Escludendo quelle, che sono già state omesse nella determinazione del medio e che sembra conveniente di omettere, si ha prossimamente 0,025 per l'errore di ogni determinazione in ciascuna di quelle due serie. Questo errore è molto minore per altre serie, per esempio è 0,008 nella X del tubo num. 2 e 0,005 nella I del num. 3. L'errore del medio in queste due serie sarebbe 0,003 e 0,001. Nel loro insieme i nostri risultati si mostrano per ogni singolo tubo assai più concordanti fra loro di quelli del Wertheim.

Dobbiamo anche per questo, come per ogni altro nostro lavoro, attestare la nostra gratitudine al Prof. Rossetti, che ci diede ogni agevolezza a compierlo nel laboratorio di fisica da lui diretto.

Padova 25 Febbraio 1877.

FENOMENI DI MAGNETISMO OSSERVATI NEL RADIOMETRO; PER GIUSEPPE BASSO PROFESSORE NELLA UNIVERSITÀ DI TORINO.

I.

La rotazione del molinello nel radiometro di Crookes, determinata dall'azione di raggi luminosi e calorifici provenienti dall'esterno, veniva da principio attribuita dall'inventore stesso dell'apparecchio e da altri molti ad una forza ripulsiva reale che la luce eserciterebbe sui corpi da essa colpiti; l'intensità di questa forza crescerebbe, non solo coll'intensità della radiazione, ma anche col potere assorbente della superficie esposta alla luce.

Tale ipotesi però trovasi oggidì pressochè completamente abbandonata. Il modo di comportarsi del radiometro in dipendenza della maggiore o minore rarefazione dell'aria interna e specialmente la tendenza, manifestata dallo involucro di

vetro, a girare in senso inverso a quello in cui vorrebbe girare il molinello, allorquando si rende mobile il primo e si fissa il secondo, ci obbligano a cercare la causa del fenomeno in forze che si sviluppano nell'interno stesso dello strumento, e che solo per via indiretta vengono eccitate dall'azione luminosa esteriore.

Le considerazioni svolte segnatamente dai signori Reynolds ⁽¹⁾ e Stoney ⁽²⁾ danno un gran peso alla teoria, secondo la quale la repulsione apparente delle alette sottoposte alla luce sarebbe cagionata dall'aumento di forza elastica, che producesi nell'aria lambente le facce annerite, le quali, dotate come sono di maggior potere assorbente, si riscaldano più che non le facce opposte. Si sa che, in ogni massa gassosa, una variazione di forza elastica o di pressione che nasca in qualche suo punto, si trasmette subitamente in ogni direzione e con valori eguali per elementi di superficie uguali. Ma se ciò è vero pei gaz di densità ordinaria, è molto probabile che le cose si modifichino quando la massa fluida ha raggiunto un grado estremo di rarefazione; sicchè non possono più in tal caso trasmettersi le pressioni in modo da obbedire precisamente al principio di Pascal.

Ciò si comprende benissimo quando, a renderci ragione delle proprietà fisiche dei gaz, noi ci serviamo della teoria dinamica relativa alla loro costituzione molecolare. Se le particelle di un gaz sono agitate da movimenti tali, che ciascuna di esse percorra un tratto sensibile rettilineo, nell'intervallo di tempo compreso fra due suoi successivi incontri colle circostanti, è naturale che la frequenza di tali incontri od urti nei gaz a densità ordinaria sia stragrande, sì che i tratti rettilinei della traiettoria, compresa anche in piccolissimo spazio siano numerosissimi ed abbiano tutte le direzioni possibili. In ciò risiede il meccanismo della trasmissione delle pressioni, che è a dire delle velocità molecolari, attraverso alla massa. Ma l'aria racchiusa nel radiometro è in tale stato di tenuità,

(1) *Proceedings of the Royal Society of London*, 1876.

(2) *Philosophical Magazine*, 1876.

che i tratti percorsi dalle sue molecole non hanno più lunghezze assolutamente insensibili, rispetto all'intervallo fra le alette e la parete interna del vaso di vetro. Ne consegue che, sotto l'influenza del calore e della luce raggianti dal di fuori, le molecole aeree urtanti contro le facce annerite, che sono le più calde, rimbalzano con velocità maggiore di quella propria delle molecole vicine alle facce lucenti, e conservano fin presso alla parete tale eccesso di velocità; quindi ciascuna aletta, per reazione, tenderà a muoversi in modo, che la sua faccia nera si trovi dalla parte posteriore rispetto alla direzione del moto.

II.

Qualunque del resto sia la vera cagione del movimento radiometrico, non si riuscirà a rintracciarla con sicurezza, se non variando nel maggior numero possibile di modi le condizioni in cui esso può aver luogo, ed esaminandone minutamente le particolarità. Perciò io non credo inutile far breve parola di alcune esperienze da me eseguite sopra radiometri di varia costituzione, sottoposti all'azione della luce e ad un tempo a forze d'altra natura, come sarebbe l'azione del magnetismo.

Disposi convenientemente una poderosa elettro-calamita, com'è quella dell'apparecchio di Faraday per gli studii di diamagnetismo, e nel campo magnetico di essa collocai un radiometro comune a quattro alette di mica, di cui ciascuna ha una faccia nuda e l'altra annerita. Essendo dapprima aperto il circuito, presentavo lateralmente al radiometro la fiamma d'una lampada a gaz; lasciavo che il molinello assumesse una velocità sensibilmente costante, la quale però non fosse mai tanto grande da non permettere la comoda numerazione dei giri coll'impiego di un contasecondi. Chiudevo poscia il circuito, cosicchè all'azione della luce univasi quella dei poli dell'elettrocalamita; allora, a velocità di nuovo costante, contavo ancora il numero dei giri fatti in un determinato tempo. Il fatto costantemente osservato fu che, du-

rante l'influenza del magnetismo, la velocità di rotazione era minore. Così, in una delle esperienze, ho notato che il molinello, a circuito aperto, faceva 26 giri al minuto primo; ma discendeva a soli giri $20\frac{3}{4}$ in pari tempo quando l'elettromagnete era animata.

Il rallentamento del moto radiometrico, operato dal magnetismo, è un fenomeno di natura alquanto complessa. Esso è soprattutto cagionato dall'azione (attrattiva o repulsiva secondo la natura dei corpi) esercitata da ciascun polo della grande magnete sopra ciascuna delle alette del molinello. Ma potrebbe forse influirvi per qualche poco la modificazione che nella poca aria chiusa nel radiometro induce l'azione magnetica; si deve qui ricordare che, mentre il nitrogeno è quasi inerte magneticamente, l'ossigeno è all'incontro fortemente magnetico. Inoltre non è del tutto impossibile la generazione di correnti elettriche indotte anche nel molinello, nell'atto che esso si muove in presenza dei poli magnetici; quantunque la sua forma non sia troppo favorevole alla nascita di queste correnti, mentre sarebbe tale se fosse, per es., quella d'un disco girante nel suo piano. Se correnti d'induzione si producono in modo sensibile, esse hanno anche per effetto il rallentamento del moto rotatorio.

L'esistenza di correnti indotte nel molinello, che gira nel campo magnetico, parmi, se non provata, resa almeno verosimile dai risultati ottenuti col mezzo di altri radiometri, in cui asticine ed alette sono metalliche, e perciò ottime conduttrici. Ho esaminati strumenti di tal fatta ad alette di platino, di rame, di stagno, ecc.; ciascuna di tali alette presentando una faccia nuda, e l'altra coperta da una fogliolina di mica. In tutti i casi, non solo trovai che l'intervento dell'azione magnetica produceva una diminuzione di velocità rotatoria, ma il rallentamento facevasi in proporzione assai maggiore di quella avvertita nei radiometri a molinello poco o punto conduttore. Per citare un solo esempio, un radiometro ad alette di platino faceva 38 giri al minuto primo sotto la semplice azione luminosa, mentre riducevasi a soli 21 giri e mezzo quando si aggiungeva l'azione dell'elettrocalamita.

Per semplificare le condizioni, in cui ha luogo la diminuzione di moto radiometrico per l'azione della calamita, ho ricorso ancora ad un radiometro, nel quale una sola aletta è atta a subire l'impulso provocato dalla luce. Invece della solita croce, portante agli estremi delle due aste le quattro alette disposte al solito modo, io adoperai, come molinello, una sola asticella di alluminio, i cui capi portano, ciascuno, un'aletta di mica; però, mentre una di queste alette ha nuda una faccia e nera l'altra, la seconda ha le facce ambedue nude ed è perciò inattiva. Disposto l'apparecchio fra i poli dell'elettro-magnete, e tenuto quasi all'oscuro, l'asta del molinello, finchè il circuito è aperto, sta indifferentemente in qualunque posizione; ma appena si anima l'elettro-calamita, l'asta si muove con una certa veemenza e finisce per arrestarsi sempre secondo la linea assiale. Ciò prova che il molinello possiede un potere magnetico piuttosto considerevole; è quindi prevedibile che, messo in moto dall'azione luminosa, esso dovrà subire un notevole rallentamento, quando intervenga eziandio l'influenza dell'elettro-calamita. Ed infatti le cose procedono appunto in tal modo; per esempio, ho visto che se la presenza della fiamma, a corrente interrotta, produce una velocità costante di 20 giri al minuto, basta chiudere il circuito per discendere a 15 giri nel medesimo tempo.

III.

Si fu nel variare le esperienze di cui fo cenno, e nello impiegare apparati radiometrici di forme differenti, che trovai un nuovo procedimento, che parmi di qualche importanza, per la misura della forza che sollecita un corpo nell'aria rarefatta ad allontanarsi dalla sorgente della luce che lo colpisce. — Per giungere a tale determinazione si potrebbe, come fece Stoney, seguire una via puramente razionale. Basterebbe applicare convenientemente i postulati che si ammettono nella teoria dinamica dei gaz, relativi al valore della velocità media molecolare, ed alla relazione fra la densità d'un gaz e la lunghezza media del tratto che ogni sua mo-

lecola percorre fra due incontri successivi con altre. Crookes invece ricorre ad un metodo affatto sperimentale. Esso consiste nell'adoperare una bilancetta delicatissima sospesa in un vaso vuoto d'aria; il giogo della bilancia porta ad un suo estremo una laminetta affumicata. Quando la luce proveniente da una fiamma esterna colpisce la laminetta, questa tende a far inclinare il giogo, e a controbilanciare tale tendenza si fa agire la forza elastica, che nasce dal torcere d'un angolo conveniente un sottilissimo filo di vetro annesso al giogo medesimo. Si comprende come, conoscendo per esperienze preliminari la forza di torsione del filo, se ne possa dedurre l'intensità della ripulsione apparente esercitata dalla luce sulla superficie affumicata.

Il nuovo procedimento, a cui alludevo or ora, e che avrebbe su quello di Crookes il vantaggio di una più grande agevolezza, mi fu suggerito dall'uso d'un apparecchio radiometrico di speciale forma, appartenente al Gabinetto di fisica del museo industriale. Questo apparecchio consiste in un tubo di vetro orizzontale, lungo mm. 24, il quale a ciascuna sua estremità si prolunga in una bolla, pure di vetro, il cui diametro è di 64 mm. Nel suo interno, ove si è fatto il vuoto, una punta d'acciaio verticale, passante pel mezzo del tubo, serve di pernio (come nei radiometri comuni) ad un'asticina di alluminio, la quale rimane così sospesa entro il tubo e termina nelle bolle estreme, dove ciascun suo capo porta una laminetta verticale di alluminio. L'asta mobile, in un colle laminette estreme, che chiamerò *bilanciere*, quando è diretta secondo l'asse del tubo, ha le sue alette terminali così disposte, che i loro centri coincidono coi centri delle bolle sferiche corrispondenti; il bilanciere può deviare alquanto a destra o a sinistra di tale direzione, per quanto lo permette la sezione interna del tubo. Infine le due alette sono annerite dalla stessa parte e lucenti dall'altra; perciò l'apparecchio serve solo come *radiometro differenziale*, e se sulle due alette si fanno contemporaneamente cadere raggi di eguale intensità, il bilanciere non soffre deviazione.

Io posso servirmi del radiometro differenziale ora descritto

in modo che, mentre un'aletta del bilanciere è sottoposta alla semplice influenza della luce, l'altra senta soltanto l'azione magnetica che, per l'alluminio, è attrattiva. Perciò io sopprimo uno dei due grandi cilindri, che nell'apparecchio di Faraday stanno colle loro superficie polari di fronte l'un l'altro. Dirimpetto al polo dell'elettrocalamita così dimezzata dispongo il radiometro differenziale, in modo che la linea dei centri delle due bolle sia perpendicolare all'asse dell'elettro-calamita, che verso questa le alette volgano le loro facce lucenti e che l'asse della stessa elettro-calamita, prolungato, passi pel centro d'una delle bolle, che indico con A. Dall'altra parte del radiometro dispongo la fiamma, su cui voglio sperimentare, così che la sua luce giunga soltanto sull'aletta contenuta nella seconda bolla B. A circuito chiuso, il bilanciere trovasi sottoposto ad un tempo all'azione magnetica che esercita per attrazione sull'aletta in A, ed all'azione repellente che la luce esercita sulla aletta in B. Queste due forze tendono evidentemente a far deviare il bilanciere in sensi opposti; per conseguenza, se spostando, per es., la fiamma, si fa in modo che il bilanciere rimanga in equilibrio secondo la linea dei centri delle due bolle, si deve concludere che l'azione repulsiva della luce è allora eguale in intensità all'attrazione magnetica.

Così, in una mia esperienza, trovavo che la fiamma di una candela comune di stearina produceva, alla distanza di 21 centimetri, una forza equivalente all'azione magnetica esercitata dall'elettro-calamita alla distanza di 32 millimetri.

La misura di quest'ultima azione può farsi con procedimenti più o meno diretti e non presenta difficoltà insuperabili. Io pensai di ricorrere al metodo delle oscillazioni ed eseguii in proposito qualche esperienza. Debbo però subito notare che i risultati numerici ai quali pervenni finora non possono meritare piena fiducia, specialmente per due ragioni: 1^a non conoscendo direttamente il peso del bilanciere da me adoperato, dovetti semplicemente desumerlo dalla stima approssimativa delle sue dimensioni e lo valutai in grammi 0,12; 2^a l'elettrocalamita, di cui facevo uso, per cause accidentali,

non conservò rigorosamente invariato il suo momento magnetico nelle due fasi essenziali dell'operazione, cioè quando essa agiva sul bilanciare per equilibrare l'azione repulsiva della luce, e quando sollecitava il medesimo determinando il suo moto oscillatorio.

Non sarà tuttavia inutile lo indicare come io studiassi tale moto oscillatorio e deducessi dal suo esame, in modo almeno grossolano, l'intensità dell'azione magnetica di attrazione. Disposto il radiometro differenziale in modo che la linea dei centri delle sue bolle coincidesse coll'asse dell'elettro-calamita, io constatavo il fatto che, a circuito chiuso, lungo lo stesso asse disponevasi spontaneamente l'asticina del bilanciare. Accostando allora per un momento una fiamma ad una faccia nera delle sue alette, vi producevo un lieve allontanamento dalla sua posizione di equilibrio e lasciavo poi che, per riprenderla, fosse obbligato a fare alcune oscillazioni di piccola ampiezza. Nelle mie esperienze ciascuna oscillazione durava all'incirca 13 secondi.

La nota formola

$$T = \pi \sqrt{\frac{M}{R}}$$

può senza grave errore, essere applicata a tale moto oscillatorio, intendendo che T rappresenti la durata di una oscillazione, M il momento d'inerzia del bilanciare rispetto alla verticale passante pel suo punto di sospensione, R il suo momento di rotazione relativo alla forza magnetica.

Rappresento con:

- p il peso di ciascuna aletta, rispetto al quale suppongo trascurabile quello dell'asticina d'unione;
- l la distanza del centro dell'aletta dall'asse di rotazione, e suppongo che rispetto a tale distanza, nello esprimere il momento d'inerzia, si possa non tener conto delle dimensioni delle alette;
- f l'intensità della forza d'attrazione magnetica applicata al centro dell'aletta.

Si ha:

$$M = \frac{2pl^2}{g} \quad \text{e} \quad R = fl;$$

perciò

$$T = \pi \sqrt{\frac{2pl}{gf}};$$

donde si ricava

$$f = \frac{2\pi^2 pl}{gT^2}.$$

In tale espressione della forza esercitata dalla elettrocalamita sull'estremità del bilanciere, sostituisco i valori numerici forniti dall'esperienza, cioè:

$$l = 0,05 \text{ metri}$$

$$p = 0,06 \text{ grammi}$$

$$T = 13 \text{ secondi}$$

ed ottengo:

$$f = 0,0000357.$$

Conchiudo adunque che l'aletta del radiometro (la quale ha forma d'un quadrato d'un centimetro e mezzo di lato) era respinta dalla luce della fiamma, posta da essa alla distanza di 21 centimetri, colla forza di circa 36 millesimi di milligrammo.