

Note introduttive alla Storia dell'Elettromagnetismo Classico

I) Il modo in cui l'Elettromagnetismo Classico viene presentato dagli usuali libri di testo è per molti aspetti insoddisfacente.

a) Arnold Sommerfeld nella prefazione al suo testo sulle equazioni differenziali alle derivate parziali in Fisica (I) asserisce che: "La spesso menzionata 'armonia prestabilita' tra ciò che è matematicamente interessante e ciò che è fisicamente importante si incontra ad ogni passo e conferisce un'attrazione estetica - mi piacerebbe dire metafisica - al nostro soggetto".

Effettivamente questo è il caso di una ben nota equazione: la cosiddetta equazione potenziale, ovvero le equazioni differenziali alle derivate parziali del secondo ordine di Laplace e Poisson:

$$\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad \text{e} \quad \Delta u = -4\pi\rho$$

Questa equazione è ben nota in molte branche della Fisica che si riferiscono sia alle particelle sia ai mezzi continui.

L'equazione potenziale in effetti è usata nella teoria della gravitazione, in elettrostatica e magnetostatica, in idrodinamica dei fluidi incompressibili e irrotazionali (ove u rappresenta la velocità potenziale).
L'equazione potenziale bidimensionale

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$$

è la base della teoria delle funzioni di Riemann, che Sommerfeld caratterizza come la "teoria di campo" delle funzioni analitiche $f(x+iy)$.

L'equazione delle onde

$$\Delta u = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

è fondamentale in acustica (ove c è la velocità del suono) e nell'elettrodinamica dei campi variabili (ove c è la velocità della luce) e in ottica. Nella teoria della relatività speciale diventa l'equazione del potenziale quadrimensionale

$$\square u = \sum_{k=1}^4 \frac{\partial^2 u}{\partial x_k^2} = 0$$

Altre applicazioni dell'equazione oltre quelle degli stati d'equilibrio e dei processi oscillatori (teoria dell'elasticità: membrana e filo oscillanti, vibrazione trasversale di un disco sottile, oscillazioni di una sbarra, etc.) sono quelle dei processi di equalizzazione: conduzione del calore (equalizzazione delle differenze di energia), diffusione (equalizzazione delle differenze di densità dei materiali) e conduzione elettrica (equalizzazione di differenze di potenziale).

L'equazione di Schrodinger della meccanica ondulatoria appartiene formalmente allo stesso schema, in particolare nel "force-free case":

$$\Delta u = \frac{2m}{i\hbar} \frac{\partial u}{\partial t}$$

La straordinaria applicazione dell'equazione potenziale senza dubbio giustifica l'affermazione iniziale di A. Sommerfeld ma lascia aperto il problema di una risposta più precisa sui rapporti matematica-fisica che non il ricorso all'"armonia prestabilita" di Leibniziana memoria. Per Sommerfeld il problema dipende "dall'invarianza per rotazione e traslazione che si deve richiedere nel caso di mezzi omogenei e isotropi." e dal fatto che "l'uso di equazioni differenziali alle derivate parziali è dovuto all'approccio dell'azione tramite campi, che è la base della fisica contemporanea, in accordo al quale solo elementi vicini di spazio si possono influenzare l'un l'altro."

Un altro premio Nobel che dedica largo spazio a questa problematica in un libro di testo è R. Feynman. Egli sottolinea che ciò che queste equazioni hanno in comune e probabilmente il fatto che abbiamo a che fare con un'approssimazione di distribuzione uniforme in uno spazio omogeneo ed isotropo (2): "E' possibile che questa sia la chiave? Che ciò che è comune a tutti i fenomeni sia lo spazio, la cornice in cui la fisica è posta? Finchè le cose sono ragionevolmente uniformi nello spazio, gli elementi importanti che entreranno in gioco saranno le diverse rapidità di variazione delle grandezze al variare della posizione nello spazio. Questa è la ragione per la quale si ottiene sempre un'equazione che contiene un gradiente. Le derivate devono comparire nella forma di gradiente o di divergenza; infatti siccome le leggi della fisica sono indipendenti dalla direzione esse devono esprimersi in forma vettoriale.....ciò che è comune a tutti i nostri problemi è che essi implicano lo spazio e che noi abbiamo imitato ciò che è effettivamente un fenomeno complicato con un'equazione differenziale semplice".

Questa seconda citazione, scritta circa trent'anni dopo la prima (di Sommerfeld) presenta un approccio più astratto: non fa riferimento a mezzi isotropi e omogenei ma allo spazio come cornice di tutti i fenomeni, continui e discontinui, ed il cosiddetto approccio tramite campi viene ricondotto alla condizione, probabilmente un'approssimazione di distribuzione uniforme. Ogni simiglianza di sostanze fondamentali è esplicitamente negata: "La "sottostante unità" (della natura) potrebbe significare che ogni cosa sia fatta della stessa sostanza, e pertanto obbedisca alle stesse equazioni. Questa sembra una buona spiegazione, ma pensiamoci su. Il potenziale elettrostatico, la diffusione dei neutroni, il flusso di calore - abbiamo veramente a che fare con la stessa sostanza ? Possiamo veramente immaginare che il potenziale elettrostatico sia fisicamente identico alla temperatura, oppure alla densità delle particelle ? Certamente non è esattamente la stessa cosa dell'energia termica delle particelle. Lo spostamento di una membrana non è certamente identico alla temperatura perchè allora c'è una sottostante unità?"

b) Fin qui un primo punto è stato illustrato: la generalità dell'equazione potenziale. Una seconda considerazione segue immediatamente: la sua vasta applicazione in entrambi i campi della fisica classica, le particelle e i mezzi continui . Nello sviluppo della teoria matematica del potenziale entrambe queste vecchie fondamentali concezioni vengono utilizzate: da una

parte i corpi continui vengono considerati in ultima analisi come aggregati di particelle, per i quali la legge di Newton può essere generalizzata, d'altra parte le forze in ogni punto dello spazio sono prese come un tutto, un continuum, piuttosto che fissare l'attenzione su forze in punti isolati (3). Questo conduce alla teoria formale dei campi, con i suoi concetti di linee di forza, flussi, sorgenti, pozzi, divergenza, rotore, etc.. In questo contesto formale è rilevante per i nostri scopi il ruolo dell'equazione di continuità,

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

che esprime matematicamente un approccio continuo, per mezzo di derivate parziali, ma che fisicamente non si riferisce soltanto ai mezzi continui. Fin qui ci siamo riferiti soltanto alla teoria matematica del potenziale ed alle teorie matematiche dei campi scalari, vettoriali e tensoriali. Questo ambito di discorso e quello cui Einstein ed Infeld (4) si riferirono come "campo come rappresentazione" e Max Born (5) "l'azione pseudocontigua" (se il tempo non compare). Questi autori lo consideravano come un punto intermedio tra le concezioni dell'azione a distanza e quelle dell'azione a contatto, tra la fisica del discreto e quella del continuo.

c) Un terzo aspetto da sottolineare del modo in cui l'E.C. viene presentato nei libri di testo è il tentativo di sistematizzazione formale di risultati derivanti da riferimenti concettuali completamente differenti. Ne è un esempio l'uso delle equazioni di Maxwell della moderna teoria classica del campo insieme con l'equazione di Lienard e Wiechert per i potenziali di una carica in moto. Tale equazione viene usata come soluzione generale delle equazioni di Maxwell stesse, ma originariamente essa fu derivata in un contesto di azioni a distanza anche se non istantanea. Un secondo esempio è l'equivalenza delle equazioni di Feynman per il campo di una carica in moto in modo qualsiasi (6)

$$\underline{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{\rho}{r^{12}} \underline{r}' + \frac{r}{c} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{\rho}{r^{12}} \underline{r}' \right) + \frac{1}{c^2} \cdot \frac{d^2 \rho \underline{r}'}{dt^2} \right]$$

$$c \underline{B} = \rho \underline{r}' \times \underline{E}$$

con le soluzioni delle equazioni di Maxwell. Il tipo di derivate utilizzate, totali e non parziali, mostra da sé il contesto concettuale della formula. E, naturalmente, lo stesso concetto di campo è molto lontano dal contesto originario delle idee di Faraday e Maxwell. In particolare l'equazione di Feynman è un'equazione di azione a distanza e non di azione per contatto, con forze però che dipendono non solo dalle distanze ma anche dalle velocità e dalle accelerazioni delle cariche. La propagazione inoltre avviene con velocità finita e non infinita come nelle tradizionali teorie dell'azione a distanza. L'equivalenza di questo tipo di approccio con quello radicalmente differente dell'azione per contatto fa sorgere interessanti domande che però non trovano sui libri di testo risposte adeguate.

d) Un quarto aspetto da sottolineare è la minore importanza attribuita dalla fisica contemporanea al modello del campo continuo basato su una concezione geometrica dello spazio tempo, dopo la sconfitta delle teorie di campo unificato di Einstein e lo sviluppo della fisica quantistica. Non solo il

concetto newtoniano di forza diviene meno importante ma anche il concetto einsteiniano di campo (7): "... il potenziale vettore \underline{A} (insieme con il potenziale scalare che va con esso) sembra dare la più diretta descrizione della fisica. Ciò diventa sempre più chiaro via via che andiamo più profondamente nella teoria quantistica. Nella teoria generale dell'elettrodinamica quantistica, si prendono i potenziali vettore e scalare come le quantità fondamentali in un insieme di equazioni che sostituiscono le equazioni di Maxwell: \underline{E} e B stanno lentamente scomparendo dalle moderne espressioni delle leggi fisiche: stanno per essere sostituiti da \underline{A} e Φ .

Strettamente legato alle considerazioni precedenti è il seguente problema: il concetto di potenziale elettrico (vettore e scalare) deve essere ancora considerato uno strumento matematico privo di reale significato fisico?

E inoltre: su che basi oggi va fatta la netta distinzione classica tra quantità matematiche e fisiche?

e) Ulteriore problema da sottolineare è il ruolo della costante c (la velocità della luce). Per Einstein (8) l'introduzione di questa costante costituiva il superamento della fisica newtoniana ed il riconoscimento dell'esistenza del campo continuo, per Planck (9) l'espressione moderna dell'oggettività nelle leggi fisiche, per Pauli (10) solamente un nuovo gradino in uno sviluppo linearmente cumulativo verso approssimazioni sempre più rigorose.

f) Insoddisfacente, nei libri di testo, è anche l'uso dei grandi principi regolativi: principalmente quello di minima azione (P.M.A.) e quello di conservazione dell'energia (P.C.E.). Entrambi questi principi non vengono esposti in modo chiaro. In particolare per quel che riguarda il P.C.E. nell'elettromagnetismo vi è un contrasto non chiarito tra 1) la formulazione meccanica classica che prevede una distinzione netta tra energia cinetica e potenziale, 2) la formulazione del medesimo in riferimento a formule tipo quelle del Feynman che, facendo dipendere la forza dalla velocità e dall'accelerazione non permettono più una separazione netta dell'energia in cinetica e potenziale, e 3) la formulazione di Poynting che introduce la conservazione locale. In generale si può dire che i principi regolativi sono della massima importanza ma il loro contenuto si riallaccia ad una specifica scelta dei parametri e questa scelta presenta una certa arbitrarietà. Spesso questa scelta è determinata con l'aiuto di uno specifico modello concettuale, ma quest'ultimo a sua volta dipende dai principi regolativi e tra i due c'è quindi un'interazione.

g) Un'ultima considerazione infine riguarda il rapporto teoria-esperimento: generalmente esso viene presentato in maniera acritica e banalmente induttiva: dagli esperimenti si risale direttamente agli assiomi della teoria e le previsioni della teoria vengono poste in raffronto diretto con gli esperimenti.

I punti che sono stati sottolineati si riferiscono a quattro aspetti dell'impresa scientifica: il modello concettuale, principi regolativi, le strutture matematiche e la componente sperimentale. I libri di testo non

offrono una risposta sufficiente al problema delle interazioni tra queste componenti. Ciò è probabilmente ovvio perché i libri sono finalizzati a insegnare la "scienza normale" (11). Nello stesso tempo però si rischia di perdere di vista l'impresa scientifica nel suo complesso: la sua parte fluida oltre che quella stabile (12). Dare una risposta a questi problemi, cioè chiarire le interazioni tra le varie componenti e le ragioni della sistemazione contemporanea diventa un problema di storia e filosofia della scienza, ed in particolare di una storia e filosofia della scienza che superino la vecchia versione dello sviluppo linearmente cumulativo della scienza. Ma mentre si riconosce che lo sviluppo linearmente cumulativo è un approccio alla storia della scienza ingenuo e dogmatico io credo che uno sforzo vada fatto allo stesso tempo per delineare i problemi storici sulla base di un esplicito e moderno punto di vista scientifico (13). Ci sono due fondamentali ragioni per questa impostazione: primo, in ogni resoconto di storia della fisica c'è un'opzione storiografica ed epistemologica ma c'è, anche se implicita, un'opzione fisica; infatti giocano un ruolo le idee fisiche che lo storico ha del dominio di fenomeni in esame e la differenza tra queste e quelle dello scienziato che sta studiando. Per esempio lo studio della storia del concetto di energia senza uno specifico e possibilmente esplicito termine di riferimento crea grossi problemi, almeno quanti ne crea il fare storia senza sapere che tipo di criterio storiografico di selezione si stia applicando. Secondo, anche se il punto di vista moderno non è l'ultimo o necessariamente il migliore, almeno esso dà garanzia di essere sufficientemente ampio e largamente noto tra i fisici; questi, naturalmente, non sono certamente gli ultimi ai quali uno storico della fisica dovrebbe indirizzarsi, soprattutto se riconosce che la scienza ha aspetti importanti che non sono inclusi nella "ricerca stabile".

L'importanza di iniziare una ricerca in storia della fisica da un punto di vista "fisico" esplicito e moderno "grande, anche se questo punto di vista non va considerato come definitivo, il migliore, il risultato cumulativo delle teorie precedenti. Esso è infatti una visione delle cose sufficientemente coerente, vasta abbastanza da permettere di utilizzare le teorie del passato, ben conosciuta al giorno d'oggi. Essa è in ogni caso presente, spesso in maniera confusa, implicita e parziale allo storico.

II Per iniziare un lavoro storico sull'Elettromagnetismo Classico che possa portare a chiarire i problemi sollevati dai libri di testo è utile un approccio storiografico suggerito da T. Kuhn. Per Kuhn infatti bisogna suddividere le scienze del seicento in classiche (astronomia, armonia, matematica, ottica e statica) e baconiane (chimica, elettricità e magnetismo, termometria). Durante la rivoluzione scientifica del seicento si ha una trasformazione delle scienze classiche, che ricerche storiche più accurate permettono di attribuire a nuovi modi di guardare vecchi fenomeni più che ad una serie di nuove scoperte sperimentali. In questo Kuhn è d'accordo con Koyrè. Disaccordo invece sulla seconda tesi: Kuhn infatti sostiene che il movimento baconiano fu importante per il sorgere di nuovi campi di indagine scientifica: i campi su definiti, per l'appunto, baconiani. Le scienze baconiane nel seicento e settecento, a differenza di quelle classiche, restarono ad un livello fortemente qualitativo. Nell'ottocento invece furono

quantificati e raggiunsero il livello delle scienze classiche. Da qui deriva il termine di seconda rivoluzione scientifica per questa matematizzazione delle scienze baconiane. Ma tra la prima e la seconda rivoluzione scientifica c'è un'importante differenza: nel primo caso si cambiò il modello concettuale di un corpus teorico già matematizzato, nel secondo si matematizzò una serie di risultati sperimentali, inquadrandoli in specifici e più completi contesti concettuali.

Questo tipo di impostazione si adatta molto bene allo sviluppo dell'elettromagnetismo classico: in particolare il momento di passaggio dalla fase qualitativa a quella quantitativa si ha con lo sviluppo della teoria matematica del potenziale alla fine del settecento e nei primi decenni dell'ottocento in connessione agli sviluppi della teoria dell'azione per contatto e della teoria dell'azione a distanza.

La ripartizione classica della Storia dell'E.C. corrisponde a otto fasi:

- a) la fase baconiana nel seicento e settecento, culminante con la formulazione della legge di Coulomb nel 1785
 - b) gli sviluppi della teoria matematica del potenziale
 - c) la scoperta della pila, le esperienze di Oersted e le leggi di Biot-Savart e di Ohm
 - d) l'opera di Ampere e lo sviluppo dell'elettrodinamica, cioè il filone newtoniano nell'elettromagnetismo in particolare con Weber in Germania
 - e) lo sviluppo delle idee di Faraday e Maxwell in Inghilterra e della teoria dell'azione a contatto
 - f) il dibattito nella seconda metà dell'ottocento tra le concezioni inglese e tedesca dell'azione per contatto e dell'azione a distanza
 - g) la soluzione del dibattito con la sintesi di Lorentz
 - h) lo sviluppo della teoria della relatività a partire dalla teoria dell'elettrone di Lorentz.
- a) L'elettricità ed il magnetismo dalle origini alla formulazione della legge di Coulomb.

Il primo documento sullo studio del magnetismo è del 1269: l'"Epistola Petri Peregrini de Maricourt de magnete", nella quale si racconta della costruzione di un globo di magnetite e delle esperienze condotte osservando le posizioni assunte da un ago poggiato su questo globo. Tali esperienze dovevano condurre al concetto di poli magnetici (in analogia ai poli geografici terrestri) e a realizzare che l'attrazione tra i magneti dipende essenzialmente dalla posizione dei poli, che quindi rappresentano la sede del potere magnetico.

Dovevano passare più di trecento anni prima della pubblicazione del lavoro di William Gilbert (1544-1603), il "De Magnete"¹, con il quale si fa iniziare la storia moderna sia dell'elettricità sia del magnetismo.

¹GILBERT, William (1544-1603)

Gilbert , che formulò una vera e propria "filosofia magnetica", si preoccupava di distinguere i "nobili" effetti prodotti dalla magnetite da quelli dell'ambra strofinata. Nel campo del magnetismo Gilbert fu il primo a formulare l'idea che la terra sia essa stessa un grande magnete e quindi a spiegare così le proprietà della bussola , inoltre ipotizzò che il magnetismo potesse dar conto della gravità e del moto dei pianeti. Gilbert mostrò che non solo l'ambra, ma anche il vetro, lo zolfo, svariate pietre preziose e altri materiali strofinati godevano della capacità di attrarre: tale forza fu da Gilbert denominata elettricità. Dall'analisi delle differenze tra forze elettriche e magnetiche Gilbert ipotizzò in primo luogo che i fenomeni elettrici sono dovuti a qualcosa di natura materiale che sotto l'influenza dello strofinio si libera dal vetro o dall'ambra nei quali normalmente è imprigionato, in secondo luogo che l'azione elettrica è solo attrattiva e non reciproca: siamo al sorgere della teoria dell'elettricità come effluvio di materia imponderabile. E' da notare da una parte la concezione di azione per contatto (la materia non può agire dove non c'è) e dall'altra quella di fluido imponderabile. Importante è anche l'analogia con i fenomeni gravitazionali: per Gilbert l'atmosfera è l'effluvio gravitazionale con il quale la terra attira i corpi.

La reciprocità dell'azione venne riconosciuta e resa pubblica indipendentemente da H. Fabri (,) e da R. Boyle (,), solo alla metà del secolo. Quanto alla possibilità di una repulsione tra corpi carichi è negata sia da N. Cabeo ² (,) che la considera un fenomeno occasionale, che da O. von Guericke (,) che la assimila ad una manifestazione di "virtù espulsiva". Solo H. C. Huygens (,) la prevederà nel quadro di una teoria cartesiana, nella quale l'emanazione di fluido da parte dei corpi elettrizzati viene sostituita con la vibrazione della loro superficie, vibrazione che si comunica alla materia sottile che riempie tutto lo spazio.

Guilielmi Gilberti... De magnete, magneticisque corporibus et de magno magnete tellure. Physiologia nova plurimis et argumentis et experimentis demonstrata. Londini, Excudebat P. Short, 1600. [16], 240 p., ill., in 4°.

²CABEO, Niccolò (1586-1650)

Philosophia magnetica in qua magnetis natura penitus explicatur, et omnium quae hoc lapide cernuntur causae propriae afferuntur. Nova etiam pyxis construitur, quae propriam poli elevationem, cum suo meridiano, ubique demonstrat... Ferrariae, Apud F. Succium, 1629. [16], 412, [8] p., ill. nel testo, in 4°.

Per tutto il Seicento la teoria fluidica e quella cartesiana ebbero una diffusione incontrastata, nonostante l'affermazione della teoria gravitazionale newtoniana dell'azione a distanza. Per quel che riguarda i fluidi imponderabili bisogna ricordare che l'opera di Gilbert avrebbe fatto scuola: nel 1700 si affermerà infatti in chimica l'idea del flogisto che durerà fino alla rivoluzione chimica di Lavoisier, la concezione del calorico, che affermatasi a danno di una precedente concezione meccanica del calore (Bacone, Boyle, Newton), durerà fino al 1850, ed infine l'etere materiale, che dopo aver soppiantato i corpuscoli di luce, sarà utilizzato dalla fisica fino quasi al 1900.

Innovazioni e scoperte di rilievo caratterizzano la prima metà del Settecento. In Inghilterra, F. Haukesbee³ (.), costruttore di strumenti presso la Royal Society dal 1703, mentre era presidente Newton, per illustrare l'effetto dell'attrito sulla produzione di luce, costruisce la sua "macchina elettrica", nella quale una sfera di vetro veniva elettrizzata facendola ruotare mentre era a contatto con le mani di qualcuno.

Vale la pena di ricordare che lo stesso Newton (.) opta per un'interpretazione in termini di effluvi dei fenomeni elettrici, e non in termini di forze attrattive/repulsive per diverse ragioni, tra le quali sono senz'altro da annoverare le obiezioni cartesiane alle qualità occulte invocate per la sua teoria della gravitazione.

Nei medesimi anni, a Leida, compare l'opera di Willem s'Gravesande⁴ (1688-1744) nella quale gli effetti elettrici sono attribuiti a vibrazioni indotte negli effluvi dallo strofinio, effluvi stabilmente collegati alle sostanze.

³HAUKSBEE, Francis (1666-1713)

Esperienze fisico-meccaniche sopra vari soggetti contenenti un racconto di diversi stupendi fenomeni intorno la luce e l'elettricità producibile dallo strofinamento de' corpi, con molte altre notabili apparenze non mai prima osservate. Colle spiegazioni di tutte le macchine... In Firenze, Per J. Guiducci e S. Franchi, 1716. [18], 162 p., 7 tav. ripieg., in 8°.

⁴s GRAVESAND, Willem Jacob (1688-1742)

Physices elementa mathematica experimentis confirmata, sive Introductio ad philosophiam Newtonianam... Editio quarta auctior et correctior. Leidae, Apud J. A. Langerak, J. et H. Verbeek, 1748. 2 v., 127 tav. ripieg., in 4°.

Stephen Gray(,), amico di Desaguliers traduttore inglese dell'opera di s' Gravesande, facendo ricerche su nuove sostanze elettrizzabili, individua le capacità di alcuni corpi di agire come canali per il trasporto a distanza della "virtù elettrica". All'inizio ritiene che la dimensione di questi corpi sia la responsabile di eventuali perdite, ma poi riconosce che l'elemento determinante è la sostanza. Cataloga quindi le sostanze che potevano servire da sostegni e quelle che potevano servire da recettori: quelle che Desarguliers⁵ (,) chiamerà poi rispettivamente 'conduttori' ed 'isolanti'. Nell'interpretazione data da Gray venivano riunificati i meccanismi di conduzione e di attrazione, creando una situazione ambigua e per molti versi contraddittoria. Comunque, d'ora in poi non si potrà parlare più di effluvi inseparabilmente connessi con i corpi bensì di un fluido elettrico, concepito come sostanza materiale imponderabile. Gray stesso distinse il fluido elettrico dal calorico (entrambi si generavano per strofinio, si trasmettevano per contatto e migliori conduttori dell'uno lo erano anche dell'altro) osservando che a differenza del calorico il fluido elettrico interessa solo le superfici dei corpi: osservò infatti identici effetti su due cubi di legno di quercia uno pieno ed uno cavo.

Intanto in Francia, C.-F. de Cisternay Dufay (1698-1739) stabilisce che ogni corpo, trattato in maniera appropriata, può essere elettrizzato per strofinio eccetto metalli e fluidi, e formula la cosiddetta "regola di Dufay": per ottenere un'elettrizzazione per comunicazione è necessario che il corpo usato si trovi sopra un corpo isolante. Da notare che se questa regola fosse stata usata senza eccezioni avrebbe impedito la scoperta della bottiglia di Leida. Dufay ipotizzò poi l'esistenza di due fluidi elettrici: quello "vetroso" e quello "resinoso", stabilì che oggetti con elettricità simile si respingono, mentre quelli con elettricità dissimile si attraggono, che ogni corpo ha un tipo fisso di elettricità, indipendentemente dall'agente di strofinio, e che l'elettricità comunicata per contatto è dello stesso tipo di quella del comunicatore.

Ricordiamo inoltre l'abate Nollet ⁶(,), cartesiano convinto, che ideò un sistema teorico che godette di grandissima fama presso i suoi

⁵DESAGULIERS, John Theophilus (1683-1744)

A dissertation concerning electricity... To which is annex'd a letter from president Barbot, perpetual secretary of the Academy of Bordeaux... London, W. Innys and T.Longman, 1742. 50 p., in 8°.

⁶NOLLET, Jean Antoine (1700-1770)

Essai sur l'électricité des corps... 2. éd. A Paris, Chez les frères Guerin, 1765. XXI, 276 p., 4 tav. ripieg., in 12°.

contemporanei, all'interno del quale riusciva a 'spiegare' pressoché tutti i fenomeni noti. Egli riferisce tutto a materia inerte in movimento e descrive i fenomeni elettrici in termini di "correnti defluenti" ed "affluenti"⁷. Egli non accetta infatti l'ipotesi di Dufay di due elettricità: le sue correnti differiscono in direzione, non in natura.

Intorno alla metà del secolo E. J. Kleist (,) scopre per caso la potenza della scarica prodotta da quella che verrà chiamata bottiglia di Leida, mentre cerca di caricare un chiodo inserito in un bicchiere che teneva in mano. Nessun altro ritrova i suoi effetti perché Kleist non sottolinea che lo sperimentatore deve tenere la bottiglia in mano ed essere in contatto con il pavimento: situazione che violava la "regola di Dufay". A. Cunaeus (,), cerca di riprodurre le esperienze che aveva visto fare a P. van Musschenbroek⁸ (,), che cercava di ottenere il fuoco dall'acqua, caricandola elettricamente, e ignorando la "regola di Dufay" tiene in mano la bottiglia ed esperisce la forza della scarica. Riferisce di questa sua esperienza a Réamour a Parigi e quindi ne vengono a conoscenza gli "eltrricisti" francesi. L'interpretazione teorica di questo esperimento fu molto ardua: esso contraddiceva le teorie dell'epoca, in particolare quella di Dufay. L'idea di circuito elettrico, di induzione elettrostatica e per l'appunto quella di condensatore erano infatti estranee alla fisica dell'epoca. William Watson (1715-1787) inglese, notò che la scossa elettrica su descritta passava soltanto attraverso le braccia ed il petto e quindi ipotizzò l'esistenza di un solo fluido: l'etere elettrico che non viene né creato né distrutto ma semplicemente trasferito durante la scarica. Tale etere è presente ovunque in ugual densità i fenomeni elettrici sono

NOLLET, Jean Antoine (1700-1770)

Lecons de physique expérimentale... A Paris, Chez H. L. Guerin et L. F. Delatour, 1764. 6 v., tav. ripieg., in 12°.

⁷NOLLET, Jean Antoine (1700-1770)

Essai sur l'électricité des corps... 2. éd. A Paris, Chez les frères Guerin, 1765. XXI, 276 p., 4 tav. ripieg., in 12°.

⁸MUSSCHENBROEK, Pieter van (1692-1761)

Elementa physicae conscripta in usus academicos... Neapoli, Typis P. Palumbo, 1745. 2 v., [29] tav. ripieg., in 8°.

MUSSCHENBROEK, Pieter van (1692-1761)

Introductio ad philosophiam naturalem... Lugduni Batavorum, apud S. et J. Luchtmans, 1762. 2 v., 64 tav. ripieg., in 4°.

dovuti semplicemente al variare della densità di questo fluido, variazione che si produce ad esempio per strofinio. In realtà era la proposizione di una teoria dell'elettricità ad un fluido, che doveva essere indipendentemente ripresa da Benjamin Franklin (1706-1790) uomo politico e uno dei primi scienziati americani. All'ipotesi di un solo fluido viene affiancata da Franklin l'idea di conservazione; ne discende immediatamente la legge di conservazione della carica elettrica: in ogni processo elettrico si formano sempre uguali quantità di elettricità positiva e negativa, normalmente i corpi sono elettricamente neutri perchè la densità dell'etere all'interno ed all'esterno è la stessa. Franklin chiamò carichi positivamente i corpi con eccesso di elettricità vetrosa (come una bacchetta di vetro strofinata) e carichi negativamente i corpi con scarsità di elettricità vetrosa (come una bacchetta d'ambra strofinata). Ciò ha dato origine alla moderna convenzione del passaggio della corrente dall'elettrodo positivo (abbondanza di fluido) a quello negativo (scarsità di fluido), ove però il fluido è quello resinoso e non vetroso come pensava Franklin. Un altro modo di considerare la teoria a un fluido è di collegare la materia all'elettricità positiva ed il fluido elettrico a quella negativa. In questo modo il passaggio del fluido elettrico da un corpo A ad uno B carica automaticamente A positivamente e B negativamente. Questa convenzione sarà ripresa dalla teoria dell'elettrone di Lorentz.

E' interessante comunque notare come la legge di conservazione della carica sia sorta in un contesto teorico radicalmente diverso da quello attualmente accettato.

Franklin formula anche un'interpretazione della bottiglia di Leida, utilizzando delle ipotesi non condivise dalla maggior parte dei suoi contemporanei: l'assoluta impermeabilità del vetro e l'azione a distanza macroscopica. Va anche ricordato per l'individuazione del potere dispersivo delle punte e l'identificazione del fulmine con la

scarica elettrica e quindi l'invenzione del parafulmine. Il suo volume "Esperimenti e osservazioni sull'elettricità eseguiti a Filadelfia in America"⁹ è del 1753; con Franklin si chiude l'epoca degli scienziati che interpretano l'elettrostatica in termini di azione a contatto, infatti, mentre nelle teorie delle atmosfere elettriche sono indistinguibili l'induzione e la conduzione, la

⁹F R A N K L I N, Benjamin (1706-1790)

Experiments and observationa on electricity, made at Philadel phia in America... to which are added letters and papers on phi losophical subjects. The whole corrected... and now first collected into one volume...[4th ed]. London, D. Henry, 1769. IV, 496,[16] p., ill., 7 tav., in 4°.

carica e la forza, le esperienze di Franklin che rilevano un'attività nei parafulmini anche con tempo sereno portano alla separazione di induzione e conduzione; e d'altra parte l'interpretazione proposta della bottiglia di Leida prevedeva che la materia elettrica agisse anche attraverso il vetro (considerato impermeabile ad essa), e dunque a distanza.

Fu Franz Aepinus (1724-1802) il primo a ribaltare completamente la teoria dell'azione per contatto, pur continuando ad accettare l'ipotesi dell'esistenza di un solo fluido elettrico. Il lavoro di Epino si sviluppò a partire da quello di Franklin: egli accetta l'ipotesi di un solo fluido elettrico ed estende l'idea di impermeabilità al fluido elettrico a tutti i non conduttori. Per dimostrare questa teoria costruì il primo condensatore ad aria. Il successo di quest'impresa, corroborato dall'osservazione dello stesso Franklin che l'elettricità all'intorno di un corpo eccitato non è distrutta se si elimina l'aria, lo portò a negare l'esistenza di effluvi elettrici che circondano i corpi carichi: in tal caso infatti i condensatori ad aria si sarebbero scaricati. Considerando inoltre l'esperimento di Gray con i cubi di quercia citato in precedenza si poteva dire che il fluido elettrico si colloca sulle superfici dei corpi e che le attrazioni e repulsioni non sono che azioni a distanza attraverso l'aria interposta. Riformula quindi matematicamente i risultati di Franklin, in termini di azione a distanza¹⁰, ma per fare ciò deve ammettere che le particelle di materia ordinaria si respingono come le particelle di fluido elettrico. Questa teoria che collega un tipo di elettricità alla materia ordinaria (fissa) e l'altro al fluido elettrico (mobile), permise ad Epino di spiegare il fenomeno dell'induzione elettrica nei corpi conduttori; in questo fenomeno la forza attrattiva prevale su quella repulsiva perché le forze diminuiscono con l'aumentare della distanza. Epino era conscio di quest'aspetto del problema ma non riuscì a dare l'esatta legge di tale decremento.

Alla determinazione della legge quantitativa sulle attrazioni e repulsioni elettrostatiche sono legati essenzialmente tre nomi: Joseph Priestley, Henry Cavendish e Charles Augustin de Coulomb.

Priestley (1733-1804), lo scopritore dell'ossigeno, era amico di Franklin e nel 1766 fu informato da quest'ultimo che all'interno di un corpo cavo metallico elettrizzato non v'era forza elettrica nè cariche sulla superficie interna. Ripetuti tali esperimenti nel 1767 Priestley, al termine

¹⁰AEPINUS, Franz Ulrich Theodor (1724-1802)

Tentamen theoriae electricitatis et magnetismi. Accedunt dissertationes duae, quarum prior phaenomenon quoddam electricum, altera magneticum explicat... Petropoli, Typis Academiae Scientiarum, [175] o[20], 390 p., 7 tav. ripieg. f.t., in 4°.

della sua "History and present state of electricity"¹¹, si poneva la seguente domanda: "Non dobbiamo forse inferire da questo esperimento che l'attrazione dell'elettricità è soggetta alle stesse leggi della gravitazione, ed è pertanto in accordo al quadrato delle distanze; dato che si dimostra facilmente che se la terra avesse la forma di una cavità un corpo all'interno non sarebbe attratto da un lato più che dall'altro?". L'argomentazione di Priestley non è però una vera dimostrazione, infatti l'analogia tra comportamento gravitazionale ed elettrico era incompleta: la gravità entro una scatola rettangolare non scompare, mentre sono comunque nulli gli effetti elettrici. Il ragionamento di Priestley è stato più tardi ripreso, e sulla sua base, ma con altri strumenti a disposizione, come il teorema di Gauss, si sono fatti molti esperimenti di verifica dell'esattezza del fattore due al denominatore della forza elettrostatica.

Henry Cavendish (1731-1810), un bizzarro aristocratico inglese, nel 1771 pubblicò "An attempt to explain some of the principal phaenomena of electricity by means an elastic fluid". Lo scopo dichiarato di quest'opera era di portare avanti l'opera di Aepinus, con spirito newtoniano. Cavendish ipotizza per la forza un andamento del tipo $1/r^n$ e, con stringenti dimostrazioni, giunge alla conclusione che l'esponente non può differire da 2 per più di 1/50. Questo lavoro di Cavendish, come del resto quello di Aepinus, era considerato troppo difficile dalla maggior parte degli "elettricisti"; costoro erano del tutto impreparati alla matematizzazione messa in atto in questi testi. Bisogna aggiungere che molti lavori di Cavendish vennero alla luce solo molto più tardi, nel 1879, per opera di Maxwell; la loro non pubblicazione dipese da molti fattori, tra i quali il carattere bizzarro dello scienziato.

Prima di parlare dei contributi di Coulomb soffermiamoci un attimo sul magnetismo: il primo a determinare la legge della forza tra poli magnetici fu John Michell (1724-1793) nell'anno 1750 nel suo "A treatise of artificial magnets" scritto a soli 26 anni. Nella sua teoria da una parte si riallaccia a Gilbert per l'ovvia notazione Nord Sud che si attraggono se opposti e respingono se simili, ma d'altra parte se ne distacca affermando che "ogni polo attrae o respinge in maniera esattamente uguale a uguali distanze in ogni direzione" e inoltre, in contrasto con i suoi contemporanei, "l'attrazione e la repulsione magnetica sono esattamente uguali tra loro".

Michell tentò di introdurre anche nel magnetismo la teoria ad un fluido, ma il tentativo non riuscì e verso la fine del settecento s'era affermata nel magnetismo una teoria a due fluidi, boreale e australe, in analogia a quella di du Fay dell'elettricità vetrosa e resinosa. E' da notare che Michell fu il primo inventore della bilancia di torsione e che

¹¹PRIESTLEY, Joseph (1733-1804)

The history and present state of electricity, with original experiments... London, J. Dodsley, J. Johnson and B. Davenport, and T. Cadell, 1767. [4], XXXI,736,[10] p., 7 tav. ripieg., in 4°.

l'esperimento di Cavendish sulla misura della densità della terra fu progettato dal Michell stesso.

Coulomb (1736-1806) , che era fisico ed ingegnere, mise a punto la sua bilancia di torsione per la misura di forze anche assai deboli, come risultato dei suoi studi sulla torsione dei fili. Con questa bilancia, nel 1785, verificò la legge dell'inverso del quadrato dapprima per la repulsione e in seguito per l'attrazione. Nelle sette memorie da lui scritte tra il 1785 ed il 1789 sono presentate tutte le esperienze che lo hanno reso celebre. Coulomb rimise in voga la teoria dei due fluidi, anche se in una memoria del 1788, confrontando le due ipotesi a uno o due fluidi, sosteneva che erano equivalenti sia da un punto di vista matematico che interpretativo. I motivi principali di dibattito (Volta ad esempio sosteneva la teoria ad un fluido) tra le due teorie erano che in una entrambi i fluidi sono mobili all'interno di un conduttore solido, mentre nell'altra le particelle del conduttore sono fisse ed è mobile solo l'effettivo fluido elettrico. Nella quarta memoria di Coulomb si mostra che l'elettricità in equilibrio giace alla superficie dei conduttori nella sesta che la forza elettrica nei pressi di un conduttore è proporzionale alla densità superficiale di elettrizzazione. Coulomb nel campo del magnetismo confermò la legge di Michell e mostrò che i due fluidi magnetici non possono essere ottenuti separatamente. Coulomb spiegò questa proprietà supponendo che i due fluidi magnetici fossero "imprigionati" entro le molecole del magnete e che la magnetizzazione consistesse nella separazione dei due fluidi alle estremità della molecola.

La legge di Coulomb ha avuto una importanza fondamentale per lo sviluppo dell'elettrostatica:

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

Da una parte essa segna il trionfo della concezione newtoniana dell'azione a distanza, ma dall'altra essa pone immediatamente anche le condizioni del superamento di questa stessa concezione. Infatti alla fine del settecento lo sviluppo matematico dell'elettrostatica era estremamente carente, ma dopo la derivazione della legge di Coulomb esso assumerà nuovo vigore. Come nota Max Born "il problema principale dell'elettrostatica consiste nel trovare la distribuzione di carica su un insieme di conduttori sottoposti a influenza, e le forze dovute a tali cariche, nota la quantità di elettricità posseduta da ogni conduttore. Il grande interesse di questo problema è nel fatto che esso porta immediatamente a superare la formulazione iniziale basata sulla teoria dell'azione a distanza, con l'ipotesi di un'azione pseudocontinua, il che significa, nel linguaggio della matematica, sostituire alle somme su tutte le forze di Coulomb, equazioni differenziali nell'incognita campo elettrico, o una quantità ad esso connessa, il potenziale. Si tratta di questioni di carattere essenzialmente matematico alla cui soluzione contribuirono scienziati come Laplace (1782), Poisson (1813), Green (1828), Gauss (1840)...Ci limiteremo quindi a mettere in evidenza che questa trattazione dei fenomeni elettrostatici, generalmente nota come teoria del potenziale non è una vera e propria teoria dell'azione per contatto... ma piuttosto una teoria d'azione a distanza istantanea,

poiché in essa non si introduce il concetto di velocità di propagazione finita. Le equazioni differenziali usate si riferiscono infatti solo a variazioni dell'intensità del campo nello spazio e non nel tempo".

Dopo Coulomb inizia un processo di matematizzazione dell'elettrostatica, che segue gli sviluppi delle ricerche sulla gravitazione, e ciò ovviamente è dovuto alla stretta analogia tra la formula di Newton e quella di Coulomb. In un primo periodo la Francia è al centro della cultura scientifica europea, la tendenza matematizzante è portata avanti con grande successo all'interno dell'Ecole Polytechnique. Già dal 1740 erano sorti dibattiti sul calcolo dell'attrazione gravitazionale esercitata da un corpo esteso su una massa unitaria considerata puntiforme. Essa viene considerata come la somma delle forze esercitate da tutte le piccole masse che costituiscono il corpo.

Se $d\xi d\eta d\zeta$ è un piccolo volume del corpo così che esso possa essere considerato come una particella avente centro in (ξ, η, ζ) al punto $P(x, y, z)$ l'attrazione esercitata da tutte le piccole masse di densità ρ sulla particella unitaria è un vettore diretto da P verso la piccola porzione di massa e per la legge newtoniana della gravitazione le componenti del vettore sono:

$$-k\rho \frac{x-\xi}{r^3} d\xi d\eta d\zeta$$

$$-k\rho \frac{y-\eta}{r^3} d\xi d\eta d\zeta$$

$$-k\rho \frac{z-\zeta}{r^3} d\xi d\eta d\zeta$$

dove K è la costante nella legge di Newton e

$$r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}$$

La forza esercitata dall'intero corpo sulla massa P ha per componenti

$$f_x = -k \iiint \rho \frac{x-\xi}{r^3} d\xi d\eta d\zeta$$

$$f_y = -k \iiint \rho \frac{y-\eta}{r^3} d\xi d\eta d\zeta$$

$$f_z = -k \iiint \rho \frac{z-\zeta}{r^3} d\xi d\eta d\zeta$$

dove l'integrale è esteso a tutto il corpo che esercita l'attrazione. Gli integrali valgono anche nel caso in cui P sia all'interno del corpo. Invece di trattare ogni componente della forza separatamente è possibile introdurre

una funzione $V(x,y,z)$ le cui derivate parziali rispetto a x,y,z sono rispettivamente le tre componenti della forza. Questa funzione è:

$$V(x, y, z) = \iiint \frac{\rho}{r} d\xi d\eta d\zeta$$

Differenziando sotto il segno di integrale rispetto a x,y,z si ottiene:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{k} f_x; \quad \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{k} f_y; \quad \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{1}{k} f_z$$

e queste equazioni valgono anche per P interno al corpo.

La funzione V è chiamata una funzione potenziale. Quando i problemi che implicano le tre componenti f_x, f_y, f_z possono essere ridotti al problema di lavorare con v c'è l'ovvio vantaggio di lavorare con una sola funzione invece che con tre. Caratteristica principale di V è che per punti esterni al corpo essa soddisfa l'equazione differenziale alle derivate parziali:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = 0$$

in cui non compare. Questa è l'equazione di Laplace, ovvero l'equazione potenziale.

Il primo ad avere l'idea che la forza potesse essere derivata da un potenziale e ad introdurre una funzione potenziale fu D. Bernoulli nella sua Idrodinamica del 1738. L'equazione potenziale stessa appare per la prima volta in una delle maggiori opere di Eulero: Principi del moto dei fluidi, del 1752.

Ulteriori sviluppi di questo approccio furono dati da Lagrange nel 1762, da Legendre nel 1782, da Laplace nel 1782 e le applicazioni all'elettricità ed al magnetismo principalmente da Poisson nel 1812, da Green nel 1828 e da Gauss nel 1839.

Metodologicamente e storiograficamente è importante l'analisi di questi sviluppi della teoria matematica del potenziale. Ho già ricordato che l'uso di equazioni differenziali alle derivate parziali in cui la variabile tempo non compare non è considerata come introduzione di un'azione per contatto dagli storici dell'elettromagnetismo che vedono come elemento fondamentale l'affermarsi di una concezione di campo all'Maxwell-Einstein. Il problema è però molto complesso perché data l'equivalenza formale tra le teorie dell'azione a distanza e a contatto, valida anche oggi come dimostra la formula di Feynman, il passaggio dal laplaciano al d'Alembertiano può anche essere considerato come un passaggio formale, implicante sì una velocità finita delle interazioni ma non una teoria dell'azione per contatto (vedi teoria dei potenziale ritardati).

In altre parole il passaggio da

$$\begin{aligned} \nabla^2 \Phi &= -\frac{\rho}{\Sigma_0} & e & & \nabla^2 \bar{A} &= -\frac{J}{\Sigma_0 c^2} \\ \nabla^2 \Phi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} &= \frac{\rho}{\Sigma_0} & e & & \nabla^2 \bar{A} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial t^2} &= -\frac{J}{\Sigma_0 c^2} \end{aligned}$$

può essere visto come il passaggio da un'azione a distanza (pseudocontigua) ad un'azione a contatto (campo) oppure come il passaggio da un'azione a distanza immediata ad un'azione a distanza con tempo di propagazione finito. E ciò ovviamente non è indifferente per l'analisi storica: in genere coloro che sostengono la prima ipotesi trascurano i contributi dati al dibattito delle scuole che sostenevano la seconda ipotesi.

c) Come vedremo tra breve la polemica Galvani-Volta porterà alla scoperta della pila ed al sorgere dell'elettromagnetismo-elettrodinamica. Alcune notazioni vanno evidenziate: l'interpretazione di Volta del concetto di tensione è legata alla densità di carica e non al concetto di potenziale. Essa influirà su una parte dei fisici francesi e su Ohm in Germania. Solamente nel 1849 Kirchoff unificherà il concetto di tensione con quello di differenza di potenziale. Il ruolo delle metafisiche di fondo sempre notevolmente influente: si ritrova nei modelli concettuali differenti di Volta e Galvani e negli spunti che la filosofia della natura tedesca suggerì a Oersted e Sabeck (collaboratore di Goethe) sui rapporti tra elettricità e magnetismo e elettricità e calore.

Abbiamo visto che l'ultima memoria di Coulomb sull'elettrostatica è del 1789, e l'elettrostatica ancora per parecchi anni avrebbe occupato un posto di rilievo negli studi sull'elettricità. Nell'ultimo decennio del settecento però stavano maturando delle ricerche che avrebbero portato a dei risultati inattesi e di straordinaria importanza. Tali ricerche sono legate al nome di due scienziati italiani, Luigi Galvani (1737-1798) e Alessandro Volta (1745-1827), che diedero luogo ad una lunga polemica, come vedremo, estremamente fruttuosa.

L'invenzione della bottiglia di Leida e la scoperta che le scariche prodotte davano luogo a intense contrazioni muscolari negli esseri viventi aveva aperto un nuovo campo agli esperimenti dell'epoca; molti si occuparono dell'influenza del "fluido elettrico" sugli animali e sorsero varie linee di tendenza sull'interpretazione teorica da dare ai fenomeni elettrofisiologici. Due in particolare le più importanti: una identificava nella forza elettrica l'ipotetico "spirito animale" l'altra all'opposto riteneva il "fluido elettrico" un semplice agente irritativo dei muscoli e dei nervi. In questo clima maturarono le esperienze di Galvani, che aveva la cattedra di anatomia presso l'Accademia delle Scienze di Bologna, ed in particolare quella ormai famosa nel novembre del 1780 con la rana, esperienza quindi che non è da attribuire al caso. Essa viene comunque seguita da una serie di altre esperienze, ben più importanti ed originali, pubblicate nel 1791, e che oltre riproporre fatti già noti illuminavano fenomeni sconosciuti. Galvani operava sugli arti inferiori di rane, isolati dal tronco, mantenendo però intatta la connessione dei nervi femorali col midollo spinale. Collegando elettricamente il midollo spinale a una macchina elettrostatica si ottenevano forti contrazioni nei muscoli degli arti. Ma la più importante scoperta di Galvani consistè nel mettere in luce la possibilità di ottenere contrazioni nelle rane preparate, anche senza l'uso di macchine elettrostatiche o di corpi elettricamente carichi, semplicemente connettendo il midollo spinale al muscolo mediante un arco elettroconduttore. Le

contrazioni ottenute apparentemente senza intervento di elettricità dall'esterno erano inspiegabili. osservava Galvani "le contrazioni si ottengono tanto con archi bimetallici quanto, sebbene in misura minore, con archi monometallici; le contrazioni si ottengono pure senza arco alcuno, solo toccando il muscolo col corrispondente nervo crurale; anche applicando i due estremi dell'arco a dei punti distinti del nervo, senza toccare il muscolo, si ottengono contrazioni. Contrazioni si verificano pure se si interrompe l'arco in qualche suo punto mentre esso è connesso al nervo e al muscolo".

Sulla base di ciò Galvani suppose che l'agente materiale della contrazione fosse l'"elettricità animale". Per Galvani essa viene prodotta dal cervello e trasferita dai nervi alla parte interna dei muscoli dove si accumula, si crea quindi uno squilibrio elettrico tra parte interna ed esterna del muscolo, che viene a formare una specie di bottiglia di Leida. La connessione tra nervo (parte interna) e parte esterna del muscolo determina la contrazione.

Queste, in breve, le idee di Galvani che suscitarono un notevole dibattito tra i fautori dell'identità tra "spirito animale" e fluido elettrico e i sostenitori dell'"irritabilità" causata dalla corrente elettrica; in questo dibattito si inserì Alessandro Volta.

Alessandro Volta nacque a Como il 18 febbraio 1745, già a diciotto anni, autodidatta nel campo della fisica, scriveva all'abate Nollet, fisico parigino, illustrandogli una sua concezione tendente a unificare i fenomeni elettrici e newtoniani. A venticinque anni, senza aver conseguito la laurea, che non conseguirà più, scrisse le prime memorie di elettrostatica. Nel 1774 viene nominato professore a Como, entra in contatto con i maggiori fisici dell'epoca, perfeziona il condensatore e inventa innumerevoli e svariate apparecchiature; nel 1779 viene nominato professore di fisica sperimentale a Pavia, ove nel 1785 gli studenti lo eleggeranno rettore.

Volta, spinto dalle concezioni di Galvani, inizia nel 1792 a fare esperienze secondo lo schema su descritto, cioè assimilando la rana ad una bottiglia di Leida. Notando però che quando l'arco "scaricatore" è bimetallico le contrazioni sono più violente si convinse che non dalla rana ma dal contatto tra i due metalli nasceva il "disequilibrio elettrico" causa delle contrazioni della rana. Galvani comprendendo che la sua teoria veniva ribaltata nel considerare l'arco bimetallico come eccitatore anziché semplice conduttore iniziò una lunga polemica con Volta che, in breve, ebbe vasta risonanza e contrappose più in generale la scuola di Pavia a quella di Bologna. Tra i momenti salienti di questo dibattito teorico e sperimentale vi fu il tentativo di Volta di sperimentare la contrazione muscolare direttamente sulla propria lingua: dapprima con una foglia di stagno ed un cucchiaino d'argento e poi con una scarica di una bottiglietta di Leida. Ciò gli fece individuare due sapori diversi per l'elettricità positiva e negativa, rispettivamente amarognolo e acidulo. Ritenne da questa esperienza di confermare l'interpretazione data nel caso della contrazione muscolare delle rane: la coppia metallica eccita questa volta il nervo del gusto. I galvaniani, in risposta, come abbiamo visto, riuscirono a mostrare l'esistenza della contrazione anche con un arco di un sol metallo e poi mettendo direttamente in contatto i muscoli lombari ed il midollo spinale

della rana senza alcun arco. La teoria di Volta sembrò a quel punto in seria difficoltà finché Volta non riuscì a costruire un condensatore con elettroscopio che metteva in evidenza l'elettrizzazione provocata dal contatto dei due metalli (prima legge di Volta). In pratica si era in una situazione di parità tra le due scuole: gli uni avevano eliminato la coppia metallica, gli altri la rana. Continuando i suoi esperimenti con varie sostanze Volta finalmente nel 1799 scoprì che le forze elettromotrici si sommano quando vengono costituite catene di coppie bimetalliche tutte nel medesimo ordine, separate tra loro da un liquido acido: "Questo é il gran passo da me fatto sulla fine del 1799, passo che mi ha condotto ben tosto alla costruzione del nuovo apparato scotente" - apparato che in seguito denominò organo elettrico artificiale e poi apparato elettromotore a colonna donde infine il nostro "pila" (cioè colonna). Galvani frattanto era morto convinto che le contrazioni ottenute col solo contatto muscolo-nervo non si potevano spiegare se non in base all'elettricità animale. Egli affermava che proprietà analoghe si trovavano nell'elettricità prodotta dalle torpedini di mare: pertanto non si capiva perché un tale tipo di bioelettricità non potesse trovarsi in ogni altro animale.

Egli affermava che proprietà analoghe si trovavano nell'elettricità prodotta dalle torpedini di mare: pertanto non si capiva perché un tale tipo di elettricità non potesse trovarsi in ogni altro animale. Anche dopo la scoperta della pila il galvanismo continua ad avere un certo numero di seguaci ed a stimolare ricerche di elettrofisiologia.

Il successo di Volta fu eccezionale: nel 1801 fu ricevuto da Napoleone e premiato all'Istituto di Francia. Continuò a lavorare, sia pure con minore intensità e minori successi, fino ai settant'anni e poi si ritirò. Morì nel 1827.

E' già da notare che l'interposizione di un liquido tra i conduttori non era considerato teoricamente rilevante da Volta sebbene egli fosse cosciente che la pila acidificata era più efficiente e che in assenza del liquido acido non si aveva la somma degli effetti tra le varie coppie ma lo stesso effetto della coppia costituita dal primo e dall'ultimo metallo (seconda legge di Volta del 1801).

Immediatamente dopo l'annuncio della scoperta di Volta, fatto nel 1800, in Inghilterra Nicholson e Carlisle costruirono una pila e per rendere più sicuro il contatto all'estremità superiore vi posero una goccia d'acqua: notarono la produzione di gas in quel punto. Immersero quindi i terminali della pila in un tubo d'acqua e, con elettrodi di platino, notarono la produzione di ossigeno e idrogeno ai due elettrodi rispettivamente positivo e negativo. Si trattava della scomposizione elettrica dell'acqua nei suoi due gas componenti: era il primo processo di elettrolisi le cui leggi quantitative sarebbero venute molto più tardi, con Faraday nel 1832. Uno dei primi ad individuare una azione chimica nel processo di produzione della corrente tramite la pila, anche in opposizione a Volta fu Humphrey Davy (1778-1829): "L'ossidazione dello zinco nella pila, ed i cambiamenti chimici ad esso connessi sono in qualche modo la causa degli effetti elettrici che essa produce". Seguendo questa linea Nicholson costruì una pila in cui vi era un solo metallo (ma più di un fluido) per dimostrare che la forza elettromotrice non dipendeva dall'effetto Volta, cioè dal contatto tra due metalli diversi.

Davy infine pervenne nel 1807 ad una concezione secondo la quale il "contatto" e la spiegazione "chimica" si intrecciavano: il primo sarebbe la causa che disturba l'equilibrio, mentre la seconda continuamente riproduce le condizioni attraverso le quali l'energia di contatto può esercitarsi, cioè ricrea l'equilibrio.

d) Per parecchi anni ancora l'elettrolisi e la sua interpretazione avrebbero affascinato i fisici e provocato accesi dibattiti tra teorie contrastanti, ma su questi ora sorvoleremo per parlare di un contributo tra i maggiori, al sorgere dell'elettromagnetismo e del clima culturale che lo generò: l'individuazione della deflessione dell'ago magnetico prodotta dal passaggio della corrente.

L'esistenza di una stretta relazione tra elettricità e magnetismo era stata ipotizzata già da lungo tempo: nel 1735 era stata notata una magnetizzazione di alcuni oggetti metallici colpiti da un fulmine e nel 1751 Franklin riuscì a magnetizzare un ago da cucire per mezzo di una scarica prodotta da una bottiglia di Leida. Ne seguirono molti ma infruttuosi esperimenti perché ciò che si cercava era il collegamento tra elettricità statica e magnetismo: ad esempio nel 1805 Hachette e Desormes tentarono di determinare se una pila voltaica isolata, sospesa, si orientasse secondo il magnetismo terrestre. Lo stesso Oersted doveva per parecchi anni, dal 1807 al 1820, sperimentare a circuito aperto anziché chiuso. Ciò può dare un'idea delle difficoltà concettuali che essi dovevano affrontare per raggiungere dei risultati oggi considerati banali e può collocare in una prospettiva diversa da quella abituale il ruolo giocato dal "caso" in numerose scoperte: il "caso" ha svolto un ruolo positivo solo se prodotto in un ambiente teoricamente pronto a recepire e inquadrare un determinato evento, anzi in un ambiente che fosse in un certo senso alla sua ricerca.

Soffermiamoci un attimo sulla figura di Oersted e sul suo mondo concettuale perché la differenza tra i programmi di ricerca di Oersted e Ampere può servire ad illustrare i rapporti e le interconnessioni tra teoria ed esperimento in un concreto esempio di storia della fisica.

Hans Christian Oersted nacque in Danimarca nel 1777 e morì nel 1851. Dopo la laurea all'università di Copenaghen viaggiò in Francia, Germania e Paesi Bassi entrando in contatto con fisici e filosofi tra i maggiori dell'epoca, ad esempio Fichte, Shelling, Ritter e si accosta alle problematiche connesse alla scoperta e alla utilizzazione della pila. Nel 1809 espose in un volume le sue concezioni sulla natura e sull'origine unitaria di tutti i fenomeni, concezioni che sono in stretta connessione da una parte con le idee dei filosofi tedeschi della "filosofia della natura" e dall'altra con gli interessi scientifici dell'autore. La natura per Oersted veniva intesa come un processo, e non come una struttura statica: in quel processo i vari agenti naturali erano interdipendenti e trasformabili gli uni negli altri. Per l'altro verso la distribuzione nello spazio di tali agenti costituiva l'oggetto da indagare, ciò che stava dietro i fenomeni e ne produceva il fluire. Pertanto la natura non era più pensabile in termini di materia riducibile alle spiegazioni della fisica matematica meccanicistica: in opposizione al tentativo degli scienziati francesi dell'Ecole Polytechnique di costruire un'immagine fisico-matematica del mondo (Laplace, Poisson), Oersted

tentava di cogliere qualitativamente i conflitti basilari della natura alla cui dinamica dovevano essere ricondotti i fenomeni indagati in laboratorio. Non a un caso quindi che queste idee di Oersted si accoppiassero ai suoi studi di elettricità, galvanismo e magnetismo: proprio questi erano i settori in cui si incominciavano a mettere in discussione le teorie meccanicistiche settecentesche. Oersted nel 1813 scriveva: "Si percepisce che le forze magnetiche hanno la stessa generalità di cui godono le forze elettriche. Si dovrebbe fare dei tentativi per vedere se l'elettricità, nel suo stadio più latente, è in grado di esercitare una qualche azione sul magnete". Finalmente nel 1820 Oersted poteva scrivere: "La mia precedente convinzione della identità delle forze elettriche e magnetiche si era sviluppata con nuova chiarezza, e decisi di provare la mia opinione in proposito mediante esperimenti.....richiamai l'attenzione sulle variazioni dell'ago magnetico durante i temporali e, nello stesso tempo, esposi l'ipotesi che una scarica elettrica potesse agire su un ago magnetico situato all'esterno del circuito galvanico". La comunicazione del 1820 venne immediatamente tradotta e pubblicata sulle più importanti riviste europee: si era giunti alla consapevolezza di una fondamentale difficoltà per una spiegazione del mondo naturale in termini di sole forze newtoniane, agenti a distanza lungo rette, ed alla consapevolezza anche della contraddizione tra la concezione dell'azione a distanza (che verrà portata avanti da Ampère) e quella dell'azione a contatto (ripresa da Faraday). E' da notare infine che Oersted e Faraday si incontrarono nel 1823 e rimasero poi in fruttuoso contatto epistolare per trent'anni.

Il 30 ottobre 1820, poco dopo la presentazione della scoperta di Oersted fatta da Arago all'Accademia di Francia, Jean Baptiste Biot (1774-1862) e Felix Savart (1791-1841) annunciarono la legge che porta il loro nome, generalizzata in seguito da Laplace:

$$dH = i \cdot \frac{ds \sin \alpha}{r^3}$$

la legge indica che la forza è perpendicolare al filo e alla congiungente e ciò in netto contrasto con le concezioni newtoniane secondo cui le forze dovevano agire lungo le congiungenti i corpi in esame.

André Marie Ampère (1775-1836) si assumerà il compito ed il programma di ricerca di spiegare l'esperimento di Oersted senza rinunciare alle forze centrali.

Nel 1822, poco dopo la scoperta di Oersted fu scoperta una connessione fra "galvanismo" e calore: Thomas Seebeck di Berlino scoprì che si può produrre una corrente elettrica semplicemente riscaldando il punto di giunzione di due metalli; questo genere di circuiti furono denominati termoelettrici.

Nel frattempo si continuavano a fare esperienze con le pile di Volta: Davy nel 1825 mise in connessione i terminali di una pila con un percorso contenente dell'acqua ed, in parallelo a questo, con un conduttore metallico; al di sotto di una certa lunghezza del conduttore l'acqua non veniva più decomposta; confrontando i conduttori metallici si scoprì che la conducibilità

è inversamente proporzionale alla lunghezza e direttamente proporzionale alla sezione.

Restava però ancora da collegare la corrente, oltre che ai conduttori, anche alle caratteristiche della batteria: ciò fu effettuato nel 1826 da George Simon Ohm (1787-1854), tedesco. Ohm era un deciso ammiratore della scuola matematica francese e del programma di matematizzazione e di astrazione nella scienza: si interessa quindi maggiormente dell'espressione matematica delle leggi che della loro interpretazione fisica. In particolare ebbe grande influenza su di lui l'opera di Fourier del 1822: "Theorie analytique de la chaleur". Dice Ohm: "La grandezza del flusso tra due particelle adiacenti, a parità di altre condizioni, è stata assunta come proporzionale alla differenza delle forze elettriche esistenti nelle due particelle; proprio come, nella teoria del calore, il flusso calorico tra due particelle è visto come proporzionale alla differenza tra le due temperature" (come si ricorderà Fourier sosteneva l'ipotesi del fluido "calorico"). Si evidenzia pertanto la necessità di introdurre una quantità analoga alla temperatura per misurare il "potere di conduzione" che agisce sull'elettricità tra due punti. Ohm si riallacciò alle ricerche di Volta sulla "forza elettroscopica" di una pila a circuito aperto. In pratica tale "forza elettroscopica" doveva identificarsi con il potenziale elettrostatico, ma Ohm ed i suoi contemporanei non avevano chiare le relazioni tra le concezioni teoriche sulla pila e le funzioni elettrostatiche di Poisson che derivavano dalla teoria matematica del potenziale. Infatti all'epoca la "forza elettroscopica" nella pila aperta era in genere identificata con la densità dello strato elettrico nel posto in prova; ora invece Ohm, riconoscendo che le correnti elettriche non sono confinate alla superficie dei conduttori, sembra che abbia ritenuto che la "forza elettroscopica" in un posto in un circuito fosse proporzionale alla

locale densità spaziale di elettricità, un'idea che aveva delle analogie con le relazioni che esistono tra la temperatura di un corpo e la densità spaziale di calore che si suppone sia contenuto in esso. Comunque Ohm pervenne alla sua famosa formula:

$$S=YE$$

che portò ad un notevolissimo passo avanti nello studio dell'elettromagnetismo: si realizzò infine che la corrente che fluisce in ogni conduttore dipende solo dalla conduttività specifica del conduttore e da un'altra variabile che sta all'elettricità proprio come la temperatura sta al calore e, inoltre, si realizzò che quest'ultima variabile è il collegamento tra la teoria delle correnti e l'elettrostatica. A causa del clima culturale della Germania dell'epoca, dominato da quella filosofia della natura che aveva dato notevoli stimoli a Oersted, ma ostile alla scuola fisico-matematica francese di derivazione illuministica alla quale Ohm si rifaceva, a quest'ultimo fu data una cattedra solo nel 1849, ben ventidue anni dopo la pubblicazione della sua fondamentale memoria e solo cinque anni prima della sua morte.

e) Non mi soffermo qui sulle opere di Ampère e Faraday. Occorre qui solamente sottolineare come nella prima metà dell'800 il primato scientifico passi dalla Francia all'Inghilterra e di qui in seguito nella seconda metà alla Germania. Gli sviluppi dell'opera di Ampère sono infatti favorevolmente accolti da Weber, allievo di Gauss, in Germania, mentre invece l'opera di Faraday e di W. Thomson stimolerà il fondamentale contributo di Maxwell. verso la metà del secolo vediamo quindi due filoni, uno tedesco, dell'azione a distanza ed uno inglese, dell'azione a contatto, abbastanza nettamente distinti e contrapposti. La teoria matematica del potenziale costituisce un ponte tra le due concezioni perché viene largamente utilizzata da entrambe le scuole. I rapporti tra strutture matematiche, modelli concettuali, principi regolativi e risultati sperimentali sono ancora in larga misura non chiariti dall'analisi storica.

f) Un primo aspetto che vorrei mettere in risalto è il carattere non cruciale del ricorso all'esperimento nel dibattito tra le due scuole. Nelle parole dello stesso Maxwell (17):

"Da un punto di vista filosofico inoltre, è estremamente importante che i due metodi siano confrontati. Entrambi sono riusciti a spiegare i principali fenomeni elettromagnetici, entrambi hanno tentato di spiegare la propagazione della luce come un fenomeno elettromagnetico ed hanno effettivamente calcolato la sua velocità, mentre ciò che effettivamente avviene, così come la maggior parte delle concezioni secondarie delle grandezze in gioco, sono radicalmente differenti".

In effetti nella seconda metà del secolo scorso il dibattito sui fenomeni elettromagnetici era molto vitale. C'erano molte scuole che si contrapponevano nelle principali nazioni europee. In questa sezione prendiamo in considerazione il dibattito a partire dal 1846, cioè dalla pubblicazione della legge di Weber sulla interazione tra cariche, fino alla teoria dell'elettrone di Lorentz che rappresentò una valida ma temporanea sintesi della controversia. Fondamentalmente due punti di vista si contrapponevano: l'azione a contatto e quella a distanza, il campo verso la particella, la concezione della natura come continua e come discreta. Entrambi questi punti di vista avevano radici nella concezione meccanica, il primo si rifaceva alla meccanica dei corpi continui ed il secondo a quella delle particelle. Alla fine del secolo non si poteva dire che l'una o l'altra concezione avessero prevalso: la teoria di Lorentz rappresenta una sintesi, che adotta elementi di entrambi gli approcci. La risoluzione del dibattito fu ovviamente temporaneo: tentativi sono ancora fatti per costruire una teoria elettromagnetica basata solamente sull'uno o sull'altro dei due modelli fondamentali. In questa introduzione tali ulteriori sviluppi non verranno neanche accennati. Ciò che a me sembra importante notare è che:

"Non è un esercizio molto utile discutere su quale scuola abbia contribuito maggiormente alla teoria elettromagnetica, ma è storicamente e filosoficamente importante dimostrare che due teorie possono essere differenti per aspetti essenziali nonostante l'equivalenza della forma e l'identità del contenuto sperimentale" (18).

Questa opinione, molto simile a quella di Maxwell citata in precedenza introduce a quello che mi sembra un problema storico fondamentale: i due approcci diedero contributi equivalenti, la loro formulazione matematica era equivalente, il loro contenuto sperimentale era identico; su che basi si sviluppò il dibattito ? Ovviamente questa domanda ha implicazioni molto vaste e probabilmente ad essa non si può dare una risposta precisa. Si possono però dare dei contributi in nuove direzioni e degli approfondimenti delle analisi del passato. In particolare sembra interessante soffermarsi sul ruolo svolto dai principi regolativi, in particolare dal principio di conservazione dell'energia sullo svolgimento della controversia. Per far questo è però necessaria un'analisi degli elementi fondamentali dei modelli concettuali in gioco. Per comodità, e facendo qualche forzatura, ho raggruppato i maggiori contributi nelle seguenti scuole:

- a) La scuola tedesca dell'azione a distanza (F. Neumann, W. Weber, G. Kirchhoff, R. Kohlrausch, K. Gauss e B. Riemann)
- b) La scuola britannica dell'azione per contatto (W. Thomson, J.C. Maxwell, Poynting, J.J. Thomson, O. Lodge, Rankine, Tait, Heaviside)
- c) La scuola tedesca dei potenziali ritardati (B. Riemann, C. Neumann, L. Lorentz, G. Gauss)
- d) La scuola di Helmholtz ed Hertz e le sue interazioni con l'opera di Clausius
- e) La scuola francese di Duhem e Poincarè, che svolge principalmente un'enorme lavoro di analisi critica
- f) La scuola di H. Lorentz

Per dare almeno un'idea della complessità del dibattito ho riportato una cronologia dei contributi principali:

1845 Introduzione del potenziale vettore come potenziale elettrodinamico da parte di F. Neumann

Equivalenza formale tra elettrostatica di Poisson e teoria della conduzione termica di Fourier da parte di W. Thomson

Primo suggerimento di Gauss di una velocità finita di interazione in una teoria di azione a distanza

1846 Legge di forza di W. Weber con forze che dipendono anche dalla velocità e dall'accelerazione

1847 Lavoro di Helmholtz "Sulla conservazione della Forza" con ipotesi di forze centrali newtoniane

Primo lavoro di Thomson sull'energia nel mezzo

1848 F. Neumann deriva la legge di Ampère

W. Weber mostra l'accordo tra la sua legge e il Principio di conservazione dell'Energia (PCE)

W. Thomson (1851 e 1853) deduce le leggi dell'induzione di Faraday dalla legge di Ampère e dal PCE

1849 Kirchhoff identifica tensione e differenza di potenziale attraverso la dimostrazione di un errore di Ohm

1852 Clausius critica il lavoro di Helmholtz del 1847

1853 B. Riemann dà il primo contributo ad una teoria dei potenziali ritardati

Rankine dà la sua interpretazione del PCE

1855 Determinazione di c come rapporto azioni elettrostatiche ed elettrodinamiche ad opera di Weber e Kohlrausch

1856 Lavoro di Maxwell: "On Faraday's Lines of Force"

Libro di Clausius su "Funzione potenziale e potenziale", diversa derivazione del PCE rispetto ad Helmholtz

1857 Kirchhoff: la propagazione nei conduttori avviene con velocità

1858 Contributo di Riemann ai potenziali ritardati (pubblicato nel 1868)

1860 Ultimo lavoro di W. Thomson sull'energia nel mezzo

1861 Contributi di Riemann all'azione a distanza

Lavoro di Maxwell: "On physical lines of force"

1865 Lavoro di Maxwell: "A dynamical theory of the electromagnetic field"

1867 Prima edizione della "Natural Philosophy" di Thomson e Tait

L. Lorentz formula equazioni con potenziali ritardati equivalenti a quelle di Maxwell

1868 Tait polemizza con l'approccio di Weber al PCE

C. Neumann formula una teoria completa dei potenziali ritardati Clausius polemizza con Riemann, C. Neumann e Retzi

1869 Weber di nuovo mostra il suo accordo con PCE C. Neumann replica a Clausius

1870 Fondamentale lavoro di Helmholtz "per fare ordine nel dibattito"

1871 Weber formula un suo PCE e polemizza con Helmholtz

C. Neumann difende Weber ed estende il suo PCE

1872 Helmholtz ancora critica Weber e afferma di preferire Maxwell

1873 "Trattato" di Maxwell

Helmholtz critica Weber

1875 C. Neumann difende Weber

Clausius difende Helmholtz

Weber polemizza con Helmholtz

1876 Trattato elementare di Maxwell

1878 Esperimenti di Hertz, suggeriti da Helmholtz; risultati contro Weber

Memoria di Lorentz in cui si considera l'etere non materiale e si introduce il modello di oscillatore armonico

Settimo lavoro fondamentale di Weber

1881 Helmholtz di nuovo preferisce Maxwell contro Weber

1884 Teorema di Poynting e interpretazione locale del PCE

1885 Confronto delle teorie elettriche di J.J.Thomson

1886-88 Esperimenti di Hertz, propagazione delle interazioni con velocità finita - effetto fotoelettrico

1887 Planck: a favore di Maxwell sulla base di considerazioni energetiche (energia locale di Poynting)

1889 Hertz passa all'azione per contatto

1890 Hertz elimina i potenziali vettori dall'opera di Maxwell

Poincaré pubblica l'Electricité et Optique

1891 Lorentz accetta l'azione per contatto

1892 Lorentz ancora tenta una derivazione lagrangiana delle equazioni di Maxwell

Hertz pubblica la famosa introduzione al suo volume sulle "Onde elettriche"

1894 Helmholtz di nuovo a favore di Maxwell

1895 Lorentz rinuncia alla derivazione lagrangiana

1898-900 Lienard e Wiechert: soluzioni tramite potenziali ritardati delle equazioni di Maxwell nel caso di una sorgente in moto vario

1901 Poincaré: seconda edizione dell'Electricité et Optique

1902 Duhem: "La teoria di Maxwell", libro scritto a favore della teoria di Helmholtz

Poincaré: "La scienza e l'ipotesi" (riprende l'introduzione dell'Electricité et Optique in cui si schierava a favore di Maxwell e contro Weber)

La cronologia da solo un' idea della complessità del dibattito.

Un tentativo di chiarire le posizioni in gioco fu fatto da Hertz nel 1892 (19) nella introduzione alla raccolta dei propri articoli sull'elettromagnetismo. Hertz distinse quattro posizioni e illustrò le ultime tre con quattro figure. La posizione tre infatti da luogo a due sottocasi, illustrati con figure differenti. La posizione 3 é quella di Helmholtz che é intermedia tra l'azione a contatto e a distanza. Un caso limite della posizione di Helmholtz verrà a coincidere formalmente con la posizione di Maxwell, ma la "vera" posizione di Maxwell, secondo Hertz, è la quarta, indicata nella quarta figura. Hertz ebbe, tra gli altri meriti, quella di aver espresso le equazioni di Maxwell in maniera più coerente al modello fisico 4.

L'accento di Hertz é sul rapporto tra elettricità sulle piastre e polarizzazioni, cioè tra energia dipendente dalle cariche o dalle polarizzazioni. Nel caso in cui si consideri l'azione a distanza c'è una differenza se si considera la presenza o meno del mezzo. L'azione a distanza delle cariche provoca infatti una polarizzazione del mezzo che a sua volta provoca un'azione a distanza. Nel caso in cui l'energia della polarizzazione sia prevalente la teoria dell'azione a distanza coincide con quella dell'azione per contatto, ma solo formalmente. Infatti le sorgenti sono sempre le cariche e l'interazione è sempre a distanza. L'equivoco é presente nella stessa opera di Maxwell. Per una rigorosa concezione maxwelliana le polarizzazioni devono essere considerate primari e rispetto alle cariche sulle piastre .

A) Il primo punto di vista può essere attribuito alla scuola tedesca di Weber, ovvero all'azione a distanza con velocità infinita.

Esponenti principali di questa scuola furono: F. Neumann (1798-1895), W. Weber (1804-1891), R. Kohlrausch (1809-1858), G. Kirchhoff (1824-1887). La linea seguita era quella newtoniana di Ampère.

a) Neumann dava una legge di forza tra elementi di corrente invece che tra cariche (come Weber); nel 1834 seguendo le idee di Lenz matematizzò la scoperta dell'induzione di Faraday:

$$E = -\frac{dN}{dt}$$

nel 1845 e '48 definì il potenziale elettrodinamico (spesso visto come una matematizzazione dello stato elettronico di Faraday) cioè il potenziale mutuo di due circuiti: lavoro meccanico di separazione a corrente costante

b) W. Weber, allievo di Gauss a Cottinge e di Fechner a Lipsia fu il primo ad adottare una concezione atomista dell'elettricità e della corrente elettrica, come moto di cariche di segno opposto. Fondamentale la sua formula del

1846, che modificava il modello newtoniano introducendo forze dipendenti dalla velocità e dall'accelerazione (v. Feynman)

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2} \left[1 - \frac{1}{c^2 w} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{2r}{c^2 w} \cdot \frac{d^2 r}{dt^2} \right]$$

Questa legge, più elementare di quella di Ampere, può spiegare la mancanza di effetti elettrostatici in una corrente di densità uniforme, è riducibile a quella di Coulomb nel caso elettrostatico e spiega non solo le forze tra correnti di Ampère ma anche i fenomeni di induzione di Faraday. Ancora nel 1886 uno storico della fisica, Hoppe, la riteneva l'unica formulazione valida

dell'elettromagnetismo.

Weber portò avanti il programma di stabilire unità di misura assolute e nel 1855-7 con Kohlrausch determinò il rapporto tra unità elettrodinamiche ed elettrostatiche. A tal fine fu inventato il galvanometro balistico. Il valore trovato fu

Nonostante il valore vicino a quello della velocità della luce Weber non interpretò questo fatto in maniera particolare, neanche dopo aver realizzato che era la velocità di un'onda nel filo più che la velocità di una particella; per lui era una velocità relativa tra cariche ed anche la velocità limite alla quale le cariche si dovevano muovere affinché le azioni dinamiche bilanciassero quelle statiche.

c) Kohlrausch individuò una proporzionalità tra la differenza di tensione a circuito aperto e gli effetti elettrodinamici a circuito chiuso (1848) e tra le differenze di tensione, misurate elettrostaticamente, tra due punti del circuito chiuso e la resistenza ohmica interposta (1849).

d) Ciò portò Kirchhoff nel 1849 all'identificazione del concetto di tensione elettrica (da Volta in poi, compreso Ohm, come densità di fluido elettrico) con quello di ddp, e quindi all'unificazione di elettrostatica e teoria delle correnti voltaiche (modificando l'ipotesi sull'elettricità alla superficie dei conduttori). Nel 1857 pervenne a) all'equazione di propagazione in circuiti perfettamente conduttori ove la propagazione avviene con la velocità della luce, ma senza attribuirvi speciale significato ed b) alla generalizzazione della legge di Ohm in una forma che avrebbe influenzato la scuola dell'azione a distanza con potenziali ritardati:

$$a) \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \quad b) \underline{s} = k \left(c^2 \text{grad } \Phi - \frac{\partial \underline{a}}{\partial t} \right)$$

e) Altri contributi a questa scuola furono dati nel 1835 e nel 1867 da Gauss e Riemann ma, pubblicati postumi, non ebbero grande influenza.

B) Il secondo punto di vista nella classificazione di Hertz e quello della teoria del potenziale.

Con una leggera forzatura interpretativa lo considereremo in connessione alla scuola dell'azione a distanza con velocità finita.

Principali esponenti di questa scuola furono: Gauss (1777-1855); B.Riemann (); C. Neumann (1832-1952); L. Lorentz (1829-1897).

In particolare Gauss e Riemann diedero contributi sporadici, nel 1845 e nel 1858 rispettivamente. Clausius nel 1868 criticherà quest'approccio, in cui "il potenziale si propaga come la luce" e che costituisce purtuttavia una delle prime indicazioni esplicite a favore di un'identificazione di fenomeni ottici ed elettromagnetici.

C. Neumann nel '68 presenta la sua teoria e nel '69 le risposte alle critiche di Clausius. Nel '73 tale teoria sarà ancora criticata da Maxwell ma non sul piano formale ne su quello del rapporto con gli esperimenti, bensì sul piano del modello: "non sono capace di costruire una rappresentazione mentale della teoria di Neumann".

Notevoli contributi a questa scuola furono dati da L. Lorentz, un fisico danese, nel 1866 e 1867. Egli si riallacciò ai lavori di Kirchhoff e li sviluppò non più come propagazione nei conduttori ma nello spazio libero. Le equazioni da lui raggiunte sono formalmente equivalenti a quelle di Maxwell, ma molto dissimili per il modello concettuale usato. L'equivalenza formale si ricava considerando i potenziali ritardati, introdotti da Lorentz qualche anno prima in un lavoro sull'elasticità.

C) Il terzo punto di vista dello schema di Hertz si riferisce alla teoria di Helmholtz. questa teoria fu da Helmholtz presentata nel 1870 con l'esplicito scopo di "mettere ordine nel campo dell'elettromagnetismo". Era una teoria che comprendeva come casi particolari quella di Weber, di Neumann e di Maxwell.

Hertz mostra come un caso limite della teoria di Helmholtz sia equivalente a quella di Maxwell. Ma prima di ciò è opportuno dare uno sguardo alla "metafisica" di Helmholtz (1827-1894) così come è espressa nella sua fondamentale memoria del '47 sulla conservazione dell'energia. Infatti Helmholtz parte da posizioni rigidamente newtoniane, si oppone strenuamente per tutta la vita a Weber che aveva modificato il modello newtoniano, e finisce poi pur di non accettare la teoria di Weber per modificare gradatamente il proprio punto di vista fino a preferire la teoria di Maxwell, anche se non nella stessa interpretazione. La teoria di Helmholtz sarà vista anche in seguito (a fine secolo da Duhem) come l'unica teoria elettromagnetica coerente e stimolerà sia gli esperimenti di Hertz sia le prime ricerche di Lorentz.

In definitiva Helmholtz rappresenta un punto cruciale nello sviluppo dell'elettromagnetismo classico, maggiore probabilmente di quello stesso di Maxwell.

Come vedremo l'accettazione della teoria di Maxwell fu decretata da Helmholtz e nella sintesi di Lorentz, Maxwell rappresenta solo una delle componenti e notevolmente modificata rispetto all'originale.

Helmholtz generalizzò l'espressione del potenziale elettrodinamico tra elementi lineari di corrente a:

$$-\frac{1}{c^2} \cdot \frac{L_1 L_2}{r} \cdot \left[(1+k) \cdot d\sigma_1 \cdot d\sigma_2 + \frac{(1-k) \cdot r \cdot d\sigma_1 \cdot r \cdot d\sigma_2}{r^2} \right]$$

per $k=1$ e $k=-1$ si hanno le leggi di Neumann e Weber, $k=0$ corrisponde alla teoria di Maxwell. Sulla base di questa formula Helmholtz derivò un'equazione descrivente la propagazione ondulatoria di stati di polarizzazione attraverso un mezzo capace di polarizzazioni elettriche e magnetiche.

D) Il quarto punto di vista è quello della teoria di Maxwell.

Hertz mostra benissimo come Maxwell risenta del passaggio incompleto da un modello ad un altro e come ciò crei delle ambiguità.

Sorvolando sui primi lavori di Maxwell (1856 "On Faraday's Lines of Force"; 1867 "On Physical lines of forces"; 1865 "A dynamical theory of the electromagnetic field") voglio far rilevare come tali ambiguità non sono assolutamente casuali ma dipendono dal modo stesso in cui Maxwell ha sviluppato la sua opera: partendo dai risultati della scuola tedesca dell'azione a distanza e cercando di tradurli nella metafisica di Faraday dell'azione a contatto, utilizzando la versione differenziale più che quella integrale della teoria matematica del potenziale - e tentando sempre di mantenere una sorta di "principio di corrispondenza" con la meccanica -.

Ciò risulta molto chiaramente dallo stesso "Piano dell'opera" che Maxwell pone al paragrafo 59 del suo famoso Trattato del 1873 (20), "Nel seguente trattato mi propongo dapprima di spiegare l'ordinaria teoria dell'azione elettrica, che la considera come dipendente solo dai corpi elettrizzati e dalle loro posizioni relative, senza tener conto di alcun fenomeno che possa intervenire nel mezzo interposto. In questo modo stabiliremo la legge dell'inverso del quadrato, la teoria del potenziale e le equazioni di Laplace e Poisson.", più oltre: "Nel teorema di Thomson, l'energia totale del sistema viene espressa nella forma di un integrale di una certa quantità estesa su tutto lo spazio tra i corpi elettrizzati, ed anche nella forma di un integrale esteso solo sulle superfici elettrizzate. L'uguaglianza di queste due espressioni può dunque essere interpretata fisicamente. Possiamo concepire la relazione fisica tra corpi elettrizzati, sia come risultato dello stato del mezzo interposto, sia come risultato dell'azione diretta a distanza tra i corpi elettrizzati."

"Se calcoliamo su questa ipotesi l'energia totale che risiede nel mezzo, la troveremo uguale all'energia dovuta all'elettrizzazione dei conduttori nell'ipotesi dell'azione diretta a distanza. Pertanto le due ipotesi sono matematicamente equivalenti."

Par. 60) "La polarizzazione elettrica di una porzione elementare di un dielettrico è uno stato forzato in cui il mezzo è posto dall'azione della forza elettromotrice, e che scompare quando questa forza è rimossa. Possiamo concepirlo come consistente in quello che possiamo chiamare uno spostamento elettrico, prodotto dall'intensità elettromotrice."

"L'analogia tra l'azione dell'intensità elettromotrice nel produrre lo spostamento elettrico e della forza meccanica ordinaria nel produrre lo spostamento di un corpo elastico è così ovvia che mi sono avventurato a chiamare il rapporto dell'intensità elettromotrice rispetto al corrispondente spostamento elettrico, il coefficiente di elasticità elettrica del mezzo."

Par. 62) "Dato che, come abbiamo visto, la teoria dell'azione diretta a distanza è matematicamente equivalente a quella dell'azione tramite un mezzo, gli effettivi fenomeni possono essere spiegati da una teoria come dall'altra, ammesso che opportune ipotesi vengano introdotte quando capitino delle difficoltà."

E) La posizione di Hertz relativa al modello concettuale usato è abbastanza chiara: è una rigorosa affermazione della priorità delle polarizzazioni; va aggiunto inoltre che a) eliminò dalle equazioni originarie di Maxwell i termini contenenti i potenziali, b) considerava l'etere come totalmente trascinato dai corpi in moto: in tal modo non scisse il campo elettromagnetico dalla materia. Non dobbiamo dimenticare che per Maxwell l'etere è una sostanza materiale ed il campo elettromagnetico è uno stato meccanico dei mezzi dielettrici, uno dei quali è l'etere.

"Sebbene libri divulgativi sulla storia della fisica spesso asseriscano che la scoperta di Hertz delle onde elettromagnetiche nel 1888 verificò la teoria del campo elettromagnetico, ciò che comunemente si riteneva provato all'epoca era l'esistenza dell'etere come sostanza meccanica" (21)

Maxwell e la sua scuola considerarono il campo elettromagnetico come uno stato speciale della materia, un "accidente" delle sostanze dielettriche e non una "sostanza" in se stesso. Lo "spostamento elettrico" è un vero spostamento di particelle del dielettrico, sia esso etere o altro, e quindi l'etere e la materia non differiscono. Maxwell non indaga la natura della carica elettrica, e quindi si precluse la possibilità di distinguere l'etere dalla materia e quindi di rendere autonomo il campo elettromagnetico e di completare così la sua teoria dell'azione a contatto, che invece pur sempre si basava sull'azione a distanza che provocava la polarizzazione. Indagare la natura dell'elettricità avrebbe anche significato indagare la struttura microscopica della materia e quindi gli spazi intermolecolari riempiti dall'etere e quindi separare etere e materia, campo elettrico e materia.

Hertz col postulare le equazioni di campo demolì l'immagine meccanica del campo. Non ci sono più problemi concernenti la costituzione dell'etere, anche se, l'etere essendo inseparabile dai corpi, non c'è ancora la separazione tra etere e materia: sia per l'ipotesi dell'etere completamente trascinato sia per la mancanza di un punto di vista atomistico.

F) H.A. Lorentz (1853-1928) diede una sintesi di queste varie scuole in contrapposizione. La sua opera fu veramente eccezionale e sia rappresenta la vetta dell'elettromagnetismo classico e sia rappresentò il punto di partenza per ricerche sulla teoria della relatività, per lo sviluppo della meccanica quantistica, nonché per la cosiddetta concezione elettromagnetica della natura (1900-1910). In particolare Quattro lavori di Lorentz sono rilevanti in questo contesto: 1875, 78, 92, 95.

1875: L'articolo viene scritto sotto l'influenza dei lavori di Helmholtz e quindi dell'azione a distanza con velocità finita; la luce viene considerata come propagazione in un mezzo materiale di variazioni dello stato di polarizzazione; la vibrazione elettrica viene intesa al fatto che la polarizzazione dielettrica è una funzione periodica del tempo.

1878: Viene mantenuta una concezione dell'azione a distanza, ma l'etere viene visto come il solo dielettrico, anche se ancora come corpo materiale. Il ruolo dell'etere viene però distinto da quello delle particelle che costituiscono la materia ponderabile. Il significato del lavoro sta nel fatto che il modello fondamentale della teoria dell'elettrone veniva così stabilito: un oscillatore armonico entro una molecola, e si avviava l'idea che l'etere intermolecolare avesse proprietà analoghe al vuoto. Qui c'è il passo decisivo per rendere il campo indipendente dalla materia: l'immagine di un etere onnipervasivo (vuoto) e di un sistema di particelle cariche. Si doveva solo accettare l'idea dell'azione a contatto.

1891: Qui si accetta per la prima volta la teoria di Maxwell sulla base di considerazioni oltre che delle influenze di Hertz e Poincarè. 1892: Il campo elettromagnetico è considerato come uno stato dinamico dell'etere stazionario privato di tutte le qualità meccaniche. Il campo è un'entità fisica indipendente.

1895: si rinuncia a una derivazione meccanica delle equazioni di campo.

Nel 1895 il dibattito poteva dirsi grosso modo concluso, almeno provvisoriamente. Queste brevi note hanno voluto semplicemente introdurre ai problemi in gioco, dare almeno un quadro schematico di riferimento, più che dare delle risposte a complessi problemi. Un'indicazione emerge però con una certa chiarezza: un ruolo notevole fu giocato dal principio di conservazione dell'energia. Questo stesso principio però ebbe varie formulazioni e l'intergioco tra formulazioni del principio e modelli delle varie scuole e un campo di indagine estremamente affascinante.

Questo è però l'inizio di un'altra storia....