

Paolantonio Marazzini

LE LEGGI DI OHM

**INDAGINE STORICA DEL CONTESTO
TEORICO-SPERIMENTALE**

CON CONSIDERAZIONI DIDATTICHE



MINERVA SCUOLA

Indice

Premessa	5
----------	---

CAPITOLO 1

Il contrasto teorico - sperimentale sulla conduzione nei solidi durante le prime quattro decadi del XIX secolo 8

1. Introduzione	8
2. Stefan Gray e la scoperta della conduzione	8
3. Le ricerche di Priestley, Cavendish e Leslie sulla conducibilità dei solidi	10
3.1 Una prima scala delle conducibilità	10
3.2 Conducibilità e lunghezza dei conduttori nelle ricerche di Cavendish	12
3.3 Conducibilità e sezione dei conduttori nelle ricerche di Leslie	12
3.4 Limiti delle ricerche del '700 relative alla conduzione	13
4. La pila di Volta e il suo ruolo teorico-sperimentale	13
5. La natura dell'elettricità nei primi decenni dell'Ottocento	16
5.1 Il rapporto fra elettricità e calore	16
5.2 Una o più elettricità?	19
5.3 Un fluido, due fluidi o particelle elettrizzate?	22
6. Il principio generatore dell'elettricità nella pila di Volta	25
6.1 Teoria del contatto e teoria chimica	25
6.2 Il dibattito fra le due teorie	27
6.3 Le tesi di Ohm sulla teoria del contatto	33
7. Complicazioni circuitali associate alla resistenza interna degli elementi di batteria	36
7.1 La mancata proporzionalità fra il numero di elementi di una batteria e l'intensità della corrente	36
7.2 Intensità e velocità della corrente	39
8. Strumenti e tecniche di misura delle grandezze elettriche	41
8.1 Premessa	41
8.2 Gli elettrometri	41
8.3 Misura di proprietà elettriche mediante effetto termico	42
8.4 Misura della conducibilità mediante la scarica di batterie voltaiche	42
8.5 Misure con galvanometro di Ampere-Nobili e moltiplicatore di Schweigger	43
8.6 Tecniche differenziali e di punto zero	44
9. Ambiguità nei termini utilizzati per definire le grandezze relative all'elettricità in movimento	46
9.1 Tensione	47
9.2 Resistenza	47
9.3 Il concetto di resistenza secondo Ohm	48
9.4 Intensità e quantità dell'elettricità	49
10. Le leggi sulla conducibilità dei conduttori e sul circuito nel quadro non ohmico	52
10.1 Conducibilità, lunghezza, sezione di fili metallici	53
10.2 Una legge per il circuito	55

CAPITOLO 2	
Le leggi di Ohm	59
1. Introduzione	59
2. Le ricerche sperimentali di Ohm	59
3. Una prima formalizzazione delle leggi di Ohm	62
4. Introduzione alla “teoria matematica del circuito galvanico”	64
5. Una descrizione “più libera” della legge del circuito	65
6. Una “compatta” deduzione matematica della legge del circuito	70
7. Applicazioni delle leggi di Ohm	74
7.1 Corrente e tensione in un circuito aperto	74
7.2 L'identità della corrente in un circuito	75
7.3 Espressione della grandezza della corrente in un circuito contenente una resistenza variabile	75
7.4 Confronto fra circuiti termoelettrici e idroelettrici (voltaici)	76
7.5 Pile in serie	76
7.6 Pile in parallelo	77
7.7 Effetti del galvanometro in un circuito	78
7.8 Resistenze in parallelo	79
8. La diffusione delle leggi di Ohm	80
8.1 Nei paesi di lingua tedesca	80
8.2 In Inghilterra	81
8.3 In Italia	81
8.4 In Francia	83
Considerazioni conclusive	84
Testi	85
Comunicazione provvisoria della legge secondo la quale i metalli conducono l'elettricità di contatto	85
Prima serie di esperimenti	85
Seconda serie di esperimenti	86
Terza serie di esperimenti	87
Postfazione	88
Determinazione della legge secondo la quale i metalli conducono l'elettricità di contatto, insieme a un abbozzo di una teoria dell'apparato di Volta e del moltiplicatore di Schweigger	89
Appendice didattica	101
Premessa	101
1. Introdurre la legge di Ohm senza ricorrere al concetto di campo elettrico	101
2. Creare dubbi sulla proporzionalità diretta tra differenza di potenziale applicata ai capi di un conduttore e intensità di corrente fluente in esso	103
3. Risolvere problemi “strani” alla luce delle leggi di Ohm	106
Note bibliografiche	111

Premessa

A proposito delle “leggi di Ohm”, così si legge nel Trattato di Maxwell del 1873:

“Le relazioni fra forza elettromotrice, corrente e resistenza, furono studiate per la prima volta da G.S. Ohm, in un lavoro pubblicato nel 1827, intitolato *Trattazione matematica della catena galvanica* [...]. Il risultato di queste ricerche nel caso dei conduttori omogenei è comunemente detto “legge di Ohm”.

La legge di Ohm

La forza elettromotrice che agisce tra le estremità di una parte qualunque di un circuito è uguale al prodotto dell'intensità della corrente per la resistenza di quella parte del circuito.”

[Maxwell 1873, pp. 631-632]

Questa perentoria affermazione di Maxwell contiene un errore di natura storica e opera una sintesi semplificatrice e involontariamente banalizzante di concetti acquisiti faticosamente nel corso di decenni. In effetti, le relazioni fra la “forza” di un generatore elettrostatico o di una pila voltaica, il “flusso di elettricità” da questi creato in un conduttore metallico e l’“ostacolo” offerto dal conduttore medesimo erano state oggetto di ricerca già prima del 1827 e frammenti di ciò che Maxwell ricorda come leggi di Ohm erano già stati enunciati da altri.

Tuttavia la legge in questione scaturisce solo quando si giunge ad attribuire un corretto contenuto fisico alle grandezze in essa coinvolte. In quel momento emerge la legge, che è essa stessa parte di quel processo di chiarimento, e da quel momento si comprende il perché delle ambiguità o addirittura delle contraddittorietà di molti precedenti risultati sperimentali.

In questo processo di creazione di una corretta legge del circuito elettrico, Ohm fu realmente il primo e talmente poco banali furono alcuni suoi enunciati, talmente in contrasto con la maggior parte delle ipotesi che all'epoca venivano formulate relativamente alla conduzione elettrica, da essere accettati solo con un ritardo di circa quindici anni dalla comunità scientifica europea.

Il concetto radicalmente nuovo di “grandezza della corrente” (l'attuale intensità di corrente) e l'ipotesi della sua stazionarietà; l'idea che la tensione dei punti del circuito vari lungo il circuito stesso in stretta relazione con la “lunghezza ridotta” (l'attuale resistenza elettrica) dei suoi elementi, costituiscono le intuizioni geniali che diedero ordine logico alla massa di dati sperimentali relativi alla conduzione elettrica nel circuito elettrico che erano stati rilevati dopo la scoperta della pila di Volta. Nella formulazione di queste ipotesi, Ohm si giovò certamente dell'analogia fra conduzione elettrica e conduzione termica, resa evidente dalla identità formale delle sue equazioni differenziali e di quelle proposte da Fourier qualche anno prima. Questa analogia suggerì a Ohm una “intima connessione tra i due fluidi” ma, ciononostante, sia a questo proposito sia relativamente ad altre questioni, egli seppe mantenere un atteggiamento metodologico che gli consentì di non impelagarsi nelle sabbie mobili delle “ipotesi fisiche” (in senso newtoniano).

Così, ad esempio, pur propendendo per un'idea monofluidica della corrente, egli si limiterà sempre a parlare di “passaggio dell'elettricità” determinato dalla tendenza delle diverse porzioni del circuito a raggiungere l'equilibrio elettrico, rivelato, a sua volta, dall'identità delle forze indicate dall'elettroscopio.

Analogamente, pur essendo profondamente convinto della correttezza dell'ipotesi voltiana del contatto bimetallico quale generatore della forza elettromotrice

della pila, nella descrizione matematica del circuito, quella ufficiale, egli si limiterà ad immaginare che “in un luogo” di un “anello omogeneo [...] e secondo tutta la sua spessore siasi in qualsivoglia modo prodotta una medesima tensione elettrica”.

Purtroppo questa posizione metodologica, che oggi riconosciamo molto corretta e come la più adatta a generare una conoscenza almeno fenomenologica, non era condivisa dalla maggior parte dei fisici dell'epoca i quali perciò rigettarono, insieme alle “ipotesi fisiche” di Ohm anche le sue ipotesi matematiche.

Struttura della monografia

Il lavoro verrà articolato in due capitoli e un'appendice.

Nel primo capitolo vengono illustrate le teorie e le ricerche fondamentali relative alla conduzione nei solidi che vanno, all'incirca, dalla invenzione della pila di Volta all'affermarsi della teoria di Ohm (fine degli anni Quaranta) con qualche riferimento a importanti lavori del Settecento.

Nel secondo capitolo vengono esposti e commentati i contenuti fondamentali della teoria di Ohm.

L'appendice contiene alcune considerazioni didattiche che potrebbero essere utilizzate per ridurre, almeno in parte, quel carattere di banalità che purtroppo affligge le consuete “verifiche sperimentali” della legge di Ohm proposte nella scuola secondaria superiore italiana (nonché, nel primo biennio dei corsi di laurea scientifici).

Per la stesura del primo capitolo è stata eseguita una lettura sistematica degli articoli scientifici pubblicati, durante la prima metà del 1800, sulle seguenti riviste:

- «*Journal de physique et d'Histoire naturelle*»
- «*Annales de chimie et de physique*»
- «*Philosophical Transactions*»
- «*Annalen der Physik und Chemie*»
- «*Memorie di matematica e di fisica della società italiana delle scienze (Accademia dei XL)*»
- «*Mémoires de l'Académie des Sciences de Turin*»
- «*Miscellaneæ medico-chirurgico-farmaceutiche*» (1843)
- «*Il Cimento*» (1844-46).

Sono poi stati consultati articoli di letteratura secondaria, nonché le opere dei principali protagonisti di questa vicenda scientifica.

Per il secondo capitolo si sono esaminati i lavori di Ohm del 1825-26 e la monografia da lui pubblicata a Berlino nel 1827: *Die Galvanische Kette mathematisch bearbeitet* nella traduzione di Achille Perugia dal titolo *Teoria matematica del circuito galvanico* (tipografia Vannucchi, Pisa 1847).

La traduzione del Perugia possiede uno stile che potrebbe creare qualche problema di lettura ma è sicuramente vicina alla mentalità dell'epoca e quindi fedele a quello che doveva essere il linguaggio di Ohm.

La monografia è corredata dalla traduzione dei primi due articoli di Ohm relativi all'argomento in esame. Il primo: *Vorläufige Anzeige des Gesetzes, nach welchem Metalle di Kontaktelektricität leiten*, *Annalen der Physik*, 1825, Vol.4, pp.79-87, contenente la descrizione di una serie di esperimenti, realizzata con un generatore voltaico, che condusse a una prima formulazione (errata!) della legge del circuito; il secondo: *Bestimmung des Gesetzes, nach welchem Metalle die Kontakt-Elektrizität leiten*, ecc., *Schweigger Journal für Chemie und Physik*, 1826, Vol.46, pp.137-166, contenente la descrizione di una serie di esperimenti, realizzata con una coppia termoelettrica, che verifica la corretta formulazione della legge del circuito.

La scelta di questi lavori è stata determinata dal fatto che in essi sono presenti una componente sperimentale adatta a esemplificare in modo efficace le metodiche di laboratorio dell'epoca e una componente teorica di facile leggibilità. Le considerazioni che Ohm riporta in esse consentono inoltre di cogliere gli aspetti fondamentali delle problematiche che rendevano difficile il perseguimento di una legge soddisfacente per il circuito elettrico. Ampii segmenti di tali lavori potrebbero pertanto essere utilizzati da un docente di scuola media superiore o di biennio universitario per corredare, dal punto di vista storico, le proprie lezioni sulla legge di Ohm.

Avvertenza

I termini con i quali i fisici dell'Ottocento designavano le grandezze che determinano il regime del circuito elettrico sono spesso coincidenti con gli attuali, ma il loro significato può essere notevolmente diverso. Dedicheremo un paragrafo apposito per illustrare il significato ottocentesco di termini quali "resistenza", "tensione", "forza elettroscopica", "intensità di corrente", ecc. e, in più punti, aggiungeremo note specifiche per ricordare quei significati. Il lettore dovrà compiere un certo sforzo di memorizzazione di questi termini, perché solo così potrà comprendere il senso delle citazioni via via riportate nel testo. Si noterà inoltre che una stessa grandezza può essere indicata da autori diversi, o dallo stesso autore in lavori diversi, con termini non del tutto identici, ma ciò è tipico delle fasi in cui una teoria scientifica sta prendendo forma e mette in evidenza appunto la carica di ambiguità presente nel periodo storico da noi esaminato relativamente al fenomeno della conduzione elettrica.

La traduzione dei testi, ove non diversamente indicato, è dell'Autore.

Capitolo 1

Il contrasto teorico-sperimentale sulla conduzione nei solidi durante le prime quattro decadi del XIX secolo

1. Introduzione

In questo capitolo ci si propone di descrivere il contesto teorico - sperimentale relativo alla conduzione nei solidi entro il quale sono inserite le ricerche di Georg Simon Ohm (1787-1854) sul medesimo argomento.

Tali ricerche furono sviluppate negli anni 1825-1826 e coronate, nel 1827, con la pubblicazione del trattato intitolato *Die Galvanische Kette mathematisch bearbeitet*. Si è perciò ritenuto opportuno indagare in modo sistematico il periodo che va dalla invenzione della pila (1800) agli anni Cinquanta dell'Ottocento, coincidenti con la definitiva affermazione in tutta Europa delle teorie di Ohm ad eccezione di quella riguardante la causa generatrice della forza elettromotrice.

L'esame di tale periodo verrà preceduto da un'indagine, rapida e non sistematica, di quanto prodotto sull'argomento nel Settecento, con lo scopo di illustrare l'origine:

- a) di alcune metodiche sperimentali che poi l'Ottocento svilupperà appieno con l'ausilio del generatore voltaico;
- b) di alcuni problemi teorici sui quali i fisici ottocenteschi dibatterono con accanimento per alcuni decenni.

2. Stefan Gray e la scoperta della conduzione

I primi lavori sperimentali sulla conduzione dell'elettricità si fanno solitamente risalire a Stephen Gray¹ (1666-1736).

Nel 1731, sulle pagine del *Philosophical Transactions of the Royal Society* compare infatti una sua memoria nella quale viene descritta una serie di esperimenti eseguiti alcuni anni prima e comprovanti la possibilità di condurre attraverso certi corpi la "virtù elettrica".

L'origine della scoperta fu in qualche modo casuale.

Nel 1728, Gray stava eseguendo esperimenti di elettricità con un tubo di vetro cavo (avente lunghezza di tre piedi e cinque pollici, diametro di un pollice e due decimi e chiuso agli estremi con tappi di sughero, per evitare l'ingresso della polvere) e una piuma destinata a evidenziare gli effetti attrattivi dello stato di carica del tubo.

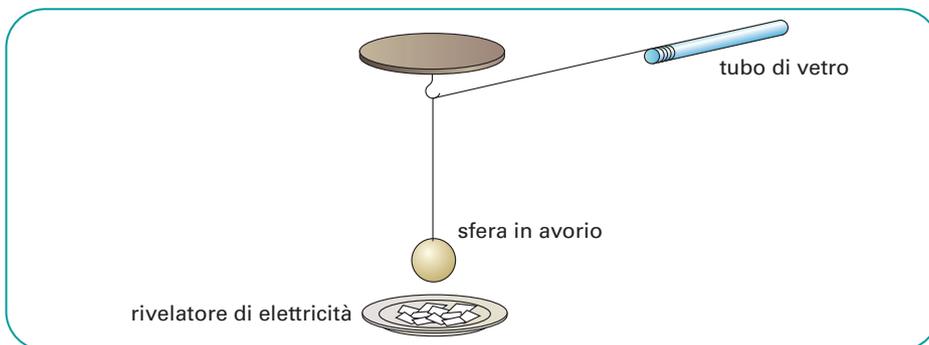
¹In effetti la prima constatazione della possibilità di propagare l'elettricità lungo i corpi è descritta da Otto Von Guericke (Otto Von Guericke, 1672). L'esperimento da lui eseguito mette in evidenza che l'elettricità prodotta da una sfera di zolfo opportunamente sfregata si può propagare lungo un filo di lino. Lo scopo di tale esperimento non era però svolgere un'indagine sistematica sul fenomeno della conduzione elettrica, ma semplicemente dimostrare che l'aria non è essenziale per lo sviluppo di tale processo. Si trattò quindi di un esperimento fine a se stesso, che né Von Guericke né altri avevano interesse a sviluppare ulteriormente. Inoltre si trattava di un esperimento che il suo autore inseriva in una visione teorica dell'elettricità piuttosto bizzarra, se non addirittura magica, nella quale l'elettricità è vista come l'effetto di "virtù mondane" insite nella materia.

Come si usava fare in quel tipo di esperimenti, la piuma veniva fatta cadere dall'alto, sulla verticale del tubo, precedentemente sfregato con seta o altro materiale e generalmente mantenuto orizzontalmente. Durante uno di questi esperimenti egli notò che la piuma:

“[...] andava verso il tappo, essendo attratta e respinta da esso come dal tubo quando è stato eccitato per sfregamento. Allora tenni la piuma sulla parte piatta del tappo che attraeva e respingeva molte volte; la qual cosa mi sorprese molto e conclusi che il tubo eccitato certamente comunicava una virtù attrattiva al tappo.”

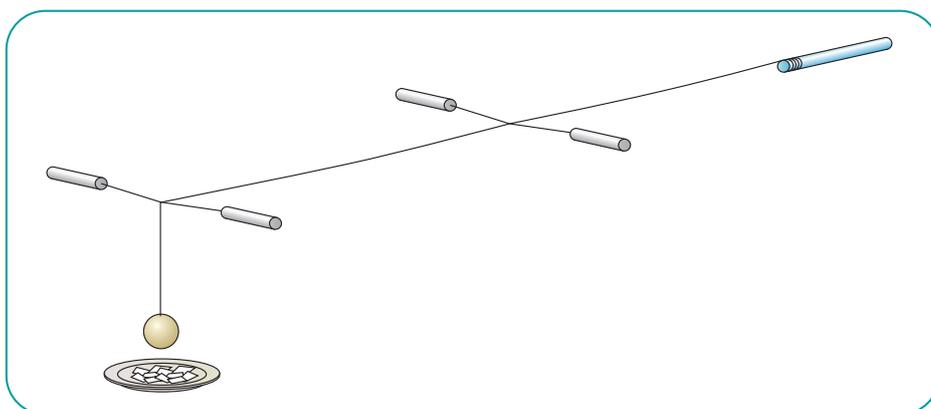
[Gray, 1731, p.19]

Dopo questa prima osservazione Gray pensò di aumentare la distanza alla quale portare gli effetti elettrici infilando dei leggeri bastoncini all'estremità del tubo generatore e applicando a questi dei fili di spago che faceva pendere dal proprio balcone di casa. Quando queste brevi distanze non lo soddisfecero più, pensò di utilizzare una corda disposta orizzontalmente. Un estremo di questa veniva fissata al tubo di vetro destinato a generare l'elettricità e l'altro estremo a una palla di avorio sulla quale avrebbe dovuto trasferirsi la carica elettrica. La parte terminale della corda veniva fatta passare sopra un gancio in ferro e da questo pendeva poi verso il rivelatore dell'elettricità (un recipiente contenente pagliuzze o leggeri pezzi di carta) (**figura 1**).



In queste condizioni però l'effetto elettrico sembrava non propagarsi: la palla d'avorio infatti non manifestava alcun effetto attrattivo sui pezzettini di carta o sulle pagliuzze posti sotto di essa.

Più tardi, nel 1729, Gray riprese i suoi esperimenti con l'aiuto, anche economico, del reverendo Granville Wheler appoggiando la linea orizzontale trasmittente (di circa ottanta piedi) su due tratti trasversali di seta (**figura 2**).



In queste condizioni i risultati tornarono a essere buoni: la palla d'avorio dava ora evidenti segni di elettrizzazione. Incoraggiato dalla risposta positiva dell'esperimento, Gray aumentò ulteriormente la lunghezza della linea facendo passare più volte, avanti e indietro, la corda sui fili di seta di sostegno. Poiché il troppo peso dei tratti di fune determinava la rottura dei fili di seta, questi vennero sostituiti con fili di ottone; ma con questo nuovo assetto sperimentale l'effetto di propagazione dell'elettricità scompariva nuovamente. Da qui l'intuizione fondamentale:

“[...] da ciò ci convincemmo che i successi che prima avevamo ottenuto dipendevano dalle funi che sostenevano la linea di comunicazione, dal fatto cioè che erano di seta e non dal fatto di essere sottili, come avevo supposto prima dell'esperimento.”

[idem, p. 29]

Questa affermazione equivaleva alla scoperta dell'esistenza di sostanze conduttrici e sostanze isolanti.

Dalla lettura delle memorie di Gray si può dedurre che egli affrontò lo studio di questi problemi più con lo spirito del dilettante entusiasta che con quello del ricercatore metodico e perciò si dovrà attendere il lavoro di Charles François Du Fay (1698-1739), di pochi anni posteriore, per giungere a precisare con chiarezza:

“Quali siano i corpi che possono arrestare o facilitare la trasmissione di questa virtù, sia che essa passi per mezzo di una corda, d'una bacchetta, o del solo avvicinamento di una cannuccia e quali siano quelle che sono più vivamente attratte dai corpi elettrici.”

[Du Fay, 1733 a, p. 73]

La conclusione di questi lavori fu la seguente:

“Al presente ci basta aver riconosciuto e stabilito per principio che i corpi meno adatti a divenire elettrici per sé stessi sono quelli che sono più facilmente attirati e che trasmettono più lontano e più abbondantemente la materia elettrica; al contrario, quelli che hanno più disposizione a divenire elettrici per sé stessi sono i meno adatti di tutti ad acquistare una elettricità estranea e a trasmetterla a una distanza considerevole.”

[Du Fay, 1733 b, p. 253]

2 Ricordiamo che i corpi “elettrici per sé stessi” sono quelli che manifestano uno stato elettrico dopo essere stati opportunamente sfregati (come l'ambra e il vetro). Come oggi sappiamo, tutti i corpi sono, in qualche misura, “elettrici per sé stessi”, ma solo quelli dotati anche di proprietà isolanti sono in grado di non disperdere troppo rapidamente lo stato di carica acquisito, attraverso la mano e il corpo dell'operatore che li sorregge.

3 Il generatore a globo di vetro sfregato manualmente o con carta o cuoio era già stato realizzato da Francis Hauksbee (1666-1713) all'inizio del 1700 (si veda ad esempio Hauksbee, 1716), ma, a causa della difficoltà di realizzarlo, cadde in disuso a favore dei tubi di vetro meno costosi, più pratici, ma anche meno efficaci.

3. Le ricerche di Priestley, Cavendish e Leslie sulla conducibilità dei solidi

3.1 Una prima scala delle conducibilità

Le ricerche sulla conduzione dell'elettricità nei corpi non ebbero un grande sviluppo nei successivi quindici anni, probabilmente anche a causa della mancanza di generatori capaci di sviluppare quantità consistenti di fluido elettrico. Il diffondersi dei generatori a globi di vetro³ o a cilindri di vetro e, soprattutto, l'invenzione della bottiglia di Leida (1745, Ewald Jürgen Kleist in Germania, Pietre van Musschenbroek e Andreas Cunaeus in Olanda) eliminarono questa carenza

e, in breve tempo, si cominciarono a esaminare gli effetti della propagazione dell'elettricità in "circuiti umani" (per il diletto delle dame e dei gentiluomini del settecento) e, con obiettivi più scientifici, in fili metallici o di altro materiale. Nel terzo volume della sua *Storia dell'elettricità*, Joseph Priestley (1733-1804) riporta un resoconto delle sue ricerche sulla conducibilità di materiali diversi, consistenti nel rilevare la facilità con la quale fili metallici di uguali dimensioni geometriche, realizzati con quei materiali e disposti in serie tra i capi di una batteria di bottiglie di Leida, subivano il processo di fusione.

“Ricordo che, essendomi una volta trovato con il Dottor Franklin, il Sig. Canton e il Sig. Price, io chiesi se fosse probabile che vi fosse qualche differenza nel potere conduttore di diversi metalli e, nel caso vi fosse, se fosse possibile accertare questa differenza.

[...] ho tentato di mettere in esecuzione questo progetto, trasmettendo nel medesimo tempo la stessa scarica della batteria, attraverso due fili di diverso metallo e di identica grossezza. Essi furono agganciati l'uno all'altro e [...] [si assegnò loro], con precisione, la medesima lunghezza.⁴

[...] Anzitutto ho riunito un capo di filo di ferro a un altro di rame. La scarica fonde totalmente il ferro e lascia il rame intatto. Parimenti l'ottone si fonde quando lo riunisco al rame e il ferro quando lo riunisco all'ottone.

[...] Dopo queste esperienze è facile stabilire in quale ordine i metalli sopra nominati devono essere ordinati in rapporto al potere che l'elettricità ha di fonderli. Cioè: il ferro, l'ottone, il rame, l'argento, l'oro.

[...] Prima di poter fare qualche uso di queste esperienze, per determinare il potere conduttore relativo dei diversi metalli, è necessario confrontare l'ordine nel quale essi si fondono a un calore ordinario, con l'ordine nel quale essi si fondono per la scarica elettrica.”

[Priestley, pp. 454 e seg.]

Priestley non esegue questo confronto e anzi osserva che occorrerebbe anche determinare prima l'attitudine a fondersi di fili metallici di lunghezza e grossezza diverse. Il paragrafo termina senza che l'autore tragga precise conclusioni sulla conducibilità elettrica dei materiali. Unica considerazione è la seguente:

“Non dubito che una scarica che fonde un filo di rame di un dato diametro, non fonda un filo di ferro di un diametro doppio; in modo che sarà molto più sicuro, per proteggere un edificio dal fulmine, realizzare il conduttore in rame piuttosto che in ferro, tanto più che esso è meno soggetto all'arrugginimento, anche se ciò sarà più dispendioso.”

[idem, p. 459]

I passi precedenti giustificano l'ipotesi che, secondo Priestley, il materiale elettricamente più conduttore fosse quello che meglio manteneva la sua integrità fisica al passaggio dell'elettricità. Si noti che tale intuizione risulta corretta anche alla luce delle attuali teorie sulla conduzione. Si supponga infatti che due fili di materiali diversi, di conducibilità rispettivamente σ_1 e σ_2 , con $\sigma_1 > \sigma_2$, abbiano identica lunghezza l e sezione S . Poichè, nell'esperimento di Priestley, il cortocircuito della batteria di bottiglie di Leida veniva realizzato con i due fili disposti in serie, la potenza termica in essi sviluppata (proporzionale a i^2/σ_1 , i^2/σ_2) risulta inversamente pro-

⁴ Si osservi che questa disposizione corrisponde, come s'è detto in precedenza, a un collegamento in serie dei due segmenti di filo di diversa natura da esaminare e al collegamento degli estremi di questa serie ai due poli della batteria di bottiglie di Leida.

5 Per comodità del lettore ricordiamo che, per il rame:

calore specifico: $0,092 \text{ cal}/(\text{g } ^\circ\text{C})$;

temperatura di fusione: $1083 \text{ } ^\circ\text{C}$;

densità: $8,96 \text{ g}/\text{cm}^3$;

resistività: $1,7 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$;

per l'oro invece si ha, rispettivamente:

$0,33 \text{ cal}/(\text{g } ^\circ\text{C})$;

$1065 \text{ } ^\circ\text{C}$;

$19,3 \text{ g}/\text{cm}^3$;

$2,3 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$.

6 Da alcuni passi riportati alle pagine 197-198 di un suo lavoro del 1776 (Cavendish, 1776), si può stabilire che egli deve aver eseguito successivamente misure di conducibilità di sostanze liquide e solide utilizzando come generatore di elettricità le bottiglie di Leida. Il fatto che il confronto delle conducibilità dei materiali diversi avvenisse a parità di lunghezza e diametro del canale conduttore indica con una certa sicurezza che Cavendish ritenesse confermata anche sperimentalmente la dipendenza della conducibilità da questi due parametri. Dall'articolo ora ricordato non si può però desumere quale fosse l'ampiezza e la generalità degli esperimenti di Cavendish; l'autore li caratterizza tuttavia come *some experiments* e si può quindi dedurre che essi non siano stati né particolarmente numerosi né particolarmente variati.

7 La frase appare oggi molto ambigua. Infatti non è la carica il parametro determinante che produce la fusione del filo, ma l'intensità della corrente; va però tenuto presente che, in un processo di scarica di un condensatore, qual è, in definitiva, una batteria di bottiglie di Leida, l'intensità di corrente è data da:

$$i = i_0 e^{-t/(RC)} = \Delta V/R e^{-t/(RC)} = Q/(RC) e^{-t/(RC)}$$

A parità di C, quindi, una batteria maggiormente carica sarà in grado di creare una scarica nella quale l'intensità di corrente è mediamente maggiore.

porzionale alla loro conducibilità; minore quindi nel rame e maggiore nel ferro che, perciò, fonde prima. Come è noto, però, in questi fenomeni giocano un ruolo determinante anche la massa dei fili, la loro capacità termica e la temperatura di fusione del materiale di cui sono fatti. Ciò spiega perché, ad esempio, nella serie di Priestley il rame precede l'oro pur essendo maggiore la sua conducibilità elettrica.⁵

3.2 Conducibilità e lunghezza dei conduttori nelle ricerche di Cavendish

Anche Henry Cavendish (1731-1810), in un suo lavoro pubblicato nel 1771, affronta il problema della mobilità dell'elettricità nei conduttori. Il suo approccio è però essenzialmente teorico e si fonda sull'ipotesi di una repulsione del fluido elettrico (repulsione che, per svariati motivi, egli ritiene inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra i baricentri dei corpi che lo possiedono). A partire da questa idea egli deduce che:

“se un corpo di qualunque dimensione viene elettrificato nella stessa misura dell'armatura Bd [di un condensatore] e si stabilisce una connessione fra il corpo e la terra mediante un canale della medesima lunghezza, larghezza e spessore di NRS [NRS, nella figura riprodotta nel lavoro di Cavendish che qui non riportiamo perché del tutto intuitiva, rappresenta il conduttore che collega l'armatura Bd con quella opposta Ef], il fluido sarà spinto in quel canale con la stessa forza che lo sospinge in NRS, supponendo che il fluido in entrambi i canali sia incompressibile; conseguentemente, siccome la quantità di fluido da porre in movimento e la resistenza al suo moto è la stessa in entrambi i canali, il fluido dovrà muoversi in essi con identica rapidità. Perciò, ciò che si è detto all'inizio di questa sezione, cioè che una scossa altrettanto grande sarebbe prodotta realizzando una comunicazione fra il conduttore e la terra come fra i due lati della bottiglia di Leida mediante canali di identica lunghezza e del medesimo tipo, sembra una conseguenza necessaria di questa teoria [...] Spero di essere presto in grado di dire se ciò si accorda con gli esperimenti così come accade con la teoria.”⁶

È degno di nota osservare che, più lungo è il canale NRS, mediante il quale si stabilisce la connessione [fra due corpi di cui uno elettrizzato], minore sarà la rapidità con la quale il fluido si muove lungo questo; infatti, più lungo è il canale, maggiore è la resistenza al moto del fluido in esso; mentre la forza con la quale l'intera quantità di fluido è spinta in esso è la stessa qualunque sia la lunghezza del canale. Di conseguenza, nel fondere piccoli fili facendo passare attraverso essi una scarica, si trova che più lungo è il filo maggiore è la carica richiesta per fonderlo.⁷”

[Cavendish, 1771, paragrafi 130 - 131]

3.3 Conducibilità e sezione dei conduttori nelle ricerche di Leslie

Sulla medesima linea si collocano i lavori sperimentali di John Leslie (1766-1832). Il suo punto di partenza è la convinzione che non esistono corpi assolutamente conduttori e corpi assolutamente isolanti per quanto riguarda l'elettricità, ma che l'unico parametro che differenzia i corpi da questo punto di vista è la rapidità del trasferimento del fluido elettrico.

Anch'egli, come Cavendish, ipotizza che il fluido elettrico sia di tipo elastico e che le sue particelle si respingano mutuamente. Assumendo poi come modello della conduzione elettrica quello relativo alla conduzione del calore, egli deduce teoricamente che la rapidità della trasmissione è inversamente proporzionale alla lunghezza e direttamente proporzionale alla sezione del conduttore in cui si realizza.

“queste deduzioni sono confermate dagli esperimenti [...] se una striscia di carta, sufficiente a scaricare una bottiglia di Leida in circa un quarto d'ora, viene strisciata leggermente con polvere di carbone, si produrrà l'effetto in dieci secondi. Se si riduce a metà la sua larghezza, ci vorrà un tempo circa doppio e se viene ancora accorciata a metà della sua lunghezza, il tempo sarà quasi lo stesso del primo caso. Se la polvere di carbone viene distribuita più spessa, la scarica sarà più rapida fino a che l'intervallo di tempo non potrà più essere distinto.”

[Olson, 1969, p. 192]

Leslie sembra dunque rendersi conto che l'attitudine di un corpo ad essere attraversato dall'elettricità dipende non solo dalla sua natura e dalla sua lunghezza ma anche dalla sua sezione. Si tratta dunque dell'intuizione di ciò che oggi denominiamo seconda legge di Ohm. Si tenga però presente che il lavoro di Leslie fu pubblicato solo nel 1824 e che, comunque, esso si colloca nel quadro settecentesco della descrizione statica dell'elettricità. Ciò, come si vedrà in un successivo paragrafo, era sufficiente per molti fisici a far ritenere che si trattasse di fenomeni elettrici regolati da leggi diverse da quelle che descrivevano l'elettricità voltaica.

3.4 Limiti delle ricerche del '700 relative alla conduzione

Come si vede, nella seconda metà del Settecento esistono ormai notevoli intuizioni sul fenomeno della conduzione, ma si tratta appunto di intuizioni di tipo non sistematico e semiquantitativo, perché con le batterie di bottiglie di Leida, delle quali, oltretutto, non era ancora nota la dinamica della scarica, non si poteva pretendere di ottenere flussi di corrente di intensità costante e determinata. D'altra parte, a quell'epoca, non si sapeva bene come caratterizzare quantitativamente tali flussi, sia per carenze teoriche (che cosa misura la “forza” di un flusso di elettricità? che cosa misura la “quantità” di elettricità? ecc.) sia per carenze strumentali. A questo proposito si tenga presente che gli strumenti elettrici di misura della fine del Settecento erano solo la bilancia a torsione (Coulomb, 1785) e l'elettroscopio a foglie (in proposito si veda ad esempio Volta, 1787, p.185-186) e che entrambi erano dei rivelatori degli stati di *tensione* dei corpi elettrizzati (cioè, con termini attuali, del valore del loro potenziale), non della quantità o delle intensità dei flussi di elettricità.

4. La pila di volta e il suo ruolo teorico sperimentale

“Dopo un lungo silenzio, di cui non cercherò di scusarmi, ho il piacere di comunicarvi, Signore, e, per vostro mezzo, di comunicare alla Società Reale alcuni stupendi risul-

tati ai quali sono arrivato, perseguendo le mie esperienze sull'elettricità eccitata dal semplice mutuo contatto di metalli di differenti specie, e dal contatto di altri conduttori, differenti anch'essi fra loro, sia liquidi, sia contenenti qualche umore al quale essi propriamente debbono il loro potere conduttivo. Il principale di questi risultati, e che comprende presso a poco tutti gli altri, è la costruzione di un apparecchio che per gli effetti, cioè per la commozione che è capace di far risentire nelle braccia, ecc., rassomiglia alle bottiglie di Leida e meglio ancora alle batterie elettriche debolmente caricate, che agiscono però senza posa, ossia la cui carica, dopo ciascuna esplosione, si ristabilisce da sé stessa, in una parola, che fruisce di una carica indefettibile, d'un'azione, o impulso perpetuo sul fluido elettrico; ma che d'altra parte ne differisce essenzialmente, sia per quest'azione continua che gli è propria, sia perché, invece di consistere, come le bottiglie e le batterie elettriche ordinarie, in una o più lamine isolanti, in strati sottili di quei corpi reputati essere i soli elettrici, armate di conduttori o corpi così detti non elettrici, questo nuovo apparecchio è formato unicamente di parecchi di quest'ultimi corpi, scelti anche tra i migliori conduttori, e perciò i più lontani, secondo quanto si è sempre creduto, dalla natura elettrica. Sì, l'apparecchio di cui vi parlo e che senza dubbio vi meraviglierà, non è che l'insieme di un numero di buoni conduttori di differente specie, disposti in modo particolare, 30, 40, 60 pezzi, o più, di rame, o meglio d'argento, applicati ciascuno a un pezzo di stagno, o, ciò che è molto meglio, di zinco, e un numero uguale di strati d'acqua, o di qualche altro umore che sia miglior conduttore dell'acqua semplice, come l'acqua salata, la lisciva, ecc., o dei pezzi di cartone, di pelle, ecc., bene imbevuti di questi umori: di tali strati interposti a ogni coppia o combinazione di due metalli differenti, una tale serie alternata, e sempre nel medesimo ordine di questi tre pezzi conduttori, ecco tutto ciò che costituisce il mio nuovo strumento;”

[Volta, 1800, pp.514- 515]

Questo lungo passo ha come scopo non solo quello di ricordare, con le parole dello stesso Alessandro Volta (1745-1827), la struttura fisica della sua invenzione ma anche quello di sottolinearne la straordinaria importanza nell'ambito delle ricerche sulla elettricità a cavallo dei secoli XVIII e XIX sia sul versante sperimentale sia su quello teorico.

Per quanto riguarda le conseguenze sulla sperimentazione relativa ai fenomeni elettrici, basterà riflettere sul fatto che l'invenzione della pila metteva finalmente a disposizione dei fisici dell'epoca una sorgente capace di fornire flussi di elettricità di valore variabile a piacere e relativamente costanti nel tempo, ampliando enormemente le possibilità di indagare le proprietà elettriche dei corpi e, soprattutto, di indagarne indirettamente la composizione elementare attraverso i processi di decomposizione chimica.

A questo proposito così si legge nelle Memorie dell'Istituto Nazionale Italiano, pubblicate nel 1806:

“Non sia disdetto d'inserir pure fra questi estratti quello di una nobile memoria chimica [di Brugnatelli] [...]

Avvolgesi essa intorno a un argomento che sopra forse ogni altro a' dì nostri tiene rivolta verso di se l'industria de' Fisici e de' Chimici commossi e accesi, e a fin di usare un traslato che in questo incontro appena è tale, elettrizzati per così dire dalle scoperte immortali di Galvani e di Volta. Fra essa quella del piliere d'invenzione di quest'ultimo è stata accolta con un entusiasmo di cui in niuna forse delle sue epoche lo studio della natura non ci presenta un esempio uguale.

Basti il dire che tanti sono entrati nella carriera schiusa loro d'innanzi da questo strumento, e lo studio ne ferve a un segno per tutta Europa, che la copia de' materiali raccolti nel breve giro di pochi anni ha messo in istato un valoroso e zelante Franzese di tesserne e pubblicarne la storia. ”

[Memorie dell'Istituto Nazionale Italiano, 1806, pag. LIV]

Gli italiani furono certamente i più prodighi nel celebrare l'invenzione del Volta e nel considerare ogni invenzione successiva appartenente al dominio dei fenomeni elettrici quasi come sua diretta conseguenza. Ricordiamo in proposito (Carradori, 1817) ove, a pag. 42, la pila di Volta viene ricordata come “un prodigio in Fisica, la gloria del nostro secolo, che sarà sempre oggetto di studio, e sorgente di istruzione...” e, ancora, (Configliachi, 1833) e (Majocchi, 1838). In quest'ultima memoria i principi della pila vengono considerati come possibile chiave interpretativa dell'”incandescenza che prova da tanti secoli il Sole...”, della fosforescenza, dei mutamenti geologici, della sensibilità animale e di funzioni biologiche quali la digestione, la secrezione, la respirazione e la pila stessa viene considerata come il mezzo più adatto a indagare la natura degli elementi, a curare le paralisi, il reumatismo e altre malattie e come strumento dal quale era scaturita quasi spontaneamente la scoperta dell'effetto magnetico prodotto dalla corrente elettrica. Da tutto ciò, coerentemente, deriva la conclusione seguente:

“Da quanto rapidamente vi ho esposto son certo che ora vorrete meco convenire e riconoscere nella pila il più meraviglioso congegno che mai abbia l'uomo concepito. I dotti dei diversi tempi e di tutte le nazioni lo proclamarono infatti con voto unanime la più bella scoperta che onori la mente umana. ”

[Majocchi, 1838, pp.11-12]

In effetti, gli elogi alla pila di Volta vennero, numerosi ed entusiastici anche da fonti non soggette alla critica di “campanilismo”. Così ad esempio si esprime Sir Humpry Davy (1778-1829):

“Come vi sono storici della chimica e dell'astronomia che datano l'origine di queste scienze dai tempi antediluviani, così non ci sono persone competenti che immaginano l'origine della scienza elettrochimica prima della scoperta della pila di Volta. ”

[Davy, 1826, p.384]

Per quanto riguarda il ruolo giocato dalla pila di Volta in ambito più strettamente teorico si tengano presenti i punti seguenti.

A) La pila di Volta aggiungeva al già vivo dibattito sulla identità di natura dell'elettricità statica e animale (che ebbe inizio dopo le osservazioni e le interpretazioni del Galvani) quello della identità di natura dell'elettricità statica e voltaica (detta anche idroelettrica) ampliando inoltre quello relativo alla natura (o alle nature?) dell'elettricità.

B) Essa poneva sul tappeto un problema teorico specifico di non facile soluzione: quello di stabilire la causa che nella pila è in grado di generare il flusso di elettricità.

C) L'inserimento stesso della pila in un qualunque circuito costituisce una causa di perturbazione delle condizioni del medesimo e ciò complicò enormemente il

cammino verso l'individuazione delle leggi della conduzione: nei fili, in particolare, e nel circuito, in generale.

Come si vede, dunque, l'invenzione della pila, se, da una parte, sembrava offrire uno strumento di straordinaria efficacia, capace di spalancare le porte addirittura a una scienza nuova (l'elettrocinetica) e di fornire la chiave di lettura dei misteri della chimica, dall'altra poneva numerosi problemi teorici e sperimentali di non facile soluzione.

Nei prossimi tre paragrafi illustreremo più in dettaglio i punti A, B, C sopra indicati, mettendo in evidenza soprattutto quegli aspetti che ebbero maggiore influenza sulla storia delle leggi che vogliamo descrivere.

5. La natura dell'elettricità nei primi decenni dell'Ottocento

Trasgredendo le "regulae philosophandi" di Newton (peraltro da lui stesso, in più occasioni, disattese) includenti il principio dell'"*hipoteses non fingo*", la maggior parte dei fisici dei primi decenni dell'ottocento si dimostrò nei fatti molto sensibile ai problemi connessi alla "reale natura" dei fenomeni.

Le posizioni alla Ampère (1775-1836) che, nel 1826, scriveva:

“Il principale vantaggio delle formule così determinate in modo immediato da alcuni fatti generali dati da un numero di osservazioni sufficientemente grande perché non se ne possa contestare la certezza, è quello di rimanere indipendenti tanto dalle ipotesi, con le quali i loro autori possono essersi aiutati nella ricerca di queste formule, quanto dalle ipotesi che possono esservi sostituite in seguito.
(...) La stessa cosa deve dirsi dalla formula con la quale io ho rappresentato l'azione elettrodinamica. Qualunque sia la causa fisica alla quale si vogliono attribuire i fenomeni prodotti da tale azione, la formula che ho ottenuto rimarrà sempre l'espressione dei fatti.”

[Ampère, 1826, pp.250-251]

erano perfettamente controbilanciate, anzi sovrastate, dalla impostazione tipica della *Naturphilosophie* alla quale si ispiravano molti fisici dell'epoca fra i quali Hans Christian Oersted (1777-1851) e Michael Faraday (1791-1867).

Questa attenzione al "che cosa è" influenzò notevolmente le ricerche dell'epoca e, in particolare, anche quelle di Ohm.

In questo paragrafo vogliamo perciò tracciare a grandi linee le concezioni dell'epoca relative alle seguenti tematiche:

- il rapporto fra elettricità e calore;
- il rapporto fra i diversi tipi di elettricità;
- la natura fisica dell'elettricità.

5.1 Il rapporto fra elettricità e calore

Le opere scientifiche settecentesche di Hermann Boerhave (1688-1738), Benjamin Franklin (1706-1790), Jean Antoine Nollet (1700-1770) avevano contribuito a diffondere la convinzione che esistesse una profonda identità fra calore ed elettricità. Valga per tutte la seguente citazione:

“Da tutte queste proprietà messe a confronto io concludo, in un modo che mi sembra molto verosimile, che il fuoco e l'elettricità vengono da uno stesso principio, che la stessa materia, a seconda delle circostanze, è agitata in un certo modo, si fa sentire come calore, ci illumina, e spinge i corpi che non sono elettrici verso quelli che lo sono.”

[Nollet, 1745, p.121]

Questa convinzione fu ampiamente condivisa per tutto il Settecento. Ricordiamo ad esempio che John Leslie, proprio fondandosi sull'analogia di comportamento fra conduzione del calore e conduzione dell'elettricità, in particolare considerando i concetti di quantità di calore e temperatura come strettamente analoghi a quelli di quantità di elettricità e intensità di elettricità (intesa come rapporto fra la quantità di elettricità e il suo volume), deriva alcune leggi sulla conduzione che, sotto alcuni aspetti, precorrono la formulazione di Ohm relativa a un conduttore metallico (si veda in proposito: Olson, 1969)

Volta manifestò maggior prudenza su tale problema.

“L'analogia dunque, che ho voluto indicare del fluido elettrico colla luce, col calore, ecc. consiste in ciò, che come questi, appartiene anch' esso ad una classe di fluidi incomparabilmente più sottili ed elastici, dei fluidi aeriformi o gas, e non sensibilmente pesanti; la qual classe si può denominare dei fluidi eterei.”

[Volta, 1792 b, p. 405]

Come è noto, proprio la fede nell'identità delle forze fisiche aveva spinto Oersted a progettare il suo esperimento (anche se, dal fatto che esso ebbe esito pienamente positivo solo operando in modo d'avere elettricità *senza* calore e luce, si sarebbe potuto trarre una prova della *sostanziale diversità* di queste manifestazioni naturali). Inoltre, dopo pochissimi anni (1822), l'individuazione dell'effetto termoelettrico sembrava riproporre l'identità fra calore ed elettricità con estrema evidenza. Così perciò afferma Antoine César Becquerel (1788-1878) nel 1823:

“Quando si vede il magnetismo, il calorico e la luce prodursi nello stesso tempo dell'elettricità, si è portati a credere che tutti questi effetti siano dovuti a una sola e identica causa diversamente modificata. Questa dottrina è già ammessa tacitamente da qualche fisico, altri la professano pubblicamente; ma [si noti la prudenza scientifica di Becquerel] i fatti che servono a stabilirla non possono ancora essere del tutto concludenti perché la si possa considerare come una verità dimostrata.”

[Becquerel, 1823, p. 135]

Così lo stesso Ohm, nel 1827:

“La forma delle equazioni differenziali così ottenute e il modo onde si trattano, sono tanto simili alla forma ed al modo di trattare quelle date da Fourier e Poisson pel movimento del calore, che già da questa somiglianza senza prove ulteriori potrebbesi a buon diritto dedursi un'intima connessione tra i due fluidi; d'altronde questo rapporto di identità si va sempre più facendo palese a misura che si procede nella investigazione.”

[Ohm, 1827, p.5]

E ancora Auguste De La Rive (1801-1873), nel 1829:

“Questa permanenza nello stato calorifico del filo metallico ha obbligato i fisici a rinunciare alla spiegazione che essi davano di questo fenomeno, spiegazione secondo la quale si supponeva che l'elettricità, per un effetto analogo a quello di una forte pressione meccanica, sprigionasse istantaneamente dai corpi che attraversava il calorico in essi contenuto naturalmente. Si è dunque condotti ad ammettere che è nell'elettricità stessa che risiede il calorico che è sviluppato e che è dovuto alla riunione dei due principi elettrici opposti [...] che è nell'elettricità e non nei corpi sottoposti alla sua azione che risiede il principio calorifico il cui sviluppo diviene sensibile in certe circostanze.”

[A. De La Rive, 1829, p.372]

Non ci furono grossi dibattiti in proposito; al massimo furono espressi dubbi prudenziali (si ricordi la precedente citazione di Becquerel) e, più che per contrapposizione di tesi opposte, l'idea dell'identità fra elettricità e calore venne meno unitamente al venir meno delle teorie fluidiche. Comunque essa dovette continuare a essere presente nella mente di molti ricercatori degli anni Cinquanta e Sessanta dell'Ottocento se, ancora nel suo *Trattato*, James Clerk Maxwell (1831-1879) sente l'esigenza di distinguere chiaramente fra le due entità.

“L'analogia tra la teoria della conduzione di elettricità e quella della conduzione del calore è, a prima vista, quasi completa. [...] Possiamo perciò servirci della teoria del potenziale elettrico e di quella della temperatura per illustrarle a vicenda; esiste, però, una differenza notevole tra i fenomeni dell'elettricità e quelli del calore.

Si sospenda un corpo conduttore all'interno di un recipiente conduttore chiuso, per mezzo di un filo di seta, e si carichi di elettricità il recipiente. Il potenziale del recipiente e di tutto ciò che vi sta dentro aumenterà istantaneamente, ma per quanto a lungo prepotentemente si elettrizzi il recipiente, e indipendentemente dal fatto che si faccia venire a contatto con esso il corpo che esso contiene, non si avrà alcun segno di elettrizzazione all'interno del recipiente, e il corpo in esso contenuto non mostrerà effetti elettrici neppure quando sarà tolto.

Se invece si porta il recipiente ad alta temperatura, il corpo che si trova all'interno si porterà alla stessa temperatura, ma solo dopo un considerevole intervallo di tempo, e se lo si toglie si troverà che esso è caldo, e rimarrà tale finché non abbia emesso calore per qualche tempo.

La differenza tra i due fenomeni sta nel fatto che i corpi sono capaci di assorbire ed emettere calore, mentre non possiedono alcuna proprietà corrispondente rispetto all'elettricità. Non si può riscaldare un corpo senza comunicargli una certa quantità di calore, che dipende dalla massa e dal calore specifico del corpo, mentre si può far aumentare finché si vuole il potenziale elettrico di un corpo nel modo descritto, senza comunicare elettricità al corpo. [...]

Il calore può restare celato all'interno di un corpo in modo da non avere alcuna azione esterna, ma è impossibile isolare una quantità di elettricità in modo da evitare che essa sia costantemente collegata per induzione con un'eguale quantità di elettricità di segno opposto.

Non vi è nulla, perciò, tra i fenomeni elettrici, che corrisponda alla capacità di un corpo per il calore. Ciò è conseguenza immediata della dottrina che è esposta in questo trattato, secondo cui l'elettricità obbedisce alla stessa condizione di continuità di un fluido incompressibile.”

[Maxwell, 1873, pp. 635-636]

5.2 Una o più elettricità?

Gli “elettricisti” del seicento e della prima metà del settecento erano stati in grado di riconoscere e produrre un unico tipo di elettricità: quella originata dallo sfregamento dei corpi non conduttori. L'elettricità atmosferica, studiata in laboratorio soprattutto da Franklin, era stata subito riconosciuta come identica a quella e lo stesso era accaduto per l'elettricità prodotta dalla compressione della tormalina.⁸ Gli esperimenti di Luigi Galvani (1737-1798) avevano però sconvolto questo quadro unitario.

⁸ Sul primo argomento si veda ad esempio (Heilbron, 1979, p.339); sul secondo (Home, 1976, pp. 21-30).

“Galvani, che fece la grande scoperta dell'eccitamento ad arbitrio delle contrazioni muscolari nelle Rane per mezzo dei metalli, specialmente quando vengono applicati uno al nervo, e l'altro al muscolo, e sono fatti comunicare fra loro con un arco conduttore, si determinò, indotto dall'analogia, a riguardare tali fenomeni per effetti di elettricismo; e siccome non gli parve che fossero referibili all'elettricismo universale, pensò che avessero origine da una elettricità propria degli animali, o sia da un fluido animale analogo al fluido elettrico, o elettricismo universale, e fondò una nuova parte di Fisica basata sopra una serie di seducenti esperimenti, che risvegliò l'ammirazione di tutti i savi, e gli impegnò ad uno studio particolare, presentando un vastissimo campo alle ricerche loro sperimentali.

Questa nuova parte di Fisica, che riconosceva, al parer di Galvani, per principio di azione un fluido animale simile all'elettrico, fu da esso chiamata elettricità animale; ma poi, per eternare la memoria del suo scopritore Galvani, Galvanismo la denominarono i Fisici di tutte le Nazioni.”

[Carradori, 1817, pp. 6-7]

Come è noto, Volta riconduce nel quadro delle forze inorganiche le cause dell'elettricità animale affermando con grande intuito l'identità di natura della elettricità prodotta dalla pila e quella comune:

“Ma il penetrante genio di Volta non seppe restringersi ai limiti dell'Esperienze di Galvani. Il desiderio d'internarsi sempre più nel Galvanismo, che egli aveva abbracciato, gli fece variare esperimenti, gliene fece immaginare dei nuovi, e lo condusse passo passo per una serie, o catena di ben ragionate ricerche a svelare il mistero e a spiegare il prodigio delle Galvaniche Operazioni.

[...] abbandonò così totalmente la teoria di Galvani [in quanto] gli parve, e poi lo dimostrò esuberantemente, che per ispiegare tutti i fenomeni del Galvanismo bastasse quest'unico principio, cioè dell'elettricità smossa dall'incontro, e combaciamento di metalli, o conduttori dissimili; e pensò, che quando si fatti fenomeni avevano luogo senza la diversità dei conduttori, cioè per mezzo di un sol metallo, o due pezzi di metallo simili, ciò non fosse che in apparenza, ma che in realtà, bene esaminata la cosa, vi fosse in qualche modo una diversità dei medesimi.

[...] Dunque non esiste nessuna elettricità animale, e se di essa si vuol conservare il nome, si intenderà per questa una prodigiosa facoltà dei nervi, specialmente di alcuni animali, di sentire lo stimolo del fluido elettrico, smosso, e messo in corrente da cause esterne; che vuol dire una disposizione passiva riguardo ad una elettricità estranea, e artificiale, della quale cioè gli animali ne risentono, come squisitissimi elettrometri.”

[ibidem, pp. 11, 15-16]

9 Sulle differenze fenomenologiche fra elettricità statica e voltaica si veda ad esempio (Vassalli Eandi, 1803). In questo articolo sono indicati ben 10 tipi di esperimenti che sembrano dimostrare la differenza fra i due tipi di elettricità.

Molti fisici dell'epoca non condividevano però le sicurezze di Volta, basando i loro dubbi su non pochi fatti sperimentali fra i quali merita ricordare i seguenti.⁹

1. L'elettricità comune si riequilibra pressoché istantaneamente attraverso un buon conduttore mentre ciò non succede nell'elettromotore voltaico.
 2. I fenomeni voltaici richiedono la presenza di elementi umidi, cosa che non si verifica nei generatori elettrostatici.
 3. L'elettricità di una bottiglia di Leida o di un conduttore carico anche non troppo fortemente produce con estrema facilità effetti luminosi, cosa che non accade con la pila voltaica anche di molti elementi.
 4. L'elettricità comune si distribuisce tutta sulla superficie esterna dei conduttori, mentre quella voltaica sembra scorrere entro i conduttori che uniscono i poli della batteria.
 5. L'elettricità statica fa deviare fortemente gli elettrometri, mentre l'elettricità dinamica produce segnali molto deboli in questi strumenti.
- I dubbi sulla sostanziale differenza fra l'elettricità statica e quella voltaica, particolarmente quelli indicati nei punti 4 e 5, ebbero vita lunga, come si può dedurre dal passo seguente, datato 1832.

“Dalla marcata differenza fra gli effetti dell'elettricità libera e voltaica è estremamente improbabile che una minuta porzione di elettricità comune possa aver acquistato i caratteri della voltaica. L'elettricità comune è diffusa sulla superficie del metallo; l'elettricità voltaica esiste entro il metallo.”

[Richtie, 1832, p. 280]

e sempre nello stesso articolo, a proposito del meccanismo dell'elettrolisi prodotto da William Hyde Wollaston (1766-1828) nel 1801 con elettricità statica:

“Ma questa decomposizione è totalmente diversa da quella prodotta dall'elettricità voltaica [infatti quella di Wollaston viene interpretata come] azione meccanica del fluido elettrico. La sottile spada elettrica sparata fuori dai punti invisibili dell'oro può aver realmente tagliato una molecola d'acqua disposta in modo favorevole...”

[idem, p.282]

Per quanto riguarda il problema della *conduzione* sulla superficie dei corpi o entro i corpi, merita ricordare che la prima tesi era eredità della concezione settecentesca secondo la quale l'elettricità non poteva che essere distribuita sulla superficie dei corpi conduttori (in proposito si tenga presente, ad esempio, (Coulomb, 1786)). In un articolo di W. Richtie, di poco precedente a quello sopra citato, si trova un passo molto significativo sull'argomento; in esso si afferma che i metalli costituiscono:

“l'interno passivo di un recipiente la cui superficie esterna è l'aria; e che il fluido elettrico si propaga fra il confine atmosferico e la superficie del metallo ove esso trova un facile passaggio. Noi consideriamo perciò i metalli come del tutto passivi nella conduzione del fluido elettrico e che il primo motore è l'energia repulsiva esistente fra atomi simili del fluido elettrico composto [e poco più avanti] è ovvio che la bottiglia cessa di ricevere carica quando la pressione dell'aria diviene uguale o minore dell'energia repulsiva esistente fra gli atomi di identici tipi di elettricità.”

[Richtie, 1829, pp. 373, 375]

In effetti, già nel 1822, Davy aveva rilevato che la conducibilità di una egual massa di rame non dipende dal fatto che questa sia concentrata in un unico filo di lunghezza l o in più fili di egual lunghezza l , e, quindi, che non dipende dalla diversa superficie del metallo che sta conducendo (Davy, 1822).¹⁰

Tuttavia il precedente passo di Richie sta a dimostrare che la questione, ancora al termine degli anni Venti, non aveva trovato un accordo definitivo e, proprio per questo motivo, come si vedrà nel capitolo 2, Ohm dovrà prendere una posizione precisa sull'argomento, assumendola come una delle sue tre "leggi" della conduzione.

Tornando al problema delle diverse elettricità, ricordiamo ancora che, a quelle già note, si erano aggiunte, nel 1822, l'elettricità termoelettrica, ad opera di Thomas Johann Seebeck (1770-1831), e, dopo il 1831, l'elettricità indotta, ad opera di Faraday. Questi non aveva dubbi sull'identità dell'elettricità indotta, voltaica e comune:

“La similitudine dell'azione, che è quasi un'identità, fra le correnti prodotte sia da magneti sia da elettromagneti e le correnti voltaiche è in totale accordo con la teoria di Ampère e fornisce forti ragioni per credere che l'azione sia la stessa in entrambi i casi; ma poiché una distinzione nel linguaggio è necessaria, io propongo di chiamare l'ente così esercitato da magneti ordinari, induzione magneto-elettrica o magnetoelettrica. La sola differenza, che colpisce fortemente l'attenzione, esistente fra l'induzione volta-elettrica e magneto-elettrica è la istantaneità della prima e il sensibile tempo richiesto dalla seconda; ma persino in questo primo stadio di investigazione vi sono circostanze che sembrano indicare che con ulteriore indagine questa differenza, come distinzione filosofica, scomparirà.”

[Faraday, 1832 a, pp. 138, 139]

10 Si noti che se m è la massa di un filo di lunghezza l e raggio r realizzato con materiale di densità δ , ammesso che la sua conducibilità σ dipenda dalla superficie si avrebbe:

σ_{filo} proporzionale a $2 \pi r l$

ed essendo il raggio del filo $r = \sqrt{\frac{m}{\delta l} \cdot \frac{1}{\pi}}$

si può scrivere:

$$\sigma_{\text{filo}} = \sqrt{\frac{4 \pi l m}{\delta}}$$

Supponendo ora di realizzare, con la stessa massa m di metallo, due fili di lunghezza l e massa $m/2$, la conducibilità $\sigma_{2\text{fili}}$ del sistema di due fili risulterà:

$\sigma_{2\text{fili}}$ proporzionale a $2 \cdot 2 \pi r' l$

$$\text{con } r' = \sqrt{\frac{m/2}{\delta l} \cdot \frac{1}{\pi}}$$

Si ottiene allora:

$$\sigma_{2\text{fili}} \text{ proporzionale a } \sqrt{\frac{8 \pi l m}{\delta}} = \sqrt{2} \sigma_{\text{filo}}$$

Invece, se la conducibilità dipende dalla sezione del filo:

– per un filo di lunghezza l e massa m

$$\sigma_{\text{filo}} \text{ proporzionale a } \frac{m}{\delta l}$$

– per due fili, ciascuno di lunghezza l e massa $m/2$:

$$\sigma_{2\text{fili}} \text{ proporzionale a } 2 \frac{m/2}{\delta l} = \frac{m}{\delta l}$$

e quindi $\sigma_{\text{filo}} = \sigma_{2\text{fili}}$

Quindi, nella prima ipotesi la conducibilità viene a dipendere dalla lunghezza del filo mentre nella seconda ipotesi no.

A buon conto, Faraday sente il bisogno di dedicare l'intera Terza serie delle sue ricerche (Dicembre 1832) per togliere ogni possibile dubbio sulla identità delle elettricità derivate dai vari mezzi. Dopo un attento esame degli effetti (fisiologici, di deflessione dell'ago magnetico, di magnetizzazione di oggetti, di formazione di scintille, termici, chimici, elettrostatici) prodotti dai cinque tipi allora noti di elettricità (comune, animale, voltaica, termoelettrica, magnetolettrica) così conclude:

“La conclusione generale che a mio parere si deve trarre da questa collezione di fatti è che l'elettricità, qualunque possa essere la sua sorgente, è identica nella sua natura. I fenomeni, nei cinque tipi di specie elettriche analizzate, differiscono non nel loro carattere ma solo in grado; e da questo punto di vista variano in proporzione alle circostanze variabili di quantità e intensità che possono a piacere essere fatte variare in quasi tutti i tipi di elettricità...”

[Faraday, 1833, p.48]

Ma accanto ai “maggioranti” dell'epoca, che sembrano tutti convinti dell'unicità della elettricità, doveva esserci un gran numero di altri fisici che dubitava fortemente di tale ipotesi o addirittura si schierava contro di essa. Abbiamo già citato in proposito il Richtie ma anche il De La Rive, che non può certo essere considerato l'ultimo arrivato in materia, così afferma:

“Così dunque, come ho già detto più sopra, ciascuna corrente ha un carattere o delle proprietà individuali che dipendono dalla natura della combinazione chimica che l'ha prodotta; e se, invece di limitarsi alle correnti di natura puramente chimica, si studiano quelle che hanno un'altra origine e che sono sviluppate sia per il calore, sia per un'azione meccanica, sia per l'influenza dei magneti ecc., si trovano ancora, così come mi sono assicurato, delle differenze nelle loro proprietà che possono servire come dei tipi propri a caratterizzare ciascuna di esse [...] le correnti elettriche non sono omogenee e hanno differenze specifiche assai grandi e forse più grandi ancora ma dello stesso genere di quelle che M. Melloni ha osservato per i raggi calorifici.”¹¹

[De La Rive, 1836, p.47]

¹¹ Questa ipotesi di De La Rive viene esaminata da Jhoann Friedrich Pfaff (1765-1825) l'anno successivo, con l'obiettivo ben definito di stabilire “se nell'elettricità si lasci appunto dimostrare una diversa modificazione specifica, come nella luce, cosicché ad esempio una modificazione simile alla luce rossa produca effettivamente calore, ma nessuna azione di separazione [chimica], mentre un'altra modificazione simile alla luce violetta non produca alcun innalzamento di temperatura, ma una forte azione chimica...” (Pfaff, 1837, p. 444).

5.3 Un fluido, due fluidi o particelle elettrizzate?

Il Settecento si era chiuso nella totale incertezza circa il numero dei fluidi che avrebbero dovuto materializzare la o le elettricità. Da una parte i bifluidisti: Du Fay, Robert Symmer (1707-1763), Charles Augustin de Coulomb (1736-1806), dall'altra i monofluidisti: Benjamin Franklin, Ulrich Theodor Aepinus (1724-1802), Henry Cavendish, ognuno con i suoi esperimenti vincenti e ognuno con i suoi problemi da risolvere.

“Qualunque sia la causa dell'elettricità, si spiegheranno tutti i fenomeni e il calore risulterà conforme ai risultati delle esperienze, ipotizzando l'esistenza di due fluidi, con le particelle dello stesso fluido che si respingono in ragione dell'inverso del quadrato della distanza e che attirano le particelle dell'altro fluido ancora in ragione dell'inverso del quadrato delle distanze [...].

Il Signor Aepino ha ipotizzato nella sua teoria dell'elettricità che non vi sia che un solo fluido elettrico le cui particelle si respingano reciprocamente e siano attratte dalle par-

ticelle dei corpi con la stessa forza con cui si respingono. Ma per spiegare lo stato dei corpi nella loro situazione naturale, così come la repulsione tra i due tipi di elettricità, è obbligato a supporre che le molecole dei corpi si respingano reciprocamente con la stessa forza con cui si attirano le molecole elettriche e che queste molecole elettriche si respingano fra loro¹². E' facile rendersi conto che l'ipotesi del Sig. Aepino dà, quanto ai risultati numerici, gli stessi risultati di quella dei due fluidi.

Io preferisco quella dei due fluidi, che è stata proposta da parecchi fisici, perché mi sembra contraddittorio ammettere allo stesso tempo, tra le particelle dei corpi, una forza attrattiva in ragione dell'inverso del quadrato delle distanze, dimostrata dalla gravitazione universale e una forza repulsiva sempre in ragione dell'inverso delle distanze [...] L'ipotesi dei due fluidi è, d'altra parte, coerente con tutte le scoperte di chimica e di fisica [...]

[Coulomb, 1788, p. 671-673]

I fenomeni elettrici e magnetici dell'Ottocento, le nuove misure e le nuove teorie sulla conduzione non riuscirono a smuovere in modo sostanziale l'ago della bilancia a favore dell'una o dell'altra ipotesi.

Alcuni sembravano intravedere prove a favore della teoria monofluidica in certi comportamenti delle pile o, più tardi, della corrente indotta (si veda, ad esempio (Marianini, 1829, p.143) e (Christie, 1833, pp.113-114)¹³.

Ma, in contrapposizione, autorità scientifiche come Ampère e Becquerel sostenevano una teoria bifluidica (si veda in proposito (Ampère, 1820, pp.164-5) e (Becquerel, 1831, p.268)).

Non pochi si inserirono in questo dibattito con una posizione sostanzialmente fenomenologica, senza pronunciarsi chiaramente a favore dell'una o dell'altra ipotesi. Ohm ad esempio, nel suo Trattato, non si pronuncerà in alcun modo sulla

12 Il meccanismo della repulsione e dell'attrazione elettrica secondo i monofluidisti assume come presupposti:

- che ogni corpo contenga una certa quantità naturale di fluido elettrico;
- che un corpo sia carico positivamente quando contiene un eccesso di fluido elettrico rispetto alla sua quantità normale;
- che un corpo sia carico negativamente quando contiene meno fluido elettrico rispetto alla sua quantità normale;
- che il fluido elettrico respinga il fluido elettrico;
- che il fluido elettrico attragga la materia comune;
- che porzioni di materia comune si respingano fra loro.

Le forze sviluppate tra corpi carichi dello stesso segno o tra corpi carichi di segno opposto si spiegano allora qualitativamente mediante gli schemi di figura 3, nei quali, per semplicità, si è assunto che la forza repulsiva dovuta all'eccesso di fluido elettrico contenuto in egual misura nei due corpi sia in modulo uguale alla forza repulsiva prodotta dalla materia, che supporremo in quantità uguale, che costituisce i corpi e, ancora, uguale in modulo alla forza attrattiva che si stabilisce fra l'eccesso di fluido di un corpo e la materia dell'altro corpo.

$\vec{F}(f_1, f_2)$ = forza repulsiva fluido 1 - fluido 2

$\vec{F}(f_1, m_2)$ = forza attrattiva fluido 1 - materia 2

$\vec{F}(m_1, f_2)$ = forza attrattiva materia 1 - fluido 2

$\vec{F}(m_1, m_2)$ = forza repulsiva materia 1 - materia 2

13 Abbiamo appositamente scelto questi riferimenti a cavallo degli anni venti e trenta per sottolineare meglio il fatto che il dibattito fra le due teorie si protrasse molto a lungo, ma non è certo difficile individuare passi di contenuto analogo che risalgono ai primi anni dell'ottocento. Si veda in proposito: (Nicholson, 1806), (Sylvester, 1806).

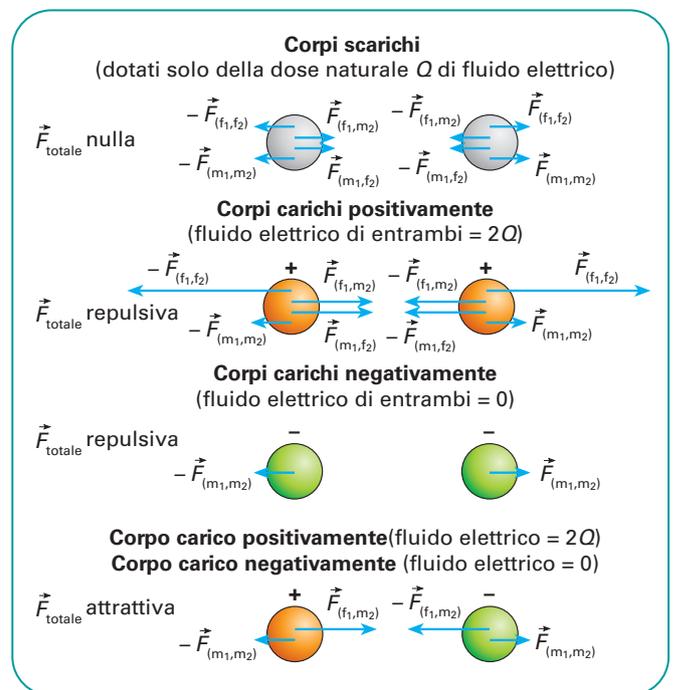


Figura 3. Schema delle forze agenti tra il fluido elettrico e il fluido elettrico, la materia e la materia, il fluido elettrico e la materia di due corpi variamente carichi.

“natura dell’elettricità” limitandosi a una definizione operativa dello stato elettrico realizzata mediante l’elettroscopio.

“Onde investigare in modo perfettamente determinato i cambiamenti che occorrono nello stato elettrico di un corpo A, noi lo uniamo ogni volta in circostanze uguali, a un altro corpo mobile e di stato elettrico invariabile, al cosiddetto elettroscopio, e determiniamo la forza con cui l’elettroscopio è attratto o respinto dal corpo [...].”

[Ohm, 1827, p. 45]

“Onde determinare in che modo dipende la forza elettroscopica dal tempo in cui essa è osservata, e dal luogo in cui si manifesta, dobbiamo partire dalle leggi fondamentali a cui è sottoposto lo scambio delle forze elettroscopiche che ha luogo tra gli elementi di un corpo.

Queste leggi fondamentali sono di due sorte; prese dall’esperienza, o dove questa manchi assunte ipoteticamente. L’ammissibilità delle prime non può essere soggetta a nessun dubbio, e la legittimità delle ultime viene provata dalla concordanza dei risultati dei calcoli dedotti da esse, con ciò che in realtà succede; quindi siccome il calcolo esprime nel modo il più determinato il fenomeno colle sue modificazioni, così deve una osservazione egualmente completa della natura abbattere o giustificare decisamente le ipotesi del calcolo, affinché questo non abbia nel suo progredire a imbattersi sempre in nuove incertezze.

In ciò consiste il merito principale del calcolo, cioè nell’offrire una tal generalità di espressioni in niuna parte ambigue da invitar sempre a nuove esperienze, e quindi nel condurre a una cognizione più perfetta dei fenomeni della natura. Ogni teoria creata sui fatti di una classe di fenomeni naturali che non regge a un’esposizione matematica dettagliata è imperfetta, ed è incerta ogni teoria la quale potendo essere sviluppata in tale esatta forma non è quanto si deve comprovata dall’esperienza.”

[idem, pp. 46, 47]

“Noi chiameremo in seguito quantità di elettricità, la somma delle indicazioni elettroscopiche, riferita alla grandezza degli elementi; per la qual somma si ha da intendere il prodotto della forza nella grandezza dello spazio in cui essa è diffusa, quando in tutti i punti di questo spazio è sempre la medesima. Coll’espressione quantità di elettricità non intendiamo di stabilir nulla circa alla natura materiale dell’elettricità, e questa osservazione valga per tutte le espressioni sintetiche qui introdotte.”

[idem, pp. 49, 50]

Posizioni di questo genere dovettero però nuocere gravemente all’accettazione della teoria di Ohm, perché, come si è detto in apertura di paragrafo, molti fisici dell’epoca esigevano che una teoria fisica fosse fondata su termini e concetti “fisicamente” evidenti. Si consideri ad esempio che proprio la mancanza di chiarezza con la quale Ampère utilizzava il concetto di corrente condusse il giovane Faraday a rifiutare la sua teoria elettrodinamica del magnetismo:

“Quando un filo metallico, che è un conduttore di elettricità, viene posto a contatto dei due poli della batteria voltaica, porta via i due fluidi; ma avendo la batteria in sé stessa il potere di convogliare continuamente nuove porzioni dei due fluidi alle due estremità, le prime porzioni che sono rimosse dal filo sono sostituite da altre, e così

vengono prodotte le correnti, che sono costanti finché la batteria rimane in azione, e i poli continuano ad essere collegati al filo. Ora, poiché è in questo stato che il filo è in grado di influenzare l'ago magnetico, per l'esatta comprensione della teoria, è molto importante che ci si faccia una chiara e precisa idea del suo stato, perché su di esso è fondata l'intera teoria. Porzioni di materia nello stesso stato di questo filo costituiscono i materiali dei quali Ampère immagina che siano composti, teoricamente, non solo barre magnetiche ma anche il grande magnete della Terra; e noi possiamo perciò essere spinti ad aspettarci che una chiarissima descrizione di esso ci venga offerta come prima cosa. Tuttavia ciò non accade, e ritengo che sia un vero peccato poiché esso rende il resto della teoria molto oscuro. »¹⁴

[Faraday, 1821, in Marazzini, Tucci 1996, pp. 82-83]¹⁴

Come accadde per il dibattito sull'identità fra elettricità e calore, anche quello fra monofluidisti e bifluidisti si smorzò non in forza di nuovi e più convincenti dati sperimentali ma per il progressivo affermarsi della interpretazione atomistica, sostenuta da De La Rive, Becquerel, Carlo Matteucci (1811-1868) e, più tardi, da Rudolph Julius Emanuel Clausius (1822-1888).

In effetti, la teoria atomistica della prima metà dell'Ottocento non eliminava i fluidi ma li relegava in un ambito ben definito, negli atomi (o nelle molecole)¹⁵, a generare gli effetti di polarizzazione, svuotando di essi lo spazio e, al tempo stesso, preparando in anticipo il terreno ad accogliere la possibilità che questo o questi fluidi elettrici molecolari potessero materializzarsi più tardi in una particella¹⁶. Comunque, al di là di ogni disputa fra fluidisti, atomisti e atomo-fluidisti, la situazione sulla natura della corrente è, ancora nel 1873, così riassunta da Maxwell.

«Al contrario [ha appena citato le dottrine dell'elettricità corpuscolare di Weber e Fechner] noi non facciamo alcuna ipotesi sulla relazione esistente tra P ed N [P ed N sono numeri che esprimono quante unità di elettricità positiva e negativa si trasferiscono da un polo elettrico ad un altro] ma ci atteniamo solamente al risultato della corrente, cioè al trasferimento di $P + N$ unità di elettrizzazione positiva da A a B e consideriamo $P + N$ come la vera misura della corrente.»

[Maxwell, 1873, p. 620]

6. Il principio generatore dell'elettricità nella pila di volta

6.1 Teoria del contatto e teoria chimica

Le esperienze con l'elettroscopio condensatore eseguite da Volta a partire dal 1796 lo avevano convinto che il contatto di due metalli diversi poteva creare una carica elettrica.

«È dunque dimostrato direttamente che tutti i conduttori sono anche motori di elettricità nel mutuo loro combaciamento: che più degli altri e in 1° grado lo sono i metalli molto diversi, come Argento e Stagno, Ferro e Zinco, e massime Argento e Zinco: che in 2° grado, cioè meno, ma sufficientemente ancora lo sono tutti i metalli, quali più quali meno, affrontando altri conduttori non metallici, o di 2ª classe, e

¹⁴ Merita però osservare che, una decina d'anni dopo, anche Faraday sembra rinunciare a una definizione della natura fisica dell'elettricità:

“Alcuni fisici, con Franklin, assumono un solo fluido elettrico [...] altri assumono due fluidi elettrici [...]. Io ho cercato fra i vari esperimenti riportati a favore di queste concezioni [...] uno qualunque che potesse essere considerato capace di suffragare la teoria delle due elettricità piuttosto che quella di una, ma non sono stato in grado di individuare un solo fatto che possa essere utilizzato a tale scopo [...]. Giudicando in base ai soli fatti, non c'è la minima ragione per considerare l'influenza che è presente in ciò che chiamiamo la corrente elettrica [...] come una influenza composta e complicata. Essa non è mai stata risolta in influenze più semplici ed elementari e può forse essere meglio concepita come una linea di potenza (*axis of power*) avente forze contrarie di ammontare esattamente uguale in direzioni contrarie.” [Faraday, 1833 b, pp. 694-696]

¹⁵ Si veda ad esempio (De La Rive, 1827, pp.42-43).

¹⁶ Facciamo osservare che l'ipotesi di una elettricità prigioniera delle singole molecole aveva un grande vantaggio su quella che concepiva i fluidi mobili nello spazio, perché consentiva di evitare la critica che Faraday muoveva all'atomismo proprio a partire da considerazioni sull'elettricità. Secondo Faraday infatti, la teoria atomistica conduce a concepire lo spazio contemporaneamente come conduttore e come isolante: come conduttore, perché il vuoto non può offrire alcun ostacolo al fluido o ai fluidi elettrici, come isolante, perché, se non lo fosse, esisterebbero solo i corpi conduttori.

A tale obiezione però si poteva rispondere nel modo seguente:

“Quanto a noi, è alla sola molecola che attribuiamo la proprietà di essere più o meno conduttrice o isolante; la conducibilità non è che il risultato della maggiore o minore facilità che le particelle consecutive hanno a polarizzarsi attraverso lo spazio che le separa e che è necessariamente isolante.” (De La Rive, 1856, p. 39)

diversamente secondo è diverso l'umore onde son questi intrisi: che meno ancora, cioè in 3° grado, riescono i conduttori di questa classe tra loro, a norma essi pure della loro diversità: che qualche cosa finalmente, ma ben poco, fanno nel loro mutuo contatto due conduttori sia della 1^a, sia della 2^a classe, dell'istessa specie, come Argento e Argento, Ottone e Ottone, Cartone e cartone, legno e legno dell'istessa qualità, ecc. i quali corpi omogenei io colloco nel 4° ed ultimo grado, riflettendo nel tempo stesso, che quel poco che fanno è probabilmente dovuto a qualche impercettibile differenza che trovasi fra essi, nelle superfici cioè che si affacciano. ”

[Volta, 1799, p. 511]

Diventava perciò quasi naturale per lui identificare la causa che genera lo stato elettrico nel contatto bimetallico con la causa che genera il flusso di elettricità prodotto in una pila e, infatti, come vedremo fra poco, la struttura fisica del generatore voltaico è strettamente condizionata da questa convinzione.

Nella lettera a Banks con la quale annuncia la sua invenzione Volta sembra preoccuparsi quasi esclusivamente di descrivere in dettaglio la struttura del suo “organo elettrico artificiale” e gli effetti da esso prodotti; i cenni alla causa che genera l'elettricità sono pochi e poco sottolineati, dal momento che essa doveva apparire a Volta del tutto ovvia e completamente provata. Dopo le prime critiche a tale impostazione egli si vede però obbligato a sostenere esplicitamente la sua tesi e lo fa con affermazioni perentorie di questo tipo:

“Tengo io dunque per sicuro che nelle riferite sperienze, ed altre analoghe, l'azione sul fluido elettrico si eserciti nel mutuo contatto di metalli diversi e non, come altri ha creduto, o credono pur ancora, nel contatto di questo o quel metallo con questo o quel conduttore.

[...] Or dunque tutte queste sperienze, in cui non interviene alcun corpo umido, e il contatto si fa solo tra metallo e metallo, dimostrano ad evidenza che la mossa al fluido elettrico viene data da tale mutuo contatto di metalli diversi. ”

[Volta, 1801, p. 545]

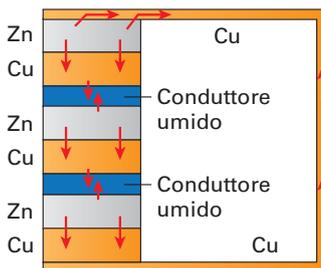


Figura 4 Schema delle forze che si producono nei contatti metallo-metallo e metallo-conduttore umido secondo Volta.

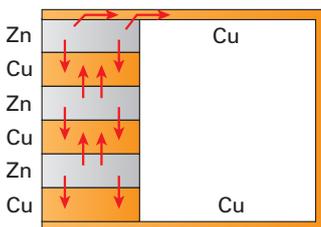


Figura 5 In assenza del conduttore umido, le forze metallo-metallo, esattamente contrapposte tra loro, non sono in grado di far circolare il fluido elettrico.

e subito dopo, quasi per replicare a una prevedibile obiezione:

“Ma, e quando questo o quel metallo tocca o combacia un conduttore umido, non viene anche per tale contatto data alcuna spinta al fluido elettrico? Sì veramente [...], ma così poco, trattandosi di acqua, sia semplice sia impregnata di diversi sali [...], che generalmente non è tale azione da paragonarsi per alcun conto a quella che dispiegasi tra due metalli assai diversi, come zinco e argento. ”

[idem, p. 546]

Il processo che, secondo Volta, determina il flusso di elettricità in un circuito, nel quale il generatore è costituito da una coppia rame-zinco, può essere schematizzato come indicato nella **figura 4**.

Le frecce indicate nel disegno, sempre orientate arbitrariamente dallo zinco al rame, evidenziano il verso del movimento del fluido elettrico determinato dal combaciamento dei due metalli. Si noti che l'interposizione della parte liquida spezza la simmetria delle azioni contrapposte che, nella pila costituita di soli metalli, impedirebbe il flusso di elettricità (**figura 5**).

Subito dopo la comunicazione di Volta del 1800, in Inghilterra viene proposta una teoria alternativa a quella del contatto, secondo la quale la causa dell'elettricità prodotta dalla pila va ricercata nelle azioni chimiche che si producono fra i metalli e il liquido in cui sono immersi.

“*Appare dai fatti precedenti che la pila galvanica di Volta agisce solo quando la sostanza conduttrice fra le piastre è in grado di ossidare lo zinco; e che quanto più grande è la quantità di ossigeno che entra in combinazione con lo zinco in un dato tempo, tanto più grande è la potenza della pila. Sembra perciò ragionevole concludere, sebbene allo stato attuale dei fatti non si possa spiegare l'esatta modalità del fenomeno, che l'ossidazione dello zinco nella pila e i mutamenti chimici ad essa connessi siano in qualche modo la causa degli effetti elettrici che essa produce.*”

[Davy, 1800, citato in (Sudduth, 1980, p. 30)]

Un lavoro di William Nicholson (1753-1815) dello stesso anno rafforza questa ipotesi. In questo lavoro viene comunicata l'avvenuta separazione dell'acqua in idrogeno e ossigeno e, per quanto riguarda appunto l'azione chimica della pila che, in qualche misura, poteva creare dubbi sull'interpretazione voltaica, così si legge:

“*Io mi devo tuttavia meravigliare che Volta nelle numerose osservazioni contenute nel suo trattato non abbia preso in alcuna considerazione le manifestazioni chimiche del galvanismo sulle quali Fabbroni ha insistito così fortemente.*”¹⁷

[Nicholson, 1800, p. 346]

6.2 Il dibattito fra le due teorie

Il dibattito sulle due teorie contrapposte si sviluppò con notevole vivacità fino agli anni Quaranta.

Dalla parte di Volta si schierarono, almeno fino agli anni Venti, i fisici francesi i quali però, essendo bifluidisti, sostituirono all'ipotesi voltaica della “mossa al fluido elettrico” l'ipotesi della separazione del fluido neutro (si veda in proposito (Biot, 1804)). La teoria del contatto trovò inoltre un forte sostegno nelle pile a secco realizzate da Giuseppe Zamboni (1776-1846) nel 1812. Così si legge, ad esempio, in un lavoro di rassegna del 1815 pubblicato sugli *Annalen*:

“*Secondo la teoria del Volta, nelle usuali pile costituite da due metalli e un mezzo umido, l'elettricità che si manifesta viene prodotta solo dai metalli mediante il loro reciproco contatto e il mezzo umido serve solo come conduttore e trasferitore dell'elettricità da una piastra all'altra. Si trovi perciò un corpo completamente secco che rispetto a entrambi i metalli agisca altrettanto efficacemente non come produttore ma semplicemente come trasferitore di elettricità, così si dovrebbe con esso realizzare una pila completamente secca che manifesta un'azione elettrica, nella quale tuttavia non si produce fra le placche metalliche e il terzo corpo alcuna azione chimica, alcuna separazione e ossidazione (...). Ma quindi diviene palese oggigiorno che si sono sbagliati tutti coloro che hanno cercato la causa dell'elettricità della pila di Volta nella separazione chimica e nell'ossidazione dei metalli, come hanno fatto specialmente i fisici inglesi, prima di aver potuto imparare meglio (dal 1807) la teoria di Volta dell'elettricità galvanica.*”

[Gilbert, 1815, pp.36-37]

17 È interessante osservare che, descrivendo il fenomeno di separazione dell'acqua, Nicholson afferma, contrariamente a quanto diremmo oggi, che l'idrogeno si sviluppa all'argento e l'ossigeno allo zinco. Questo fatto è conseguenza del modo con il quale veniva realizzata la pila. Secondo la teoria voltaica, che prevedeva la necessità delle coppie bimetalliche, una pila, ad esempio, di tre elementi veniva realizzata come indicato in **figura 6**.

Con questa disposizione però, la lamina inferiore di argento e la lamina superiore di zinco svolgono semplicemente un ruolo conduttore e perciò, di fatto, la figura 6 rappresenta una pila di due elementi. In essa l'elettrodo 1 risulta in contatto con lo Zinco (polo negativo della pila) e quindi intorno ad esso si deve sviluppare l'idrogeno; analogamente l'elettrodo 2 risulta in contatto con l'Ag (polo positivo della pila) e quindi intorno ad esso si deve sviluppare l'ossigeno. La questione viene chiarita in un successivo lavoro di Erman nel 1801, il quale però non trae alcuna conclusione critica sulla teoria voltaica (Erman, 1801).

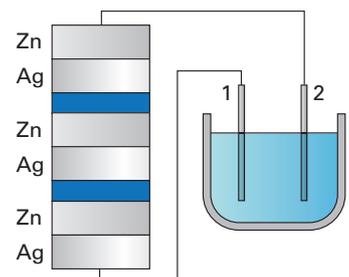


Figura 6 Schema di una pila voltaica costituita da tre coppie realizzate a partire dall'ipotesi che il flusso di elettricità sia prodotto dagli accoppiamenti bimetallici.

18 Naturalmente, solo qualche anno dopo, Georg Friedrich Parrot (1767-1852) controbatte a Pfaff osservando che i suoi esperimenti con la pila a secco dimostrano solo che, per produrre elettricità, non servono lamine di notevole spessore ed esprimendo seri dubbi sulla effettiva secchezza delle pile Zamboni (Parrot, 1819, p.291).

E in un lavoro di Pfaff del 1816:

“Che l'elettricità di questa pila [l'autore si sta riferendo alla pila a secco] produce anche azioni chimiche quando essa, mediante grandi moltiplicazioni, è forte abbastanza, non lo metto in dubbio minimamente [tuttavia] non ritengo questi processi necessari al sostentamento della tensione elettrica e al suo rinnovamento e, quando hanno luogo, li considero come effetto e non come causa.¹⁸”

[Pfaff, 1816, pp. 112]

Come s'è detto in precedenza, i francesi, nei primi anni dell'Ottocento, si dichiararono sostenitori della teoria del contatto ma, verso la fine degli anni Venti, si convertirono progressivamente alla teoria chimica anche se, probabilmente, con qualche perplessità, come dimostrano i tre passi seguenti tratti da un lavoro di Becquerel del 1831.

“Subito dopo che io osservai e analizzai i fenomeni elettrici che si producono in tutte le azioni chimiche e nelle diverse circostanze in cui lo stato molecolare dei corpi subisce dei cambiamenti, il Sig. A. de La Rive propose che l'azione di contatto ammessa da Volta per il rame e lo zinco, [...] [di un elettroscopio condensatore] non fosse che il risultato della differenza delle azioni chimiche dell'aria e dell'acqua racchiusa su ciascuno dei due metalli;”

[Becquerel, 1831, pp.286-287]

Per evitare questi effetti Becquerel utilizza un elettroscopio condensatore con armature di platino e d'oro che non vengono attaccate dai liquidi che ordinariamente aderiscono alle dita dell'operatore e che quindi dovrebbero fornire indicazioni sicure e dipendenti solo dai corpi coinvolti nell'esperimento.

“Si trova subito che il platino e l'oro non danno luogo ad alcun sviluppo di elettricità per il loro mutuo contatto, qualunque sia la sensibilità dell'elettroscopio utilizzato. Dunque, se Volta l'ha trovato operando con placche di rame, lo si deve attribuire all'azione chimica del liquido, di cui le dita sono coperte, sul rame.”

[idem, p. 292]

Ma nella pagina seguente, dopo aver esaminato il comportamento di altre coppie bimetalliche:

“Potrei riferire ancora altri fatti che portano a ritenere che si possa avere azione elettrica di contatto tra due sostanze senza che si possa in alcun modo supporre che siano state messe in gioco azioni chimiche provenienti da cause esterne. Si può obiettare a questa affermazione che non si prova del tutto che non si abbia un'azione chimica incognita da parte di liquidi sui corpi che sono sottoposti all'esperienza; rispondo a ciò che si ipotizza un fatto non provato per sostenere un'opinione. Io sono di parere opposto, io parto dai fatti per azzardare qualche considerazione in favore di una teoria alla quale non sono realmente legato che dalle osservazioni fatte sopra. Se più tardi giungerò a trovare che nei diversi casi studiati si aveva azione chimica, abbandonerò in seguito la teoria del contatto.”

[idem, p.293]

Anche negli anni immediatamente successivi Becquerel manterrà un atteggiamento di prudenza (si veda in proposito De La Rive 1837, p.356), mentre a sostegno della teoria chimica si schiererà decisamente A. De La Rive.

“Ogniqualvolta si produce una combinazione chimica fra due atomi si produce una corrente elettrica la cui intensità dipende dalla natura dei due atomi. Ogniqualvolta si produce una separazione chimica e cioè si produce una divisione di due atomi, si produce parimenti una corrente elettrica.”

[De La Rive, 1836 b, p.230]

A favore della teoria del contatto continuarono però a dichiararsi non pochi fisici di area tedesca come Pfaff, Gustav Theodor Fechner (1801-1887), Emilij Christianovic Lenz (1804-1865) e Ohm, nonché alcuni fisici italiani fra i quali il già citato Zamboni e Stefano Marianini (1790-1866). Per chiarire le posizioni dei sostenitori della teoria del contatto illustriamo in dettaglio un esperimento di Fechner e riportiamo alcune considerazioni di Marianini. L'esperimento di Fechner viene realizzato con l'apparato schematicizzato in **figura 7**.

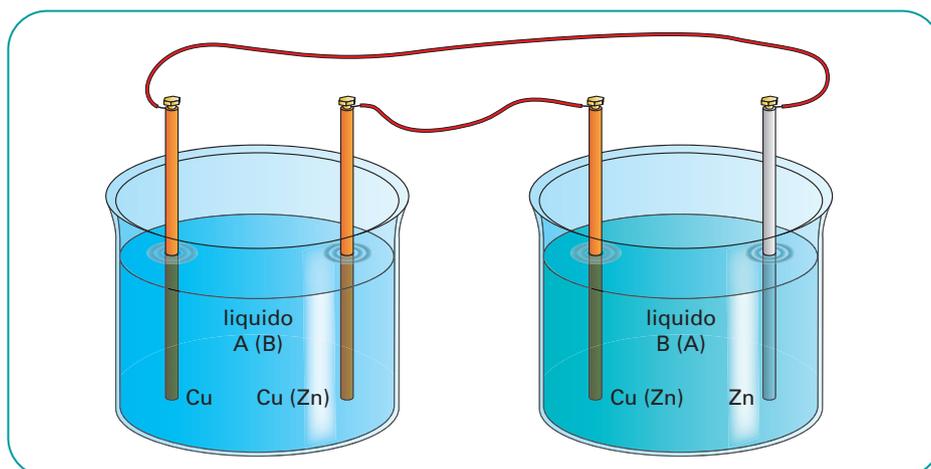


Figura 7 Schema nostro dell'apparato sperimentale di Fechner. Il simbolo (Zn) indica che la lamina posta accanto ad esso può essere talvolta di rame, talvolta di zinco.

Essa mostra due tazze nelle quali vengono poste, separatamente, una lamina di rame e una lamina di zinco; a queste vengono poi aggiunte o due lamine di rame o due lamine di zinco. Le due tazze vengono poi riempite una con acqua pura e l'altra con acqua acidulata in modo da realizzare, di volta in volta, le disposizioni seguenti:

- | | |
|------------------------------|---------------------------|
| 1) Cu, Cu in acqua acidulata | Cu, Zn in acqua pura |
| 2) Cu, Cu in acqua pura | Cu, Zn in acqua acidulata |
| 3) Cu, Zn in acqua acidulata | Zn, Zn in acqua pura |
| 4) Cu, Zn in acqua pura | Zn, Zn in acqua acidulata |

Fechner osserva che in tutti e quattro i casi l'azione deviatrice dell'elettricità sull'ago magnetico è, nella fase iniziale, identica, mentre sono in generale diversi gli effetti chimici ottenuti. In particolare, egli nota che nel caso 1) l'effetto chimico è trascurabile, mentre è molto evidente nel caso 4).¹⁹

La conclusione non lascia dubbi:

“La difficoltà di spiegare l'eguaglianza delle azioni in questi quattro casi mediante la teoria chimica è di per sé evidente”

[Fechner, 1838, p.435]

¹⁹ Si tenga presente l'ordine con il quale rame e zinco si trovano elencati nella serie dei potenziali di riduzione. Da esso si deduce che il rame non sposta l'idrogeno quando è posto in acqua acidulata, mentre lo zinco lo fa in modo efficace.

Si noti che la conclusione di Fechner deriva dall'ipotesi erronea dei sostenitori della teoria chimica secondo i quali doveva esistere corrispondenza biunivoca fra gli effetti chimici e la "forza della pila" evidenziata, a sua volta, dalla deviazione dell'ago magnetico. Si vede chiaramente da qui come una oscura intuizione dei concetti "forza della pila" e "quantità di elettricità" impedissero una corretta interpretazione di questi fenomeni. Ma su tale questione torneremo con maggiori dettagli più avanti.

Le considerazioni e gli esperimenti di Marianini partono da un riesame critico di alcuni esperimenti che Faraday, dopo il 1835, aveva assunto come probatori della teoria chimica. Marianini riconosce la forza di alcune conclusioni di Faraday:

“Io per altro ammetto di buon grado che quest'ultima [l'azione chimica che il liquido esercita sullo Zinco di una coppia Zinco-Platino immersa in un miscuglio di acido solforico e acido nitrico e connessa esternamente da un pezzetto di carta imbevuta di ioduro di potassio] sia la principale cagione della corrente elettrica negli esperimenti di cui parliamo, e che perciò essi somministrino delle nuove prove che nelle azioni chimiche si hanno sviluppi di elettricità, e che questi possano produrre delle decomposizioni.

[e tuttavia]

Ma perché si vorrà escludere il contatto metallico come fonte di correnti elettriche, se quando leviamo la carta bagnata che separa la piastra di zinco da quella di platino, e portiamo queste a contatto, si ottiene una corrente tanto più energica da produrre una deviazione di novanta e più gradi?”

[Marianini, 1836-7, p. 209]

E ancora, dopo aver rilevato all'elettrometro che una batteria costituita da 24 coppie platino-oro congiunte metallicamente tra loro e disposte in altrettanti bicchieri contenenti acqua distillata, fornisce una tensione di poco inferiore a quella di due coppie rame-zinco...

“Finché non sia dimostrato che l'acqua distillata esercita una qualche azione chimica anche su questi metalli, o almeno sull'oro, anche il risultato di questo esperimento rimane senza spiegazione nella nuova teoria”

[idem, p.238]

Dunque, al termine dell'articolo:

“[...] conchiudo che gli esperimenti recati dal Signor Faraday che formano l'argomento principale di questa Memoria, si spiegano facilmente con la teoria del Volta, e che molti dei risultati che si ottennero nello studio dei medesimi rimangono senza spiegazione nella teoria che esclude il contatto dei corpi eterogenei dal novero delle cause di correnti elettriche.”

[idem, p. 238]

Come abbiamo detto in precedenza, la teoria chimica viene inizialmente proposta da Davy e Nicholson e proprio in Inghilterra essa troverà i suoi più accesi sostenitori.

Il primo esperimento che viene espressamente progettato e realizzato per mette-

re a prova la teoria del contatto è però dell'italiano Salvatore Dal Negro (1768-1839). Allo scopo egli realizza un elettrometro molto sensibile con il quale esamina le tensioni elettriche prodotte dai diversi elementi, metallici e umidi, di una pila voltaica a colonna nella quale si realizza la sequenza: disco di rame, disco di zinco, disco umido, disco di rame, ecc.

Le tensioni, indicate dalle deviazioni dell'elettrometro, nel caso in cui il primo disco di rame sia connesso a terra, sono espresse nel modo seguente:

1	R	0,0
2	Z	0,0
3	U	2,8
4	R	2,8
5	Z	2,8
6	U	6,2
7	R	6,2
8	Z	6,2
9	U	11,5
10	R	11,5
11	Z	11,5

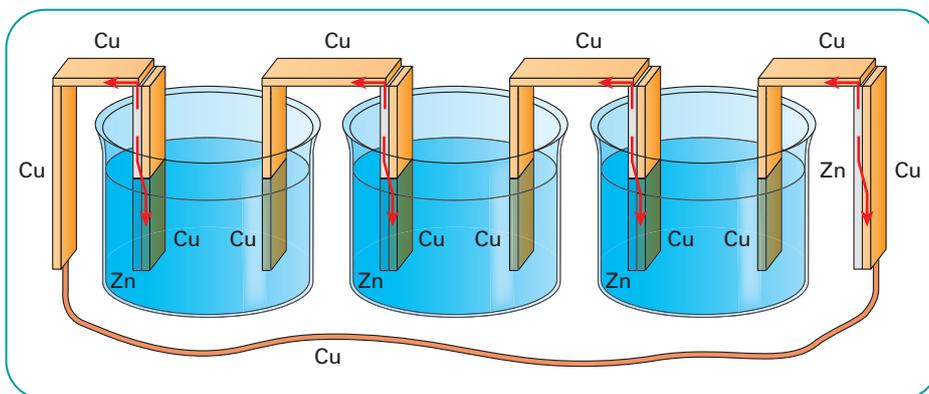
ove la sequenza numerica 1, 2, 3, ecc. contrassegna il numero d'ordine degli elementi posti in contatto con l'elettrometro; R, Z, U indicano rispettivamente il disco di rame, il disco di zinco, il disco umido; i numeri a destra indicano le deviazioni dell'elettrometro. In proposito così conclude Dal Negro.

“Secondo l'ipotesi del Chiarissimo Volta illustrate col calcolo dai Fisici Francesi, la carica dovrebbe incominciare in 2 Z, ed invece si manifesta in 3 U al momento cioè che l'umidità è al contatto col metallo più ossidabile. Di più, secondo i principi supposti dai Fisici Francesi, dovrebbe essere $2Z = 4R$; $5Z = 7R$; $8Z = 10R$ ²⁰, ed invece tra i due primi si trova una differenza di 2°; tra i due secondi di 4° e tra i due ultimi di 5°²¹. [...] I risultati dunque di questi miei esperimenti non corrispondono all'ipotesi del Volta.”

[Dal Negro, 1804, pp. 632-3]

Un secondo esperimento avente le identiche finalità di quello di Dal Negro viene realizzato nel 1806 da Johann Salomon Cristoph Schweigger (1779-1857).

L'apparato per eseguirlo è essenzialmente costituito da un circuito nel quale si produce elettricità in condizioni nelle quali la teoria di Volta ne negherebbe l'esistenza (figura 8).



20 Per comprendere questa osservazione critica di Dal Negro si tenga presente che l'accoppiamento della lamina 1R con la lamina 2Z dovrebbe già fornire, secondo Volta, una differenza di potenziale, mentre, secondo la teoria chimica, tale accoppiamento non ha alcuna efficacia in quanto la sorgente della differenza di potenziale sono le reazioni chimiche che si producono tra il disco di zinco 2Z e il primo disco umido 3U.

Analogamente, secondo la teoria voltaica, il disco umido 3U non dovrebbe produrre alcun effetto elettromotore e quindi la differenza di potenziale tra il disco di zinco 2Z e il disco di rame 4R dovrebbe essere nulla; conseguentemente la deviazione dell'elettrometro a contatto con il disco 2Z dovrebbe essere uguale a quella dell'elettrometro a contatto con 4R, contro l'evidenza sperimentale.

21 Qui, evidentemente, Dal Negro considera solo la differenza tra le unità, trascurando, con approssimazione un po' forte, i decimali. Va poi osservato che la sequenza dei valori delle deviazioni dell'elettrometro non indicano un aumento della differenza di potenziale proporzionale al numero di coppie. Alla luce delle conoscenze attuali, questa situazione può essere attribuita o al funzionamento dell'elettrometro o alla struttura della pila, ma Dal Negro non commenta in alcun modo questo risultato.

Figura 8 Schema di principio (nostro) dell'esperimento di Schweigger. Le frecce indicano il flusso dell'elettricità prodotta, secondo la teoria di Volta, dagli accoppiamenti metallici zinco-rame.

Le frecce, aggiunte da noi, indicano la direzione del fluido elettrico prevista dalla ipotesi voltiana. Esse si contrastano a coppie e dunque il sistema non dovrebbe erogare corrente, mentre esso produce “la ben nota produzione di scintille e la separazione dell’acqua” (p. 409). Schweigger fronteggia molte possibili obiezioni tendenti a dimostrare che la catena non risulta perfettamente bilanciata, ma comunque la conclusione è molto prudente:

“Per brevità ho presentato subito il fatto senza mescolarlo con la minima speculazione. Tuttavia mi sembra necessario attendere, se voi concedete la vostra approvazione a quanto detto sopra, che io scriva prima una più lunga comunicazione.”

[Schweigger, 1806, p. 414]

Oersted sarà un seguace della teoria chimica e tali diverranno progressivamente, negli anni Venti e Trenta, i fisici francesi. Analogamente si convertiranno in gran numero a tale teoria anche i fisici italiani; ricordiamo in particolare Amedeo Avogadro (1776-1856)²², Leopoldo Nobili (1787-1835) e Carlo Matteucci che, nel 1844, così scrive:

“Nel tempo che noi riconosciamo pienamente col Sig. Wheatstone il grande servizio che hanno reso la teoria di Ohm [...] a rischiarare questa parte intricata della scienza elettrica dobbiamo però dichiarare che adottando la parola forza elettromotrice non accettiamo la teoria di Volta del contatto, come ha fatto Ohm.”

[Matteucci, 1844, p.111]

La questione della natura della forza elettromotrice doveva comunque lasciare dubbi e perplessità in molti se Faraday, nel 1833, e Lenz (che veniva considerato un difensore della teoria del contatto), nel 1839, si vedevano ancora obbligati ad affermazioni di questo tipo:

“[...] senza voler trascurare per nulla il contatto metallico o il contatto di sostanze dissimili, conduttrici ma non metalliche, come se non avessero nulla a che fare con l’origine della corrente, io concordo ancora pienamente con Davy che essa è per lo meno continuata dall’azione chimica e che il rifornimento costituente la corrente è quasi interamente proveniente da quella sorgente [...] e non può che sottoporsi all’attenzione di ognuno che sia impegnato nell’esaminare questo soggetto che in quei corpi (così essenziali alla pila) [si tratta degli elettroliti] la decomposizione e la trasmissione di una corrente sono così intimamente connessi che uno non può accadere senza l’altro.”

[Faraday, 1833, p.165]

“Appartiene certamente alle più interessanti manifestazioni della fisica che una serie di fenomeni, come quelli del galvanismo, sia, da più di quaranta anni, sottoposta a continue, appassionate trattazioni da parte di un gran numero di naturalisti, fra i quali troviamo i nomi più eccellenti, e che, tuttavia, ci si trovi ancora, nella dimostrazione della vera causa del fenomeno, nella medesima oscurità nella quale ci si trovava all’inizio. Infatti, dopo che Volta, mediante la realizzazione della sua celebre pila, aveva sottratto la causa di questo fenomeno al mondo organico e l’aveva assegnata al regno inorganico, la concezione dei fisici sulla reale sede della cosiddetta forza elettro-motrice del circuito galvanico si è suddivisa in due opinioni diverse, delle quali

²² Segnaliamo in proposito (Avogadro, 1822-23), la pagina 63.

la più antica attribuisce questa forza al contatto di conduttori diversi, mentre l'altra [...] la cerca nell'azione chimica dei liquidi sui corpi solidi che si trovano in contatto di quelli. ”

[Lenz, 1839 a, p. 584]

Lenz continua il suo articolo esaminando in dettaglio alcuni fatti sperimentali che usualmente erano considerati come prova della teoria chimica, volgendoli a favore della teoria del contatto. In particolare osserva che l'aumento della corrente associato all'aumento della concentrazione dei liquidi negli elementi voltaici può essere attribuito non tanto a una aumentata azione chimica ma a una *diminuzione della resistenza incontrata dalla corrente nel passaggio metallo-liquido*. La conclusione di Lenz è comunque molto cauta.

“Tuttavia, allo scopo, la dimostrazione non è ancora sufficiente, così io la rimando a una successiva comunicazione, specialmente perché questo argomento ci introduce nel mezzo della controversia fra le due ipotesi, un ambito che voglio tenere separato da quanto detto in precedenza. ”

[ibidem, p. 593]

Ci sembra interessante rilevare che i primi estimatori della teoria di Ohm, Fechner e Lenz appunto, furono anche sostenitori della teoria del contatto e, probabilmente, anche questo non giovò alla diffusione della teoria circuitale di Ohm che doveva apparire inscindibilmente legata all'ipotesi, ritenuta errata, del contatto bimetallico.

6.3 Le tesi di Ohm sulla teoria del contatto

Soffermiamoci ora brevemente sulle tesi di Ohm relative alla teoria del contatto. L'ipotesi che la “forza generatrice di elettricità” risiedesse nel contatto di due corpi eterogenei viene assunta da Ohm come una delle “tre leggi” poste alla base della sua teoria del circuito galvanico.

“Io ho esposto come segue il modo di manifestarsi dell'elettricità ai punti di contatto di due corpi differenti, ossia la tensione elettrica di questi corpi. Quando due corpi eterogenei si toccano, conservano sempre ai punti di contatto una sola e medesima differenza tra le loro forze elettroscopiche. ”

[Ohm, 1827, p. 5]

Questa frase viene ripresa anche a pag. 57 del *Trattato*, nell'ambito della discussione generale dei principi che sorreggono la teoria del circuito elettrico e, in quell'occasione, verrà integrata nel modo seguente:

“Quando corpi eterogenei si toccano, conservano sempre al luogo del contatto una e medesima differenza tra le loro forze elettroscopiche, in virtù di un antagonismo che deriva dal loro essere. Questa differenza si deve esprimere colle parole tensione elettrica. ”

[ibidem, p. 57]

Ohm si rende conto che nella pila si producono anche reazioni chimiche, ma tali effetti sono interpretati come secondari e perturbatori dell'effetto primario che resta sempre l'azione bimetallica.

“I cambiamenti chimici che avvengono tanto frequentemente nelle singole parti, e per lo più nelle liquide dell'apparecchio galvanico, fanno perdere agli effetti la loro naturale schiettezza, e per le complicazioni che ivi producono ne celano in gran parte l'andamento.

Dalle azioni chimiche si ripete la cagione di alcune straordinarie differenze nei fenomeni, le quali danno occasione a tante apparenti eccezioni alle regole, e talora anche a contraddizioni [...]

[ibidem, p. 6]

Il problema delle azioni chimiche viene affrontato nella *Appendice alla teoria del circuito galvanico* (Ohm, 1827, pp.105 - 128) e ivi inquadrato sempre nella teoria dell'azione fra corpi mediante ardite ipotesi di natura microscopica.

Ohm ritorna infatti sulla tensione che si produce fra i corpi a contatto assumendo che essa sia

“[...] proporzionale alla differenza delle loro forze elettroscopiche latenti²³ e ad una funzione, che noi diremo coefficiente di tensione, la quale dipende dalla grandezza, dalla posizione e dalla forma delle particole che operano l'una sull'altra al luogo di contatto. Da questa ipotesi si deduce non solamente le leggi che seguono le tensioni dei metalli [...] ma in essa può eziandio rinvenirsi il modo di spiegare i fenomeni in conseguenza dei quali la tensione elettrica non dipende solo dall'antagonismo chimico dei due corpi ma anche dalla loro densità relativa, e quindi ella può mostrarsi diversa a temperature differenti.”

[ibidem, p. 122]

23 Le forze elettroscopiche latenti sono associate da Ohm alle *elettricità latenti* di un corpo, dove con tale termine si deve intendere l'elettricità che “appartiene all'essere delle parti costituenti” del corpo delle quali tali parti “non possono spogliarsi senza abbandonare la loro maniera di esistere”. Si noti che tale tipo di elettricità va tenuto ben distinto dalla *elettricità libera* cioè da quella elettricità “che non è necessaria ai corpi per conservare la loro propria natura e la quale può quindi passare da una parte all'altra del corpo senza però [che] esse abbiano a cambiare il loro modo specifico di essere.” [idem, p.109]

A partire da tale ipotesi, tradotta in termini quantitativi, Ohm giunge a scrivere una relazione che connette la corrente S che percorre il circuito prima che si sviluppino le reazioni chimiche e la corrente S' che percorre il circuito dopo che si è realizzato il massimo cambiamento chimico. La formula che traduce tale relazione è la seguente:

$$S' = S - \frac{\Phi \lambda}{L} (S' + \Psi \omega a)$$

ove a indica la conducibilità della parte liquida, ω la sua sezione, λ la lunghezza ridotta²⁴ della parte liquida, L la lunghezza ridotta totale del circuito; Ψ è invece un termine che tiene conto delle forze elettroscopiche e dei cosiddetti “coefficienti di tensione” (inglobati nella funzione Φ) relativi alle parti a contatto.

Questa formula verrà ripresa e sviluppata ulteriormente nella *Aggiunta inedita alla teoria del circuito galvanico del dott. Ohm*, che egli aveva spedito ad Achille Perugia nell'imminenza della traduzione del suo lavoro.

In questa *Aggiunta*, a proposito della formula di cui sopra (o, meglio, della sua riscrittura più esplicativa) Ohm osserva fra l'altro che non vi sarà cambiamento di corrente se $\Phi = 0$ e che, al contrario, le superfici limite dei liquidi influiranno sulla corrente solo in quanto, in corrispondenza di tali superfici “si forma di preferenza una tensione provocata dalla decomposizione stessa”.

24 “Lunghezza ridotta”, applicata a un tratto di conduttore filiforme, designa il rapporto fra la lunghezza geometrica del conduttore e il prodotto della sua sezione per la conducibilità, designa dunque ciò che oggi denominiamo resistenza del conduttore. Torneremo su tale argomento nel capitolo 2.

“In questa circostanza deve cercarsi la ragione del perché la grandezza della corrente [con questo termine Ohm indica la nostra intensità della corrente] dipenda in vari casi ed in modo tanto sorprendente dalle superfici piane metalliche che limitano lo strato liquido.”

[ibidem, Aggiunta, p. 3]

Appare dunque chiaro che Ohm attribuisce tutte le variazioni di corrente non tanto alle reazioni liquido-metallo quanto alla variazione dei “coefficienti di tensione” associati ai processi di deposizione o comunque di separazione che si producono entro il liquido e che, secondo il suo pensiero, modificano la posizione, la forma, la grandezza delle particole che operano l’una sull’altra nel luogo di contatto.

“Supponiamo che una soluzione salina si trovi fra due lastre metalliche unite in modo da formare un circuito, la soluzione salina comincerà a decomporsi e la base del sale sarà attirata verso il metallo positivo, e se queste parti costituenti non entrano in combinazione coi metalli esse saranno rattenute vicino ad essi [...] Per questa separazione polare si aggiungono nuove tensioni che agiscono in senso contrario a quelle esistenti originariamente nel circuito, e che quindi indeboliscono l’azione della corrente in esso.”

[ibidem, Aggiunta, p. 19]

In contrapposizione alla teoria chimica, Ohm cita anche casi di pile nelle quali le reazioni chimiche appaiono energiche senza però che si modifichi sostanzialmente la forza elettromotrice della pila. Ribadisce quindi la validità della teoria del contatto estendendola anche alle tensioni fra non metalli e osservando (erroneamente però!) che se Volta non aveva operato tale estensione era perché le tensioni fra i metalli superano di gran lunga quella fra gli altri corpi.

Il meccanismo generatore della corrente nella pila non doveva comunque apparire semplice neppure a Ohm, come si può dedurre dal passo seguente.

“Da alcuni fu opposto alla teoria del Volta esser inverosimile che una causa così tenue com’è la tensione e che si lascia a stento scorgere, possa dar origine all’azione potente della corrente elettrica. A questa obiezione, se pur venisse fatta seriamente, v’ha da opporre che Volta stesso non riguardava la tensione come la causa fondamentale del fenomeno, ma come una delle manifestazioni di quella causa, e che egli poteva anche concedere non esser la tensione che un elemento differenziale della forza galvanica primitiva che la genera; anzi egli poteva andar più oltre e dire che egli riteneva la tensione come un prodotto lontano della forza stessa che determina il processo chimico, e ciò poteva dire senza perder nulla del suo terreno.”

[ibidem, Aggiunta, p. 22]

Purtroppo, l’adesione di Ohm alla teoria del contatto in un periodo in cui la maggior parte dei fisici si era convertita o si stava convertendo alla teoria chimica nocque gravemente all’accettazione dell’intero quadro concettuale relativo alla conduzione elettrica da lui proposto e quindi anche all’accettazione dei suoi aspetti formali comunque indipendenti da qualunque ipotesi relativa alla “natura” dei fenomeni.

Questo fatto è ben testimoniato da una breve nota di John Frederick Daniell (1790-1845) del 1842, che così osserva:

“Il prof. Ohm ha adottato (e credo che concorderete con me nel ritenere sfortunatamente) la teoria del contatto della forza elettromotrice [...]”

[Daniell, 1842, pp. 137-138]

Ancora più esplicito in proposito è il Matteucci che, nel 1843, così scrive:

“Sono ormai sedici anni che Ohm pubblicò a Berlino un libro intitolato Del circuito galvanico considerato matematicamente. La molta parte ipotetica di questo libro, la forma matematica con cui è redatto, le pochissime, se pur ve ne sono, esperienze proprie dell'autore, il fondarsi sulla forza elettro-motrice nel tempo in cui veniva sviluppandosi la teoria chimica della pila [corsivo nostro], infine la lingua in cui è scritto, sono di certo le molte ragioni per cui è rimasto nell'oscurità e quasi generalmente ignorato.”

[Matteucci, 1843, p.88]

Sulla stessa linea di pensiero troviamo anche Giuseppe Domenico Botto (1791-1865) che nel 1843, a proposito delle leggi di Ohm, osserva:

“[...] sebbene i partigiani della teoria chimica della pila non potranno accettare un tale principio fondato sulla opposta dottrina del contatto, se non in quanto essa risponde ai risultati dell'osservazione in tutti i casi possibili [corsivo nostro].”

[Botto, 1843, p.240]

7. Complicazioni circuitali associate alla resistenza interna degli elementi di batteria

In questo paragrafo illustreremo il senso dell'affermazione C) del paragrafo 4 e cioè che l'inserimento stesso della pila in un qualunque circuito costituisce una causa di perturbazione delle condizioni del medesimo e ciò complica enormemente il cammino verso l'individuazione delle leggi della conduzione, nei fili in particolare, e nel circuito in generale.

Mostreremo in effetti che, oltre a problemi teorici di tipo molto generale, l'uso della pila di Volta comportava complicazioni circuitali che mascheravano la corretta interpretazione del fenomeno della conducibilità sia nel semplice conduttore sia nel circuito.

7.1 La mancata proporzionalità fra il numero di elementi di una batteria e l'intensità della corrente

Una misura di resistenza interna di un elemento di pila voltaica a tazze (una coppia di lamine rame - zinco immerse senza particolari cautele in un becher contenente acqua acidulata) consente di assegnare a tale grandezza un valore che può variare da qualche ohm a qualche decina di ohm (a seconda dell'estensione delle lamine, del loro stato superficiale, della distanza che le separa, della

concentrazione di acido, dello stato di polarizzazione del sistema). Se si tiene conto che gli esperimenti sulle correnti elettriche, nella prima metà dell'Ottocento, venivano realizzati con conduttori di resistenza molto bassa, si può comprendere quanto sarebbe stato necessario il saper valutare correttamente il ruolo della resistenza interna del generatore al fine di stabilire l'esatta relazione fra la tensione applicata ai capi del conduttore e le caratteristiche della corrente che in esso fluisce.²⁵

In questo stato di carenza teorica, l'andamento dell'intensità (intesa in senso moderno) della corrente, rivelata dalla deviazione dell'ago magnetico di un galvanometro, manifestava due andamenti non conciliabili a seconda che il generatore fosse chiuso su un conduttore di bassa o di alta resistenza.

Nel primo caso infatti (bassa resistenza del conduttore esterno), con pochi elementi voltaici si raggiunge un valore di corrente che rimane poi sostanzialmente invariato con l'aggiunta di altri elementi (figura 9).

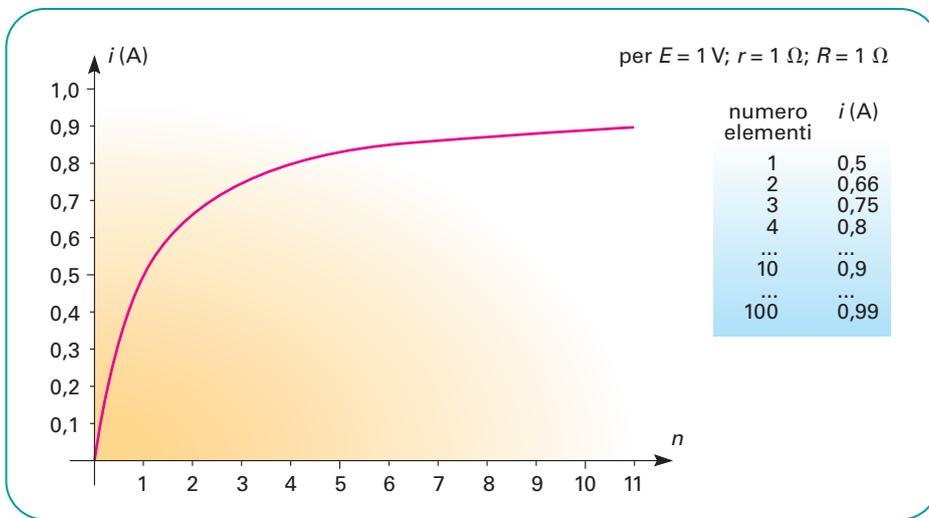


Figura 9 Dipendenza dell'intensità di corrente dal numero di elementi di batteria quando la forza elettromotrice di ciascun elemento vale 1 V, la resistenza interna r vale 1 Ω e il conduttore che connette i poli del generatore ha resistenza $R = 1 \Omega$ (confrontabile quindi con la resistenza interna degli elementi della batteria).

Nel secondo caso (alta resistenza del conduttore esterno) sembra invece esserci una proporzionalità diretta fra il numero degli elementi voltaici e l'intensità della corrente (figura 10).

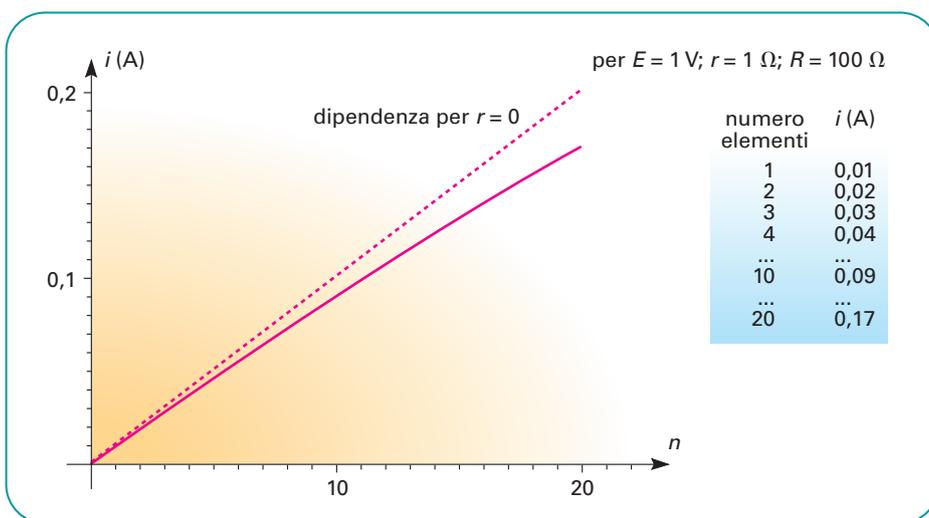


Figura 10 Dipendenza dell'intensità di corrente dal numero di elementi di batteria quando la forza elettromotrice di ciascun elemento vale 1 V, la resistenza interna r vale 1 Ω e il conduttore che connette i poli del generatore ha resistenza $R = 100 \Omega$ (molto elevata quindi con la resistenza interna degli elementi della batteria).

Non è difficile spiegare i due andamenti mediante la legge di Ohm, pur di tenere conto che l'intensità di corrente in un circuito di resistenza esterna R in cui ope-

rano n elementi voltaici in serie, ciascuno di forza elettromotrice F e di resistenza interna r è data da:

$$i = \frac{n F}{R + n r} \quad [1]$$

Da questa formula si deduce subito che:

– se R è molto maggiore di $n r$, trascurando tale prodotto rispetto a R , si ottiene:

$$i \cong \frac{n F}{R}$$

si deduce cioè che l'intensità della corrente è, con buona approssimazione, direttamente proporzionale al numero di elementi voltaici della pila, cioè è direttamente proporzionale alla forza elettromotrice applicata;

– se R è confrontabile o minore di r e, quindi, molto minore di $n r$, trascurando il suo contributo al denominatore rispetto a $n r$ si ottiene:

$$i \cong \frac{n F}{n r} = \frac{F}{r}$$

si deduce cioè che l'intensità della corrente è addirittura indipendente dal numero di elementi voltaici utilizzati.

Nei casi intermedi, avremo andamenti della corrente che si avvicinano a quello di figura 9 o a quello di figura 10 a seconda del valore di r e di R .

Problemi senza soluzione (in assenza della legge di Ohm) del tipo ora illustrato si trovano frequentemente nei lavori pubblicati fino agli anni Quaranta e non sarebbe molto utile farne una casistica dettagliata. Può però essere interessante ricordare che anche Faraday si imbatté, nei primi anni Venti, in problemi del genere senza riuscire a darne una interpretazione soddisfacente.

“Moll [...] fornisce un resoconto di alcuni esperimenti tesi ad accertare il potere relativo di una batteria consistente di molte piccole piastre e una di due sole grandi piastre. Il grande apparecchio consisteva di uno stretto truogolo di rame, contenente una piastra di zinco di quasi quattro piedi quadrati di superficie. L'apparato più piccolo consisteva di piastre di quattro pollici quadrati, poste insieme alla maniera del Dr. Wollaston, con il rame attorno allo zinco. Con il grande apparato, Moll osservava che il potere magnetico era molto grande quando il filo di collegamento era di considerevole spessore (2/10 di pollice); ma quando si usava un filo di platino molto più piccolo (1/100 di pollice) il potere diminuiva considerevolmente. Tuttavia, con un cilindro di rame di circa un pollice di diametro, il potere era diminuito. Nessuna azione chimica poteva essere ottenuta con questo apparato facendo il collegamento con soluzioni saline, o tintura di litmo, sebbene l'effetto magnetico fosse molto potente. Nel confrontare questo apparato con quello a piccole placche e celle, furono prese 36 coppie delle seconde; cosicché in entrambi gli strumenti si usava una ugual superficie di zinco. Fatti agire con lo stesso acido e con lo stesso filo di collegamento, quello delle due piastre faceva deviare l'ago da 60° a 70° rispetto al meridiano magnetico; mentre quella fatta con le piccole piastre lo deviava solo di 12°. Il potere di decomposizione della batteria a piccole piastre era molto considerevole e Moll trae la conclusione che l'apparato con le celle produce intensi effetti chimici mentre la sua azione magnetica è molto piccola; mentre le piastre singole hanno uno scarso effetto chimico sebbene la loro forza magnetica sia molto grande.”

[Faraday, 1821, pp. 288-89]

7.2 Intensità e velocità della corrente

L'interpretazione dei fenomeni ora descritti è molto semplice se si conoscono le leggi di Ohm, ma in mancanza di quelle si deve ricorrere a ipotesi ad hoc. Un esempio di soluzione di questo tipo è fornita dai fisici francesi i quali introdussero, nell'insieme dei concetti che allora si usavano per descrivere i fenomeni della conduzione (ne parleremo nel paragrafo 9) quello di *velocità* della corrente.

Un precursore di questo concetto può essere considerato il Volta stesso il quale usa il concetto di *rapidità* della corrente per indicare la causa della scossa prodotta da una certa quantità di elettricità:

“Concludiamo che la rapidità della corrente elettrica e di conseguenza la forza della commozione patita è in ragione composta della tensione elettrica e della libertà o facilità di passaggio in tutte le parti della catena o circuito.”²⁶

[Volta, 1802, p. 584]

Anche Ampère, nel 1820, a proposito delle correnti che si muovono in senso opposto da un polo all'altro del generatore voltaico usa il termine di *accelerazione*:

“Le correnti di cui parlo vanno accelerandosi fino a che l'inerzia dei fluidi elettrici e la resistenza che essi incontrano per l'imperfezione stessa dei migliori conduttori facciano equilibrio alla forza elettromotrice, dopo di che esse continuano indefinitamente con una velocità costante, finché questa forza conserva la stessa intensità.”

[Ampère, 1820, p. 165]

Nel medesimo filone di pensiero possiamo collocare l'interpretazione che Marianini fornisce dell'apparente indipendenza del potere deviante della corrente dal numero di coppie che costituiscono la batteria voltaica (Marianini, 1827). Egli ritiene infatti che ciò sia da attribuirsi al fatto che i conduttori di seconda classe catturino parzialmente l'elettricità o, per lo meno, ne ritardino il movimento cosicché in una batteria l'azione di ciascuna coppia diminuisce in proporzione diretta al proprio numero. Marianini attribuisce questa diminuzione o questo ritardo al fatto che la corrente, nel passaggio metallo - liquido, subirebbe una sorta di riflessione o rifrazione simile a quella della luce.²⁷

²⁷ Ci è parso interessante rilevare questo passaggio del lavoro di Marianini, perché sta a indicare che doveva essere piuttosto diffusa l'idea che l'elettricità si propagasse con modalità analoghe a quelle delle onde e che, pertanto, non si accettasse l'idea di una *stazionarietà* del regime di corrente del circuito. La suggestione dell'analogia di comportamento fra luce ed elettricità si ritrova anche in un successivo lavoro di Marianini (Marianini 1829) e anche, con notevole evidenza, in un più tardo lavoro di De La Rive nel quale, dopo alcune considerazioni sul comportamento della corrente, egli osserva:

“È facile comprendere che le manifestazioni sopra descritte sono reali fenomeni interferenziali che spingono a ritenere che la corrente elettrica si propaga per mezzo di ondulazioni molto lunghe, per mezzo di ondulazioni la cui lunghezza è tanto più considerevole quanto più il mezzo ove si produce la propagazione è buon conduttore.” [De La Rive, 1837, p.157]

L'ipotesi di una propagazione ondulatoria della corrente ha comunque radici precedenti, come risulta dal seguente passo di Oersted.

“L'elettricità non scorre dunque nei conduttori come l'acqua in un canale; ma essa si propaga per mezzo di una specie di decomposizione e ricomposizione continua, o meglio, per un atto che disturba l'equilibrio in ciascun momento e lo ristabilisce nell'istante seguente. Si potrebbe esprimere questa successione di forze opposte, che esiste nella trasmissione dell'elettricità, dicendo che l'elettricità si propaga sempre in modo ondulatorio.” [Oersted, 1820, p.72]

²⁶ A proposito di questa affermazione, in una sua nota di commento che compare a pag. 584 delle *Opere* di Volta, pubblicata dalla UTET nel 1973, così osserva M. Ghiozzi:

“Nel linguaggio moderno questa proposizione si traduce dicendo che l'intensità della corrente in un circuito è proporzionale al prodotto della forza elettromotrice e della conduttanza: questa fondamentale legge del circuito elettrico fu successivamente ritrovata da Stefano Marianini [...] e stabilita in celebri lavori teorici e sperimentali del 1825-27 da Georg Simon Ohm (1789-1854), sotto il cui nome, a buon diritto, è oggi universalmente conosciuta [...]”

Noi riteniamo che questa identificazione della intuizione di Volta con la legge di Ohm sia alquanto azzardata. Infatti, se è vero che la scossa elettrica (la commozione) è associata alla intensità di corrente, non è vero che si possa stabilire una rigorosa dipendenza di proporzionalità diretta fra causa ed effetto, se non altro perché l'effetto non è, in questo caso, definibile operativamente come una qualsiasi altra grandezza fisica. In secondo luogo, permane nella affermazione di Volta l'ambiguità del termine “rapidità della corrente elettrica”. Questo termine suggerisce infatti che nel circuito fluisce una corrente di elettricità più o meno veloce e in tal caso la rapidità della corrente elettrica sarebbe una derivata seconda rispetto al tempo della carica elettrica messa in circolo e non una derivata prima. Anche volendo interpretare il termine “rapidità della corrente” proprio come l'intensità della corrente modernamente intesa, ci sarebbe poi da conciliare la stazionarietà della corrente, carattere fondamentale di un circuito ohmico, con la variabilità della commozione. Come si vede l'intuizione di Volta avrebbe richiesto molti altri concetti per diventare la legge di Ohm.

Utilizzando l'ipotesi di una diversa velocità della corrente, il De La Rive ritiene di poter risolvere il problema delle anomalie di comportamento che si riscontrano quando più elementi di una batteria voltaica vengono via via applicati a un conduttore esterno "imperfetto" (di grande resistenza) o "perfetto" (di bassa resistenza):

“Ma se la necessità di una pila a più elementi è facilmente sentita [per aumentare la deviazione del galvanometro] allorché il conduttore è imperfetto [cioè ha un'alta resistenza], perché i fenomeni che hanno luogo con dei conduttori perfetti [cioè di bassa resistenza] non sono prodotti altrettanto bene [...] ed esigono al contrario un piccolo numero di coppie? [affinché si possa constatare una proporzionalità fra intensità di corrente e numero di coppie]. Tale questione non può essere risolta che distinguendo nella corrente l'intensità e la velocità; la prima dipende sia dalla superficie che dal numero degli elementi; la seconda dipende principalmente dal numero nel senso che essa è tanto più grande quanto minore è questo numero, perché la corrente che fa il giro del circuito è tanto meno ritardata nel suo passaggio attraverso la pila quanto meno alternanze di conduttori liquidi e solidi essa incontra.”

[De La Rive, 1829, a, p. 384]

Problemi interpretativi analoghi a quelli appena descritti si creavano in quegli esperimenti nei quali il flusso di corrente veniva misurato dalla quantità di sostanza che veniva decomposta dal suo passaggio in una cella elettrolitica.

Significativo in proposito è un articolo pubblicato nel 1839 negli *Annalen* (Poggendorf, 1839).

In esso l'autore, Johann Christian Poggendorf (1796-1877) fa un resoconto di alcuni esperimenti eseguiti da Adam Walker (1731-1821) (membro della Società elettrica di Londra) nei quali si nota che lo sviluppo di una medesima quantità di gas in una cella elettrolitica sottoposta successivamente all'azione di 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 elementi di una batteria voltaica, richiede tempi che non risultano inversamente proporzionali al numero di coppie applicate ma, in un caso raggiungono un valore limite, in un altro caso decrescono molto lentamente e in un terzo caso decrescono rapidamente.

Mentre per Walker questi risultati rimangono privi di una chiara interpretazione, Poggendorf li giustifica in modo molto naturale mediante la teoria di Ohm "che deve essere considerata come la base di uno studio razionale di tutte le correnti elettriche".

Si noti però che egli si rende perfettamente conto che l'interpretazione che sta proponendo rappresenta un qualcosa di completamente nuovo nel panorama della fisica del suo tempo e infatti così conclude il suo articolo.

“Tutte queste sono semplici conseguenze della teoria di Ohm; cionondimeno questa teoria, perfino da noi, non ha ancora trovato il riconoscimento che essa merita di trovare a causa della sua essenzialità nell'indagine approfondita dell'azione della corrente elettrica; e pure presso i fisici francesi e inglesi è totalmente sconosciuta (perciò anche là viene eseguito un gran numero di esperimenti che sono del tutto inutili o perché i loro risultati possono essere previsti o perché, a causa di una indagine trascurata dei dati necessari, non vengono derivati da essi risultati corretti) e dunque non sarà stato superfluo l'aver segnalato con un esempio particolare e facilmente comprensibile la sua utilità.”

[Poggendorf, 1839, p. 131]

8. Strumenti e tecniche di misura delle grandezze elettriche

8.1 Premessa

Nel descrivere i problemi connessi al generatore voltaico abbiamo accennato molto rapidamente ad alcune tecniche di rilevamento delle grandezze caratteristiche del generatore stesso e della corrente prodotta. L'analisi di queste tecniche merita però molto più di un semplice cenno, sia perché completa la panoramica dei problemi sperimentali e teorici che dovevano essere superati per giungere ad una descrizione coerente dei fenomeni circuitali, sia perché mette in chiara evidenza, se ve ne fosse ancora bisogno, che uno strumento di misura può fornire informazioni addirittura fuorvianti quando non ne venga compreso esattamente il ruolo nell'ambito dell'intero apparato in cui si trova inserito. Uno strumento di misura infatti non dichiara di per se stesso quale grandezza stia misurando né, tanto meno, come tale grandezza sia correlata a quelle rilevate da altri strumenti di misura operanti in concomitanza. Esso inoltre ingloba in sé una gran quantità di aspetti teorici la cui conoscenza è condizione indispensabile per una sua corretta "lettura"

In questo paragrafo descriveremo perciò i principali strumenti e le principali tecniche di rilevamento dei fenomeni connessi alla corrente elettrica continua con particolare riguardo alla strumentazione che venne realizzata dopo la scoperta di Oersted.

8.2 Gli elettrometri

Le tecniche per la misura delle grandezze elettriche che i fisici dell'Ottocento ereditarono dal secolo precedente sono essenzialmente quella che sfrutta l'elettrometro (sia esso quello artificiale, a foglie, o quello naturale costituito dalle zampe di una rana o dalla lingua dell'uomo) e la bilancia a torsione²⁸ e quello che rileva gli effetti termici della corrente.

Per quanto riguarda gli elettrometri artificiali, possiamo dire che essi dovevano essere giunti ad un notevole grado di perfezione e di confrontabilità se, come dice il Volta:

“tutti concorrono a stabilire che 1/60 di grado circa del mio elettrometro a paglie sottili è la tensione elettrica indotta dal mutuo contatto dello zinco con l'argento.”

[Volta, 1801, p.549]

Essi sono quindi i primi strumenti ad essere usati per determinare l'azione di una pila voltaica; con “strani” risultati naturalmente, perché essi manifestavano una notevole divergenza quando erano posti in contatto con un polo della pila non chiusa in circuito mentre questa divergenza scompariva pressoché completamente quando i poli venivano connessi da un circuito (si veda in proposito, ad esempio (Erman, 1801, pp.204-205)).

Torneremo più avanti su tale fenomeno perché il suo ruolo nell'orientare le ricerche di quel periodo fu, come vedremo, determinante.

28 Sull'uso di questo strumento per la determinazione di ciò che allora si denominava intensità dell'elettricità si veda ad esempio (Biot, 1804, p.20)

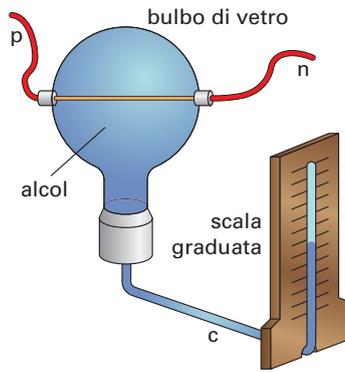


Figura 11 Schema dell'apparato utilizzato da Harris per la determinazione della conducibilità di conduttori metallici.

29 Se una medesima corrente i attraversa due conduttori di uguale lunghezza l e sezione S e di conducibilità σ_1 e σ_2 con $\sigma_1 < \sigma_2$, le quantità di calore Q_1 e Q_2 in essi sviluppate nell'unità di tempo sono proporzionali rispettivamente a

$$i^2 R_1 = i^2 \frac{l}{\sigma_1 S}$$

$$i^2 R_2 = i^2 \frac{l}{\sigma_2 S}$$

dunque il conduttore di minor conducibilità è quello in cui si sviluppa il maggior calore. Se invece i due conduttori vengono separatamente sottoposti alla medesima d.d.p. ΔV , le quantità di calore in essi sviluppate nell'unità di tempo sono proporzionali a:

$$\frac{\Delta V^2}{R_1} = \frac{\Delta V^2 \sigma_1 S}{l}$$

$$\frac{\Delta V^2}{R_2} = \frac{\Delta V^2 \sigma_2 S}{l}$$

e quindi nel conduttore di minor conducibilità si sviluppa il minor calore, contrariamente a quanto pensava Harris.

30 Ricordiamo che la scala Reamur assume come stati di riferimento quelli del ghiaccio fondente e dell'acqua bollente a pressione atmosferica ma assegna al primo stato il valore 0°R e al secondo stato il valore 80°R .

8.3 Misura di proprietà elettriche mediante effetto termico

Anche l'utilizzo di effetti termici per la determinazione di grandezze relative ai circuiti elettrici può essere considerato eredità del settecento (si ricordi in particolare la tecnica usata da Priestley per determinare la conducibilità dei fili metallici).

Il processo di fusione dei fili che cortocircuitano una batteria viene ad esempio utilizzato nel 1805 da Wilkinson per studiare la dipendenza dell'attività di una batteria dal numero e dalla superficie delle coppie bimetalliche di cui è costituita (Wilkinson 1805).

Un altro esempio di utilizzo di questa tecnica, finalizzata agli stessi obiettivi lo si trova anche in un lavoro di G. J. Singer del 1813 (Singer 1813).

Direttamente imparentata a questa tecnica è quella usata nel 1827 da William Snow Harris per la determinazione della conducibilità dei conduttori e per lo studio della dipendenza di questa grandezza dalla temperatura. Lo strumento realizzato ed utilizzato da Harris è schematizzato in **figura 11**.

In questo strumento, il conduttore pn collegato ai poli della batteria attraversa un bulbo in vetro contenente alcol. La produzione di calore, dipendente, secondo Harris, dalla conducibilità del conduttore, determina una proporzionale dilatazione del liquido rilevabile nel tratto verticale del tubo C posto davanti ad una scala graduata di riferimento. La relazione fra conducibilità e quantità di calore sviluppata è però fondata da Harris su presupposti analoghi a quelli utilizzati da Priestley per i suoi esperimenti sulla conducibilità descritti nel paragrafo 1 (minor conducibilità del conduttore, maggior calore sviluppato). Questa ipotesi, che funzionava correttamente nel caso del dispositivo sperimentale di Priestley, ove la carica elettrica attraversava *due conduttori in serie*, conduce però a risultati errati nel caso del dispositivo sperimentale di Harris, ove la corrente erogata dalla batteria voltaica attraversa *un solo conduttore alla volta*.²⁹

Conseguenza di ciò fu una deduzione errata della dipendenza fra conducibilità del conduttore e sua temperatura.

Ricordiamo che il problema della dipendenza fra la temperatura di un conduttore e la sua resistenza elettrica venne affrontata in modo sistematico da Lenz nel 1833. Si veda in proposito (Lenz, 1835), ove viene riportata la sintesi di un lavoro presentato all'Accademia delle Scienze di S. Pietroburgo nel Giugno 1833. Questa ricerca approda ad una formula del tipo $\sigma_n = x + y n + z n^2$ nella quale σ_n indica la conducibilità del filo alla temperatura di n gradi Reamur³⁰, x la conducibilità del medesimo a 0° e y e z sono coefficienti da determinare. I risultati sperimentali vengono però interpretati da Lenz alla luce della teoria di Ohm!

8.4 Misura della conducibilità mediante la scarica di batterie voltaiche

Analoghe, entro certi limiti, alle tecniche Settecentesche si possono considerare sia quella che consentiva di determinare la conducibilità dei fili metallici in base al numero di elementi di batteria (voltaica questa volta!) che venivano scaricati quando i fili da esaminare venivano posti in cortocircuito rispetto ai suoi poli, sia quella che consentiva misure di quantità di elettricità sulla base degli effetti elettrochimici prodotti.

Resoconti di misure che sfruttano la prima tecnica si possono trovare in (Children, 1815) e in (Davy, 1822).

Children la utilizza per stabilire una scala delle conducibilità dei metalli; Davy anche per studiare la dipendenza fra conducibilità e temperatura.

“Così un filo di platino di $1/220$ di diametro e di 3 pollici di lunghezza, allorché è stato raffreddato dall'olio, scarica l'elettricità di due batterie, o di venti bande doppie; ma quando, esposto all'aria, si riscalda, può appena scaricare una batteria.”

[Davy, 1822, p.231]

Resoconti di misure che sfruttano la tecnica elettrochimica si possono trovare in (Arnim 1801, pp.270-283)³¹ o anche nell'interessante lavoro di Joseph Louis Gay Lussac (1778-1850) e Louis Jacques Thenard (1777-1857) (Gay Lussac e Thenard, 1811)³².

8.5 Misure con galvanometro di Ampère-Nobili e moltiplicatore di Schweigger

Anche prescindendo dagli inconvenienti teorici associati alle tecniche di misura sopra descritte, specialmente a quella usata da Davy, si deve notare che nessuna di esse poteva garantire una rapida misura di ciò che oggi denominiamo intensità della corrente. Per avere uno strumento efficace in tal senso occorrerà dunque aspettare la scoperta di Oersted e le applicazioni strumentali che di essa fecero Ampère, Nobili e Schweigger.

Ricordiamo l'apparato di Ampère con la citazione seguente e con la [figura 12](#).

“Nelle esperienze del Sig. Oersted l'azione direttrice si combina sempre con quella che il globo terrestre esercita sull'ago magnetico e si combina inoltre talvolta con l'azione che descriverò fra poco sotto la denominazione di azione attrattiva e repulsiva; il che conduce a risultati complicati dei quali è difficile analizzare le circostanze e scoprire le leggi. Per osservare gli effetti dell'azione direttrice di una corrente elettrica su un magnete, senza che siano alterati dalle diverse cause suddette, ho fatto costruire uno strumento che ho chiamato ago magnetico astatico.”

[Ampère, 1820, p.188]

Fin dal 1820 Schweigger esegue un'importante modifica dell'apparato di Ampère, circondando l'ago magnetico con una bobina adatta a moltiplicare l'effetto della corrente e, infine, nel 1825, Nobili realizzerà il galvanometro astatico³³ accoppiando il dispositivo astatico di Ampère con la sospensione unifilare di Avogadro e Vittorio Michelotti (1774-1842).

Sul ruolo di questi strumenti e, in particolare, del moltiplicatore di Schweigger, così si esprime Richtie nel 1832:

“È proprio dal possedere il più perfetto misuratore di elettricità voltaica - cioè il galvanometro a torsione - che sono stato in grado di dare una più completa analisi dei principi della batteria e delle leggi che regolano l'accumulazione della potenza voltaica.”

[Richtie, 1832, p.288]

Secondo le affermazioni degli stessi ricercatori dell'epoca, si potrebbe dunque ritenere che con tali strumenti a disposizione si fosse dischiusa una rapida via

31 In questo lavoro, l'autore correla la “forza” del conduttore alla sua capacità di ridurre l'azione della batteria nella produzione di gas in una cella contenente acqua. Ottiene in tale modo la serie seguente, ordinata dal conduttore più debole (cioè dal conduttore che indebolisce meno l'azione della batteria) al conduttore più forte: Oro, Argento, Mercurio, Rame, Ottone, Stagno, Piombo, Ferro, Magnete, manganese, Zinco.

32 In questo lavoro si utilizza il gas sviluppato da due elettrodi connessi ai poli della pila e immersi in acqua salata per determinare come varia l'azione della pila in funzione del numero e della estensione delle coppie di cui essa è costituita. Naturalmente anche Gay Lussac e Thenard non sono in grado di tenere in debito conto il ruolo della resistenza interna della batteria e della resistenza della cella in cui si producono gli effetti chimici e giungono quindi ad ipotizzare una dipendenza fra la massa m di gas sviluppata e il numero n di elementi di cui è costituita la batteria del tipo: m proporzionale alla radice cubica di n .

33 Si legga ad esempio (Nobili 1828, Nobili 1829)

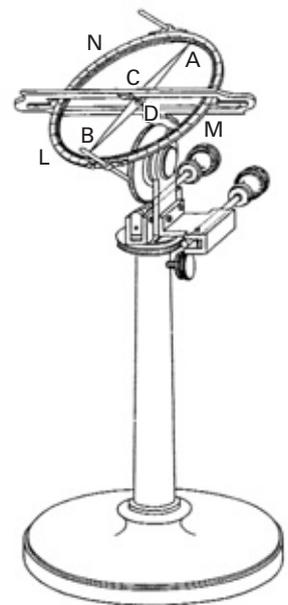


Figura 12 Riproduzione dell' "ago magnetizzato astatico" di Ampère. Esso consiste in un ago magnetizzato AB che può ruotare in un piano perpendicolare al perno CD il quale, a sue volta, è fissato a un telaio solidale con il cerchio graduato NLM che può essere orientato in un piano qualunque.

verso la definizione delle leggi della conduzione. In realtà, l'aumento di sensibilità degli strumenti a disposizione, non accompagnata da una corretta teoria del circuito elettrico, creò in molti certezze fondate su dati sperimentali fuorvianti che, in diversi casi, sembravano invalidare le intuizioni teoriche delle prime decenni dell'Ottocento che oggi riconosciamo come del tutto valide.

Un esempio. Il moltiplicatore di Schweigger aumentava sì la coppia che faceva deviare l'ago magnetico ma introduceva anche una *resistenza elettrica* supplementare nel circuito di valore non trascurabile, soprattutto se si considera che, a quell'epoca, si operava quasi sempre con circuiti di resistenza esterna molto bassa. Da ciò derivavano anomalie sperimentali del tipo indicato nel passo seguente.

“Nella prima serie di esperimenti della precedente tabella, con 11 coppie si produce meno gas che con 10. Questo non stupisce più di tanto, se si assume che l'undicesima coppia aggiunta possa agire in modo particolarmente cattivo. Stupisce però il fatto che, avendo introdotto una bussola delle tangenti, con 10 coppie si producano 2640 cm^3 [di gas] e una deviazione di $40^\circ 51'$ e con 11 coppie, invece, 2775 cm^3 e una deviazione di $42^\circ 13'$.

Senza il moltiplicatore inserito dunque la batteria di 11 coppie è peggiore di quella da 10 ma migliore con il moltiplicatore inserito.

L'esperimento venne ripetuto più volte e sempre con gli stessi risultati; [...]

Un simile fenomeno può essere interpretato adeguatamente solo mediante la teoria di Ohm.”

[Jacobi, 1839]

Si aggiungeva poi il fatto che l'intenso effetto del moltiplicatore poteva modificare in modo imprevedibile il momento magnetico dell'ago o magnetizzare permanentemente il moltiplicatore stesso³⁴ rendendo praticamente impossibili misure assolute di corrente a distanza di tempo a meno di lunghi e noiosi controlli periodici dello stato di magnetizzazione dell'ago mediante la tecnica delle oscillazioni.

Infine si doveva tenere conto del fatto che la risposta del galvanometro non è lineare se non in corrispondenza di piccoli angoli in quanto il campo magnetico generato dalla bobina entro la quale si muove l'ago non è uniforme.

8.6 Tecniche differenziali e di punto zero

Per superare quest'ultimo inconveniente Ohm, come vedremo meglio nel prossimo capitolo, utilizzerà una tecnica di misura nella quale l'ago viene riportato sempre nella medesima posizione. Negli stessi anni Becquerel, al fine di ovviare all'inconveniente delle possibili e imprevedibili variazioni di forza elettromotrice della pila³⁵ applicherà una tecnica di tipo differenziale.

L'apparecchiatura che realizzava questa tecnica è schematizzata in **figura 13** [sostanzialmente identica a quella riportata da Becquerel nel suo lavoro].

B è una batteria i cui poli sono collegati mediante quattro conduttori identici a quattro capsule, a, b, c, d contenenti mercurio. Dalle capsule a, c partono due lunghi fili in rame isolati e, g identici che si avvolgono su un apposito telaio a formare una sorta di moltiplicatore di Schweigger entro il quale può ruotare liberamente un ago magnetico M sospeso ad un filo. Dopo una serie numerosa di avvolgimenti i fili (ora indicati dalle lettere f, h) tornano rispettivamente nelle capsule b, d consentendo la chiusura del circuito. Con tale collegamento, qualunque

³⁴ Si veda in proposito (Walker 1825 a,p.97). Si noti che in questo stesso lavoro (p.98) l'autore sostiene che non si devono neppure trascurare in queste misure col moltiplicatore le condizioni barometriche, poiché dichiara di aver rilevato consistenti differenze nella deviazione dell'ago quando la misura viene eseguita alla pressione di 28 pollici di mercurio e quando viene eseguita in un apparato per vuoto.

³⁵ Si tenga presente che la pila a forza elettromotrice costante viene realizzata da Daniell solo nel 1836 (Daniell, 1836).

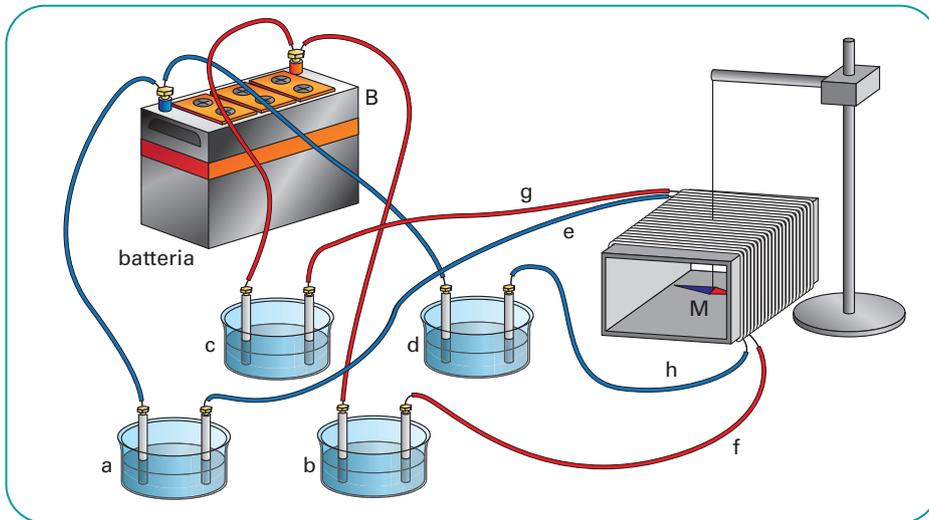


Figura 13 Schema di principio dell'apparato differenziale di Becquerel.

sia il valore istantaneo della forza elettromotrice della batteria, i due avvolgimenti vengono percorsi da due correnti di identica intensità e verso opposto che lasciano quindi indeviato l'ago magnetico.

Il confronto di due conduttori X e Y diversi (o per lunghezza, o per sezione, o per tipo di materiale) veniva eseguita ponendo le loro estremità in contatto contemporaneo (mediante appositi conduttori di collegamento identici) con le capsule a, b e c, d rispettivamente. Quando la conducibilità di X e Y fosse stata identica, tutto il circuito sarebbe stato elettricamente bilanciato e l'ago magnetico sarebbe rimasto immobile; diversamente, la sua deviazione avrebbe indicato come modificare uno dei due conduttori per ripristinare l'equilibrio del circuito (si veda, per ulteriori dettagli, Becquerel 1826,b, p.423)

Il sistema adottato da Becquerel era teoricamente perfetto ma sulla sua efficienza reale così osserverà Charles Wheatstone (1802-1875):

“[...] è quasi impossibile sistemare le due bobine in modo tale che le correnti di ugual energia circolanti in esse producano eguali deviazioni dell'ago in direzioni opposte, conseguenza della qual cosa è che il permanere in quiete dell'ago non costituisce indicazione dell'eguaglianza delle correnti. Questo ed altri difetti hanno impedito la diffusione del metodo differenziale.”

[Wheatstone, 1843, p.323]

Un notevole perfezionamento dell'apparato di Becquerel venne invece realizzato da Christie nel 1833.

Egli si era proposto di dimostrare sperimentalmente che le leggi della conduzione delle correnti indotte (da poco messe in evidenza da Faraday e, in modo parziale, da Joseph Henry (1797-1878) erano del tutto simili a quelle delle correnti voltaiche. E perciò:

“Al fine di stabilire se le correnti elettriche prodotte in tutti i metalli fossero, a parità di altre condizioni, di ugual intensità, proposi di sottoporre diversi metalli direttamente allo stesso grado di eccitazione magneto-elettrica, in modo tale che le correnti eccitate in essi si trovino in direzioni opposte e abbiano la stessa facilità di trasmissione, onde si possa determinare la differenza delle loro intensità.”

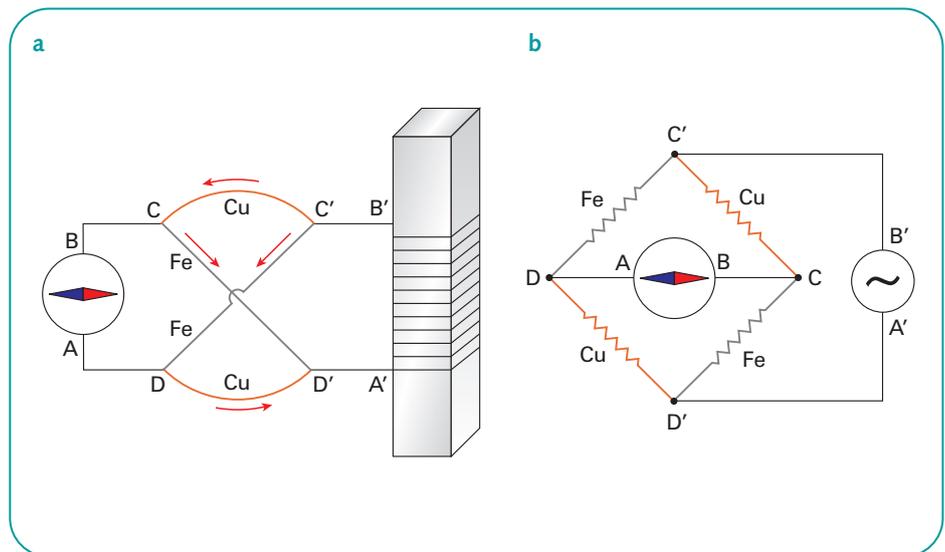
[Christie, 1833, p. 96]

La disposizione dei conduttori utilizzata da Christie è quella riportata in **figura 14a**. Con tale disposizione, la corrente deve attraversare due rami (C'DD' e C'CD') di uguale "facilità di trasmissione" complessiva ma con diversa conducibilità nei tratti C'C e C'D. In tale modo, secondo Christie, una diversa conducibilità dei due rami determinerà una diversa "intensità della corrente" (ovviamente da non intendersi in senso moderno!) nei punti C e D e ciò determinerà un passaggio di corrente, attraverso il galvanometro BA, da C a D o da D a C a seconda che la sua "intensità" sia maggiore in C o in D. Come si vede, le misure di Christie prevedevano che il circuito dovesse essere utilizzato in condizioni di sbilanciamento, con tutte le conseguenze che ne derivavano.

Si noti che, se opportunamente ridisegnato (**figura 14b**), il circuito di Christie si dimostra essere nient'altro che un "ponte di Wheatstone".

Figura 14a Schema dell'apparato di Christie utilizzato per confrontare la conducibilità di fili conduttori di caratteristiche diverse.

b Schema corrispondente a quello di figura 14a ridisegnato in modo da evidenziare la sua identità strutturale con il ponte di Wheatstone.



E infatti lo stesso Charles Wheatstone riconosce a Richtie il suo ruolo di precursore nel suo articolo del 1843! Vi sono però differenze non trascurabili fra i ponti progettati dai due fisici. Infatti, quello di Wheatstone non era costituito semplicemente da conduttori fissi ma un suo ramo era sostituito da un reostato (invenzione genuina di Wheatstone!); inoltre, mentre Wheatstone usa sempre il ponte in condizioni di bilanciamento, evitando così i problemi connessi alla presenza del galvanometro (ma Wheatstone crede nei principi di Ohm!), Richtie, come s'è detto, esegue le sue misure con il ponte sbilanciato, deducendo le conducibilità dei conduttori proprio sulla base delle deviazioni dell'ago associate al passaggio delle correnti indotte (e proprio perciò ottenendo leggi errate).

9. Ambiguità dei termini utilizzati per definire le grandezze relative all'elettricità in movimento

Fino a quando la legge di Ohm non venne accettata ed applicata, i dubbi teorici e l'ambiguità delle risposte sperimentali si traducevano nella ambiguità della maggior parte dei termini con i quali venivano designate le caratteristiche dell'elettricità dinamica e nella discordanza delle molteplici leggi con le quali si tentava di descriverne il comportamento.

In questo paragrafo vogliamo giustificare la prima parte dell'affermazione mentre dedicheremo il prossimo paragrafo alla giustificazione della seconda.

9.1 Tensione

Questo termine viene coniato, già verso il 1770, da Volta, per definire lo stato di "saturazione elettrica" di un conduttore in equilibrio elettrostatico (Volta, 1769, p. 67). Tale grandezza veniva misurata da Volta (e dai suoi contemporanei) mediante gli elettrodi a paglie o a foglie e questo strumento continuò ad essere usato, salvo rare accezioni³⁶ anche per misurare la tensione che si produce ai capi di una pila che non sta erogando corrente (si ricordi la citazione sull'elettrometro a paglie riportata nel precedente paragrafo).

Lo stato di tensione di un conduttore o dei poli di una pila veniva dunque, in linea di principio, misurato mediante uno strumento ed era quindi operativamente ben definito.

Ohm, nell'usare il termine di tensione non si discosta sostanzialmente da queste idee del Volta e anch'egli, come abbiamo visto nel paragrafo 5.3, fornisce una precisa definizione operativa di questa grandezza agganciata alle deviazioni dell'elettroscopio.

9.2 Resistenza

Con questo termine veniva genericamente indicata l'entità dell'ostacolo incontrato dall'elettricità nel passare attraverso i corpi e, da questo punto di vista, c'era un accordo abbastanza unanime sul suo significato qualitativo. Il disaccordo si manifestava invece quando si passava a considerare la sede della resistenza di un circuito. Volta ad esempio la collocava tutta nei dischi umidi o nei liquidi interposti fra le coppie bimetalliche³⁷ mentre altri la ritenevano concentrata quasi esclusivamente nei conduttori esterni alla pila, ignorando la resistenza interna di questa.

Questa difficoltà nel pervenire a risultati univoci deve essere attribuita sia all'incapacità di valutare il rapporto fra la conducibilità del conduttore esterno e quella dei liquidi contenuti nella pila, sia alla mancanza di un sensibile rivelatore di corrente. Entrambe le carenze generavano esperimenti dalle risposte ambigue. Ricordiamo in proposito una serie di esperimenti di F.H. Basse (Basse, 1803) relativi alla trasmissione a distanza dell'effetto di una pila da 70 elementi, dai quali sembra che tale effetto non subisca diminuzione sia usando una linea di 200 piedi sia usandone una di 4000 piedi. A questa distanza l'autore ha addirittura l'impressione che gli effetti (scintille, produzione di gas dall'acqua, scosse elettriche sulla lingua, ecc.) siano più forti. Interessante notare che l'autore non sente l'esigenza di riportare il valore del diametro del filo e che si limita a ricordare solo il materiale (ferro) di cui è fatto e la sua lunghezza³⁸.

È evidente che esperimenti di questo tipo potevano suggerire l'idea che tutta la resistenza fosse determinata dai conduttori di seconda specie, interni alla pila, rendendo per lo meno discutibili gli esperimenti di Ohm. Per una conferma di questa tesi si veda, ad esempio: relativamente ai primi anni dell'800 (Marechaux, 1803), relativamente al periodo stesso della produzione di Ohm (Walker 1825). Questo secondo lavoro compare nello stesso volume degli *Annalen* in cui si trova il primo lavoro di Ohm e il contrasto fra le due impostazioni di ricerca non potrebbe apparire più stridente.

36 Si noti però che Walker, in un suo lavoro del 1825, riferisce di esperimenti condotti con Kastner nei quali la misura della tensione veniva rilevata sulla base della *prima* oscillazione dell'ago magnetico di un moltiplicatore di Schweigger uno dei cui capi veniva posto in contatto con il punto del corpo o della batteria di cui si voleva determinare la tensione. (Walker 1825 a, pp.89-108) Egli stesso esegue esperimenti di questo tipo dai quali però non ritiene di poter trarre alcuna legge di proporzionalità (p.99) a causa della scarsa affidabilità di questo tipo di misure che, tra l'altro, dipendevano notevolmente dalla rapidità con la quale si stabiliva il contatto.

37 Si veda ad esempio: Volta 1801, p.571-572

"Avvi un'altra ragione per cui l'apparecchio, sia a colonna, sia a corona di tazze, non dà la commozione tanto valida, quanto aspettarcela potremmo dall'azione incessante di tal apparecchio, dalla scarica elettrica cioè continuata senza fine. Questa ragione è che gli strati umidi interposti a ciascuna coppia metallica riescono di un notevole ostacolo alla corrente elettrica, cioè la rallentano non poco, essendo essi conduttori imperfetti, come indicato già abbiamo [...], i liquori salini assai meno, a dir vero, dell'acqua semplice, ma pure imperfetti anch'essi in un grado considerevole."

38 Questo lavoro di Basse sulla conducibilità a grandi distanze viene ricordato da Sommering come test adatto a confermare la propria tesi sulla possibilità di realizzare un telegrafo a sviluppo di gas per grandi distanze (Sommering, 1811).

Interessante sull'argomento è pure un lavoro di De La Rive del 1828 nel quale le cause della "forza della corrente" sono tutte associate alla natura della pila e del liquido in essa contenuto, mentre il circuito esterno viene pressoché ignorato. Questo modo di considerare il circuito galvanico è ben espresso dal passo seguente.

“Si può, io credo, ricondurre alle tre seguenti le circostanze che esercitano una influenza sulla intensità della corrente:

1) La differenza nell'energia con la quale l'azione chimica del liquido si esercita su ciascuno degli elementi metallici della coppia voltaica: a parità delle altre circostanze, maggiore è questa differenza, più intensa è la corrente.

2) La facilità più o meno grande con la quale la corrente elettrica può passare dall'elemento solido della coppia nel liquido interposto. [...].

3) La facilità più o meno grande con la quale l'elettricità passa da una molecola del liquido conduttore ad un'altra, ovvero la conducibilità propria del liquido.

In teoria si dovrebbe prendere in considerazione anche la conducibilità propria delle porzioni solide, solitamente metalliche; ma in pratica si può trascurare quest'ultima causa di variazione dell'intensità che, viste le circostanze nelle quali si sviluppano i fenomeni, non esercita, in rapporto alle altre tre, che un'influenza pressoché nulla.”

[De La Rive 1828, p. 251]³⁹

39 Negli anni seguenti De La Rive muterà in parte le sue opinioni sulla resistenza del circuito esterno alla pila ma non nel senso di una visione ohmica. Così infatti scriverà nel 1837: “La causa di queste differenze [del fatto cioè che una batteria con pochi elementi opera perfettamente quando il conduttore esterno è molto buono mentre quando il conduttore esterno è di bassa conducibilità o quando si voglia produrre calore e luce occorre una batteria di molti elementi] si fornisce facilmente se si pensa che per entrambi i tipi di elettricità ammassati agli estremi della pila sono possibili due vie per la loro neutralizzazione, quella attraverso la pila medesima, come abbiamo visto in precedenza, e quella attraverso il conduttore che unisce i poli di questa pila. La quantità delle due elettricità che penetra nell'una e nell'altra via, dipende dalla facilità relativa che queste offrono al ricongiungimento di ognuna. Appena la pila è anche solo un poco più conduttrice del corpo che unisce i poli, allora attraverso questo non passa corrente o molto poca.” [De La Rive, 1837, p.521]. Merita rilevare il deciso contrasto fra l'impostazione di De La Rive e quella di Ohm che, nel 1826, così scrive: “Questa legge [sta riferendosi alla propria legge del circuito] si estende unicamente ai conduttori dell'elettricità mediante i metalli e non prende in considerazione la funzione dei conduttori liquidi della catena galvanica.” [Ohm 1826, p.138]

Nel punto 2) della citazione sopra riportata possiamo già considerare espresso in qualche modo il concetto di “resistenza al passaggio” (metallo - liquido) che Fechner descrive in modo esplicito nel 1829 (si vedano (Fechner 1829) e (Fechner 1838)) e che Lenz utilizza poi nel 1839 per contrastare la teoria chimica della forza elettromotrice. Ricordiamo che (si riveda eventualmente la parte finale del paragrafo 6) un elemento a sostegno di questa teoria si fondava sul fatto che l'aumento della concentrazione di acidi, basi o sali nei liquidi della pila determinava anche un aumento della sua attività. A questa argomentazione, Lenz rispondeva osservando che, in realtà, l'aumento della concentrazione dei liquidi lasciava immutata la forza elettromotrice della pila, associata al solo contatto bimetallico, ma riduceva drasticamente la resistenza incontrata dalla corrente nel passaggio metallo liquido (Lenz, 1839).

9.3 Il concetto di resistenza secondo Ohm

Il concetto di resistenza elettrica e la relativa terminologia emerge chiaramente nel lavoro di Ohm del 1826 pubblicato sullo *Schweiggers Journal*. Il concetto è di natura operativa, in quanto semplicemente associato ai parametri geometrici e fisici del conduttore mediante procedura sperimentale. Ohm infatti esegue misure di conducibilità di conduttori filiformi confrontando, in un medesimo circuito, la conducibilità di coppie di conduttori di medesima sezione la cui lunghezza viene modificata fino a quando il momento meccanico sviluppato su un ago magnetico (fissato all'estremità del filo di una bilancia a torsione e disposto sopra il conduttore in esame) dall'elettricità fluente in uno dei due conduttori non risulta uguale a quella che si produce nell'altro assunto come conduttore di riferimento.

“In questo modo ho stabilito la conducibilità di metalli diversi. Presi fili cilindrici di identico diametro e diverso materiale, li introdussi uno dopo l'altro nella catena [galvanica] e accorciai quelli che indebolivano maggiormente la forza fino a una lunghez-

za tale da ottenere all'incirca lo stesso valore di conducibilità dell'altro [...]. Così giunsi ai seguenti numeri proporzionali alla lunghezza dei diversi metalli con i quali si ottengono uguali valori di conducibilità: Rame 1000, Oro 574, Argento 356, Zinco 333, Ottone 280, Ferro 174, Platino 171, Stagno 168, Piombo 97”

[Ohm 1826, p.141]

È evidente da questo passo che Ohm, per definire la conducibilità di un conduttore applica materialmente l'operazione di *riduzione* delle lunghezze del filo e da qui trae origine il termine di “lunghezza ridotta” (reducirte Lange) che utilizzerà in un articolo di poco posteriore (Ohm 1826, b, p.463) per caratterizzare la resistenza dei diversi componenti di un circuito galvanico.

In effetti nell'articolo dello *Schweiggers Journal* la terminologia non è ancora chiaramente definita. Per la resistenza di un conduttore, Ohm usa il termine Leitungswiderstande (resistenza del conduttore), per quella di un moltiplicatore il semplice termine di Widerstand (resistenza) e per quella di una coppia bimetallica il termine Widerstandlange (lunghezza di resistenza), intendendo con ciò comparare la resistenza propria della coppia a quella di un conduttore standard di lunghezza tale da produrre lo stesso indebolimento dell'azione deviatrice dell'ago magnetico.

Come s'è detto, il termine più generale di *lunghezza ridotta* apparirà nell'articolo degli *Annalen* del 1826 e verrà poi utilizzato ampiamente nella *Teoria del circuito galvanico* per denominare la costante che correla la “differenza delle forze elettriche” che si trovano alle estremità di una parte del circuito (cioè la differenza di potenziale esistente tra due punti del circuito) e la “grandezza” della corrente (la nostra intensità di corrente).

Per i conduttori “prismatici”⁴⁰ tale costante è espressa dal prodotto $BC/(\gamma\omega)$ ove BC indica la lunghezza del tratto di circuito in esame, γ la sua conducibilità, ω la sua sezione; per gli altri componenti del circuito essa è invece data da una opportuna lunghezza ridotta di un conduttore di riferimento. L'insieme di tutte le lunghezze ridotte così definite concorre poi a costituire la “lunghezza totale ridotta” L dell'intero circuito, legata alla “grandezza della corrente” S e alla somma A di “tutte le tensioni del circuito” dalla relazione $S = A/L$ (Ohm 1827, p.21).

Ohm non fornisce un'interpretazione microscopica dell'origine della resistenza dei conduttori ma la sua interpretazione molecolare della propagazione dell'elettricità, secondo la quale l'azione di una particella elettrica è sentita solo dalle particelle elettriche contigue, gli consente di assumere mediante procedimento deduttivo che la conducibilità di un conduttore sia direttamente proporzionale alla sua sezione (risultato di cui, in base alle misure degli anni precedenti, era già pienamente convinto).

⁴⁰ Ohm usa questo termine anche se poi, per i suoi esperimenti utilizza conduttori cilindrici.

9.4 Intensità e quantità dell'elettricità

Sono questi i termini che subiscono il maggior mutamento di significato in relazione al precisarsi delle leggi relative alla conduzione ed al circuito.

Nel Settecento, il termine “intensità” dell'elettricità designava la capacità di questa di produrre effetti quali ad esempio la produzione di scintille, la deviazione degli elettrometri o la torsione di una bilancia di Coulomb. Con tale significato il termine continua ad essere usato, in generale, anche nell'Ottocento, per caratterizzare l'attitudine dell'elettricità a produrre fenomeni quali la deposizione di sostanze agli

elettrodi di una cella elettrolitica, la deviazione di un ago magnetico, il superamento di corpi interposti fra i poli di un generatore, ecc.). I tre passi che seguono esemplificano quanto detto; nel leggerli, si tenga presente che, nonostante la data della loro pubblicazione, i loro autori operano al di fuori della teoria di Ohm.

“Qual è, nella produzione di un effetto, la parte relativa al numero e all'intensità della corrente? È questo che non si può ancora dire in un modo ben esatto [...]. In ciò che precede, io ho sempre inteso per intensità di corrente, l'effetto più o meno considerevole che essa produce sul galvanometro magnetico.”

[De La Rive, 1836,a, p. 48]

“La parola intensità, applicata ad una corrente elettrica, in tanto quanto la distingue dalla sua forza elettrodinamica, non può avere altro senso determinato e capace d'essere sottoposto all'esperienza che quello della facoltà di poter sormontare più o meno facilmente gli ostacoli che si oppongono alla sua trasmissione attraverso i conduttori imperfetti, quali sono in generale i liquidi comparativamente ai metalli.”

[Botto, Avogadro, 1839, p.15]

“...Prima di quest'epoca [quella dell'esperimento di Oersted] non si avevano, per la misura delle correnti elettriche, che dei mezzi molto imprecisi, che confondevano la quantità di elettricità che attraversa il conduttore con la sua intensità, cioè a dire, con la potenza particolare che acquista una quantità qualunque di elettricità, di vincere la resistenza del circuito”

[Peltier, 1839,p. 225]

Come si può dedurre da questi passi, chi operava in uno schema concettuale estraneo alle leggi di Ohm, concepiva l'esistenza di un rapporto fra corrente e resistenza del circuito ma non era in grado di proporre una formulazione quantitativa di tale rapporto e, soprattutto, non intravedeva il rapporto fra il tempo e la “quantità di elettricità”.

Esaminiamo ora il significato di quest'ultimo termine.

Esso viene già utilizzato da Volta per caratterizzare la causa che genera il maggiore o minore effetto elettrochimico:

“[...] ho quindi avuto ragione di dire nel primo annunzio che diedi di tali apparati [la pila a colonna e a tazze] alla Società Reale di Londra nel mese di Marzo del 1800, che le scosse prodotte da' medesimi sono simili, dell'istessa natura e polso di quelli delle grandi batterie elettriche debolissimamente cariche⁴¹, supplendo, come in queste, così e meglio ancora in quelli, alla poca intensità, onde è spinto il fluido elettrico, la grandissima quantità del medesimo, che passa in una corrente continua per molti istanti successivi.”

[Volta, 1801, p. 565]

⁴¹ Ricordiamo che queste batterie non sono quelle voltaiche ma sono le batterie di condensatori che potevano essere caricate a vari livelli mediante tecniche opportune.

e più avanti:

“Farò qui osservare intanto che diverse esperienze riportate più sopra dimostrano che questi apparecchi, malgrado una tensione elettrica sì debole, che non arriva per avventura ad 1 o 2 gradi del mio elettrometro a paglie sottili, forniranno nulladimeno

una quantità ben grande di fluido elettrico in pochissimo tempo; [...] Egli è visibile da ciò che i miei apparecchi forniscono molto più abbondantemente che la miglior macchina elettrica; voglio dire che ad ogni istante tramandano e fanno passare maggior quantità di fluido elettrico [...] di quello far possa codesta macchina. [...]

LII. Questa conclusione inaspettata sorprenderà forse e sembrerà paradossa a molti [...] essa però non lascia d'esser vera a tutto rigore, ed è resa evidente non solo dalle adottate sperienze, ma da altre egualmente incontestabili. Essa spiega altronde assai bene e naturalmente come i medesimi apparecchi valgano a produrre certi effetti, o a portargli ad un più alto grado di quello possano le macchine elettriche ordinarie: quali effetti sono la decomposizione dell'acqua [...].

Per comprenderne la ragione [...] basta, dico, concepire che per cagionare tali decomposizioni chimiche fa d'uopo d'un torrente elettrico molto copioso e continuato... [in proposito si veda anche (Volta 1802, p.588)]”

[Volta 1801, p.572-574]

Anche Davy usa il termine quantità di elettricità per designare gli effetti elettrochimici delle batterie voltaiche e per quanto riguarda i rapporti di questa grandezza con l'intensità dell'elettricità così si esprime:

“Ho fatto qualche esperienza nella speranza di ottenere il rapporto esatto delle facoltà conduttrici in funzione del cambiamento di intensità e di quantità di elettricità; ma non sono riuscito che a pervenire a questo risultato generale, che più l'intensità dell'elettricità è grande, minor difficoltà incontra a passar attraverso cattivi conduttori, e più fenomeni rimarchevoli sono associati a questa circostanza.

Così, in una batteria ove la quantità di elettricità è molto grande ma ove la sua intensità è molto debole [...] il carbone messo in contatto soltanto in qualche punto, è un corpo isolante all'incirca quanto l'acqua, non può essere infiammato e i fili di platino non possono essere scaldati a meno che il loro diametro non sia almeno 1/80 di pollice quando la loro lunghezza sia circa 3 o 4 piedi...”

[Davy, 1822, p. 234]

Proprio riprendendo il lavoro di Davy appena citato, Becquerel, qualche anno dopo, definiva le corrette condizioni per eseguire misure di conducibilità nel modo seguente:

“...che ciascuna placca fornisca alla corrente la stessa quantità di elettricità e che le pile formate da uno stesso numero di queste placche abbiano la stessa intensità di azione.”

[Becquerel, 1826, p.421]

Al di fuori dello schema concettuale di Ohm i due termini continuarono a presentare ambiguità notevoli. Ancora negli anni trenta così scrive ad esempio Faraday a proposito del termine “quantità”:

“Il termine quantità di elettricità è forse sufficientemente definito quanto al senso...”

[Faraday, 1833 a, p.48]

affermazione che esprime incertezza, anche se Faraday connetteva strettamente la quantità di elettricità alla quantità di azione elettrochimica, come risulta ad esempio dal passo seguente:

“Quando si produce la decomposizione elettrochimica, vi è una forte ragione di credere che la quantità di materia decomposta non sia proporzionale all'intensità ma alla quantità di elettricità passata.”

[idem, p.32]

e anche, poco più avanti:

“Segue anche per questo caso di decomposizione elettrochimica, ed è probabile per tutti i casi, che la potenza chimica, come la forza magnetica, è in proporzione diretta alla quantità assoluta di elettricità che passa.”

[idem, p.53]⁴²

⁴² Come si vede, se si può essere d'accordo con Faraday per quanto riguarda l'azione chimica, non lo si può essere per quanto riguarda l'azione magnetica che dipende dal rapporto tra la quantità di elettricità e il tempo.

ma a proposito del termine “intensità”:

“Il termine intensità è più difficile da definire rigorosamente. Io sto usando i termini nel loro significato ordinario e accettato.”

[idem, p. 48]

In questa situazione così fluida, le definizioni di Ohm (le esamineremo in dettaglio nel prossimo capitolo) delle grandezze elettriche appaiono veramente le sole adatte a sostenere una corretta definizione delle leggi del circuito. A questo proposito si ricordi la frase di Poggendorf sulla “razionalità” delle leggi di Ohm riportata al termine del paragrafo 7.2 e si legga anche questo omaggio di Wheatstone alle medesime.

“Poichè tutti gli strumenti e le metodologie che descriverò sono fondati sui principi stabiliti da Ohm nella sua teoria del circuito voltaico [...] non posso sperare di far capire le mie descrizioni e spiegazioni senza far precedere un breve resoconto dei principali risultati che sono stati dedotti da essa. Si vedrà subito come le chiare idee di forza elettromotrice e resistenza, sostituendo i vaghi concetti di intensità e quantità fin qui dominanti, ci permettono di dare soddisfacenti spiegazioni dei più importanti fenomeni.”

[Wheatstone, 1843, p. 303]

10 Le leggi sulla conducibilità dei conduttori e sul circuito nel quadro non ohmico

In questo paragrafo vogliamo riportare in modo sintetico le principali leggi relative alla conduzione che vennero proposte fino agli anni quaranta, escluse naturalmente quelle proposte da Ohm.

10.1 Conducibilità, lunghezza, sezione di fili metallici

Nel paragrafo 2 abbiamo osservato che le prime intuizioni della dipendenza della conducibilità dei metalli dalla loro lunghezza e dalla loro sezione sono già patrimonio del settecento. Come si può desumere dalle tre citazioni seguenti, pur con la sua discutibile tecnica di misura, Davy fra i primi confermerà questa ipotesi anche per le correnti voltaiche:

“[...] allorché porzioni diverse dello stesso filo immerse in un fluido non conduttore, sono collegate a diverse parti della stessa batteria egualmente caricate, le loro facoltà conduttrici sembrano essere in ragione inversa alla loro lunghezza; [...] Trovai [...] che la facoltà conduttrice di un filo per l'elettricità [...] si mostra pressappoco proporzionale alla massa [e dunque, ipotizzando fili di ugual lunghezza, proporzionale alla sezione]”

[Davy, 1822, pp. 231, 233]

Con la sua tecnica differenziale, pur criticata, come s'è visto nel paragrafo 8, da Wheatstone, Becquerel giungerà sostanzialmente alle stesse conclusioni:

“Per ottenere la stessa conducibilità in due fili dello stesso metallo è necessario che i loro pesi siano proporzionali al quadrato delle loro lunghezze oppure che le loro lunghezze stiano nel rapporto delle loro sezioni.”⁴³

[Becquerel, 1826, p. 425]

Proprio sulla base di questa legge, Becquerel determina la conducibilità di sostanze diverse assumendo come riferimento la conducibilità di un filo di rame standard. Il risultato di queste misure è il seguente:

Rame 100; Oro 93,60; Argento 73,60; Zinco 28,50; Stagno 15,50; Platino 16,40; Ferro 15,80; Piombo 8,30; Mercurio 5,45; Potassio 1,33.⁴⁴

Una conferma dei risultati di Davy e Becquerel sulla dipendenza della conducibilità dei fili metallici dalla loro sezione e dalla loro lunghezza viene anche dai lavori di Claude Servais Mathias Pouillet (1791-1868) (si veda in particolare Pouillet 1829).

Questo lavoro merita di essere segnalato in quanto in esso appare una consapevolezza sorprendente dei problemi connessi a questi tipi di misure, consapevolezza che conduce il suo autore a una *interpretazione* dei dati sperimentali che ricorda molto da vicino il concetto di lunghezza ridotta di Ohm (al quale per altro non si accenna minimamente).

Pouillet esegue le sue misure utilizzando l'effetto della corrente su un moltiplica-

⁴³ Si noti che, posto $m = \delta S l$ con δ = densità del materiale di cui è fatto il filo, S = sezione del filo, l = lunghezza del filo,

$$\text{se } \frac{m_1}{m_2} = \frac{l_1^2}{l_2^2} \text{ deriva: } \frac{\delta S_1 l_1}{\delta S_2 l_2} = \frac{l_1^2}{l_2^2} \text{ da cui } \frac{l_1}{S_1} = \frac{l_2}{S_2}$$

$$\text{e quindi } R_1 = \frac{l_1}{\sigma S_1} = \frac{l_2}{\sigma S_2} = R_2$$

⁴⁴ Si noti che secondo i valori attuali assegnati alla conducibilità di questi metalli la scala dovrebbe essere la seguente:

Rame 100; Oro 76; Argento 103,4; Zinco 28,1; Stagno 15,5; Platino 15,8; Ferro 17,4; Piombo 8,1; Mercurio 6,8; Potassio 24,7

tore di Schweigger costituito da una sola spira; le indicazioni dell'ago non vengono però immediatamente assunte come indice della conducibilità del filo in esame perché:

“[...] la legge che la conducibilità sia inversamente proporzionale alla lunghezza mi sembra essere precisa solo sotto una condizione. Nel mio apparato le forze elettromagnetiche che si usano per la misura della conducibilità erano proporzionali alla tangente della deviazione dell'ago e quando di uno stesso filo venivano prese le lunghezze l, l', l'' , ecc., le tangenti t, t', t'' , ecc. delle deviazioni non stavano mai in proporzione inversa a queste lunghezze.

Invece stavano in proporzione inversa a queste lunghezze sommate a una quantità l , cosicché si aveva:

$$\frac{\lambda + l}{\lambda + l'} = \frac{t'}{t}, \quad \frac{\lambda + l}{\lambda + l''} = \frac{t''}{t}, \quad \frac{\lambda + l'}{\lambda + l''} = \frac{t''}{t'}$$

La quantità l rimane costante per diverse lunghezze di uno stesso filo ma cambia con la natura della sostanza e per ogni sostanza si trova in proporzione inversa alla sezione del filo.

Mi sembra perciò che la conducibilità sia in tutto rigore inversamente proporzionale alla lunghezza del filo supposto che si tenga in considerazione la resistenza che subisce l'elettricità nel passaggio attraverso i liquidi che separano le coppie metalliche e attraverso i fili conduttori che si collegano al filo in osservazione. ”

[Pouillet, 1829, p.93]

È interessante notare che, con questa impostazione teorica, Pouillet determina, per la conducibilità di materiali diversi, valori sensibilmente differenti da quelli che aveva determinato Becquerel.

Qualche anno dopo, anche Christie affronta il problema della dipendenza fra la conducibilità dei fili metallici e le loro caratteristiche geometriche ma nel caso in cui i fili siano attraversati da correnti indotte. I lavori di Christie, soprattutto quello del 1833, mostrano chiaramente che i suoi risultati sperimentali, non interpretati alla luce delle leggi di Ohm, non confortano per nulla l'ipotesi della proporzionalità della conducibilità dal rapporto S/l .

Come s'è già detto nel paragrafo 8.6, Christie esamina la conducibilità di conduttori diversi, opportunamente inseriti nel suo circuito a ponte, facendoli attraversare da correnti indotte rivelate dal galvanometro. Più precisamente, egli quantifica tali correnti osservando “la velocità con la quale l'ago è spinto all'inizio del suo moto” (Christie, 1833, p. 111). Con questa tecnica, della quale abbiamo già evidenziato i difetti, egli trova che la conducibilità di un filo varia con la sua lunghezza L secondo la dipendenza $1/L^n$ con n variabile da 0,19 a 0,6.

Problemi analoghi caratterizzano le misure destinate a rilevare la dipendenza della conducibilità del filo dal suo diametro D . La proporzionalità indicata dai valori sperimentali risulta del tipo D^n con n variabile fra 1,744 e 1,945 a seconda del valore del diametro.

Christie si rende conto che queste dipendenze così diverse da quelle proposte da Davy e Becquerel per la corrente voltaica potrebbero essere determinate da un effetto perturbatore del galvanometro e conclude il suo lavoro dichiarandosi convinto che la legge secondo la quale la corrente magneto-elettrica fluisce nei conduttori deve essere identica alla legge proposta da Davy e Becquerel per la corrente voltaica (Christie, 1833, p.132).

Non tutti però condividevano la “fiducia ragionata” di Christie. Ricordiamo ad esempio che, nel 1823, Cumming propone una legge della conducibilità dei fili metallici sia del tipo $D/L^{1/2}$, sia del tipo $D^2/L^{1/2}$ e che Peter Barlow (1776-1862), nel 1825, propone una dipendenza del tipo $1/L^{1/2}$.⁴⁵

Significative in proposito sono anche le posizioni di De La Rive e Matteucci che attribuiscono ai conduttori conducibilità dipendenti dalla “intensità di corrente” (intesa come s’è detto nel paragrafo 9.4) che li attraversa.

“la conducibilità dei corpi per l’elettricità non è una proprietà assoluta ma varia con l’intensità della corrente [...] tanto che una sostanza più conduttrice di un’altra per una certa intensità di corrente, può divenire meno conduttrice di quest’altra per un’intensità diversa o per una corrente della stessa intensità ma proveniente da una pila composta da un numero di coppie che non è più lo stesso.”

[De la Rive, 1836, p.52]

E così Matteucci:

“La perdita che una corrente prova attraversando una lama metallica interposta in un canale liquido che essa percorre, diminuisce proporzionalmente all’accrescimento della sua intensità, allorché questo suo accrescimento si realizza con un più grande numero di coppie.”

[Matteucci, 1836, p. 260]

Posizioni critiche relativamente alla dipendenza fra la resistenza e la lunghezza di un conduttore si trovano ancora in un lavoro di Luigi Pacinotti (padre del più famoso Antonio Pacinotti), datato 1843!

“Da più anni avevo eseguito l’esperienze che sono per rammentare, e ad unico oggetto di conoscere l’influenza del circuito nell’intensità della corrente indipendentemente da qualunque principio teorico. Ma poiché ha acquistato credito adesso su tal soggetto la teorica di Ohm, e si ammettono le conseguenze sperimentali dedotte da Fechner, e da Pouillet, io credo conveniente confrontare con quelle i miei risultati. [Il motivo di ciò è il seguente] Dalle mie esperienze [...] deduco che la resistenza non segue sempre la ragione semplice diretta della lunghezza, e che per ridurre comparabili le lunghezze delle diverse parti del circuito non si può sempre dividere la lunghezza reale per la sezione.”

[Pacinotti, 1843, pp. 129-130]

10.2 Una legge per il circuito

Fin qui abbiamo riportato resoconti sulle ricerche aventi come obiettivo quello di determinare la conducibilità dei conduttori. L’altro problema, non certo meno importante, consisteva nel determinare la relazione fra il numero degli elementi di batteria e la corrente prodotta. La soluzione di questo problema sembrava presentare difficoltà ancora maggiori per almeno tre motivi.

Il primo è di carattere estremamente generale e continuamente ricorrente nella letteratura scientifica delle prime decadi dell’ottocento. Esso si fondava sulla constatazione che la cortocircuitazione dei poli di una batteria se, da una parte, creava flussi

⁴⁵ Queste informazioni sono tratte dalla parte iniziale della memoria di Christie del 1833 nella quale sono riportati anche i dati bibliografici relativi.

intensi di elettricità accompagnati da vistosi effetti elettrochimici e da forti deviazioni dell'ago magnetico, dall'altra determinava la chiusura apparentemente totale delle foglie di un elettrometro collegato al polo positivo della pila. Significativi in proposito i due passi seguenti, il primo di Ampère, il secondo di Jean Daniel Colladon (1802-1893):

“L'azione elettromotrice si manifesta con due specie di effetti [...] chiamerò il primo tensione elettrica, il secondo corrente elettrica. Si osserva il primo quando i due corpi fra i quali avviene l'azione elettromotrice sono fra loro separati da corpi non conduttori [...]; il secondo è quello invece nel quale i due corpi fanno parte di un circuito di corpi conduttori [...] nel primo caso, l'effetto di questa azione è di mettere i due corpi o sistemi di corpi fra i quali essa ha luogo in due stati di tensione [...] nel secondo caso non vi è più tensione elettrica [e] [...] l'ago magnetizzato è spostato dalla sua direzione quando viene posto vicino ad una porzione qualunque del circuito [...] questo prova che le tensioni non sono la causa della scomposizione dell'acqua né dei cambiamenti di direzione dell'ago magnetizzato.”

[Ampère, 1820, p. 161]

“Se si uniscono le due estremità di una cella con un buon conduttore di elettricità, il fenomeno della tensione svanisce interamente; i due fluidi separati incessantemente dalla forza elettromotrice sono riuniti istantaneamente nel conduttore producendo ciò che si chiama una corrente. L'azione di questa corrente produce due nuovi importanti fenomeni, la decomposizione chimica e la deflessione dell'ago magnetico.”

[Colladon, 1826, p. 62]

Abbiamo riportato citazioni degli anni venti perché più vicine al periodo in cui Ohm formula la sua teoria ma la drastica diminuzione della tensione prodotta da una pila quando i suoi poli vengono connessi da un buon conduttore viene rilevata fin dai primissimi anni dell'800. Ad esempio, in (Erman, 1801, p.205) così si legge:

“Ma quando il circuito viene chiuso mediante un filo metallico interrotto che si fa affondare in un bicchiere pieno d'acqua, allora si giunge alla seguente situazione, che l'elettrometro, che durante la chiusura del circuito è in contatto con uno dei poli della pila diverge poco o nulla.”

E poco prima (p. 204):

“Si chiuda il circuito da polo a polo, mentre uno dei due fili della batteria si colloca all'elettrometro divergente, allora [le foglie] cadono di colpo insieme, nell'eventualità che il conduttore sia completo, cioè quando consiste di un metallo non interrotto e da un metallo dalla superficie non ossidabile.”⁴⁶

⁴⁶ Erman ripeterà concetti analoghi anche nel 1803; si veda (Erman 1803, p.388).

Dunque, ove c'è tensione non c'è corrente e ove c'è corrente non c'è tensione e perciò, che senso ha voler ricercare una qualunque relazione fra questi due effetti? Questo aspetto è stato posto in rilievo da Morton Schagrin che così scrive:

“[...] avendo fatto dipendere l'azione magnetica del flusso di elettricità dalla forza eccitatrice della corrente, Ohm sembrò aver confuso la ben riconosciuta distinzione fra

*elettricità di tensione e elettricità di corrente*⁴⁷. E questa differenza nel procedimento di concettualizzazione a mio parere fu alla radice della reazione al lavoro di Ohm. ”

[Schagrin, 1963, p.545]

Il secondo motivo va ricercato nella ambiguità di significato dei termini stessi utilizzati per descrivere le grandezze elettriche (si tenga presente il contenuto del paragrafo 8), ambiguità che impediva di individuare la o le grandezze da porre in correlazione al numero di elementi di batteria.

Il terzo consisteva nel non riuscire a tenere conto della resistenza prodotta dagli elementi del circuito al passaggio della corrente, in particolare di quelli che generano l'elettricità e di quello che la misura (il galvanometro). Come vedremo nel prossimo capitolo, solo l'applicazione del concetto ohmico di "lunghezza ridotta" ad ogni elemento del circuito poteva risolvere tale problema. Fino a quel momento tutto quanto veniva enunciato sul legame fra la corrente e il numero di elementi di batteria era destinato ad apparire come risultato puramente empirico o a generare ipotesi del tutto fantasiose come quella della "velocità della corrente" (si riveda il paragrafo 7.2).

47 Con il primo termine, Schagrin intende riferirsi all'elettricità di conduttori isolati o a quella rilevabile ai poli di una pila non cortocircuitata, che si manifesta con la deviazione delle foglie di un elettrometro; con il secondo termine intende riferirsi invece all'elettricità che fluisce nei conduttori e che manifesta un forte potere deviatore dell'ago magnetico.

Capitolo 2

Le leggi di Ohm

1. Introduzione

In questo capitolo verranno illustrate le leggi di Ohm sul circuito galvanico. Riferimenti a tali leggi sono già stati fatti nel capitolo precedente ove, in particolare, abbiamo presentato con un certo dettaglio le vedute di Ohm sulla causa generatrice del flusso di elettricità. Nel seguito perciò ci soffermeremo in modo particolare prima sugli aspetti sperimentali dell'opera di Ohm, quindi sulla formulazione delle sue leggi del circuito elettrico e infine sulle applicazioni che Ohm stesso fece di queste leggi.

Le memorie che sono state esaminate per la stesura di questo capitolo sono i tre articoli di Ohm pubblicati nel 1825 e 1826 e il trattato intitolato *Die galvanische Kette mathematisch bearbeitet* (Teoria matematica del circuito galvanico), pubblicato nel 1827. Quest'ultima pubblicazione è stata letta nella traduzione di A. Perugia, pubblicata a Firenze nel 1847.

In questa traduzione, la primitiva esposizione di Ohm è seguita da una "Appendice" nella quale si accenna alle cause dei mutamenti chimici e delle conseguenti variazioni di "forza" che si producono nel circuito elettrico quando il generatore sia di tipo voltaico. Questa sezione non verrà commentata in modo sistematico e faremo riferimento ad essa in un solo caso.

2. Le ricerche sperimentali di Ohm

Il Trattato di Ohm inizia con la frase seguente:

“Lo scopo di questo libro è quello di dedurre, partendo da alcuni fatti, dati la maggior parte dall'esperienza, l'insieme di quei fenomeni elettrici che si producono pel contatto di due o più corpi, e che sono compresi sotto il nome di fenomeni galvanici.”

[Ohm, 1827, p. 3]

Questo esordio di Ohm è certamente piuttosto discutibile, sia perché i dati sperimentali di molti altri fisici suoi contemporanei, come s'è visto nel precedente capitolo, erano nettamente contrastanti fra loro e con i propri, sia perché egli non dovette dedicare molto tempo alla sperimentazione, dal momento che i suoi articoli di contenuto sperimentale riportano i risultati di un numero relativamente limitato di misure (in proposito si veda anche (Mc Knight, 1966))¹.

Comunque, prima di illustrare le "leggi di Ohm" così come vengono esposte nella stesura definitiva del 1827, conviene esaminare le caratteristiche principali degli esperimenti descritti in un articolo pubblicato nel 1825 e in uno pubblicato nel 1826.

Nel primo di questi articoli (Ohm 1825) Ohm riferisce i risultati di alcune serie di misure relative alla conduzione dell' "elettricità di contatto" in conduttori di

¹ Ricordiamo d'altra parte, che agli inizi del secolo scorso, il ruolo dell'esperimento nelle ricerche fisiche era del tutto preponderante rispetto a quello dell'elaborazione teorica e sarebbe stato molto rischioso per Ohm dichiarare che la sua teoria era più il frutto dell'intuizione e della deduzione che dell'induzione. In proposito può essere interessante osservare che, solo un anno prima, anche Ampère, nel suo Trattato "Théorie des Phénomènes électro-dynamiques uniquement déduite de l'expérience" aveva dichiarato di aver fondato le sue ipotesi su una serie organica di esperimenti (Ampère, 1826, p.247) mentre la critica storica ha ormai accertato che tali esperimenti furono al più utilizzati da Ampère solo per confermare ciò che l'intuizione, sulla base di pochissimi fatti sperimentali, gli aveva suggerito. Alcuni storici ritengono addirittura che alcuni di quegli esperimenti non furono mai realizzati.

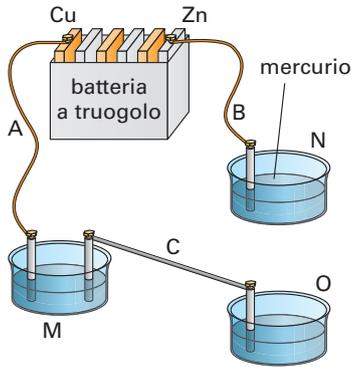


Figura 1. Schema nostro del circuito utilizzato da Ohm per la serie di misure il cui resoconto è riportato nell'articolo del 1825.

diversa lunghezza. L'apparato utilizzato per generare l'elettricità è una batteria a trapezoido realizzata con coppie bimetalliche rame-zinco (il loro numero non viene precisato). Gli elettrodi che si trovano alle estremità di questa batteria sono collegati a due tazze M e N contenenti mercurio mediante due conduttori A e B di lunghezza totale 2,5 piedi. Da M parte un terzo conduttore C lungo 4 piedi che termina in una terza tazza O, anch'essa contenente mercurio (figura 1).

Il circuito viene chiuso connettendo N con O prima mediante un corto e grosso conduttore di riferimento *o*, successivamente con altri cinque conduttori *a, b, c, d, e*, lunghi rispettivamente 1; 5; 6; 10,33; 23 piedi e tutti di diametro pari a 0,3 linee (0,6 mm).

Al di sopra del conduttore C viene disposto un ago magnetico fissato all'estremità del filo di una bilancia a torsione di Coulomb.

La misura della conducibilità dei diversi conduttori viene realizzata nel modo seguente. Si osserva la deviazione angolare dell'ago magnetico quando le tazze N e O sono connesse dal conduttore *o* di riferimento e si valuta quindi la diminuzione relativa della forza che devia l'ago magnetico quando il conduttore *o* viene sostituito dai conduttori *a, b, c, d, e* nell'ordine. Per ovviare a eventuali variazioni della forza del generatore, l'inserimento dei conduttori *a, b, c, d, e* fra le tazze N e O viene sempre preceduto dal reinserimento del conduttore *o* di riferimento. Sulla base dei risultati ottenuti in tre serie successive di misure, in ciascuna delle quali vengono apportate alcune variazioni dell'apparato sperimentale, Ohm ritiene di poter tradurre la diminuzione relativa della forza che devia l'ago magnetico, indicata con *v*, con la formula seguente:

$$v = m \log \left(1 + \frac{x}{a} \right) \quad [1]$$

ove *x* indica la lunghezza del conduttore che viene utilizzato per connettere le tazze N e O, *a* la lunghezza totale dei conduttori A, B, C quando siano realizzati con un filo avente il medesimo diametro dei conduttori *a, b, c, d, e*; *m* una costante il cui valore viene ricavato empiricamente da Ohm e che egli ritiene

“... una funzione della forza normale [quella che si produce quando fra N e O è inserito il conduttore di riferimento *o*], dal diametro dei conduttori, dal valore di *a* e, come ho motivo di credere, dalla forza della tensione elettrica.”

[Ohm, 1825, p.85]

Come si può notare, nella relazione (1) esiste già un parametro (indicato con *a*) che consente di tenere conto della lunghezza dei conduttori A, B, C che concorrono con il conduttore in esame a costituire il circuito completo ed esiste pure un parametro (indicato con *m*) capace di tradurre (anche se per via empirica) la “forza dell'azione” della batteria (oggi diremmo la forza elettromotrice della batteria); manca tuttavia un parametro capace di tenere conto della *resistenza interna del generatore* (resistenza che era tutt'altro che trascurabile rispetto alla resistenza dei conduttori A, B, C e dei conduttori *a, b, c, d, e*).²

² Tenendo conto che la diminuzione della forza che devia l'ago magnetico valutata relativamente alla forza deviante che si sviluppa quando è inserito il conduttore *o* può essere assunta come proporzionale a

$$v = \frac{I_0 - I}{I_0}$$

- indicando con *a* la lunghezza complessiva dei conduttori A, B, C (assunti con ugual diametro),

La formula [1] risulta dunque non coerente con quella che diverrà la corretta formula ohmica del circuito.

Nella parte finale del suo articolo (e in un successivo breve commento al medesimo) Ohm segnala espressamente ai lettori che l'azione del generatore diminuisce fortemente al trascorrere del tempo. Questa segnalazione prelude evidentemente alla sua decisione di abbandonare l'uso dell'infido apparato idroelettrico (la pila di Volta) per affidarsi al generatore termoelettrico.

“Per gli esperimenti che si occupano [di determinare la resistenza dei conduttori] ogni variazione della forza [elettromotrice della pila] influisce molto negativamente dato che [quando] conduttori di valore molto diverso fra loro vengono inseriti nel circuito si stabilisce una incertezza che viene aumentata mediante le continue variazioni che subiscono il flusso e la costituzione chimica delle superfici metalliche a contatto. In verità io ho cercato di ovviare a questo inconveniente nei miei precedenti esperimenti [...]; tuttavia, sebbene gli errori di osservazione siano limitati in confini abbastanza ristretti, non potevo sperare di scoprire in questo modo le corrette leggi della conduzione e perciò presi rifugio nel circuito termomagnetico [corsivo nostro] la cui stabilità mi era stata segnalata dal Sig. Poggendorf.”

[Ohm, 1826 a, p.143]

Abbiamo voluto sottolineare con un nostro corsivo il ruolo della generazione termoelettrica dell'elettricità ritenendo di aver così interpretato il pensiero di Ohm che, infatti, chiude l'articolo dal quale abbiamo tratto il passo precedente nel modo seguente:

“L'importante scoperta di Seebeck sembra dipanare il filo che conduce fuori dal labirinto nel quale si intricava la corrente elettrica.”

[Ohm, 1826 a, p.166]

Tuttavia ciò che differenzia il lavoro di Ohm descritto nel suo secondo articolo da quello descritto nel primo non è solo il diverso tipo di generatore usato per creare corrente nel circuito ma anche il diverso modo di rilevare i dati sperimentali e il chiaro riconoscimento di una resistenza propria del generatore.

Quanto al primo punto, facciamo rilevare che Ohm non esegue più alcun con-

che assumeremo proporzionale alla loro resistenza;

- indicando con r la lunghezza del conduttore di diametro identico a quello dei conduttori A, B, C e corrispondente alla resistenza interna del generatore;

- indicando con x la lunghezza del conduttore che connette O con N (supposto anch'esso di diametro identico a tutti gli altri);

- indicando con fem la forza elettromotrice del generatore;

la legge di Ohm corretta applicata all'intero circuito conduce all'espressione seguente:

$$I_0 = \frac{fem}{r+a} \quad I = \frac{fem}{r+a+x}$$

e quindi

$$v = \frac{I_0 - I}{I_0} = \frac{\frac{fem}{r+a} - \frac{fem}{r+a+x}}{\frac{fem}{r+a}} = \frac{x}{r+a+x}$$

Inserendo in questa formula alcuni valori ottenuti da Ohm nella sua terza serie di misure (ad esempio i valori $v = 0,355$; $x = 23$ piedi; $a = 6,5$ piedi) si ottiene $r = 35,3$ piedi, un valore tutt'altro che trascurabile!

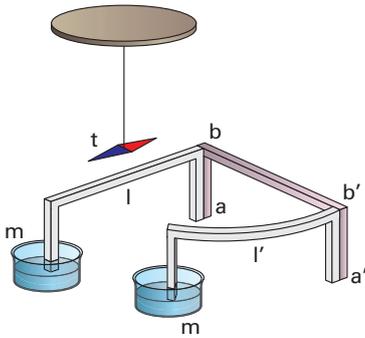


Figura 2. Schema dell'apparato "termomagnetico" utilizzato da Ohm per la serie di misure i cui risultati sono pubblicati nel primo articolo del 1826.

fronto con la corrente associata a un conduttore di riferimento (molto corto e di grande sezione) ma, più direttamente, rileva la "forza della corrente" che scorre nel circuito sulla base della deviazione di un ago magnetico montato come indicato schematicamente in **figura 2** (la figura più completa dell'apparato sperimentale con i dati relativi alle dimensioni dei diversi suoi componenti, sono riportati nell'ambito della traduzione dell'articolo che segue il presente Capitolo).

abb'a' è una sbarra di bismuto a forma di parentesi quadrata capovolta che, con le parti contigue delle lamine di rame l e l' , costituisce una termocoppia. Le altre due estremità di l e l' pescano in due tazze contenenti mercurio nelle quali vengono immersi gli estremi dei conduttori da esaminare; t è un ago magnetico fissato all'estremità di una bilancia di torsione.

Per le sue misure Ohm utilizza ora otto conduttori di rame di diametro pari a $7/8$ di linea (circa 1,7 mm) e di lunghezza rispettivamente 2, 4, 6, 10, 18, 34, 66, 130 pollici. I valori della deviazione dell'ago magnetico che si ottengono inserendo di volta in volta i conduttori nel circuito quando gli estremi della termocoppia sono tenuti immersi rispettivamente in acqua e ghiaccio e in acqua bollente vengono inquadriati tutti in una formula del tipo:

$$\text{forza dell'azione magnetica} = \frac{a}{b + x} \quad [2]$$

ove x indica la lunghezza del conduttore inserito nel circuito, a una costante che si dimostra dipendente solo dalle caratteristiche del generatore, b una costante che dipende solo dalla parte invariabile del circuito (escluso quindi il conduttore di lunghezza variabile x).

Ohm si rende conto del fatto che la bontà di una legge si manifesta nella sua capacità di descrivere anche fenomeni diversi da quelli dai quali è stata indotta e perciò ne tenta l'applicazione ai circuiti idroelettrici (contenenti pile voltaiche). Anche in questo caso la formula si dimostra del tutto efficace pur di tenere conto che per questi circuiti b è centinaia o migliaia di volte più grande di quello che esso assume nei circuiti termoelettrici e che nel circuito idroelettrico il valore di b è suscettibile di notevoli variazioni a causa della consistente modificazione della conducibilità del generatore prodotta dalle separazioni [dissociazioni elettrolitiche] che hanno luogo al passaggio della corrente. Emerge dunque chiaramente il concetto di resistenza propria del generatore, che Ohm esprime come lunghezza di un conduttore (di materiale e di sezione identici a quelli dei conduttori variabili inseriti nel circuito) la cui resistenza al flusso della corrente è equivalente a quella del generatore. Questa resistenza equivalente, nell'articolo in esame, viene denominata *Widerstandslänge* e costituisce la premessa teorica del concetto di "lunghezza ridotta" che verrà introdotto nel successivo articolo.

Con questo nuovo concetto, nella seconda parte dell'articolo, Ohm riuscirà a fornire l'interpretazione del comportamento, fino a quel momento inspiegato, di un circuito in cui opera una batteria costituita da m elementi identici e di un circuito in cui è inserito un moltiplicatore di Schweigger.

3. Una prima formalizzazione delle leggi di Ohm

L'espressione della "forza della corrente" che Ohm propone nel suo primo articolo del 1826 è già molto simile alla formula attuale che consente di calcolare l'intensità di corrente circolante in un circuito elettrico ma i termini a e b che in essa

compaiono risultano dedotti empiricamente e non sono direttamente connessi al valore della tensione che il generatore manifesta quando un suo polo è messo a terra e l'altro è connesso a un elettroscopio. Questa connessione viene proposta da Ohm nel secondo dei suoi articoli del 1826, quello pubblicato sugli *Annalen*.

“Da poco ho reso noto nel giornale di Schweigger un esperimento che mi ha condotto a una teoria delle correnti [...]. Da quel momento tuttavia sono stato così fortunato da scoprire due [...] leggi [...] che riproducono stabilmente e tuttavia così semplicemente tutti i fatti precedentemente rilevati e in più, cosa che ognuno desidera maggiormente, che mostrano di essere autoconsistenti.”

[Ohm 1826 b, p.459]

La forma che Ohm dà a queste due leggi è la seguente:

$$X = k \omega \frac{a}{l} \quad [3]$$

$$u - c = \pm \frac{x}{l} a \quad [4]$$

“(...) dove k indica la conducibilità, l la lunghezza, ω la sezione di un conduttore omogeneo prismatico, a la tensione elettrica stabilita ai suoi estremi e x la lunghezza di una parte del conduttore che si estende da una sezione, assunta come invariabile e per altro arbitraria nel conduttore, che è stata scelta come origine delle ascisse, fino a una data sezione variabile interna al conduttore; da ultimo X rappresenta la forza invariabile della corrente elettrica mantenuta sull'intera lunghezza del conduttore [oggi diremmo: l'intensità della corrente elettrica, che è stazionaria nel conduttore] e u l'intensità dell'elettricità agente sull'elettrometro stimata nel punto indicato da x e variabile con esso [oggi diremmo: il potenziale del punto x]; infine c è una quantità da definire tramite le date circostanze, indipendente da x [il potenziale è definito infatti a meno di una costante]. Il doppio segno nell'equazione [4] si definisce successivamente, in base al fatto che la direzione dell'ascissa vada da luoghi più negativi a luoghi più positivi o al contrario.”

[Ohm 1826, p.460-1]

Nell'illustrazione delle leggi soprascritte egli utilizza il concetto di “lunghezza ridotta” (*reducirte Länge*), termine con il quale indica la lunghezza di un conduttore di prestabilita sezione e conducibilità che sostituisce uno o più altri conduttori nell'equazione (a) senza modificare i valori di X e a . Ricorrendo a tale concetto, Ohm può sostituire al rapporto $l/(k \omega)$ un nuovo parametro, che indica ancora con l , mediante il quale la formula [3] può essere riscritta nella seguente forma sintetica

$$X = \frac{a}{l} \quad [5]$$

Come si vede, dunque, la “lunghezza ridotta” di Ohm non è altro che la nostra “resistenza” del conduttore.

Nella seconda parte dell'articolo e nel suo seguito che compare nel Vol. 7 degli *Annalen* (pp.45-54), Ohm svolge una serie di applicazioni delle due leggi [3] e (4).

Preferiamo però presentare queste applicazioni nella forma più sistematica e ordinata con la quale esse vengono proposte nella prima parte della *Teoria matematica* alla quale dedichiamo il prossimo paragrafo.

4. Introduzione alla “teoria matematica del circuito galvanico”

In questo trattato Ohm si propone di rendere “di pubblica ragione una teoria dell’elettricità galvanica come parte speciale della teoria generale dell’elettricità.” (Ohm 1827, p.2)

Si tratta dunque, intenzionalmente, di una esposizione teorica *destinata a spiegare e a interpretare*, nella quale non compare più alcun dato sperimentale ma ove i principi e le formule sembrano scaturire quasi esclusivamente da un processo puramente deduttivo, appena mitigato dalla decisione di far

“*precedere al compatto lavoro matematico un più libero, né perciò meno coordinato, prospetto del suo andamento e dei suoi risultati.*”

[Ohm 1827, p.3]

Questo prospetto si apre con l’enunciazione di

“*Tre leggi, di cui la prima riguarda la maniera di propagarsi dell’elettricità in uno stesso corpo, la seconda la dispersione dell’elettricità per l’aria circostante, e la terza il modo di manifestarsi dell’elettricità ai punti di contatto di due corpi eterogenei, ...*”

[Ohm 1827, p.3]

Del “modo di manifestarsi dell’elettricità ai punti di contatto di due corpi eterogenei”, della causa cioè della forza elettromotrice, abbiamo già detto piuttosto diffusamente nel paragrafo 6.4 del Capitolo precedente. Per comodità di chi legge ci limiteremo perciò a ricordare la questione con la citazione seguente.

“*Io ho esposto come segue il modo di manifestarsi dell’elettricità ai punti di contatto di due corpi differenti, ossia la tensione elettrica di questi corpi. Quando due corpi eterogenei si toccano, conservano sempre ai punti di contatto una sola e medesima differenza tra le loro forze elettroscopiche.*”

[Ohm 1827, p.5]

A proposito della “dispersione dell’elettricità per l’aria circostante” va ricordato quanto detto nel paragrafo 5.4 del Capitolo precedente riguardo la sede materiale del flusso di elettricità nei conduttori metallici. Una conduzione che si fosse sviluppata sulla sola superficie dei conduttori avrebbe esposto l’elettricità a forti dispersioni nel mezzo circostante e avrebbe reso molto improbabile il principio cardine della stazionarietà della corrente. Ohm ritiene però, con il Davy, che la conduzione avvenga entro i conduttori, fatto che annulla praticamente l’effetto di dispersione dell’elettricità nell’aria. Poiché il problema del luogo della conduzione continuò ad essere dibattuto per tutti gli anni Venti, Ohm si vede però obbligato ad assumere una posizione precisa in merito enunciandola addirittura sotto forma di legge.

“Circa alla dispersione dell'elettricità per l'aria ho ritenuta [ho assunta valida] la legge trovata da Coulomb coll'esperienza, secondo la quale la perdita di elettricità di un corpo circondato d'aria in un istante piccolissimo di tempo e di lunghezza costante, è proporzionale alla carica elettrica ed ad un coefficiente dipendente dalle condizioni dell'atmosfera.

Un semplice confronto delle circostanze nelle quali Coulomb faceva le sue esperienze con quelle che hanno luogo quando si tratta della elettricità in movimento, fa pertanto vedere che nei fenomeni galvanici l'influenza dell'aria può trascurarsi. Nelle esperienze di Coulomb l'elettricità spinta alla superficie dei corpi era tutta compresa dall'aria e però tutta esposta al processo della dispersione, laddove nel caso della corrente l'elettricità passa quasi sempre nell'interno dei corpi e non entra quindi che in piccola parte in comunicazione coll'aria.

Per conseguenza in quest'ultimo caso la dispersione per l'aria non può che riuscire piccolissima, in confronto di quella che ha luogo nel primo. Questa conseguenza dedotta dalla natura delle circostanze, è confermata dall'esperienza, ed in essa sta il motivo per cui si fa così di raro menzione della seconda legge.”

[idem, pp. 4 - 5]

In effetti, a questo problema Ohm dedicherà solo alcune pagine nella parte più matematica del Trattato (pp. 85 - 87). Veniamo dunque all'esame della prima legge che costituisce il nucleo centrale della teoria di Ohm. Di tale legge egli afferma che la sua natura è “alquanto teoretica”.

“Quanto a questa prima legge, io mi sono partito dalla supposizione che la comunicazione dell'elettricità abbia luogo immediatamente solo da un elemento del corpo ad un altro contiguo, talmenteché tra elementi non contigui non vi sia comunicazione immediata di elettricità. Io ho posto la quantità d'elettrico che passa tra due elementi contigui, tutte le altre circostanze essendo le stesse, proporzionale alla differenza delle forze elettriche dei due elementi; come nella teoria del calore si prende la quantità di calore che una molecola riceve dall'altra proporzionale alla differenza delle loro temperature.”

[idem, p.4]

Nella parte più “libera” (meno matematica e più intuitiva) dell'esposizione, questa ipotesi appare poco evidente. Il punto di partenza sembra essere l'ipotesi macroscopica della stazionarietà della corrente, dalla quale vengono fatte derivare la legge con la quale le forze elettroscopiche variano nel circuito e la dipendenza fra queste forze e la “grandezza della corrente”. Nella parte più matematica diviene invece chiaro che i principi della conduzione del calore conducono direttamente Ohm ad una espressione differenziale della grandezza della corrente.

Nei due prossimi paragrafi esamineremo separatamente i due tipi di ragionamento.

5. Una descrizione “più libera” della legge del circuito

“Immaginiamoci un anello omogeneo e della stessa spessore dappertutto, in un luogo nel quale e secondo tutta la sua spessore si sia in qualsivoglia modo prodotta una

medesima tensione elettrica, cioè una disuguaglianza negli stati elettrici di due piani contigui; [...] Se quella tensione è prodotta in un istante brevissimo di tempo, anche l'equilibrio si ristabilirà tosto, se al contrario quella tensione è permanente l'equilibrio non può mai ristabilirsi, ma l'elettricità in virtù della sua forza espansiva insensibilmente ritenuta riconduce in uno spazio di tempo, la cui durata quasi sempre sfugge ai nostri sensi, uno stato prossimo all'equilibrio il quale consiste in ciò che fin che dura il movimento dell'elettricità, non si manifesta in nessun luogo un cambiamento sensibile nello stato elettrico della parte del corpo percorsa dalla corrente. Questo stato particolare è cagionato da ciò che ogni particella del corpo che sta nella sfera d'azione, a ciascun istante riceve da una parte precisamente tanta dell'elettricità in movimento, quanta ne dà poi via dall'altra parte, a cagione di che ne conserva sempre la stessa quantità. Ora poiché in forza del primo principio fondamentale il passaggio dell'elettricità non ha luogo immediatamente che da un elemento a quello contiguo, e siccome la quantità di elettricità che passa è determinata, supposte tutte le altre circostanze uguali, dalla differenza degli stati elettrici dei due elementi, così in tutta la spessezza dell'anello, uniformemente eccitato e costituito in tutte le sue parti ugualmente, quello stato deve manifestarsi con una variazione permanente dello stato elettrico;”

[idem, pp.7 - 8]

“Variazione permanente” ovvero, nel caso più semplice del conduttore omogeneo che unisce i poli del generatore, un rapporto costante fra la variazione delle forze elettroscopiche di due punti del conduttore e la lunghezza del tratto di conduttore compreso fra essi.

Ohm passa ora alla descrizione del “modo di distribuzione dell'elettricità nell'anello”.

Egli rappresenta “l'intensità dell'elettricità”³ con segmenti perpendicolari ad una linea orizzontale (che visualizza l'anello disteso) che puntano verso l'alto (rispetto alla linea orizzontale) quando rappresentano stati positivi dell'elettricità e che puntano verso il basso quando ne rappresentano gli stati negativi (si veda la **figura 3** che riproduce nella sua essenzialità la prima di tre figure riportate da Ohm nel suo Trattato).

3 Ricordiamo che “l'intensità dell'elettricità” indicava a quell'epoca la capacità della corrente di produrre determinati effetti (paragrafo 9.4 del capitolo precedente) e per Ohm indica la nostra tensione ovvero il nostro potenziale elettrico.

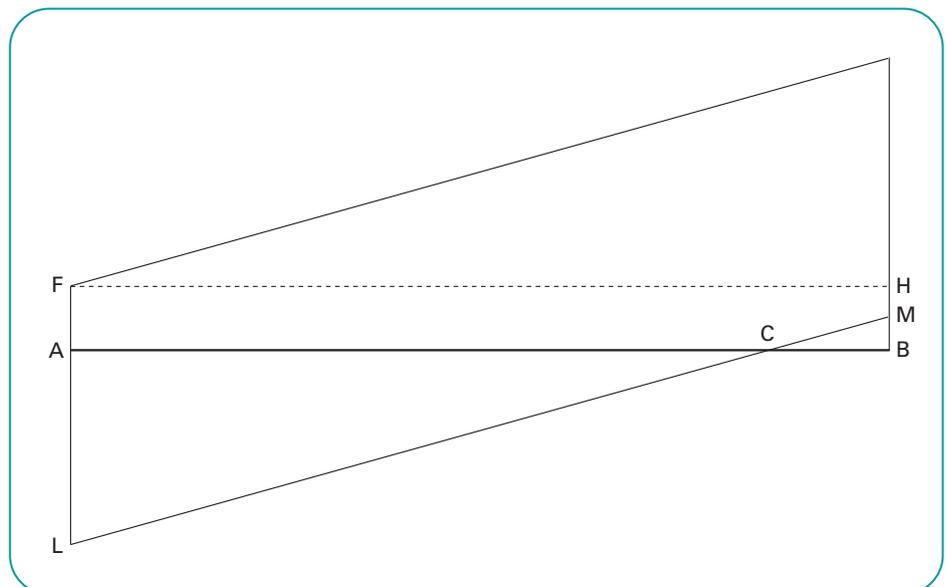


Figura 3

quella della parte AB (ed entrambe costituite del medesimo materiale) l'indipendenza dello stato elettrico dell'anello dal tempo e la precedente condizione della stazionarietà del flusso elettrico richiedono

“... che nello stesso tempo da un elemento all'altro il passaggio elettrico sia nella parte BC 10 volte maggiore che nella parte AB [...] Ma poiché questo passaggio dell'elettricità, 10 volte più grande, da elemento ad elemento, abbia luogo, la differenza elettrica fra elemento ed elemento deve in forza del primo principio fondamentale esser 10 volte più grande nella parte BC che nella parte AB, ossia, volendo riportare questa determinazione nella figura, la linea HJ per parti uguali deve inclinarsi 10 volte più della linea FG cioè deve avere una pendenza 10 volte maggiore.”

[idem, p. 12]

Successivamente egli considera porzioni di circuito di identica sezione ma costituiti da sostanze diverse e quindi dotate di diversa conducibilità γ . Anche in tale caso la diversa attitudine a condurre imporrà una diversa pendenza delle linee FG e HJ e perciò:

“Le pendenze delle linee FG e HJ stanno in ragione inversa della conducibilità delle suddette parti”

[idem, p. 13]

In conclusione:

“In un circuito galvanico composto di un numero qualsivoglia di parti prismatiche eterogenee, si produce, rispetto al suo stato elettrico, in ogni luogo di eccitazione da una parte all'altra un salto subitaneo che costituisce la tensione; ed ha luogo in ciascuna parte da un' estremità all'altra un passaggio successivo ed uniforme d' elettricità; e le pendenze delle linee rappresentanti questo passaggio in ciascuna parte, stanno in ragione inversa dei prodotti delle conducibilità nelle rispettive sezioni trasversali di quelle parti.
Da questa legge si può dedurre facilmente in ciascun caso particolare la figura completa che rappresenta la distribuzione della elettricità, ...”

[idem, p. 14]

4 Per ascissa ridotta si deve intendere quell'ascissa che si ottiene dividendo l'ascissa geometrica per il prodotto sezione per conducibilità relativi a quel tratto. Più in generale, se il circuito è costituito da tre porzioni AB, BC, CD di ascisse geometriche rispettivamente 0 e x_1 , x_1 e x_2 , x_2 e x_3 , le cui sezioni siano ω_1 , ω_2 , ω_3 , e le cui conducibilità siano γ_1 , γ_2 , γ_3 , un punto di ascissa geometrica x compreso fra x_2 e x_3 sarà caratterizzato dalla seguente ascissa ridotta:

$$y = \frac{x_1}{\omega_1 \gamma_1} + \frac{x_2 - x_1}{\omega_2 \gamma_2} + \frac{x - x_2}{\omega_3 \gamma_3} =$$

$$= \lambda_1 + \lambda_2 + \frac{x - x_2}{\omega_3 \gamma_3}$$

Nella determinazione di questa distribuzione, Ohm introduce il concetto di lunghezza ridotta di un tratto omogeneo di circuito. Tale grandezza è assunta come *proporzionale* al rapporto fra la lunghezza del tratto di circuito e il prodotto della sua sezione per la sua conducibilità.

A partire dalla lunghezza ridotta delle singole porzioni del circuito viene poi definita la lunghezza ridotta totale L dell'intero circuito come somma delle lunghezze ridotte parziali. Infine, indicata con A la somma algebrica di tutte le tensioni operanti nell'anello, la “forza elettrica” u in un punto qualunque dell'anello, definita dall' “ascissa ridotta” y^4 risulta data dall'espressione:

$$u = \frac{A}{L} y - O + C \quad [6]$$

ove O indica la somma delle tensioni che stanno a sinistra dell'ascissa ridotta y e C rappresenta una costante arbitraria da definirsi.

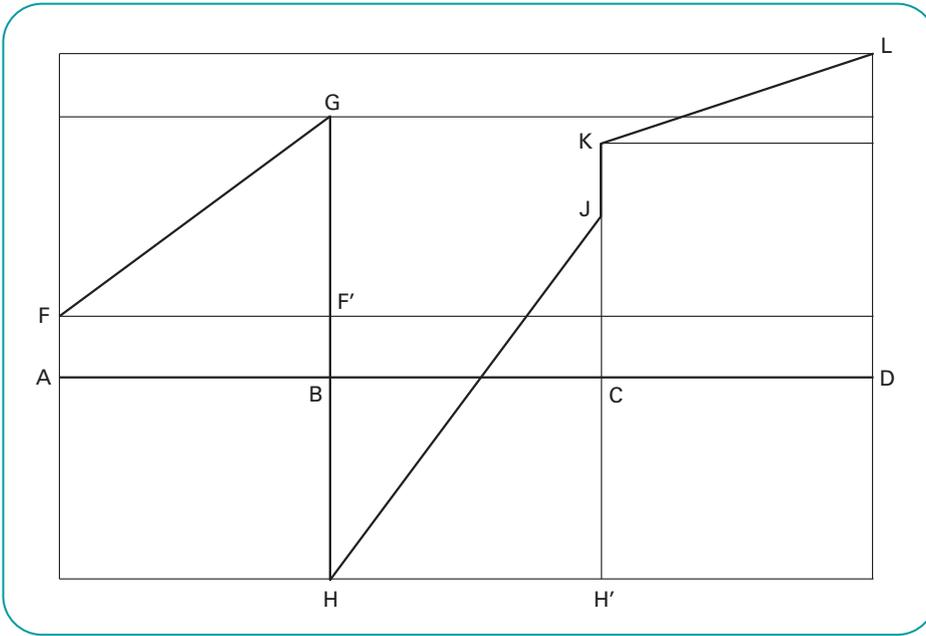


Figura 5

Per rendere più evidenti queste considerazioni Ohm propone l'esame di un terzo circuito contenente tre diversi salti di tensione e tre diversi conduttori descrivibili con tre diverse lunghezze ridotte. La rappresentazione delle "forze elettriche" relative a questo circuito è riportata nella **figura 5** (riproduzione parziale della figura che compare sul trattato).

Stabilita la distribuzione delle forze elettriche dei diversi punti del circuito, Ohm passa ora alla determinazione dell'entità del flusso di corrente che lo percorre, cioè di ciò che oggi denominiamo intensità di corrente e che Ohm denomina invece "grandezza della corrente".

A tale scopo egli riparte da un'asserzione già dimostrata in precedenza secondo la quale la "differenza elettrica degli elementi ricondotta ad una unità invariabile di distanza" è espressa dalla pendenza delle linee che rappresentano lo stato elettrico. Ad esempio, nel caso di **figura 5**, dal rapporto JH'/BC .

Indicata ora con γ la conducibilità della porzione BC di circuito, Ohm assume la "forza del passaggio da elemento a elemento, cioè l'intensità della corrente nella parte BC" pari a $\gamma JH'/BC$ ⁵ e dunque, se ω indica il valore della sezione della parte BC,

“la quantità di elettricità che da una sezione trasversale passa ad un'altra contigua ad ogni istante, ossia la grandezza della corrente sarà espressa da:

$$\gamma \omega \frac{JH'}{BC}$$

[7]”

Nella fase precedente durante la quale Ohm aveva dedotto la formula [6], era stato dimostrato che

$$JH' = \frac{A}{L} \lambda'$$

ove λ' indica una linea di lunghezza direttamente proporzionale alla lunghezza BC e inversamente proporzionale al prodotto $\gamma \omega$.

⁵ Si noti che questa intensità corrisponde alla nostra densità di corrente dato che JH'/BC ($=\Delta V/\Delta l$) corrisponde al campo elettrico.

Quindi, sostituendo nella [7] la grandezza della corrente (per la quale viene usato il simbolo S) viene espressa dalla relazione seguente:

$$S = \frac{A}{L} \gamma \omega \frac{\lambda'}{BC} \quad [8]$$

Fino a questo punto, Ohm ha assunto le λ come semplicemente proporzionali alle quantità del tipo $l/(\gamma \omega)$.

“Se si restringe ora questa supposizione, che lascia indeterminata la grandezza assoluta delle linee $\lambda, \lambda', \lambda''$, ponendo le grandezze di esse non più proporzionali ma uguali ai suddetti quozienti, e se si modifichi di qui innanzi conformemente a questa restrizione il senso dell'espressione lunghezza ridotta...”

[idem, p. 20]

le formule [7] e [8] divengono:

$$S = \frac{\gamma \omega}{BC} JH' = \frac{JH'}{\lambda'} \quad [9]$$

$$S = \frac{A}{L} \frac{\gamma \omega \lambda'}{BC} = \frac{A}{L} \quad [10]$$

Con parole di Ohm, relativamente alla prima delle due formule:

“La grandezza della corrente in una parte qualsiasi omogenea del circuito, viene determinata dal quoziente che si forma dividendo la differenza delle forze elettriche che si trovano alle estremità di quella parte, per la sua lunghezza ridotta.”

[idem, p.21]

e relativamente alla seconda:

“la grandezza della corrente in un circuito galvanico è direttamente proporzionale alla somma di tutte le tensioni del circuito, ed inversamente proporzionale alla lunghezza totale ridotta di esso; ove è mestieri rammentare che per lunghezza ridotta totale si intende la somma di tutti i quozienti formati dividendo la lunghezza reale di ciascuna delle parti omogenee, per il prodotto corrispondente della conducibilità nella sezione rispettiva.”

[idem, p. 21]

6. Una “compatta” deduzione “matematica” della legge del circuito

Questo secondo tipo di deduzione, fondata su considerazioni più matematiche, viene sviluppata da Ohm nella parte del suo lavoro intitolata *Ricerche generali sulla propagazione dell'elettricità* (pp. 45 - 66).

Consapevole del fatto che, a quell'epoca, una legge fondata su “considerazioni teoriche” avrebbe potuto creare diffidenze profonde, Ohm, nelle prime pagine di questa sezione, si premura di precisare e difendere la sua posizione metodologica.

“Onde determinare in che modo dipende la forza elettroscopio dal tempo in cui essa è osservata, e dal luogo in cui si manifesta, dobbiamo partire dalle leggi fondamentali a cui è sottoposto lo scambio delle forze elettroscopiche che ha luogo tra gli elementi di un corpo. Queste leggi fondamentali sono di due sorte; prese dalla esperienza, o dove questa manchi assunte ipoteticamente. L'ammissibilità delle prime non può esser soggetta a nessun dubbio, e la legittimità delle ultime viene provata dalla concordanza dei risultati dei calcoli dedotti da esse, con ciò che in realtà succede; quindi, siccome il calcolo esprime nel modo il più determinato il fenomeno colle sue modificazioni, così deve una osservazione egualmente completa della natura abbattere o giustificare decisamente le ipotesi del calcolo, affinché questo non abbia nel suo progredire ad imbattersi sempre in nuove incertezze. In ciò consiste il merito principale del calcolo, cioè nell'offrire una tal generalità di espressioni in niuna parte ambigue da invitar sempre a nuove esperienze, e quindi nel condurre ad una cognizione più perfetta dei fenomeni della natura. Ogni teoria creata sui fatti di una classe di fenomeni naturali che non regge ad un'esposizione matematica dettagliata è imperfetta, ed è incerta ogni teoria la quale potendo esser sviluppata in tale esatta forma non è quanto si deve comprovata dall'esperienza.”

[idem, pp. 46 - 47]

Le preoccupazioni di Ohm erano tanto più giustificate in quanto egli, nella sua deduzione della legge del circuito, parte da un'ipotesi che si conforma a quella utilizzata da Joseph Fourier (1768-1830) per la deduzione delle leggi sulla conduzione del calore ma si discosta da quella che Pierre Simon Laplace (1749-1827) aveva proposto per descrivere le azioni molecolari e che veniva maggiormente condivisa in quegli anni.

Secondo Laplace, tale azione si sviluppa non solo fra elementi materiali contigui ma anche fra elementi separati (anche se poi doveva ammettere che questo secondo tipo di azione diminuiva così rapidamente da poter essere considerato praticamente nullo anche in corrispondenza di distanze estremamente piccole). La necessità di questo tipo di interazione derivava dal fatto che:

“la supposizione che l'azione immediata si eserciti soltanto tra gli elementi contigui gli dava delle equazioni i cui termini non erano tutti della stessa dimensione relativamente ai differenziali delle variabili, la quale mancanza di omogeneità è assolutamente contraria allo spirito del calcolo differenziale.”

[idem, p.50]

L'ipotesi sulle interazioni fra gli elementi dei corpi materiali che sta alla base dell'interpretazione della conduzione elettrica viene espressa da Ohm nel modo seguente:

“... La quantità di elettricità che in un tempo cortissimo viene trasportata da un elemento all'altro in generale è proporzionale, la distanza essendo invariabile, alla differenza delle forze elettroscopiche degli elementi, alla durata del tempo ed alla grandezza di ciascun elemento.”

[idem, p. 51]

Si noti dunque che la quantità di elettricità che passa da un elemento ad un altro dipende dalle sole forze elettroscopiche dei due elementi e non anche da altri ele-

menti ad essi precedenti o seguenti. Il ruolo di questa ipotesi appare ancora più evidente nella deduzione che inizia poco più avanti (p. 58), ove la variazione della quantità di elettricità contenuta in un certo elemento M di ascissa x viene calcolata considerando la quantità che giunge in M dall'elemento M_1 di ascissa $x - dx$ (e quindi posto alla sua sinistra) e la quantità che da M finisce nell'elemento M' di ascissa $x + dx$ (e quindi posto alla sua destra).

Per esprimere la quantità di carica che dal prisma M' passa al prisma M nel tempo dt , Ohm assume la relazione seguente:

$$\frac{\gamma(u' - u)}{dx} dt \quad [11]$$

ove γ indica il "potere conduttore dal prisma M' al prisma M " e u' , u indicano le forze elettroscopiche dei due prismi M' e M . Analogamente la quantità di elettricità che dal prisma M_1 passa al prisma M , assumendo identico il potere conduttore, è data da

$$\frac{\gamma(u_1 - u)}{dx} dt \quad [12]$$

Un calcolo che coinvolge gli sviluppi in serie di Taylor conduce allora ad esprimere la variazione relativa della quantità di elettricità che si trova nel prisma M e che si produce nel tempo dt nel modo seguente

$$\gamma \frac{d^2 u}{dx^2} dx dt$$

Tenendo conto che γ deve variare proporzionalmente alla sezione ω del conduttore, l'espressione precedente viene riscritta nella forma

$$\gamma \omega \frac{d^2 u}{dx^2} dx dt \quad [13]$$

ove ora γ indica la conducibilità del corpo indipendentemente dalla sua sezione e viene chiamato *conducibilità assoluta*.

Come si può notare, questa deduzione introduce in modo automatico il concetto di lunghezza ridotta che nella prima parte della trattazione sembra avere una origine più sperimentale.

Tenendo anche conto delle possibili dispersioni della carica nell'aria circostante, la [13] viene riscritta nella forma più completa

variazione della carica in M relativa all'intervallo di tempo dt =

$$\gamma \omega \frac{d^2 u}{dx^2} dx dt - b c u dx dt \quad [14]$$

ove $c dx$ indica la superficie dell'elemento cilindrico confinante con l'aria e b un coefficiente dipendente dal suo stato.

Ohm osserva ora che, ammessa l'ipotesi di una proporzionalità diretta fra la variazione della quantità di elettricità contenuta nell'elemento M e la variazione du della sua forza elettroscopica, si può porre anche:

$$\text{variazione della carica in M relativa all'intervallo di tempo } dt = \frac{du}{dt} dt \omega dx$$

Infine, per tenere conto della possibilità, tutta da dimostrare, che la variazione delle forze elettroscopiche sia diversa per una medesima variazione della quantità di carica, riscrive la precedente relazione nella forma generale

$$\omega P \frac{du}{dt} dx dt \quad [15]$$

Dall'uguaglianza fra la (10) e la (11) si ottiene perciò la relazione generale seguente:

$$P \frac{du}{dt} = \gamma \frac{d^2 u}{dx^2} - \frac{b c u}{\omega} \quad [16]$$

Ponendo $P = 0^6$ e $b = 0$, Ohm ottiene la semplice equazione

$$\frac{d^2 u}{dx^2} = 0 \quad [17]$$

il cui integrale generale $u = f x + c$ costituisce il punto di partenza per la deduzione dell'andamento delle forze elettroscopiche nei vari punti del circuito e, in ultima analisi, del regime di corrente del circuito nelle più svariate situazioni.

In particolare, l'espressione dell'integrale generale della [17] corrisponde alla condizione $du/dx = costante$ e quindi deriva da ciò che resta costante il prodotto

$$\gamma \omega \frac{du}{dx} dt$$

che esprime la quantità di elettricità che nel tempo dt passa da un generico elemento prismatico M' all'elemento M posto alla sua sinistra o dall'elemento M all'elemento M_1 posto alla sua sinistra. E' quindi possibile definire una "corrente elettrica" la cui "grandezza" S è data da

$$S = \gamma \omega \frac{du}{dx}$$

“nella quale espressione i valori positivi di S danno a conoscere che la corrente va in direzione contraria a quella delle ascisse, i negativi che essa va nella stessa direzione.”

[idem, p.62]

Le formule che abbiamo riportato nell'ultima parte di questo paragrafo ci consentono di giustificare pienamente l'analogia formale che Ohm individuava

6 Il caso in cui P è diverso da zero viene analizzato da Ohm al punto 23. [pp. 87 - 92]. In tale punto egli deduce una relazione matematica per la variazione di u così definita:

$$u = \frac{a}{2l} x + a S \left(\frac{1}{i \pi} \operatorname{sen} \frac{i(l+x)}{l} \exp \left(\frac{-\gamma' \pi^2 i^2 t}{l^2} \right) \right)$$

nella quale:

- $2l$ indica la lunghezza del circuito;
- a la tensione al luogo di contatto;
- x l'ascissa in corrispondenza della quale si determina u ;
- S il simbolo di sommatoria da 1 a i ;
- i un indice variabile da 1 a i che contrassegna i termini della sommatoria;
- t il tempo trascorso;
- \exp il simbolo di esponenziale.

“Si vede facilmente che il valore del 2° termine a destra dell'equazione trovata per determinare u , diventa sempre più piccolo a misura che cresce il tempo, e che alla fine sparisce totalmente; allora lo stato costante del circuito galvanico ha cominciato.”

[idem, p.91]

nelle modalità di trasferimento dei fluidi elettrico e calorico, analogia dalla quale, come s'è visto nel paragrafo 5.1, egli deduceva quell' "intima connessione tra i due fluidi" che gli dava il diritto di considerarli come identici.

In particolare, ricordiamo che, trattando del trasferimento di calore in un anello chiuso su se stesso nel quale esistano sezioni dotate di temperatura definita e diversa, Fourier esprime la variazione del calore che si produce nell'intervallo di tempo infinitesimo dt in una parte dell'anello con la formula seguente:

$$K S \frac{d^2 v}{dx^2} dx dt - h l v dx dt \quad [\text{Fourier, 1822, p.86}]$$

ove:

- x indica la distanza della parte considerata rispetto ad una prefissata origine O ;
- dx indica lo spessore della parte;
- S la sezione della parte;
- l il perimetro di S , e quindi $l dx$ indica la superficie laterale della porzione che si trova a contatto con l'esterno;
- K la conducibilità termica del materiale di cui è fatto l'anello;
- h un coefficiente di trasmissione del calore verso l'esterno;
- v la temperatura dell'elemento.

Come si vede l'analogia con la formula [14] è totale e si manifesta persino nella sequenza dei simboli utilizzati che hanno significato corrispondente!

7. Applicazioni delle leggi di Ohm

A conclusione della deduzione delle formule che esprimono la grandezza della corrente così osserva Ohm:

“Dall'equazione che determina la grandezza della corrente in un circuito galvanico, insieme a quella trovata precedentemente, dalla quale è data la forza elettrica di ogni punto del circuito, si possono dedurre con facilità e sicurezza tutti i fenomeni appartenenti al circuito galvanico.”

[idem, p.21]

In questo paragrafo vogliamo appunto analizzare alcune delle più interessanti applicazioni che Ohm fa delle sue formule. In questa analisi manterremo rigorosamente l'ordine espositivo che egli utilizza nella parte meno formalizzata del suo lavoro utilizzando ampi stralci del Trattato.

7.1 Corrente e tensione in un circuito aperto

“L'espressione $A/L \cdot (\lambda/l)$, la quale dà la pendenza in una parte qualunque del circuito, diventa nulla quando L è infinitamente grande ed A e (λ/l) conservano dei valori finiti. Dunque se L assume un valore infinitamente grande mentre A resta finita, la pendenza delle linee rette rappresentanti la distribuzione dell'elettricità è nulla in tutte quelle parti del circuito la cui lunghezza ridotta ha un rapporto finito colla lunghezza reale, cioè il che è lo stesso, l'elettricità ha la forza medesima in tutti i punti di ciascuna di tali parti.”

[idem, p.27]

Si tenga presente che, in questa circostanza, il termine “forza” sottintende “forza elettroscopica” e corrisponde dunque al nostro potenziale. La frase precedente traduce quindi, in linguaggio moderno, la costanza della tensione nelle porzioni di un circuito aperto che partono da una delle sorgenti di forza elettromotrice appartenenti al circuito e terminano alla successiva.

Ohm osserva che il caso di L infinitamente grande si realizza ogniqualvolta almeno una parte del circuito possiede conducibilità nulla e quindi quando il circuito contiene un cattivo conduttore. La conclusione è dunque la seguente:

“... quando una parte del circuito è un cattivo conduttore, l'elettricità si propaga su ognuna delle altre parti uniformemente, e varia soltanto da una parte all'altra di tutta la tensione che vi si trova.”

[idem, p.28]

7.2 L'identità della corrente in un circuito

Per quanto implicita in tutta la precedente trattazione, Ohm sente il bisogno di ribadire, anche in questa sezione più applicativa, il concetto fondamentale di tutta la sua teoria.

“... ora passiamo a considerare la corrente che si forma nel circuito e la cui natura come si è mostrato sopra è espressa per ogni suo punto dall'equazione $S = A/L$. Tanto la forma di quest'equazione quanto il modo con cui ci siamo giunti, danno a conoscere che la grandezza della corrente in un tal circuito galvanico resta in tutti i punti la stessa, e dipende soltanto dal modo di distribuzione dell'elettricità, cosicché essa non cambia quand'anche venga cambiata la forza elettrica in un punto qualunque del circuito o toccando questo punto derivatamente o in qualunque altro modo.”

[idem, p. 28-29]

7.3 Espressione della grandezza della corrente in un circuito contenente una resistenza variabile

“... supponiamo che nel circuito galvanico soltanto la lunghezza reale di una parte sia soggetta ad un continuo cambiamento [rimanendo] sempre gli stessi tutti gli altri valori che determinano la grandezza della corrente. Si indichi questa lunghezza variabile con x , e la conducibilità corrispondente della parte con γ , la sua sezione con ω , e la somma delle lunghezze ridotte di tutte le altre parti con Λ , con che sia

$$L = \Lambda + \frac{x}{\gamma \omega}$$

l'equazione generale si muta allora nella seguente

$$S = \frac{A}{\Lambda + x/(\gamma \omega)}$$

ovvero, moltiplicando il numeratore e il denominatore per $\gamma \omega$, e ponendo $\gamma \omega A = a$, e $\gamma \omega L = b$,

$$S = \frac{a}{b + x}$$

dove a e b rappresentano due quantità costanti, e x la lunghezza variabile di una parte del circuito del tutto determinata, per quanto alla sostanza di cui è formata e alla sezione. Questa forma generale [...] è quella stessa che io ho dedotto da esperimenti, che hanno dato origine alla teoria qui sviluppata. La legge che essa esprime relativamente alla lunghezza dei conduttori è essenzialmente diversa da quella che Davy prima, e poi Becquerel in questi ultimi tempi, hanno dedotto dall'esperienza, essa legge si allontana considerevolmente da quella che ha stabilito Barlow, come pure da quella che io aveva in addietro rilevata da altre esperienze, benché le due ultime s'accostino già più al vero. ”

[idem, p. 30]

7.4 Confronto fra circuiti termoelettrici e idroelettrici (voltaici)

“Si vede immediatamente che quando la somma delle tensioni non varia, un cambiamento nell'ordine delle parti del circuito non ha alcuna influenza sulla grandezza della corrente. Questa non varia neppure quando la somma delle tensioni e la lunghezza totale ridotta del circuito variano nello stesso rapporto [...] A questa circostanza deve attribuirsi la differenza caratteristica tra circuito termoelettrico e idroelettrico. In quello non entrano che metalli, in questo entrano inoltre dei liquidi la conducibilità dei quali è straordinariamente tenue in confronto alla conducibilità dei metalli [...] Da ciò viene che per solito la lunghezza ridotta è assai più piccola nei circuiti termoelettrici che nei circuiti idroelettrici, per cui in quelli può esistere una tensione nella stessa proporzione minore, e dar tuttavia una corrente che non la cede in grandezza a quella del circuito idroelettrico. ”

[idem, p. 32 - 33]

7.5 Pile in serie

“Nella pila del Volta si ripete tante volte la somma delle tensioni e la lunghezza ridotta del circuito semplice quante lo indica il numero degli elementi onde essa pila è composta. Si indichi perciò con A la somma di tutte le tensioni nel circuito semplice, con L la di lei lunghezza ridotta, e con η il numero degli elementi della pila composta, evidentemente la grandezza della corrente nella pila chiusa sarà

$$\frac{\eta A}{\eta L}$$

mentre nel circuito semplice chiuso sarà A/L .

Si introduca ora nella pila e nel circuito semplice una nuova parte di lunghezza Λ [di lunghezza ridotta Λ], sulla quale si faccia agire la corrente, allora nel circuito semplice il valore della grandezza della corrente in tal modo cambiata sarà

$$\frac{A}{L + \Lambda}$$

e nella pila voltiana

$$\frac{\eta A}{\eta L + \Lambda} = \frac{A}{L + \Lambda/\eta}$$

d'onde si vede che la corrente riesce più grande nella pila Voltiana che pel circuito semplice, ma che è insensibilmente maggiore finché Λ è assai piccolo in confronto di ηL mentre all'incontro s'accosta tanto più ad esser η volte quella del circuito, quanto più Λ è grande rispetto a ηL ed a fortiori rispetto a L . ”

[idem, p.34]

Facciamo notare che questa descrizione interpreta in modo completo gli esperimenti del tipo di quelli descritti nel paragrafo 7 del Capitolo 1, esperimenti che, lo ricordiamo, avevano portato Becquerel ad introdurre il concetto di velocità della corrente. Nella parte matematica della trattazione (punto 26, pp. 96 - 98) Ohm riprende l'analisi della efficienza delle pile in serie proponendo il problema seguente:

“Come deve essere in ciascun caso particolare disposto un apparecchio galvanico dato acciò produca la massima azione?”

[idem, p. 97]

La risoluzione che Ohm fornisce del quesito posto non ha un carattere del tutto generale ma si riduce a stabilire se data “una determinata quantità di superficie p. es. di rame e zinco della quale si possa fare una gran coppia o più coppie” (identiche fra loro e più piccole) convenga l'una o l'altra realizzazione.

Indicata con Λ la lunghezza ridotta del conduttore nel quale dovrà fluire la corrente, con L la lunghezza ridotta della grande coppia formata con l'intera superficie di rame e di zinco e con A la tensione da essa generata, per la grandezza della corrente prodotta da una serie di x coppie ottenute ritagliando in x parti uguali le due grandi superficie di rame e zinco, Ohm deduce la formula seguente:

$$\frac{x A}{x^2 L + \Lambda}$$

La conclusione di Ohm è perciò la seguente:

“... quest'espressione acquista il suo massimo valore quando

$$x = \sqrt{\frac{\Lambda}{L}}$$

si vede perciò che l'apparecchio è più vantaggioso in forma di circuito semplice [finché] L non è minore di Λ ; per contrario diventa più utile la riunione Voltiana quando L è minore di Λ , e sarà la miglior cosa il comporlo con 2 elementi quando $\Lambda = 4 L$, di 3 elementi quando $\Lambda = 9 L$, e così via discorrendo. ”

[idem, p.98]⁸

7.6 Pile in parallelo

“Oltre a questo modo di aumentar la grandezza della corrente galvanica havvene un altro il quale consiste nel accorciare la lunghezza ridotta del circuito semplice. E

⁷ Il termine $x A$ è facilmente comprensibile, perché deriva dalla somma di x tensioni di valore A ; il termine $x^2 L$ deriva dalla considerazione che se le superfici di partenza sono ritagliate in x parti uguali, ciascuna coppia rame zinco, avendo una superficie x volte più piccola della superficie della grande coppia, avrà una lunghezza ridotta pari a $x L$ e l'insieme delle x coppie in serie avrà perciò lunghezza ridotta $x x L$.

⁸ Si osservi che se $L > \Lambda$, risulta addirittura $x < 1$ e quindi conviene operare senz'altro con un unico elemento di batteria. Se invece Λ è maggiore di L , x diviene maggiore di 1 ma dovendo assumere un valore intero (2,3, ecc.) si dovrà avere $\Lambda/L = 4$, $\Lambda/L = 9$, ecc. da cui, appunto, $\Lambda = 4 L$, $\Lambda = 9 L$, ecc.

ciò può farsi ponendo più circuiti semplici l'uno accanto all'altro, e unendoli in tal modo che essi formino di nuovo un solo circuito semplice.

Ritenendo le precedenti denominazioni, così che

$$\frac{A}{L + \Lambda}$$

esprima la grandezza della corrente in un elemento, allora negli η elementi riuniti la grandezza della corrente sarà

$$\frac{A}{L/\eta + \Lambda} = \frac{\eta A}{L + \eta \Lambda} \gg$$

In effetti "l'accostamento" di più circuiti semplici comporterebbe anche un aumento della sezione del conduttore esterno in cui circola la corrente e quindi questo conduttore dovrebbe assumere la lunghezza ridotta L/η . Ma evidentemente quando Ohm immagina i circuiti semplici "l'uno accanto all'altro" ha in mente un collegamento in cui tutte le coppie voltaiche si chiudono su un unico conduttore di lunghezza ridotta pari ancora a Λ . In tale caso la grandezza della corrente è proprio quella espressa dalla formula appena riportata.

A partire da essa Ohm conclude nel modo seguente:

“... quando Λ è assai grande in confronto di L , si mostrerà un aumento piccolissimo d'azione nella nuova riunione, mentre per contrario si mostra in esso un aumento notevole quando Λ è assai piccolo in confronto di L/η , ed a fortiori di L .”

[idem, p.35]

7.7 Effetti del galvanometro in un circuito

Nel capitolo precedente si è messo in evidenza che l'inserimento del galvanometro in un circuito voltaico creava grossi problemi di interpretazione dei risultati. Vediamo ora come Ohm sia in grado di spiegarli con grande chiarezza.

“Sia A la somma delle tensioni ed L la lunghezza ridotta di un qualsiasi circuito galvanico, A/L esprimerà la grandezza della corrente. Immaginiamoci ora un moltiplicatore formato di η giri uguali ognuno della lunghezza ridotta λ ,

$$\frac{A}{L + \eta \lambda}$$

darà la grandezza della corrente quando si introduce il galvanometro come parte integrante del circuito. Supponiamo ancora per semplicità che ciascuno dei η giri del moltiplicatore eserciti sull'ago calamitato la medesima azione, in questo caso l'azione del moltiplicatore sull'ago calamitato evidentemente è

$$\frac{\eta A}{L + \eta \lambda}$$

Di qui si deduce tosto che col moltiplicatore viene aumentata o diminuita l'azione sull'ago calamitato secondo che ηL è maggiore o minore di $L + \eta \lambda$, vale a dire secondo che in volte la lunghezza ridotta del circuito galvanico senza moltiplicatore è maggiore o minore della lunghezza ridotta col moltiplicatore. ”

[idem, pp. 36 - 37]

Questa frase un po' oscura si deve interpretare ammettendo che la deviazione dell'ago magnetico prodotta dalla corrente fluente nel circuito quando in questo non sia inserito il moltiplicatore, valga A/L . Allora la deviazione dell'ago col moltiplicatore, data da

$$\frac{\eta A}{L + \eta \lambda}$$

sarà maggiore (minore) di A/L se

$$\frac{\eta A}{L + \eta \lambda} > (<) \frac{A}{L}$$

ovvero quando $\eta L > (<) L + \eta \lambda$

7.8 Resistenze in parallelo

Molto interessante quest'ultima applicazione di Ohm perché mette in evidenza che il principio della stazionarietà della corrente l'aveva già condotto ad intuire il primo principio di Kirchoff (o principio dei nodi).

“Supponiamo p.e. che il circuito si divida in tre rami, le cui lunghezze ridotte sieno $\lambda, \lambda', \lambda''$, e che in ciascuno dei luoghi, (ove avviene questa divisione) il circuito indiviso e i singoli rami abbiano una stessa forza elettrica, e che quindi ivi non si trovi veruna tensione; si indichi con α la lunghezza delle forze elettriche che si trovano in questi luoghi,⁹ allora per l'accennata regola la grandezza della corrente nei tre rami sarà rispettivamente

$$\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\alpha}{\lambda'}, \frac{\alpha}{\lambda''}$$

donde segue che le correnti nei tre rami stanno tra loro in ragione inversa delle lunghezze ridotte di essi. Cosicché si troverà ciascuna corrente tostoché sarà nota la somma di tutte tre.

La somma di tutte tre le correnti è evidentemente uguale alla grandezza della corrente in un qualunque altro punto della parte del circuito non diviso, perché altrimenti non avrebbe luogo lo stato costante del circuito che qui sempre si suppone sussistere.

[...] Immaginatoci ora che in luogo dei tre rami separati sia introdotto nel circuito un solo conduttore, la cui lunghezza ridotta sia Λ , il quale non faccia cambiare punto la grandezza della corrente e le tensioni, dovrà in conseguenza delle cose già dette la differenza delle forze elettriche alle due estremità esser ancora α , e quindi

$$\frac{\alpha}{\Lambda} = \frac{\alpha}{\lambda} + \frac{\alpha}{\lambda'} + \frac{\alpha}{\lambda''} \quad \text{ossia} \quad \frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\lambda'} + \frac{1}{\lambda''}$$

la quale equazione serve a trovare Λ . ”

[idem, pp. 39 - 40]

9 Anche qui la frase risulta un po' oscura ma poco più avanti verrà detto chiaramente che α indica “la differenza delle forze elettriche che si manifestano” agli estremi del parallelo.

8. La diffusione delle leggi di Ohm

Il confronto di quanto esposto in questo capitolo con ciò che si è detto nel precedente dovrebbe aver messo in evidenza quanto le leggi di Ohm si differenziassero dalle proposte del contesto teorico ad esse contemporaneo relative al campo

fenomenico della conduzione elettrica. Questa originalità ed altri fattori che abbiamo messo in evidenza nel capitolo 1, determinarono il ritardo con il quale tali leggi furono accettate e applicate. In questo paragrafo che chiude il presente capitolo vogliamo quantificare questo ritardo indicando sinteticamente quali furono i primi lavori, pubblicati sulle riviste scientifiche di area tedesca, inglese, italiana e francese, nei quali è possibile trovare o dichiarazioni di condivisione delle leggi di Ohm o lavori che la spongono e la applicano.

8.1 Nei paesi di lingua tedesca

La lettura degli articoli relativi alla conduzione elettrica pubblicati dopo il 1825 conferma pienamente l'affermazione di Poggendorf del 1839 riportata al termine del paragrafo 7 secondo la quale la teoria di Ohm, ancora a quell'epoca, non aveva trovato il giusto riconoscimento in Germania, mentre in Francia e in Inghilterra era totalmente sconosciuta (nella citazione non si fa alcun cenno all'Italia).

In effetti, dopo la pubblicazione dei tre articoli di Ohm, due sugli *Annalen* (Ohm 1825 a, Ohm 1826) e uno sullo *Schweiggers Journal* (Ohm 1825,b) e dopo la pubblicazione della sua opera principale *Die galvanische Kette* (Ohm 1827), per diversi anni, nessuno sembra interessarsi alle sue teorie, almeno per criticarle e respingerle. L'unica eccezione a questo stato di cose è rappresentata da un corposo lavoro sperimentale di Fechner (Fechner 1831) finalizzato alla verifica delle tesi di Ohm¹⁰ e da un lavoro di Lenz del 1835 (già citato nel paragrafo 8), finalizzato alla determinazione della variazione della conducibilità elettrica di un conduttore in funzione della sua temperatura.

Nel 1837 Poggendorf tenta di promuovere la conoscenza del nuovo modo di trattare il circuito elettrico pubblicando la traduzione di un lavoro di Pouillet (precedentemente comparso in *Compt. Rendus*, vol. IV, p. 267) corredato dalla nota seguente:

“Sebbene i risultati di questo articolo siano in parte solo conferme delle leggi scoperte da Ohm (*Die Galvanische Kette e Schweigg. Journ. Bd. XXXXVI, S: 137*) osservate anche da Fechner (*Maassbestimmungen über die Galvanische Kette*) e prima di Pouillet stesso (*Ann. Bd. XV S.91*), tuttavia non sembra superfluo pubblicare le medesime comunicazioni integrali, dato che esse sono così poco prese in considerazione.”

[Pouillet 1837, p.281]

Gli esiti del tentativo di Poggendorf cominciano a manifestarsi l'anno seguente; infatti, nel primo tomo degli *Annalen* del 1838 troviamo una esposizione di P.S.Munck della teoria della pila secondo le notazioni di Ohm al quale l'autore tributa il seguente riconoscimento:

“Nella sua opera fondamentale *Die galvanische Kette mathematisch bearbeitet*, a partire dalla quale ha inizio una nuova era nella scienza del Galvanismo, il Professor Ohm assume come ipotesi fondamentale...”

[Munck 1838, p.476]

Nessun altro articolo sulle correnti galvaniche pubblicato in quell'anno sugli *Annalen* accenna però esplicitamente alla teoria di Ohm ma nel 1839 gli articoli

¹⁰ Per quanto riguarda la diffusione di questo lavoro, può essere interessante notare che esso, ad esempio, non si trova in alcuna delle biblioteche lombarde.

nei quali la materia trattata viene interpretata alla luce della teoria di Ohm sono già cinque: (Poggendorf 1839), (Lenz 1839 a), (Jacobi 1839), (Lenz 1839 b), (Vorsselman de Heer 1839).

Sottolineiamo il fatto che nell'ultimo lavoro citato la legge di Ohm viene assunta addirittura come *paradigma* per confermare la bontà di una formula teorica dedotta in precedenza da Riess (si veda la pag 293 di quel lavoro).

8.2 In Inghilterra

Nella letteratura inglese il silenzio sulle leggi di Ohm viene spezzato solo nel 1842, anno in cui Daniell chiede all'editore dei *Philosophical Transactions* il permesso di poter ritornare su questioni da lui già affrontate in precedenza che, però, trovano una nuova interpretazione alla luce delle leggi di Ohm.

“Devo chiedervi il permesso di scrivervi ancora sul tema delle combinazioni voltaiche. A ciò sono stato spinto da svariate considerazioni. In primo luogo, la bellissima legge di Ohm e la semplice espressione che egli ha fornito della forza elettromotrice e delle resistenze di un circuito voltaico, mi permettono di rivedere con vantaggio, e di correggere, molte delle conclusioni che avevo derivato dai miei precedenti esperimenti; esse hanno anche suggerito esperimenti ulteriori i cui risultati consentono, mi auguro, di rimuovere alcune oscurità ed ambiguità che erano rimaste nelle mie precedenti comunicazioni.”

[Daniell 1842, p.137]

L'anno successivo, sulla stessa rivista, compare un lavoro di Wheatstone il quale inizia con l'affermazione seguente:

“Poichè gli strumenti e i fenomeni che sto per descrivere sono tutti basati sui principi stabiliti da Ohm nella sua teoria del circuito voltaico, e poichè questa bella e comprensiva teoria non è ancora stata generalmente capita e accettata, persino da molte persone impegnate in ricerche originali, difficilmente posso sperare di rendere comprensibili le mie descrizioni e le mie spiegazioni senza premettere ad essi un breve resoconto dei principali risultati che sono stati dedotti da essa. Apparirà subito come le chiare idee di forza elettromotrice e resistenza, in sostituzione delle vaghe nozioni di intensità e quantità che hanno prevalso fino ad oggi, ci permettano di dare spiegazioni soddisfacenti dei più importanti fenomeni le cui leggi sono state fin qui avvolte nell'oscurità e nel dubbio.”

[Wheatstone, 1843, pp. 303-304]

8.3 In Italia

La conoscenza della teoria di Ohm si diffonde in Italia a partire dal 1843. Riferimenti espliciti ad essa compaiono in un lavoro di Botto pubblicato nelle *Mémoires de l'Académie des Sciences de Turin* e in un lavoro di Matteucci pubblicato nelle *Miscellanee*.

Nel primo (Botto, 1843) la teoria di Ohm viene utilizzata per interpretare l'azione magnetica della corrente. Il secondo (Matteucci, 1843) è una sintesi molto efficace del nucleo essenziale della teoria di Ohm, alleggerita da quelle complessità for-

mali che all'epoca avrebbero potuto creare diffidenza, se non addirittura difficoltà di lettura, nella gran parte dei fisici italiani, essenzialmente sperimentali.

Abbiamo già detto che, nello stesso anno e nella stessa rivista, Pacinotti aveva avanzato una critica all'ipotesi ohmica della dipendenza fra la resistenza del conduttore e la sua lunghezza ma altri articoli che, in qualche misura, fanno riferimento alla teoria di Ohm compaiono nel 1844, nella neonata rivista *Il Cimento* (Matteucci, 1844,a) (Matteucci, 1844,b).

A partire dal 1845, sempre nella stessa rivista, compare poi la traduzione di una parte del trattato di Ohm, completata nel 1846, sotto il titolo *Teoria matematica del circuito galvanico*. Gli esiti di questa diffusione non furono particolarmente significativi se, ad esempio, ancora nel 1862, possiamo trovare un lavoro di Marianini sulla natura dell'elettricità (Marianini, 1862-66) nel quale si tratta di correnti che si propagano in conduttori disposti in parallelo senza accennare minimamente alla teoria di Ohm; tuttavia vorremmo almeno segnalare, relativamente al 1846, un bell'articolo di Botto sulle leggi del calore sviluppato dalla corrente (Botto, 1846) nel quale si evidenzia un perfetto dominio della teoria di Ohm e, relativamente al 1847, un lavoro di L. Ridolfi caratterizzato da una notevole trattazione matematica mediante la quale vengono sviluppate alcune precedenti ricerche di Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) sulla propagazione della corrente in corpi diversi dal conduttore cilindrico o prismatico (Ridolfi, 1847).

8.4 In Francia

A giudicare da quanto compare sugli *Annales*, gli ultimi ad accettare le leggi di Ohm in Europa furono sicuramente i francesi.

Abbiamo già detto in precedenza che la descrizione matematica che Pouillet fornisce delle sue ricerche sperimentali sulla conducibilità dei fili metallici ha non pochi punti di somiglianza con le ipotesi di Ohm, eppure questo lavoro rappresenta un messaggio sostanzialmente isolato nella letteratura scientifica francese relativa alla conduzione. In proposito, può essere interessante notare che, nella edizione del 1835 del suo *Traité experimental de l'électricité* (Vol.III), Becquerel riporta i risultati e le interpretazioni di Pouillet sulla conducibilità dei conduttori in termini piuttosto distaccati limitandosi a riportare stralci del testo di Pouillet.

Nel 1837 inoltre troviamo una sintetica esposizione delle ipotesi di Pouillet e di Ohm nel Vol.V (Cap.VI, pp.255 e seguenti) del *Traité de l'électricité et du magnétisme* dello stesso Becquerel. Ciononostante il primo riferimento alle leggi di Ohm che ho individuato negli *Annales* risale addirittura al 1847 e si presenta in questi termini:

“Non voglio terminare questo soggetto [il problema della resistenza incontrata dalla corrente nel passaggio da un conduttore ad un altro] senza dire qualche parola sull'introduzione dei termini che rappresentano la resistenza al passaggio, nella formula di Ohm sulle pile voltaiche. Io credo che questa formula, qualunque sia la legge della resistenza al passaggio, è sempre l'espressione dell'intensità di corrente nella pila voltaica; perché l'eguaglianza

$$i = \frac{\Sigma E}{\Sigma R}$$

nella quale l'intensità di corrente i è uguale al rapporto della somma delle forze elettriche [...] rispetto alla somma delle resistenze, contiene tutte le resistenze [...]

[Becquerel 1847, p.79]

La posizione di Becquerel non sembra certo quella di chi condivide in modo entusiastico la teoria di Ohm e la sua posizione doveva essere condivisa appieno in Francia se, nel successivo articolo degli *Annales* nel quale si fa riferimento alle leggi di Ohm, così si legge:

“Del resto la legge di Ohm e Pouillet è così generalmente accettata dai fisici, essa ha fatto fare un così grande passo alla scienza, essa sembra rendere così bene conto dei fenomeni della pila, che sono necessarie prove ben evidenti per contraddirla o anche per modificarla. Mi sembra d' altra parte che la sua fortuna è stata fondata più sul bisogno che ciascuno prova nel mettere un po' d'ordine nel caos dei fatti elettrici piuttosto che su dimostrazioni rigorose.”

[Davy M. 1848, p.263]

L'accettazione dei fisici francesi diverrà convinta e, probabilmente, unanime a partire dagli anni cinquanta, come testimoniato dalla rapida sequenza di traduzioni dei lavori di Kirchhoff e Friedrich Wilhelm Georg Kohlrausch (1840-1910) sui circuiti elettrici, fondati tutti sulle leggi di Ohm.

Considerazioni conclusive

Quando si parla di filosofia della scienza, la mente corre immediatamente ai grandi personaggi e ai grandi “casi” della storia della fisica: Galileo, Newton, il dibattito sui modelli della luce, la nascita del concetto di campo, la fisica dei quanti, ecc. Non c'è nulla da eccepire in ciò, perché queste analisi consentono di far emergere tutte le questioni fondamentali della epistemologia scientifica. Tuttavia, forse, la costante attenzione a questi grandi casi scientifici ha un poco oscurato l'importanza di altri casi, fra i quali mi sembra di dover appunto collocare il dibattito sulla legge della conduzione elettrica.

Mentre approfondivo via via questo universo scientifico delle prime quattro decenni dell'ottocento, ritrovavo infatti tutte le problematiche che emergono dall'analisi dell'opera dei “grandi” ma con un taglio forse più realistico in quanto proprie di una scienza più “normale” non ancora idealizzata dalle indagini dei filosofi della scienza. Nei dibattiti sulla conduzione troviamo insomma non solo la fisica e il metodo del “genio” ma la fisica e il metodo di lavoro di chi porta avanti la ricerca per piccoli passi con una metodologia che, in molti casi, ha ben poco a che vedere con le “regulae philosophandi” proposte (e non sempre osservate!) da Newton.

E, infatti, si apprende che per i più non basta dire che una forza elettromotrice è semplicemente l'effetto di due diversi stati di tensione in un punto del circuito ma si deve saper specificare con quale congegno la si produce e come opera quel congegno, perché sistemi diversi o anche solo principi generatori diversi potrebbero dare luogo a flussi di elettricità descrivibili con leggi diverse. Analogamente, quando si parla di corrente di elettricità si deve saper precisare la sua natura fisica; da qui il dibattito serrato sul monofluidismo, sul bifluidismo, sul confinamento molecolare dell'elettricità.

E ancora, per i più la ricerca fisica è essenzialmente fatta di esperienze dai cui esiti soltanto potrà scaturire la legge. Questa idea metodologicamente scorretta spiega perfettamente l'enorme mole di dati sperimentali relativi alla conduzione che si accumularono nella prime decenni dell'ottocento; dati che rimasero però scoordi-

nati e spesso del tutto inspiegati fino all'intuizione di un'ipotesi capace di inquadrarli in un sol colpo, mostrandone la sostanziale identità del principio teorico ad essi sottostante. Con grande evidenza dunque il "caso della conduzione", che potremmo anche definire il "caso di Ohm" mostra che dall'esperienza *non* scaturisce la legge e che uno strumento diviene tale solo quando una teoria adeguata è in grado di dichiararne potenzialità e limiti e, soprattutto, di stabilire esattamente quale grandezza esso è in grado di misurare.

Certamente la ricerca sulla conduzione elettrica dei metalli può apparire meno importante e ben più circoscritta (insomma, meno nobile e meno degna di essere sviluppata) della ricerca sul moto dei cieli o sull'interazione elettromagnetica o sul modello ondulatorio della luce e proprio perciò la storia della fisica ha posto Ohm ad un livello più basso di Newton, Ampère, Faraday e Fresnel ma, probabilmente, nel far ciò si è sottovalutata l'originalità del lavoro di Ohm, accerchiato da un contesto che sostanzialmente negava le sue intuizioni e si è sottovalutata la portata teorica e tecnologica di ciò che emerse da una corretta conoscenza di base del circuito elettrico.

Sicuramente Ohm ebbe il torto di non aver avuto la forza di sviluppare le sue intuizioni originarie lasciando ad altri il compito di applicarle all'analisi dei circuiti ma questa posizione di rinuncia diviene perfettamente comprensibile quando si tenga conto del silenzio, o addirittura dell'ostilità, che circondarono il suo lavoro (i primi riconoscimenti ufficiali giunsero solo quindici anni dopo la pubblicazione del suo Trattato sulla conduzione e ad Ohm fu assegnata una cattedra di Fisica presso l'Università di Monaco solo nel 1852, cioè a meno di due anni dalla sua morte ¹¹).

¹¹ Una dettagliata biografia scientifica di Ohm, scritta da K. L. Caneva, è riportata in *Dictionary of scientific biography*.

Testi

La traduzione dei due articoli che seguono è stata effettuata dal Prof. Alberto Vanchieri e rivista, da un punto di vista strettamente tecnico, dall'autore di questo volume, che ha tradotto anche le note del secondo articolo.

Georg Simon Ohm

Comunicazione provvisoria della legge secondo la quale i metalli conducono l'elettricità di contatto

[Schweiggers Journal für Chemie und Physik, vol. 44, pag. 110-118, 1825]

Spinto da varie osservazioni ho fatto accurati e ripetuti esperimenti sulla conduzione dell'elettricità di contatto nei metalli e ho ottenuto risultati che mi sento tanto più spinto a comunicare rapidamente quanto più la mancanza di tempo libero non mi permette di portare a termine queste ricerche in tempi brevi. Spero di rendere un servizio al pubblico interessato indicando ovunque la ragione che mi spinse a fare una nuova serie di esperimenti.

Per gli esperimenti ho utilizzato un truogolo di rame-zinco di tredici pollici di altezza e sedici pollici di lunghezza. Dalla parte in zinco partiva un filo *A* che finiva in un contenitore *M* contenente del mercurio e dalla parte in rame un filo *B* in un contenitore *N*, anch'esso contenente mercurio; inoltre un terzo filo *C* congiungeva il contenitore *M* ad un terzo contenitore *O*. Per brevità chiamerò i fili *A, B, C* presi assieme *il conduttore fisso*. Oltre a questi avevo a disposizione altri sei conduttori *o, a, b, c, d, e* le cui lunghezze erano rispettivamente di $1/3$, 1, 3, 6, 10 $1/3$, 23 piedi e che servivano a collegare tra loro i contenitori *N* ed *O* e quindi a chiudere il circuito, li chiamerò *conduttori variabili*. Questi conduttori variabili avevano un diametro di 0,3 linee [1 linea è pari a $1/12$ di pollice ovvero a circa 2 mm; n. d. t.], ad eccezione di *o* che era molto spesso. Sulla parte *C* del conduttore fisso era appeso un ago magnetico all'interno di una bilancia di torsione coulombiana di particolare costruzione che serviva come riferimento per le misurazioni della forza.

Prima serie di esperimenti

Il conduttore fisso aveva una lunghezza di quattro piedi e un diametro di una linea e un quarto. I conduttori variabili vennero usati nel seguente ordine: *o, a, o, b, o, c, o, d, o, e, o* e ogni volta venne misurata la forza esercitata dal conduttore fisso sull'ago magnetico. Da numerose serie di tali esperimenti risultarono i seguenti valori medi per la perdita di forza che aveva luogo quando uno dei conduttori variabili chiudeva il circuito.

Conduttore	<i>o</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
Perdita di forza osservata	0,00	0,12	0,25	0,35	0,43	0,58

La serie di valori assume come unità di misura la forza esercitata dal conduttore o , che chiamerò *forza normale*. Questa forza normale corrispondeva a 150 divisioni sulla scala della bilancia di torsione, cento delle quali corrispondevano a un giro completo.

Questa serie di valori si lascia esprimere in modo assai soddisfacente dalla formula $v = 0,41 \cdot \log(1 + x)$ dove v indica la perdita di forza e x la lunghezza del conduttore variabile espressa in piedi. Da questa formula si ottiene mediante calcolo:

Conduttore	o	a	b	c	d	e
Perdita di forza calcolata	0,00	0,12	0,25	0,35	0,43	0,57

Per convincermi che questo accordo non fosse dovuto al caso, costruii un nuovo conduttore variabile f della lunghezza di 75 piedi. L'osservazione portò ai seguenti valori per la perdita di forza

- 0,78 per una forza normale di 168 divisioni
- 0,75 per una forza normale di 130 divisioni.

Il calcolo fornisce per questa perdita di forza il valore di 0,77 in corrispondenza di una forza normale di 150 divisioni.

Seconda serie di esperimenti

Se si differenzia l'equazione

$$v = 0,41 \cdot \log(1 + x)$$

si ottiene

$$dv = m \frac{dx}{1 + x}$$

Questa forma dell'equazione differenziale mi portò all'idea che forse la sua forma generale poteva essere

$$dv = m \frac{dx}{a + x}$$

con a dipendente dalla lunghezza del conduttore fisso; poiché quest'ultimo, lungo 4 piedi, aveva uno spessore di una linea e un quarto, era possibile che proprio con questa lunghezza si riuscisse a ottenere l'equilibrio con il filo di un piede di lunghezza e di 0,3 linee di spessore. Se questa supposizione è confermata, la formula sopra si trasforma nella seguente:

$$v = m \cdot \log\left(1 + \frac{x}{a}\right)$$

Per essere sicuro di questo fatto sostituii al posto delle parti A e B del conduttore fisso, che insieme misuravano due piedi e mezzo, due altre parti della stessa lunghezza e dello spessore di 0.3 linee. Gli esperimenti realizzati in questo modo diedero, con una forza normale di 133 divisioni

Conduttore	o	a	b	c	d	e	f
Perdita di forza osservata	0,00	0,07	0,16	0,24	0,32	0,49	0,75

Siccome però rimaneva un piede e mezzo di filo spesso al quale si aggiungevano due piedi e mezzo di filo sottile, si sarebbero dovuti mettere per i due insieme 2,9 piedi di filo sottile (questo varrebbe se, secondo la supposizione fatta prima, a quattro piedi di filo spesso corrispondesse un piede di filo sottile). Se si calcola ora v dalla precedente formula, sostituendo i valori $a = 2,9$ e $m = 0,525$, si ottiene

Conduttore	o	a	b	c	d	e	f
Perdita di forza calcolata	0,00	0,07	0,16	0,25	0,34	0,50	0,75

e si vede facilmente che il valore di m , che è stato derivato soltanto dalla perdita di forza del conduttore f , avrebbe potuto adeguarsi ancora meglio alle osservazioni. Daltronde è da notare che i valori qui osservati sono stati derivati da una sola serie di misure.

Terza serie di esperimenti

Nel frattempo avevo raggiunto un buon grado di sicurezza in esperimenti di questo tipo e avevo cominciato a fare attenzione ad una circostanza che era in grado di portare ad un errore di due o più divisioni in ciascuna osservazione alla bilancia di torsione e della quale non avevo tenuto conto nei precedenti esperimenti, non essendomi allora ancora nota. Questa circostanza consiste nel seguente fatto, di per se sorprendente. Quando nel circuito viene sostituito al conduttore o un'altro fra quelli variabili, è necessario più di mezzo minuto di tempo prima che l'azione sull'ago magnetico abbia raggiunto il suo massimo, tempo che è necessario lasciar passare se non si vuol registrare un valore troppo piccolo. Viceversa, quando poi si reintroduce il conduttore o nel circuito, in un primo momento l'azione sull'ago magnetico risulta troppo grande e si deve attendere il suo valore minimo per avere una misura sicura.

Così preparato decisi di fare, come verifica della legge trovata, una nuova serie di esperimenti consistente, per ciascun conduttore, di solo due osservazioni, che risultarono in ottimo accordo tra di loro. Misi al posto della parte C del conduttore fisso due piedi di filo spesso 0,3 linee in modo tale che complessivamente il conduttore fisso consisteva ora di un filo di un solo tipo lungo 4,5 piedi, del quale erano fatti i conduttori variabili da a fino a f . Il risultato di questi esperimenti fu il seguente:

Conduttore	o	a	b	c	d	e	f
Perdita di forza osservata	0,00	0,04	0,10	0,16	0,23	0,36	0,56

Se si sostituisce nella formula scritta sopra $a = 4,5$, come deve essere in questo caso, e si sceglie per m il valore 0,452, così come viene dato dall'ultima indicazione, si trova

Conduttore	o	a	b	c	d	e	f
Perdita di forza calcolata	0,000	0,039	0,100	0,166	0,234	0,355	0,56

Questo accordo fra valori calcolati e quelli osservati è da considerarsi perfetto, tanto più che in questi esperimenti la forza normale alla bilancia di torsione resta-

va sempre compresa tra 44 e 43 divisioni e io non potevo prendere in considerazione intervalli più piccoli di mezza divisione.

Dopo questi esperimenti considero la legge

$$v = m \cdot \log \left(1 + \frac{x}{a} \right)$$

come sufficientemente confermata dall'esperienza. Il fatto che per $x = -a$ risulti $v = -$ non contraddice in alcun modo la nostra idea corrente della natura della forza galvanica. Questo basta a spiegare sia l'effetto sorprendentemente marcato dell'apparato a incandescenza studiato da Wollaston, sia l'effetto così intenso dell'apparato elettromagnetico costruito seguendo il progetto di Gilbert; inoltre spiega perché nel moltiplicatore di Schweigger a un certo punto l'aumento degli avvolgimenti non contribuisca più alla intensità dell'effetto; e c'è da aggiungere che attraverso la continua moltiplicazione dei giri l'effetto deve di nuovo diminuire per sparire, alla fine, completamente. Tutto ciò promette finalmente una più profonda comprensione della natura del termomagnetismo. Il coefficiente m è una funzione della forza normale, dello spessore del conduttore, del valore di a e, come ho motivo di credere, della tensione elettrica della forza. In questo momento sto ancora cercando di giustificare con degli esperimenti più precisi la natura di questa funzione. Per attirare già adesso l'attenzione dei ricercatori su questo punto riporto ancora la seguente osservazione. Il circuito era chiuso con il conduttore f e nel truogolo era stato versato dell'acido solforico diluito come lo si usa negli esperimenti sull'elettromagnetismo; la bilancia di torsione indicava 50 divisioni, l'ago retrocedeva in modo continuo ma estremamente lento e dopo più di un quarto d'ora, quando l'effervescenza era quasi smessa del tutto, la bilancia di torsione indicava 45 con una forza normale di 447 divisioni. Da esperimenti precedenti sapevo però che con un truogolo così riempito la forza normale era ancora di 1300 divisioni dopo che erano passati 12 minuti e l'effervescenza era già diminuita. Questo conduttore è quindi capace di riportare la forza normale a molto meno della sua ventiseiesima parte. *Gli effetti di conduttori su altri conduttori che si trovano nello stesso circuito possono essere facilmente ridotti con tali ostacoli fino a mille volte.*

Postfazione

Uno studio più approfondito dell'aumento e della diminuzione della forza con un diverso conduttore intermedio nel circuito elettrico ha dato i seguenti risultati:

- 1) La forza elettrica raggiunge il massimo con ogni conduttore subito dopo la chiusura del circuito, diminuisce quindi poco a poco e raggiunge infine, quando si consideri invariato il fluido conduttore, un valore minimo. Il circuito raggiunge la precedente forza in seguito ad una sua apertura prolungata.
- 2) La differenza tra il valore iniziale della forza e tale valore minimo è proporzionalmente più piccola con il conduttore più lungo che con quello più corto. (Si intende che lo spessore è da considerare costante); perciò la forza cresce poco a poco e sembra raggiungere un massimo quando un conduttore più lungo viene introdotto nel circuito subito dopo quello più corto.

Dopo aver riconosciuto la natura di questo fenomeno e dopo averne determinato l'entità in vari casi, non esitai più nemmeno un momento a cercare in questo fatto la ragione per la quale l'effetto dell'apparato a incandescenza di Wollaston può

essere ricreato più volte anche dopo che quest'ultimo è sparito, esponendo l'apparato per un breve tempo all'aria. Trovai un'altra conferma di ciò nel modo seguente: tagliai quella parte della striscia di rame attaccata allo zinco che oltrepassava quest'ultimo e collegai le due parti con una striscia di avorio che interrompeva il circuito. Su ognuna di queste parti avvitali una ciotolina di ottone riempita di mercurio e le ricollegai con un arco fatto di filo di ottone, in modo da completare in tal modo il circuito. Posi l'apparecchio così modificato in acido solforico diluito e, quando il filo di platino non era più incandescente, senza togliere l'apparato dal liquido, rimossi il filo di ottone dalle ciotoline per poi rimettervelo dopo breve tempo. Il filo di platino ridiventò incandescente e io potevo rinnovare molte volte questo effetto. Quando però con tale procedimento non si poteva più creare nessuna incandescenza, non serviva nemmeno il fatto di togliere l'apparato dal liquido per poi rimettervelo.

Georg Simon Ohm

Determinazione della legge secondo la quale i metalli conducono l'elettricità di contatto, insieme ad un abbozzo di una teoria dell'apparato di Volta e del moltiplicatore di Schweigger

[Schweiggers Journal für Chemie und Physik., tomo 46, pag. 137-166, 1826]

Nell'ultimo anno ho fatto su questo giornale (tomo 44 pag. 110-118) una comunicazione provvisoria della legge secondo la quale i metalli conducono l'elettricità e ho riferito di numerose serie di esperimenti che erano stati approntati con tutta la cura e la precisione che l'argomento meritava e rendeva possibile. Quasi contemporaneamente ci sono giunte dall'estero delle comunicazioni sullo stesso argomento da parte di due sperimentatori di grande fama, BARLOW e BECQUEREL, nelle quali si evidenziava il fatto che i risultati di questi due scienziati differivano notevolmente sia tra di loro sia con la legge da me scoperta attraverso i miei esperimenti, nella parte riguardante l'influsso della lunghezza del filo conduttore. Nelle mie ultime ricerche ho costantemente tenuti presenti i loro lavori, per quanto mi erano noti, e così sono giunto alla conclusione che né le leggi formulate da questi ricercatori sulla lunghezza del conduttore, né quella annunciata da me sarebbero generali e libere dall'influsso di forze che nulla hanno a che vedere con l'argomento oggetto di studio. In cambio spero di essere ora nelle condizioni di riconciliare le tesi l'una con l'altra e di enunciare una legge che si proclama come pura legge della natura sia per il perfetto accordo con esperimenti condotti in tutte le direzioni, sia in particolare grazie per l'unità che risulta da tutte le esperienze che riguardano la corrente elettrica; una unità che si scorge soltanto seguendo la verità.

Questa legge è estesa però solamente alla conduzione dell'elettricità nei metalli e non prende in considerazione la funzione del conduttore liquido nel circuito galvanico. Non considero ancora conclusi i miei esperimenti sull'influenza dei liquidi sulla circolazione della corrente elettrica, sebbene poco a poco diventino sempre più chiari; proprio per questo fatto devo accontentarmi per il momento di pre-

sentare solo a grandi linee i risultati che già ho ottenuto in modo chiaro e mi riservo la possibilità di fornire in un secondo tempo una teoria più particolareggiata del circuito elettrico, elaborata sul piano matematico e comprendente al tempo stesso al suo interno gli aspetti elettroscopici e chimici. Gli ostacoli che il mio ruolo di insegnante liceale creano in misura straordinaria a ogni lavoro approfondito potranno scusarmi del fatto che quel trattato seguirà a questa comunicazione dopo un lasso di tempo più ampio di quanto sembri necessario.

Per evitare inutili ripetizioni riprendo da dove finisce la comunicazione citata all'inizio e perciò prego il lettore di volerla tenere presente.

Il persistente fluire della forza (a.a. O. S. 116) che ha luogo all'apertura e alla chiusura del circuito, o in occasione dello scambio di quei conduttori che, come elementi per la chiusura del circuito, hanno valori differenti della conducibilità, rende gli esperimenti oltre modo difficili. Per dare una idea delle dimensioni e della durata di queste fluttuazioni, non sarà superfluo riportare i risultati di alcuni degli esperimenti che io ho fatto ripetutamente per determinarne la natura.

Il circuito venne chiuso con il conduttore *o* e la posizione dell'ago osservata ogni 5 minuti. Uno dopo l'altro risultarono i seguenti valori: 180, 135, 125 $\frac{1}{2}$, 119 $\frac{1}{2}$, 115, 111 $\frac{3}{4}$, 109 $\frac{1}{2}$, 107 $\frac{3}{4}$, 106 $\frac{3}{4}$, 105 $\frac{3}{4}$, 105, 104 $\frac{1}{2}$, un'ora più tardi 100 $\frac{1}{2}$ così che dunque in tutto erano passate 2 ore e 5 minuti. Dopo pochi minuti, durante i quali il circuito rimase aperto, l'ago, che era stato portato il più rapidamente possibile nella linea visuale in posizione di riposo (cosa che può essere realizzata rapidamente con un po' di esercizio mediante una rotazione di verso opposto a quella della sua oscillazione), segnò nuovamente per un certo periodo più di 180 divisioni della scala. Il circuito venne nuovamente aperto e l'ago costretto a rimanere nella linea visuale mediante un ostacolo collocato sul lato; dopo di ciò il disco venne collocato sul valore 500 e il circuito chiuso con il conduttore *o* - si vide allora l'ago collocarsi per più secondi sul lato opposto, dove allo stesso modo, ad una certa distanza, era stato posto un secondo ostacolo¹. Già con il conduttore da 75 piedi questa fluttuazione della forza non aveva più un valore significativo. Per quanto ne so c'è solo un modo per rendere questa fluttuazione della forza abbastanza inoffensiva e consiste nel tenere il circuito chiuso per un certo tempo prima dell'inizio dell'esperimento e nel non aprirlo mai durante la sua esecuzione, vale a dire nel chiudere il circuito con il successivo conduttore prima di estrarre il precedente. Questa difficoltà è trascurabile in esperimenti nei quali vengono introdotti alternativamente nel circuito conduttori con all'incirca lo stesso valore della conducibilità, sempre che vengano osservate le misure precauzionali appena menzionate. Tali esperimenti permettono un alto grado di precisione.

In questo modo determinai la conducibilità di diversi metalli. Presi dei fili cilindrici tutti dello stesso diametro e di diversi materiali e li introdussi uno dopo l'altro nel circuito, sempre confrontandoli a coppie; e accorciai ogni volta quello che riduceva maggiormente la forza fino a che non aveva raggiunto all'incirca la stessa conducibilità dell'altro. L'ideale è prendere la media di due misure vicine, delle quali una è troppo alta e l'altra troppo bassa. Così giunsi ai seguenti valori per la lunghezza di diversi metalli che possiedono la stessa conducibilità:

Rame 1000, *oro* 574, *argento* 356, *zinco* 333, *ottone* 280, *ferro* 174, *platino* 171, *stagno* 168, *piombo* 97.

Quando l'anno scorso eseguii questi esperimenti, li ripetei alcune volte in differenti condizioni e ottenni con differenze assai trascurabili costantemente gli stessi risultati; da allora ho però fatto esperienze che mi spingono a diffidare in affermazioni di questo tipo. Quando, infatti, circa mezzo anno dopo, volli ripetere gli

¹ Non ci si deve quindi meravigliare se togliendo l'apparato a incandescenza di Wollaston per breve tempo dal liquido il filo già spento diviene nuovamente incandescente.

stessi esperimenti iniziando con rame, oro e argento, l'argento, con mio stupore, superò in modo deciso il rame. Fortunatamente possedevo ancora il pezzo di filo d'argento con il quale avevo eseguito i miei primi esperimenti e vidi che questo si collocava nella sequenza nella sua vecchia posizione. Entrambi i fili erano di hornsilber ed erano perciò della stessa purezza e non si distinguevano l'uno dall'altro in nulla se non per il fatto che la superficie del più recente era pulita con cura, mentre quella del più vecchio era ricoperta da un velo d'olio che si era depositato durante la produzione di tale filo. Questa circostanza mi indusse a interrompere provvisoriamente i miei esperimenti. Li avrei voluti riprendere utilizzando l'apparato descritto nel seguito, che dà risultati estremamente sicuri, ma mi mancavano i metalli nella quantità richiesta allo scopo. Spero più avanti di poter ritornare su questo punto.

Successivamente presi due fili tutti dello stesso materiale, ma con diverso spessore, tra 0,12 e 1,40 linee e procedetti con questi esattamente come nel caso della determinazione della conducibilità dei metalli. Risultò così la seguente legge: *conduttori cilindrici dello stesso tipo e con differente diametro hanno lo stesso valore della conducibilità se le loro lunghezze stanno in rapporto come le loro sezioni*. Anche Barlow e Becquerel furono condotti dai loro esperimenti a questa legge.

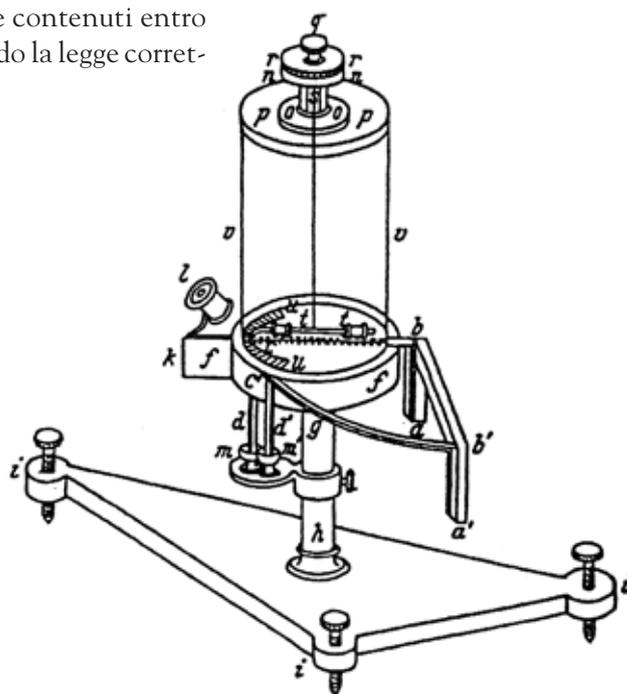
Anche qui è da notare la circostanza che sempre il filo più grosso devia più o meno dalla regola; ma mentre quello più grosso manteneva lo stesso aspetto, con una superficie in diverso grado di puro metallo, gli altri, a seguito dell'estrusione, si erano ricoperti di una pellicola abbastanza uniforme. Nei miei esperimenti successivi ho sempre tenuto conto di questo fatto.

Negli esperimenti che concernono la lunghezza dei conduttori, ogni fluttuazione della forza ha un influsso assai negativo, poiché conduttori di valore molto differente vengono introdotti uno di seguito all'altro nel circuito; da ciò nasce una incertezza che viene ulteriormente accresciuta dalle trasformazioni chimiche che il liquido e le superfici metalliche a contatto subiscono in continuazione. In effetti, nei miei primi esperimenti ho cercato di ovviare a questo inconveniente facendo seguire l'una all'altra le varie osservazioni a intervalli regolari di tempo e scegliendo, nell'arco di tutta la durata degli esperimenti, solo quegli intervalli nei quali l'effetto del circuito mostrava di essere meno mutevole. Anche se in questo modo gli errori di misura possono essere contenuti entro limiti molto ristretti, non potevo sperare di scoprire in tal modo la legge corretta della conduzione² e di conseguenza feci ricorso al circuito termomagnetico [termoelettrico, n.d.t.] la cui stabilità mi era stata raccomandata dal signor Poggendorf. Poiché i dati ottenuti in questo modo consentono di esprimere la legge della conduzione in modo decisivo, non considero superfluo descrivere in modo dettagliato l'apparato da me utilizzato, affinché si possa riconoscere più facilmente il grado di affidabilità che meritano i fatti venuti alla luce con l'uso di tale apparato

Un pezzo di bismuto $aba'b'$ forgiato in forma di parentesi quadrata rovesciata (figura 1), con lato maggiore bb' di 6 ½ pollici e lati minori ab e $a'b'$ di 3 ½ pollici, aveva una larghezza di 9 linee e uno spessore di 4 linee, ambedue costanti. A ciascuno dei suoi lati minori fissai mediante due viti delle striscioline di rame $abcde$ e $a'b'c'd'$ larghe 9 linee, spesse una linea e lunghe in tutto 28 pollici e ripiegate in modo tale che, quando l'intero dispositivo era piazzato sul sostegno in legno $fghi$, i

2 Mi sono convinto che la legge annunciata nella mia comunicazione a pag. 115 non sia generale, per il fatto che un conduttore di 1500 piedi può essere sostituito con un conduttore di 300 piedi la cui sezione è cinque volte più piccola di quella del precedente. Esso dava $2\frac{3}{4}$ per una forza normale di 139 divisioni e $1\frac{1}{2}$ per una forza normale di 76 divisioni.

Figura 1 Bilancia di torsione.



loro estremi liberi $c d$, $c' d'$ pescassero in due scodelline $m m'$ riempite di mercurio e collocate anch'esse sul sostegno.

Mi soffermerò sulla descrizione della bilancia di torsione posta sulla parte superiore del sostegno ff , poiché in essa si verificano le deviazioni rispetto al normale assetto del sistema. Il cilindro in vetro $v v$ sul quale la bilancia è posta è alto 6 pollici e largo $4 \frac{1}{2}$ pollici. La bilancia stessa consiste di due parti delle quali una, provvista di un incavo leggermente conico $n o p$, è fissata solidamente alla parte superiore del cilindro in vetro e l'altra $q r s$, con il suo tappo di otto linee di spessore e di forma conica, si adatta precisamente all'incavo della prima e con il suo disco $r r$ largo 3 pollici si appoggia su quella $n n$ della prima parte, che ha la stessa larghezza. Al tappo $q s$ è stato segnato con gran cura al tornio il punto di mezzo della rotazione mediante una lieve cavità di forma conica e quindi il tappo è stato limato per mezzo pollice della sua lunghezza, in modo tale che sulla superficie piana risultante da tale limatura la cavità conica si presentava come un triangolo completo. Mediante opportuni preparativi il filo al quale verrà appeso l'ago viene serrato al tappo in modo tale che il suo punto di mezzo cada esattamente sulla punta del triangolo³.

3 Questa bilancia di torsione è stata realizzata secondo le mie indicazioni dal Signor MAUCH, un meccanico di grande abilità residente nella zona. Inoltre avevo a disposizione anche due bilance di torsione di tipo comune provenienti da Strasburgo. Capii ben presto però che queste due non erano adatte ad esperimenti precisi perché sbagliavano le misure di 30 e più divisioni).

L'ago magnetico $t t$ è ricavato da un filo di acciaio spesso 0.8 linee non più lungo di due pollici; entrambi i suoi estremi sono collocati in pezzi di avorio di forma cilindrica dei quali uno porta in sé un filo di ottone lievemente appuntito e un po' ripiegato verso il basso. Questa punta di ottone, che serve da indicatore, si trova a breve distanza sopra l'arco di ottone $u u$, suddiviso in gradi e a sua volta appoggiato sul sostegno. Inizialmente avevo fatto l'ago di una lunghezza tale da pendere con uno dei suoi estremi direttamente sopra l'arco graduato in ottone; ma l'inerzia, riconoscibile dalla bassa frequenza delle sue oscillazioni, mi ricordava l'esperienza fatta poco tempo prima da Arago e motivò il cambiamento descritto sopra

L'ago, così preparato, viene retto da una striscia di filo d'oro appiattito lunga 5 pollici e fissata alla bilancia di torsione precisamente nel punto di mezzo della rotazione. Per quella che è la mia esperienza, queste strisce di metallo sono più adatte dei fili cilindrici per gli esperimenti con la bilancia di torsione. Malgrado la sua ridotta lunghezza, per altro desiderabile sotto molti altri aspetti, il filo appiattito che io utilizzo per la mia bilancia di torsione possiede ancora in tal misura le caratteristiche richieste negli esperimenti con la bilancia di torsione che l'ago, dopo che il filo appiattito ha sopportato una tensione di più di tre rotazioni complete, assume nuovamente la sua precedente posizione, una volta rimossa la tensione stessa. Malgrado ciò, dopo ogni esperimento, ho osservato l'ago nella posizione di riposo per essere sicuro che l'apparato non avesse subito delle alterazioni. Per il resto penso di dover ancora far notare che precedenti esperimenti con un ago in ottone simile al precedente e sostenuto anch'esso da un filo appiattito, mi hanno convinto che oscillazioni grandi e piccole (le mie osservazioni vanno da due giri completi fino a pochi gradi) hanno luogo sempre con lo stesso periodo, per cui non c'è nulla da temere da questo punto di vista.

La bilancia di torsione fu fissata sul piatto superiore del sostegno in modo tale che, quando la lancetta della bilancia era posizionata sullo zero, una linea tracciata a metà attraverso la striscia di rame $b c$ fosse allineata con il meridiano magnetico assieme alla tacca centrale dell'arco graduato $u u$ e ad un filo di seta tirato a piombo e posto di fronte a questo arco. Sulla sporgenza k del sostegno fu posizionata, ad una opportuna distanza e in una opportuna direzione, una lente l convessa con una distanza focale di un pollice attraverso la quale veniva osservata la sottostante scala graduata. Durante l'osservazione l'occhio venne posto costantemente in

posizione tale che il filo di seta e la tacca centrale dell'arco graduato si coprissero, onde evitare qualsiasi errore di paralasse. L'osservazione venne condotta in modo tale che, ogni volta che l'ago magnetico veniva deviato dalla corrente elettrica che attraversava l'apparato, il filo appiattito veniva girato in direzione opposta mediante la parte mobile della bilancia, fino al momento in cui la punta in ottone dell'ago stava dietro al filo di seta, in corrispondenza della tacca centrale dell'arco graduato; a questo punto l'entità della rotazione veniva letta sulla bilancia, nella sua parte superiore; in centesimi di una intera rotazione; questo numero esprime notoriamente l'intensità della forza che ha agito sull'ago⁴.

I conduttori utilizzati negli esperimenti avevano i capi immersi nel mercurio contenuto nelle scodelline $m m'$ sopra le quali, per motivi di sicurezza, era stato posto un semplice dispositivo grazie al quale gli estremi dei conduttori entravano in contatto con il mercurio sempre nello stesso modo. Oltre a ciò tutti i capi dei conduttori vennero rivestiti di resina in quanto era da temere il contatto con il mercurio; successivamente le superfici di appoggio degli stessi vennero limate con una sottile lima metallica ed ogni volta di nuovo ripulite. In esperimenti di questo genere un perfetto contatto metallico delle singole parti è una condizione irrinunciabile perché altrimenti non si perviene a nessun accordo nelle osservazioni.

Infine, per assicurare una differenza di temperatura costante tra le parti del dispositivo dove rame e bismuto entrano in contatto, mi feci preparare due recipienti di latta le cui sezioni sono raffigurate in dimensione maggiore. Ognuno di questi due recipienti aveva al suo interno uno spazio $x x$ (figura 2) aperto sopra e per il resto chiuso tutt'intorno, tale da poter alloggiare le parti $a b a' b'$.

Nel contenitore contrassegnato con A venne mantenuta costantemente acqua in ebollizione; questo recipiente, allo scopo di poter introdurre l'acqua, aveva perciò in prossimità di y una apertura che poteva essere chiusa con un tappo, e sul lato opposto un tubo $z z$ col quale condurre fuori il vapore prodotto; nell'altro recipiente venne introdotta neve o ghiaccio a pezzetti. Le parti $a b a' b'$ vennero dapprima avvolte con sottile ma fitto materiale in seta e successivamente introdotte negli spazi $x x$ che vennero infine riempiti fino ad una altezza di circa un pollice con pallini di piombo e poi fino all'orlo con vetro sminuzzato. In questo modo tutti i punti di contatto tra il bismuto e il rame si trovavano all'interno dello spazio riempito di piombo che conduceva bene il calore; la copertura di vetro proteggeva questo spazio da un rapido cambiamento di temperatura dovuto all'aria circostante.

Dopo questa dettagliata descrizione dell'apparato, parlerò ora degli esperimenti che ho svolto con esso. Mi ero preparato otto diversi conduttori che indicherò in seguito con 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 della lunghezza rispettivamente di 2, 4, 6, 10, 18, 34, 66, 130 pollici e di spessore pari a $7/8$ di linea; questi conduttori erano stati tagliati tutti da un solo pezzo di filo in rame placcato e ed erano stati preparati nel modo precedentemente descritto. Dopo che l'acqua era stata tenuta in ebollizione per mezz'ora, questi conduttori venivano introdotti nel circuito uno dopo l'altro. Fra le due serie di esperimenti svolte nel corso di una stessa giornata, che prendevano complessivamente un tempo di 3-4 ore, veniva sempre interposta una pausa di un'ora, durante la quale veniva aggiunta nuova acqua preriscaldata che arrivava in breve tempo ad ebollizione; successivamente i conduttori venivano introdotti nel circuito in ordine inverso. In tal modo ottenni i seguenti risultati:

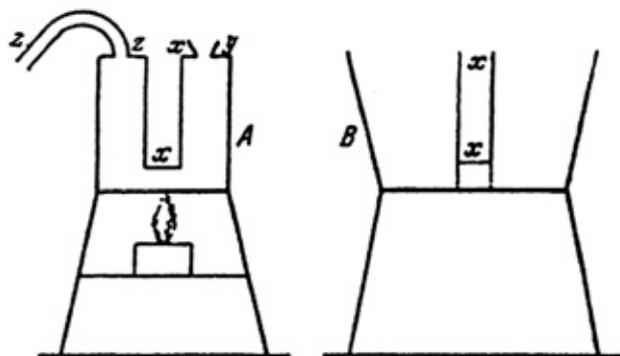


Figura 2

4 L'ago e il filo appiattito avevano tra loro una relazione tale per cui, per far avanzare l'ago di un grado della sottostante scala, si doveva ruotare la bilancia di torsione di 10 divisioni. Tuttavia, con l'assetto realizzato non ritenevo difficile vedere ancora bene $1/40$ di un sottostante grado e quindi di percepire ancora chiaramente $1/4$ delle soprastanti divisioni. Al tempo stesso diviene chiaro da ciò il perché una deviazione del punto di rotazione di neppure mezza linea potrebbe condurre a errori di 20 e più divisioni; non deve sorprendere perciò la minuziosa cura con la quale ho fatto costruire la mia bilancia di torsione. In ciò forse consiste il motivo per il quale altri non poterono ottenere con la bilancia di torsione risultati in accordo con quelli di Coulomb.

tempo della osservazione	serie speriment.	conduttore							
		1	2	3	4	5	5	7	8
8 gennaio (1826)	I.	326,75	300,75	277,75	238,25	190,75	134,50	83,25	48,5
11 gennaio	II.	311,25	287,00	267,00	230,25	183,50	129,75	80,0	46,0
	III.	307,00	284,00	263,75	226,25	181,00	128,75	79,0	44,5
15 gennaio	IV.	305,25	281,50	259,00	224,00	178,50	124,75	79,0	44,5
	V.	305,00	282,00	258,25	223,5	178,00	124,75	78,0	44,0

Si nota che la forza diminuisce sensibilmente da un giorno all'altro. Non mi azzardo a decidere se questa diminuzione sia da attribuire ad una variazione delle condizioni di contatto o al fatto che l'8 e l'11 gennaio erano delle giornate molto fredde e il contenitore di ghiaccio stava inoltre alla finestra di un locale non molto riscaldato e poco protetto contro il freddo. Mi pare opportuno solo far notare che a partire dal giorno 15 non notai più differenze di rilievo.

Bisogna mettere in particolare rilievo il fatto che, inoltre, non c'è traccia di quella fluttuazione della forza descritta sopra che ha luogo invece nel circuito idroelettrico. L'ago, appena raggiunta la posizione di riposo, vi rimane immobile. Dopo gli esperimenti descritti sopra, ho osservato spesso per mezz'ora l'ago senza constatare il minimo cambiamento. Raggiunto l'equilibrio con il conduttore 1 inserito, l'ago fu tenuto in questa posizione tramite un ostacolo collocato lateralmente e si poté osservare che non si muoveva minimamente nella direzione opposta quando si richiudeva il circuito con lo stesso conduttore, dopo che questo era stato tolto per qualche tempo. Questo autorizza a concludere che ogni fluttuazione ha la sua origine in una modificazione del liquido, modificazione che viene prodotta dalla corrente elettrica e che con questa cresce e diminuisce. Sembra che nel liquido si sia indotta una separazione di certe sue particelle costitutive mediante l'elettricità in movimento che segue le stesse leggi valide nel caso della elettricità statica. Ad un aumento della forza segue una maggiore separazione di queste particelle, mentre una diminuzione porta le stesse ad un raggruppamento parziale che diventa totale nel momento in cui la forza sparisce completamente. È molto probabile, e più avanti se ne troverà una conferma, che questa separazione del liquido causata dalla corrente comporti un cambiamento non solo nella forza, ma anche nella conducibilità del liquido; ed è proprio questa molteplice variabilità che ha luogo nel circuito idroelettrico che rende così complicata la legge della conduzione e che rende questo fenomeno così difficile da spiegare. Al tempo stesso ne risulta anche che il circuito idroelettrico, essendo fonte di molti errori, non si presta assolutamente alla determinazione dell'effetto che i metalli hanno sulla conduzione della corrente elettrica; il circuito termoelettrico al contrario si presta bene a tale scopo. Vediamo dunque quali vantaggi offre.

I valori indicati sopra si lasciano rappresentare soddisfacentemente mediante l'equazione

$$X = \frac{a}{b + x}$$

dove X rappresenta l'intensità dell'effetto magnetico sul conduttore di lunghezza x , a e b sono costanti che dipendono dalla forza eccitatrice e dalla resistenza delle altre parti del circuito. Se si assegna ora alla grandezza b il valore 20,25 e alla grandezza a , in successive serie di esperienze, i valori: 7285, 6965, 6885, 6800, 6800 si ottengono, attraverso calcoli, i seguenti risultati:

serie di esperimenti	conduttore							
	1	2	3	4	5	5	7	8
I.	328,0	300,50	277,50	240,75	190,50	134,50	84,25	48,50
II.	313,0	287,25	265,33	230,25	182,00	128,33	80,75	46,33
III.	309,5	284,00	262,33	228,00	180,00	127,00	79,75	45,75
IV.	305,5	280,50	259,00	224,75	177,75	125,25	79,00	45,00
V.	305,5	280,50	259,00	224,75	177,75	125,25	79,00	45,00

Se si confrontano questi valori ottenuti attraverso i calcoli con i precedenti ricavati mediante gli esperimenti con la bilancia, risulta evidente che le differenze sono minime, come ci si può sempre aspettare in esperienze di questo genere. Non volevo tuttavia fermarmi qui ma, cosa della massima importanza quando si tratta di comunicare leggi ricavate da pochi casi particolari, verificare l'efficacia della precedente formula nei casi limite.

Come conclusione costruii con il filo di ottone spesso 0,3 linee che avevo utilizzato nei precedenti esperimenti con il circuito idroelettrico, quattro conduttori *a*, *b*, *c*, *d* rispettivamente di lunghezza 2, 4, 8, 16 pollici; questi produssero nel circuito rispettivamente 111,5; 64,75; 37; 19,75 divisioni mentre il conduttore 1 ne produceva 305. Se si ricavano dalla precedente equazione le lunghezze corrispondenti a questi valori si trovano i seguenti risultati: 40,75; 84,75; 163,5; 324, valori che ci dicono con grande chiarezza che un pollice di filo di ottone equivale a 20,5 pollici di filo placcato. Dopo questa preparazione introdussi nel circuito il conduttore lungo 23 piedi ricavato dallo stesso filo di ottone che nella mia comunicazione veniva contrassegnato dal numero 5; il risultato fu di 1,25. E veramente si ottiene con quasi assoluta precisione questo valore se si sostituisce nell'espressione a *x* il valore $23 \cdot 12 \cdot 20,5 = 5658$. Da ciò si vede che quella equazione aderisce fedelmente ai dati sperimentali fino quasi al punto di estinzione della forza a causa della resistenza alla conduzione.

Inoltre mantenni con del ghiaccio un estremo del collegamento rame-bismuto alla temperatura di 0° mentre l'altro rimaneva a temperatura ambiente e un termometro appeso accanto all'apparato indicava durante tutto il tempo dell'esperienza il valore 7.5° R senza apprezzabili cambiamenti. I conduttori, introdotti nel circuito nell'ordine seguente 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1 diedero nell'ordine i seguenti valori: 27; 25; 23,33; 20; 15,5; 10,75; 6,5; 3,67; 6,5; 10,75; 15,5; 20; 23,5; 25,25; 27,75. Però se si pone nell'espressione sopra $b = 20,25$ e si determina *a* così che $a : 10,6 = 619$ si ottengono con i calcoli valori che mai si differenziano da quelli osservati per più di una mezza divisione; da ciò emerge a sufficienza che l'equazione precedente resta valida per qualsiasi valore della forza eccitatrice. In queste ultime esperienze si impongono altri due importanti punti. Come prima cosa è sorprendente il fatto che il valore di *b* resti invariato sebbene la forza diminuisca di più di 10 volte, così che *a* sembra dipendere unicamente dalla forza eccitatrice e *b* unicamente dalla parte fissa del conduttore. In secondo luogo pare che da questi esperimenti emerga che la forza del circuito termoelettrico sia esattamente proporzionale alla differenza di temperatura tra i suoi punti di eccitazione.

A conclusione di questi esperimenti non posso far a meno di ricordare ancora una osservazione che conferma in modo più diretto la conclusione di Davy secondo la quale il potere di conduzione dei metalli viene ridotto da un aumento della temperatura e aumentato da una sua diminuzione. Presi un conduttore di ottone della lunghezza di 4 pollici e lo misi nel circuito. Il risultato fu di 159 divisioni. Non appena lo scaldai nel suo mezzo mediante una fiamma alimentata con alcol la

5 Già Davy è arrivato a questo risultato attraverso un cammino del tutto diverso (Annali di Gilbert, nuova serie, Vol. XI, p.252). Se posso fidarmi del mio compendio, ivi si legge (p.253) letteralmente il passo seguente: «Come c'era da aspettarsi, io ho successivamente trovato che nelle batterie voltaiche, caratterizzate dalle modalità costruttive e dal numero di coppie sopra descritti, la conducibilità elettrica di un filo è *quasi direttamente proporzionale alla sua massa*. Se, ad esempio, una certa lunghezza di un filo di platino scarica una batteria, un filo sei volte più pesante della stessa lunghezza è sufficiente a scaricare 6 di quella batterie, della qual cosa mi sono convinto con due fili di platino di lunghezza 1 piede ciascuno pesanti 1,13 e 6,7 grani; e l'esito era del tutto identico prendendo in un secondo caso un singolo filo di massa 6 volte o 6 piccoli fili uniti l'uno all'altro, ammesso soltanto che i fili venissero tenuti in acqua fredda. Questi risultati da soli provano già che la conducibilità non dipende dalla superficie, almeno non per l'elettricità di questo tipo. Ancora più chiaramente lo dimostra questo esperimento diretto: di due fili di platino egualmente lunghi e di ugual forma, ne appiattisco uno cosicché assuma una superficie 6 o 7 volte più grande e confronto poi la conducibilità di entrambi. All'aria il filo appiattito si manifesta come il miglior conduttore in quanto esso si raffredda più rapidamente; ma quando entrambi i fili sono tenuti in acqua, non si riconosce alcuna diversità nella loro conducibilità».

Non senza ragione ipotizzo in questo punto un errore di traduzione la cui ricerca compensa certamente la fatica. Secondo i miei esperimenti infatti l'espressione "quasi direttamente proporzionale alla massa" è corretta solo quando si assume l'identica lunghezza dei fili. Questo si riconduce a una indeterminazione dell'espressione ma è la frase seguente ad essere in contrasto con questa ipotesi e con gli esperimenti propri di Davy: "Di due fili di platino egualmente lunghi ecc."

6 Che questa circostanza sia in realtà associata agli esperimenti di Becquerel lo riconduco alla seguente considerazione. Nel suo apparato x valeva 200 e h assumeva gradualmente 1, 2, 3, ecc. di tali quantità unitarie. Dal rapporto contenuto nel bollettino universale non si riesce a stabilire quanto Becquerel procedesse nella variazione di h . Supponendo che aves-

forza diminuì poco a poco fino a più di 20 divisioni e l'effetto rimase uguale anche spostando la fiamma verso l'uno o l'altro dei due estremi del conduttore; ma non appena appoggiai sullo stesso una lastra di neve sgocciolante la forza aumentò di due divisioni. La temperatura della stanza era di 8.5°R . Questo dato non è qui fuori luogo perché può essere origine di piccole anomalie.

Dopo che la nostra equazione ha dato prova di sé quale descrizione corretta della natura, grazie alla fedeltà con la quale riproduce in un così vasto ambito tutti i risultati ottenuti con il circuito termoelettrico, vogliamo svilupparla ancora un po' per vedere che cosa ancora nasconde nel suo grembo.

Se, come prima cosa, la si impiega negli esperimenti con il circuito idroelettrico, i conduttori più corti danno per a e b dei valori costantemente inferiori a quelli dei conduttori più lunghi, cosa che conferma la seguente ipotesi già esposta precedentemente in modo indeterminato: *il liquido diventa un conduttore migliore nella misura in cui grazie alla corrente viene ottenuta al suo interno una elevata separazione; allo stesso modo però, sebbene non nella stessa misura, siamo in presenza di una forza eccitatrice di segno opposto che, insieme al cambiamento della forza di conduzione verificatasi nel liquido provoca i fenomeni di fluttuazione di cui abbiamo già parlato spesso*. Un semplice colpo d'occhio all'equazione fa vedere che la variazione della forza per un certo x dovrebbe risultare tanto più piccola, quanto più b è grande e già un confronto superficiale dei risultati ottenuti con il circuito termoelettrico e con quello idroelettrico fa riconoscere che il valore di b è *centinaia di volte più grande in questo che in quello*; ciò dipende palesemente dal liquido usato come conduttore. Quegli esperimenti sono però allestiti con delle vaschette la superficie laterale delle quali supera i 200 pollici quadrati e poiché da tutti gli esperimenti fatti fino ad ora si sa che le lastre più piccole aumentano la resistenza del fluido almeno proporzionalmente alla loro superficie, segue che si dovrebbe ottenere per b un valore *molte migliaia di volte maggiore con una coppia di lastre di pochi pollici quadrati di superficie rispetto a quello ottenuto con il circuito termoelettrico di cui sopra*. Al tempo stesso emerge da questo confronto che la forza eccitatrice è di molto maggiore nel circuito idroelettrico che in quello termoelettrico.

Si aumenti la lunghezza x del filo conduttore di un tratto h e si indichi con V la conseguente diminuzione di X ; dalla nostra equazione, attraverso note regole, si ottiene:

$$\frac{V}{X} = \frac{h}{b+x} - \frac{h^2}{(b+x)^2} + \frac{h^3}{(b+x)^3} - \dots$$

Se h è molto piccolo in rapporto a $b+x$ si può porre senza sbagliare

$$\frac{V}{X} = \frac{h}{b+x}$$

Sotto l'ipotesi fatta la variazione della forza è quindi proporzionale all'aumento di lunghezza del filo conduttore. Questa legge è la stessa che Becquerel⁵ ha ottenuto col suo dispositivo. Di fatto nei suoi esperimenti h è già molto piccolo in confronto a x e inoltre questo fisico, essendosi servito del moltiplicatore, sembra aver sperimentato con piccole coppie di lastre così che x risulta di nuovo verosimilmente molto piccolo rispetto a b . Qui si dovrebbe ricercare la ragione per cui persino l'amplificazione dell'effetto con il moltiplicatore non ha dato risultati⁶.

Se utilizziamo la nostra equazione *nella teoria dell'apparato voltaico* questa ci dà informazioni inaspettate sui più diversi fenomeni.

Se supponiamo che la forza eccitatrice di una coppia metallica sia uguale a 1, un

apparecchio voltaico fatto da m di queste coppie deve possedere la forza eccitatrice m perché ogni coppia contribuisce alla produzione della corrente elettrica e questo in condizioni sempre identiche. Misuriamo dunque la resistenza che ogni coppia metallica oppone alla corrente (tenendo conto, là dov'è necessario, anche del conduttore umido, senza considerare però l'influsso del liquido sulla forza eccitatrice e sulla resistenza stessa) tramite la lunghezza di un corpo cilindrico sempre uguale che serve come unità di misura e chiamiamo la lunghezza in corrispondenza della quale il cilindro oppone alla corrente una resistenza uguale a quella che si vuole misurare la *lunghezza di resistenza* della coppia metallica; salta agli occhi allora che la lunghezza di resistenza di tutte le m coppie sarà m volte quella di una singola coppia, poiché sono tutte identiche una all'altra. Se vogliamo esprimere la forza della corrente elettrica di una singola coppia secondo la precedente equazione ponendo

$$a : (b + x)$$

dove x è la lunghezza di resistenza del conduttore di unione che chiude la catena, si trova che si otterrà la forza del collegamento di m di tali coppie se

1. si sostituisce a con $a m$; dagli esperimenti si è visto infatti che a è proporzionale alla forza eccitatrice;
2. si sostituisce m con $m b$; poiché dagli esperimenti si è visto che b non dipende dalla forza eccitatrice, si capisce dalla natura stessa dell'espressione che b rappresenta la lunghezza di resistenza della coppia metallica senza conduttore di unione⁷. Supponendo inoltre che lunghezza di resistenza del conduttore di unione resti la stessa in entrambi i casi, troviamo la seguente espressione per la pila voltaica fatta da m coppie metalliche:

$$a m : (b m + x)$$

Se si confronta questa formula con quella trovata per la catena semplice si arriva alle conclusioni seguenti:

1. Se $x = 0$ allora la forza dell'apparecchio voltaico è uguale alla forza della catena semplice, ammesso che entrambe siano fatte dallo stesso tipo di elementi. In questo consiste la legge trovata da Fourier e Oersted con i loro esperimenti con il circuito termoelettrico (su questa annata, Vol. XI, pag.48). Inoltre questa corrispondenza sarà quasi raggiunta ogni volta che x diventa molto piccolo in rapporto a b , come avviene negli esperimenti magnetici in condizioni usuali e con apparati a incandescenza.

Se $x = 0$ e inoltre il valore di b per la connessione voltaica è m volte più piccolo del valore di b per il circuito semplice, la forza in quell'apparecchio è m volte più grande che non in questo. Anche gli esperimenti di Fourier e Oersted hanno dimostrato che il valore è più grande, ma quando i due illustri scienziati affermano che l'effetto del collegamento costituito da più elementi è molto meno forte della somma degli effetti di tutti i singoli elementi, ciò non dimostra nulla contro la legge derivata dalla nostra equazione, che contraddice la loro affermazione, essendo questa basata su una misura sbagliata dell'effetto, cioè dell'angolo di deviazione.

2. Se x è molto grande in confronto a $b m$, e quindi tanto più in confronto a b , l'effetto della batteria galvanica diventa quasi m volte più grande di quello del circuito semplice. Questo caso può venir utilizzato con esperimenti di separazione dell'acqua con poche lastre grandi e può perfino essere utilizzato - se si usa un apparecchio come quello di Children - per esperimenti di magnetismo e di incandescenza. Siccome però proprio in questi ultimi il liquido partecipa in maniera

se già fissato $h = 5$ dm, allora sarebbe stato $h : x = 1/40$; se quindi $h : (b + x)$ non fosse diventato notevolmente più piccolo il suo così sensibile dispositivo avrebbe dovuto rilevare senza incertezze l'influenza del secondo membro nel soprascritto sviluppo di $V : X$.

⁷ Sarebbe sicuramente possibile che in b fosse contenuta, oltre alla lunghezza di resistenza, anche una parte costante; non affronto qui per nulla questo caso la cui trattazione verrà sviluppata in altro luogo.

non trascurabile all'effetto generale mi trattengo da ulteriori conclusioni.

3. In tutti gli altri casi la forza dell'effetto dell'apparecchio voltaico si situa tra i due limiti trovati.

Per provare questa teoria veramente semplice della pila galvanica utilizzo gli esperimenti sugli effetti chimici della pila di Volta che sono stati riportati con molta cura dal professor G. Bischof nell'Archivio di Kastner, Vol. 4, H. 1. Sembrerà azzardato applicare l'espressione sopra indicata ad un apparecchio idroelettrico dove a e b cambiano con l'effetto stesso (come è stato mostrato) mentre la legge del cambiamento rimane ancora sconosciuta. Questi dubbi vengono sollevati dall'osservazione che, come era stato allo stesso modo detto sopra, la modificazione della corrente dovuta al liquido diminuisce in proporzione molto maggiore rispetto a quest'ultimo. Nel nostro caso dove il conduttore x inglobava un tratto non trascurabile di acqua pura - e tanto più con poche superfici di contatto metalliche - la forza della corrente deve essere stata così debole da poter considerare senza esitazione i valori di a e b come costanti. Dopo questi esperimenti la forza che separa l'acqua

di	1	2	3	4	colonne
fatte da	51	102	153	204	coppie di lastre
sta nella relazione numerica di	37	62	83	100.	

Se si pone la lunghezza di resistenza di una colonna = 1 e si prende di conseguenza $x = 5,6$ e la forza eccitatrice di una colonna = 240 si ottengono, attraverso il calcolo, i valori:

36,3 63 83,75 100

con una corrispondenza che prova in uguale misura la correttezza della formula e l'esattezza degli esperimenti allestiti in questo modo. Quest'applicazione presuppone o, piuttosto, prova che la forza separatrice dell'acqua del circuito è proporzionale a quella magnetica.

Non voglio trattare più a lungo questa teoria della pila, per il completamento della quale servono ancora degli studi che allo stato attuale delle cose mancano; voglio piuttosto passare alla altrettanto sorprendente teoria del moltiplicatore che già adesso si può descrivere in forma più completa.

Supponiamo che in un circuito galvanico la cui forza eccitatrice è a e la cui lunghezza di resistenza è b venga introdotto un conduttore di unione con lunghezza di resistenza $m l$, allora la forza magnetica di questo circuito senza conduttore di unione è $= a : b$, con il conduttore di unione è $= a : (b + m l)$. Se si struttura questo conduttore di unione in m avvolgimenti perfettamente uguali, ciascuno di lunghezza l (assumiamo per brevità che a tutti questi avvolgimenti venga attribuito uno stesso nome) allora la forza magnetica di questi m avvolgimenti sta alla forza di un avvolgimento perfettamente uguale del circuito senza conduttore di unione nella proporzione seguente:

$$\frac{a m}{(b + m l)} = \frac{a}{b}$$

Si trova dunque, a condizione che a e b siano grandezze costanti, il fattore di rinforzo del moltiplicatore

$$b m : (b + m l)$$

Questo ci mostra che un rinforzo dell'effetto tramite il moltiplicatore è possibile soltanto finché $m l < (m-1) b$, quindi soltanto nel caso in cui un avvolgimento del moltiplicatore opponga meno resistenza alla corrente elettrica di tutto il circuito

senza conduttore intermedio. Se si pone $b = l n$ allora il fattore di rinforzo si trasforma in

$$m n : (m + n)$$

da cui segue che si raggiunge un massimo del rinforzo se n è trascurabile in confronto a m e che questo massimo viene rappresentato dal numero n . Quest'ultimo indica quante volte la resistenza opposta da un giro del moltiplicatore alla corrente è contenuta nella resistenza che il circuito senza il moltiplicatore gli oppone.

L'effetto del moltiplicatore, dopo che è sopraggiunto il massimo del rinforzo, viene espresso da $a : l$ ed è così completamente indipendente dalla capacità conduttrice del fluido; solo il numero degli avvolgimenti deve modificarsi nei vari casi. L'espressione appena trovata può essere espressa a parole nel seguente modo: L'entità dell'effetto di uno stesso moltiplicatore in corrispondenza a diversi metalli eccitatori è proporzionale alla tensione fra i due metalli; e l'entità dell'effetto di due moltiplicatori costruiti con fili diversi ma con avvolgimenti della stessa grandezza e forma stanno, per metalli eccitatori simili, in rapporto di proporzionalità inversa con le lunghezze di resistenza di un avvolgimento di ciascuno dei due. Nei due casi si presuppone che sia stato raggiunto il massimo dell'effetto.

A conferma delle leggi derivate sopra dalle nostre equazioni utilizzo gli esperimenti di Poggendorf (Isis 1821, H. 1) che in accordo con ciò che è stato qui determinato, affermano che:

1. il massimo dell'effetto non può venir superato dal moltiplicatore.
2. questo massimo rimane il medesimo per coppie di placche grandi e piccole, purché il numero degli avvolgimenti che servono per il moltiplicatore sia più grande quando le placche sono più piccole.
3. un moltiplicatore costruito con filo più spesso dà un massimo dell'effetto maggiore.

Gli esperimenti di Poggendorf (i quali del resto vengono interpretati in svariate occasioni con le formule sopra indicate) non consentono di derivare da essi dei valori numerici perché mancano le indicazioni necessarie. Negli esperimenti con il filo di chiusura spesso sembra essersi prodotto un disturbo ingente. Questo fatto risulta non solo dalla irregolarità dei suoi dati, ma anche dai risultati ottenuti col circuito piccolo costruito con lo stesso filo di chiusura, che presentavano oscillazioni così straordinarie da rendere impossibile conclusioni soddisfacenti. Per questo motivo costruii due moltiplicatori ricoperti di ceralacca. Ognuno di questi consisteva di 220 avvolgimenti; uno era fatto con un filo spesso $1/5$ di linea, l'altro con lo stesso filo, tirato però fino ad una lunghezza quattro volte maggiore. Ciascuno era suddiviso in due anelli circolari identici spessi $5 \frac{1}{2}$ linee, distanti l'uno dall'altro 5 linee e del diametro di due pollici. Esattamente nel mezzo di questi due anelli era sospeso l'ago lungo 18 linee. L'installazione era tale che i due moltiplicatori potevano essere portati alternativamente e senza perdita di tempo in una posizione sicura sotto l'ago. Placche di rame e di zinco del diametro di $3 \frac{1}{4}$ pollici fungevano da eccitatori mentre una soluzione concentrata di sale ammoniacale allo stato liquido faceva da conduttore liquido (avevo trovato che con l'utilizzazione di una grande quantità di liquido l'effetto era più sicuro che con una pezza di stoffa impregnata di sale ammoniacale). La determinazione della forza avvenne in modo simile a quello degli esperimenti descritti sopra e risultò di 263 divisioni per quello fatto con il filo più spesso e di 68 divisioni per quello fatto con il filo più sottile; con questo la legge trovata riceve la sua piena conferma.

L'uso del moltiplicatore crea un aumento della forza fino ad un certo massimo se $ml < (m - 1) b$ e una sua diminuzione fino ad un certo minimo se al contrario $ml > (m - 1) b$; entrambi sottostanno alle stesse leggi. Non parliamo in questa sede della loro applicazione poiché ho soltanto intenzione di mostrare la validità generale dell'equazione trovata. Voglio solo far notare che sta in esse il motivo per il quale il moltiplicatore indebolisce nella maggioranza dei casi l'effetto del circuito termoelettrico; difficilmente si avvera infatti il caso in cui un avvolgimento del moltiplicatore oppone alla corrente elettrica meno resistenza di quanto non faccia il circuito termoelettrico.

Se quindi Nobili ha ottenuto degli effetti così forti con l'uso del moltiplicatore è grazie alla sensibilità del suo ago e non alla funzione del moltiplicatore, come mi sono convinto con il seguente esperimento. Un ago costruito secondo le sue indicazioni mi diede, attraverso l'uso di un moltiplicatore di 60 avvolgimenti, ciascuno con $2\frac{1}{2}$ pollici di diametro fatto da filo di rame spesso $\frac{1}{5}$ di linea, delle deviazioni dovute al contatto della mano calda che non hanno mai superato i 20° ; lo stesso circuito, se usato da solo come avvolgimento della stessa grandezza di quella del moltiplicatore, faceva prendere all'ago un angolo che superava sempre i 70° quando lo si toccava con la mano calda. Questo dispositivo può essere modificato in modo tale da non aver nulla da invidiare al termoscopio più sensibile.

Le teorie della colonna e del moltiplicatore, qui descritte a grandi linee, confermano, quasi più degli esperimenti stessi da cui sono nate, la validità della legge della conduzione dell'elettricità nei metalli sviluppata in questo trattato. Gli effetti del circuito galvanico, in apparenza molto diversi fra di loro, si traducono da una variegata molteplicità ad un tutto armonico. L'importante scoperta di Seebeck sembra tessere il filo che porta fuori dal labirinto nel quale si aggira la corrente elettrica.

Appendice didattica

Premessa

La conduzione elettrica in generale e le leggi di Ohm in particolare costituiscono un capitolo di rilievo nell'insegnamento della fisica delle Scuole secondarie superiori italiane. Questi argomenti vengono solitamente considerati come strettamente "tecnici" e quindi la loro esposizione non viene mai corredata da considerazioni storiche, come talvolta può accadere per tematiche quali la dinamica del moto, il campo elettromagnetico o la teoria dei quanti.

Il contenuto di questa monografia dovrebbe però aver messo in evidenza che la comprensione delle leggi sulla conduzione passò invece attraverso dibattiti di grande interesse storico la cui conoscenza, anche parziale, potrebbe generare riflessioni, approfondimenti e, in definitiva una miglior comprensione delle leggi medesime. In particolare, potrebbe mettere in evidenza che la definizione delle leggi di Ohm non fu per nulla un processo banale né sul piano teorico, né sul piano sperimentale. Infatti, l'apparente banalità di queste leggi (che proponiamo senza alcuna preoccupazione anche agli studenti di 14 anni) deriva soltanto dal fatto che, da una parte, quando si introducono le leggi di Ohm sono già stati precisati, per vie diverse, il concetto di potenziale elettrico e il concetto di intensità di corrente, dall'altra che esse vengono "verificate" mediante strumenti che sono essi stessi un verifica della legge di Ohm in quanto progettati ed usati secondo i suoi dettami.

Chi scrive ritiene che il contenuto di questa monografia potrebbe offrire non pochi spunti didattici a un docente di Scuola media superiore; anzitutto letture di passi adatti a far emergere la problematicità della tematica, ma anche suggerimenti per l'attività di laboratorio e per la risoluzione di problemi insoliti.

Nel seguito esplicitiamo alcuni di tali suggerimenti.

1. Introdurre la legge di Ohm senza ricorrere al concetto di campo elettrico

Quando si affronta il tema della conduzione elettrica in un triennio della Scuola Superiore, si è solitamente già illustrato il concetto di campo elettrico. Con tale premessa diviene piuttosto facile giungere al concetto di potenziale, anche senza utilizzare il formalismo matematico del gradiente, passando prima attraverso la definizione del lavoro delle forze elettriche che trasportano una carica elettrica q lungo una linea di forza di un campo elettrico uniforme \vec{E} per un tratto \overline{AB} ($L = q E \overline{AB}$) e definendo poi la differenza di potenziale tra i punti A e B come rapporto tra il lavoro L e la carica q :

$$\Delta V_{AB} = q E \overline{AB} / q = E \overline{AB}.$$

Stabilito il significato di differenza di potenziale è poi immediato introdurre la legge di Ohm $i = \Delta V / R$ in termini sperimentali.

Nell'insegnamento dei fenomeni elettrici in classi di *biennio* questa procedura spesso non viene applicata perché molti docenti preferiscono non introdurre il concetto di campo elettrico, ritenuto troppo astratto per questa fascia scolare. Per

caduta di potenziale) mentre le indicazioni degli amperometri A_1 e A_2 risultano sempre identiche tra loro (concetto di stazionarietà della corrente) pur diminuendo il loro valore al variare del numero degli elementi di batteria inclusi tra A e B.

Con questo stesso circuito si potrebbe stabilire anche la proporzionalità tra ΔV e i variando il numero degli elementi di batteria e lasciando invariata la lunghezza del tratto CE; con le batterie attuali, i cui elementi hanno resistenza interna dell'ordine del decimo di ohm, i dati sperimentali per la corrente e per la differenza di potenziale si adeguano ad una quasi perfetta legge di proporzionalità diretta. Prima di proporre questo passaggio concettuale conviene però creare qualche dubbio nello studente proponendo la procedura sperimentale illustrata al punto seguente (questo tipo di dubbio sarà bene crearlo anche nello studente del triennio che ha introdotto il concetto di potenziale a partire dal campo elettrico).

I grafici *tensione-distanza dal polo positivo* possono, successivamente, quando cioè si passa a considerazioni energetiche, essere utilizzati per calcolare l'energia dissipata sotto forma termica nel passaggio di una carica q da un estremo all'altro di un conduttore di lunghezza L sfruttando l'analogia con il caso meccanico.

In base al principio di conservazione dell'energia, l'allievo sa già infatti che un corpo di peso \vec{P} che scivola a *velocità costante* lungo un piano inclinato di base L e altezza h , l'energia trasformata in calore è data da (vedi **figura 4**):

$$\text{energia} = P h$$

Basandoci sull'analogia grafica tra il piano inclinato e l'andamento *potenziale-lunghezza del conduttore*, possiamo stabilire facilmente che il corrispondente della "carica gravitazionale" P (peso del corpo) è la carica elettrica q e il corrispondente della variazione della quota h del peso del corpo è la variazione del potenziale elettrico ΔV . Perciò:

$$\text{energia dissipata sotto forma termica dalla carica } q = q \Delta V$$

Da qui, tenendo conto delle relazioni $i = q/t$ e $\Delta V = R i$ si otterrà poi facilmente la relazione:

$$\text{energia dissipata} = i^2 R t.$$

Facciamo notare anche che, secondo questa analogia, come la forza operante sulla carica gravitazionale che si sposta sul piano inclinato è, di fatto, la forza $F = P h/L$, la forza elettrica agente sulla carica q è data da $F = q \Delta V/L$. Emerge dunque molto spontaneamente la forma della *forza per carica unitaria* $F/q = \Delta V/L$ cioè, la corretta espressione del campo elettrico nel caso in esame, senza passare attraverso la sua introduzione classica ed astratta.

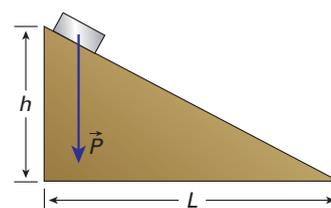


Figura 4.

2. Creare dubbi sulla proporzionalità diretta tra differenza di potenziale applicata ai capi di un conduttore e intensità di corrente fluente in esso

Come s'è detto all'inizio di questa Appendice, la verifica della dipendenza di proporzionalità diretta tra la differenza di potenziale applicata ai capi di un conduttore e l'intensità di corrente che viene prodotta in esso è, nella didattica attuale, banalizzata dal fatto che si offrono all'allievo strumenti progettati alla luce della legge di Ohm e connessi tra loro tenendo conto della legge che si vorrebbe verificare.

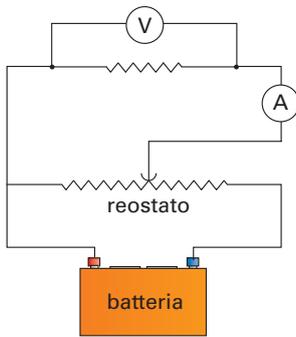


Figura 5.

Consideriamo ad esempio il circuito classico che gli allievi devono montare per “verificare” la legge di Ohm (figura 5).

È evidente che se si vuole spiegare questo tipo di circuito non si può fare a meno di introdurre teoricamente la legge di Ohm e quindi questa attività didattica si riduce ad un esercizio di lettura di due strumenti di misura elettrici (il che non è poco, ma non coincide con il presunto obiettivo dell’esperienza).

Proviamo invece a proporre all’allievo la seguente successione di esperimenti e considerazioni.

A) Immergiamo in un becher contenente acqua acidulata con acido solforico una lamina di rame e una di zinco mantenendole parallele tra loro e a una distanza di circa 1 cm. Fissiamo, mediante due coccodrilli, un conduttore in rame a ciascuna di esse e colleghiamo i due conduttori ai terminali di un amperometro. Il basso valore della corrente registrata dallo strumento consentirà di far capire, anche solo qualitativamente, che sistemi generatori di quel tipo possiedono una resistenza al passaggio della corrente notevolmente elevata. Ovviamente si potrebbe determinare esattamente il valore della resistenza del generatore ma questa misura richiederebbe la conoscenza della legge di Ohm e converrà posporla. Si potrebbe anche protrarre per un po’ di tempo l’erogazione della corrente per mettere in evidenza la diminuzione della sua intensità nel tempo a causa degli effetti di polarizzazione ma per quanto segue questa osservazione non è essenziale.

B) Mostriamo ora agli allievi una normale batteria da laboratorio e, cortocircuitando per un breve istante i suoi poli, produciamo una piccola fusione di una delle estremità del conduttore di collegamento deducendo, sempre intuitivamente, da questo fatto che la sua resistenza al passaggio della corrente deve essere molto piccola. Il confronto dei fenomeni indicati in questo punto e nel precedente dovrebbe convincere facilmente gli allievi che se si desidera simulare una batteria di primo ottocento è necessario simularne l’elevata resistenza interna. Ciò potrà essere fatto ponendo in serie alla batteria una cassetta di resistenze e inserendo con essa una resistenza di qualche ohm (5 o 6 ad esempio) per ogni elemento di batteria inserito nel circuito.

C) Facciamo ora montare il circuito seguente (figura 6).

In questa figura, R rappresenta la resistenza esterna, A un amperometro, M un morsetto che consente di variare il numero degli elementi di batteria inclusi nel circuito, C una cassetta di resistenze. Con questo circuito facciamo studiare ora la dipendenza della tensione applicata ai capi della resistenza R dalla intensità di corrente in essa circolante facendo variare il numero degli elementi di batteria inclusi nel circuito e ricordando di inserire, mediante la cassetta di resistenze, una

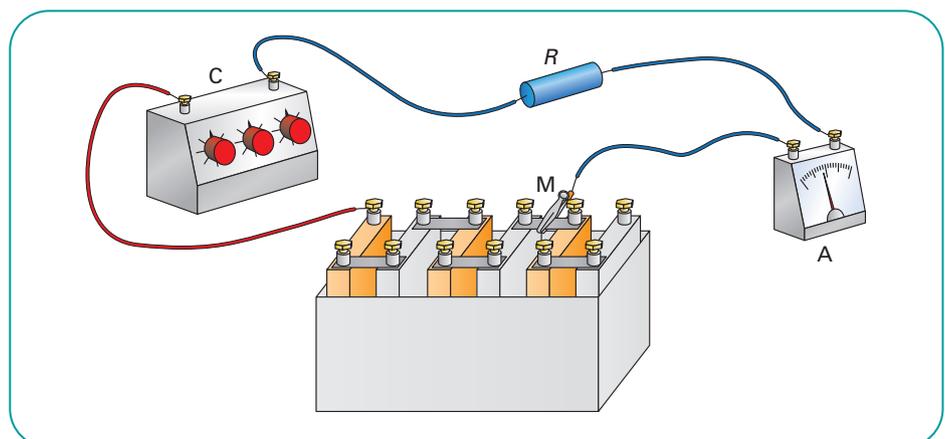


Figura 6.

resistenza prestabilita di $X \Omega$ ogniqualvolta si aumenta di una unità il numero di elementi di batteria utilizzati. Il grafico riportato in **figura 7** riproduce i risultati sperimentali nel caso in cui $X = 6$ e $R = 10 \Omega$.

Avendo del tempo a disposizione sarà molto utile continuare l'esperimento variando X e mantenendo R fisso o variando R e mantenendo X fisso al fine di constatare quando la dipendenza *numero di elementi - intensità di corrente* si avvicina alla proporzionalità diretta. Lasciamo immaginare il tipo di discussione che può essere stimolata dalla considerazione di grafici così ottenuti quando vengano poi confrontati con la legge di Ohm del libro di testo.

Discussioni altrettanto interessanti possono essere suscitate quando la verifica della legge di Ohm (anche se realizzata con strumenti attuali) viene eseguita utilizzando un generatore e una resistenza esterna di valore tale da consentire un'ampia variazione dell'intensità di corrente e della differenza di potenziale (ad esempio da qualche decimo di milliamperere a qualche decimo di ampere per l'intensità di corrente e da qualche millivolt a qualche volt per la differenza di potenziale) in modo che l'allievo sia obbligato a cambiare il fondo scala degli strumenti. In tale caso le resistenze interne di questi possono variare notevolmente e quindi i valori sperimentali della differenza di potenziale e dell'intensità di corrente non si troveranno più su una retta ma manifesteranno un andamento del tutto incomprensibile a meno di interpretarlo mediante la legge di Ohm. Viene così simulato l'effetto del moltiplicatore di Schweigger nei circuiti del primo ottocento.

In **figura 8** è riportata la rappresentazione di un insieme di valori sperimentali ottenuti con un voltmetro e un amperometro a più portate; i valori del fondo scala (indicato con F.S. in **figura 8**) sono riportati sul grafico medesimo.

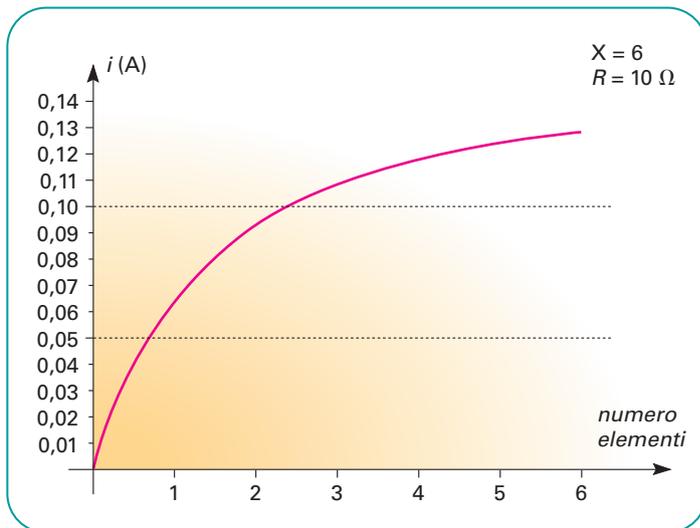


Figura 7.

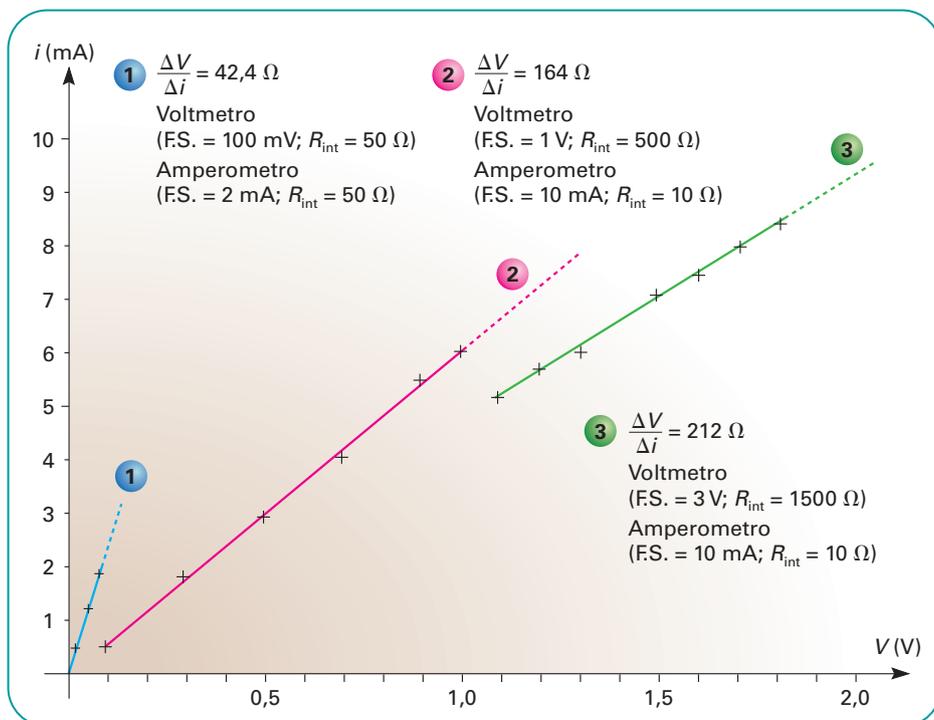


Figura 8.

3. Risolvere problemi “strani” alla luce della legge di Ohm

Nel capitolo 1 abbiamo riportato alcuni fenomeni che proponevano fenomeni “strani” che venivano interpretati con altrettanto “strane” ipotesi ad hoc (quale quella della velocità della corrente) o che rimanevano del tutto senza spiegazione. Il contenuto di questi passi potrebbe essere proposto all’allievo sotto forma di problema, con l’obiettivo didattico di evidenziare la potenza interpretativa delle leggi di Ohm e di far riflettere sul significato delle grandezze in esse coinvolte.

Per comodità del lettore-docente proponiamo i seguenti cinque problemi.

Problema 1

Questo problema ci riconduce agli esperimenti di Priestley illustrati nel paragrafo 3.1 del Capitolo 1.

Testo

Due metalli diversi possiedono temperatura di fusione, calore specifico e densità all’incirca uguali. Con essi si trafilano due conduttori cilindrici geometricamente identici. Dimostrare che:

- se due fili di diverso materiale vengono inseriti in serie ai poli della batteria, fonderà prima quello dotato di maggior conducibilità elettrica;
- se due fili di diverso materiale vengono inseriti in parallelo ai poli della batteria, fonderà prima quello dotato di minor conducibilità elettrica.

Risoluzione

Per la risoluzione del problema si vedano il paragrafo 3.1 e la nota del paragrafo 8.3 del primo capitolo.

Problema 2

Questo problema è strettamente connesso alla parte sperimentale illustrata al punto C) del precedente paragrafo.

Testo

Dimostrare che la dipendenza di proporzionalità diretta tra il numero di elementi di batteria inseriti in serie in un circuito e l’intensità di corrente in esso circolante è verificata con buona approssimazione solo se la resistenza del conduttore esterno alla batteria è decisamente maggiore della resistenza interna dei suoi elementi.

Risoluzione

Per la risoluzione si leggano le considerazioni del paragrafo 7.1 del primo capitolo.

Problema 3

Questo problema costituisce una parafrasi in termini moderni del passo di Faraday presentato nel paragrafo 7.1 del primo capitolo.

Testo

A) Dimostrare che una cella voltaica costituita da una sola coppia di piastre rame zinco di grandi dimensioni (circa $1,0 \text{ m}^2$) devia fortemente un ago magnetico

disposto sotto il filo che collega i suoi poli quando il diametro del filo è di circa 5,0 mm e la sua lunghezza 1,0 m mentre lo devia poco quando il suo diametro è di soli 0,20 mm e la sua lunghezza sempre 1,0 m.

B) Dimostrare che un simile elemento di pila non è in grado di produrre l'elettrolisi dell'acqua quando il filo (anche di grande diametro) che collega i suoi poli viene tagliato e le due estremità vengono immerse in un recipiente contenente acqua acidulata.

C) Supposto di utilizzare due grandi lastre di rame e di zinco per realizzare una batteria di 36 elementi voltaici identici disposti in serie, si dimostri che questa batteria, quando è collegata con un conduttore di notevole diametro, devia l'ago magnetico meno di quanto faceva l'elemento singolo (collegato con il medesimo conduttore) mentre è in grado di produrre un sensibile effetto elettrolitico quando il suo conduttore di collegamento viene tagliato e i due segmenti vengono immersi in un recipiente contenente acqua acidulata.

Risoluzione

A) Sia S la superficie delle lastre di rame e di zinco che costituiscono la coppia singola, r la resistenza interna della coppia e fem la sua forza elettromotrice. Collegando le due lastre con un conduttore filiforme di resistenza R si ottiene una corrente i_C di valore:

$$i_C = \frac{fem}{r + R}$$

Assegnando al rame la resistività di $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}$, un filo di rame di 5,0 mm di diametro e di lunghezza pari a 1,0 m ha una resistenza di $8,7 \cdot 10^{-4} \Omega$, decisamente molto piccola. Anche la resistenza interna della coppia rame zinco è piuttosto piccola data la notevole estensione delle lastre con cui è realizzata (assumiamo per essa il valore $0,20 \Omega$). Assegnando alla forza elettromotrice il valore di 1,0 V, l'intensità di corrente i_C risulta allora:

$$i_C = \frac{1,0 \text{ V}}{0,20 \Omega + 8,7 \cdot 10^{-4} \Omega} = 5,0 \text{ A}$$

Una corrente che ha una simile intensità è certamente in grado di produrre notevoli deviazioni dell'ago magnetico.

La riduzione del diametro del filo con cui si cortocircuitano i poli del generatore determina però un aumento della sua resistenza che si calcola nel modo seguente:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{S_2}{S_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2} = \frac{(0,20 \text{ mm})^2}{(5,0 \text{ mm})^2} = 1,6 \cdot 10^{-3}$$

e quindi $R_2 = 625 R_1 = 0,54 \Omega$.

L'intensità della corrente circolante si riduce dunque al valore di:

$$\frac{1,0 \text{ V}}{0,20 \Omega + 0,54 \Omega} = 1,4 \text{ A}$$

e produce minori effetti sull'ago magnetico.

B) La conducibilità dell'acqua salata è migliaia di volte inferiore a quella di un conduttore metallico e quindi un qualunque apparato per l'elettrolisi dell'acqua avrà una resistenza molto elevata (dell'ordine delle centinaia di ohm) che ridurrà la corrente erogata dal generatore costituito da un' unica coppia rame zinco a valori molto bassi che rendono il processo di elettrolisi molto lento.

C) Consideriamo una batteria realizzata con 36 coppie ritagliate da una lastre di rame e da una di zinco, ciascuna di superficie S (di $1,0 \text{ m}^2$). Le lastre di queste coppie hanno quindi superficie $S/36$ e la loro resistenza interna dovrà valere $36 r$. L'intensità di corrente i_{bat} erogata dalla batteria di 36 di questi elementi voltaici è data da:

$$i_{\text{bat}} = \frac{36 fem}{36 \cdot 36 r + R} = \frac{fem}{36 r + R/36}$$

Assumendo ancora per r il valore di $0,20 \Omega$ e per R il valore di $8,7 \cdot 10^{-4} \Omega$, si potrà trascurare $R/36$ rispetto a $36 r$, ottenendo:

$$i_{\text{bat}} = \frac{fem}{36 r} \cong \frac{i_C}{36} = 0,14 \text{ A}$$

L'ago magnetico subisce quindi una deviazione notevolmente inferiore.

La situazione si capovolge quando, con la stessa cella voltaica di superficie S e la stessa batteria di 36 elementi di superficie $S/36$ si cerca di elettrolizzare l'acqua.

In questo caso la resistenza esterna è quella di una cella elettrolitica e quindi il suo valore è notevolmente elevato. Perciò:

$$i'_C = \frac{fem}{r + R'} \quad i'_{\text{bat}} = \frac{fem}{36 r + R'/36}$$

Con i valori di $fem = 1,0 \text{ V}$, $r = 0,20 \Omega$, $R' = 100 \Omega$ si ottiene:

$$i'_C = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ A} \quad i'_{\text{bat}} = 1,0 \cdot 10^{-1} \text{ A}$$

Problema 4

Questo problema costituisce la parafrasi del passo di Jacobi riportato al paragrafo 8.5 del capitolo 1.

Testo

A) Nell'eseguire esperimenti di elettrolisi si constata che una batteria costituita da 11 coppie rame-zinco, collegata a una cella elettrolitica, produce, nello stesso tempo, meno gas di quanto venga prodotto da una batteria di 10 coppie rame-zinco applicata alla medesima cella. Spiegare come ciò sia possibile.

B) Desiderando conoscere il valore dell'intensità di corrente erogata si inserisce in serie alla cella una bussola delle tangenti (un amperometro). Si constata ora che l'efficienza della batteria di 11 elementi supera, anche se di poco, quella di 10 elementi. Spiegare come ciò sia possibile.

Risoluzione

A) La peggiore efficienza della batteria costituita da 11 coppie si spiega supponendo che l'undicesima coppia abbia una resistenza interna più elevata di quella delle altre. In tale caso, indicati:

- con fem la forza elettromotrice di ciascuna coppia;
- con r la resistenza interna delle prime 10 coppie;
- con r' la resistenza interna dell'undicesima coppia;
- con R la resistenza della cella,

si può scrivere:

$$i_{10} = \frac{10 fem}{R + 10 r} \quad i_{11} = \frac{11 fem}{R + 10 r + r'}$$

e quindi $i_{10} > i_{11}$ quando:

$$\frac{10}{R + 10r} > \frac{11}{R + 10r + r'}$$

dalla quale, con qualche passaggio, si ottiene:

$$r' > R/10 + r$$

Ad esempio, per $R = 10 \Omega$ e $r = 0,3 \Omega$, si può porre $r' = 1,5 \Omega$.

B) Per spiegare il comportamento indicato al punto B) occorre tenere presente che uno strumento per la misura della corrente deve possedere una propria resistenza interna r_S . Ora, perciò, le espressioni delle intensità di corrente divengono:

$$i_{10} = \frac{10 fem}{R + 10r + r_S} \quad i_{11} = \frac{11 fem}{R + 10r + r' + r_S}$$

e quindi $i_{11} > i_{10}$ quando:

$$\frac{11}{R + 10r + r' + r_S} > \frac{10}{R + 10r + r_S}$$

dalla quale, con qualche passaggio, si ottiene:

$$r_S > -R - 10r + 10r'$$

Utilizzando i valori del caso A): $R = 10 \Omega$, $r = 0,3 \Omega$, $r' = 1,5 \Omega$, risulta $r_S > 2,0 \Omega$. Ponendo ad esempio $r_S = 3,0 \Omega$ e $fem = 1,0 \text{ V}$ si ottiene (esprimendo il risultato con tre cifre significative): $i_{10} = 0,625 \text{ A}$, $i_{11} = 0,629 \text{ A}$ e perciò la quantità di gas sviluppata sarà ora maggiore per la batteria da 11 coppie.

Problema 5

Questo problema è formulato sulla base dei dati riportati nella nota del paragrafo 8.4 del capitolo 1 che ricorda il risultato del lavoro di Gay Lussac e Thenard.

Testo

Dimostrare che, collegando una batteria di n elementi agli elettrodi di una cella per l'elettrolisi dell'acqua, la massa m di gas sviluppata risulta all'incirca proporzionale alla radice cubica del numero degli elementi.

Risoluzione

La massa m di gas sviluppata dal passaggio della corrente è direttamente proporzionale alla quantità di carica che passa nella cella, ovvero all'intensità di corrente che la attraversa per un tempo prefissato. Perciò: $m = k i$ con k costante di proporzionalità.

Trascurando le variazioni della fem degli elementi della batteria, e la resistenza dei conduttori di collegamento tra la batteria e la cella (corti e di notevole sezione, come allora si usava) indicando con R_C la resistenza della cella e con r la resistenza interna degli elementi della batteria, in base alla legge di Ohm si può scrivere:

$$i = \frac{n fem}{R_C + n r}$$

Si ha perciò:

$$m = k fem \frac{n}{R_C + n r}$$

Il resoconto dell'esperimento da cui abbiamo tratto questo problema non consente di dedurre il rapporto tra la resistenza della cella e quella degli elementi della

batteria. Assumendo ad esempio i valori $R_C = 6 \Omega$ e $r = 5 \Omega$ e moltiplicando poi il valore del rapporto $n/(R_C + nr)$ per 11 in modo che per $n = 1$ tale rapporto coincida con la radice cubica di 1, cioè con 1, si ottiene la seguente tabella di valori:

n	$n/(R_C + nr)$	$11 n/(R_C + nr)$	$\sqrt[3]{n}$
1	0,09	1	1
2	0,125	1,38	1,26
3	0,143	1,57	1,44
4	0,154	1,69	1,59
5	0,161	1,77	1,71
6	0,166	1,83	1,82
7	0,171	1,88	1,91
8	0,174	1,91	2,00
9	0,176	1,94	2,08
10	0,178	1,96	2,15

Come si vede, l'accordo fra i valori della terza colonna, proporzionali, a meno di una costante, alla massa di gas sviluppata, e quelli della quarta colonna, che esprimono la radice cubica del numero di elementi di batteria impiegati, non è dei migliori ma, d'altra parte, gli esiti di questo esperimento dovevano essere non poco viziati dalle imprevedibili variazioni della forza elettromotrice degli elementi della batteria prodotte dagli effetti di polarizzazione (ricordiamo che si tratta di un esperimento del 1811 e che le pile depolarizzate vengono progettate da Daniell solo nel 1836).

Note bibliografiche

Per le indicazioni bibliografiche si utilizzano le abbreviazioni seguenti:

Annalen der Physik und Chemie: ADPC

Annales de Chimie et de Physique: ACP

Philosophical Transactions: PT

Memorie di matematica e di fisica della società italiana delle scienze (Accademia dei XL): Acc.XL

Mémoires de l'Académie des Sciences de Turin: MAST

Miscellanee medico-chirurgico-farmaceutiche: MMCF

Il Cimento: CIM

Ampère A.M., 1820, Dell'azione esercitata su una corrente elettrica da un'altra corrente, ecc. in *Opere*, a cura di Bertolini M., UTET, Torino, 1969

Ampère A.M., 1826, Teoria matematica dei fenomeni elettrodinamici unicamente dedotta dall'esperienza, in *Opere*, a cura di Bertolini M., UTET, Torino, 1969

Arnim L.A., 1801, Bemerkungen über Volta's Säule; Dritter Brief: Untersuchungen über der Leiter, pp. 270-283

Bass, F.H., 1803, Galvanische Versuche und Beobachtungen, die Leitung des Galvanisch-electrischen Fluidums betreffend, ecc., Vol. 14, pp. 26-37

Becquerel A.C., 1823, Du developpment de l'électricité par le contact de deux portions d'un même métal, ecc. ACP, Vol. 23, pp. 135-154

Becquerel A.C., 1826 a), Recherches sur les Effets électriques de contact produits dans les changemens de température, ecc., ACP, Vol. 31, pp. 371-392

Becquerel A.C., 1826 b), Du pouvoir conducteur de l'Electricité dans les métaux, ecc. ACP, Vol. 32, pp. 420-430

Becquerel A.C., 1831, Considerations générales sur les changemens qui s'opèrent dans l'état électrique des corp, ecc., ACP, Vol. 46, pp. 265-294

Becquerel A.C., 1847, Sur la conductibilité électrique des corps solides et liquides, ACP, Vol. 20, pp. 53-84

Biot J.B., 1804, Recherches physiques sur cette question: Quelle est l'influence de l'oxidation sur l' électricit, développée par la colonne de Volta, ACP, Vol. 47, pp. 5-45

Botto J.D., Avogadro A., 1839, Memoires sur les Rapports entre le Pouvoir conducteurs des Liquides, ecc., ACP, Vol. 71, pp. 5-20

Botto G.D., 1843, Expériences sur les rapports entre l'induction électromagnétique et l'action électrochimique, MAST, Vol. 5, pp. 239-261

Botto J.D., 1846, Sur les lois de la chaleur dégagée par la courant voltaïque, MAST, Vol. 8, pp. 275-292

Brown T.M., 1969, The electric current in early XIX century french physics, *Historical Studies in the Physical Sciences*, pp. 61-103

Carradori G., 1817, Istoria del galvanismo in Italia o sia della contesa fra Volta e Galvani, Firenze

Cavendish H., 1771, An attempt to explain some of the principal phaenomena of electricity, by means of an elastic fluid, PT, Vol. 61, pp. 584-677

- Cavendish H., 1776, An account of some Attempts to imitate the Effects of the Torpedo by Electricity, PT, Vol. 66, pp. 196-225
- Children J.G., 1815, Sur quelques experiences faites avec una grande batterie voltaique, Annales de chimie ou recueil de memoires concernant la chimie, Vol. 8, pp. 120-140
- Christie H., 1833, Experimental determination of the laws of magneto electric induction, ecc., PT, Parte I, pp. 95-142
- Colladon J.D., 1826, Deviation de l'aiguille aimantée par la courant, ecc., ACP, Vol. 33, pp. 62-75
- Configliachi P., 1833, Elogio scientifico di Alessandro Volta, Memorie dell'imperiale regio istituto del Lombardo Veneto, Vol. 4, pp. 29-39
- Coulomb C.A., 1785, [I] Construction et usage d'une balance électrique, Académie des Sciences, Paris, Mémoires, pp. 569-577
- Coulomb C.A., 1786, [IV] Où l'on démontre deux principales propriétés du fluide électrique, Académie des Sciences, Paris, Mémoires, pp. 67-77
- Coulomb C.A., 1788, [VI] Suite des recherches sur la distribution du fluide électrique entre plusieurs corps conducteurs, Académie des Sciences, Paris, Mémoires, pp. 617-705
- Dal Negro, 1804, Descrizione di un nuovo elettrometro ed alcune esperienze relative alla carica della colonna voltiana, Acc.XL, Vol.11, pp. 623-634
- Daniell F., 1836, On voltaic combinations, PT, Parte I, pp. 107-124
- Daniell F., 1842, Sixth letter on Voltaic Combinations, PT, Parte II, pp. 137-155
- Davy H., 1822, Recherches sur les phénomènes magnétiques produits par l'électricité, ecc., Journal de physique, de chimie et d'histoire naturelle, Vol. 94, pp. 226-257
- Davy H., 1826, On the relation of electrical and chemical changes, PT, Parte II, pp. 383-422
- Davy M., 1848, Recherches expérimentales sur l'électricité voltaique, ACP, Vol. 22, pp. 257-278
- De La Rive A., 1827, Recherches sur une propriété particuliere des conducteurs metalliques de l'electricité, ACP, Vol. 36, pp. 34-49
- De La Rive A. 1828, Analyse des Circonstances qui déterminent le sens et l'intensité du courant électrique dans un élément voltaique, ACP, Vol.37, pp. 225-286
- De La Rive A., 1829 a, Recherches sur les effets calorifiques de la pile, ACP, Vol.40, pp. 371-385
- De La Rive A., 1829 b, Ueber die Umstände, welche die Richtung und Stärke des electrischen Stromes in einer galvanischen Kette bedingen, ADPC, Vol.15, pp. 122-144
- De La Rive A., 1836 a, Lettre de M. Auguste De La Rive a M. Arago sur l'Electricité voltaique, ecc., ACP, Vol.61, pp. 38-52
- De La Rive A., 1836 b, Ueber die voltasche Elektrizität, ADPC, Vol.37, pp. 225-238
- De La Rive A., 1837, Untersuchungen über die voltasche Elektrizität, ADPC, Vol.40, pp. 355-382
- De La Rive A., 1856, Traité d'electricité, Tome duxieme
- Du Fay C.F., 1733 a), Second mémoire sur l'électricité, Académie des Sciences, Paris, Mémoires, pp. 73-84
- Du Fay C.F., 1733 b), Troisième mémoire sur l'électricité, Académie des Sciences, Paris, Mémoires, pp. 233-254
- Erman XX, 1801, Ueber die electroskopischen Phänomene der Voltaschen Säule, ADPC, Vol.8, pp. 197-208

- Faraday M., 1821, 1822, Historical Sketch of Electro-magnetism, *Annals of Philosophy*, 1821, pp.195-200; 274-290; 1822, pp. 107-121
- Faraday M., 1832, Experimental Researches in electricity, First series, On the induction of electric Currents, ecc. PT, Part I, pp. 125-162
- Faraday M., 1833 a, Experimental researches in electricity, third series, Identity of Electricities derived from different sources, ecc. PT, PART I, pp. 23-54
- Faraday M., 1833 b, Experimental researches in electricity, fifth series, On Electro-chemical Decomposition, ecc., PART II, pp. 675-710
- Fechner G.Th., 1829, Drei Versuchsreihen, welche die elektromotorische Kraft und die einzelnen Elemente des Leitungswiderstandes betreffen, in *Das Grundgesetz des elektrischen Stromes*, Herausgegeben von C. Piel, Leipzig, 1938, pp. 30-38
- Fechner G.Th., 1831, Maassbestimmungen über die galvanische Kette
- Fechner G.Th., 1837, Rechtfertigung der Contact-Theorie des Galvanismus, ADPC, Vol.42, pp. 481-516
- Fechner G.Th., 1838, Einige Versuche zur Theorie der Galvanismus, ADPC, Vol.43, pp. 433-440
- Fourier J.B., 1822, Théorie analytique de la chaleur, Parigi, in *Oeuvres de Fourier*, Ed. Gauthier-Villars, Parigi, 1888
- Gay Lussac Thenard, 1811, Untersuchungen über die elektrische Säule, ecc.; Vol.38, pp. 121-160
- Gray S., 1731, A letter to Cromwell Mortimer, containing several Experiments concerning Electricity, PT, Vol. 37, pp. 18-44
- Gilbert, 1815, Einige historische Nachrichten von den trocknen electrischen Säulen der Herren De Luc und Zamboni, ADPC, Vol.49, pp. 35-46
- Guericke Otto Von, 1672, *Experimenta Nova Magdeburgica*, Amsterdam
- Harris W.S., 1827, On the relative powers of various metallic substances as conductors of electricity, PT, PART I, pp. 18-24
- Hauksbee F., 1716, *Esperienze fisico meccaniche*, Firenze
- Heilbron J.L., 1979, *Electricity in the 17th and 18th Centuries*, University of California Press
- Home R.W., 1976, Aepinus, the Tourmaline Crystal and the theory of Electricity and Magnetism; *ISIS*, Vol.67, pp. 21-30
- Jacobi M., 1839, Ueber das chemische und das magnetische Galvanometer, ADPC, Vol. 48, pp. 26-57
- Lenz E., 1835, Ueber die Leitungsfähigkeit der Metalle für die Elektrizität bei verschiedenen Temperaturen, ADPC, Vol.34, pp. 418-437
- Lenz E. 1839 a, Bemerkungen ueber einige Punkte aus der Lehre vom Galvanismus, ADPC, Vol. 47, pp. 584-593
- Lenz E. 1839 b, Ueber die Eigenschaften der magneto - elektrischen Ströme. Eine Berichtigung des Aufsatzes von Hrn. De La Rive über denselben Gegenstand, ADPC, Vol.48, pp. 385-423
- Majocchi G.A., 1838, Dell'influenza che ha esercitato sullo scibile umano la scoperta della pila di Volta, *Opuscoli fisici*, Vol.3, pp.1-15, Pavia, Biblioteca Universitaria
- Marazzini P., Tucci P. (a cura di), 1996, *Michael Faraday, Saggio storico di elettromagnetismo*, CUEN, Napoli
- Marechaux P., 1803, in *Auszüge aus Briefen an der Herausgeber*, ADPC, Vol.14, pp. 116-122
- Marianini E., 1827, Ueber das Verhältniss zwischen magnetischer Kraft und Zahl der Plattenpaare einer Voltaschen Batterie und dessen Ursachen, ADPC, Vol.9, pp. 165-169

- Marianini E., 1829, Memoire sur une analogie qui existe entre la propagation de la lumiere et celle de l'électricité, ecc., ACP, Vol.42, pp. 131-144
- Marianini E., 1836-37, Sulla teoria degli elettromotori, Acc.XL, Vol.21, pp. 205-238
- Marianini S. 1862-66, Sulla probabile esistenza di una nuova analogia fra l'elettricità e la luce; Acc.XL, Vol.1,2, pp. 303-314
- Matteucci C. 1835, Sur la Force électro - chimique de la pile, ACP, Vol. 58, pp. 75-80
- Matteucci C., 1836, Note sur la Propagation du Courant Electrique à travers les Liquides et les Lames Métalliques, ACP, Vol.63, pp. 256-264
- Matteucci C., 1843, Teoria di Ohm sulla pila, MMCF, Anno primo, parte seconda, pp. 88-94
- Matteucci C., 1844 a, Raguaglio di alcuni nuovi istrumenti, CIM, pp. 111-123
- Matteucci C., 1844, b, Sulla conducibilità della terra per la corrente elettrica, CIM, pp. 203-209
- Maxwell J.C., 1873, Trattato di elettricità e magnetismo, a cura di Agazzi E., UTET, Torino, 1973
- Mc Knight, 1966, Laboratory Notebooks of G.S. Ohm; a case study in Experimental Method, Am. Journal of Physics
- Memorie dell'Istituto Nazionale Italiano, 1806; Classe di Fisica e Matematica; Prefazione; Tomo primo, parte prima
- Munck P.S., 1838, Untersuchungen über Elektrizität, mit besonderer Rücksicht auf die Theorie der galvanischen Kette, ADPC, Vol.43, pp. 193-227
- Nicholson W., 1800, Beschreibung des neuen electrischen oder galvanischen Apparatus Alexander Volta's und einiger wichtigen damit angestellten Versuche, ADPC, Vol. 6, pp. 340-359
- Nicholson W., 1806, Instrumente, durch welche die beiden Arten von Electricität, oder die Richtung des electrischen Stroms erkannt werdwn kann, ADPC, Vol. 23, pp.421-425 (trad. da Journal of natur. philosop., 1801, Oct. p. 121)
- Nobili L., 1828, Comparaison entre les deux galvanomètres les plus sensibles, la grenouille et le multiplicateur à deux aiguilles, suivie quelques résultats nouveaux, ACP, Vol.38, pp. 224-245
- Nobili L., 1829, Sopra un galvanometro con nuove aggiunte, Acc.XL, Vol.20, pp. 173-185
- Nollet J.A., 1754, Conjectures sur le causes de l'Electricité des Corp, Memoires de l'Academie Royale, pp. 107-151
- Oersted XX, 1820, Sur un effet que le courant de la Pile excité dans l'Aiguille aimantée, Journal de Physique, de Chimie, Vol. XCI, pp. 72-76
- Ohm S.G., 1825 a, Vorläufige Anzeige des Gesetzes, nach welchem Metalle die Kontaktelektricität leiten, ADPC, Vol.4, pp. 79-88
- Ohm S.G., 1825 b, Vorläufige Anzeige des Gesetzes, nach welchem Metalle die Kontaktelektricität leiten, Schweigger Journal für Chemie und Physik, Vol.44, pp. 110-118
- Ohm S.G., 1826 a, Bestimmungen des Gesetzes, nach welchem Metalle die Kontakt-Elektrizität leiten, ecc. Schweiggers Journal für Chemie und Physik, Vol.46, pp. 137-166
- Ohm S.G., 1826 b, Versuch einer Theorie der durch galvanische Kräfte hervorbrachten elektroskopischen Erscheinungen, ADPC, Vol.6, pp.459-469, Vol.7, pp. 45-54
- Ohm S.G., 1827, Teoria matematica del circuito galvanico; traduzione di Perugia A., Tipografia Vannucchi, 1847

- Olson R.G., 1969, Sir J. Leslie and the law of Electrical Conductions in Solids, *Am. Journal of Physics*, Vol. 37, pp. 190-194
- Pacinotti L., 1843, Esperienze sull'azione del circuito nell'intensità della corrente elettrica, *Miscellanea di chimica, fisica e storia naturale*, Anno I, parte seconda, pp. 129-148
- Parrot G.F., 1819, Zusatz (Volta's Theorie der galvanischen Electricität betreffend, *ADPC*, Vol.61, pp. 288-293
- Peltier J., 1839, Memoire sur la Formation des Tables des Rapports qu'il y a entre la Force d'un Courant électrique, ecc., *ACP*, Vol.71, pp. 225-313
- Pfaff J.F., 1816, Ueber die sogenannten trocknen galvanischen Säulen, *ADPC*, Vol.52, pp. 108-114
- Pfaff J.F., 1829, Defense de la théorie de Volta, relative a la production de l'électricité par la simple contact, contre les objections de M. le professeur A. De La Rive, *ACP*, Vol.41, pp. 236-247
- Pfaff J.F., 1837, Notiz über Becquerel's chemisch wirkende galvanische Kette, die keine Temperaturerhöhung hervorbringt, *ADPC*, Vol.40, pp. 443-446
- Poggendorf, 1839, Ueber die Gesetzmässigkeit in der chemischen Wirkung der Volta'schen Batterie, *ADPC*, Vol. 47, pp. 123- 131
- Pouillet C., 1829, Versuche über die Elektrizitätsleitung in verschiedenen Metallen, *ADPC*, Vol.15, pp. 91-95
- Pouillet C., 1837, Ueber die Volta'sche Säule und über das allgemeine Gesetz für die Intensität der Ströme, ecc.; *ADPC*, Vol.42, pp. 281-306, traduzione da *Compt. Rendus*, Vol.4, p. 267
- Priestley J. 1771, *Histoire de l'électricité*, M.J. Brisson, Paris, Vol. III
- Richtie W., 1829, Experiments and observations on electric conduction, *PT*, Parte II, pp. 361-366
- Richtie W., 1832, Experimental researches in Voltaic electricity and electromagnetism, *PT*, Parte II, pp. 279-298
- Ridolfi L., 1847, Dell'equilibrio dinamico dell'elettricità in un corpo percorso dalla corrente voltiana, *CIM*, pp. 193-219
- Schagrin M., 1963, Resistance to Ohm's Law; *American Journal of Physics*, Vol.31, pp. 536-547
- Schweigger J.S.C., 1806, Versuche mit einem Electromotor eigenthümlicher Art, welche gegen die Theorie Volta's zu streiten scheinen, *ADPC*, Vol.22, pp.407-414
- Singer G.J., 1813, Wie nimmt die kraft einer Volta'schen Batterie, Draht zu schmelzen, mit der Menge der Plattenpaare zu? *ADPC*, Vol. 44, pp. 229-234 (traduz. da *Nicholson's Journal*, 1811, Maggio)
- Sömmering S.Th., 1811, Bemerkungen über Herrn Prem. Lieut. C.J.A. Prätorius Aufsatz: über die Unstatthaftigkeit der elektrischen Telegraphen für weite Fernen; *ADPC*, Vol.39, pp. 478-482
- Sudduth W., 1980, The voltaic pile and electro - chemical theory in 1800, *Ambix*, Vol. 27, Part I, pp. 26-35
- Sylvester C., 1806, Die galvanischen Erscheinungen stimmen nicht mit der Annahme zweier Electricitäten und des Wassers als chemisch-einfach überein, *ADPC*, Vol.23, pp.441-447 (traduz. da *Nicholson's Journal*, Vol.9, p. 179, Vol.10, p.107)
- Vassalli Eandi A.M., 1803; Saggio sopra il fluido galvanico; *Memorie di matematica e di fisica della società italiana delle scienze (Accademia dei XL)*, Tomo 10, parte II, pp. 733-765
- Volta A., 1769, La forza attrattiva del fuoco elettrico e i fenomeni che ne dipendono, in *Opere*, a cura di Gliozzi M., UTET, Torino, 1973

- Volta A., 1787, Lettera del Sig. Don A. Volta sulla meteorologia elettrica; lettera prima; 28 Luglio, 27 Agosto 1787 - Gennaio, Febbraio 1788; in Opere, a cura di Gliozzi M., UTET, Torino, 1973
- Volta A., 1792 a), Dalla memoria prima sull'elettricità animale, in Opere, a cura di Gliozzi M., UTET, Torino, 1973
- Volta A., 1792 b), Memoria seconda sull'elettricità animale, 14 Maggio 1792; in Opere, a cura di Gliozzi M., UTET, Torino, 1973
- Volta A., 1799, L' elettroscopio condensatore in una lettera a Lorenzo Mascheroni, in Opere, a cura di Gliozzi M., UTET, Torino, 1973
- Volta A., 1800, Sull'elettricità eccitata dal semplice contatto di sostanze conduttive di diversa natura, in Opere, a cura di Gliozzi M., UTET, Torino, 1973
- Volta A., 1801, Memoria del Prof. A. Volta sull'identità del fluido elettrico col fluido galvanico, in Opere, a cura di Gliozzi M., UTET, Torino, 1973
- Volta A., 1802, Lettera a Martino Van Marum, Giugno 1802, in Opere, a cura di Gliozzi M., UTET, Torino, 1973
- Walker A., 1825 a, Ueber die Ursachen, welche die Grösse der elektrischen Spannung bestimmen, ADPC, Vol.4, pp. 89-108
- Walker A., 1825 b, Ueber die Ursachen, welche Elektrizitäts - Erregung bewirken, ADPC, Vol.4, pp. 443-458
- Wheatstone C., 1843, On account of several new Instruments and Processes for determining the Constants of a Voltaic Circuit, PT, Parte II, pp. 303-327
- Wilkinson C., 1805, Wie nimmt die Kraft Galvani'scher Apparate, Metalle zu verbrennen, mit der Menge und mit der Grosse der Platten zu?, ADPC, Vol.19, pp.45-54 (traduz. da Journal of Nicholson, Vol.7, p. 206)
- Vorsselman de Heer, 1839, Bemerkungen über die thermische Wirkung elektrischer Entladung, ADPC, Vol.48, pp. 292-300