

## Le fonti energetiche nell'Ottocento

Dagli inizi dell'Ottocento il **carbone**, dopo aver preso il posto della legna (che ancora oggi rappresenta il principale combustibile di uso domestico per circa 1/3 della popolazione mondiale), ricoprì saldamente il posto d'onore come **fonte di energia primaria**; esso fu la forza trainante della rivoluzione industriale. Così, grazie all'energia del carbone, che faceva funzionare bene le macchine a vapore, si svilupparono le fabbriche, le ferrovie e la navigazione. Altre forme di energia primaria inanimata erano l'**acqua**, il **vento** e il **gas**, ma il loro impiego era molto inferiore a quello del carbone. Anche il **petrolio**, nell'Ottocento, non costituì una grande minaccia per il carbone che rimase la fonte di energia più utilizzata fino a dopo la Prima Guerra Mondiale. Inoltre la tecnologia fece enormi passi avanti nel rendimento e nella potenza delle **macchine a vapore** aumentando ancora di più l'importanza del carbone. In seguito le macchine a vapore furono quasi del tutto sostituite dalle **turbine a vapore**, che permettevano di trasformare direttamente l'energia del vapore in movimento rotatorio, mentre la macchina a vapore aveva fra l'azione del vapore e il movimento rotatorio un altro stato di moto, cioè il moto alternativo che quindi costituiva uno stadio non necessario di dissipazione di energia.

Nel 1799 **Alessandro Volta inventò la pila**, il primo generatore di corrente elettrica, che però risultava inadeguata per impieghi su larga scala in quanto la trasformazione dell'energia chimica in elettricità era troppo costosa e inquinante. Così per molti anni la **corrente elettrica** rimase solamente un oggetto di studio per gli scienziati ottocenteschi, fino a quando i lavori di Oersted, Arago, Ampere e infine di Faraday non portarono alla realizzazione nel 1832 della prima macchina elettromagnetica da parte di Hippolyte Pixii (fabbricante di strumenti fisici a Parigi), cioè un apparato che sotto un'azione meccanica esterna generava corrente elettrica grazie al fenomeno dell'**induzione magnetica**. La corrente elettrica generata in questo modo era prima di tutto un tipo di energia pulita e poi, come ci si accorse man mano che le applicazioni tecnologiche si susseguirono, la corrente elettrica si rivelò come la forma di energia più duttile, versatile e disponibile grazie anche alla sua trasmissibilità da un posto all'altro.

## Le prime applicazioni della corrente elettrica

Si può far nascere l'elettrotecnica (cioè l'applicazione pratica e industriale dell'elettricità) nel 1837 quando vennero realizzati i primi **telegrafi** (di Steinheil, di Morse, di Cooke e di Wheatstone) e cominciò a svilupparsi la telegrafia commerciale. Quasi contemporaneamente, nel 1838, nacque un altro ramo dell'applicazione tecnica dell'elettricità: la **galvanotecnica**, ovvero la produzione di depositi metallici per mezzo dell'elettricità. Tutto ciò che venne fatto prima essenzialmente apparteneva al mondo dei laboratori di ricerca, ma non alla tecnica. Fin dai primi anni dell'Ottocento si era sperimentato l'**arco voltaico** come sorgente di luce, ma questo non fu di uso generale fino a quando non si resero disponibili le prime dinamo Gramme dal 1870 in poi. Pure la **lampada ad incandescenza** era stata proposta nel 1838 ma anche per essa si dovrà arrivare al 1870 per poterne vedere un impiego pratico. Un altro esempio simile è l'impiego dell'elettricità nel **motore**: l'idea c'era già nel 1832 ma solamente decine di anni più tardi il motore elettrico acquistò la sua importanza.

Così fu anche per le **macchine elettromagnetiche** che generavano la corrente elettrica: la prima macchina magneto-elettrica fu costruita da Pixii nel 1832 e di lì a poco furono costruite anche grandi macchine, ma sempre per impieghi mirati (ad esempio le grandi macchine Alliance che alimentavano la luce ad arco dei fari), senza riuscire ad avere uno strumento veramente utile e ben funzionante per la generazione della corrente elettrica. Fu la **Macchina ad anello** di Antonio Pacinotti che aprì definitivamente la strada alla produzione industriale delle nuove macchine dinamo-elettriche o semplicemente «dinamo», anche se toccò a Gramme, nel 1870, il merito di aver costruito la prima dinamo funzionante a livello industriale.

Dagli anni '70 in poi si svilupparono anche il **telefono**, la **distribuzione a distanza dell'energia elettrica** (centrali idroelettriche), l'**illuminazione pubblica** e il **motore elettrico** (ferrovie e tranvie).

## Le macchine magneto-elettriche e dinamo-elettriche

Numerosi furono coloro che misero a punto modelli di macchine magneto-elettriche subito dopo quella di Pixii del 1832: ricordiamo la macchina di William Ritchie del 1833, quella di Joseph Saxton del 1833, quella di Edward M. Clarke del 1834, quella di D'Ettingshausen del 1837 ed infine la macchina di Page del 1839. Si trattava di modelli che presentavano miglioramenti costruttivi rispetto alla macchina di Pixii: diverse dimensioni, diversa disposizione fra **indotto** ed **induttore**, modifiche meccaniche, ma senza un diverso assetto magneto-elettrico. Anche il **collettore** fu un miglioramento meccanico introdotto necessariamente per raccogliere la corrente nella macchina di Saxton poiché erano le calamite a stare ferme e l'indotto a girare; in seguito le altre macchine seguirono l'esempio di Saxton perché si capì che l'induttore, essendo pesante, girava molto peggio dell'indotto. Il primo intervento sul sistema indotto-induttore fu realizzato nel 1843 con la macchina di Stöhrer: i fasci calamitati passarono da uno a tre e i rocchetti da due a sei, avendo intuito che l'aumento dei fasci calamitati e delle bobine avrebbe aumentato la potenza della macchina.

La corrente prodotta da queste macchine era **alternata** e in quel periodo risultava scarsamente utilizzabile in quanto la si conosceva poco, mentre si sapeva adoperare la corrente continua. Per questo alle macchine magneto-elettriche si applicava un dispositivo chiamato **commutatore** che raddrizzava la corrente erogata, il risultato era una corrente sempre nello stesso verso anche se non costante.

Un miglioramento a questo tipo di macchine fu apportato dall'invenzione di Werner von Siemens dell'«elettromagnete a cilindro» (1856) che ne aumentò notevolmente il rendimento. Nel 1864 Henry Wilde introdusse come induttori degli elettromagneti al posto dei magneti permanenti e nel 1867 Siemens trasformò le macchine magneto-elettriche in dinamo-elettriche, con la tecnologia dell'**autoeccitazione**, cioè magnetizzando l'elettrocalamita con la stessa corrente prodotta dalla macchina (nella macchina Wilde le elettrocalamite venivano eccitate da una piccola macchina magneto-elettrica).

## L'invenzione di Antonio Pacinotti

Ancor prima di laurearsi, grazie ai suoi studi personali sull'elettricità, soprattutto attraverso la lettura del libro del De La Rive, e la frequentazione del corso di Fisica di Riccardo Felici (\*), Pacinotti realizzò la famosa **Macchinetta**, la **prima dinamo-motore a corrente continua**. Nel primo dei due quaderni di appunti, da lui stesso denominati «Sogni», Pacinotti scrisse che fra la fine del 1858 e i primi del '59, mentre stava facendo esperimenti per la costruzione di un Galvanometro, si accorse che questa apparecchiatura avrebbe potuto funzionare da macchina magneto-elettrica e così, alla data del 10 Gennaio 1859, si trova descritto l'esperimento con il quale realizzò il primo prototipo di una dinamo-motore a corrente continua: **una spirale di filo conduttore chiusa su se stessa e avvolta attorno ad un anello di ferro dolce** che, fatto ruotare all'interno di un campo magnetico (generato da un magnete permanente) passante per il suo diametro, generava una corrente continua estraibile con degli elettrodi appoggiati sulla spirale chiusa e posti lungo la perpendicolare al campo magnetico esterno. Questo esperimento fu ricostruito da Antonio Pacinotti nel 1911 in occasione delle Celebrazioni Nazionali che gli furono tributate.

Nel 1860, con l'aiuto di Giuseppe Poggiali, meccanico del Gabinetto di Fisica Tecnologica diretto dal padre Luigi, Antonio costruì la Macchinetta e nel suo primo quaderno dei Sogni scrisse:

«Poscritto. 1860 Aprile. La macchina elettro-magnetica della quale le prime idee si trovano qui sopra registrate è stata da me costruita in piccolo modellino; e sebbene abbia una porzione della elica non isolata dal ferro, e il commutatore che stabilisce le comunicazioni molto imperfetto per cattiva costruzione, gira con notevole velocità, e con tre elementi di Bunsen sebbene con gli acidi stanchi solleva 10 denari ad un decimetro per ogni secondo. Questa macchina ha una sola elettro calamita fissa. Agisce bene assai come macchina magneto elettrica, giacché dà una corrente continua sempre in un senso e molto intensa.»

(\*) Riccardo Felici, professore di Fisica presso l'Università di Pisa.

## L'importanza dell'invenzione di Antonio Pacinotti

Le macchine elettromagnetiche furono impiegate nella galvanotecnica e nell'illuminazione. Nelle industrie galvanotecniche c'era bisogno di molta corrente e le batterie galvaniche costituivano un limite per l'aumento della produzione oltre ad avere alti costi; l'impiego delle macchine elettromagnetiche favorì sia l'aumento della produzione sia l'abbassamento dei costi. Per quanto riguarda l'illuminazione, sebbene la luce ad arco fosse stata prodotta fin dall'inizio del secolo, essa aveva una bassa diffusione dato l'alto costo delle pile: **le macchine elettromagnetiche fornirono il generatore elettrico che mancava**, in particolare il loro impiego fu ottimale nell'illuminazione dei fari.

Rimanevano comunque grossi problemi che impedivano un'utilizzazione della corrente elettrica su larga scala; **andava eliminato il forte surriscaldamento del ferro e degli avvolgimenti e andava prodotta una corrente continua e costante. Questi problemi furono superati dall'invenzione di Pacinotti**, una macchina che utilizzava un nuovo tipo di indotto: al posto del rocchetto o dell'indotto Siemens, Pacinotti utilizzò un anello di ferro dolce con un avvolgimento continuo e chiuso: l'**elettrocalamita trasversale**. Questa macchina con indotto anulare fu la **prima dinamo-motore a corrente continua**.

Pacinotti, con la sua configurazione ad **anello chiuso**, individuò l'**elemento fondamentale che mancava** per dare l'avvio alla produzione industriale dell'energia elettrica.

## La vicenda Gramme

Dal 1° luglio al 30 settembre 1865 Antonio partì per una missione in Francia e in Inghilterra, per conto del Ministero della Marina, al fine di raccogliere informazioni riguardo i servizi meteorologici e i bollettini di previsione impiegati all'estero. Visitò Parigi, Londra e poi ancora Parigi e infine Ginevra. La seconda volta a Parigi ebbe l'occasione di visitare le officine Froment in cui incontrò, fra gli altri, il capo officina belga Zenobio Gramme al quale parlò estesamente della sua nuova dinamo-motore, lasciandogli anche delle stampe del suo articolo. Nel 1871, leggendo la rivista "Comptes rendus" dell'Accademia delle Scienze di Parigi, Pacinotti trovò la notizia relativa alla presentazione del prof. Jamin (con il quale aveva avuto un incontro a Parigi negli stessi giorni in cui aveva visitato le officine Froment) di una macchina dinamo-elettrica a corrente continua dovuta a Zenobio Gramme.

**Dall'articolo risultava evidente che la macchina realizzata e brevettata nel 1869 da Zenobio Gramme era derivata da quella da lui descritta ne "Il Nuovo Cimento" pubblicato nel 1865.** A questo punto a Pacinotti non restò altro che rivendicare la paternità dell'invenzione. Così scrisse all'Accademia delle Scienze e al prof. Jamin, ricordando la storia della macchinetta. Nonostante tutto furono necessari ben 10 anni per avere il riconoscimento desiderato; infatti fu solo nel 1881, in occasione dell'Esposizione Internazionale e Mondiale dell'Elettricità, che ad Antonio fu riconosciuta definitivamente la priorità dell'invenzione per la dinamo-motore a corrente continua. Inoltre alla fine di quell'anno gli fu conferita dal Presidente della Repubblica Francese la decorazione di Cavaliere dell'Ordine Nazionale della Legione d'Onore e ciò fu il suggello del riconoscimento internazionale della sua opera scientifica.

## Le macchine-dinamo derivate dal modello di Pacinotti

Fu Zenobio Gramme a realizzare in pratica le idee di Pacinotti e ad immettere sul mercato le prime dinamo a corrente continua. Le sue grandi capacità meccaniche gli permisero di costruire dinamo veramente soddisfacenti. La gran parte delle sue dinamo venivano azionate da macchine a vapore, mentre quelle azionate a mano erano destinate a ricerche di laboratorio. Numerose furono le modifiche al modello Gramme (lui stesso ne produsse diversi modelli) e quindi le dinamo costruite, soprattutto in Germania, ma **ciò che stava alla base di tutte queste dinamo industriali era la soluzione tecnologica della Macchinetta di Pacinotti**.

Lo stesso Pacinotti negli anni (in pratica fino alla sua morte) costruì altri dispositivi che si ispiravano direttamente alla sua prima Macchinetta; ricordiamo la Macchina a Gomitolo, la Macchina a Volano e le Macchine a Trazione Elettromagnetica. È interessante osservare che questi dispositivi erano tutti a corrente continua e che Pacinotti non si interessò mai a dispositivi a corrente alternata, nonostante avessero cominciato a diffondersi dalla seconda metà degli anni Ottanta.



## La dinamo di Antonio Pacinotti



## Museo degli Strumenti per il Calcolo (Sistema Museale di Ateneo)

Via Nicola Pisano, 25 - 56126 Pisa  
www.fondazionegalileogalilei.it

## Elettricità e Magnetismo fino a Faraday

**600 a.C.** - **Talete** (640/625 a.C. - circa 547 a.C.) forse fu il primo a studiare le proprietà elettriche dell'ambra (in greco: electron), una resina fossile che se viene sfregata attrae pezzetti di materia. Sembra che conoscesse anche il magnete.

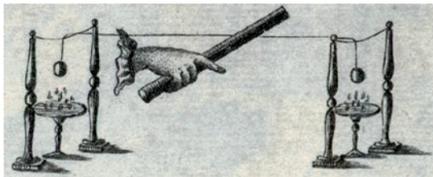
**360 a.C.** - **Platone** (428/427 a.C. - circa 348/347 a.C.) fa riferimento all'attrazione dell'ambra e della calamita.

**300 a.C.** - **Teofrasto** (371 a.C. - 287 a.C.) trattò altri materiali aventi le stesse proprietà dell'ambra.

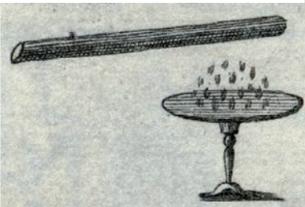
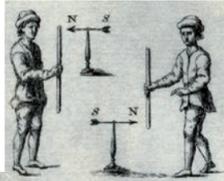
Al III secolo a.C. andrebbero fatte risalire le prime conoscenze sull'ago calamitato (da parte dei cinesi).

**Lucio Anneo Seneca** (4 a.C. - 65 d.C.) si occupò di fenomeni elettrici, in particolare dei fulmini.

**Plinio il Vecchio** (23 d.C. - 79 d.C.) descrisse le proprietà dell'ambra e riferì di un altro fenomeno elettrico: le scintille che si producevano strofinando l'ambra con un panno.



Gli antichi non conoscevano né la polarità della calamita e né, quindi, gli effetti di repulsione; l'attrazione elettrica e magnetica venivano considerate dello stesso tipo, cioè riferite alla stessa causa, ma si distinguevano in intensità. Sembra che si conoscesse anche la possibilità di magnetizzare il ferro con un magnete naturale.



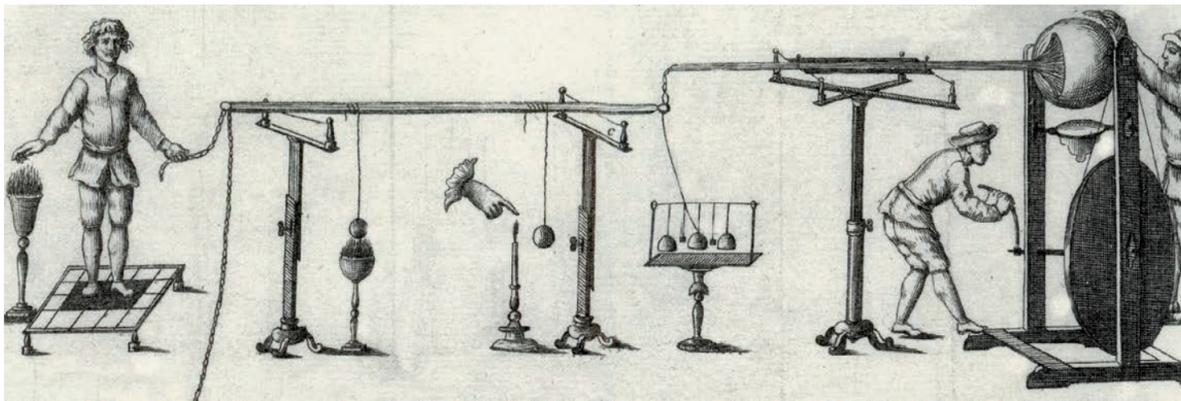
Alla fine la bussola arrivò in Europa nel X secolo e i primi documenti scritti che parlano delle proprietà direttrici della bussola sono del XIII secolo. Con l'introduzione della bussola compare anche la parola calamita.

**1269** - **Petrus Peregrinus di Manicourt** (vissuto nel XIII secolo) scrisse l'epistola *De magnete*. Volendo trattare dei poli magnetici costruì un modello sferico di magnetite denominato "terrella", di cui insegnava a determinare i poli. Egli descrisse l'attrazione e la repulsione fra poli magnetici. Trattò la magnetizzazione per contatto e raccontò l'esperienza della calamita spezzata. Quest'opera, a carattere sperimentale, avrebbe potuto incidere molto nella storia della scienza in quanto anticipava il modo di fare e di intendere la scienza che sarebbe scaturito dal XVII secolo; purtroppo questa epistola rimase sconosciuta agli uomini del suo tempo e dimenticata dai successori.

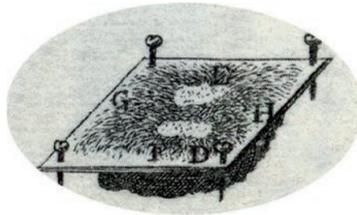
**1492** - **A Cristoforo Colombo** (1451-1506) alcuni attribuiscono la scoperta della declinazione magnetica (valore dell'angolo sul piano orizzontale tra la direzione dell'ago magnetico e la direzione del meridiano del luogo), altri la assegnano a personaggi a lui precedenti.

**1544** - **A Georg Hartmann** (1489-1564?) si deve la scoperta dell'inclinazione magnetica (angolo formato dalla direzione del campo magnetico terrestre con il piano orizzontale in ogni punto della superficie della Terra).

**1550** - **Girolamo Cardano** (1501-1576?) si occupò di elettricità distinguendo, per la prima volta, la forza elettrica da quella magnetica.



**1600** - **William Gilbert** (1544-1603), scrive il *De Magnete*. In questa opera importantissima per la storia dell'elettricità e del magnetismo sono descritte oltre 600 esperienze. Gilbert conosceva bene l'opera del Peregrino, e anche lui si costruì una sfera magnetica (la Terrella). Questa opera costituisce la prima teoria sul magnetismo terrestre. Dopo di lui la terra fu considerata un magnete dotato di due poli e un equatore magnetico. Egli discusse esperimenti in cui si distinguevano nettamente gli effetti elettrici da quelli magnetici. Egli osservò le stesse proprietà dell'ambra anche in altri materiali, come il vetro e lo zolfo. Non mancano le false interpretazioni ma ci sono anche molte osservazioni importanti: ad esempio che due magneti si respingono se avvicinati con i poli simili e si attraggono con i poli opposti, che una sbarra di ferro dolce si magnetizza se inserita in un campo magnetico o che il magnetismo del ferro è influenzato dalla temperatura. Vengono trattati i corpi che per strofinio si elettrizzano e quelli che invece non si elettrizzano, aumentando così il numero dei materiali elettrizzabili conosciuti.



Keplero nella sua *Astronomia nova* prefigurò un sistema solare mosso da forze magnetiche, citando espressamente Gilbert.

**1629** - **Niccolò Cabeo** (1586-1650) pubblica la *Philosophia Magnetica* nella quale studia gli effetti della repulsione elettrica. In questa opera egli descrive ulteriori tipi di corpi elettrici come la cera e diverse qualità di gomma. Le sue idee sull'elettricità e sul magnetismo anticipano in qualche modo la moderna teoria dei campi.

**1661** - **Otto Von Guericke** (1602-1686) costruì il primo prototipo di macchina elettrostatica: una sfera di zolfo veniva fatta girare da una manovella di legno, sfregando con la mano la sfera si produceva una elettrizzazione della sfera stessa. Con questo apparato Guericke studiò i fenomeni elettrici di attrazione e repulsione e scoprì la conduzione elettrica. Osservò anche la luminosità che accompagnava l'elettrizzazione della sfera di zolfo. Inoltre per primo osservò l'induzione elettrica e rilevò l'importanza delle punte nei fenomeni elettrostatici.

**1676** - **Robert Boyle** (1627-1691) con l'uso della macchina pneumatica osservò che le azioni elettriche si manifestavano anche nel vuoto.

**1706** - **Francis Hawksbee** (1660? - 1713), grande sperimentatore, sostituì il globo di zolfo prima con un cilindro cavo di vetro e poi con un globo di vetro. Egli, attraverso esperimenti con la sua macchina elettrostatica, arrivò per la prima volta a fare osservazioni sulla scintilla elettrica. La sua macchina elettrostatica a globo di vetro fu di grande utilizzo dalla seconda metà del XVIII secolo e fu Newton a contribuire alla sua diffusione. Perfezionamenti seguirono alla macchina elettrica: globo o cilindro che ruotavano grazie ad un dispositivo a pedale e, al posto della mano, si metteva un panno di pecora o altro materiale soffice. Con i fili conduttori si trasportava questa elettricità generata dalla macchina.

Tra il **1729** e il **1739** esperimenti di **Stephen Gray** (1666?-1736) e **Charles du Fay**, realizzati con l'impiego di bacchette (tubi) di vetro strofinate a mano, portarono alla luce effetti straordinari che si potevano ottenere da corpi elettrizzati per strofinamento: trasporto dell'elettricità (conduttori ed isolanti), elettrizzazione del corpo umano, elettrizzazione di sostanze non elettriche se messe in contatto con un elettrico eccitato, ad esempio un metallo si elettrizzava se era isolato, cioè se era appeso a fili di seta o simili. (**Jean Théophile Desaguliers** (1683-1744) introdusse la terminologia dei conduttori riferendosi agli esperimenti di conducibilità del Gray).

**1733** - **Charles Francois de Cisternay du Fay** (1698-1739) asserisce che ci sono due tipi di elettricità (fino ad allora si credeva ce ne fosse solo una e che esistesse solamente l'attrazione): vetrosa (dopo strofinato è attratto dall'ambra e respinto dal vetro) e resinosa (dopo strofinato è attratto dal vetro e respinto dall'ambra). Du Fay osservò che un corpo non può cambiare la sua elettrizzazione se strofinato con corpi diversi. Due corpi con lo stesso tipo di elettricità si respingono mentre si attraggono se le loro elettricità sono di tipo diverso. Egli sperimentò l'induzione elettrostatica. Nella sua ultima memoria scrisse 16 principi sui fenomeni elettrici che costituiscono il Sommario dell'elettricità fino al 1734.

**1746** - *Bottiglia di Leida*: scoperta accidentale dell'accumulo di carica in un condensatore (due conduttori separati da un isolante). Fu una scoperta fatta separatamente da **Petrus van Muschbroek** (olandese, 1692-1761) e da **Ewald Jürgen Georg von Kleist** (tedesco, 1700-1748). L'intensità delle scariche ottenute era molto maggiore di quelle che si potevano ottenere con le macchine a globo. Fu **Jean Antoine Nollet** (1700-1770) che iniziò a far sentire la «scossa» prima a degli uccelli e poi ad una catena di persone che si tenevano per mano.

Seconda metà del XVIII secolo: inizia la produzione di macchine elettrostatiche a piatti di vetro al posto dei globi o dei cilindri; questo tipo di macchine, dette di tipo Ramsden - da **Jesse Ramsden** (1735-1800), abile meccanico - si diffuse in Francia dopo il 1769.

**1750** - **Benjamin Franklin** (1706-1790) si occupò di elettricità atmosferica, inventando anche il parafulmine. Dette un inquadramento all'importanza delle punte, interpretò il fenomeno della bottiglia di Leida e costruì i quadri di Franklin (bottiglie di Leida srotolate).

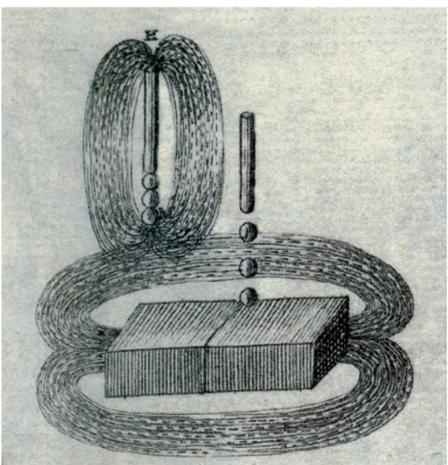
**1753** - **Giovanni Battista Beccaria** (1716-1781), nella sua «Dell'elettricità artificiale e naturale libri due» conteneva resoconti sperimentali di una certa importanza, riguardanti i corpi conduttori e quelli isolanti. Definì che la resistenza dei metalli è proporzionale alla lunghezza del tragitto che deve percorrere la scintilla e riconobbe molti fenomeni naturali come dovuti a effetti elettrici quali le trombe marine o le aurore boreali.

**1757** - **Johann Karl Wilcke** (1732-1796), nel 1757 - proseguendo le esperienze del Canton (John, 1718-1772, a cui si deve l'utilizzo dell'elettroscopio, apparso in uno scritto anonimo del 1746) - scrisse un elenco di corpi che si elettrizzavano in maniera differente a seconda del materiale con cui venivano a contatto durante lo strofinio. A Wilcke si deve anche l'enunciazione chiara che due corpi che si strofinano fra loro assumono entrambi uno stato elettrico ma di segno opposto.

**1759** - **Franz Ulrich Theodor Aepinus** (1724-1802), nella sua opera introdusse l'uso della matematica nel trattare l'elettricità e il magnetismo. Studiò la tormalina, che si elettrizza per riscaldamento, con numerosi esperimenti. Costruì un condensatore ad aria (capi che il vetro non era l'unico mezzo necessario per avere il condensatore; già il Beccaria aveva dimostrato che oltre al vetro anche lo zolfo e le resine erano in grado di immagazzinare elettricità). Interpretò correttamente il fenomeno dell'induzione: un corpo che avvicinato ad un altro carico si caricherà di una carica opposta e non della stessa come si era creduto fino ad allora. Egli scrisse che non osava avanzare ipotesi sulla dipendenza delle forze elettriche e magnetiche ma che se avesse potuto scegliere avrebbe optato per l'inverso del quadrato della distanza. Cavendish, Volta e Coulomb svilupparono le idee di Aepinus...(idee che ai suoi contemporanei riuscirono troppo difficili da comprendere).

**1771** - **Henry Cavendish** (1731-1810). Gran parte delle sue ricerche sperimentali non fu pubblicata e l'opera del 1771 era di difficile lettura (idee chiare sul potenziale, sulla capacità e sulla resistenza elettrica); ad esempio egli ipotizzò che la forza elettrica dipendesse dall'inverso del quadrato della distanza fra le due cariche che interagivano e che la carica su un conduttore si distribuisse sulla superficie (va ricordato che la dipendenza dall'inverso del quadrato della distanza era stata intuita da **Joseph Priestley** (1733-1804) nel 1767 e già sospettata da Aepino).

**1777** - **Charles Augustin de Coulomb** (1736-1806) riconobbe che le forze attrattive e repulsive elettriche e magnetiche sono dello stesso tipo di quelle gravitazionali. Il suo lavoro si fondava essenzialmente su un sistema di bilance di torsione che richiedevano misure estremamente raffinate. Nel 1784 dichiarò di aver costruito una bilancia elettrica e una bilancia magnetica e rimandava ad un lavoro successivo la stesura delle leggi elettriche e magnetiche. Nel 1785 dimostrò che sferette elettrizzate dallo stesso genere di elettricità si respingono reciprocamente in ragione inversa del quadrato della distanza tra le due sferette. Nel 1787 trattò delle sferette che si attraevano (le bilance precedenti funzionavano nel caso di repulsione). Per quanto riguarda le forze magnetiche secondo Coulomb anch'esse dipendevano dall'inverso del quadrato della distanza, ma secondo una legge più impegnativa. Nel 1789 la ristrutturazione coulombiana della base empirica dell'elettricità e del magnetismo si era conclusa; con Coulomb la fenomenologia elettrica e magnetica era stata ordinata secondo schemi teorici generali. Coulomb aveva separato nettamente l'elettrostatica dalla magnetostatica, e ciò non fu un bene per lo sviluppo dell'elettrodinamica.

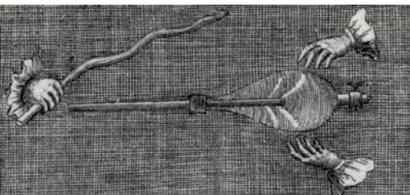


**1800** - **Alessandro Volta** (1745-1827), con l'invenzione della pila (coppie di rame/zinco separate da dischi imbevuti di acqua acida) realizza il primo dispositivo atto a produrre corrente elettrica continua. La pila ebbe un grande impatto anche sull'elettrochimica e infatti in brevissimo tempo si ottenne anche l'elettrolisi dell'acqua. Prima della Pila, Volta aveva inventato l'elettroforo: ideato intorno al 1775, si componeva di un piatto metallico inferiore con una cavità profonda 2 mm, uno strato di resina fuso dentro questa cavità e uno scudo superiore di legno ricoperto di stagnola, sollevabile dalla resina mediante un manico isolante. Successivamente, nel 1780, inventò il condensatore e infine, intorno al 1787, Volta realizzò l'elettrometro a pagliette, migliorando l'elettroscopio ideato da **Abraham Bennet** (1749-1799) nel 1786 (lo strumento di Volta portava una scala graduata sul vetro per misurare la deflessione delle foglioline).

**1820** - **Hans Oersted** (1777-1851) osserva che un ago magnetizzato posto nelle vicinanze di un filo percorso da corrente viene deviato dalla sua posizione di equilibrio.

**1820** - **André-Marie Ampere** (1775-1836), sulla scia degli esperimenti di Oersted scopre che due fili percorsi da corrente interagiscono fra di loro. In questo periodo anche altri fisici fecero altre scoperte riguardanti questa materia, ricordiamo Arago, Biot e Savart. Arago studiò le proprietà magnetiche del ferro vicino ad una corrente elettrica e in qualche modo intuì le leggi dell'induzione (come Ampere). L'opera di Ampere però fu la più grande: definì l'intensità di corrente, diede nome al galvanometro, inventò l'elettrocalamita inserendo una barra di ferro in un'elica conduttrice, concepì l'idea dell'identità delle forze magnetiche ed elettriche schematizzando con piccole correnti circolari le proprietà magnetiche dei vari materiali, diede un modo semplice per prevedere la deviazione dell'ago magnetico vicino ad un filo percorso da corrente, ed infine il risultato più importante fu la formula dell'azione reciproca fra correnti in cui figurava il quadrato della distanza fra i fili. Egli fu anche il primo a introdurre una grandezza che anticipava la nozione di campo magnetico. Fu nel 1827 che Ampere espose l'insieme dei suoi lavori.

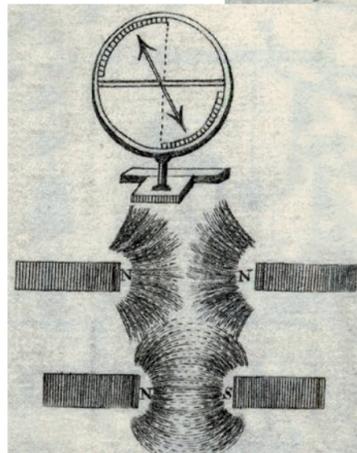
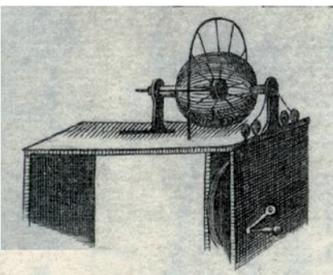
**1827** - **Georg Simon Ohm** (1789-1854) studiò la forza elettromotrice e l'intensità di corrente, arrivando al concetto di resistenza di un conduttore (anche se poi non fu lui a scrivere  $V=RI$ ). Definì la nozione di conducibilità. I suoi lavori furono generalizzati da *Kirchhoff* vent'anni dopo con le leggi che portano il suo nome.



**1831** - **Michael Faraday** (1791-1867), scoprì l'induzione elettromagnetica: l'interazione fra un circuito elettrico e un campo magnetico esterno genera una corrente elettrica nel circuito stesso. Ispirandosi alle osservazioni di Arago realizzò la prima semplice macchina elettromagnetica facendo ruotare un disco di rame fra i due poli di una calamita a ferro di cavallo. Egli aveva capito che le correnti indotte sono create non dall'influenza di un campo, ma dalle variazioni del campo o dagli spostamenti del circuito nel campo. Munendo il proprio disco di contatti realizzò anche il primo generatore di corrente a induzione.

Ampere comprese l'importanza di questa scoperta e chiese subito a *Hippolyte Pixii* (1808-1835) di costruire una macchina ad induzione (1832), per la quale inventò anche un dispositivo, detto commutatore, che trasformava la corrente alternata in impulsata sempre nello stesso verso.

Faraday nel 1834 riconobbe anche l'autoinduzione senza conoscere i lavori di **Joseph Henry** (1797-1878) che l'aveva scoperta due anni prima.



Tutte le immagini sono tratte da «Specimen experimentorum naturalium» (1764) di Carlo Alfonso Guadagni.