc.

Ora, questi fatti, secondo il Pringsheim, non si possono spiegare che colla ipotesi di una luminescenza chimica.

Ma veramente non ne hanno il carattere. La spiegazione

1) Proc. Roy. Soc. vol. 33, p. 428, 1882.

più naturale è quella suggerita dagli autori stessi, che la presenza di uno dei metalli agevoli la volatilizzazione dell'altro e ne difenda il vapore dalla ossidazione; così può essere aumentata la quantità del vapore emittente, e anche variatene le condizioni di densità e di temperatura.

In questo proposito mi è occorso di osservare il fatto curioso, che del resto probabilmente altri avranno osservato, che con un carbone positivo animato di un miscuglio di grafite e limatura di ferro, usato contro un negativo massiccio, si può ottenere del vapore di ferro spettroscopicamente più denso che coll'arco preso tra due grosse bacchette di ferro.

Ciò può dipendere o dalla temperatura più elevata, o dalla azione riducente del carbone.

Anche in altre esperienze ¹⁾ degli stessi autori, non coll'arco, ma con vapori metallici riscaldati entro tubi in fornelli, si osservano fatti di questo genere che sono certo di grande interesse, ma non mi pare che costringano a pensare alla luminescenza chimica.

Tutto calcolato, si può dire che *manca una prova che nell'arco si abbia una luminescenza chimica od elettrica.*

Manca però anche una ragione sicura per escluderla, perchè le frequenti inversioni, che cita in questo senso il Kayser, veramente si accordano ugualmente bene, come vedremo in seguito, con qualunque ipotesi sulla origine della emissione, e neppure l'esperienza di Liveing e Dewar, già ricordata dell'emissione e inversione nel tubo di carbone, anche se rappresenta un caso di emissione pura di temperatura, non mostra che tale sia quella dell'arco.

8. Le lampade a vapori di mercurio che segnano il passaggio tra l'arco e le scariche nei gas rarefatti, rappresentano un caso troppo particolare relativamente alla questione generale di cui mi occupo; per questo mi limito a ricordarla, e passo senz'altro alle scariche elettriche.

Dell'immenso numero di lavori sperimentali relativo alle scariche elettriche la maggior parte hanno un indirizzo o puramente spettroscopico o puramente elettrico. Negli uni

1) Proc. Roy. Soc. vol. 27, p. 132; p. 354, 1878.

vien descritto accuratamente lo spettro della luce emessa dal tubo a vuoto o dalla scintilla, dando solo poche indicazioni rispetto alla parte elettrica; (se si usa o no un condensatore, se si inserisce o no uno spinterometro in serie col tubo). Negli altri si indicano gli elementi elettrici del circuito, si studia la ripartizione dell'energia, si indaga il meccanismo della scarica, senza fare uno studio spettroscopico della luce emessa.

Ricerche che uniscono lo studio spettroscopico a quello elettrico sono relativamente scarse. Ne viene di conseguenza che la parte energetica della emissione elettrica è ancora poco conosciuta.

Il meccanismo poi per cui i gas vengono portati all'emissione dalle scariche è molto oscuro, anche più di quello dell'emissione delle fiamme.

È lecito sperare che anche su questi punti le modernissime teorie degli ioni porteranno molta luce.

9. *Gas rarefatti*. — Comincerò col richiamare il fatto che gli spettri dati dalle scariche (o correnti) nei gas rarefatti si distinguono in due tipi.

Quelli detti di *primo ordine* o di bande ¹⁾, e gli altri detti di *second'ordine* o di righe. I primi corrispondono a una eccitazione meno viva (diciamo così) e i secondi a una più viva; per es. nei tubi di Plucker spesso i bulbi mostrano lo spettro di bande e il capillare quello di righe. Ma su ciò torneremo diffusamente in seguito.

Solo gli spettri di righe hanno vera importanza spettroscopica, o meglio, per la spettroscopia celeste.

Ciò non di meno voglio riferire, riguardo alla temperatura dei gas che emettono gli spettri del primo ordine, un risultato sperimentale ben netto dovuto principalmente a Hittorf ²⁾ e da lui ottenuto mediante l'uso della corrente di una pila.

1) Lo spettro di *prim'ordine* dell'idrogeno è impropriamente detto di bande: esso è invero costituito da molte righe fini senza ordine di serie.

2) Principalmente, perchè molti altri sperimentatori sono con lui concordi, e Wiedeman per altra via era già giunto a simili conclusioni; ma le esperienze di Hittorf sono le più importanti.

Wied. Ann. vol. 7, p. 558, 1879; vol. 19, p. 73, 1888.

10. E veramente siccome le scariche di un rocchetto durano sempre un tempo molto breve di fronte a quello che intercede tra l'una e l'altra, così non permettono una conoscenza diretta della temperatura che il gas può raggiungere momentaneamente al passaggio di ciascuna scarica.

Anche la misura del calore svolto e della durata della scarica non ci dice niente di certo sulla temperatura.

Per una corrente continua la temperatura sarebbe permanente, e riescirebbe meno difficile, se non farne una misura molto precisa, almeno poterne assegnare in modo sicuro l'ordine di grandezza. Orbene, coll'uso di una batteria voltaica se anche non si ottiene una corrente perfettamente continua, ci si avvicina abbastanza a questo caso, e per tal via Hittorf ha provato che l'emissione degli spettri di bande e di quello a molte righe, detto anche impropriamente di bande, dell'idrogeno non è di temperatura, e ciò colle seguenti esperienze:

Un piccolo tubo a vuoto veniva illuminato dalla corrente di una pila di un gran numero di piccoli elementi in modo che fosse quasi tutto invaso dalla luminosità positiva. Esso era connesso con un manometro a mercurio, costituendosi così una specie di termometro a gas. E veramente una elevazione della temperatura anche piccola veniva rivelata in questo modo, mediante una depressione del mercurio.

Nel fatto, per correnti relativamente deboli, il tubo si illuminava, e il mercurio non si abbassava sensibilmente; ed era necessaria una intensità maggiore per ottenere una depressione chiaramente visibile. Questa, del resto, era dovuta in parte all'espansione del gas nella regione oscura presso il catodo, in cui la temperatura era in quelle condizioni più alta.

Delle striscioline sottilissime di carta finissima, mantenute per del tempo nella luminosità positiva, non presentavano traccia di carbonizzazione ¹⁾.

La luce è in questo caso adunque emessa a temperatura poco superiore alla ordinaria e molto lontana da quella di incandescenza.

1) Voglio citare soltanto le ricerche più particolareggiate sulla temperatura nei tubi di Wood, Wied. Ann. vol. 59, 1896.

Un solo dubbio che si può elevare, e che il Kayser accenna senza insistervi nel riferire queste esperienze, è che la corrente (come abbiamo accennato) non sia veramente continua.

L'Hittorf non mancò di esaminare la luce con uno specchio rotante che faceva fino a 100 giri il secondo, e constatò che la luminosità appariva intermittente se la resistenza posta in serie col tubo superava un certo limite, mentre, se era ad esso inferiore, la luminosità appariva continua, e ne concluse che allora doveva essere continua anche la corrente. Ma per noi basta ad ogni modo che fosse continua la luminosità. Che se poi si volesse pensare a intermittenze così frequenti da non potere esser risolte dallo specchio rotante, come si potrebbe ammettere che per esse il gas si riscaldasse e raffreddasse alternativamente, e durasse ad esser caldo per un tempo molto breve di fronte a quello intercedente tra un riscaldamento e il successivo?

11. Ma v'ha di più: se il gas si riscalda molto sotto l'azione della corrente galvanica, non emette più luce, come risulta da quest'altra bella esperienza di Hittorf.

Egli faceva passare la corrente di una numerosissima pila attraverso a tubi contenenti gas rarefatti, crescendo via via l'intensità della corrente in modo da arroventare gli elettrodi sebbene fatti con asticelle piuttosto massicce.

Con elettrodi di platino potè spingere l'intensità fino al punto di incipiente fusione del catodo, e allora il gas intorno a questo presentava un ampio spazio oscuro. Con elettrodi di iridio potè accrescere ancora l'intensità della corrente fino a incipiente fusione dell'anodo che questa volta si scalda più. Il gas (azoto, idrogeno, ossido di carbonio) rimaneva allora oscuro in tutto il tratto percorso dalla corrente.

E voglio anche ricordare le esperienze di Stark ¹⁾ che riscalda il gas reso luminoso dalla corrente elettrica ad alta tensione, con filamenti da lampada resi incandescenti da una corrente più intensa a bassa tensione; ed osserva che la luminosità si indebolisce e scompare in vicinanza di questi filamenti. Egli toglie assai bene il dubbio che tale effetto sia

1) Wied. Ann. vol. 68, 1899.

dovuto, invece che al riscaldamento del gas, a una emissione di vapori dal filamento incandescente.

Per gli spettri di bande adunque non si tratta di emissione di temperatura, che anzi per l'emissione è necessario che la temperatura non sia troppo elevata.

Risulta inoltre dalle esperienze di Hittorf che azoto, idrogeno e ossido di carbonio, riscaldati a una temperatura vicina al punto di fusione dell'iridio, non emettono ancora, almeno con piccoli spessori; e ciò non è certo favorevole alla possibilità per questi gas di una emissione di temperatura.

12. Ma con ciò non è deciso ancora il punto principale, cioè qual parte possa avere la temperatura nell'emissione degli spettri di secondo ordine che sappiamo esser dovuti ad eccitazioni più vive, non ottenibili per i gas studiati da Hittorf colla corrente continua; e non si può escludere assolutamente che ad esse possano corrispondere delle temperature anche molto superiori a quelle ottenute dall'Hittorf colle correnti continue.

Veramente talvolta le righe dell'idrogeno che costituiscono lo spettro di 2° ordine erano debolmente visibili nelle esperienze dell'Hittorf; ma neanche questo fatto può mostrare che esse sieno un effetto di luminescenza, quando sono sole, o spiccano in modo speciale nello spettro di bande.

Qui la questione si complica enormemente; e mi è forza di esaminare un po' più da vicino le condizioni che danno luogo all'uno e all'altro tipo di spettri.

13. Contro l'idea che gli spettri di righe sieno dovuti a temperature più elevate che quelli di bande, si cita una esperienza di D. van Monckhoven ¹⁾ il quale, in un tubo di azoto a forma di H munito di quattro elettrodi, manda le scariche semplici di un rocchetto e le condensate di un altro.

Le prime danno lo spettro di bande, le altre lo spettro di righe, e questi due spettri si vedono sovrapposti, osservando il tratto che riunisce le due aste dell'H. Da ciò egli conclude che l'emissione dei due spettri, essendo contemporanea, non può essere legata a due temperature diverse.

1) C. R. vol. 95, p. 520, 1892.

Ma le due scariche non sono perfettamente contemporanee; e il van Monckhoven si schermisce da questa obiezione affermando che la luminosità dura nei tubi specialmente di ossigeno (ma egli intanto adopra l'azoto) qualche decimo di secondo dopo il passaggio della scarica.

Tutto ciò non è molto persuasivo.

Se la persistenza della luminosità esistesse veramente nel senso e nella misura detta dall'autore, visto che, sia per la produzione dello spettro di bande, sia per la produzione dello spettro di righe, il tubo non si riscalda molto anche con un'interruttore assai rapido, basterebbe ciò a mostrare che in tutti questi casi l'emissione non è di temperatura.

14. Ma la cosa è assai diversa: la luminosità data dalla scarica si estingue tosto, quasi totalmente, e rimane, è vero, una luminosità residua per qualche tempo, ma essa è molto debole, e non permette di asserire che nelle esperienze del van Monckhoven le due emissioni sieno contemporanee. In vero, osservando con uno specchio girante dei tubi di Plücker alimentati da un rocchetto di Rumkhorf con interruttore assai rapido, ho notato facilmente quanto segue:

a) Adoperando un tubo di ossigeno di fronte al quale si poneva un diaframma a iride a diverse altezze per limitare via via la parte presa in esame, si vedeva nello specchio girante una serie di immagini corrispondenti alle varie scariche connesse tra loro da un nastro continuo, il quale è più visibile per le ampolle che per il capillare, forse soltanto a causa della maggiore larghezza della immagine.

b) Con un tubo di azoto questo nastro continuo è pure visibile, ma a gran fatica, ed ha un'intensità estremamente minore delle immagini staccate, le quali sono sempre a contorni molto netti, anche se lo specchio si fa girare presto in modo da separarle molto le une dalle altre.

Si può quindi affermare che, se si osservasse il tubo del Monckhoven collo specchio girante, si vedrebbero staccate le immagini corrispondenti alle due specie di scariche sopra un nastro continuo debolissimo.

E quindi, qualunque sia poi la causa di questo nastro continuo, si vede che l'esperienza del Monckhoven non è decisiva.

Del resto è cosa notissima che spettri di primo e di secondo ordine *colla stessa scarica* si osservano comunemente nei tubi di Plücker; per esempio con un tubo di idrogeno è facile vedere le quattro righe caratteristiche risaltare in modo speciale sopra un fondo di un numero grandissimo di righe fini e deboli. Ma anche qui si potrebbe sottilizzando sospettare che lo spettro di secondo ordine si avesse solo nell'istante della maggior temperatura, e quello di primo ordine solo quando la temperatura decresce.

Con questo non voglio sostenere che lo spettro di righe sia dovuto alla temperatura, e nemmeno che necessariamente sia accompagnato da un'alta temperatura; solo voglio affermare che dalla esperienza del v. Monckhoven sopra descritta non si ricava nessuna prova della tesi da lui sostenuta.

15. Ma in che cosa risiede dunque la causa della differenza? Non certo, almeno in generale, nella dissociazione della molecola in atomi liberi. E veramente, senza che si possa escludere che questa dissociazione possa in alcuni casi manifestarsi col cambiamento di spettro, sebbene ciò non paia adattarsi al caso delle scariche, basta citare il fatto di gas monoatomici come il mercurio ¹⁾ e l'argo che presentano i due spettri, per mostrare che le cause di questo fenomeno, importantissimo nella spettroscopia, vanno ricercate in linea generale, non nelle associazioni o dissociazioni *chimiche*, ma nel meccanismo stesso della emissione, il quale è connesso intimamente e forse è la stessa cosa col meccanismo della conduzione nei tubi di Plücker ²⁾. Non si può dunque sperare di farsi un concetto chiaro del lato spettroscopico del fenomeno, sino a che non ci saremo fatti un concetto chiaro del lato elettrico, e sarebbe superfluo citare i fenomeni magnetottici, specialmente quello di Zeeman, per mostrare come ormai bisogna ritenere che la minima particella carica di elettricità sia la causa identica della conduzione elettrica e della emissione di luce. In fine a questo capitolo parlerò brevemente della teoria degli ioni in relazione colla luminosità elettrica.

1) Eder e Valenta. Wied. Ann. vol. 55, p. 479, 1895.

2) Trowbridge e Richards. Phil. Mag. (5), vol. 43, p. 77, 1897.

Ma intanto citiamo alcuni fatti cercando di dedurne qualche conclusione riguardo alla temperatura.

16. Pare che in molti casi la causa principale che determina il carattere dello spettro sia la natura della scarica, oscillatoria o no, e ciò apparisce specialmente dimostrato con mezzi grandiosi nelle esperienze di J. Trowbridge in unione anche con Richards ¹⁾.

Il gas che mostra la differenza di contegno più spiccata è l'argo, che dà lo spettro rosso per le scariche e correnti continue, e l'azzurro per le scariche oscillatorie; anzi un tubo ad argo convenientemente preparato può servire per riconoscere se un oscillatore sia veramente tale, semplicemente avvicinandolo ad esso, ed osservando il colore con cui si illumina (talantoscopia). Anche l'azoto e l'idrogeno mostrano tale comportamento, se non colla stessa evidenza. Tra le osservazioni in proposito voglio riferire la seguente:

Un tubo di Plücker, ripieno di idrogeno, quando era percorso da correnti continue, produceva lo spettro di righe fini, e qualche riga più intensa, tra cui le quattro caratteristiche (corrispondenti a C, F, *f*, *h* di Fraunhofer) erano presenti senza spiccare per niente. Inserendo un condensatore di grande capacità, la luce cambia colore, e lo spettro si trasforma in quello delle sole quattro righe, che corrisponde allo spettro azzurro dell'argo. Quello che è più caratteristico in questo cambiamento è la scomparsa dell'*esercito* di tutte le altre righe sottili. Smorzando queste scariche oscillatorie, queste righe sottili ricompaiono in parte. Ma pare che il tipo di spettro continuo si abbia anche inserendo una grande autoinduzione, cioè con oscillazioni lente; nè ciò mi sembra strano perchè se le correnti hanno una certa durata, si capisce come poco importi se sono dirette sempre in un senso, o se cambiano alternativamente direzione.

Corrispondentemente a queste differenze ve ne è una anche nella resistenza. Per determinarla nel caso delle scariche oscillanti, Trowbridge e Richards fanno le fotografie col meto-

1) Phil. Mag. (5), vol. 43, p. 77, p. 135-349, 1897. Vedi ancora Phil. Mag. (5), vol. 50, p. 338, 1900; (6) vol. 2, p. 370, 1901 ecc.

do di Feddersen, esaminando lo smorzamento prodotto dal tubo e quello prodotto da resistenze di filo di manganina, ed assegnano per la resistenza del tubo lo stesso valore di quella del filo, che produce lo stesso smorzamento.

La resistenza dei fili è misurata col metodo del ponte. Ora questo modo di determinare le resistenze per le scariche oscillatorie non è rigoroso, perchè la resistenza del filo è a causa dell'effetto di superficie, ben diversa per queste che per la corrente continua. I valori ottenuti saranno quindi da considerare come un'approssimazione un po' grossolana, ma bastante per non lasciare dubbio sul fatto che, mentre la resistenza per la corrente continua è di migliaia di ohm, quella dello stesso tubo per le scariche oscillatorie è di qualche ohm solamente.

Trowbridge e Richards pare che sostengano aversi in corrispondenza per le scariche oscillatorie una temperatura molto maggiore. Ma senza seguirli in questo ordine di idee che non mi sembrano pienamente giustificate, dirò solo che: *i due tipi di spettri di primo e di secondo ordine corrispondono a due diverse specie di scariche e a due diverse resistenze* ¹⁾ *del tubo, cioè probabilmente a due meccanismi di conduzione diversi* i quali in alcuni casi si possano anche sovrapporre.

E se gli spettri di prim'ordine sono dati dalla luminescenza, potremo ritenere probabile che lo siano anche gli altri; ma, a causa delle differenze dette sopra, non potremo asserirlo; tanto più che molte esperienze, e specialmente di Trowbridge stesso, mostrano come in certi casi (di scariche molto energiche) non si possa dubitare che gli spettri di secondo ordine sieno prodotti da gas a temperatura molto elevata.

Ma la quistione si può risolvere per altra via, che però è vincolata alla ipotesi cinetica dei gas.

Il movimento termico delle molecole (in questo caso la parola *molecola* è consacrata dall'uso) produce per l'effetto di Doppler un allargamento della riga spettrale. Ma altre

1) La parola non va presa in senso stretto.

cause possono aumentare tale allargamento; sicchè dalla larghezza non si può in ogni caso dedurre che un limite massimo per la velocità molecolare, e quindi per la temperatura.

La teoria di questo fenomeno è stata tentata da H. Ebert, e poi trattata esaurientemente da Lord Rayleigh ¹⁾, però non riferendosi propriamente alla larghezza delle righe, ma ciò che in sostanza fa lo stesso, alla visibilità delle frangie di interferenza con gran differenza di cammino.

Ed esperienze delicatissime di Michelson ²⁾ eseguite col suo interferenziometro, gli hanno permesso di assegnare il limite minimo della velocità media molecolare di parecchi vapori e gas eccitati elettricamente in corrispondenza alle varie loro righe.

Si tratta di quelle righe sottilissime capaci di interferire con differenze enormi di cammino, che si possono applicare, alla metrologia.

Orbene, le temperature corrispondenti non sono notevolmente diverse dalle ordinarie. Cioè bisognerebbe assolutamente escludere la emissione di temperatura in questi casi.

17. Tra le molte esperienze sull'argomento ho scelto queste poche, e le ho riferite con una certa ampiezza, perchè mi sembrano le più adatte a fissare le idee e i termini del problema dell'emissione pei gas rarefatti.

Ve ne sono molte altre assai importanti che io tralascio per non dilungarmi troppo, poichè tra esse non ne ho trovata alcuna che fosse per gli spettri di righe decisiva, come sono quelle di Hittorf per gli spettri di bande, cioè che fornisse una prova certa che anche essi siano effetto di luminescenza.

18. *Scintille*. — Sebbene si passi per gradi dall'uno all'altro fenomeno, pure una differenza profonda vi è tra le scariche nei tubi di Plücker e la scintilla, differenza costituita dalle righe metalliche, le quali sono presenti nello spettro di questa.

E qui fortunatamente il fenomeno si conosce assai meglio. Le ricerche di molti fisici ³⁾ specialmente per effetto del po-

1) Phil. Mag. (5), vol. 27, p. 293, 1889.

2) Phil. Mag. (5), vol. 34, p. 280, 1892.

3) Födderren, Boys, Trowbridge, Lodge, Heidweiller, Cardani, Battelli e Magri ecc.

tente strumento di indagine che è lo specchio girante, ci hanno insegnato molto del meccanismo, almeno esteriore, di queste scariche.

Tutti sanno che a seconda delle grandezze dei tre elementi elettrici del circuito, resistenza, autoinduzione e capacità, si hanno i tipi oscillatorio e continuo, o intermittente, e in corrispondenza condizioni alquanto diverse dei gas emittenti.

19. *Scintille oscillanti*. — Il caso più importante e più studiato è quello delle scariche oscillanti, e anche dal punto di vista nostro, mi pare il più istruttivo. Per noi hanno speciale interesse le ricerche di Schuster e Hemsalech ¹⁾ che hanno fatto con belle esperienze uno studio approfondito spettroscopico ed elettrico. Alle loro conclusioni devo fare alcune modificazioni ed aggiunte, richiamando cose che non giungeranno certo nuove a chi abbia familiarità colle fotografie delle scintille; ma ciò pure è necessario per delucidare la questione dell'emissione luminosa.

Anzi voglio cominciare colla descrizione dei tipi più spicati di scintille oscillatorie, servendomi di alcune belle fotografie gentilmente favoritemi dai signori A. Battelli e L. Magri.

20. Esse sono state ottenute colla disposizione descritta nella memoria « *Sulle scariche oscillatorie* » ²⁾.

Gli elementi che lasciano tracce visibili nella lastra fotografica sono:

a) La scintilla detta *pilota* in cui passa una piccola parte della carica, cioè quella che si trova distribuita sui conduttori più vicini allo spinterometro. Essa apre la strada alla scarica del condensatore (prima striscia sottile).

b) Le successive scariche parziali traverso il gas interposto agli elettrodi (strisce diritte o serpeggianti più larghe).

c) I punti degli elettrodi resi incandescenti (lineette orizzontali).

d) I vapori metallici ³⁾ emanati da questi (strisce incurvate).

1) Schuster e Hemsalech. Phil. Trans. A. 193, p. 189, 1900. — Hemsalech "Recherches experimentales sur les Spectres d'Etincelles", Paris, Hermann 1901.

2) Accademia delle Scienze di Torino (Memorie), 2, 51, 1902.

3) La scintilla era presa tra punte di cadmio.

Tutti questi elementi sono visibili nelle figure 1 e 2 Tav. I (Autoinduzione $L = 92.000$ cm., capacità $C = 0,00399$ microfarady, periodo $0'',00000\ 38$ calcolati).

Delle scariche parziali se ne vedono però due soltanto.

Invece la 3 ($L = 20.100$ $C = 0,00399$ $T = 0,00000178$ calcolati) mostra un numero maggiore di scariche parziali, ma il pilota si confonde colla prima di queste.

I punti incandescenti dell'elettrodo e i vapori metallici sono visibili distintamente soltanto via via per l'elettrodo che fa da positivo.

Queste scariche parziali adunque si rivelano per una illuminazione quasi istantanea del tratto di gas compreso fra i due elettrodi.

Esse non possono contenere ancora i vapori metallici, perchè questi si sviluppano dagli elettrodi, e si avanzano con velocità piccole, relativamente a quella di propagazione delle scariche nell'intervallo esplosivo.

I vapori metallici invece si mostrano, come ho detto, nelle strisce che partono dall'elettrodo negativo prevalentemente (N. 5), o esclusivamente (N. 1, 2 e 3), le quali col loro incurvamento mostrano che il moto dei vapori metallici è ritardato.

Esse si intersecano tra loro a forma di spiga, e vanno ciascuna gradatamente diminuendo di forza; e non si osserva ne in queste riprodotte nella tavola, nè in nessuna delle molte fotografie di scariche di periodi svariatiissimi da me esaminate, un rin vigorimento di alcuna di queste strisce in corrispondenza ad ogni scarica parziale successiva.

Questo fatto ha per me molto interesse, in quanto che mostra come l'energia che i vapori emettono è loro comunicata tutta in una volta da quella scarica parziale che li distacca dagli elettrodi, e non viene aumentata di altri contributi dalle successive scariche parziali, al cui meccanismo i vapori metallici rimangono estranei, o almeno non manifestano la loro partecipazione con un aumento di luce.

Delle strisce date dalle scariche parziali, in molte fotografie è poi presente solo la prima, specie se la distanza esplosiva è piccola. Se poi lo smorzamento è piuttosto rapido, spesso i vapori seguitano a emettere luce anche dopo che è

cessata la scarica per molti milionesimi di secondo, lasciando una lunga coda sfumata come mostra la fotografia della fig. 4.

Con grandi autoinduzioni e periodi piuttosto lenti, le nubi di vapore prendono ancora più importanza relativamente alle strisce, e finalmente si giunge a scariche come quella della fotografia della fig. 5, in cui è visibile solo la scintilla pilota e le nubi di vapore, sempre più deboli, per l'elettrodo negativo, e non sono visibili le scariche parziali nell'aria.

I ciuffi di vapore non vanno dall'uno all'altro elettrodo, come se conducessero essi la scarica, ma talvolta rimangono a mezza strada N. 1, 2 e 3, tal'altra si spingono anche più in là dell'altro elettrodo, uscendo dal vero e proprio intervallo di scarica o deviano enormemente (fig. 5) e talvolta persistono anche quando la scarica è cessata (fig. 4 frequenza altissima).

21. Dunque i fenomeni luminosi della scintilla sono di due sole specie ben distinte:

a) *Quelli provenienti dal gas*, che danno luogo ai tratti sottili nelle fotografie. Essi seguono istantaneamente o quasi i fenomeni elettrici che li producono, perchè ogni riga corrisponde anche con periodi brevissimi a una scarica parziale, e in alcune fotografie dei signori Battelli e Magri si notano queste strisce delle scariche parziali succedersi a meno di un milionesimo di secondo l'una dall'altra.

Questi fenomeni sono adunque un indice ottico diretto del meccanismo di conduzione della scintilla.

b) *I fenomeni luminosi dei vapori metallici*. La loro emissione va gradatamente e molto lentamente spengendosi dall'istante in cui essi si sprigionano dall'elettrodo; non viene ravvivata dalle successive scariche parziali; si manifesta in luoghi e in tempi in cui manca la scarica elettrica, e quindi non può essere considerata come indice ottico del meccanismo di conduzione, col quale non ha altro rapporto che l'origine dei vapori e dell'energia.

Ne viene di conseguenza che, dopo l'ultima striscia trasversale visibile, il meccanismo di conduzione si svolge nella scintilla senza dare di sè direttamente un indizio luminoso.

Questi i fatti che cercheremo di interpretare più giù: ora riferiamo i principali risultati spettroscopici che vi sono connessi.

22. È chiaro che, osservando allo spettroscopio i diversi elementi che abbiamo visto costituire la scintilla, si riscontrerebbe per le strisce diritte trasversali, corrispondenti alle scariche parziali, lo spettro dell'aria, e per le strisce incurvate nebulose, lo spettro dei metalli.

Schuster e Hemsalech appunto proiettarono sopra una pellicola fotografica rotante lo spettro delle scintille ottenute con circuiti di scarica di piccolissima autoinduzione, aventi pochissime oscillazioni molto rapide (essi le chiamano scintille ordinarie), nelle quali la prima scarica nell'aria aveva molta importanza. Essi ottennero nella fotografia le righe dell'aria diritte e nette, e quelle del metallo incurvate ed espanse assumendo la forma simile a quelle che si osservano nelle fotografie riprodotte sopra.

Fecero anche dal loro incurvamento la misura approssimativa della velocità dei vapori metallici. Si resero ragione benissimo del fatto che con grandi autoinduzioni le righe del metallo sono sole. E invero nell'ultima fotografia da me riprodotta (N. 5 $L = 515.300$ cm., $C = 0,109$ microfarady, $T = 0'',0000473$ calcolati) la quasi totalità dei fenomeni visibili è data dai vapori metallici.

Molti risultati interessantissimi delle loro ricerche mi piacerebbe qui riferire, se ciò non mi dilungasse dal mio argomento; ma invece sono costretto a discutere un punto, in cui mi permetto di dissentire da essi e specialmente dall'Hemsalech.

23. Egli ¹⁾ descrive il fenomeno nel modo seguente « la couche d'air entre les deux électrodes est d'abord percée par la décharge initiale; ensuite l'air qui se trouve dans le voisinage immédiat du chemin parcouru par la décharge est rendu incandescent; c'est le *trait lumineux*. Mais immédiatement après l'espace compris entre les deux électrodes se remplit de la vapeur métallique entraînée par la décharge initiale: c'est

1) Recherches exper. sur les Spectres ecc. p. 6.

l'auréole. Les oscillations qui suivent la décharge initiale traversent cette vapeur et la réchauffent; ces oscillations jouent probablement un rôle important dans la production du spectre caractéristique du métal ».

24. Se egli avesse avuto a disposizione delle fotografie fatte con uno specchio girante con grandissima velocità, credo che avrebbe concepita la cosa un po' diversamente. L'impossibilità di analizzare periodi dell'ordine del milionesimo di secondo, lo ha portato a interpretare l'effetto nell'aria come un riscaldamento, e a pensare all'effetto delle scariche parziali successive sul vapore metallico già esistente.

Credo che le fotografie mostrate mi permetteranno di rettificare questi concetti.

In primo luogo non vedo la ragione di ammettere che la prima scarica fori l'aria, rendendo incandescente quella che circonda il cammino che così si apre. Ma aggiungiamo che ciò sarebbe fatto oltre che dalle scariche iniziali, anche dalle successive, con intensità via via minori. Ora è difficile concepire un riscaldamento, e tanto meno un raffreddamento così repentino come dovrebbe essere questo. Inoltre le scariche parziali non si smorzano con rapidità sufficiente da rendere ragione, secondo il concetto del riscaldamento, della rapida diminuzione di intensità di queste righe, che non corrisponde al lento digradare di splendore del vapore metallico. Il gas non può nella seconda e terza scarica parziale essere notevolmente più freddo che nella prima; è probabile anzi che sia più caldo e forse per questo cesserà presto di illuminarsi ¹⁾.

Le strisce delle scariche parziali nell'aria sono dunque dovute molto probabilmente a luminescenza elettrica.

Quanto ai vapori metallici, abbiamo esaminato il loro comportamento, il quale esclude la possibilità che vengano riscaldati via via dalle scariche parziali, o anche (se non si vuole pregiudicare la questione della temperatura) resi da esse più luminosi, e abbiamo visto che ricevono, all'atto della loro produzione, la energia che poi perdono con relativa lentezza.

1) Questa idea mi è suggerita dalle esperienze di Hittorf e di Stark riferite in altra parte del presente lavoro.

E per essi mi pare ammissibilissimo che questa energia venga prima trasformata in energia termica, e poi secondariamente in luce; o in altre parole che la scarica non faccia che riscaldarli, e la loro emissione sia di temperatura.

E invero se si trattasse di elettroluminescenza, anche in questo caso si capirebbe male, perchè la emissione non segua fedelmente il meccanismo della scarica. A meno di non volere ammettere che l'elettroluminescenza nei vapori metallici abbia un contegno diversissimo che nell'aria; cioè che essa, una volta impartita dalla scarica al vapore metallico, che questa distacca dall'elettrodo, rimanga in esso per un certo tempo (come avviene per la fluorescenza) e si estingua a poco a poco, senza venire ravvivata dalle scariche parziali successive.

25. Ora avviene che le condizioni del circuito di scarica influiscono sullo spettro, e specialmente l'autoinduzione modifica notevolmente lo spettro dei vapori metallici.

Questa influenza è stata studiata largamente, e messa in chiaro con belle e numerose esperienze dall'Hemsalech, il quale conclude che nelle sue grandi linee il fenomeno si compie nel modo seguente.

Dapprima, al crescere dell'autoinduzione, partendo da un valore molto piccolo, diminuiscono di intensità tutte le righe, ma in modo diverso.

Quelle dell'aria scompaiono gradatamente, mentre l'autoinduzione cresce fino a un certo valore.

Quelle dette di alta temperatura (ossia le *righe corte* del Lockyer) si indeboliscono rapidamente e scompaiono del tutto aumentando ancora la autoinduzione. Altre diminuiscono poco dapprima, e poi restano pressochè invariate divenendo corte. Altre infine, dopo un primo indebolimento assai lieve si rinforzano di nuovo e molto. Queste sono le righe così dette *lunghe* o di bassa temperatura.

A seconda dei metalli prevale o l'uno o l'altro effetto.

Ora questi fatti sono dall'Hemsalech discussi e spiegati secondo il suo concetto sulla costituzione della scintilla, cioè distinguendo in essa tre elementi: la scarica nell'aria, la scarica traverso ai vapori metallici e l'aureola.

Io ho mostrato, valendomi delle fotografie fatte con grande velocità di specchio, che questo concetto va alquanto modificato, e sono quindi condotto a preferire per i cambiamenti degli spettri una spiegazione ben diversa, che invece non differisce sostanzialmente da una che l' Hemsalech pure accenna nella sua monografia per poi rigettarla, io credo senza buona ragione.

26. Un aumento dell'autoinduzione procurato aumentando il numero delle spire percorse dalla corrente di scarica, ha per effetto (come mostrano forse meglio delle altre le esperienze dei signori Battelli e Magri) di aumentare la durata della scarica e di accrescere nella scintilla l'importanza dei vapori metallici (il che intanto spiega perfettamente la scomparsa delle righe dell'aria). Ciò tenderebbe ad aumentare l'intensità delle righe metalliche,

Ma da un altro lato diminuisce la parte di energia del condensatore, che si dissipa nella scintilla, e aumenta quella che si dissipa nella spirale; come appare manifestamente dalle esperienze calorimetriche della stessa memoria del Battelli e Magri. E ciò tende a diminuire l'intensità delle righe metalliche.

Quale dei due effetti prevarrà?

È naturale aspettarsi che sulle *righe corte* o di alta temperatura prevalga il secondo effetto, e sulle *righe lunghe* o di bassa temperatura prevalga il primo, come avviene effettivamente.

Ma devo notare che ciò veramente si poteva dire senza parlare di temperatura, ma solo di eccitazione più o meno energica.

La temperatura del resto a me pare in questo caso forse l'ipotesi più ragionevole, per le considerazioni esposte sopra; e non vedo la necessità di invocare la luminescenza elettrica, per rendere ragione, almeno nelle loro grandi linee, dei fenomeni luminosi dei vapori metallici, mentre di essa male si potrebbe fare a meno per spiegare quelli del gas attraversato dalla scintilla.

27. *Scariche continue e intermittenti. — Scintille con soluzioni.* — Non vedo ragione perchè nelle scariche continue

o intermittenti la causa dell'emissione sia sostanzialmente diversa, ma esse sono meno usate per produrre gli spettri dei metalli, perchè presentano lo svantaggio che l'energia si dissipa quasi tutta nel circuito metallico e non nella scintilla, e quindi questa è molto meno luminosa.

Non voglio nemmeno trattenermi sulle scintille che scoccano attraverso soluzioni saline, perchè, oltre ad avere esse minore importanza, mancherebbe il fondamento sperimentale per le nostre discussioni.

28. *Riassunto.*

a) L'*arco* ha una temperatura elevatissima, ma non si può decidere se essa sia la vera causa dell'emissione dei vapori metallici che contiene.

b) I *gas nei tubi di Plücker*, resi luminosi dalla corrente continua, sono poco caldi, ed emettono per *luminescenza spettri a bande*, o righe deboli e numerosissime, e cessano di emettere, se la temperatura si eleva molto. Gli *spettri di righe* veri e proprii pei gas rarefatti si ottengono principalmente con scariche oscillatorie, e il gas che li produce, può essere a temperatura elevata; ma l'analogia col caso della corrente continua e delle scintille e altri indizi fanno anche per questa emissione di righe, pensare all'origine di *luminescenza*.

c) Nelle *scintille il gas ambiente* e i *vapori metallici* che si svolgono dagli elettrodi, hanno comportamenti diversi tra loro; la luminosità del primo pare una vera e propria *luminescenza elettrica* prodotta immediatamente e direttamente dalla scarica, la luminosità dei secondi si può attribuire a una specie di *fosforescenza* o anche al *solo effetto della temperatura*.

L'emissione elettrica secondo la teoria degli ioni.

1. J. Stark si è molto occupato di spiegare colla teoria degli ioni la luminosità elettrica dei gas; e bisogna che di queste vedute teoriche io faccia qui un breve cenno.

Mi pare che il concetto principale dei suoi lunghi lavori ¹⁾ si possa riassumere nel modo seguente:

1) Ann. d. Phys. (4), vol. 14, p. 506, 1904. Nachrichten v. d. Königl. Gesell. d. Wissenschaften zu Göttingen, 1904, H. 3, p. 205.

Il moto progressivo degli ioni non può dare spettri di bande o di righe (solo il brusco partire o arrestarsi degli ioni può dare uno spettro continuo).

Le righe o le bande sono prodotte da vibrazioni interne delle particelle, e queste alla lor volta sono effetto degli urti degli elettroni negativi che si muovono nell'interno del gas. L'urto di questi elettroni è da considerare adunque come l'*eccitatore* della radiazione (*Strahlungserreger*).

Ma quali sono i *vibratori*, le particelle che col loro moto relativo al proprio centro di massa producono le onde luminose (*Träger*)?

Lo Stark emette l'ipotesi che i vibratori degli spettri a bande siano i sistemi di un atomo residuo positivo con un elettrone negativo nell'atto di riformare l'atomo neutro.

Per lo spettro a righe sarebbe l'atomo residuo libero che vibrerebbe dopo che la collisione con un elettrone in moto lo ha privato di uno dei suoi elettroni e ridotto ione positivo.

Ma senza discutere se tale ipotesi sia sufficientemente appoggiata dalle esperienze, dirò che questo mi pare assai bene messo in chiaro, che cioè la emissione (ove non sia un semplice effetto di riscaldamento) è una conseguenza più o meno diretta degli urti degli elettroni negativi colle particelle più complesse.

Nell'emissione di temperatura invece sono le collisioni delle molecole tra loro che producono le vibrazioni interne, le quali quindi stanno in diretta connessione colla forza viva media molecolare che determina la vivacità di queste collisioni. La validità rigorosa della legge di Kirchhoff è conseguentemente vincolata alla distribuzione maxwelliana delle forze vive.

Nel caso di un gas ionizzato percorso dalla corrente, la distribuzione delle velocità non è maxwelliana; in esso gli elettroni negativi hanno velocità e anche forze vive molto superiori alle altre particelle (lasciando anche che vi è una direzione privilegiata nel loro movimento) e quindi nei sistemi che ricevono il loro urto si determinano vibrazioni molto più energiche di quello che porterebbe la temperatura *media* del gas.

Ciò esprime lo Stark dicendo che vi è una *temperatura elettrica* assai elevata e una *temperatura termica* assai più bassa.

Con questi concetti egli interpreta i fenomeni spettroscopici; e francamente io mi permetto di dissentire da lui in alcune quistioni particolari, ma nelle vedute generali relative all'estensione del concetto di temperatura lo seguo volentieri, e vorrei anzi andare più in là.

2. Abbiamo visto come l'emissione delle fiamme si possa in un certo modo riportare a emissione di temperatura, però essendo la temperatura non quella media della fiamma, ma quella parziale del prodotto di combustione. Qualcosa di simile si può pensare per i gas o vapori percorsi dalla corrente elettrica.

E veramente la luminosità elettrica, come quella delle fiamme, ha con quella di temperatura questo a comune, l'esser cioè un effetto di *collisioni* tra le particelle del gas. Orbene, l'esperienza mostra che in quei casi in cui bisogna ammettere sia maggiore la velocità degli elettroni urtanti e quindi la vivacità degli urti, l'emissione presenta i caratteri come di più alta temperatura.

Ora io mi domando: sarebbe possibile con un complesso di urti molecolari, dovuti a una temperatura Θ , con distribuzione di forze vive maxwelliana, e convenientemente elevata, produrre nelle particelle vibranti (ammesso che esse possano esistere anche in condizioni diverse da quelle in cui si trovano nel gas percorso dalla scarica) lo stesso effetto ossia lo stesso movimento vibratorio che producono gli urti degli elettroni?

Per ciò che riguarda l'ammontare di energia media delle collisioni, certo si otterrà lo stesso effetto, pure di prendere convenientemente la temperatura Θ .

Ma la distribuzione dell'intensità degli urti sopra e sotto la media e la specie del movimento potrà esser la stessa? O piuttosto potrà aversi l'equivalenza nell'effetto complessivo di un gran numero di collisioni?

Se si ammette di rispondere affermativamente a queste domande, si giunge a ciò, che l'emissione elettrica equi-

varrebbe perfettamente a una emissione di temperatura, e quindi varrebbe per essa pure la legge di Kirchhoff

$$E = A \varepsilon (\Theta)$$

dove però A dipenderebbe dalla costituzione dei vibratori e quindi presumibilmente dalla scarica o corrente, e Θ sarebbe puramente virtuale e assai superiore alla vera temperatura del corpo.

Ora le esperienze mostrano che almeno qualitativamente le conseguenze della legge di Kirchhoff sono soddisfatte, come vedremo nel seguente capitolo; e ciò indurrebbe a credere che l'ipotesi fosse vicina al vero. Potrebbe essere un'approssimazione; ma di qual grado?

Io ho voluto solo mostrare che le ultime conseguenze della teoria ionica della luminosità elettrica nei gas non ci portano lontani dal concetto di emissione di temperatura.

3. Io credo che l'urto degli elettroni possa applicarsi alla luminescenza elettrica dei *gas* nei tubi di Plücker e inoltre nella scintilla (scintilla pilota e scariche parziali) e anche probabilmente ai vapori di metalli volatili entro tubi a vuoto, (lampade a mercurio o a cadmio). L'applicazione all'arco è molto discutibile. Quella alla luminosità dei vapori metallici nella scintilla mi pare che difficilmente si possa sostenere, per il fatto da me posto in rilievo sopra, che essi sono resi luminosi dal momento in cui si staccano dagli elettrodi, e che la loro luminosità non viene ravvivata dalle successive scariche parziali. Vero è però che spesso si osserva un distacco piccolissimo della luminosità metallica dall'estremo dell'elettrodo negativo; e ciò farebbe pensare a un'intervallo necessario perchè l'elettrone potesse acquistare la forza viva necessaria per compiere sul vapore metallico l'ionizzazione per urto, e rendere emittente l'atomo-ione metallico.

Ma il distacco si spiega anche bene col solo concetto di temperatura, cioè come effetto di raffreddamento prodotto dall'elettrodo metallico sullo strato di vapore che gli è più vicino.

Ad ogni modo, pure accettando anche in questo caso l'ipotesi degli urti degli elettroni, la inserzione di autoinduzione av-

vicina la scintilla all'arco, cioè non aumenterebbe (come dice lo Stark) ma diminuirebbe la temperatura elettrica; e questo sarebbe più in armonia colle misure di Battelli e Magri della distribuzione dell'energia nelle varie parti del circuito di scarica. Un effetto simile sarebbe prodotto nelle esperienze di Cresc e Baker¹⁾ dall'arroventamento degli elettrodi.

Il lettore può farsi un'idea da questo cenno sulla eccitazione elettrica degli spettri, di quanti problemi interessanti si presentino e possano esser trattati specialmente per mezzo dello specchio rotante e lo spettroscopio.

V. — Inversione delle righe spettrali.

1. È noto che la luce bianca di una sorgente assai intensa che abbia traversato un vapore capace di dare delle righe di emissione, può mostrare allo spettroscopio al posto di esse delle righe oscure che si dicono invertite²⁾.

E veramente le righe chiare ci sono lo stesso, ma appaiono scure rispetto al fondo continuo più splendente di esse.

2. Se le radiazioni sono di temperatura, è facile dedurre dal teorema di Kirchhoff il fenomeno e le sue leggi.

Supponiamo che il corpo C_1 emetta dei raggi, e li invii attraverso al corpo C_2 , il quale emette alla sua volta.

Fig. 3.

1) Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences, vol. 38, p. 397, 1902.

Tra due carboni coi quali era stato prima formato l'arco, e decorso un intervallo di tempo variabile dopo spento questo, essi facevano scoccare una breve successione di scintille, fotografandone lo spettro. La natura di questo dipende da quell'intervallo di tempo, cioè dalla temperatura dei carboni, in linea generale presentando carattere di più alta temperatura quando questi sono più freddi.

2) Anche per gli spettri di bande si ha l'inversione: per esempio, gli spettri dell'iodio e del bromo descritti nella nota citata.

Prendiamo a considerare per semplicità soltanto i raggi perpendicolari alle superficie dei corpi che giungono in O, e limitiamoci alle radiazioni di una sola lunghezza d'onda λ . Indichiamo con A_1 il potere assorbente e con E_1 quello emissivo di C_1 , con A_2 e con E_2 il potere assorbente e emissivo di C_2 , e con ϵ_1 ed ϵ_2 i poteri emissivi del *corpo nero* rispettivamente alle temperature Θ_1 di C_1 e Θ_2 di C_2 .

C_1 emetterà nella unità di tempo

$$E_1 = A_1 \epsilon_1$$

e C_2 emetterà

$$E_2 = A_2 \epsilon_2,$$

e delle radiazioni di C_1 trasmetterà (trascurando le riflessioni alla superficie)

$$E_1 (1 - A_2) = A_1 (1 - A_2) \epsilon_1;$$

sicchè in O giungerà l'energia

$$A_1 \epsilon_1 + A_2 (\epsilon_2 - A_1 \epsilon_1),$$

mentre, se C_2 non ci fosse, vi giungerebbe l'energia

$$A_1 \epsilon_1.$$

Cioè la intensità della radiazione sarà per effetto della presenza di C_2 aumentata di

$$A_2 (\epsilon_2 - A_1 \epsilon_1),$$

ossia aumentata veramente se è

$$(1) \quad \epsilon_2 > A_1 \epsilon_1$$

e diminuita se è

$$(2) \quad \epsilon_2 < A_1 \epsilon_1;$$

resterà la stessa se è

$$(3) \quad \epsilon_2 = A_1 \epsilon_1$$

Se il corpo C_2 ha un potere assorbente notevole per la lunghezza d'onda λ , e piccolo nell'intorno di essa ¹⁾, si avrà in questo intorno spettrale lo spettro di emissione di C_1 , e nel posto corrispondente a λ la riga spiccherà in chiaro se vale

1) Per semplicità trascuro la larghezza delle righe.

la (1), in iscuo se vale la (2), e non si distinguerà dal fondo se vale la (3) la quale rappresenta, dirò così, il *caso critico*.

Se C_1 è assolutamente nero, le tre relazioni divengono semplicemente :

$$\begin{aligned} (1') \quad & \epsilon_2 > \epsilon_1 \\ (2') \quad & \epsilon_2 < \epsilon_1 \\ (3') \quad & \epsilon_2 = \epsilon_1. \end{aligned}$$

Tutto ciò significa che una riga si inverte o no indipendentemente dal potere assorbente del corpo C_2 che la produce, ossia indifferentemente se essa sia più forte o più debole.

Che se poi il corpo C_1 è *assolutamente nero*, la riga si inverte o no a seconda che la temperatura maggiore è quella di C_1 o di C_2 poichè come è noto il potere emissivo del *corpo nero* cresce colla temperatura.

E siccome quest'aumento è maggiore per le lunghezze d'onda minori, così le righe più rifrangibili si dovrebbero vedere più distinte, sia per emissione, sia invertite.

3. Queste leggi così nette e semplici farebbero sperare una verifica sperimentale, la quale, si intende, piuttosto che come appoggio alla legge di Kirchhoff, avrebbe importanza per decidere finalmente in molti casi la quistione se le radiazioni sono di temperatura.

La esperienza più diretta sarebbe quella di inviare attraverso al vapore in istudio la radiazione del *corpo nero* e determinare le temperature corrispondenti a diverse di quelle condizioni che ho or ora denominato critiche. Ma questa esperienza presenterebbe all'atto pratico delle difficoltà forse insuperabili, specialmente per ottenere una temperatura uniforme nel vapore e per giudicare sulla presenza o no della inversione in un modo uguale per le diverse righe.

Anzi ordinariamente si osserva la inversione delle righe in condizioni diversissime da quelle che si ammettono per farne la teoria, e quindi se i fatti non corrispondono alle conseguenze di questa, ciò non è una buona ragione per ammettere l'origine di luminescenza delle righe; come d'altra parte la presenza della inversione come fatto generale, non

prova che le righe siano dovute a una radiazione di temperatura, perchè si può spiegare colla risonanza come vedremo appresso.

Il ragionamento che io ho posto in principio di questo capitolo è quello classico su cui da Kirchhoff in poi si è per molto tempo fondata ogni discussione di confronto tra righe chiare e righe scure, sebbene si desse anche la spiegazione fondata sulla risonanza; ma questa veniva tenuta in minor conto. E se il Lockyer nel suo libro, rivolto a un pubblico non strettamente scientifico, la preferisce, credo che lo faccia solo perchè la considera come più intuitiva.

4. Ma prima di esporre i concetti moderni sulla inversione spettrale, mi par bene riferire dei fatti fermandomi specialmente sulle belle esperienze di Liveing e Dewar, che si presero cura di verificare questo principio generale per i vari modi più usati di produzione degli spettri.

Prima di tutto voglio ricordare la esperienza semplicissima, ma molto elegante ideata da Kirchhoff per la dimostrazione del fenomeno ¹⁾. I raggi solari cadono sulla fenditura dello spettroscopio attraversando una fiamma rossa per litio. La riga rossa si vede invertita, ma indebolendo i raggi solari prima della fiamma con l'interposizione di un vetro smerigliato posto a distanza sempre più grande dalla fenditura, si arriva a un punto in cui la riga scura scompare per dar luogo a una chiara, allontanando ancora il vetro.

Ma spesso la sorgente delle radiazioni che danno il fondo è unita a quella che dà la riga. Possono anzi essere i diversi strati di una massa di vapore, e ciò è frequente nelle fiamme e nell'arco, ove ha luogo il fenomeno seguente.

La luce emanata dalla parte interna in cui il vapore è più denso e più fortemente eccitato, giunge allo strumento traversando uno strato superficiale dello stesso vapore meno denso ed eccitato meno.

Questo strato esterno produce una riga scura sottile, entro la chiara espansa di emissione prodotta dallo strato interno. Il più delle volte la riga scura occupa precisamente il

1) Kayser. Handbuch. B. 2.

mezzo; ma può essere anche più raramente sopra una parte, se la riga non si espande ugualmente dai due lati. Questa è la così detta autoinversione, e si osserva spesso nelle fiamme e nell'arco e anche nelle scintille.

5. Le prime esperienze ¹⁾ di Liveing e Dewar erano più che altro semplici esperienze di assorbimento, e venivano effettuate per mezzo di una canna di ferro chiusa a un estremo e arroventata entro un fornello, nella quale si faceva circolare una leggera corrente di idrogeno, e si gettavano i metalli da studiare, metalli facilmente volatili, cioè *litio, sodio, tallio, potassio, magnesio, indio*, ecc.

In tal modo si formava una massa di vapori assai densi che assorbivano la luce emessa dalle pareti e dal fondo del tubo, dando le righe scure corrispondenti alle loro lunghezze d'onda caratteristiche.

Queste righe non si vedono tutte con eguale facilità; si notano influenze reciproche di un metallo sull'altro, fino al punto che alcune righe sono presenti solo col miscuglio di due metalli (per esempio *potassio e magnesio*) e non sono date da ciascuno di essi.

Ma per ottenere in maggior numero le righe invertite, cioè per ottenerle anche per metalli meno volatili, Liveing e Dewar ²⁾ ricorsero a fiamme o archi elettrici nell'interno di crogiuoli speciali di sostanze refrattarie come calce o magnesia o anche di carbone, e in tal caso il crogiuolo stesso serviva da elettrodo positivo.

In queste esperienze fu anche usata, per liberare i metalli dai loro composti, polvere di alluminio, che a temperature elevatissime è uno dei più energici riducenti che si conoscano.

6. Liveing e Dewar si occuparono molto e ripetutamente di siffatte esperienze sulla inversione delle righe con questi e simili apparecchi. I risultati che più ci interessano sono riferiti nella memoria « *Sulle circostanze che producono l'inversione delle righe spettrali dei metalli* » ³⁾. In essa gli autori registrano diverse specie di inversioni:

1) Proc. Roy. Soc., vol. 27, p. 132, 350, 494.

2) Proc. Roy. Soc., vol. 28, p. 352, 367, 471, 1879.

3) Cambr. Proc. 4, p. 256, 1882.

1° L'autoinversione delle righe espanse.

2° L'inversione completa il cui fondo è dato sia dal foltissimo spettro discontinuo dell'arco, sia dallo spettro continuo dei carboni.

3° L'inversione delle righe di un metallo sul fondo delle righe espanse di un altro.

L'inversione delle righe può esser prodotta su scala più larga, inviando nell'arco una corrente di gas riducente (idrogeno, gas illuminante, ammoniac) attraverso a uno dei carboni perforato all'uopo.

In questo modo l'assorbimento degli strati esterni viene aumentato, e ciò probabilmente perchè il gas riducente protegge il vapore metallico dall'ossidazione e quindi agevola la formazione di uno strato più denso di esso intorno all'arco. L'effetto è un indebolimento delle righe o la inversione, o anche, se l'emissione e l'assorbimento si contrabbilanciano, la loro scomparsa. Il cloro produce un effetto opposto.

7. Un altro modo elegante di studiare le righe invertite e il loro rapporto con quelle di emissione è il seguente.

Un carbone perforato e uno pieno sono introdotti in opportune perforazioni praticate in un blocco di calce in modo che il carbone pieno col suo estremo incontri l'altro a metà. Tra i due carboni si forma l'arco e così il carbone perforato che funziona da positivo viene portato a una temperatura molto elevata.

L'immagine del suo interno è mediante una lente proiettata sopra la fenditura di un apparato spettrale, e si ottiene così sopra e sotto uno spettro continuo dato dalle pareti del foro, solcato da righe oscure provenienti dai vapori metallici, che sono nell'interno, o prodotti da impurità del carbone o introdottivi appositamente. Nel mezzo invece si mostrano le righe di emissione corrispondenti ed altre che non compariscono tra le invertite.

Di questi e degli altri esempi di inversione Liveing e Dewar pubblicano belle fotografie ¹⁾.

1) Qui voglio notare così di passaggio che quando si lavora colla fotografia, la inversione dell'effetto fotografico per posa eccessiva può simulare la inversione spettrale come avverte Hartley (Proc. Roy. Soc. vol. 34, p. 84, 1882) che consiglia, per mettersi al

Infilando nel carbone perforato una bacchettina pure di carbone che vi vada precisa, si può produrre un fondo luminoso di splendore più o meno intenso secondo il punto a cui si fa giungere l'estremo della bacchettina, e così le righe si invertono anche nel mezzo.

Ma per quanto si avanzi la bacchettina, non si riesce a invertirle tutte, e quelle che si invertono, non si invertono insieme.

8. E qui mi sia permesso di ritornare ancora un poco sulla questione dell'emissione di temperatura, cercando di interpretare questa esperienza.

La parte più profonda del tubo di carbone quando l'estremo della bacchetta scorrevole si trova al punto conveniente, costituisce un ambiente quasi del tutto chiuso a temperatura approssimativamente uniforme, e quindi la sua emissione deve essere quasi uguale a quella del *corpo nero*. Se si potesse limitare lo strato dei vapori metallici alla parte che ha questa temperatura costante, si avrebbe un criterio per giudicare se l'emissione è di temperatura; perchè manifestamente allora le righe non si dovrebbero distinguere in chiaro nè in oscuro dal fondo.

Ma i vapori si estendono necessariamente in parti più fredde del tubo, più o meno a seconda della loro natura, e ciò, anche nel concetto dell'emissione di temperatura, rende ragione delle inversioni e spiega come possano essere più o meno visibili per diversi metalli.

Ma come si spiega che alcune righe anche tra quelle di uno stesso metallo si possono invertire più facilmente di altre, e che anzi alcune non si invertono affatto?

Anche di ciò possiamo farci una ragione nel concetto dell'emissione di temperatura, tenendo conto della molteplici-

coperto di tale errore, di fare fotografie con varie pose, e vedere se l'inversione si presenta in quelle meno posate. Ma spesso basta anche osservare le linee all'orlo dello spettro: se sono aperte a forma di imbuto l'inversione è reale, se sono invece chiuse è effetto fotografico. Di tale criterio si valsero Liveing e Dewar.

Se poi si lavora con scariche, la cosa è più complicata, e si può avere il così detto effetto Clayden che pure simula l'inversione: vedi R. Wood. Phil. Mag. serie 6, vol. 4, p. 606, 1902, vol. 6, p. 577, 1903.

cità degli spettri, come cercherò di mostrare con l'esempio più curioso, che è quello delle linee del calcio.

La riga $\lambda = 4226$ ¹⁾ appare facilmente invertita nel tubo di carbone, mentre le due corrispondenti alle H e K del sole si vedono talvolta soltanto per emissione togliendo la bacchettina interna.

Ora, sempre rimanendo nel concetto della emissione di temperatura, si sa che le righe H e K sono di *alta temperatura* (esse compaiono solo nell'arco e nelle scintille) e la 4226 è di bassa temperatura (compare anche nelle fiamme e si attenua passando dall'arco alle scintille). Quindi il vapore più esterno, meno caldo, è capace di emettere e anche di assorbire la 4226, ma non è capace di emettere e nemmeno di assorbire le H e K. Ciò è in armonia, non solo coi fatti riferiti, ma anche colle idee teoriche espresse dal Lockyer nel suo libro ²⁾, che cioè l'alta temperatura non solo produca l'emissione delle righe HK, ma anche sia necessaria perchè si possa avere l'assorbimento corrispondente. Riferendosi alla legge di Kirchhoff, l'alta temperatura renderebbe notevole il valore di A corrispondente alle righe HK che per temperatura inferiore sarebbe sensibilmente zero, oltre a rendere maggiore il valore di ϵ . L'ipotesi della dissociazione, se anche non è, nella forma in cui la esprime il Lockyer, conforme alla realtà, ha il vantaggio di dare un modello intuitivo del fenomeno; in sostanza essa viene a dire questo, che i vari spettri di un corpo non sono prodotti dagli stessi organi vibranti in vari modi, ma da organi vibranti diversi. Ma su ciò dovremo tornare a proposito di un'altra esperienza di Liveing e Dewar, discutendola secondo il concetto di luminescenza e non secondo quello di temperatura.

9. L'autoinversione delle righe è il fenomeno che si presta meglio per mostrare le relazioni tra le righe chiare e le scure.

1) 422,6898 nell'arco, secondo il campione di Rowland.

2) Studi di Analisi Spettrale, 175 e seg.

Sperimentando coll' arco si riscontra che solo le *righe lunghe* ¹⁾ mostrano facilmente l'autoinversione, e ciò prova che lo strato esterno assorbe, delle lunghezze d'onda caratteristiche del vapore in esame, soltanto quelle che esso è capace di emettere al grado di eccitazione relativamente debole a cui si trova.

10. Ma uno speciale interesse ha l'esperienza colla quale Liveing e Dewar ottennero l'autoinversione delle righe dell'idrogeno in un tubo di Plücker. Questo era presso a poco della solita forma e veniva osservato per il lungo in modo che la luce assai intensa prodotta dal capillare doveva traversare il tratto pure luminoso, ma più debolmente, del tubo largo. La rarefazione non doveva essere maggiore di quanto è necessario per dare facile passaggio alle scariche del rocchetto usando un condensatore. Orbene, proiettando sulla fenditura dello spettroscopio per mezzo di una lente l'immagine della sezione del tubo, si vedevano con forte dispersione nel mezzo le righe enormemente espanse prodotte dal capillare che prendevano l'aspetto come di tratti di spettro continuo, e sopra e sotto le righe più sottili prodotte dal tubo largo; e in corrispondenza di queste si vedevano nello spettro di mezzo le righe invertite; ciò veramente solo per la riga rossa e per la azzurra (rispettivamente, la C e la F di Fraunhofer).

Questa esperienza è molto istruttiva per più ragioni. In primo luogo perchè è, credo, il solo esempio descritto di inversione per i gas rarefatti. In secondo luogo perchè serve mirabilmente a chiarire ciò che abbiamo già notato, e che è

1) Credo opportuno ricordare il significato di questa denominazione che mi occorre di usare spesso.

Proiettando sovra la fenditura dello spettroscopio l'immagine di una sorgente luminosa, si analizza l'emissione delle varie parti di essa, per esempio proiettandovi l'immagine dell'arco in modo che l'asse dei carboni sia perpendicolare alla fenditura, si vede che alcune righe sono date da tutta l'estensione dell'arco e altre solo dalla parte centrale; le prime risultano più lunghe delle seconde, e corrispondono rispettivamente ad eccitazioni meno vive e più vive. Il Lockyer, che specialmente si è valso di questo metodo, ha introdotto appunto la semplice distinzione di righe *lunghe* e *corte*.

Il metodo si applica con vantaggio anche alle scintille, ma qui è più interessante l'osservazione fatta disponendo lo spinterometro parallelo alla fenditura in modo che l'immagine della scintilla vi sia proiettata sopra longitudinalmente.

In tal modo si riconosce quali righe si avanzino più lontano, quali meno dagli elettrodi.

di importanza capitale per la spettroscopia, che cioè l'eccitazione (in questo caso elettrica) non solo produce le righe di emissione, ma anche quelle di assorbimento. Mi spiego: una colonna di idrogeno, per quanto lunga, non percorsa dalla scarica non avrebbe esercitato nessun'assorbimento sulle righe emesse dall'idrogeno del tubo capillare. L'inversione si produce invece per effetto di uno strato di piccolo spessore, purchè esso sia eccitato in modo da produrre le stesse righe, ma più debolmente. Con un concetto perfettamente simile abbiamo sopra cercato di spiegare il fenomeno presentato dalle righe del calcio con considerazioni di temperatura.

Ma già per l'arco abbiamo parlato di eccitazione in generale. E veramente dopo questo ultimo esempio, in cui molto probabilmente si tratta di luminescenza, si comprende addirittura la necessità di adoprare il termine generico *eccitazione* senza specificarne la natura.

E possiamo concludere che essa non solo fornisce l'energia alle vibrazioni, ma costruisce o piuttosto svolge o libera un organo capace di emettere e assorbire le stesse lunghezze d'onda. Vedremo come ciò venga chiarito colla ipotesi della risonanza; ora si noti che la densità nei diversi strati che producono la riga espansa e la inversione, non deve considerarsi come vera densità del vapore o gas, poichè in questo caso la densità dell'idrogeno è, se mai, minore nel capillare che è più caldo; sibbene va interpretata come densità di questi ipotetici vibratori che sono dovuti all'agente stesso che provoca l'emissione. È veramente essa che determina la larghezza delle righe spettrali e voglio, seguendo lo Stark, chiamarla *densità ottica*.

11. Ed ora conviene avvertire che la invertibilità delle righe, come risulta dalla osservazione spettroscopica, ha poco di assoluto, perchè il numero delle righe che mostrano l'inversione, necessariamente dipende anche dalla potenza risolutiva dello spettroscopio.

Ciò pure si osserva bene per le autoinversioni. Il Kayser cita l'esempio dello spettro di arco del ferro che, fotografato con due prismi, mostra pochissime righe invertite, mentre il loro numero cresce molto adoprando un reticolo concavo e

cresce coll'ordine degli spettri usati; e siccome molte righe presentano una sottilissima linea di inversione nel mezzo, è naturale pensare che con strumenti di forza risolutiva considerevolmente superiore a quella degli strumenti di cui ora si può disporre, il numero delle inversioni crescerebbe ancora molto.

12. Da tutti questi fatti e da altri ancora che non sto a riferire, apparisce che le righe di emissione e le invertite sono due aspetti diversi dello stesso fenomeno, e saremmo condotti a pensare che tutte le linee di emissione siano suscettibili di invertirsi. Ma in vero non vi sono esperienze tali da rendere pienamente giustificata una conclusione così generale, e anzi alcuna se ne può citare contro di essa.

È qui il caso di ricordare, sebbene si tratti di spettri di bande che non hanno valore per la spettroscopia celeste, che Hittorf non riuscì a invertire lo spettro emesso da gas rarefatti percorsi dalla corrente continua, e ne dedusse anzi un argomento per confermare la natura di *fosforescenza* (come diceva lui) di questi spettri.

E questo era naturale in un tempo nel quale si considerava ancora ogni inversione come conseguenza della legge di Kirchhoff, e quindi proprietà caratteristica delle radiazioni di temperatura.

Ma ora si tende invece a considerare l'inversione come una proprietà generale relativa a ogni specie di emissione, e sappiamo dalle ricerche di J. Kurke ¹⁾ che anche il vetro di uranio assorbe i raggi, che è capace di emettere per fluorescenza, più intensamente appunto quando li emette ²⁾. E si trova difficoltà a spiegare un caso di eccezione ³⁾ come quello della esperienza di Hittorf, la quale però forse non ha un valore decisivo, perchè non toglie il dubbio che in condizioni più favorevoli l'inversione si potesse osservare.

1) Phil. Trans. 191, p. 83, 1893.

2) È vero che l'esperienza del Kurke fu contraddetta dal Camichel (C. R. vol. 140, N. 3, 1905), ma il Kurke in un recente numero della Nature ribatte la confutazione, e ricorda altre esperienze simili. Sicchè è da ritenere che il risultato suo sia giusto.

3) Un'altra eccezione è presentata dalla riga D_2 dovuta all'elio, che apparisce come riga di emissione nella cromosfera e non come riga di Fraunhofer nell'ordinario spettro solare.

Invece non è stato rilevato nessun caso di eccezione, per quanto ho potuto riscontrare, alla proposizione inversa; che cioè *tutte le righe invertite corrispondono a righe di emissione*.

13. Questa corrispondenza basta allo spettroscopista per accertare la presenza degli elementi nello *strato invertente* di un astro, poichè egli può a buon diritto ammettere che le righe vedute in iscuero, a causa dell'inversione, potrebbero ottenersi chiare per emissione dalla stessa sostanza; e quindi le conclusioni che egli ricava dalla coincidenza con righe di emissione ottenute in laboratorio sono pienamente giustificate quando danno risultato positivo. Dei risultati negativi bisogna sempre diffidare.

14. Ma oltre alle coincidenze delle lunghezze d'onda, quali altre relazioni passeranno tra lo spettro invertito e lo spettro di emissione di un corpo?

Veramente abbiamo visto che le righe non si invertono tutte colla stessa facilità. Liveing e Dewar hanno anzi trovato che quelle più facilmente invertibili non sono sempre le più forti, ma sono forti e persistenti, ed assegnavano ad esse una speciale importanza. Esse sono più frequenti nella parte più rifrangibile dello spettro; e ciò suggerì ai due spettroscopisti inglesi l'idea che le righe visibili siano armoniche inferiori (ossia qualcosa di analogo ai suoni di Tartini) di righe principali poste nell'ultravioletto. Ma anche prescindendo da ciò, della maggior frequenza delle inversioni nella parte più rifrangibile si può dare una interpretazione semplicissima.

Abbiamo già notato che nel concetto di temperatura le righe invertite devono avere maggiore risalto per lunghezze d'onda minori; esse potranno quindi più facilmente raggiungere quel certo risalto che è necessario per rendere l'inversione visibile. A tale interpretazione pare che propenda il Kayser.

Ma talvolta righe con lunghezza d'onda minore si invertono invece più difficilmente di righe con lunghezza d'onda maggiore (per esempio le tre righe del calcio di cui si è discusso a lungo); sicchè anche questa spiegazione vale fino a un certo punto soltanto.

Lo stesso si dica riguardo alla limitata potenza risolutiva degli strumenti. In conclusione, le esperienze conducono ad ammettere una invertibilità propria per ciascuna riga, che non va di pari passo colla forza di essa, e può darsi anche che in qualche caso manchi addirittura.

Più recentemente è stato trovato che l'invertibilità va di pari passo per righe della stessa serie: per i metalli alcalini le righe della serie principale sono le più invertibili.

15. Ciò mette il sospetto che ogni ulteriore conclusione fondata sulla intensità relativa delle linee invertite, o anche sulla loro presenza o assenza, o, in altre parole, ogni applicazione della *molteplicità degli spettri* alla spettroscopia celeste, venga a mancare di fondamento. Ma nel fatto non è così; perchè se si ammette un parallelismo perfetto tra le righe invertite e le righe di emissione, si giunge appunto, tenendo conto della *molteplicità* degli spettri, a spiegare quelle apparenti discordanze di cui abbiamo parlato fin qui.

Il caso del calcio è ancora il più istruttivo, e fu quello forse che aperse al Lockyer il campo alle più ardite speculazioni di spettroscopia celeste.

La spiegazione che ne abbiamo data si può estendere nel modo seguente senza parlare più di temperatura.

Ammettiamo che le righe non sieno ottenibili tutte colla stessa eccitazione, ma si possano distinguere per questa diversi gradi, a cui esse compaiono per poi scomparire di nuovo talvolta quando sia raggiunto un grado di eccitazione più elevato. Quanto più è elevato il grado di eccitazione, e tanto più deve essere intensa la sorgente di luce bianca capace di invertire la riga, ossia capace di dare un fondo continuo che nell'intorno di essa superi la somma dell'intensità trasmessa ed emessa dal vapore appunto nella riga. Per le radiazioni di temperatura la legge di Kirchhoff ci dà il modo di precisare perfettamente quando ciò debba avvenire, ma in generale potremo dire soltanto che a gradi di eccitazione via via più elevati dovranno corrispondere per il fondo intensità via via maggiori, ossia se il fondo è dato da radiazioni di temperatura (prodotte, per esempio, da un solido incandescente) corrisponderanno per quest'ultimo temperature via via più elevate.

La temperatura del *corpo nero* che dia il fondo continuo sarebbe, quando si verifica la *condizione critica*, uguale a quella del vapore, se emettesse per temperatura, cioè in ogni caso uguale alla *temperatura della radiazione emessa dal vapore* (nel concetto del Wien).

Siccome nei nostri laboratori l'eccitazione di un gas o vapore si può spingere a un grado elevatissimo, ma non così la incandescenza di un solido, ne viene che la inversione completa su fondo continuo si otterrà facilmente soltanto per le righe corrispondenti a un grado di eccitazione basso: e ciò è in accordo colle esperienze citate.

Le autoinversioni si presentano solo quando esistano insieme due gradi diversi di eccitazione, e quindi saranno esse pure (come avviene nel fatto) più facili a ottenere nelle righe più *lunghe*.

Così, mi pare, tutto torna perfettamente, e resta confermata la completa corrispondenza tra lo spettro invertito e lo spettro di emissione. Cioè, dalla presenza di certe piuttosto che di certe altre righe invertite di un corpo semplice, potremo farci, ugualmente bene come se fossero righe chiare, il concetto del grado di eccitazione cui è sottoposto quel corpo nello strato invertente di un astro, non solo, ma anche della intensità specifica di emissione del fondo continuo della sua fotosfera; e se (come molti ritengono per il sole) questa si considera formata da particelle solide o liquide, e quindi si esclude per essa la luminescenza, possiamo anche farci un'idea della sua temperatura.

Il vero fondamento della analisi spettrale dei corpi celesti è adunque nel principio della inversione dello spettro quale risulta da queste esperienze.

VI. — Risonanza e dispersione anomala.

1. La spiegazione dell'inversione spettrale si ha nel fenomeno di risonanza.

Se si ammette che le righe sieno dovute a sistemi capaci di vibrare con determinati periodi, e propagare le loro vibrazioni nell'etere, qualunque poi sia l'ipotesi che si faccia sul

meccanismo di questi vibratorî, ne viene di conseguenza che essi risponderanno a vibrazioni che si propagano nell'etere, e le oscillazioni in essi destate saranno di ampiezza notevole solo quando le oscillazioni incidenti hanno periodo vicinissimo ad uno dei periodi caratteristici.

Se il periodo è notevolmente diverso, la radiazione passa oltre senza indebolirsi, ma se il periodo è tanto prossimo che si abbia la risonanza, ecco che una parte dell'energia della radiazione si comunica ai vibratorî, le cui oscillazioni aumentano sempre di ampiezza, fino a un regime che si stabilisce quando l'energia ricevuta sia pari a quella perduta.

Di questa in generale bisogna considerare due porzioni:

1) quella che il risonatore dissipa in se stesso, e che poi viene trasformata in energia termica o chimica o altro nel corpo assorbente;

2) quella che il risonatore emette, formando le così dette onde secondarie.

Tutte e due saranno alimentate dall'energia della radiazione primaria, e quindi questa dovrà, dopo incontrato il risonatore, risultare indebolita per doppia causa.

Anche se la prima perdita non ci fosse (come nel caso studiato dal Planck) basterebbe considerare che le onde secondarie e le primarie si trovano in opposizione di fase sul prolungamento della retta che congiunge l'origine col risonatore, per giungere alla conclusione che si indeboliscono a vicenda interferendo ¹⁾.

2. Se si applicano queste considerazioni a un vapore che presenti una riga di lunghezza d'onda λ , su cui cade la luce bianca, si giungerà alla conclusione che i raggi di lunghezza d'onda diversa da λ passano inalterati; quelli di lunghezza d'onda λ invece saranno indeboliti, di modo che la luce trasmessa presenterà la riga invertita, e l'energia che manca ai raggi trasmessi sarà in parte comunicata al corpo (assorbita) e in parte andrà nelle onde secondarie, ossia si produrrà per la lunghezza d'onda stessa λ una specie di riflessione diffusa.

1) Righi. Ottica delle oscillazioni elettriche, p. 43. — Planck. Wied. Ann. vol. 57, p. 1, 196.

Ma qual frazione della energia ricevuta rappresenta questa energia diffusa in onde secondarie? P. Drude ¹⁾ ne tenta un calcolo per le righe del sodio, ma non giunge che ad assegnare due limiti, superiore e inferiore, molto lontani l'uno dall'altro. Nella ipotesi più sfavorevole, l'energia diffusa sarebbe circa un millesimo della ricevuta, ma potrebbe anche essere una frazione assai maggiore.

E qui rimando alla mia nota sulla fluorescenza del vapore di sodio, e torno ancora alla molteplicità degli spettri.

3. La presenza di una riga o serie di righe, sia per assorbimento sia per emissione, indicherebbe la presenza di un certo vibratore.

Quando di un elemento son presenti per emissione o per assorbimento alcune righe e altre no, ciò dipenderebbe da questo: che quelle condizioni di temperatura o altro permettono la esistenza di certi vibratori e non di altri, prescindendo da ciò che può esser quistione di sensibilità del metodo di osservazione e dai casi in cui, essendo la temperatura inferiore all'incandescenza, non si vede la riga per emissione, ma solo per assorbimento.

Questa è, secondo me (e, quel che più conta, Kayser esprime in altra forma un concetto simile) la parte vera della teoria della dissociazione di Lockyer.

4. Ora, il Prof. Antonio Garbasso ²⁾, che per il primo ha ardito di portare il rigore matematico nei concetti teorici della emissione della luce e della struttura degli atomi, ed è riuscito a risultati che mostrano un mirabile accordo coi fatti, spiegando le doppiette e le triplette, le serie di Kayser ecc., giunge ad una conclusione, che, almeno presa alla lettera, contraddice alle cose dette sopra, affermando:

« nella scintilla e nell'arco gli atomi *non* si dissociano, ma in diverse regioni i diversi conduttori sono variamente eccitati » aggiungendo però che gli atomi di alcuni metalli sono probabilmente dissociati nel sole.

Nella sua teoria gli atomi hanno per modelli certi si-

1) P. Drude. *Lehrbuch der Optik*, p. 492.

2) N. Cimento, serie V, tom. 9, p. 31, 113. 1905. — Mem. dell' Acc. delle Sc. di Torino, (2), vol. 53, p. 127. 1903; vol. 54, p. 402. 1904. — Boltzmann, *Festschrift*, 1904.

stemi di conduttori più o meno complessi, a ciascuno dei quali corrisponde una serie di righe.

Ora egli mostra che i periodi di un conduttore sono modificati un poco dalla vicinanza di un altro conduttore, e quindi se in una regione dell'arco o della scintilla i conduttori fossero insieme, in altri mancassero alcuni, si dovrebbero da queste regioni ottenere righe non perfettamente coincidenti, il che non è. Invece negli spettri di diverse parti del sole si osservano questi spostamenti di alcune righe di un elemento, mentre altre rimangono a posto, o sono spostate in senso contrario. Dunque negli archi e nelle scintille mancherebbe quella dissociazione che è presente nel sole; (salvochè per gli spostamenti non si accettino le altre spiegazioni più note, ma forse meno probabili, del principio di Doppler e della dispersione anomala).

Ciò è perfettamente logico, ma non si può escludere che vi possano essere altre forme di scomposizione che non siano l'allontanamento dei singoli conduttori di un sistema, ma che formino addirittura nuovi conduttori.

Quindi chi accetta la teoria della dissociazione del Lockyer opportunamente modificata, può anche accettare i risultati delle belle ricerche di A. Garbasso, perchè mi pare che si riferiscano a due lati diversi del fenomeno.

5. Ma nel concetto della risonanza si giunge coi metodi della fisica matematica a prevedere una perturbazione anche per i raggi che si avvicinano assai in lunghezza d'onda alla riga, pure essendo ad essa esterni.

Questa perturbazione consiste in un andamento caratteristico dell'indice di refrazione, cioè nella *cosiddetta dispersione anomala*.

La teoria della dispersione è stata oggetto di un numero grandissimo di ricerche per parte di molti fisici matematici da Cauchy a Drude. Solo quando vi si introdusse il concetto della risonanza, si ottennero espressioni che con buona approssimazione corrispondono all'esperienza,

Di queste la più importante è quella detta di Sellmayer o di Ketteler-Helmholtz, perchè trovata da questi matematici per vie diverse. Indicando con n l'indice di rifrazione, con

λ_0 la lunghezza d'onda caratteristica delle vibrazioni proprie del corpo, con λ la lunghezza d'onda corrente e con a ed m due costanti, si ha per i raggi che sono esterni alla regione di assorbimento, cioè nel caso che ci interessa alla riga, la formula

$$n^2 - a^2 = \frac{m}{\lambda^2 - \lambda_0^2}$$

che mostra l'influenza della riga nel suo intorno.

Se sono vicine più righe, il loro effetto si sovrappone, e si ottiene per il caso di due linee vicine di differente intensità, che corrisponde al vapore di sodio:

$$n^2 - a^2 = \frac{m_1}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{m_2}{\lambda^2 - \lambda_2^2}.$$

Sperimentalmente il fenomeno della dispersione anomala è stato per ora osservato in un piccolo numero di vapori solo per alcune righe, ma già sopra di esso si sono fondate teorie ardite riguardo alla costituzione del sole, che capovolgerebbero buona parte delle idee universalmente accettate.

6. La prima di esse fu pensata da Lord Kelvin ¹⁾. Essa risponderebbe al desiderio di rendersi ragione di un fatto difficile a spiegare, sul quale anzi credo si sia troppo poco studiato e discusso.

Le righe di Fraunhofer dovute ai metalli sono spesso più sottili di quelle che noi possiamo produrre, facendo traversare alla luce una fiamma mediocrementemente carica di vapore metallico. Quelle dell'idrogeno non sono certo notevolmente più grosse delle invertite che ottennero Liveing e Dewar collo spessore di pochi centimetri di questo gas rarefatto.

E nel sole gli strati che producono l'inversione hanno uno spessore immenso, e la densità non vi può essere nemmeno estremamente piccola.

Ora questa grave difficoltà sarebbe tolta da un modo di considerare i fenomeni, proposto, o meglio soltanto esposto, da Lord Kelvin in una breve nota nella quale egli però non dichiara esplicitamente che valore gli attribuisca.

1) Phil. Mag., (5), vol. 47, pag. 302, 1899.

Egli premette che le esperienze di H. Becquerel danno una conferma della formula di Sellmeier

$$n^2 = 1 + \frac{M_1 \tau^2}{\tau^2 - k_1^2} + \frac{M_2 \tau^2}{\tau^2 - k_2^2}$$

dove τ indica il periodo di vibrazione corrente, k_1 e k_2 quelli caratteristici, delle due righe D_1 D_2 ¹⁾; e osserva che per valori di τ poco inferiori a k_1 e a k_2 si ha per n un valore immaginario, e corrispondentemente la luce non può esser trasmessa, e ciò dà luogo all' *ombra* delle righe. Per valori poi tali, che pur essendo reale, n è assai diverso dall' unità, si può applicare la nota formula di Fresnel

$$1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2$$

per calcolare la perdita di luce per riflessione, e così si può spiegare la *penombra*.

La riga in ombra e penombra verrebbe così a non dipendere affatto dallo spessore, ma solo dalla densità del vapore.

7. Veramente ardisco di obiettare, che nel caso di una fiamma o simili, manca una superficie netta di separazione tra essa e l' ambiente, cioè quel salto brusco nell' indice di rifrazione che è necessario per giustificare l' applicazione della formula di Fresnel.

Oltre a ciò, se questa teoria corrispondesse alla realtà, le linee invertite dovrebbero coll' aumento della densità spostarsi verso la parte più rifrangibile dello spettro, e precisamente il loro centro dovrebbe distare di metà della larghezza dell' ombra dalla posizione delle righe estremamente sottili.

Tale spostamento non è stato mai osservato per le righe del sodio.

Ciò non ostante io volli ancora ricercarlo in condizioni scelte appositamente per renderlo visibile in modo speciale se vi fosse.

Essendo già persuaso che un assorbimento vero e proprio dovesse aver luogo, mi proposi non già di verificare se le ri-

1) Questa formula equivale perfettamente all' altra riferita sopra.

ghe scure fossero dovute totalmente a un effetto di riflessione, ma piuttosto se questa potesse avere nella loro produzione una parte sensibile. Ciò si sarebbe manifestato con uno spostamento delle righe larghe date dal vapore molto denso, rispetto a quelle sottilissime date dal vapore pochissimo denso.

8. Cercai adunque :

a) Che la densità del vapore di sodio potesse farsi variare entro limiti larghi, e soprattutto si potesse rendere assai grande.

b) Che lo spessore fosse invece piccolo il più possibile.

c) Che la disposizione spettrale fosse di alta dispersione e si prestasse ad apprezzamenti delicati.

d) Che fosse evitata ogni influenza della dispersione anomala per via diversa da quella in quistione (deviazione dei raggi fuori dello spettroscopio) ¹⁾.

Usai lo stesso reticolo di Rowland, (di 6 piedi di raggio di curvatura) che mi aveva servito per lo studio interferenziale della dispersione anomala, osservando lo spettro di 2° ordine.

Le righe invertite erano ottenute con una fiamma prodotta nel seguente modo (fig. 4).

Fig. 4.

1) A questo proposito sono state fatte esperienze eleganti da Julius e da Ebert.

Una corrente di idrogeno asciutto era guidata nel tubo da saggio T, nel cui fondo era posto un po' di sodio metallico che veniva scaldato dalla fiamma F, posta sotto, e produceva così i vapori che, trascinati dall'idrogeno, colorivano intensamente la fiamma accesa sul becco a ventaglio V ¹⁾.

Dal luogo di osservazione si poteva regolare sia la corrente d'idrogeno, sia quella del gas del bruciatore che serve al riscaldamento, e si poteva ottenere così la fiamma nelle condizioni desiderate.

La luce che serviva a dare lo spettro continuo era quella di una lampada Serrin a centro fisso (fig. 5).

Fig. 5.

Il prisma P a riflessione totale serviva a rendere orizzontali i raggi del cratere; questi, limitati da un diaframma assai largo, venivano dalla lente L concentrati sulla fenditura a cui era quasi accosta la fiamma che aveva forma schiacciata, ed era traversata nel senso del minore spessore (circa 1 cm).

La posizione delle righe veniva determinata con un micrometro oculare a vite micrometrica con testa divisa in 100 parti, munito di un reticolo a forma di X che serviva ottimamente per il caso mio (fig. 6).

Con esso si prendeva bene la posizione anche delle righe larghissime regolandosi colle quattro intersezioni del loro margine sinistro e destro coi fili.

È da notare che la penombra ha pochissima estensione.

Per fissare la posizione delle righe sottili servivano quelle che sono sempre presenti invertite nell'arco, a causa dei sali

1) Ho appreso questo modo di produrre la fiamma del sodio da un lavoro di R. Wood.

di sodio contenuti in piccola quantità nei carboni ordinari; e non sarebbe stato opportuno accrescerne la larghezza.

Fig. 6.

Aggiustavo adunque il reticolo sulla riga larga, spengevo la fiamma di sodio, e osservavo la posizione del reticolo rispetto alle righe sottili date dall' arco.

La coincidenza era quasi perfetta, e le piccolissime divergenze dipendenti da imperfezione dell' apprezzamento si verificavano indifferentemente in un senso o nell' altro, sia per la riga D_1 che per la D_2 .

Feci anche delle serie di misure alternate colla fiamma d' idrogeno e sodio, e senza, e poi presi le medie delle misure delle due categorie, considerando le divergenze tra esse in rapporto alla divergenza di ciascuna misura dalla media, e alla distanza D_1 D_2 .

Delle diverse serie fatte variando anche la densità del vapore nella fiamma, ne riferisco due fatte sulle righe D_1 e D_2 con vapore tanto denso quanto più si può senza che le righe espandendosi si accostino troppo tra loro, e un' altra di misure fatte tutte sulla D_2 che è la più larga delle due.

D_1	
sottile	larga
0,45	
	0,45
0,45	
	0,41
0,42	
<hr/>	<hr/>
0,44	0,43 medie

D_2	
5,50	
	5,50
5,49	
	5,495
5,505	
-----	-----
5,50	5,50 medie

distanza $D_1 D_2 = 5,06$

altra posizione dell' oculare micrometrico

D_2	
strette	larghe
5,45	
5,49	
5,44	
	5,52
5,47	
	5,49
5,45	
	5,425
5,48	
	5,405
5,445	
-----	-----
5,46	5,46 medie

9. Mi pare che questi numeri mostrino che manca uno spostamento sensibile delle righe coll' allargamento, e se si nota che, secondo la teoria, se le righe fossero dovute totalmente alla riflessione, questo spostamento dovrebbe uguagliare la metà della larghezza dell' ombra, cioè alcuni decimi della distanza tra le due righe, si vede che la riflessione ¹⁾ (se pur c' è) non ha parte sensibile nella produzione delle righe scure.

1) Cioè quella dovuta a differenza di indice di rifrazione, giacchè quella dovuta a risonanza si considera come onde secondarie.

E neppure vi ha importanza notevole la produzione delle onde secondarie, perchè esse non prendono una parte rilevante della energia incidente ¹⁾.

L'effetto capitale e prodotto dall'assorbimento vero e proprio, e per esso, almeno nel caso in questione, la energia raggiante si trasforma in calore. A questo proposito è opportuno citare una esperienza del Wood, il quale produceva del vapore di sodio nell'interno di una camera radiofonica, e mandando in questa luce molto intensa a intermittenze regolari e molto frequenti, osservava che il radiofono dava un suono forte se la luce conteneva le lunghezze d'onda caratteristiche del sodio, e rimaneva quasi in silenzio, se queste erano intercettate.

10. Ma se l'assorbimento è la causa delle righe, siccome esso cresce collo spessore secondo una legge esponenziale, e le righe sono dal più al meno sfumate agli orli, ci sarebbe da aspettarsi che, per spessori enormi quali quelli che si trovano negli invogli gassosi del sole, esse si dovessero espandere enormemente. Certo è che per la larghezza delle righe la densità del vapore ha molto maggiore importanza che non lo spessore; e siamo lontani dalla legge di Beer; cioè due righe ugualmente larghe possono corrispondere a quantità diverse di sostanza traversata dalla luce (spessore moltiplicato per la densità). Ma ciò non basta ancora, perchè alcuni vapori a gas, devono avere nel sole densità non piccolissime, non minori di quelle che hanno nelle sorgenti da laboratorio.

11. A me sembra che anche su questo punto l'esperienza di Liveing e Dewar sulla inversione delle righe dell'idrogeno nel tubo di Plücker, possa suggerire una spiegazione plausibile. In essa si vede che, come notai, ciò che determina la larghezza delle righe non è la densità del gas, ma sibbene la densità degli ipotetici vibratorii, che si potrebbe chiamare (per non fare nessuna ipotesi) densità di eccitazione.

Ora sarebbe assurdo pensare che sebbene la densità dell'idrogeno nell'atmosfera solare non sia piccola, sia piccola

1) Vedi anche la mia nota sulla fluorescenza del vapore di sodio l. c.

invece la sua densità di eccitazione? E che ciò avvenga dal più al meno anche per i vapori metallici?

Ma anche per tal via si incontrano delle difficoltà, e bisogna confessare che non riusciamo a farci una idea esatta delle condizioni dei gas o vapori che costituiscono l'atmosfera del sole.

Ma passiamo alle teorie dell' Julius ¹⁾ e di altri, secondo le quali le protuberanze sarebbero un fenomeno o meglio una figura dovuta alla dispersione anomala; questa avrebbe parte nella origine delle macchie e anche delle righe di Fraunhofer; tutto ciò che è spostamento di righe o variazioni in genere, inversioni, sfumature ecc. avrebbe la sua spiegazione non più nel principio di Doppler e nelle variazioni di densità, o simili, ma principalmente nella dispersione anomala, la quale dovrebbe ancora dare la chiave per interpretare i risultati dello spettroeliografo, chiarire i mutamenti del sole, la periodicità delle macchie, e anche avrebbe relazione colla meteorologia ecc. ecc. Gli spettri delle stelle nuove sarebbero secondo Ebert ²⁾ da interpretare con essa, che dovrebbe anche entrare in gioco in molte esperienze di laboratorio ecc.

Ma ripeterò quello che già dissi in una pubblicazione precedente ³⁾ che tutto ciò è ingegnoso, seducente, ma prematuro; prima è opportuno studiare bene il fenomeno in laboratorio, e notare quali righe lo presentano e in qual grado.

12. Il metodo interferenziale da me proposto ha continuato a servirmi utilmente. Colla disposizione descritta sul periodico *Memorie degli Spettroscopisti Italiani* ho fatto parecchie osservazioni di cui riferisco qui i risultati.

1) Julius. Archives Néerlandaises, (2), vol. 6, p. 155, 1901; vol. 7, p. 88, 478, 1902; vol. 8, p. 218, 374, 390, 1903; vol. 9, 211, 1904; vol. 10, p. 97, 1905; anche in Astronomische Nachrichten, vol. 153, c. 433, 1900; Phys. Z. S. vol. 2, p. 348, 357, 1900; vol. 3, pag. 154, 1901, vol. 6, p. 85, 132, 1902. Koninklyke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam, 8 Juni 1904.

2) Astronomische Nachrichten, vol. 64, col. 65, 1903.

3) Metodo interferenziale sulla dispersione anomala dei vapori ecc. I. c.; alle citazioni ivi fatte aggiungo. H. Ebert, Boltzmann, Festschriften 1904.

Ferro.

Prima sperimentai con un arco tra grosse bacchette di ferro, ma poi riconobbi più vantaggioso per me l'uso di carboni di cui il positivo era forato e ripieno di limatura di ferro mista a grafite. Non riuscii però a rendere l'arco molto tranquillo; e le fluttuazioni delle frangie facevano l'osservazione un po' penosa, e impedivano un ragguaglio molto accurato delle righe tra loro perciò che riguarda l'*intensità* della dispersione anomala. Invece l'individuare le righe e il riconoscere la presenza, o meno, del fenomeno nei limiti di sensibilità, si poteva fare con tutta sicurezza, coll'aiuto di una mappa fotografica del Rowland.

Nella seguente tabella le indicazioni delle lunghezze d'onda, dell'intensità della riga nell'arco e del suo aspetto (R significa invertita e i numeri crescono coll'intensità) sono tolti dal campione del Rowland ¹⁾; le indicazioni dell'ultima colonna sono solamente approssimative.

(*f* = forte, *m* = media, *d* = debole, *dd* = debolissima, estrem. *d* = estremamente debole).

Si comprende che le righe di metalli presenti come impurità davano un effetto assai attenuato.

1) Dufet. Requeil de donnés numeriques, fasc. I.

TABELLA I

Indicazione	Elemento	Lunghezza d'onda	Intensità	Aspetto	Intensità appross. della dispersione anomala
Impurità	Mn	403,0919	(30)	(R)	<i>d d</i>
Impurità	Mn	403,3230	(25)	(R)	<i>d d</i>
Impurità	Mn	403,4642	(20)	(R)	<i>d d</i>
Impurità	Mn	403,588	(7)		<i>d d</i>
	Fe	404,5975	20	R	<i>f</i>
	Fe	406,3755	15	R	<i>m</i>
	Fe	407,1903	10		<i>m</i>
	Fe	420,2187	8		<i>d d</i>
Impurità	Ca	422,6898 (<i>g</i>)	(50)	(R)	<i>d</i>
	Fe	426,0647	6	R	<i>d</i>
	Fe	427,1920	10	R	<i>m</i>
Impurità di Ca ?	Fe	430,8072 (<i>g</i>)	7	R	<i>m</i>
	Fe	432,5932 (<i>f</i>)	10	R	<i>m</i>
	Fe	438,3721 (<i>d</i>)	15	R	<i>m</i>
	Fe	440,4928	10	R	<i>m</i>
	Fe	441,5298	4	R	<i>d</i>
	Fe	491,9183 (*)	6		estrem. <i>d</i>
	Fe	492,0676	9		estrem. <i>d</i>
	Fe	495,7482 (*)			<i>d d</i>
	Fe	516,7664 (<i>b₁</i>)	6		<i>d</i>
	Fe	522,5690 (*)	2		<i>d d</i>
	Fe	523,3124 (*)	7		<i>d d</i>
	Fe	526,9714 (<i>E₁</i>)	8		<i>d</i>
Impurità di Ca ?	Fe	527,0533* (<i>E₁</i>)	6		<i>d</i>
	Fe	532,4373 (*)	9		estrem. <i>d</i>
	Fe	537,1686 (*)	9		<i>d d</i>
	Fe	538,3576 (*)	6		estrem. <i>d</i>
	Fe	539,7319	7		<i>d d</i>
	Fe	540,5979	7		<i>d d</i>
	Fe	541,5421 (*)	4		estrem. <i>d</i>
	Fe	542,4284 (*)	5		estrem. <i>d</i>
	Fe	543,4725	5		<i>d d</i>
	Fe	544,7116	7		<i>d d</i>
	Fe	545,5826 (*)	6		<i>d d</i>

Calcio.

Carbone positivo animato con cloruro di calcio. Le lunghezze d'onda, le intensità della riga e l'aspetto come nella

(*) Mancando la misura della lunghezza d'onda nell'arco ho messo quella solare.

tabella precedente. Soltanto le lunghezze d'onda relative allo spettro di bande dell'ossido sono determinate da me per interpolazione dalle righe solari.

TABELLA II.

Indicazione	Elemento	Lunghezza d'onda	Intensità	Aspetto	Intensità appross. della dispersione anomala
	Ca	393,3809 (K)	75	R	<i>f</i>
	Ca	396,8617 (H)	70	R	<i>f</i>
	Ca	422,6898 (<i>g</i>)	50	R	estrem. <i>f</i>
	Ca	428,3175	5	R	<i>d d</i>
	Ca	428,9527	4	R	<i>d d</i>
	Ca	429,9153	3	R	<i>d d</i>
	Ca	430,2690	6	R	<i>d d</i>
	Ca	430,7906 (G)	4	R	<i>d d</i>
	Ca	431,8816	4	R	<i>d d</i>
	Ca	442,5616	5	R	<i>d d</i>
	Ca	443,5133	5	R	<i>d d</i> $\wedge$
	Ca	445,4949	6	R	<i>d d</i>
	Ca	526,1880 (*)	6		<i>d d</i>
	Ca	526,4408	6		<i>d d</i>
	Ca	526,5725	8		<i>d d</i>
	Ca	527,0445 (E ₁)	10		<i>d d</i>
	Ca	558,2204	6		incerta
	Ca	558,8977	10	R	<i>d d</i>
	Ca	559,0352	5		incerta
	Ca	559,4689	7	R	<i>d d</i>
	Ca	559,8712	7		<i>d d</i> $\vee$
	Ca	560,1502	5		<i>d d</i>
	Ca	560,3097 (*)	6		<i>d d</i>
	Ca	585,7672 (*)	10		estrem. <i>d</i>
Banda stretta	»	593,3	»	»	inflessione
	Ca	610,2941 (*)	10	R	<i>d d</i>
	Ca	612,2428 (*)	15	R	<i>d</i> $\wedge$
	Ca	616,2383 (*)	15	R	<i>d</i>
	Ca	616,9260 (*)	6		<i>d d</i> $\wedge$
Canto di banda	»	621,4	»	»	<i>f</i>
Canto di banda	»	622,5	»	»	<i>d</i>
	Ca	643,9298 (*)	10	R	<i>d</i>
	Ca	645,0029 (*)	5		<i>d d</i> $\vee$
	Ca	646,2835 (*)	10	R	<i>d</i>
(?)	Ca	647,1881 (*)	5		<i>d d</i>
	Ca	649,4001 (*)	8		<i>d</i>
(?)	Ca	649,9871 (*)	5		estrem. <i>d</i>

Stronzio.

Le lunghezze d'onda e le intensità sono tolte dalle tabelle di Thalèn; i numeri più piccoli corrispondono alle righe più forti. Per l'aspetto io ho notato soltanto le inversioni più vistose.

TABELLA III.

Indicazioni	Elemento	Lunghezza d'onda	Intensità	Aspetto	Intensità appross. della dispersione anomala
	Sr	407,85	1	invertita	<i>f</i>
	Sr	421,53	1	invertita	<i>f</i>
	Sr	460,75	1	gr ^{de} inver.	estrem. <i>f</i>
	Sr	472,10	3		<i>d</i>
	Sr	474,05	3		<i>d</i>
	Sr	478,35	3		<i>d</i>
	Sr	481,20	3		<i>d</i>
	Sr	483,15	3		<i>d</i>
	Sr	487,20	3		<i>d</i>
	Sr	487,60	3		<i>d</i>
	Sr	496,15	2		<i>d d</i>
	Sr	496,75	4		<i>d d</i>
	Sr	522,35	3		<i>d d</i>
	Sr	522,55	3		<i>d d</i>
	Sr	522,85	3		<i>d d</i>
	Sr	523,85	1		<i>d</i>
	Sr	525,60	2		<i>d</i>
	Sr	548,00	1		<i>d</i>
	Sr	548,50	3		<i>d d</i>
	Sr	550,35	2		<i>d d</i>
	Sr	552,25	2		<i>d d</i>
	Sr	554,00	3		<i>d d</i>
Angolo da una banda		636			<i>d</i>
	Sr	638,70	3		estrem. <i>d</i>
	Sr	640,70	1		<i>d</i>
Idem		647			<i>d d</i>
	Sr	650,15	2		<i>d d</i>
Idem		663			<i>d</i>
Idem		675			<i>d</i>

Bario.

Con carbone positivo animato di cloruro di bario, ho riconosciuto la dispersione anomala in 20 righe di questo metallo: 4 righe tra le più forti, facilmente invertibili, la presentano spiccatissima; una riga violetta, sebbene forte, non ne presenta traccia. Non posso dare ancora i numeri che hanno bisogno di un più accurato riscontro.

Magnesio.

Operando con un carbone animato da fili di magnesio, si osserva la dispersione anomala solo per la tripletta corrispondente a *b* solare; essa è forte per la componente meno rifrangibile, media per la media e debole per la più rifrangibile. L'aspetto delle frangie è molto caratteristico. Per le altre poche righe visibili del magnesio non ho osservato traccia di dispersione anomala.

Ho poi vantaggiosamente sostituito ai quattro prismi di flint dello spettroscopio un prisma con solfuro di carbonio che dà una dispersione quasi uguale, e una maggiore chiarezza. Con questo e con un obiettivo di Steinheil di quasi un metro di distanza focale, ho fatto le fotografie che sono, ingrandite circa del doppio, riprodotte nella Tavola II, N. 2 (sodio) N. 3 (bario) N. 4 (stronzio).

Il **Sodio** presenta il fenomeno solo per le righe D e per queste invero con intensità eccezionale, e non lo presenta sensibile per le altre righe visibili della prima e seconda serie accessoria. Per ora mi limito a riferire questi fatti che discuterò quando ne avrò osservati degli altri collo stesso metodo.

Voglio notare però che le differenze tra le diverse righe di uno stesso elemento, mostrano come anche, prescindendo da ogni applicazione alla spettroscopia celeste, questi studi abbiano un vivo interesse spettroscopico.

Riepilogo.

1. La legge di Kirchhoff non si può applicare con rigore alla maggior parte dei casi di emissione e di assorbimento

studiati dalla spettroscopia, perchè anche se pare probabile che in parecchi di essi la emissione sia di temperatura, manca di ciò la certezza. Tanto meno questa certezza si potrà avere per l'emissione dei corpi che si trovano nel sole e nelle altre stelle.

2. L'inversione dello spettro va riguardata piuttosto che come una conseguenza della legge di Kirchhoff, come un fatto sperimentale che si spiega col concetto della risonanza.

Le esperienze sulla inversione delle righe combinate colla molteplicità degli spettri, portano al concetto di una scala composta di tanti gradi di eccitazione; prima si diceva di temperatura (e alcuni, per es. il Lockyer, lo dicono ancora) ma allora bisogna prendere la parola temperatura in un senso un po' elastico. I diversi vibratorii che possono esser forniti da un elemento, non sussistono tutti a tutti i gradi della scala. L'emissione corrispondente si ha sempre (tolto il caso dei primissimi gradi, come sarebbe di vapori metallici scaldati al disotto dell'incandescenza che non emettono ancora) purchè si sia raggiunto il grado di eccitazione a cui si forma il vibratore, e non si sia ancora raggiunto quello a cui si spezza.

L'inversione richiede inoltre un fondo continuo o almeno comprendente l'intorno spettrale della riga così intenso da superare l'intensità della luce emessa dal vapore, più quella da esso trasmessa indebolita per assorbimento.

Deve quindi, perchè la riga invertita sia visibile, essere la densità del vapore relativa a quei vibratorii e lo spessore tanto elevato che l'assorbimento sia sensibile, e lo spettroscopio deve avere una sufficientemente alta risoluzione.

Ma soddisfatte queste condizioni, la riga scura sarà indizio della presenza di quel certo stato allotropico del vapore nè più nè meno come la riga chiara.

I gradi più alti di eccitazione che si possono raggiungere nel laboratorio, non sono mai separati da gradi assai inferiori; per questo il Lockyer¹⁾ ideò di rilevare le righe che si rinforzano notevolmente o compaiono passando dall'arco alla scintilla più energica che si possa ottenere: egli le disse righe rinforzate: *enhaced*.

1) Nature, vol. 59, p. 342, 468, 535, 585.

1

2

3

4

5

1

2

3

4

Lo spettro di alcune stelle tra le più bianche, cioè verosimilmente più calde, presenta numerosissime coincidenze di righe oscure con queste righe rafforzate, mostrando che il grado di eccitazione massimo nel nostro laboratorio è il minimo in quelle stelle, giacchè mancano gradi di eccitazione più bassi, e il loro interno si trova in un grado di eccitazione ancora superiore;

3. a meno che non si voglia ammettere che in esse la materia sia ancora in uno stato primordiale rispetto a quello in cui noi ordinariamente la studiamo, e se ciò fosse, verrebbe assai bene giustificato il nome di proto elementi (proto ferro, proto magnesio ecc.) che il Lockyer dà a questi corpi nello stadio in cui hanno uno spettro ridotto alle loro righe rafforzate le quali (è da notare) per ciascuno son poco numerose. E ciò sarebbe il risultato della teoria di dissociazione di Lockyer ridotta debitamente, e quale la propugna anche H. Kayser.

Ma tutto ciò risulta da un complesso vasto di indizi, piuttosto che essere provato da qualche fatto in modo decisivo, perchè le esperienze di inversione sono sempre complicate dalla presenza della emissione e sono troppe le righe non ancora invertite in laboratorio. Appresso dirò come la dispersione anomala ci può dare il modo di fare un'esperienza decisiva.

Altra cosa sarebbe la dissociazione quale discende dalla teoria di Garbasso, e secondo le sue esperienze non si effettua in laboratorio, ma può dare forse la più semplice spiegazione degli spostamenti di righe che si hanno nello spettro di alcune parti del sole e in quello delle stelle nuove.

4. Della dispersione anomala che secondo alcuni ha grande importanza astronomica è appena cominciato lo studio sperimentale: io porto per ora ad esso il contributo di oltre cento righe per la maggior parte nuove.

Il metodo interferenziale può presto fornire un materiale assai vasto perchè gli astronomi vi possano fondare le loro speculazioni.

Esso può anche dare il modo di fare quella esperienza decisiva di cui parlavo sopra.

5. Si tratta di confrontare la dispersione anomala nella fase di minimo e di massimo nell'arco con corrente alternata per

varie righe di uno stesso metallo. Questa, dipendendo solo dalla *costituzione* e non dalla *eccitazione*, ci potrà dare il modo di verificare se nel minimo, quando scompare la riga, è anche scomparso il vibratore, oppure se esso è presente senza essere eccitato.

Di questa esperienza, non priva di difficoltà pratiche, mi occupo da qualche tempo; e spero di riuscire.

Esprimo la mia gratitudine al Prof. Antonio Ròiti nel cui laboratorio ho studiato e lavorato, e ai Professori Angelo Battelli e Luigi Magri che hanno molto gentilmente messe a mia disposizione le loro belle fotografie di scintille, e ne hanno fatte alcune apposta per me.

R. Istituto Superiore di Firenze
Maggio 1905.