ATTI

DELLA

REALE ACCADEMIA DEI LINCEI

ANNO CCCI.

1904

SERIE QUINTA

RENDICONTI

Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali.

VOLUME XIII.

2° Semestre.

ROMA

TIPOGRAFIA DELLA R. ACCADEMIA DEI LINCEI

PROPRIETÀ DEL CAV. V. SALVIUCCI

1904

Fisica. — *Sulla variazione di resistenza del bismuto in un campo magnetico debole.* Nota del dott. C. Carpini, presentata dal Socio P. Blaserna.

1. Nel 1856 Lord Kelvin, studiando le proprietà termoelettriche dei metalli, trovò che la loro resistenza è influenzata dal loro stato magnetico. Tra i metalli, che più confermarono questa veduta, primeggia il bismuto. Il Tomlinson ed il Righi dimostrarono per primi che la resistenza del bismuto varia notevolmente con il variare dell' intensità del campo magnetico in cui esso si trova. Tale fenomeno, dal 1882 fino ad oggi, fu oggetto di larghi studi per opera di illustri sperimentatori come l' Hurion, il Leduc, l' Ettingshausen ed il Nernst, il Van Aubel, il Lenard.

Di un filo di bismuto furono studiate le variazioni della resistenza tanto normalmente che parallelamente al campo, ed in due casi distinti, sia con corrente continua, sia con corrente alternata. Però le migliori ricerche in proposito si sono limitate a campi piuttosto intensi, che di rado scesero al di sotto di 2000 unità. Solo per il bismuto lamellare il Goldhammer è arrivato fino a campi di 400 unità, ricercando come la resistenza dipenda anche dalla orientazione della lamina.

Mi è parso perciò interessante, sia per colmare una lacuna finora esistente, sia per vedere che cosa diventa la legge di variazione della resistenza, enunciata da taluni autori, di studiare tali variazioni in un filo di bismuto posto normalmente in un campo magnetico variante tra 0 e 2000 unità.

2. Il filo di cui mi sono servito era una spirale bifilare Hartmann e Braun, avente la superficie di cm^2 3,46.

La sua resistenza a zero la determinai con il ponte di Wheatstone, seguendo la disposizione e le norme date dal prof. H. F. Weber [1], per eliminare resistenze di contatti e leggeri difetti di calibro: mi risultò così di Ohm 17,266 e pel coefficiente di temperatura il valore 0,003539.

3. Il metodo precedente non si sarebbe prestato bene alla misura di piccole variazioni di resistenza, nè avrebbe consentito una certa rapidità, necessaria, sia per eliminare variazioni di resistenze dovute a piccole oscillazioni di temperatura, sia perchè riusciva difficile tener costante per lungo tempo il campo magnetico. Mi occorreva dunque un metodo che permettesse la misura di piccole resistenze dell'ordine del millesimo di Ohm, e che nel tempo stesso fosse rapido.

[1] Wied. Ann. 30, pag. 638, 1887.

È noto che se primieramente si stabilisce l'equilibrio nel ponte, e poscia in uno dei rami si fa variare la resistenza d'una quantità ΔW molto piccola, l'intensità i_g della corrente che passa pel ramo del galvanometro è proporzionale a ΔW, ossia:

$$i_g = C\,\Delta W.$$

Per verificare sperimentalmente questa relazione sul mio caso speciale, intercalai in un ramo del ponte un reostato di 18 Ohm; e nell'altro ramo insieme ad un reostato di 17,50 Ohm, un filo di nichelina calibrato, sopra il quale poteva scorrere un tasto a pressione collegato con l'altro estremo del ponte.

La pila era una Daniell, che lasciavo chiusa, prima di cominciare le esperienze, per una buona mezz'ora.

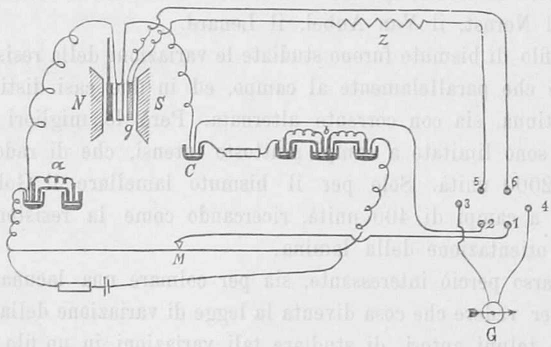

Fig. 1.

Stabilito l'equilibrio nel ponte, in maniera che il tasto fosse all'incirca nel punto di mezzo del filo, cioè in condizioni di massima sensibilità, spostavo ogni volta di mm. 5 il tasto ed osservavo la corrispondente deviazione. Ho verificato che per un tratto di cm. 20 tanto a destra che a sinistra della posizione d'equilibrio, le deviazioni corrispondenti seguono una legge lineare.

E poichè cm. 20 del filo di nichelina presentavano una resistenza di Ohm 0,3, così il metodo esposto potei adoperarlo con sicurezza fino a questo limite. Dimodochè adottai la disposizione rappresentata dalla fig. 1 per misurare le variazioni di resistenza della spirale di bismuto. Nel ramo del ponte in cui era inserita la spirale, intercalai una piccola spiralina a di nichelina, la cui resistenza, paragonata ad un decimo di Ohm campione col metodo dianzi descritto, mi risultò di Ohm 0,04503. Essa poteva essere intercalata od esclusa a volontà, togliendo od immergendo un grosso filo di rame nei due pozzetti di mercurio. Nell'altro ramo del ponte, oltre un reostato, intercalai alcune spiraline *b* pure di nichelina di diversa resistenza, che, come la prima, potevano a volontà escludersi od inserirsi nel circuito. Il tasto M ed il pozzetto C comunicavano col la coppia 1, 2 di un commutatore: mentre alla coppia 3, 4 giungevano i fili del galvanometro; dimodochè si poteva a volontà inserire quest'ultimo o con la coppia (1,2) o con l'altra (5,6) per lo scopo che dirò in seguito. Nel ramo principale della pila intercalai un reostato per regolare, a seconda dei casi, la corrente, e quindi la sensibilità del galvanometro. La corrente che passava attraverso alla spirale di bismuto non fu mai superiore ad ampère 0,015; tantochè gli effetti di temperatura da essa prodotti, nel breve tempo necessario alla misura, erano del tutto trascurabili.

Stabilito l'equilibrio del ponte, spostando il tasto M, procedevo alla sua graduazione, cioè intercalavo la spiralina *a* togliendo il grosso filo di rame che la ponevo in corto circuito: ottenevo così al galvanometro una deviazione α, che nella lunga serie di misure eseguite si aggirò intorno a mm. 110: dimodochè potevo con tale sensibilità apprezzare variazioni di resistenza di Ohm 0,0004. Tale graduazione veniva ripetuta alla fine d'ogni serie di esperienze, e delle due si prendeva la media, determinando così la costante C del galvanometro, tale che fosse:

$$\varDelta W = C \cdot \alpha .$$

Rimesso poi a posto il filo di rame escludente la spiralina *a* dal circuito, faceva agire il campo magnetico sulla spirale di bismuto, e leggevo la corrispondente deviazione del galvanometro: tale lettura veniva ripetuta un certo numero di volte, specie se le diverse deviazioni presentavano uno scartamento superiore ai due millimetri: la media di esse sostituita nella precedente formula mi forniva $\varDelta W$.

La spirale era protetta con ovatta da variazioni di temperatura, e così pure tutti i punti del ponte ove erano a contatto metalli diversi: un termometro segnava la temperatura della spirale, e mi permetteva così di determinare la resistenza della medesima quando il campo era nullo. L'Henderson ha dimostrato che la variazione della resistenza è funzione della temperatura; ma dalle sue curve risulta che la correzione da arrecarsi ai miei risultati non è sensibile nei limiti di temperatura per i quali ho osservato (19°-22°).

Il metodo descritto mi servì fino ad una variazione $\varDelta W$ di Ohm 0,3; non avrei con sicurezza potuto applicarlo più oltre: pur tuttavia nella tabella che segue si vede che ho dovuto misurare variazioni di circa un Ohm. Per potere applicare lo stesso principio anche in questo caso ho proceduto così;

nell' istante in cui si creava il campo magnetico, inserivo nel secondo ramo del ponte una o due delle spiraline b, compensando così una parte di $\varDelta W$; se α è la lettura al galvanometro sarà:

$$\varDelta W = \varrho + \alpha C$$

ove ϱ è la resistenza nota inserita. Mi sono accertato che il metodo era nel mio caso giustificato.

4. Il campo magnetico era prodotto da un elettrocalamita Ruhmkorff, coi poli della superficie di cm² 9,61 ed alla distanza di cm. 3,5. Il campo magnetico generato dalla corrente era sufficientemente uniforme come riconobbi da misure preliminari. Per ottenere sempre il medesimo campo commutavo più volte, prima di eseguire una misura, la corrente magnetizzante, chiudevo poscia il circuito del galvanometro, e lanciavo di nuovo, sempre nello stesso senso, la corrente magnetizzante. Le misure dell' intensità del campo magnetico venivano sempre fatte prima e dopo delle misure di $\varDelta W$.

Alla misura del campo mi servì una piccola bobina g a filo sottile, di superficie esterna eguale a cm² 3,50 e dello spessore di mm. 5: l'area abbracciata dalle sue spire la determinai paragonando la deviazione galvanometrica ottenuta, per un medesimo campo, con quella data da un'altra bobina piùspessa a filo più grosso, e della quale potei così determinare con precisione l'area.

La bobina g attraverso ad una resistenta z, variabile a seconda dei casi, poteva inserirsi nel circuito del galvanometro stabilendo il contatto del paio 3, 4 con 5, 6 del commutatore.

La costante galvanometrica fu determinata mediante due grosse spirali coassiali di noto coefficiente d' induzione, lanciando una corrente nota nella primaria.

Bisognava tenere conto di due correzioni importanti: il campo magnetico, al cessar della corrente non si annullava, per il magnetismo residuo del ferro; quindi io misuravo in sostanza l'aumento di resistenza della spirale quando il campo variava da questo valore residuo al valore corrispondente all' intensità della corrente. Il valore del campo misurato coll'estrarre rapidamente la bobina era superiore, alla variazione subìta dal campo, di una quantità eguale al magnetismo residuo. Perciò dovetti dopo ogni misura del campo, determinare l' intensità residua, e correggere così il valore del campo stesso.

Inoltre bisognava tener presente che la resistenza iniziale del bismuto era la somma della resistenza, a quella temperatura, in un campo nullo, più l'aumento dovuto al campo residuo. Ora per un campo di circa 2000 unità, l' intensità del magnetismo residuo mi risultò di 36 unità: dalla tabella che segue si può dedurre che alla temperatura di 20° ad un campo di 36 unità corrisponde un aumento di resistenza di Ohm. 0,00074, mentre ad un campo di 2000 un aumento di 0.958: perciò il vero rapporto $\frac{\Delta W}{W}$ non è $\frac{0,958}{18,475}$ ma bensì $\frac{0.958}{18,475 + 0.00074}$. La correzione, come si vede, è in questo caso ed in ogni altro trascurabile.

5. Con i risultati delle mie osservazioni ho potuto costruire la curva di mezzo della fig. 2, che dà il modo di variare del rapporto $\frac{\Delta W}{W}$ con l'intensità H del campo. Da essa estraggo la seguente tabella:

H	$\frac{\Delta W}{W} \cdot 10^5$	H calcolato	Differenze percentuali	H	$\frac{\Delta W}{W} \cdot 10^5$	H calcolato	Differenze percentuali
50	4.32	49.5	+ 1.0	1100	1792.2	1084	+ 1.5
100	17.87	101	— 1.2	1200	2084.3	1181	+ 1.6
200	66.05	195	+ 2.6	1300	2398.7	1281	+ 1.5
300	162.42	307	— 2.3	1400	2712.2	1378	+ 1.6
400	287.01	410	— 2.5	1500	3075.1	1483	+ 1.3
500	436.90	509	— 1.8	1600	3454.4	1591	+ 0 6
600	606.4	603	— 0.6	1700	3844.2	1699	0 0
700	795.9	697	+ 0.4	1800	4272.1	1815	— 0.8
800	1022.1	796	+ 0.5	1900	4721.3	1933	— 1.2
900	1261.5	892	+ 0.9	2000	5187.4	2053	— 2.6
1000	1539.4	991	+ 0.9				

La curva risulta costituita di un ramo d'iperbole riferito ad assi ortogonali passanti pel vertice; calcolando col metodo dei minimi quadrati i valori delle due costanti, trovo che la equazione dell'iperbole è:

$$H^2 = \frac{\Delta W}{W}\left(\frac{\Delta W}{W}\, 46318{,}0 + 5727{,}3\right) \cdot 10^4.$$

Nella terza colonna della precedente tabella sono riportati i valori di H calcolati ponendo nella precedente formula i valori della seconda; nell'ultima ho scritto le differenze percentuali tra i valori della prima e terza colonna: l'accordo è soddisfacente, dimodochè si può affermare che *la legge di variazione della resistenza del bismuto con il campo magnetizzante è iperbolica.* Questo risultato conferma le ricerche del Lenard e dell'Henderson, i quali, come ho osservato in principio, si limitarono al ramo di curva compreso fra 2000 e 30000 unità, e ne osservarono l'andamento asintotico: e spiega anche perchè il Goldhammer, con campi deboli, abbia ritenuto soddisfacente una legge parabolica.

6. Il Lenard ha posto in chiaro che la variazione di resistenza di un filo di bismuto è diversa secondochè il filo è normale o parallelo alle linee

di forza del campo magnetizzante: precisamente più piccola in questo secondo caso. Poichè le spirali di bismuto si utilizzano alla misura dei campi magnetici, mi è sembrato interessante di studiare quale è l'errore che si commette nel misurare un campo, se la spirale non è normale al campo stesso: ed in altre parole vedere come varia la resistenza con l'angolo formato dal piano della spirale con le linee di forza.

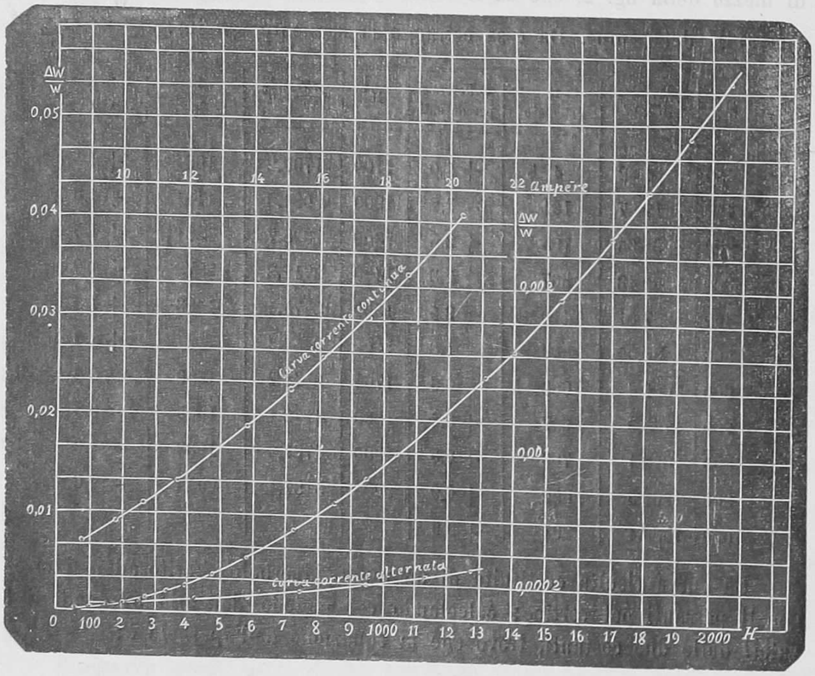

Fig. 2.

Allo scopo di avere un campo il più possibilmente uniforme ho creduto opportuno sostituire all'elettrocalamita Rumhkorff due grandi elettromagneti, le cui faccie polari di forma rettangolare avevano una superficie di cm.^{2} 425, ed erano alla distanza di cm. 4. Per conoscere come e dove il campo fosse però uniforme divisi l'area in 12 parti eguali e misurai la corrispondente intensità, ed ebbi cura di porre la spirale in una regione ove la variazione nelle parti vicine mi risultava minore dell' 1 %. La spirale, munita superiormente d'un cerchio graduato per la misura degli angoli, veniva posta normalmente al campo, osservando la massima deviazione del galvanometro.

Le variazioni di resistenza venivano misurate, a partire da questa posizione, per angoli crescenti di 11° 15'.

Nella prima colonna della seguente tabella sono scritti questi angoli: mentre nella seconda e quarta sono riportate le deviazioni galvanometriche corrette per due campi di diversa intensità: la terza e la quinta colonna sono i valori calcolati assumendo la legge di variazione sinusoidale, e prendendo come ampiezza della sinusoide la semidifferenza dei valori estremi.

α	I. SINUSOIDE		II. SINUSOIDE	
	Intensità campo 582		300	
	Osservato	Calcolato	Osservato	Calcolato
0°	199.5	. .	55.2	.
11° 15′	202.4	202.7	56.2	55.1
22° 30′	211.0	212.0	58.5	58.6
33° 45′	224.4	225.9	62.4	62.5
45°	243.0	242.4	66.6	66.9
56° 15′	259.0	25.87	71.2	71.4
67° 30′	273.1	272.7	75.3	75.3
78° 45′	282.4	281.9	77.7	77.7
90°	285.2	.	78.7	78.7

L'accordo tra il valore osservato ed il calcolato è abbastanza soddisfacente; perciò la resistenza della spirale può essere espressa dalla formula:

$$W = W_0 + A(1 - \cos 2\alpha)$$

essendo W_0 la resistenza per un angolo di 0°, ed A l'ampiezza della sinusoide:

7. Per alcuni metalli magnetici, come il ferro, il nikel, è stato osservato che il valore della resistenza non segue le vicende del campo magnetizzante, ma presenta un fenomeno di isteresi. J. B. Henderson studiò se anche il bismuto presenta questo fenomeno: i suoi risultati non hanno punto risolto la quistione, perchè rimasero nei limiti degli errori possibili: solo afferma che, se esiste, deve essere estremamente piccola.

Il mio metodo si prestava, per la sua sensibilità, a riprendere la questione. A tale scopo adoperai dapprima l'elettrocalamita Rumhkorff: allontanai dai suoi poli la spirale e poscia commutai più volte una forte corrente nell'elettrocalamita, allo scopo di avere sempre uno stato magnetico determinato. Interrotta la corrente, rimisi a posto la spirale e di nuovo lanciai la corrente nell'elettromagnete per un breve tempo. Il galvanometro, interrotta quest'ultima, non mi accusò la benchè minima variazione della primitiva resistenza.

Un risultato egualmente negativo ottenni generando il campo con una grande bobina senza ferro.

Per pormi anche in migliori condizioni ripetei i tentativi, avendo prima sottoposto la spirale ad un processo di smagnetizzazione, come si usa pel ferro, con correnti alternate sempre più deboli. Anche in tal caso ottenni risultati negativi; dimodochè debbo concludere che per la variazione di resistenza del bismuto col campo magnetico non è sensibile affatto l'isteresi.

8. Invece d'una vera isteresi, sembra esistere nel bismuto una « isteresi vischiosa » cioè che le variazioni di resistenza non seguono immediatamente le vicende del campo, ma ciò avviene con un ritardo. Infatti l'Eichhorn, studiando la resistenza d'una spirale di bismuto mobile in un campo non uniforme di circa 7000 unità, ha trovato che la resistenza della spirale in moto è, in un determinato punto del campo, più piccola di quello che si ha quando la spirale vi è ferma, se il moto avviene da un debole verso un forte campo, più grande invece nel caso contrario.

Mi è parso perciò interessante di vedere che cosa succede della resistenza quando la spirale si trova in un campo rapidamente alternante. A questo scopo mi sono servito d'una grossa bobina, senza nucleo di ferro; la spirale era posta nel suo punto medio con il piano parallelo all'asse. Un elettrodinamometro Siemens-Halske mi ha permesso di misurare l'intensità efficace della corrente alternata di periodi 50; essa variò da 10 a 20 ampère circa. I risultati sono rappresentati dalla curva inferiore della fig. 2, ove le ascisse sono le intensità efficaci, e le ordinate il valore di $\frac{\Delta W}{W}$.

Sostituendo alla corrente alternata, una corrente continua ho ottenuto la curva superiore, che è un ramo d'iperbole con l'equazione:

$$I^2 = \frac{\Delta W}{W}\left(\frac{\Delta W}{W}\, 24783 + 168028\right)$$

mentre alla curva inferiore non si addice nè l'equazione d'una iperbole nè quella d'una parabola: perciò il fenomeno si presenta di natura complessa e probabilmente dipenderà tanto dall'ampiezza che dal periodo della corrente alternata. Si può però asserire che la resistenza media in un campo rapidamente alternante è molto minore della corrispondente resistenza che si ha per un campo costante generato da una corrente eguale all'intensità efficace della corrente alternante.

Mi è grato infine di esprimere i miei più sentiti ringraziamenti al prof. H. F. Weber del Politecnico di Zurigo per il materiale ed i consigli datimi nell'esecuzione del presente lavoro.