

Anno 2000: Volta elettrofisiologo

200 anni dopo l'invenzione della pila voltaica

MARCO PICCOLINO

Due secoli fa, il 20 Marzo del 1800, Alessandro Volta, professore di Fisica all'Università di Pavia, e membro della Royal Society di Londra, indirizzò da Como sua città natale, una lettera, scritta in francese, a Sir Joseph Banks, presidente della Royal Society in cui annunciava l'invenzione di un strumento capace di produrre elettricità 'per mezzo del semplice contatto di sostanze conduttive di specie differenti' [Volta, 1800] (si veda Fig. 1). Questo strumento, che sarà poi denominato "batteria" o "pila voltaica", segnò l'avvento di una nuova epoca nello sviluppo della fisica moderna, e, con le sue applicazioni, era destinato a cambiare in un modo importante lo stile di vita dell'umanità.

Un anno più tardi, in una lettera indirizzata ad un ignoto corrispondente (probabilmente l'abate torinese Anton Maria Vassalli), Volta si lamentava del fatto che le ricerche che erano state stimulate dalla sua invenzione avevano avuto come oggetto quasi esclusivamente gli effetti chimici del suo strumento, e che gli studiosi, egli notava, 'sembrano far poco conto degli altri effetti che voglion dirsi elettrico-fisiologici, che sono per altro niente meno singolari e sorprendenti da quanto verrò accennandovene'. E proseguiva dicendo: 'Io all'incontro mi occupai dappprincipio in gran parte intorno a questi...' [Volta, 1923].

In una memoria scritta nel 1802, dopo aver discusso degli effetti fisiologici di stimoli elettrici di durata variabile ottenuti con l'uso della sua batteria, Volta sottolineava il fatto che molte applicazioni interessanti potevano essere fatte di questi ed altri esperimenti, opportunamente variati, nel campo della medicina fisiologica e pratica [Volta, 1923].

L'interesse di Volta per i problemi medici e fisiologici connessi allo studio dell'elettricità è stato messo in ombra da una certa tradizione che ha voluto vedere nello scienziato di Pavia esclusivamente il fisico, in senso moderno, contrapposto al fisiologo e medico, lo scienziato bolognese Luigi Galvani. Come è noto, una vivace polemica contrappose nell'ultima parte del Settecento questi due grandi studiosi. La polemica verteva essenzialmente sulla natura e origine dell'elettricità responsabile delle contrazioni muscolari indotte sperimentalmente in preparati di rana con archi metallici, utilizzati per connettere nervi e muscoli [Piccolino, 1997; Piccolino, 1998].

Secondo Galvani le contrazioni erano dovute ad una elettricità intrinseca all'organismo, presente in stato di "sbilancio" o "disequilibrio" tra interno ed esterno delle fibre muscolari, elettricità pronta a mettersi in moto in seguito a sollecitazioni fisiologiche o sperimentali. Lo studioso bolognese indicava questa elettricità come "elettricità animale", utilizzando un termine introdotto nella letteratura scientifica del 700 dal francese Pierre Bertholon. Volta, da parte sua, riteneva invece che l'elettricità responsabile delle contrazioni muscolari delle rane derivasse dai metalli dissimili di cui erano costituiti di solito gli archi metallici utilizzati per connettere i nervi e i muscoli delle preparazioni sperimentali. (si veda l'inserito).

La tradizione storiografica che, nella controversia tra Galvani e Volta, ha teso ad esasperare il contrasto tra due concezioni considerate come irriducibilmente contrapposte, quella fisica quella medico-fisiologica, ha reso difficile una corretta valutazione dell'opera scientifica di Galvani, e, allo stesso tempo, ha impedito di individuare alcuni degli affascinanti temi che l'elettrofisiologia, la scienza sorta dalle ricerche dello studioso bolognese, si trovò ad affrontare fin dal suo nascere. Inoltre essa ha anche impedito di porre nel giusto rilievo l'interesse di Volta per i problemi fisiologici e medici, e il contributo importante che lo scienziato di Pavia dette in campi che esulavano da quelli considerati più strettamente pertinenti alla fisica. Secondo questa tradizione l'invenzione della batteria elettrica da parte di Volta avrebbe costituito l'evento conclusivo nella polemica tra Galvani e Volta, sanzionando la vittoria di quest'ultimo, e di conseguenza la prevalenza del punto di vista fisico sulla concezione fisiologica [Polvani, 1942; Pera, 1986].

Non v'è dubbio che l'invenzione della batteria costituì una pietra miliare nella storia della scienza e della tecnologia, e che essa contribuì ad orientare quasi esclusivamente verso una direzione fisico-chimica l'ondata di studi messa in moto nel 1791 dalla prima pubblicazione degli studi di Galvani sul meccanismo della contrazione muscolare. Come Volta aveva notato, dopo che egli aveva reso pubblica la sua invenzione, c'era stato inizialmente un proliferare di studi sugli effetti chimici della batteria. Tra questi effetti particolarmente notevole era stato la decomposizione dell'ac-

qua ottenuta per la prima volta da Nicholson in Inghilterra. All'inizio dell'800, la fase più eccitante del progresso della scienza elettrica fu marcata proprio dallo studio degli effetti chimici della batteria voltaica e dei fenomeni chimici che sono alla base del suo funzionamento. Particolarmente importanti furono le ricerche di Davy, e in seguito di Faraday, suo successore alla Royal Institution di Londra, dove fu allestita una pila voltaica enorme (di oltre duemila elementi). Comunque l'interesse di Volta per gli aspetti fisiologici degli effetti dell'elettricità sull'organismo animale era genuino, e i risultati che egli ottenne in questo campo non sono di minore importanza, non solo perché portarono all'invenzione della batteria, ma anche per la loro intrinseca rilevanza biologica.

Volta aveva iniziato i suoi studi sugli effetti dell'elettricità nella contrazione muscolare nel 1792, dopo aver letto il *De Viribus* l'opera di Galvani sull'argomento appena pubblicata (si veda l'inserito). Comunque il suo interesse per il coinvolgimento dell'elettricità nella "economia animale" era precedente alla pubblicazione dell'opera dello studioso bolognese, come è documentato da una lettera che Volta aveva indirizzato dieci anni prima ad una sua amica francese, Mme de Nanteuil, figlia del prefetto di Parigi [Volta, 1918].

In questa lettera Volta discuteva la possibilità dell'esistenza di una genuina "elettricità animale", cioè di un'elettricità che "fosse associata in modo essenziale alla vita, che dipendesse da qualcuna delle funzioni dell'economia animale". A suo dire, una simile espressione non era adatta per quelle forme di elettricità che possono essere prodotte "strofinando la schiena di un gatto, o strigliando un cavallo o pettinandosi i capelli", e neppure per l'elettricità che "si è vista nascere come spontaneamente dalle piume di un pappagallino vivo". Ad ogni modo, egli aggiungeva, l'esistenza di una genuina elettricità animale è stata ora scoperta nei pesci elettrici da Walsh, che con i suoi esperimenti ha potuto verificare l'ipotesi della natura elettrica della scossa da essi prodotta [Walsh, 1773]. Nonostante questi esperimenti era difficile comunque figurarsi, notava Volta, come un animale potesse riuscire ad accumulare una grande quantità di fluido elettrico nel suo organismo e muoverlo poi con la sua volontà; ed era anche difficile capire come egli potesse produrre la sua scarica nell'acqua (un liquido esso stesso conduttivo) e dirigerla verso la preda. Per quello che concerne queste ultime difficoltà, egli soggiungeva, esse possono essere spiegate considerando che l'acqua è in effetti un conduttore relativamente cattivo: in ambiente acquoso la scarica colpirebbe la preda perché l'elettricità prenderebbe la via preferenziale del suo corpo, che è miglior conduttore del liquido in cui la preda è immersa. Con queste parole, Volta stava facendo riferimento alla spiegazione della scarica del pesce elettrico data da Cavendish

[Cavendish, 1776], una spiegazione che aveva portato lo scienziato inglese a costruire una *torpedine artificiale* ("artificial torpedo"), capace di produrre uno shock elettrico quando immersa in acqua (Fig 2). Volta concludeva la sua lettera dicendo che egli condivideva con Cavendish e Walsh l'idea che la scarica della torpedine implicava una grande quantità di fluido elettrico che comunque era dotato di una bassa *tensione*. Questo era un aspetto importante del problema. La scarica dei pesci elettrici non sembrava corrispondere da vicino alle scariche elettriche alle quali erano abituati gli scienziati del 700 con uso delle macchine elettriche e delle bottiglie di Leyda (i primi condensatori). A differenza di questi strumenti artificiali, i pesci potevano provocare forti commozioni ed altri effetti fisiologici (le anguille elettriche potevano addirittura uccidere grossi animali), ma la loro scarica non produceva di solito i segni considerati tipici di una forte elettricità, come scintille, scoppiettii, "aure" e "venti elettrici". Fino a Walsh, queste differenze ponevano difficoltà abbastanza serie all'ipotesi della natura elettrica della scossa prodotta da questi pesci. D'altra parte, era stato dimostrato che un apparato costituito da un gran numero di bottiglie di Leyda ("batteria"), caricate debolmente e connesse in parallelo, poteva produrre una scarica simile a quella della torpedine, sia per l'assenza di tipici segni elettrici che per la forte efficacia fisiologica. Volta era ben preparato ad accettare questo modo di vedere, dal momento che egli aveva sviluppato l'idea che l'efficacia dell'azione elettrica dipendeva da due fattori: un fattore quantitativo, l'entità del fluido elettrico, (quello che ora indichiamo come carica elettrica) ed un fattore intensivo, che egli indicava come "tensione" (e che ora noi indichiamo più comunemente come potenziale o "voltaggio"). Le macchine elettriche producevano deboli effetti elettrici perché, nonostante la loro tensione molto elevata, esse mettevano in moto piccolissime quantità di carica. La scarica dei pesci elettrici, invece, era potente nei suoi effetti fisiologici a causa dell'enorme quantità di fluido elettrico messo in moto, anche se, per la tensione relativamente bassa, essa non era accompagnata dai tipici segni elettrici.

Alcuni dei temi trattati nella lettera a Mme de Nanteuil ritorneranno poi nella lettera a Joseph Banks sull'invenzione della batteria, lettera che egli scrisse dopo otto anni di lavoro sperimentale estremamente intenso e ricco di risultati. Nella lettera a Banks Volta indicava l'apparato da lui costruito come "*organe électric artificiel*" (una denominazione che ricordava l'espressione "artificial torpedo" di Cavendish). Questo per sottolineare che essa era "simile in fondo - diceva Volta - come io farò vedere, e persino per come io l'ho costruita, nella forma. all'*organo elettrico naturale*, della torpedine, dell'anguilla tremante, &c ben più che alla bottiglia di

Leyda, e alle batterie elettriche conosciute”. Essendo costituita da un’alternanza di dischi di due differenti metalli (rame o stagno, o argento e zinco), con interposti dischi umidi, la batteria aveva una chiara somiglianza strutturale con l’organo elettrico naturale dei pesci, fatto anch’esso di dischi impilati. Per rendere la somiglianza con l’anguilla elettrica ancora più evidente, Volta si spingeva a dire che i dischi dell’organo artificiale “potrebbero essere riuniti insieme con dei fili metallici pieghevoli o con molle a spirale, ed essere ricoperti per tutta la loro lunghezza da una pelle, e terminare in una testa e in una coda dalla forma opportuna &c.”.

Tra l’organo elettrico artificiale e quello naturale c’era per Volta un’altra e più profonda somiglianza, di tipo operativo. A differenza di ogni apparato artificiale conosciuto, e a somiglianza unicamente con l’organo elettrico naturale, il nuovo apparato era capace di produrre e mantenere un movimento di fluido elettrico, senza essere costituito al suo interno da materiali isolanti. E’ importante sottolineare qui come la possibilità illustrata dal dispositivo messo a punto da Volta di una “elettricità eccitata dal mero contatto di sostanze conduttive” (come recita il titolo stesso della lettera a Banks) rimuoveva un’importante difficoltà all’idea che l’elettricità potesse essere prodotta ed accumulata nei tessuti dell’organismo, noti per essere costituiti da materiali conduttivi. Questo era proprio una delle argomentazioni utilizzate attorno alla metà del 700 da uno dei più grandi fisiologi dell’epoca, Albrecht von Haller per controbattere l’ipotesi che la conduzione nervosa e l’eccitabilità muscolare potessero dipendere dal flusso di un fluido elettrico. Haller e i suoi seguaci (tra i quali particolarmente importante, in Italia, Felice Fontana) infatti sostenevano che non poteva esistere nell’organismo il disequilibrio elettrico necessario a permettere il flusso della materia elettrica, proprio perché i tessuti dell’organismo erano conduttivi e quindi virtualmente in grado di determinare il dissipamento di ogni disequilibrio o sbilancio elettrico che in essi si venisse a produrre.

Secondo Volta, v’erano altre importanti somiglianze operative tra l’organo elettrico artificiale e quello naturale. Sebbene particolarmente potente nel produrre commozioni e altri effetti fisiologici, l’organo artificiale era poco efficace nel produrre i segni tipici della scarica delle macchine elettriche. Questo era dovuto, secondo lo scienziato di Pavia, al fatto che in entrambi i casi grandi quantità di fluido elettrico erano mosse ad una tensione relativamente bassa. Inoltre l’apparato artificiale poteva “agire incessantemente senza intermissioni...senza essere stato in precedenza caricato” allo stesso modo dei pesci elettrici che potevano produrre scosse ripetitive senza esaurire la loro elettricità”.

Il modo in cui Volta spinge la somiglianza tra l’organo elettrico artificiale e quello naturale è stato interpretato come evidenza che egli mirava a ridurre nell’ambito del dominio della fisica un meccanismo biologico, mostrando la somiglianza di fondo che esiste tra fenomeni biologici e fenomeni fisici [Polvani, 1942]. Questo con lo scopo di mostrare che l’elettricità della torpedine e dell’anguilla elettrica è in qualche modo un tipo di elettricità fisica, alla quale sarebbe stato improprio assegnare la denotazione di “elettricità animale”, una denotazione che egli aveva invece considerato del tutto pertinente circa vent’anni prima.

E’ forse opportuno ricordare qui ciò che Volta scrisse in una Memoria pubblicata nel 1802 [Volta, 1923]. Nel discutere come materiali conduttori diversi potevano essere disposti insieme per produrre elettricità con la sua batteria, Volta notava l’efficacia dell’assemblaggio di un metallo (conduttore di 1^a classe secondo la sua classificazione) con due liquidi differenti (conduttori di 2^a classe), in aggiunta alla combinazione usuale di due differenti metalli con un liquido. Si domandava poi se una forza elettro-motrice potesse essere anche prodotta mettendo insieme tre conduttori della stessa classe (per esempio tre differenti metalli o tre liquidi differenti). Riconosceva di non essere ancora riuscito a produrre alcun sensibile segno elettrico da combinazioni di questo tipo, ma aggiungeva: “Eppure se non l’arte, la natura ha trovato il modo di riuscirvi negli organi elettrici della Torpedine, dell’Anguilla tremante (*Gymnotus electricus*), ec. costrutti di soli conduttori di questa seconda classe umidi, senza alcuno della prima, senza alcun metallo; e forse non siamo lontani che anche l’arte vi possa arrivare”. Dunque la natura (nel caso specifico il regno animale) poteva aprire al fisico possibilità insospettite che egli avrebbe dovuto imitare con la sua arte.

Riferita all’opera di Volta, l’espressione “elettrico-fisiologico” non riguarda solo la possibilità di riprodurre in un apparato fisico i fenomeni elettrici degli organismi viventi. Nel corso degli studi che lo portarono all’invenzione della batteria, Volta fece una serie di importanti osservazioni di rilievo propriamente fisiologico, osservazioni che sono state in larga misura ignorate dalla tradizione scientifica. Questo è forse anche la conseguenza dei limiti artificiali tra fisica e fisiologia eretti da una attitudine culturale, scarsamente consapevole della difficoltà obbiettiva di tracciare i confini tra diversi settori della scienza nel diciottesimo secolo.

Volta ha anticipato di circa mezzo secolo una fondamentale nozione sulla organizzazione funzionale del sistema nervoso, la dottrina delle “energie nervose specifiche” di Johannes Müller [Müller, 1844]. Questa dottrina stabilisce che l’effetto della stimolazione di un nervo dipende dal tipo di nervo stimolato e non dal

tipo di stimolo usato per la stimolazione. Se stimoli differenti sono utilizzati per l'occhio o il nervo ottico, come per esempio irritazioni meccaniche o chimiche, o la luce e l'elettricità, il risultato sarà sempre in ogni caso, una sensazione luminosa. Lo stesso vale per altri tipi di sensazioni, come il gusto, l'udito, le sensazioni somatiche. Nella formulazione di Volta, questa legge della costanza degli effetti della stimolazione nervosa comprende anche i nervi motori. Nella Memoria seconda sull'elettricità animale pubblicata nel maggio del 1792 [Volta, 1918], durante il periodo iniziale delle sue ricerche elettrofisiologiche, Volta scrive:

“Si fa dunque manifesto, che quale è il nervo stimolato, quale la sua natural funzione, tale è l'effetto, che corrispondentemente ne siegue, di sensazione cioè, e di moto, quando quella virtù nervea è messa in esercizio dal fluido elettrico che fa incursione”. Poco sopra, nella stessa Memoria, egli aveva menzionato l'esperimento in cui produceva una sensazione gustativa stimolando la lingua con l'arco bimetallico. Questo esperimento, variato in una molteplicità di forme, sarà poi spesso riportato in pubblicazioni successive o in lettere private.

Da una comunicazione che egli indirizzò a Tiberio Cavallo, uno scienziato italiano che risiedeva a Londra, ed era anche lui membro della Royal Society, apprendiamo che Volta aveva condotto questo esperimento inizialmente con l'intenzione di produrre una contrazione muscolare in un uomo vivo utilizzando l'arco bimetallico [Volta, 1918]. La lingua sembrava particolarmente adatta allo scopo per la sua natura muscolare, la sua accessibilità e per la bassa resistenza elettrica della sua superficie mucosa. In contrasto con le sue attese, comunque, Volta non era riuscito a produrre alcuna contrazione utilizzando un arco di stagno e argento, ma aveva invece percepito un evidente sapore 'acido'. Dopo l'iniziale delusione, egli interpretò questo effetto come dovuto alla stimolazione delle fibre nervose provenienti dalle papille gustative. In seguito tentò un esperimento analogo sull'occhio e riuscì a produrre con l'arco bimetallico una sensazione luminosa.

Volta si sforzò anche di stimolare il nervo acustico e il nervo olfattivo. All'inizio non riuscì a produrre alcuna sensazione acustica con il suo arco bimetallico, ma, dopo l'invenzione della batteria, poté produrre “la sensazione di un suono, o piuttosto di un rumore” applicando alle due orecchie i due poli di una batteria di 30-40 elementi argento-zinco. Volta non riuscirà però mai ad eccitare una sensazione olfattiva, applicando lo stimolo elettrico all'interno del naso (e simile insuccesso toccò anche a molti fisiologi dell'800), neppure utilizzando l'elettricità di una potente batteria di molti elementi. Egli riuscì comunque ad evocare sensazioni somatiche applicando la sua “elettricità metallica” alla pelle o a superfici mucose. Sebbene egli

indicasse inizialmente queste sensazioni come tattili, si rese poi conto che esse erano piuttosto un particolare tipo di sensazioni dolorose. Esse divenivano particolarmente acute e difficili da tollerare quando lo stimolo veniva applicato ad una ferita o ad una piaga. Dopo l'invenzione della pila Volta poté rendersi conto che la sensazione dolorosa aumentava con la potenza della batteria, e con batterie di 20 elementi poteva essere tollerata solo per pochi istanti.

Nei suoi esperimenti elettrofisiologici Volta mostra una particolare abilità nell'ottenere informazioni importanti utilizzando dispositivi semplici. Una sensazione gustativa, egli dice, può essere evocata utilizzando due monete, una d'argento e una di rame. Una sensazione visiva può essere prodotta utilizzando un foglietto smussato di stagno (o una lamina di zinco) e un cucchiaino d'argento: lo stagno è posto a contatto con la congiuntiva dell'occhio e il cucchiaino usato per stabilire un contatto con l'interno della bocca.

Volta amava combinare effetti fisiologici differenti in un singolo esperimento, mettendo, per esempio, uno dei due metalli in contatto con la punta della lingua e l'altro con la congiuntiva. Al momento che i due metalli erano connessi insieme, egli provava sia la sensazione luminosa che quella visiva. L'esperimento poteva essere reso ancora più complesso formando una catena che includeva, oltre all'occhio e alla lingua dello sperimentatore, anche una preparazione di rana. Alla chiusura del circuito si producevano, oltre alle due sensazioni, anche la contrazione dei muscoli della rana. Con disposizioni opportune Volta poteva produrre la sensazione gustativa in un soggetto e quella visiva in un altro, oltre ad evocare la contrazione della rana (Fig.3). Questo modo di combinare effetti diversi in un singolo esperimento può sembrare espressione di un certa tendenza spettacolare tipica della scienza del 700, un secolo in cui le dimostrazioni scientifiche venivano spesso fatte al di fuori del laboratorio, per il divertimento degli spettatori, di solito membri delle classi sociali elevate e spesso dame aristocratiche. Ma in Volta esso riflette piuttosto la tendenza a catturare l'essenziale di un risultato scientifico, e a renderlo facile da mostrare e riprodurre. Dobbiamo considerare, tra l'altro, che nel 700 la scienza elettrica non si prestava facilmente alla misurazione, e non v'erano modi semplici di registrare e documentare i risultati sperimentali. **

Nella comunicazione dell'invenzione della batteria Volta invita il lettore a ripetere uno dei suoi “esperimenti multipli” traendo profitto della grande potenza del nuovo strumento:

“Ma la più curiosa di tutte queste esperienze, è di tenere la lamina metallica stretta tra le proprie labbra, e a contatto con la punta della lingua; infatti, quando poi si arriva a completare il circolo, nel modo appropriato,

si eccita in una volta, se l'apparecchio è sufficientemente grande e in buon ordine, e la corrente elettrica abbastanza forte e in buon corso, una sensazione di luce negli occhi, una convulsione nelle labbra, e persino nella lingua, una puntura dolorosa sulla sua punta, seguita in ultimo dalla sensazione di sapore”.

Lungi dall'adottare esclusivamente un punto di vista “elettro-fisico”, come si è voluto sostenere [Pera, 1986], nei suoi studi Volta operò uno scambio continuo e fertile tra la prospettiva (e la pratica) elettro-fisica e quella elettro-fisiologica. Dall'esperimento della lingua, effettuato per la prima volta nel 1792, egli riuscì a determinare la polarità della corrente metallica, quattro anni prima che egli potesse misurare questa corrente con uno strumento fisico. Egli notò che la sensazione acida prodotta nel punto della lingua a contatto con lo stagno di un arco bimetallico stagno-argento era analoga a quella prodotta dall'elettricità positiva di una bottiglia di Leyda. Inoltre, dal carattere continuo della sensazione acida percepita quando lo stimolo veniva mantenuto a lungo, Volta concluse che l'arco bimetallico produceva un flusso continuo di elettricità. Avendo quindi stabilito il carattere continuo (“perpetuo” come egli amava dire) della corrente metallica, egli poteva quindi attribuire alle proprietà fisiologiche dell'eccitabilità nervosa il fatto che le contrazioni nelle zampe di rana comparissero unicamente all'atto della chiusura e dell'interruzione del circuito, e non già ad una possibile natura transiente dell'elettricità dei metalli. Nel suo esperimento sulla visione, all'inizio Voltai notò che la sensazione luminosa si produceva solo al momento dell'applicazione e della rimozione dello stimolo elettrico [Volta, 1918]. Convinto però del carattere continuo della corrente metallica, egli si adoperò per produrre una sensazione luminosa durevole, ed infine riuscì a percepire una luce costante, anche se debole, quando uno dei poli dell'arco bimetallico era applicato a stretto contatto con l'occhio e la stanza sperimentale veniva completamente oscurata. Dal momento però che la sensazione luminosa così prodotta era estremamente debole egli concluse, che se si voleva stimolare efficacemente l'occhio, era necessario chiudere ed aprire il circuito in rapida alternanza. Questo metodo, che egli adoperò anche per indurre contrazioni tetaniche nelle rane, precede la tecnica dell'applicazione di treni di impulsi discontinui usata in tempi moderni per ottenere un'efficace stimolazione di nervi e muscoli. Volta era particolarmente abile in questo tipo di esperimenti: utilizzando l'espedito di “rompere e ristabilire alternativamente e con maggiore o minore rapidità le comunicazioni tra i due metalli” egli riuscì nel 1793 a ottenere “la sensazione di una luce ondulante o come fiammeggiante, ed infine di una luce quasi continua” facendo “in modo che separazioni e riunioni si succedano con la più grande prontezza”. Un esperimento

questo di fusione fisiologica di una sensazione luminosa dovuta ad uno stimolo alternante (“flicker-fusion experiment”) realizzato utilizzando semplicemente una lamina di stagno ed un cucchiaino d'argento!

Volta notò che gli effetti della stimolazione elettrica spesso dipendevano dalla polarità dello stimolo, anticipando in qualche modo la “legge dell'eccitazione polare” elaborata poi pienamente da Pflüger più di cinquant'anni dopo. Negli esperimenti sulla lingua egli notò che la sensazione gustativa mutava dal sapore acido a quello alcalino, quando la polarità dello stimolo veniva invertita. Egli notò inoltre che la sensazione dolorosa indotta dalla stimolazione della pelle o di una superficie mucosa era eccitata da correnti di minore intensità quando lo stimolo era di polarità negativa. Egli anticipò anche, almeno in parte, Pflüger notando che stimoli di una determinata polarità erano più efficaci all'atto della chiusura del circuito, mentre stimoli di polarità opposta risultavano più efficaci all'atto dell'apertura. Nel 1795 egli riuscì a produrre sia la contrazione di chiusura che quella di apertura in un singolo esperimento. Un arco bimetallico veniva utilizzato per connettere due preparazioni di rana per mezzo di due bicchieri riempiti di soluzione salina. Una preparazione era immersa con il midollo spinale dal lato dell'elettricità negativa, e con le zampe dal lato dell'elettricità positiva, mentre l'altra rana era disposta in modo simmetrico. Una delle due preparazioni si contraeva all'atto della chiusura del circuito, l'altra all'atto dell'apertura.

Volta era particolarmente abile a fronteggiare con l'esperimento possibili obiezioni alle sue conclusioni. Qualcuno avrebbe potuto forse pensare che il sapore acido percepito nell'esperimento della lingua fosse dovuto al metallo stesso piuttosto che al passaggio della corrente. Contro questa possibile obiezione Volta prima nota che il sapore non si produce quando i metalli sono in contatto con la lingua, ma non comunicano tra di essi. Poi, egli mostra che il sapore acido viene evocato anche senza un contatto diretto della lingua col metallo: per esempio quando la punta della lingua viene immersa in un bicchiere pieno d'acqua che è messo in contatto con l'elettrodo positivo. Nel suo virtuosismo sperimentale Volta riuscì poi a compiere un sorprendente esperimento, utilizzando una soluzione debolmente alcalina per stabilire il contatto. Al momento che egli immergeva la punta della lingua, egli percepiva inizialmente un sapore “acido” (che egli attribuiva al passaggio di corrente) che trapassava poi in una sensazione “alcalina”, man mano che la soluzione diffondeva e raggiungeva la superficie della lingua.

Sebbene Volta non abbia pubblicato opere dedicate esclusivamente a temi fisiologici e medici, l'interesse per la possibile rilevanza fisiologica e medica delle sue

scoperte appare chiaramente dai suoi scritti. Nel 1793 egli discusse differenti disposizioni sperimentali utili per la stimolazione elettrica del sistema visivo. Tra le altre possibilità, egli notò che l'esperimento riusciva anche mettendo le punte dell'arco bimetallico all'interno della bocca, per esempio nei due lati opposti del vestibolo buccale. Questo esperimento è facilmente riproducibile, perché non richiede la procedura piuttosto eroica di porre una delle due punte metalliche sul bulbo oculare (in tempi moderni può essere eseguito utilizzando per esempio una batteria comune da 4.5 Volt).

“Io sono del resto persuaso - scriveva Volta - che l'esperienza riuscirebbe anche su dei ciechi per cataratta, o per qualche altro difetto qualunque, tranne nel caso di insensibilità o paralisi dei nervi ottici. Ecco dunque che queste prove potrebbero essere di qualche utilità, permettendo di stabilire se esista un tal difetto. E chi sa poi, se venendo (la stimolazione elettrica) ben somministrata, non si potrebbe derivarne qualche soccorso in questa stessa paralisi sia all'inizio del processo che in fasi più o meno avanzate.” [Volta, 1918] E se egli non utilizzò forse l'elettricità per curare l'insensibilità o paralisi dei nervi ottici, si servì (a suo dire con qualche successo) della batteria per trattare casi di sordità congenita come risulta da una sua lettera pubblicata nel 1802.

E' interessante notare che la comunicazione del 1800 alla Royal Society sull'invenzione della batteria affronta in larga misura temi di carattere fisiologico. Nelle ultime pagine, dopo aver discusso per esteso gli effetti dell'elettricità della batteria nel promuovere sensazioni e movimenti, Volta scrisse:

“Tutti questi fatti che io ho riferito in questo lungo scritto, a riguardo dell'azione che il fluido elettrico, incitato e mosso dal mio apparecchio, esercita sulle parti del nostro corpo che la sua corrente invade e attraversa; azione che, per di più, non è momentanea, ma sostenuta e durevole per tutto il tempo che, non essendo interrotte le comunicazioni, questa corrente segue il suo corso; azione infine i cui effetti variano secondo la diversa eccitabilità delle sue parti, come si è visto; tutti questi fatti, già abbastanza numerosi, e altri ancora che si potrà scoprire in seguito, moltiplicando e variando le esperienze di questo genere, apriranno un campo notevolmente ampio di riflessioni, e di vedute, non solo curiose, ma anche interessanti in particolare per la medicina. Ce ne sarà abbastanza per occupare l'anatomico, il fisiologo e il medico pratico”.

A distanza di due secoli più tardi, possiamo ora riflettere su come siano state profetiche queste parole di Volta, considerando l'enorme sviluppo dell'elettrofisiologia, e la tremenda importanza che ha raggiunto l'elettricità nelle sue applicazioni diagnostiche e terapeutiche alla medicina.

Con l'invenzione della batteria terminava il 700, il “secolo elettrico” per eccellenza e cominciava una nuova epoca. Nel secolo dei lumi le barriere tra le differenti discipline erano molto meno definite che nei tempi moderni, anche per la fase rivoluzionaria di progresso che la scienza stava attraversando. Questo imponeva un grande scambio di idee e metodi scientifici.

La tradizione che ha voluto vedere Volta esclusivamente come il fisico, in senso moderno, contrapposto al fisiologo, Galvani, si è sviluppata soprattutto nel diciannovesimo secolo. Essa è stata ripresa in tempi moderni come un “case study” per certe tendenze della filosofia della scienza contemporanea, che tendono ad esaltare l'importanza di influenze esterne e di concezioni *a priori* sull'attività dello scienziato [Pera, 1986]. Oltre ad impedire una corretta valutazione del significato della controversia tra Galvani e Volta, questo atteggiamento ha certamente contribuito, come abbiamo già detto, a mettere in ombra l'opera elettrofisiologica di Alessandro Volta.

Non è possibile applicare rigidamente a epoche lontane categorie usate per distinguere settori della scienza in tempi relativamente moderni (e che peraltro stanno diventando in qualche modo anacronistiche anche nella scienza contemporanea). Sarebbe allora ben difficile assegnare alla fisica, alla medicina o persino alla filosofia molti degli scienziati ed intellettuali del 600 e del 700, e questo vale particolarmente per coloro che si interessarono ai fenomeni elettrici. Due secoli esatti prima dell'invenzione della pila voltaica, la parola “elettricità” in senso moderno era apparsa per la prima volta nel 1600, in un volume intitolato *De Magnete*, una pietra miliare nello sviluppo dell'elettrologia, scritto da William Gilbert. Gilbert era il medico della regina Elisabetta I [Gilbert, 1600].

Invece che basarci su distinzioni più o meno artificiali, e particolarmente inappropriate a comprendere lo sviluppo storico della scienza, sarebbe forse opportuno applicare all'opera scientifica di Volta ciò che Niels Bohr scrisse nel 1937, commemorando il bicentenario della nascita di Galvani:

“(questo) lavoro immortale...che inaugurò una nuova epoca nell'intero campo della scienza, è una particolarmente brillante illustrazione dell'estrema fertilità di un'intima combinazione dell'esplorazione della natura inanimata con lo studio delle proprietà degli organismi viventi” [Bohr, 1937].

Marco Piccolino

Bibliografia

Bohr, N. (1937) Biology and atomic physics. In Comitato per la celebrazione del II centenario della nascita di Luigi Galvani (ed): Celebrazione del secondo centenario della nascita di Luigi Galvani. Bologna: Luigi Parma, pp. 68-78.

- Cavendish, H. (1776) An Account of some Attempts to Imitate the Effects of the Torpedo by Electricity. *Philosophical Transaction* 66:196-225.
- Gilbert, W. (1600) *De Magnete, magneticibus corporibus, et de magno magnete tellure*. London:
- Müller, J. (1844) *Handbuch der Physiologie des Menschen*. Coblenz: Hölscher.
- Pera, M. (1986) La rana ambigua (The ambiguous frog. The Galvani-Volta controversy on animal electricity - English translation by J. Mandelboun - Princeton University Press, 1992). Torino: Einaudi.
- Piccolino, M. (1997) Luigi Galvani and animal electricity: two centuries after the foundation of electrophysiology. *Trends Neurosci.* 20:443-448.
- Piccolino, M. (1998) Animal electricity and the birth of electrophysiology: the legacy of Luigi Galvani. *Brain Res. Bull.* 46:381-407.
- Polvani, G. (1942) *Alessandro Volta*. Pisa: Domus Galileiana.
- Volta, A. (1800) On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different species. Letter to Sir Joseph Banks, March 20 1800. *Phil. Trans. Royal Soc.* 90:403-431.
- Volta, A. (1918) *Le opere di Alessandro Volta* (edizione nazionale) I Vol. Milano: Hoepli.
- Volta, A. (1923) *Le opere di Alessandro Volta* (edizione nazionale) II Vol. Milano: Hoepli.
- Walsh, J. (1773) On the electric property of torpedo: in a letter to Ben. Franklin. *Phil. Trans. Royal Soc.* 63:478-489.

Inserto

La polemica tra Galvani e Volta e la nascita dell'elettrofisiologia

MARCO PICCOLINO

La polemica tra Galvani e Volta era scoppiata nel 1792, all'indomani della pubblicazione nei *Commentari* dell'Accademia delle Scienze di Bologna dell'opera di Galvani intitolata *De Viribus electricitatis in motu musculari* ("Delle forze dell'elettricità nel moto muscolare") [Galvani, 1791], un'opera di cui è stato detto che aveva provocato una tempesta nel mondo scientifico di fine 700 pari forse agli sconvolgimenti politico-sociali che stavano attraversando l'inquieto Europa dell'epoca a seguito della rivoluzione francese [du Bois-Reymond, 1849].

Nel *De Viribus*, Galvani pubblicava per la prima volta i risultati degli studi sperimentali che conduceva ormai da oltre dieci anni sul ruolo dell'elettricità nella conduzione nervosa e nella contrazione muscolare. Con i suoi studi Galvani si era proposto di verificare l'ipotesi, avanzata da diversi studiosi nella prima metà del

Settecento, secondo la quale la contrazione muscolare era dovuta ad un flusso di elettricità che scorreva lungo i nervi (ipotesi neuroelettrica). Galvani voleva inoltre tentare di stabilire dei principi validi e scientifici su cui basare la pratica dell'applicazione dell'elettricità in campo medico.

Sull'onda dell'entusiasmo suscitato dalle grandi scoperte teoriche e pratiche degli 'elettricisti' del Settecento (tra l'altro la dimostrazione della natura elettrica del fulmine, l'invenzione della bottiglia di Leyda, primo condensatore della storia, e il perfezionamento delle macchine elettriche) molti avevano pensato che il fluido elettrico potesse essere utilizzato per la cura delle malattie più svariate, dalla paralisi, alle artriti, alla gotta, alle malattie nervose di diversa natura varia natura, o che potesse servire a far penetrare più efficacemente i medicinali nei tessuti interni dell'organismo. Però, dopo gli entusiasmi iniziali, un certo scetticismo si era diffuso negli ambienti scientifici più accreditati, e i 'medici elettricisti' venivano spesso accusati di ciarlataneria. Nell'ambiente dell'Università e dell'Istituto delle Scienze di Bologna in cui il giovane Galvani aveva ricevuto la sua formazione scientifica verso la metà del 700 era forte l'influsso dell'insegnamento di Marcello Malpighi, il fondatore dell'anatomia microscopica moderna. Contro le tendenze empiriste che erano affiorate nella medicina della seconda metà del 600, Malpighi aveva propugnato il concetto di 'medicina razionale', cioè la convinzione che la medicina dovesse fondarsi sullo studio scientifico dell'organismo, studio basato sull'esperienza e sulla deduzione logica, e non poteva dipendere solo da osservazioni empiriche non comprovate da uno studio sistematico dell'anatomia e della fisiologia [Piccolino, 1999a; Piccolino, 1999b]. Nell'intraprendere le sue ricerche sperimentali sul ruolo dell'elettricità nelle contrazioni muscolari Galvani si collocava dunque proprio nella linea della 'medicina razionale' malpighiana, che imponeva la l'approfondimento delle conoscenze sulle proprietà dell'organismo prima che si intervenisse su di esso con medicinali nuovi o con nuove pratiche terapeutiche.

Nel *De Viribus* Galvani dava un'accurata descrizione dei suoi esperimenti ed arrivava a formulare l'ipotesi dell'elettricità animale, ipotesi che, come abbiamo accennato, faceva dipendere la contrazione muscolare dal flusso di un'elettricità accumulata in stato di disequilibrio tra interno ed esterno della fibra muscolare. Sebbene Galvani ponesse dunque l'elettricità alla base del fenomeno della contrazione muscolare, il modello funzionale che egli aveva sviluppato differiva dalle concezioni neuroelettriche anteriori, secondo le quali era un'elettricità propria dei nervi a determinare l'insorgenza delle contrazioni muscolari. Per Galvani, i nervi svolgevano semplicemente la funzione di con-

duttori dell'elettricità accumulata nei muscoli. Ispirandosi all'immagine della bottiglia di Leyda (il primo condensatore della storia), Galvani supponeva infatti che la fibra nervosa penetrasse all'interno della fibra muscolare, come il conduttore della bottiglia penetra all'interno di questa, stabilendo il contatto con l'armatura interna della bottiglia. Secondo Galvani, quando con un arco metallico si connette il nervo con una superficie del muscolo, si chiude un circuito che permetteva il flusso di elettricità tra interno ed esterno della fibra muscolare per la via del nervo, e si producono così le contrazioni. Concettualmente il fenomeno corrispondeva alla scarica della bottiglia di Leyda, che si otteneva connettendo il conduttore della bottiglia alla sua armatura esterna. Quindi per Galvani l'arco metallico utilizzato per connettere nervi e muscoli aveva solo funzione di conduttore del fluido elettrico, e la forza che permetteva il movimento di questo fluido (o l'energia per usare un linguaggio moderno) era data dal disequilibrio elettrico presente nell'organismo.

Alessandro Volta aveva letto il *De Viribus* nel marzo del 1792 e si era subito impegnato in un intenso studio sperimentale degli effetti dell'elettricità sulle contrazioni muscolari per verificare i risultati e le conclusioni di Galvani. Il 2 aprile, dopo "otto o dieci giorni" dacché si era "applicato" a questi studi pubblicava un breve "transunto" dei suoi esperimenti riconoscendo la validità delle "stupende scoperte del Sig. GALVANI". Poi nella Memoria prima sull'elettricità animale pubblicata all'inizio di maggio aveva parlato della scoperta dell'elettricità animale di Galvani come di "una di quelle grandi e luminose scoperte, che meritano di far epoca negli annali delle scienze fisiche e mediche", ritenendo che al confronto "è men originale e ammirabile la scoperta di FRANKLIN dell'identità del fluido elettrico e del fulmineo" [Volta, 1918].

Poi però, Volta era passato dall'entusiasmo all'incredulità rispetto alle conclusioni di Galvani, mano a mano che i suoi studi mettevano in luce aspetti che apparivano in contrasto con l'ipotesi galvaniana della fibra muscolare come bottiglia di Leyda in miniatura, in grado di accumulare fluido elettrico in stato di disequilibrio o sbilancio. Le difficoltà maggiori sorsero allorché Volta si rese conto che per produrre le contrazioni non era indispensabile connettere con un arco metallico il nervo e muscolo, ma bastava stabilire una comunicazione tra due punti di un nervo. Questa osservazione contrastava con l'ipotesi galvaniana dell'elettricità accumulata in stato di disequilibrio nei tessuti animali. Dal momento che, attraverso i liquidi extracellulari, si stabilisce una comunicazione elettrica tra due punti di un nervo, appare difficile pensare che possa esistere uno squilibrio elettrico tra di essi, allo stesso modo che in una bottiglia di Leyda non è possibile immaginare

che vi sia una differenza elettrica tra due punti dell'armatura esterna (o interna).

Allo stesso tempo Volta si rendeva conto che le contrazioni muscolari si generavano costantemente utilizzando un arco costituito da due metalli diversi, mentre un conduttore monometallico risultava di solito inefficace. Cominciò a farsi luce in lui l'idea che l'arco metallico non avesse la funzione di puro conduttore dell'elettricità presente in stato di equilibrio nell'organismo che Galvani gli aveva assegnato, ma che avesse esso la capacità di generare il disequilibrio responsabile del movimento di fluido elettrico che a sua volta determinava le contrazioni. Insomma, per lo scienziato di Pavia gli archi metallici agivano da "motori" di elettricità e non da semplici conduttori, e la differenza dei metalli appariva essere responsabile di questa nuova proprietà "elettromotrice" (*è la differenza dei metalli che fa*).

Sulla base dei suoi studi Volta elaborò ad un certo punto la teoria del contatto metallico, assumendo che metalli diversi differissero nella loro tendenza a "dare" o a "prendere" elettricità, e che lo squilibrio che si generava nel contatto tra due metalli diversi dipendeva da questa differenza. Metalli come lo zinco, il piombo, lo stagno hanno una tendenza a prendere elettricità; messi a contatto con metalli come il rame, l'argento e l'oro (che hanno invece una tendenza a dare) si caricano positivamente, mentre i metalli del secondo gruppo si caricano negativamente.

Per Volta dunque, negli esperimenti con gli archi metallici, il disequilibrio elettrico responsabile dello scorrere del fluido elettrico nei tessuti dell'organismo, responsabile poi degli effetti fisiologici osservati, era generato dai metalli dissimili degli archi e non dall'organismo stesso. Quindi l'ipotesi di Galvani, dell'elettricità animale presente in stato di disequilibrio o sbilancio nei tessuti animali era, per Volta, non necessaria. Se metalli diversi sono in grado di generare un disequilibrio elettrico capace di promuovere il flusso di elettricità nei tessuti dell'organismo, perché assumere l'esistenza di un disequilibrio elettrico intrinseco all'animale. Questa convinzione si rafforzò in Volta quando a partire dal 1796, con particolari accorgimenti Volta riuscì a misurare la debole forza elettrica che si sviluppava nel contatto tra due metalli diversi (dapprima utilizzò l'elettrometro "a piattelli" di Nicholson, poi l'elettrometro condensatore che egli stesso aveva messo a punto).

Davanti alle obiezioni di Volta, Galvani notava come, nonostante archi costituiti da metalli diversi fossero particolarmente efficaci nel produrre contrazioni, pure queste potevano essere indotte con archi monometallici ed anche connettendo nervi e muscoli anche senza utilizzare alcun metallo (per esempio servendosi di pezzi di tessuti dell'animale). Inoltre nel 1794 Galvani

(e lo scienziato di origine pisana Eusebio Valli) riuscivano ad ottenere contrazioni nelle rane semplicemente connettendo direttamente nervo e muscolo, senza usare né metalli né alcun altro materiale [Galvani, 1794; Valli, 1794].

Da parte sua Volta controbatteva all'esperimento delle "contrazioni senza metallo" (che apparve all'epoca come un *experimentum crucis* a favore dell'ipotesi dell'elettricità animale), osservando che anche tessuti diversi (come il tessuto nervoso e quello muscolare) potevano produrre elettricità al loro contatto, e sviluppando l'idea che conduttori diversi di qualsiasi tipo (sia metallici che corpi umidi) erano in realtà in grado di agire da elettromotori quando posti a contatto reciproco. Quindi, secondo Volta, l'elettricità che era alla base delle contrazioni senza metallo non poteva essere considerata come un'elettricità genuinamente animale, ma era solo un nuovo tipo di elettricità di contatto [Volta, 1918] (Fig. A).

Questa nuova concezione di Volta appariva evidentemente come un'ipotesi *ad hoc*. Di fatto essa poneva una difficoltà apparentemente insormontabile a Galvani ed in particolare alla sua ipotesi della fibra muscolare come minuscola bottiglia di Leyda di cui la fibra nervosa costituiva il "conduttore". Sembrava infatti impossibile forzare il movimento del fluido elettrico dall'interno all'esterno del muscolo per la via del nervo, se nervo e muscolo non dovevano essere connessi insieme (per evitare il contatto tra corpi dissimili). Galvani, però, convinto dell'importanza di fornire fatti nuovi nelle controversie scientifiche, si mise alla ricerca di un disegno sperimentale in grado di far fronte anche alle nuove obiezioni del suo competitore, e riuscì nel suo proposito in un esperimento pubblicato nel 1797, un esperimento che è stato considerato come "l'esperimento più capitale dell'elettrofisiologia" [du Bois-Reymond, 1849], la vera fondazione di questa nuova scienza. Egli preparò e separò le due zampe di una rana con i rispettivi nervi sciatici sezionati vicino alla loro emergenza dal canale vertebrale, e le pose ad una certa distanza l'una dall'altra. Poi, con un bastoncino di vetro mosse il nervo corrispondente ad una delle due zampe così da porlo in contatto con due punti differenti dell'altro nervo, piegato a formare un "picciol arco". Se, nel corso della manipolazione si poneva cura che una delle due parti del primo nervo usate per stabilire il contatto fosse la boccuccia del nervo tagliata, allora frequentemente la contrazione compariva nella prima zampa e spesso anche nella seconda [Galvani, 1797] (Fig. B). Nonostante l'importanza di questo esperimento come prova obbiettiva dell'esistenza di un'elettricità intrinseca all'animale, non dovuta ad una semplice differenza tra corpi diversi, lo sviluppo successivo della polemica fu segnato dal trionfo di Volta con l'invenzione della

batteria che, apparve non solo una prova dell'ipotesi dello scienziato di Pavia sul potere elettro-motore dei metalli, ma anche storicamente una confutazione di fatto della teoria galvaniana dell'elettricità dei metalli. Occorsero alcuni decenni dopo Galvani e Volta prima che con Leopoldo Nobili e Carlo Matteucci si arrivasse, con l'uso del galvanometro, alla dimostrazione strumentale dell'elettricità animale. Riprese così il cammino dell'elettrofisiologia, che prima attraverso l'opera di du Bois-Reymond, von Helmholtz, Hermann e Bernstein in Germania, poi in Inghilterra, con di Gotch, Lucas e Adrian, sarebbe arrivata nel 1952 con gli studi di Hodgkin e collaboratori a stabilire nei dettagli il meccanismo del coinvolgimento dell'elettricità animale nella conduzione nervosa, aprendo il campo alla fase più moderna dell'elettrofisiologia e della neurofisiologia (si veda [Hodgkin, 1964]). Con Hodgkin, scomparso nel dicembre 1998, a quasi due secoli esatti di distanza da Galvani, si concludeva in qualche modo il ciclo storico delle ricerche iniziate dallo scienziato di Bologna nella seconda metà del 700.

Bibliografia

- Reymond E. du Bois (1849) *Untersuchungen über thierische Elektrizität*. Reimer, Berlin, 1848 (1st Volume), 1849 (2nd Volume, 1st Part), 1860 (2nd Volume, 2nd Part, Bogen), 1884 (2nd Volume, 2nd Part, Bogen)..
- L. Galvani (1791) *De viribus electricitatis in motu musculari commentarius* Bon.Sci.Art.Inst.Acad.Comm. 7:363-418.
- L. Galvani (1794) *Dell'uso e dell'attività dell'arco conduttore nelle contrazioni dei muscoli* Bologna: a S. Tommaso d'Aquino.
- L. Galvani (1797) *Memorie sulla elettricità animale al celebre abate Lazzaro Spallanzani* Aggiunte alcune elettriche esperienze di Gio. Aldini. Bologna: Sassi.
- A. L. Hodgkin (1964) *The conduction of the nervous impulse* Liverpool: Liverpool University Press.
- M. Piccolino (1999a) *Marcello Malpighi: una rivoluzione "galileiana" nella biologia e medicina del Seicento: I - "Continue molestie e vessationi" e grandi scoperte* NATURALMENTE 12(3):9-17.
- M. Piccolino (1999b) *Marcello Malpighi: una rivoluzione "galileiana" nella biologia e medicina del Seicento. II - "Galenisti" ed "empiristi" contro la Scienza Nuova* NATURALMENTE 12(4):5-12.
- E. Valli (1794) *Lettera XI sull'elettricità animale* Mantova: G. Braglia.
- A. Volta (1918) *Le opere di Alessandro Volta* (edizione nazionale) I Vol. Milano: Hoepli.