



Alberto Zanelli
CNR-ISOF, Bologna
zanelli@isof.cnr.it

1791: IL NODO TRA ELETTROCHIMICA ED ELETTROFISIOLOGIA

L'articolo descrive i principali esperimenti svolti da Luigi Galvani, fornendo un excursus sui suoi concetti di elettrochimica ed elettrofisiologia, i primi comparsi nella storia della scienza.

De viribus electricitatis in motu musculari

Più di 200 anni fa, all'apice dell'Illuminismo, tra i *Commentari* dell'Istituto delle Scienze di Bologna fu pubblicato *De viribus electricitatis in motu musculari*, oggi fruibile a tutti sia nella versione originale in latino che nelle traduzioni italiana ed inglese [1], ad opera di Luigi Galvani (1737-1798), medico e professore dello Studio felsineo. Si trattava di una pubblicazione destinata a cambiare il corso della scienza perché, grazie alle osservazioni in essa riportate, si sarebbero distinte dall'elettrologia due nuove branche, l'elettrochimica e l'elettrofisiologia, le cui ricadute oggi spaziano dalle scienze fisiche a quelle biomediche [2].

De viribus electricitatis in motu musculari descrive, con l'utilizzo anche di quattro tavole grafiche, una ventina di esperimenti sull'interazione tra elettricità e apparato neuro-muscolare delle rane, animali a sangue freddo, e alcuni in cui sono utilizzati agnelli e polli per estendere i risultati della ricerca anche agli animali a sangue caldo. L'opera è divisa in quattro parti: nella prima sono riportati gli esperimenti che interessavano l'elettricità "artificiale", cioè quella ottenuta con una macchina elettrostatica; nella seconda gli esperimenti compiuti con l'elettricità "naturale", cioè quella che è possibile raccogliere dall'atmosfera non solo durante i temporali ma anche, in misura minore, nelle giornate moderatamente perturbate. La terza parte riguarda invece le contrazioni che si ottengono dall'applicazione di parti metalliche all'apparato neuro-muscolare. Infine, nella quarta parte, il medico bolognese illustrò le proprie congetture sulla presenza di una elettricità "animale" e sulla possibilità di curare alcune malattie ad essa correlabili [3].

Il primo esperimento descritto nel *De viribus...* risale al 26 gennaio

1781: in realtà non era stato il primo in ordine cronologico poiché, come illustrato nella prossima sezione, da molti mesi Galvani riproduceva ed approfondiva il lavoro di altri ricercatori che studiavano l'interazione tra elettricità ed apparato neuro-muscolare. Probabilmente Galvani decise di aprire la sua pubblicazione con questo esperimento perché aveva carattere di forte originalità e, con lo stile un po' romanizzato dell'epoca, lo descrisse quasi come un evento fortuito: un collaboratore osservò delle contrazioni quando da una macchina elettrostatica (Fig. 1), simile a quella inventata solo dieci anni prima da Jesse Ramsden (1735-1800), scoccava una scintilla mentre un altro collaboratore, senza essere in contatto attraverso dei conduttori elettrici con la macchina stessa, toccava con un bisturi i nervi crurali di una rana posta su una lastra di vetro e preparata tagliandola trasversalmente sotto le zampe anteriori, scorticandola ed eviscerandola. Poiché non sempre quest'esperimento aveva successo, Galvani dispose ulteriori prove da cui capì che se lo sperimentatore toccava solo l'osso del manico del bisturi la contrazione non si verificava. Il bisturi fu poi sostituito da una bacchetta di vetro, una bacchetta di ferro o un filo di ferro. Alla luce delle conoscenze di oggi questo esperimento può essere così spiegato:

- la macchina elettrostatica accumula cariche sulla sua armatura sferica (Fig. 1) inducendo la polarizzazione degli oggetti conduttori circostanti;
- nel momento in cui scocca la scintilla il conduttore della macchina si scarica improvvisamente e negli oggetti polarizzati si inducono correnti che ristabiliscono la neutralità, tanto più grandi sono tali oggetti

- ti tanto più queste correnti sono intense;
- le correnti indotte nel solo bisturi, isolato dallo sperimentatore che impugna il manico d'osso, o nella bacchetta di ferro non a contatto con uno sperimentatore, non sono sufficienti a provocare le contrazioni della rana;
- ovviamente nessuna corrente circola attraverso la bacchetta di vetro, infatti, in questo caso le contrazioni non furono osservate;
- se il bisturi è impugnato in modo che lo sperimentatore tocchi le parti conduttrici (lama in bronzo o chiodini di ferro che la fissano al manico in osso) la polarizzazione dell'intero sperimentatore si scarica sui nervi della rana producendo la contrazione;
- un filo di ferro molto lungo garantisce correnti sufficienti per indurre le contrazioni.

Questo fenomeno in effetti era già noto come "contraccolpo elettrico" e in seguito Galvani fu accusato di non averlo riconosciuto ma, in realtà, la prima pubblicazione in materia uscì a firma di Charles Stanhope (1753-1816) solo nel 1779 e per di più in inglese, lingua poco diffusa all'epoca e sconosciuta a Galvani, che quindi non poteva esserne al corrente [4].

Con le conoscenze di oggi si può anche affermare che la contrazione della rana allo scoccare della scintilla dalla macchina elettrica è la prima descrizione di una trasmissione radio, quella radio che, sempre a Bologna, fu inventata più di cento anni dopo da Guglielmo Marconi (1874-1937) [5].

Galvani fece molte variazioni all'esperimento arrivando anche a bucare un muro della propria casa, dove aveva allestito il laboratorio, per fare passare il filo metallico come unico collegamento tra la stanza dove era la macchina elettrostatica e quella dove era la rana.

Per citare alcuni altri esempi:

- egli collegò la rana ad un lungo filo di ferro, collocandola in un vaso sigillato da cui usciva solo il filo e portandola in un'altra stanza molto distante, dimostrando così che l'impulso si propaga attraverso il filo di ferro e non attraverso l'aria;
- egli indusse le contrazioni contemporaneamente su varie rane disposte in cerchio attorno alla macchina elettrica per dimostrare che la propagazione avveniva in tutte le direzioni.

Il medico bolognese osservò anche che l'ampiezza delle contrazioni non diminuiva allontanando la macchina elettrica fino a 2 m e non aumentava con il numero di giri con cui era caricata l'armatura sferica, arrivando a formulare anche delle leggi semiquantitative. Provò inoltre che le contrazioni avvenivano anche utilizzando le scintille dovute all'elettricità negativa estratta da una bottiglia di Leida - strumento presentato nel 1746 nell'omonima città olandese e costituito da una bottiglia di vetro foderata all'esterno e all'interno da due fogli di stagno (armature) dei quali quello interno presenta un conduttore che emerge dal vetro - che serviva appunto a convertire le cariche positive estratte dalla macchina di Ramsden in cariche negative (Fig. 1).

Gli esperimenti ebbero successo anche su animali vivi, sfruttando il nervo della coscia messo a nudo, o su animali isolati dall'aria del laboratorio con una doppia campana messa sotto vuoto grazie alla macchina pneumatica che Galvani si era procurato dimostrandosi molto attento alla tendenza delle ricerche nel suo tempo che, come descritto in seguito, si stavano rivolgendo allo studio delle "arie".

La seconda parte del *De viribus...* inizia con un esperimento del 1786 realizzato attaccando un lungo filo di ferro alla parte più alta della casa e ad esso i nervi della rana le cui zampe scuoiate erano collegate a terra con un altro filo di ferro immerso in fondo ad un pozzo. Allo scoccare dei fulmini Galvani osservò contrazioni numerose e violente,

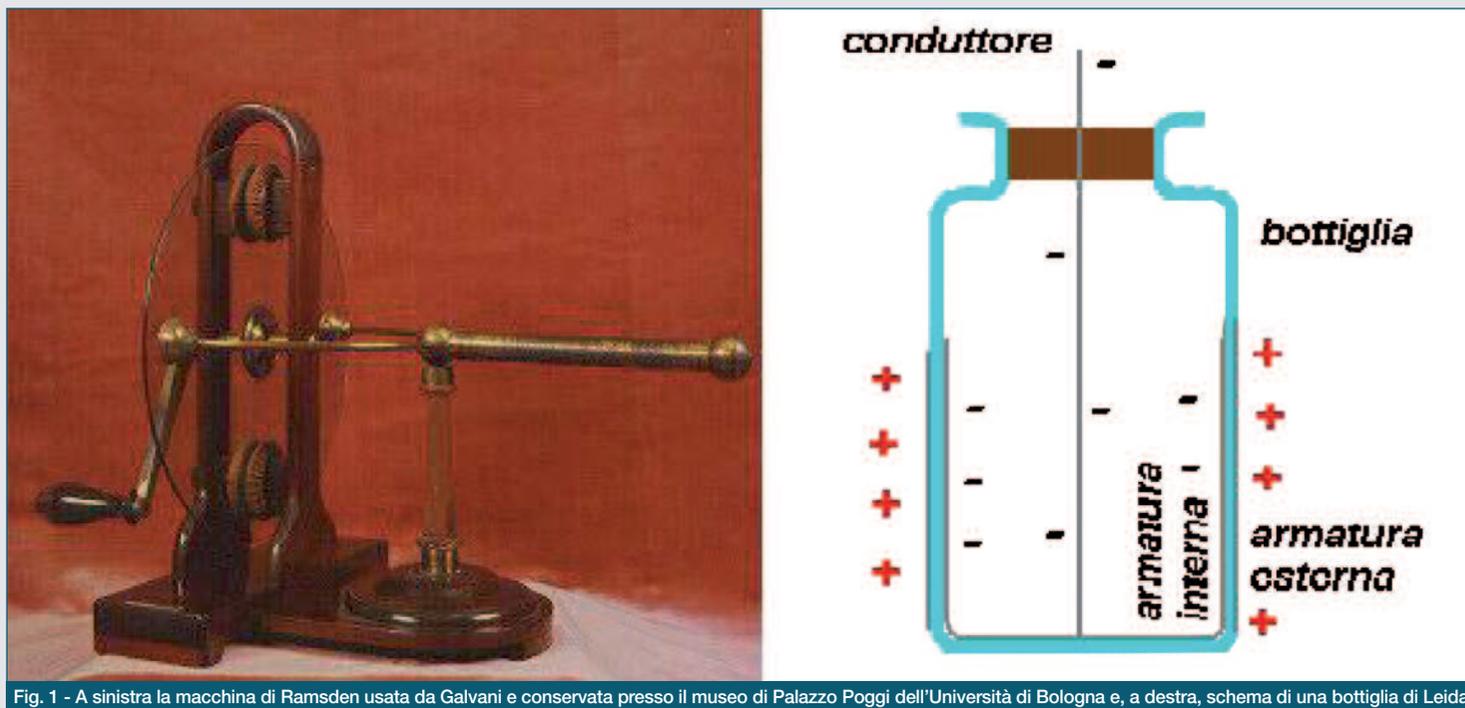


Fig. 1 - A sinistra la macchina di Ramsden usata da Galvani e conservata presso il museo di Palazzo Poggi dell'Università di Bologna e, a destra, schema di una bottiglia di Leida

FLASHBACK

RIVISITANDO

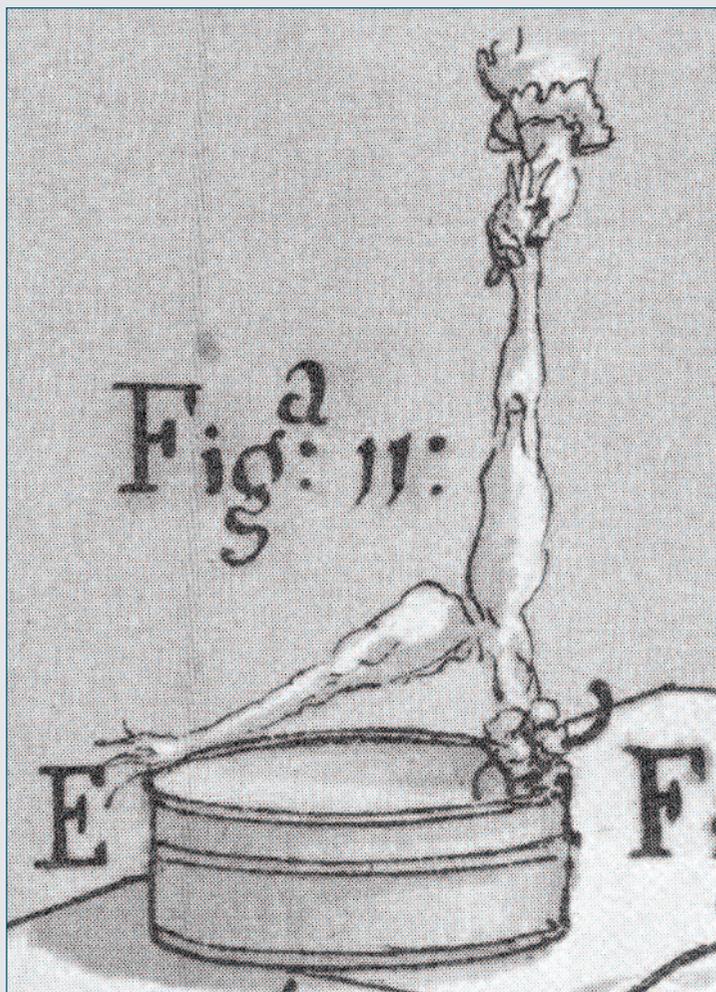


Fig. 2 - "Pendolo elettrico", particolare di un disegno forse usato da Galvani per le lezioni, da cui è tratta la tavola 4 di *De viribus electricitatis in motu musculari*; il disegnatore è ignoto

anche se l'animale era chiuso dentro ad un vaso o all'interno della casa. Egli osservò anche che, per indurre le contrazioni nel preparato di rana, bastava che le nuvole passassero in prossimità del filo di ferro, confermando che si trattava di fenomeni elettrici, perché contemporaneamente anche gli elettrometri di controllo segnalavano attività elettrica. In realtà Benjamin Franklin (1706-1790) aveva già dimostrato che i fulmini sono scariche elettriche ma la teoria non era ancora del tutto accettata e il medico bolognese voleva verificare che il tipo di elettricità che stava studiando avesse tutte le caratteristiche di quella già nota. In effetti, gli esperimenti con l'elettricità atmosferica, per quanto di maggiore entità, possono oggi essere interpretati sulla base degli stessi fenomeni di quelli con l'elettricità "artificiale" e cioè grazie ai principi dell'elettrofisiologia. Per brevità, di questa parte, non saranno descritti altri esperimenti, che comunque portavano alla conclusione dell'analogia tra elettricità "animale" e "naturale", rimandando al libro di Marco Piccolino e Marco Bresadola dove il contesto di tutta l'opera di Galvani è esaurientemente riportato [6].

La terza parte si apre con la descrizione di un esperimento fallito, usanza oggi fuori moda. Il 20 settembre 1786, Galvani tentava inutil-

mente di ottenere contrazioni anche nelle giornate serene, ma con sorpresa fece un'altra osservazione che si dimostrerà importantissima: i preparati di rana appesi per i nervi crurali con un uncino di rame manifestavano contrazioni ogni volta che le zampe scuoiate toccavano la ringhiera di ferro della terrazza. Con grande serietà scientifica, il medico bolognese si apprestò ad eseguire esperimenti di controllo all'interno del laboratorio per escludere l'eventuale influsso dell'elettricità atmosferica, utilizzando vari materiali isolanti e diversi metalli, ed osservò che con gli isolanti non avvenivano contrazioni ma che esse erano più o meno intense a seconda del tipo di metallo che costituiva gli archi di collegamento tra nervi e muscoli. Sicuramente gli esperimenti di questa parte del *De viribus...* spianarono la strada ad Alessandro Volta (1745-1827) per la formulazione delle leggi fondamentali dell'elettrochimica e per la costruzione, nove anni dopo, della prima pila elettrica cioè della prima sorgente di corrente continua che consentirà il successivo sviluppo dell'elettromagnetismo [4].

Altri esempi di esperimenti della terza parte sono:

- una rana preparata sostenuta per una zampa poggia su un oggetto in argento con l'uncino di rame infisso nei nervi, appena l'altra zampa tocca l'argento si solleva ricadendo ritmicamente, in modo molto spettacolare, come fosse un "pendolo elettrico" (Fig. 2);
- per dimostrare che l'aria non aveva effetti sulle contrazioni Galvani immerse in acqua un preparato di rana con l'uncino di ferro infisso nei nervi, toccandone poi le zampe con un altro conduttore produsse le contrazioni, inaspettatamente però le contrazioni si manifestarono anche toccando l'uncino così concluse che l'acqua poteva condurre l'elettricità "animale" come un arco metallico "occulto" - l'acqua comune all'epoca aveva sicuramente un contenuto di elettroliti tale da renderla sufficientemente conduttrice - e confermò l'ipotesi verificando che nell'olio (isolante) l'esperimento non riusciva;
- Galvani realizzò poi una serie di esperimenti in cui i nervi dei preparati di rana, ma anche quelli di polli ed agnelli vivi, venivano "armati" cioè ricoperti con fogli di stagno, come avevano fatto i fisici per costruire la bottiglia di Leida, rilevando che le contrazioni erano più intense;
- osservò anche che armare i muscoli non serviva a rendere più intense le contrazioni;
- una serie di osservazioni fu eseguita utilizzando un tubo di vetro con gli archi metallici infissi nei tappi alle due estremità: se il tubo era riempito di fluidi biologici (conduttori), applicando quest'arco disomogeneo al preparato di rana si osservavano le contrazioni che non comparivano quando il tubo era pieno d'olio (isolante);
- i fluidi biologici erano responsabili anche della conduzione di elettricità tra parti di animali che venivano sezionate e poi ricomposte;
- per dimostrare che non era il contatto meccanico con i metalli a stimolare le contrazioni bensì lo scorrere dell'elettricità, Galvani mise un preparato di rana con le zampe in un vaso d'acqua e i nervi in un altro, ed immergendo un arco metallico nell'acqua dei due vasi ottenne le contrazioni (Fig. 3).

Tutti questi esperimenti indussero il medico bolognese a formulare l'i-

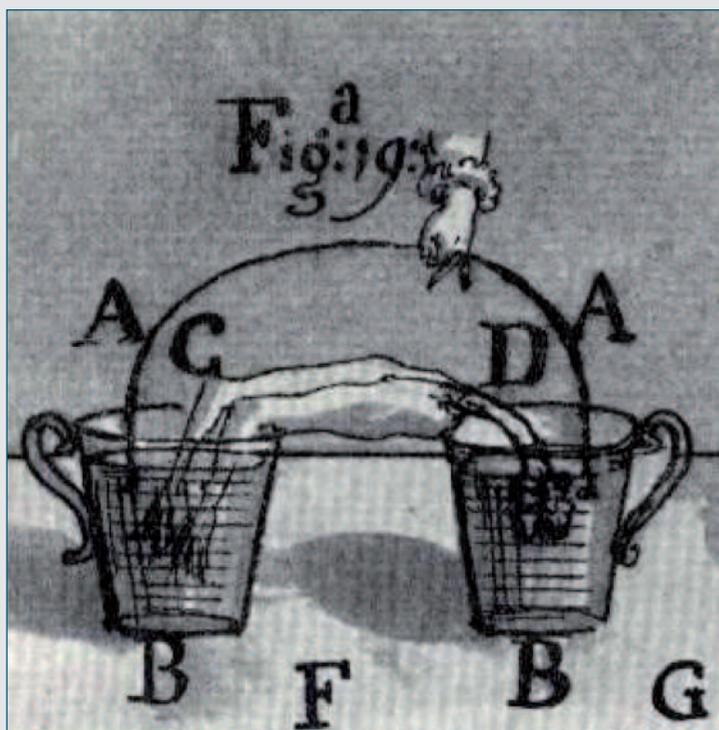


Fig. 3 - Esperimento con la rana a ponte tra le due caraffe, particolare della tavola 4 del *De viribus electricitatis in motu musculari*, il disegnatore è tuttora ignoto

potesi che vi fosse una elettricità “animale” di due qualità opposte, una con sede nei muscoli, l'altra nei nervi. Galvani osservò poi che le contrazioni si verificavano quando una bacchetta di ceramica strofinata (cariche negative) veniva avvicinata ai nervi armati ma non si verificavano quando si avvicinava una bacchetta di vetro strofinata (cariche positive), concluse quindi che i nervi erano la sede dell'elettricità positiva.

In questa parte tuttavia gli effetti elettrochimici dovuti alle giunzioni di metalli dissimili ancora si intrecciano con gli effetti elettrofisiologici legati ai potenziali di membrana di nervi e muscoli.

Utilizzando un arco di metallo omogeneo le contrazioni risultavano deboli mentre si presentavano sempre e vigorose con i metalli disomogenei, in particolare con l'argento che Galvani definì “il migliore conduttore dell'elettricità animale” o con i nervi armati con stagno. Oggi sappiamo che tra i metalli elencati da Galvani, l'argento, oltre ad essere un buon conduttore privo di strati passivi, era quello con il potenziale di ossidazione più elevato, cioè quello con cui si poteva ottenere la maggiore forza elettromotrice e quindi il maggiore stimolo per le contrazioni dei muscoli. I fogli di stagno invece oltre a garantire una buona superficie di contatto con i tessuti biologici, contribuivano alla forza elettromotrice in virtù del loro basso potenziale di ossidazione.

Nella quarta parte del *De viribus...* il medico bolognese illustrò il proprio modello paragonando ogni fibra muscolare ad una bottiglia di Leida in cui il nervo rappresenterebbe il conduttore interno. Le elettricità opposte si sarebbero disposte sulle superfici interna ed esterna di ciascuna fibra muscolare mentre i nervi avrebbero avuto solo la funzione di convogliare l'elettricità verso il cervello, che allora era considerato la sede degli “spiriti animali”, secondo la teoria di Albrecht von

Haller (1708-1777). Per Galvani i nervi erano tubi cavi o riempiti di una sostanza conduttrice, ricoperti di uno strato isolante oleoso. Centocinquanta anni dopo, con la scoperta dei potenziali di membrana, il modello di Galvani si dimostrerà sorprendentemente vicino alla realtà. Il medico bolognese elencò molte analogie tra “elettricità animale” ed “elettricità volgare”, d'altra parte egli sapeva che John Walsh (1726-1795), John Hunter (1728-1793) e Henry Cavendish (1731-1810) avevano già dimostrato la natura elettrica della scossa prodotta dalle torpedini [7], per contro rilevava che gli animali riescono a produrre elettricità senza artifici meccanici come lo sfregamento, che nel Settecento era ancora l'unico modo conosciuto per produrre appunto l'elettricità. Poiché tutti i nervi portano al cervello Galvani riconobbe la natura unitaria dell'elettricità animale e ipotizzò che l'elettricità positiva dall'interno delle fibre muscolari passasse nei nervi generando un disequilibrio, e che poi, giunta nel cervello, per effetto dell'anima, tornasse sull'esterno del muscolo attraverso le membrane o i tessuti umidi producendo la contrazione così come i corpi carichi attirano e raggruppano piccoli frammenti di carta. I movimenti involontari erano poi attribuiti ad “umori acri” che si accumulerebbero all'esterno dei nervi inducendo le contrazioni. A questo punto Galvani, fedele al suo doppio ruolo di ricercatore e medico pratico, cercò nelle nuove scoperte la spiegazione di patologie come “sciatica nervosa”, “apoplessia” o “epilessia” proponendo, pur con le dovute cautele, l'utilizzo dell'elettricità come terapia.

Il modello proposto nel *De viribus...* è straordinariamente vicino alla realtà che conosciamo oggi, ma per la fine del Settecento era estremamente innovativo e, di conseguenza, divise gli scienziati in favorevoli e scettici: tra i favorevoli c'erano Lazzaro Spallanzani (1729-1799) e molti altri medici; tra gli scettici Volta e molti fisici. Il modello della bottiglia di Leida “animale” fu comunque difeso da Galvani con tre ulteriori pubblicazioni rimanendo sostanzialmente invariato.

Ricerche preliminari, dei contemporanei e di conferma

Fu probabilmente durante la “funzione pubblica di anatomista” del 1780 - la dissezione di cadaveri che era eseguita annualmente presso il Teatro Anatomico dell'Archiginnasio (Fig. 4) - che Galvani annunciò ai colleghi bolognesi l'intenzione di iniziare gli studi sull'interazione tra elettricità e apparato neuro-muscolare seguendo la teoria proposta nel 1733 dall'inglese Stephen Hales (1677-1761) e portata a Bologna da Tommaso Laghi (1709-1764) [7]. Secondo gli appunti manoscritti, già il 6 novembre successivo preparò una rana - l'animale usato in altre ricerche da Marcello Malpighi (1628-1694) e Lazzaro Spallanzani che per la semplicità anatomica e la facile reperibilità all'epoca era considerato uno “standard” - la pose sul piano superiore di un vetro armato con fogli di stagno sui due lati - il cosiddetto “quadrato magico” ideato da Franklin che consentiva di accumulare e trasportare cariche elettriche di segno opposto - e con un arco elettrico la mise in contatto con il piano inferiore osservando le contrazioni del preparato. Questo esperimento era già stato eseguito qualche decina d'anni prima

FLASHBACK RIVISITANDO



Fig. 4 - Monumento a Luigi Galvani inaugurato nel 1879 nella piazza a lui intitolata, una delle più centrali di Bologna, subito dietro la basilica di S. Petronio e proprio di fronte all'Archiginnasio, allora sede dell'università, palazzo che contiene il teatro anatomico ove egli svolse almeno tre volte la "funzione pubblica" di anatomista

dal medico bolognese Giuseppe Veratti (1707-1793), quindi si trattava di riproducibilità e non di una novità, ma Galvani lo affrontò riducendo sistematicamente l'elettricità fornita fino a concludere che erano sufficienti quantità talmente piccole che lui non era in grado di rivelare con altri strumenti, poiché l'elettrometro condensatore fu costruito in quello stesso anno da Volta che si stava interessando delle elettricità deboli. Per contro, proprio Volta affermò che, negli esperimenti di Galvani, la rana fungeva solo da raffinatissimo elettrometro escludendo che essa potesse generare o amplificare autonomamente l'elettricità, senza considerare però che quantità così piccole non potevano alimentare movimenti così ampi, come in seguito fu obiettato da Johann Wilhelm Ritter (1776-1810).

Questo ed altri studi sull'interazione tra elettricità "artificiale" e nervi furono descritti, portando anche a conclusioni molto moderne, nel *Saggio della forza nervea* che però rimase inedito, forse perché alla morte di Giovanni Antonio Galli (1708-1782) Galvani rilevò il corso di ostetricia, considerato molto impegnativo perché riguardava sia medici che levatrici, forse perché degli studi sull'elettricità "animale" non riusciva a razionalizzare i risultati fino in fondo. Galvani sospese le

ricerche di elettrofisiologia anche per dedicarsi allo studio delle "arie", così venivano chiamati all'epoca i gas, che era diventato di gran moda verso la metà del '700 portando, in soli 25 anni, alla scoperta dell'aria "fissata" (anidride carbonica, isolata da Joseph Black nel 1754), dell'aria "inflammabile" (idrogeno, Henry Cavendish, 1766), dell'aria "de-flogisticata" (ossigeno, Joseph Priestley, 1774), dell'aria "nativa delle paludi" (metano, Alessandro Volta, 1776) e dell'aria "flogisticata" (azoto, Antoine-Laurent de Lavoisier, 1779). L'obiettivo di Galvani era individuare quegli "spiriti animali" responsabili della vita e, così come aveva fatto con l'elettricità, valutò la possibilità che fosse un gas a trasportare l'energia vitale isolando dai tessuti biologici esposti alla fiamma [7], ma soprattutto dai nervi, un'aria "inflammabile animale" che ipotizzò essere responsabile in tutto o in parte del moto muscolare. Secondo Galvani il "principio inflammabile animale" era assunto con il cibo, trasformato con la digestione e trasportato nei muscoli dove minuscole esplosioni determinavano le contrazioni [6, cap. 6.1]. Estrapolando le osservazioni di Volta sulla capacità della scintilla elettrica di innescare un'esplosione, Galvani unificò gli esperimenti sull'elettricità e sul "principio inflammabile" abbozzando un meccanismo compatibile con quello attualmente riconosciuto.

Sull'onda di questo sforzo di unificazione, nel 1786 Galvani presentò all'Accademia delle Scienze (Fig. 5) la dissertazione *Dell'accordo e delle differenze tra la respirazione, la fiamma e il fiocco elettrico uscente dal conduttore acuminato della bottiglia di Leida* in cui affermava che il "fiocco elettrico" di una bottiglia di Leida posta sotto un contenitore di vetro dopo essere scoccato ripetutamente si affievoliva fino scomparire, esattamente come la fiamma o come un animale che respira sempre più affannosamente fino alla morte, e che le arie "mefitiche", come ad esempio l'aria "flogisticata" acceleravano questi effetti.

A conferma dell'approccio interdisciplinare di Galvani, durante quella pausa nelle ricerche sull'elettrofisiologia, egli studiò anche le tormaline, minerali striati piroelettrici e piezoelettrici, che erano il primo esempio di corpo "omogeneo" capace di sostenere un dipolo elettrico e che gli servirono a controbattere le critiche basate sull'assunto che i muscoli non potessero essere sede di un disequilibrio elettrico. Dopo oltre dieci anni di esperimenti, il quadro delle ricerche di elettrofisiologia si completò con la pubblicazione di *De viribus electricitatis in motu musculari*. Quest'opera appassionò Volta, considerato all'epoca uno dei massimi esperti di elettrologia, che si buttò a capofitto negli esperimenti e già nel 1792 pubblicò *Memoria prima sull'elettricità animale* nella quale sostanzialmente confermava le congetture di Galvani ma, a distanza di due settimane soltanto, pubblicò *Memoria seconda sull'elettricità animale* abbandonando la teoria di Galvani per concludere che sono le giunzioni metalliche a provocare l'elettricità.

Solo due anni dopo furono pubblicati due trattati anonimi, ma subito attribuiti a Galvani, intitolati *Dell'uso e dell'attività dell'arco conduttore nelle contrazioni dei muscoli* e *Supplemento al Trattato dell'uso e dell'attività dell'arco conduttore nelle contrazioni de' muscoli* in cui erano riportati ulteriori esperimenti a sostegno dell'elettricità "animale". In particolare il supplemento descriveva un esperimento in cui le contrazioni

venivano osservate senza l'utilizzo di metalli, semplicemente appoggiando, con utensili isolanti, la sezione del nervo crurale direttamente sulla superficie della fibra muscolare corrispondente, posta su un supporto isolante, attraverso un tassello nella cute. Oggi sappiamo che in questo modo si mette in contatto il citoplasma del nervo con la membrana del muscolo chiudendo il circuito che comprende la giunzione delle membrane cellulari di nervo e muscolo e fornendo così lo stimolo elettrico per la contrazione. Quest'esperimento richiedeva una grandissima perizia chirurgica perché se il muscolo veniva inciso e il citoplasma muscolare andava in contatto con quello nervoso si produceva un "cortocircuito" che impediva la contrazione. Volta non fu mai capace di riprodurlo rimanendo convinto che l'elettricità si formasse esclusivamente per la giunzione di due metalli dissimili.

Infine, nel 1797, Galvani pubblicò *Memoria sull'elettricità animale di Luigi Galvani p. professore di Notomia nella Università di Bologna al celebre Abate Lazzaro Spallanzani pubblico Professore nella Università di Pavia. Aggiunte alcune elettriche esperienze di Gio. Aldini p. Prof. di Fisica* che rappresenta il suo testamento scientifico. La memoria riportava i risultati di cinque intense giornate di esperimenti svolti in riva all'Adriatico con le torpedini [8] ma soprattutto descriveva le contrazioni ottenute mettendo in contatto la sezione del nervo di una zampa con la membrana del nervo dell'altra, superando così anche l'obiezione della disomogeneità dei tessuti. Cinquant'anni dopo, quest'ultimo esperimento fu definito da Emil Heinrich du Bois-Reymond (1818-1896) "l'esperimento fondamentale dell'elettrofisiologia".

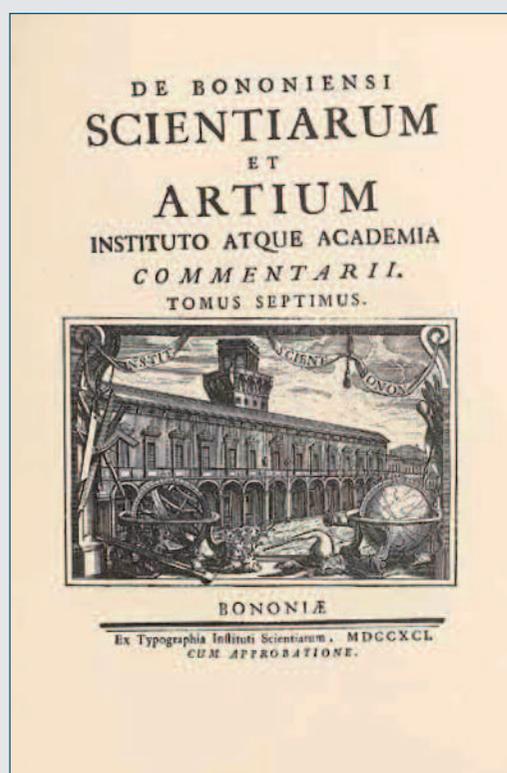


Fig. 5 - Palazzo Poggi, sede dell'Istituto delle Scienze di Bologna, come rappresentato sulla copertina dei *Commentari*

Il modello della "bottiglia di Leida modificata", cioè ricoperta di uno strato di argilla o di cera bucherellata impregnate di una sostanza umida che chiude il circuito con il conduttore interno, rappresenta il punto finale della ricerca di Galvani sul funzionamento dell'apparato neuro-muscolare. Volendo fare una forzatura storica, si può dire che Volta non ha fatto altro che ridisegnare e moltiplicare la "bottiglia di Leida modificata" semplificandola in una

sequenza di armature metalliche dissimili separate alternativamente da supporti impregnati di sostanza umida. Anche la configurazione di pila senza supporti, in cui i metalli erano collocati a ponte tra una serie di vasi pieni di elettrolita, ricorda molto l'esperimento descritto nella terza parte del *De viribus...* in cui il preparato di rana era collocato con le zampe immerse in un vaso ed i nervi in un altro (Fig. 3).

Per quanto oscurata dall'invenzione della pila di Volta, a cui seguì in breve la nascita dell'elettrochimica, la teoria dell'elettricità animale ebbe dei seguaci che contribuirono allo sviluppo, molto più tardivo, dell'elettrofisiologia. Le prime correnti elettriche provenienti da tessuti animali furono misurate tra il 1828 e il 1844 da Leopoldo Nobili (1784-1835) e Carlo Matteucci (1811-1868) con un esperimento molto simile a quello galvaniano della rana a ponte tra due caraffe (Fig. 3), nel 1848 du Bois-Reymond per primo misurò delle correnti elettriche sui nervi e nel 1868 Julius Bernstein (1839-1917) registrò per la prima volta l'andamento temporale della corrente d'eccitazione nervosa stabilendo la velocità di propagazione del segnale elettrico nei nervi, quindi, nel 1902, formulò l'ipotesi elettrochimica dei potenziali di membrana nelle cellule muscolari e nervose. Infine, nel 1939, Alain Lloyd Hodgkin (1914-1998) e Andrew Fielding Huxley (1917-vivente) misurarono per la prima volta la differenza di potenziale elettrico tra interno ed esterno dell'assone (parte della cellula nervosa) gigante del calamaro [4].

Oggi sappiamo che l'elettricità in disequilibrio invocata da Galvani esiste a livello di membrana cellulare dove le pompe ioniche - particolari strutture molecolari - consentono di creare un gradiente di concentrazione tra interno ed esterno della membrana spendendo energia chimica con il ciclo fisiologico della cellula e producendo una differenza di potenziale tra 57 e 9 mV tra i due lati di una membrana spessa tra 5 e 10 nm [9]: è la macchina elettrica interna dell'organismo che medico bolognese aveva ipotizzato alla fine del Settecento senza poterla descrivere nei suoi dettagli molecolari. Affinché gli ioni attraversino la membrana cellulare trasmettendo l'impulso nervoso parallelamente ad essa, è necessario variare il potenziale elettrico della membrana ed è quello che fece Galvani con la macchina elettrostatica, l'elettricità atmosferica o gli archi metallici.

Nella membrana della cellula nervosa ci sono due canali ionici per il potassio, uno sempre aperto e uno che si apre quando la membrana è eccitata elettricamente, e un canale ionico per il sodio che si apre anch'esso quando la membrana è eccitata. In condizioni di riposo all'interno della cellula la concentrazione di Na^+ è minore che all'esterno mentre quella di K^+ è maggiore, quest'ultimo quindi tende a passare all'esterno della cellula attraverso il canale aperto (*leak*). Quando il potenziale elettrico dell'intorno del canale viene variato, il flusso degli ioni s'inverte propagando l'impulso al tratto successivo di membrana. Il meccanismo della pompa sodio-potassio funziona per la trasmissione del segnale elettrico lungo le membrane cellulari dei nervi e dei muscoli. Quando il segnale elettrico giunge al termine della fibra nervosa induce il rilascio di un neurotrasmettitore che viene intercettato da specifiche proteine della membrana cellulare dei

FLASHBACK

RIVISITANDO



Fig. 6 - A sinistra, portale in terracotta della chiesa del Corpus Domini in Bologna che contiene la tomba, a destra, in cui la salma di Luigi Galvani venne traslata insieme a quella della moglie nel 1837

muscoli, ne cambia il potenziale elettrico e induce la trasmissione con il meccanismo della pompa sodio-potassio producendo la contrazione. In questo senso, la membrana della fibra nervosa, grazie all'elevata sensibilità al potenziale elettrico, si comporta come un amplificatore non lineare che, per qualunque potenziale che superi il valore di soglia, emette un segnale anche 100.000 volte più grande di quello eccitante. L'impulso nervoso è quindi una specie di segnale digitale 0/1 perciò Galvani osservò che l'ampiezza delle contrazioni delle zampe non dipendeva, ad esempio, dalla distanza della macchina elettrostatica né dal numero di giri con cui la macchina era caricata prima di scoccare la scintilla. Da questo punto di vista la teoria di una elettricità "animale" è corretta perché l'impulso proveniente dall'esterno agisce come un telecomando che avvia un motore autoalimentato da processi biochimici [6, cap. 10]. D'altra parte, anche Volta aveva ragione ad affermare che la giunzione di metalli dissimili o, come puntualizzò in seguito, di due sostanze conduttrici disomogenee produceva un disequilibrio elettrico che forniva l'impulso per indurre la contrazione.

Conclusioni

In *De viribus electricitatis in motu musculari* elettrofisiologia ed elettrochimica erano ancora legate in un nodo intricatissimo ma le pubblicazioni che si susseguirono a partire dal 1791 sciolsero questo nodo liberando l'elettrochimica che già nel 1800 produsse la pila elettrica, o *organe électrique artificiale* come la chiamò Volta, che rappresentò una delle più grandi invenzioni nella storia della scienza. L'opera di Galvani ne rimase oscurata per 50 anni ma ci vollero altri 100 anni per comprendere in pieno i fenomeni descritti nel 1791.

L'intreccio tra elettrochimica ed elettrofisiologia è emblematico di come la scienza si formi grazie alle osservazioni e speculazioni di diversi intelletti che incontrandosi e scontrandosi portano alla formazione di una conoscenza condivisa che è l'unico vero patrimonio collettivo dell'umanità. Il gran numero di scienziati ricordati in questo articolo insegna che di questi intelletti, pochi restano noti ai più, molti restano noti a pochi, qualcuno viene dimenticato per essere rivalutato in seguito, come fu per Luigi Galvani, ma ciascuno dà un contributo insostituibile per chi ne prosegue le ricerche e, in generale, per il progresso della conoscenza.

Appendice: biografia di Luigi Galvani

Luigi Galvani nacque a Bologna - allora la seconda città dello Stato Pontificio - il 9 settembre 1737 da una famiglia della borghesia bolognese imparentata alla piccola nobiltà locale, si trattava probabilmente di benestanti visto che possedevano una residenza in città (distrutta a fine Ottocento) ed una con annesso podere in Ozzano dell'Emilia (oggi ancora esistente in via Galvani). Il capostipite della famiglia fu probabilmente un argentiere del Quattrocento ma molti discendenti ebbero l'opportunità di laurearsi ed alcuni intrapresero la carriera universitaria. Luigi frequentò lo Studio bolognese ove si laureò in medicina e filosofia all'età di ventun'anni. Da studente aveva frequentato l'Ospedale di Santa Maria della Morte come praticante ma la successiva domanda di assunzione venne respinta, egli quindi ripiegò sul più modesto ospedale di Sant'Orsola dove divenne il sostituto di Giovanni Antonio Galli nel ruolo di chirurgo. Nel Settecento la professione di chirurgo era considerata inferiore a quella di medico tanto che non esisteva una corporazione a tutelarne gli interessi, tuttavia Galvani non abbandonò quest'attività neanche all'apice della sua fama, poiché riteneva che il fine ultimo della medicina fosse curare le persone e solo frequentando l'ospedale poteva restare a contatto con la pratica medica. Nel 1760 fu incaricato di una lettura di medicina all'Università di Bologna, non si trattava di un gran privilegio poiché lo stipendio era basso e all'epoca quasi tutti i laureati che ne facevano domanda venivano accettati. Nel 1761 fu accolto all'Istituto delle Scienze (Fig. 5), una moderna struttura comprensiva di laboratori per la ricerca, fondata grazie all'interessamento e alle collezioni di Luigi Ferdinando Marsili (1658-1730) ed ampliata poi grazie ad un lascito in libri e denaro di papa Benedetto XIV, il bolognese cardinal Prospero Lambertini (1675-1758). L'anno successivo discusse la tesi intitolata *De Ossibus. Theses physico-medico-chirurgicas*, caratterizzata da un moderno taglio interdisciplinare, che gli consentì di ottenere la lettura onoraria, cioè senza stipendio, di chirurgia.

Nel 1762 Galvani sposò Lucia, unica figlia del proprio maestro di anatomia, Domenico Gusmano Galeazzi (1686-1775) che era membro dell'Accademia delle Scienze. Forse anche grazie all'intercessione dello suocero, nel 1766 fu nominato lettore di anatomia e custode delle cere anatomiche del medesimo Istituto divenendo membro dell'Accademia benedettina con un ulteriore stipendio. In seguito Galvani entrò nel Collegio Medico bolognese - l'organo sanitario al servizio dell'amministrazione cittadina - divenendone anche il priore. Grazie a tutti questi incarichi, e ai corsi di anatomia tenuti presso la propria abitazione come usava all'epoca, Galvani poté mantenere uno stile di vita benestante ed acquistare personalmente gli strumenti necessari alla propria attività di ricerca. Per contro, tanti impegni lasciavano poco tempo alla ricerca e gli impedirono di allontanarsi da Bologna per lunghi periodi, infatti si ha notizia di tre soli viaggi: uno nell'alto Appennino bolognese (1775), intrapreso per conto del Collegio Medico allo scopo d'individuare e arrestare un'epidemia che affliggeva i bovini della zona [10], uno a Portofino (1789) durante il quale studiò le "arie" contenute nell'acqua della stazione termale [11], ed infine il tanto agognato viaggio sulla costa Adriatica (1795) per potere studiare *in vivo* i meccanismi di generazione dell'elettricità nelle torpedini [8]. Nonostante Galvani non avesse lasciato

mai lo Stato Pontificio, si mantenne in contatto con tutto il mondo scientifico grazie ad un'intensa attività epistolare e ai testi che l'Istituto delle Scienze riceveva da tutta Europa. Molto più favorevole alla mobilità era la situazione del suo grande concorrente: Alessandro Volta. Quest'ultimo, ancora celibe, era professore di fisica all'Università di Pavia, uno dei principali atenei dell'Impero Austro-Ungarico che era la superpotenza dell'epoca. L'Impero favoriva con appositi finanziamenti i viaggi di studio dei propri scienziati conscio che la circolazione delle idee favorisse la crescita della conoscenza. Volta beneficiò spesso di questi finanziamenti viaggiando in tutta l'Europa occidentale e incontrando i più importanti scienziati dell'epoca [12]. Queste relazioni personali e la fama acquisita grazie alle sue scoperte e invenzioni (metano, pistola a gas, elettroforo, elettrometro condensatore) gli erano valse l'ammissione alla Royal Society di Londra già nel 1792. Fino al 1780 Galvani si occupò principalmente di questioni anatomiche studiando le ossa, il rene, il naso e l'orecchio sia nell'uomo che negli animali, non ci si meraviglia quindi se il medico bolognese si fosse interessato delle pubblicazioni di Walsh sui pesci elettrici uscite tra il 1772 e il 1774, e poi di quelle di Spallanzani del 1783 e del 1784 sulla torpedine. Nel 1782 Galvani assunse l'insegnamento di ostetricia che era stato del Galli, rinunciando pertanto a quello di anatomia. Nel 1790 morì senza figli la moglie Lucia lasciando nello sconforto lo scienziato ma, già nel 1791, egli pubblicò *De viribus electricitatis in motu musculari* che attirò l'attenzione e le critiche di tanti colleghi. Come pronta risposta agli avversari, una seconda edizione del *De viribus...* fu pubblicata a Modena con l'aggiunta di dissertazione e note del nipote Giovanni Aldini (1762-1834). Uscirono quindi, in italiano, *Dell'uso e dell'attività dell'arco conduttore nelle contrazioni dei muscoli* (1794), *Supplemento al Trattato dell'uso e dell'attività dell'arco conduttore nelle contrazioni de' muscoli* (1794) e *Memoria sull'elettricità animale di Luigi Galvani p. professore di Notomia nella Università di Bologna al celebre Abate Lazzaro Spallanzani pubblico Professore nella Università di Pavia. Aggiunte alcune elettriche esperienze di Gio. Aldini p. Prof. di Fisica* (1797). Purtroppo, a differenza del *De viribus...* che era scritto in latino, cioè nella lingua internazionale dell'epoca e che ebbe risonanza quanto meno europea, queste ultime opere, per quanto di grande levatura scientifica, raggiunsero una platea più limitata. Tra Galvani e Volta si accese una leale diatriba scientifica combattuta a suon di esperimenti ideati per confermare le proprie teorie e confutare quelle del concorrente. Il risultato fu estremamente costruttivo perché, in breve tempo, consentì un grande balzo tecnologico con l'invenzione della pila elettrica. Con l'avvento della repubblica Cisalpina, nel 1796 fu chiesto ai professori bolognesi di giurare fedeltà al nuovo governo. Galvani, rifiutando l'intransigenza della politica sulla cultura, non accettò e di conseguenza fu espulso dall'università e lasciato senza stipendio, nonostante che un suo nipote, l'avvocato Antonio Aldini (1756-1826) fosse il presidente della repubblica stessa e, in seguito, consigliere di Napoleone Bonaparte. Galvani si trasferì quindi nella casa del fratello Giacomo dove morì il 4 dicembre 1798, poco dopo che l'università gli aveva restituito lo status di professore. In occasione del primo centenario della nascita, i resti mortali furono traslati nella chiesa monumentale del Corpus Domini in Bologna (Fig. 6) dove oggi riposano insieme a quelli della moglie.

Bibliografia

- [1] Le immagini delle pagine di *De viribus electricitatis in motu musculari* sono oggi consultabili *on-line* sul sito <http://cis.alma.unibo.it/galvani/liber.html>
- [2] G. Milazzo, *Chimica e Industria*, 1987, **69**(1), 75.
- [3] B. Dibner, Luigi Galvani, Burndy Library, Norwak, Connecticut (USA), 1974.
- [4] M. Piccolino, *Brain Res. Bull.*, 1998, **46**, 381.
- [5] P. Gallone, *Chimica e Industria*, 1987, **69**, 71.
- [6] M. Piccolino, M. Bresadola, Rane, torpedini e scintille: Galvani,

- Volta e l'elettricità animale, Bollati Boringhieri Ed., Torino, 2003.
- [7] M. Bresadola, *Brain Res. Bull.*, 1998, **46**, 367.
- [8] Il "taccuino" di Luigi Galvani, Arti Grafiche "Gentile", Fabriano, 1998.
- [9] J. O'M. Bockris, A.K.N. Reddy, *Modern Electrochemistry*, 2a Ed., Kluwer, New York, Cap. 14.
- [10] A. Veggetti, *Obiettivi e documenti veterinari*, 1998, **12**, 53.
- [11] R. Zagnoni, *Nuèter i sit, i quee*, dicembre 1991, n. 34, 116.
- [12] P. Mazzarello, Il professore e la cantante. La grande storia d'amore di Alessandro Volta, Bollati Boringhieri Ed., Torino, 2009.