

INTRODUZIONE STORICA ALL'ELETTROMAGNETISMO

Marco Panareo

Introduzione

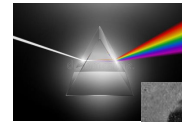
- I fenomeni elettrici e magnetici erano noti nel passato e considerati per centinaia di anni come fenomeni naturali indipendenti
- Nella seconda metà del XIX secolo James Clerk Maxwell elaborò una teoria completa dell'elettromagnetismo. Un gran numero di scienziati contribuì a questo importante risultato quali, tra gli altri, Charles Augustin de Coulomb, André-Marie Ampère, Hans Christian Ørsted, Carl Friedrich Gauss e Michel Faraday
- Maxwell raccolse i diversi risultati conseguiti da questi ricercatori e il riformulò sotto forma di un insieme di equazioni, ora note col nome di *equazioni di Maxwell*



Introduzione

- Quale elemento cruciale in questo processo creativo, Maxwell modificò la cosiddetta legge di Ampère aggiungendovi un termine che implica la generazione di un campo magnetico in corrispondenza della variazione di un campo elettrico
- Questo in analogia alla legge di Faraday sull'induzione, in cui la variazione di un campo magnetico determina la formazione di un campo elettrico
- Tali effetti, messi insieme, hanno la notevole conseguenza di attribuire ai campi una dinamica indipendente dalle sorgenti, nella forma di onde elettromagnetiche
- L'esistenza di queste onde fu successivamente provata sperimentalmente da Heinrich Rudolf Hertz. Dallo studio delle sue equazioni, Maxwell dedusse inoltre che la luce è di natura elettromagnetica

$$\begin{aligned}
 \mathbf{B} &= \text{rot } \mathbf{A}, \\
 \text{rot } \mathbf{H} &= 4\pi \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \\
 \mathbf{E} &= -[\mathbf{B}\mathbf{u}] - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \text{grad } \psi, \\
 \mathbf{E} &= \frac{4\pi}{\epsilon} \mathbf{D}, \\
 \sigma \mathbf{E} &= \mathbf{j}, \\
 \mathbf{j}_{\text{ind}} &= \mathbf{j} + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \\
 \text{div } \mathbf{D} &= 4\pi \rho, \\
 \text{div } \mathbf{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} &= 0. \quad (\text{Pe}\delta.)
 \end{aligned}$$



Introduzione

- La formulazione di Maxwell della teoria unificata dell'elettromagnetismo è considerata tra le maggiori conquiste nella storia della Fisica e la sua influenza sui successivi sviluppi sia della Fisica che della Tecnologia può difficilmente essere sottovalutata
- La società moderna è completamente dipendente dalle applicazioni dell'elettromagnetismo per le comunicazioni, i trasporti, il trasferimento dell'energia e può essere difficile per le persone di oggi comprendere fino a che punto un risultato scientifico di circa 160 anni fa influenzi la nostra esistenza
- Questo seminario ha quale obiettivo di tracciare il percorso storico che ha condotto alla formalizzazione dell'elettromagnetismo classico

INTRODUZIONE STORICA ALL'ELETTROMAGNETISMO

Marco Panareo

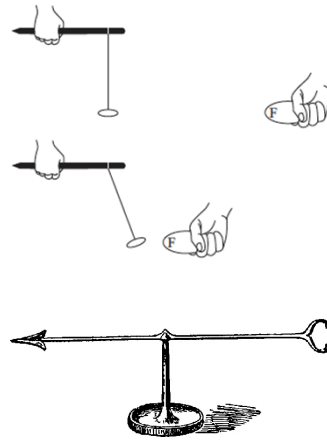
PRIMA PARTE

I precursori

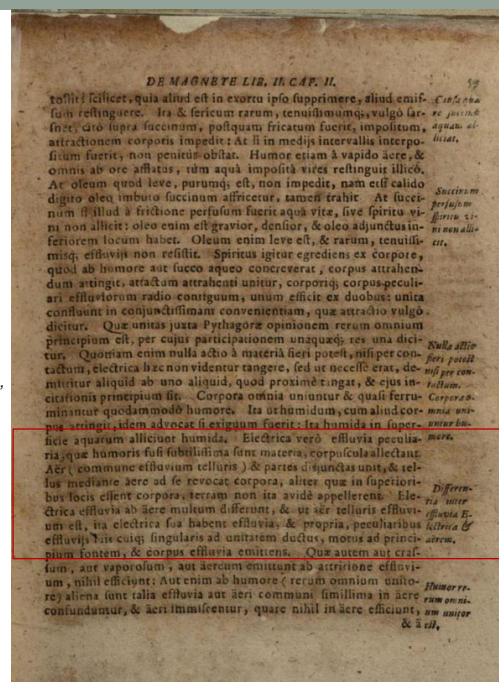
- La prima descrizione moderna dei fenomeni magnetici risale al 1262 quando Petrus Peregrinus da Marincourt, un soldato di ventura al soldo di Carlo d'Angiò, durante l'assedio di Lucera, in Puglia, con l'obiettivo di descrivere una macchina che secondo lui agiva con moto perpetuo scrisse, sotto forma di epistola, il trattato sul magnetismo *De magnete*. In questo breve documento Peregrinus elencava le principali proprietà dei magneti permanenti
- Influenzato dai lavori di Peregrinus, nel 1600 William Gilbert, il medico personale della regina Elisabetta I, nella sua opera, *De Magnete*, formulò una descrizione dei materiali magnetici e per primo ipotizzò che la Terra agisca come un magnete permanente
- Cogliendo probabilmente una connessione con la fenomenologia elettrica conosciuta fino ad allora, nel *De Magnete* Gilbert descrisse il fenomeno già noto dell'elettrizzazione per strofinio e introdusse l'aggettivo *elettrico* per indicare questa classe di fenomeni, dal nome greco dell'ambra, *ἤλεκτρον*, uno dei primi materiali che si osservò fossero in grado di elettrizzarsi



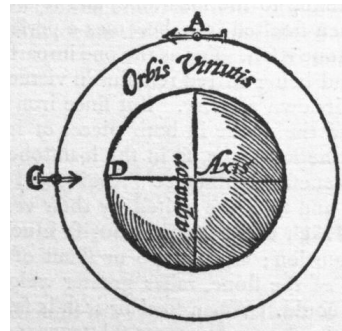
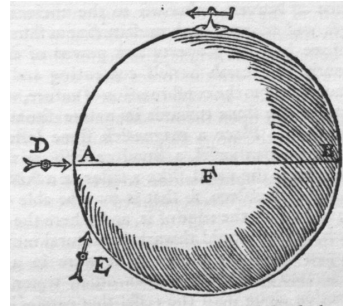
- Ispirato dai lavori di Girolamo Fracastoro, per gli studi dei fenomeni elettrici Gilbert si avvale di un dispositivo, detto *versorio*, simile ad una bussola in cui un elemento orizzontale è libero di ruotare attorno ad un perno sostenuto da un elemento verticale connesso ad una base
- Gilbert poté utilizzare il versorio per osservare il comportamento della forza elettrica nello spazio: una serie di versori disposti lungo una circonferenza attorno a un materiale elettrizzato si orientano tutti verso il centro della circonferenza; in termini moderni diremmo che l'attrazione segue una direzione radiale.



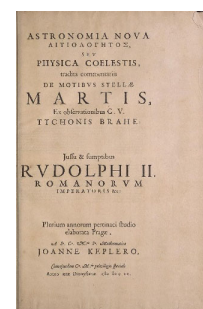
- L'interpretazione di Gilbert dei fenomeni elettrici e magnetici non si discostava da quella dei suoi predecessori che riconducevano tali fenomeni all'emissione di specifici *effluvi* da parte dei corpi elettrizzati o magnetizzati:
 - *Gli effluvi elettrici differiscono molto dall'aria, e poiché l'aria è l'effluvio terrestre, così i corpi elettrici hanno i loro effluvi distintivi; ed ogni peculiare effluvio ha il suo proprio potere individuale di condurre all'unione, il suo proprio movimento alla sua origine, alla sua fonte, e al corpo che emette l'effluvio*
- Attraverso tale ipotesi Gilbert giustificò la diminuzione della forza di attrazione elettrica con la distanza affermando che l'effluvio elettrico tende a disperdersi con la distanza e di conseguenza i suoi effetti si affievoliscono allontanandosi dal corpo elettrizzato.



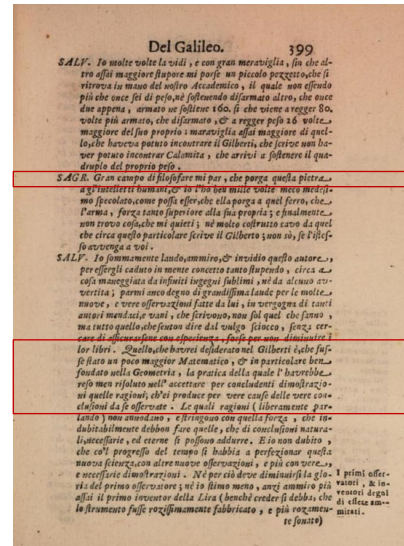
- Sul fronte del magnetismo, ispirato dai lavori di Peregrinus, realizzò quale modello della Terra un magnete di forma sferica al quale attribuì il nome di *terrella*. Spostando sulla superficie della terrella un piccolo ago magnetico Gilbert era in grado di riprodurre l'orientamento della bussola verso il nord terrestre.
- Da tale risultato Gilbert dedusse che la Terra si comporta come una grande calamita.



- L'opera di Gilbert influenzò la ricerca scientifica del XVII secolo, tant'è che l'analogia tra i magneti ed il pianeta Terra indusse Johannes Kepler nel 1609 ad ipotizzare che la forza motrice che origina i moti planetari fosse di natura magnetica
- Nella sua teoria, riportata nell'opera *Astronomia Nova*, Kepler descrive una virtù attrattiva che si situa nella regione circostante un magnete e che si attenua allontanandosi da esso
- Da qui deduce che nel sistema solare agisce la medesima virtù, che origina dal Sole e si propaga verso i pianeti più estremi indebolendosi con la distanza

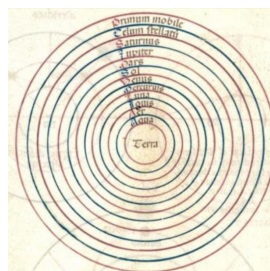


- Anche Galilei affronta il tema del magnetismo nel *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* comprendendone che la complessità dei fenomeni apre un *gran campo di filosofare* che deve però essere supportato da una adeguata matematica
- Galilei riconosce in Gilbert la rottura con gli schemi interpretativi aristotelici rimanendo tuttavia perplesso dal suo rifiuto nell'uso della matematica:
 - *Quello che avrei desiderato nel Gilberti, è che fusse stato un poco maggior Matematico, ed in particolare ben fondato nella geometria, la pratica della quale l'avrebbe reso men risoluto nell'accettare per concludenti dimostrazioni quelle ragioni ch'ei produce per vere cause delle vere conclusioni da sé osservate.*
- Per Galilei l'osservazione di fatti depauperata da un apparato formale quantitativo che li corrobori non può rappresentare il fondamento di una teoria fisica.
- L'adesione di Kepler alla teoria di Gilbert rappresenta uno dei motivi per cui Galilei respinse alcuni dei risultati di Kepler quali, ad esempio, le orbite ellittiche o la spiegazione delle maree attraverso l'azione della Luna, che comporta una azione a distanza che, per Galilei, presentava un carattere nettamente metafisico, come l'idea dei solidi incastonati tra loro o le melodie che i pianeti suonano.
- Tutto ciò si scontrava con la razionale e metodica disamina della natura che si trova in Galilei che, per altro, interpretava l'adesione di Kepler alla teoria di Gilbert sostanzialmente priva di alcuna utilità

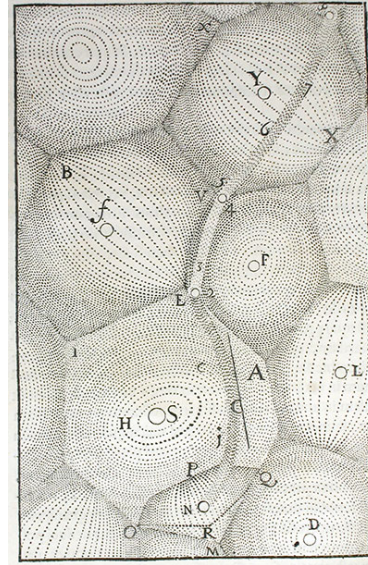


L'etere

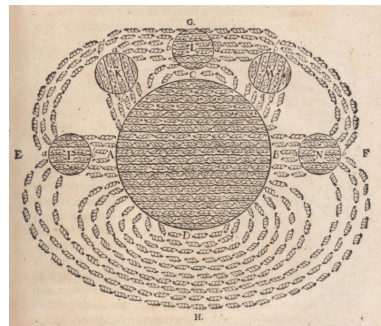
- Nella filosofia ionica del VI a.C. l'*etere*, *αἰθήρ*, sinonimo di *quintessenza*, era considerato un elemento che completava gli altri quattro già noti, il fuoco, l'acqua, la terra e l'aria. Nel *Timeo* Platone lo aveva definito *la parte più pura dell'aria*
- Considerando una insensatezza l'azione a distanza, Aristotele in *Φυσικῆς (Physics)* e in *Περὶ οὐρανοῦ (De caelo)* assumeva che le forze non si possono trasmettere tra i corpi materiali in mancanza di un mezzo intermedio, cioè si trasmettono unicamente per contatto. Il mezzo che riempie lo spazio tra i corpi, consentendo la trasmissione delle forze, è l'etere proposto da Platone. Per Aristotele l'etere è l'elemento costitutivo dei corpi celesti, dal cielo della Luna al cielo delle stelle fisse; all'etere attribuiva il moto circolare ed immutabile dei corpi celesti. Dall'interazione dell'etere con i quattro elementi che caratterizzano il mondo sublunare ne scaturiva la degradazione del moto circolare nei moti rettilinei
- Nel XVII secolo Robert Boyle riteneva che un etere costituito da particelle sottili fornisce una efficace spiegazione a molteplici fenomeni altrimenti inspiegabili sulla base di interazioni meccaniche tra corpi macroscopici quali, ad esempio, il magnetismo e probabilmente anche la gravità



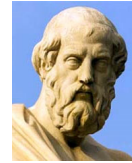
- René Descartes nel 1644 nei *Principia philosophiae* per primo fece uso del concetto di etere in un ambito strettamente scientifico
- Descartes considerava l'universo come un'immensa macchina, operante grazie al movimento e alla pressione della materia:
 - *Donnez-moi de la matière et du mouvement et je ferai un monde*
- Una particolarità che distingueva il suo sistema era il rifiuto di ogni forma di azione a distanza, presumendo che la forza non potesse essere comunicata se non mediante la pressione o gli urti
- Per sostenere tale ipotesi fornendo un meccanismo per rendere conto delle forze conosciute, Descartes ipotizzò che lo spazio doveva essere un *plenum*, occupato da una materia vorticosa, impercettibile, ma capace di fungere da veicolo per la forza e la luce e, in particolare, di reggere il moto dei pianeti
- Tale materia costituiva l'etere



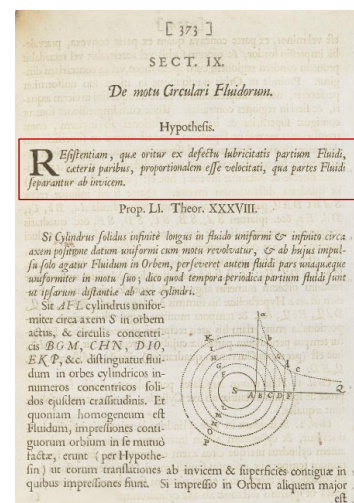
- Nei *Principia philosophiae* Descartes descrive i materiali magnetici come dotati di microscopiche scanalature attraversate da particelle elicoidali che possono emergere attraverso dei pori presenti sulla superficie.
- Le particelle, sostenute dall'etere, una volta fuoriuscite dal magnete, per effetto del loro moto a vortice, tendono a rientrarvi. Se le particelle che escono dal magnete incontrano un pezzo di ferro penetrano nei suoi pori.
- Le scanalature possono essere sinistrorse come destrorse, in questa maniera Descartes giustifica l'attrazione o la repulsione tra magneti, poiché ad analoghi avvitamenti corrisponde una attrazione, altrimenti una repulsione
- Nell'ipotesi di Descartes è possibile intravedere una anticipazione dei concetti di campo e di linee di forza introdotti 200 anni dopo



- Decartes, con l'ipotesi dei pori dai quali uscivano o entravano le particelle che davano luogo alla fenomenologia del magnetismo, riprendeva una idea che originava da Platone ed era stata successivamente ripresa da altri, compreso Gilbert.
 - Attraverso i pori i materiali magnetici spargerebbero il fluido che ne favorisce l'attrazione con gli oggetti metallici
- Plutarco osservando la differenza nella manifestazione degli effetti dovuti ai materiali magnetici ed all'ambra concludeva che quest'ultima sarebbe piena di *una sostanza ignea* che non può uscire trovando chiusi i pori. Occorre pertanto pulire la superficie dei corpi per liberare i pori e da questo origina la necessità dello strofino
 - La sostanza ignea produrrebbe lo stesso effetto del fluido magnetico



- I vortici cartesiani vengono confutati da Isaac Newton nell'opera *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* del 1687 quando, all'inizio della sezione IX formula l'ipotesi
 - La resistenza originata dalla scarsa scorrevolezza delle parti del fluido, a parità di altre condizioni (*cæteris paribus*), è proporzionale alla velocità con cui le parti del fluido si separano l'una dall'altra
- Cioè nei fluidi viscosi i vari strati scivolano gli uni sugli altri e la resistenza è proporzionale alla velocità di scorrimento degli strati
- Pertanto, se i pianeti fossero trascinati da vortici di materia sottile, essi dovrebbero fornire resistenza al moto di tale materia
- Ipotizzando che questa resistenza segua tale legge dei fluidi viscosi, Newton prova l'impossibilità di dedurre la terza legge di Kepler, per cui conclude
 - Di qui è evidente che i pianeti non sono trasportati da vortici corporei [...]



- Newton una volta stabilite le regole per cui la mutua azione tra i corpi celesti dipende dalle loro posizioni relative, in una prima fase si era guardato bene dal formulare delle ipotesi circa il processo tramite il quale questa azione si attui, affermando perentoriamente sulla natura della gravità
 - *Hypotheses non fingo*
- Tuttavia in una lettera al filologo Richard Bentley del 10 Dicembre 1692 Newton esprimeva la sua sincera opinione sull'argomento
 - *È inconcepibile che la materia bruta inanimata debba (senza la mediazione di qualcos'altro che non sia materiale) operare su e influenzare altra materia senza contatto reciproco; come sarebbe se la gravitazione, nel senso di Epicuro, fosse essenziale e inerente alla materia stessa.*
 - *Che la gravità dovrebbe essere innata, inerente ed essenziale alla materia in modo che un corpo possa agire su un altro a distanza attraverso il vuoto senza la mediazione di qualsiasi altra cosa mediante e attraverso la quale la loro azione o forza possano essere convogliate dall'uno all'altro è per me un'assurdità così grande che credo che nessun uomo che abbia una facoltà di pensiero competente in materia filosofica possa mai caderci.*
- Come vedremo nel seguito, questa idea di una mediazione dell'interazione, verrà formalmente considerata plausibile da Newton

The last Clause of the second Position I like very well. It is inconceivable, that inanimate brute Matter should, without the Mediation of something else, which is not material, operate upon, and affect other Matter without mutual Contact, as it must be, if Gravitation in the Sense of *Epicurus*, be essential and inherent in it. And this is one Reason why I desired you would not ascribe innate Gravity to me. That Gravity should be innate, inherent and essential to Matter, so that one Body may act upon another at a Distance thro' a *Vacuum*, without the Mediation of any thing else, by and through which their Action and Force may be conveyed from one to another, is to me so great an Absurdity, that I believe no Man who has in philosophical Matters a competent Faculty of thinking, can ever fall into it. Gravity must be caused by an Agent acting constantly according to certain Laws; but whether this Agent be material or immaterial, I have left to the Consideration of my Readers.

- Nella prefazione alla seconda edizione del 1713 dei *Principia* il matematico Roger Cotes aveva ritenuto opportuno dividere gli studiosi di filosofia naturale in tre categorie:

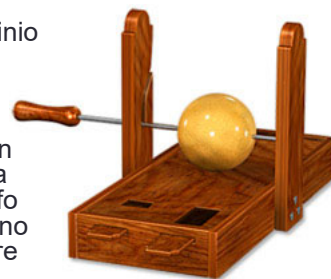


- I seguaci di Aristotele che pretendevano di analizzare la natura dei corpi, ma che ormai non avevano nulla da insegnare siccome ragionavano solo in termini di *nomi delle cose* e non delle cose stesse.
- I cartesiani, i quali con l'obiettivo di semplificare le spiegazioni dei fenomeni tendevano ad esagerare allontanandosi dalla realtà: *essi cadono nei sogni, in quanto hanno trascurato la reale costituzione delle cose*
- Quelli come Newton che, seguendo la filosofia sperimentale, *non assumono come principio niente che non sia stato provato dai fenomeni*
- Newton, secondo Cotes, era stato il primo ed il solo che seguendo tale approccio aveva dedotto *la spiegazione del sistema del mondo dalla teoria della gravitazione*. Ciò malgrado Newton non avesse mai fatto osservazioni astronomiche dirette ma avesse utilizzato risultati ricavati da altri

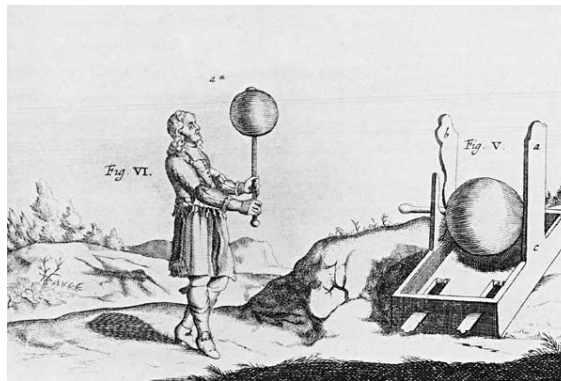
- Nell'attaccare le posizioni dei cartesiani, Cotes scrisse:
 - *Sento che alcuni disapprovano questa conclusione, e borbottano non so che, circa le qualità occulte. Sono soliti cialtrare continuamente del fatto che la gravità specialmente è un quid, e che, per la verità, le cause occulte, debbono essere bandite dalla filosofia. Ma, a costoro si risponde che cause occulte non sono quelle la cui esistenza si dimostra chiaramente per mezzo di osservazioni, ma solamente quelle la cui esistenza è occulta e inventata e ancora non è stata provata. La gravità, dunque, non sarà dunque la causa occulta dei moti celesti; se qualcosa, infatti, è appalesato dai fenomeni, e che questo potere esiste di fatto. Piuttosto, nelle cause occulte si rifugiano coloro che propongono alla guida di questi movimenti non so che vortici di materia interamente immaginata e affatto sconosciuta ai sensi.*
- Esplicitando così, in aperta polemica con Decartes ed i suoi seguaci, l'avversione circa l'ipotesi che i vortici fossero alla base della dinamica dei corpi celesti. Cotes conclude che la gravitazione è
 - *una proprietà essenziale della materia come l'estensione, la mobilità e l'impenetrabilità*
- Quando l'approccio di Newton al moto si diffuse, fu la posizione di Cotes piuttosto che quella di Newton a prevalere, una posizione che si opponeva alla proliferazione dei vari tipi di etere che continuavano ad essere proposti

Le macchine elettriche

- Per respingere l'interpretazione di Gilbert del magnetismo terrestre, nel 1663 Otto von Guericke costruì la sua versione di terrella miscelando diversi materiali in una fusione di zolfo realizzata all'interno di un globo di vetro. Dopo il raffreddamento rompeva la sfera di vetro ottenendo una sfera di zolfo che manifestava effetti elettrici dopo essere stata strofinata
- Si tratta di fatto della realizzazione della prima macchina elettrostatica a strofinio
- Il globo di zolfo, elettrizzato attraverso lo strofinio col palmo della mano secca, era in grado di attrarre piccoli corpi che però poi ne venivano respinti, come già osservato da altri
- Guericke sosteneva che l'azione repulsiva non poteva essere un solo fatto meccanico ma era dovuta ad una virtù intrinseca del globo di zolfo siccome i corpi attratti e poi respinti non tornano ad essere attratti dal globo se non dopo essere venuti a contatto con un terzo corpo



- Utilizzando il suo globo, Guericke riusciva a portare in giro, nella sfera d'azione del globo, un piuma respinta dal globo dopo esserne venuta a contatto
- Durante il movimento la piuma attrae ad essa ogni cosa vicina o, se non ne ha la forza, aderisce essa stessa, soprattutto se la cosa è dotata di sporgenze
- Guericke notava inoltre che il globo è in grado di trasmettere la sua virtù di attrarre anche a un filo, rigettando così la teoria dell'attrazione mediante l'aria come unico intermediario



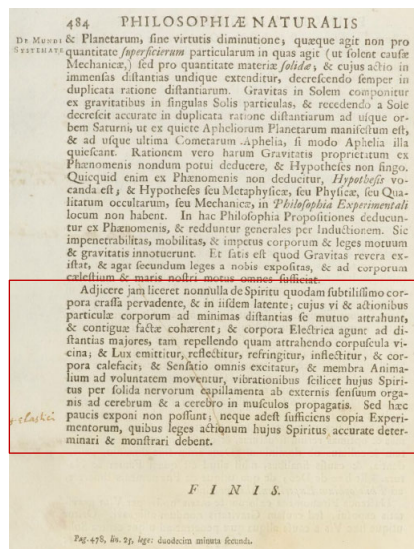
- A partire dal 1706 Newton fu affascinato dai fenomeni elettrici, grazie soprattutto ad alcuni esperimenti che erano stati presentati alla Royal Society ed ai quali aveva assistito
- Questo lo indusse a prendere in seria considerazione la possibilità che l'elettricità *mediante la sua forza e le sue azioni*, fosse in grado di spiegare molti dei fenomeni naturali studiati, quali la coesione delle particelle contigue, l'emissione, la riflessione, la rifrazione e la diffrazione della luce, il calore dei corpi, le sensazioni e i movimenti dei muscoli
- Sebbene non lo faccia in maniera esplicita, Newton sembra ipotizzare inoltre la possibilità di ricondurre al fenomeno elettrico anche l'attrazione gravitazionale, alla luce del fatto che l'elettricità sembra spiegare così tanti fenomeni



- Il peso di queste considerazioni portarono Newton a chiedere nel 1713 all'editore dei *Principia* l'inclusione di uno *Scolio* di circa un quarto di foglio da collocare alla fine:

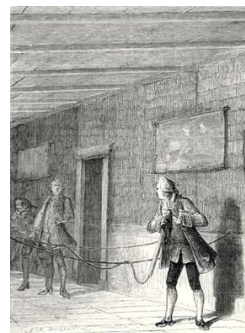
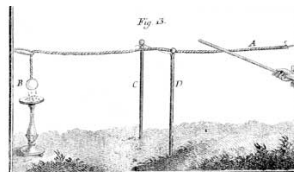
Sarebbe ora lecito aggiungere qualcosa su un certo spirito sottilissimo che pervade i corpi più massicci e si nasconde in essi; mediante la sua forza le particelle dei corpi si attraggono reciprocamente a distanza ravvicinata e, divenute contigue, formano un aggregato; i corpi Elettrici agiscono a distanze maggiori, sia respingendo che attraendo i corpuscoli circostanti; la Luce viene emessa, riflessa, rifratta, diffratta e riscalda i corpi; e tutta la Sensazione è eccitata e le membra dei corpi Animali sono mosse dalla volontà, cioè per le vibrazioni di questo Spirito che viene propagato lungo i filamenti solidi dei nervi dagli organi esterni dei sensi al cervello e dal cervello nei muscoli. Ma queste sono cose che non possono essere spiegate in poche parole, né vi è una sufficiente quantità di Esperimenti con cui le leggi delle azioni di questo spirito di possano determinare e dimostrare accuratamente.

- Alla fine Newton conclude che gli esperimenti sono ancora insufficienti a dimostrare le azioni di questo spirito, di conseguenza non è ben chiaro per quale motivo avesse deciso di introdurre questo paragrafo, soprattutto se si considera che segue di poco la sua perentoria affermazione *non faccio ipotesi* sulla natura della gravità.

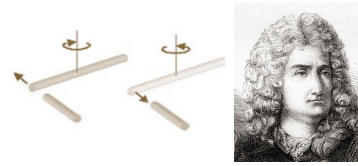


Tipi di elettricità

- Servendosi di bacchette di vetro secondo un approccio allora divenuto comune, nel 1729 Stephen Gray, un tintore inglese con interessi nell'astronomia e nella scienza in generale, iniziò a studiare il fenomeno dell'elettrizzazione per strofinio
- Gray osservò che il fenomeno dell'attrazione elettrica di piccoli corpi può manifestarsi all'estremità di una corda inumidita lunga varie decine di metri quando la bacchetta di vetro strofinata, viene posta a contatto con l'altra estremità.
- Attraverso questi esperimenti Gray inoltre scoprì che se la corda è sostenuta con fili metallici, gli effetti elettrici cessano di essere trasmessi, mentre lo stesso non accade se le sospensioni sono fatte con cordicelle di seta, così dedusse che mentre i fili metallici disperdono le proprietà elettriche, lo stesso non accade per i fili di seta
- Questa capacità fu descritta da un suo collaboratore, Jean Théophile Desaguliers conducendo ad una ben definita distinzione tra materiali *elettrici*, che potevano essere elettrizzati mediante strofinio ma che non trasmettevano l'azione elettrica, quelli che oggi denominiamo *dielettrici* o *isolanti*, e quelli *non elettrici*, che non potevano essere elettrizzati per strofinio ma che trasmettevano l'azione, oggi *conduttori elettrici*.
- Concettualmente tale distinzione risultava tuttavia in contrasto con le dimostrazioni secondo le quali il vetro, cioè un materiale *elettrico*, risultava permeabile al fenomeno elettrico



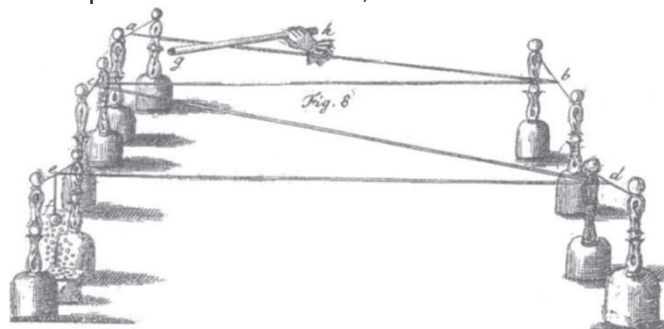
- Stimolato dai lavori di Gray, nella prima metà del XVIII secolo, lo scienziato francese Charles François Cisternay du Fay, a partire dalla constatazione che gli oggetti strofinati non sempre attraggono piccoli corpi ma, in certi casi, li respingono, realizzò un esperimento in cui una sottile asta di legno impernata come un ago magnetico aveva fissata ad una estremità un pezzo di ambra elettrizzato, avvicinando a questo un altro pezzo dello stesso materiale elettrizzato osservava che il primo veniva respinto mentre un pezzo di vetro elettrizzato lo attraeva.
- Da qui du Fay dedusse che devono esistere due tipi di elettricità che denominò *elettricità resinosa* ed *elettricità vitrea* e propose una teoria secondo la quale i corpi non elettrizzati hanno i due tipi di elettricità in uguale misura. Se due corpi posseggono lo stesso tipo di elettricità si respingono mentre se ne posseggono di tipo diverso si attraggono.
- Gray e du Fay non descrissero l'elettricità come un fluido, ma come una condizione che poteva essere indotta nella materia.



Seventhly, Chance has thrown in my way another Principle, more universal and remarkable than the preceding one, and which casts a new Light on the Subject of Electricity. This Principle is, that there are two distinct Electricities, very different from one another; one of which I call *vitreous*

Electricity, and the other *resinous Electricity*. The first is that of Glafs, Rock-Crystal, Precious Stones, Hair of Animals, Wool, and many other Bodies: The second is that of Amber, Copal, Gum-Lack, Silk, Thread, Paper, and a vast Number of other Substances. The Characteristick of these two Electricities is, that a Body of the *vitreous Electricity*, for Example, repels all such as are of the same Electricity; and on the contrary, attracts all those of the *resinous Electricity*; so that the Tube, made electrical, will repel Glafs, Crystal, Hair of Animals, &c. when render'd electrick and will attract Silk, Thread, Paper, &c. though render'd electrical likewise. Amber on the contrary will attract electrick Glafs, and other Substances of the same Glafs, and will repel Gum-Lac, Copal, Silk, Thread, &c. Two Silk Ribbons rendered electrical, will repel each other; two Woollen Threads will do the like; but a Woollen Thread and a Silk Thread will mutually attract one another.

- Attraverso Gray e du Fay una notevole mole di dati empirici, molte osservazioni accidentali ed esperimenti spesso difficilmente riproducibili su sistemi fisici complessi cominciava a presentare aspetti passibili di riorganizzazione secondo leggi e principi di portata generale
- Con du Fay era finita la caccia ai corpi elettrici e stava iniziando la scienza moderna dell'elettricità e del magnetismo
- Verso la fine del 1733 du Fay prese a lavorare con un collaboratore particolarmente abile, l'abate Jean-Antoine Nollet

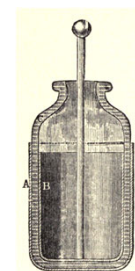


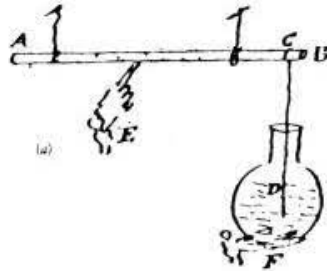
- Nollet negava l'ipotesi dualistica dell'elettricità assumendo che gli esperimenti di du Fay si riferivano a diversi gradi di elettrizzazione e non a diversi tipi di elettricità
- Inoltre attribuiva i fenomeni elettrici al movimento in direzioni opposte di due correnti di un fluido, *molto sottile e infiammabile*, che supposeva fosse presente in tutti i corpi in ogni circostanza.
- Quando tutto l'elettrico è eccitato per attrito, parte di questo fluido fuoriesce dai suoi pori, formando un flusso effluente; e questa perdita è compensata da un flusso affluente dello stesso fluido che entra nel corpo dall'esterno.
- I corpi leggeri situati nelle vicinanze, essendo catturati nell'uno o nell'altro di questi flussi, sono attratti o respinti dall'elettricità eccitata.



La bottiglia di Leida

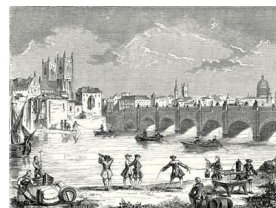
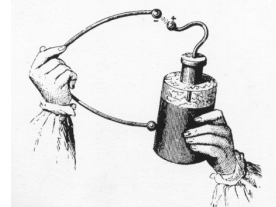
- A partire dalla questione circa la possibilità di trasferire all'acqua il potere elettrico, Ewald Jürgen Georg von Kleist e Pieter van Musschenbroek scoprirono contemporaneamente, nel 1745, un dispositivo che rivoluzionò le conoscenze fino ad allora raccolte
- L'idea di von Kleist era quella di costruire uno strumento in grado di agire quale serbatoio per concentrare gli effluvi elettrici. Allo scopo adoperava un volume d'acqua elettricamente carica circondata da un involucro di qualche non conduttore, ad esempio, il vetro.
- Musschenbroek operò su un suggerimento del suo amico Andreas Cuneus il quale aveva provato ad ottenere delle emanazioni luminose dall'acqua elettrificata contenuta in una bottiglia di vetro. Cuneus, le cui conoscenze sull'elettricità erano molto limitate, inserì un chiodo nel collo di una bottiglia piena d'acqua mentre la teneva in mano. Col chiodo toccò il conduttore di una macchina elettrica in funzione e dopo aver interrotto il contatto, sfiorò con l'altra mano il chiodo avvertendo un'intensa scossa.
- Musschenbroek ripeté l'esperimento descrivendo la *forza immensa* che si avvertiva nel corpo e che provocava sensazioni mortali





- Musschenbroek descrive così la sua esperienza in una lettera del 20 aprile 1746, indirizzata a René-Antoine Ferchault de Réaumur:
 - *a tale scopo avevo sospeso a due fili di seta un cannone di ferro, che per comunicazione riceveva elettricità da un globo di vetro che veniva ruotato velocemente sul proprio asse, mentre lo sfregava applicandovi le mani. All'altra estremità pendeva liberamente un filo di ottone, la cui estremità era immersa in un vaso tondo di vetro, parzialmente pieno d'acqua, che tenni nella mano destra; con l'altra ho cercato di sparare scintille dal cannone di ferro elettrificato. Improvvisamente la mia mano destra fu colpita così violentemente che tutto il mio corpo fu scosso come un fulmine*
- divenne evidente che era stato scoperto un metodo per accumulare o intensificare l'energia elettrica

- La bottiglia di Leida rivoluzionò lo studio della scienza elettrica. In breve tempo gli *elettricisti* del tempo presero a svolgere dimostrazioni dei fenomeni elettrici in tutta Europa facendo uso di tale dispositivo
- In genere, uccidevano piccoli animali con scariche elettriche o inviavano cariche attraverso fili su fiumi e laghi.
- Nel 1746 Nollet, scaricò una bottiglia di Leida davanti al re Luigi XV inviando corrente attraverso una catena di 180 guardie reali. In un'altra dimostrazione, Nollet utilizzò un filo di ferro per collegare una fila di monaci lunga più di un chilometro; quando una bottiglia di Leida fu scaricata, i sacerdoti sarebbero saltati simultaneamente in aria.



Atmosfere elettriche

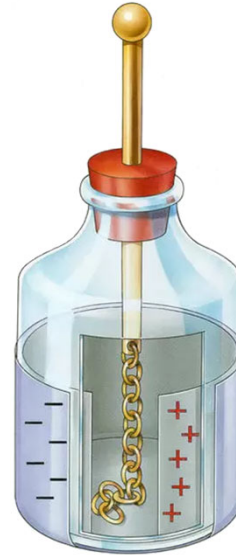
- Le ricerche sui fenomeni elettrici e magnetici si intensificarono agli inizi della seconda metà del XVII secolo. In particolare le antiche teorie che riconducevano questi fenomeni all'emanazione di effluvi da parte dei corpi elettricamente carichi o magnetizzati furono inizialmente sostituite da ipotesi basate sulle cosiddette *atmosfere elettriche* e successivamente anche le atmosfere subirono una critica radicale
- I principali attori in tale processo furono Nollet, che aveva introdotto il modello con la materia affluente ed effluente, Benjamin Franklin e Franz Ulrich Theodor Aepinus
- Il periodo fu inoltre caratterizzato da un intenso programma volto alla matematizzazione di questo campo di ricerca



- Franklin riteneva che la fenomenologia elettrica non fosse da ricondurre ad effluvi quanto ad un sistema di interazioni reciproche tra la materia nel suo stato ordinario ed una materia elettrica
- Secondo Franklin il fluido elettrico è unico ed è contenuto in tutti i corpi. Ogni processo di elettrizzazione comporta la sottrazione di una parte di questo fluido da un corpo e il trasferimento in un altro: è il conseguente difetto o eccesso di fluido in ciascuno dei corpi a determinare la fenomenologia elettrica
- Un corpo è elettrizzato se ha una quantità di fluido elettrico maggiore o minore di quella del suo stato ordinario:
 - in un caso il corpo è elettrizzato *positivamente* o *più*
 - nell'altro caso è elettrizzato *negativamente* o *meno*
- Le caratteristiche peculiari del fluido elettrico sono l'estrema sottigliezza, la mutua repulsione tra le sue parti, la forte attrazione tra la materia elettrica e la materia ordinaria. Se un corpo è elettrizzato positivamente, l'eccesso di fluido elettrico si distribuisce alla sua superficie costituendo un'*atmosfera elettrica*
- Quando Franklin venne a conoscenza delle ricerche di du Fay, identificò la carica positiva con l'*elettricità vetrosa* e la carica negativa con l'*elettricità resinosa*
- L'ipotesi di Franklin era in netto contrasto con la teoria di Nollet in quanto gli effluvi mediavano le interazioni attraverso il loro moto mentre le atmosfere elettriche erano statiche



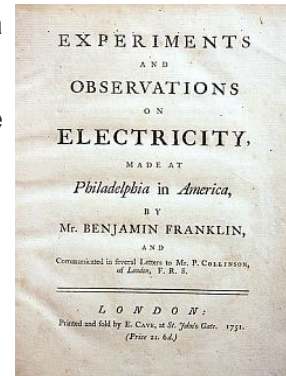
- Il modello di Franklin era in grado di fornire una interpretazione accettabile della fenomenologia della bottiglia di Leida.
- Quando nella bottiglia di Leida si carica l'acqua di un eccesso di fluido elettrico, questo non può sfuggire dal vetro essendo un materiale elettrico (isolante) e pertanto impenetrabile al fluido. Tuttavia la forza repulsiva del fluido in eccesso presente nell'acqua può agire attraverso il vetro respingendo nella superficie esterna della bottiglia parte del suo fluido naturale. Pertanto la superficie esterna della bottiglia risulta carica negativamente mentre l'acqua e la superficie interna si caricano positivamente
- Qualora le due superfici fossero poste a contatto attraverso un corpo conduttore, il fluido in eccesso presente nell'acqua scorrerebbe rapidamente attraverso il corpo verso la superficie esterna, neutralizzando così le cariche opposte



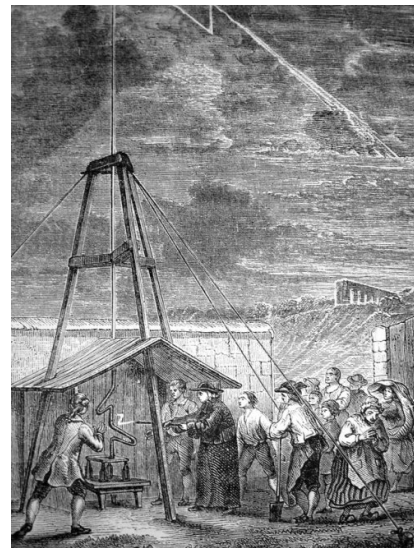
- Franklin si pose inoltre il problema di indentificare la sede dell'elettricità nella bottiglia di Leida
- Nel 1748 provò a versare l'acqua di una bottiglia elettrizzata in un'altra bottiglia isolata provando ad ottenere una scarica, ma senza alcun risultato
- Tuttavia aggiungendo nuova acqua alla bottiglia vuotata dopo averla elettrizzata la scarica si otteneva
- Da qui dedusse che l'elettricità della bottiglia di Leida non era localizzata nell'acqua ma nel vetro che la costituisce



- Il modello di elettrizzazione di Franklin aveva difficoltà a spiegare l'elettrizzazione di conduttori isolati mediante la sola vicinanza ad un corpo carico, cioè il fenomeno al quale adesso diamo il nome di *induzione elettrostatica*
- In questo caso Franklin ipotizzava la formazione di una atmosferica elettrica intorno al corpo carico positivamente in grado di attrarre un corpo scarico o carico negativamente quando tale corpo entrava nell'ambito di tale atmosfera
- Nondimeno due corpi carichi positivamente si sarebbero respinti quando le loro atmosfere di materia mutuamente repulsiva fossero venute in contatto
- Franklin si rese comunque conto che non era in grado di giustificare la repulsione di due corpi carichi negativamente siccome il suo modello non prevedeva che fossero circondati da atmosfere



- A partire dal suo modello, Franklin riuscì a giustificare il comportamento anomalo dei corpi appuntiti, osservato nel 1747 da Thomas Hopkinson, un collaboratore di Franklin. Hopkinson aveva rilevato che qualora la geometria del corpo presentava delle punte, queste erano in grado di attrarre fortemente la materia elettrica
- Tale osservazione portò Franklin ad ipotizzare la possibilità di catturare l'elettricità delle nubi adoperando corpi dotati di punte
- Nel 1752 tale previsione venne confermata a Marly-la-Ville, presso Parigi, attraverso l'osservazione di scintille tra un'asta metallica ed un filo di ottone durante un temporale

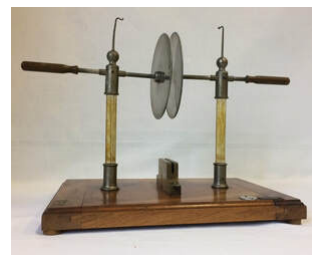


Interazione a distanza

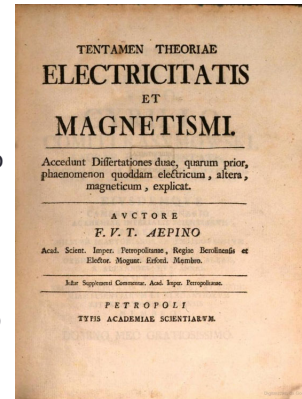
- Sia la teoria degli effluvi che quella delle atmosfere elettriche furono rigettate nel 1756 da Francis Ulrich Theodore Aepinus che le sostituì con quella dell'azione a distanza
- Il programma di Aepinus partì dall'osservazione di un materiale, noto allora col nome di *lapis electricus*, ed ora col nome di tormalina, in grado di elettrizzarsi quando riscaldato, esibendo due polarità
- Per mezzo di ragionamenti basati sulla legittimità di stabilire analogie tra l'elettrizzazione per strofinio e per effetto termico, Aepinus giunse alla conclusione che tormalina agiva come una sorta di bottiglia di Leida di origine naturale
- Da tale osservazione si domandò se il vetro della bottiglia di Leida non fosse inessenziale al funzionamento di tale dispositivo



- Pertanto, insieme a Johan Carl Wilcke, Aepinus riuscì a costruire una bottiglia di Leida senza adoperare il vetro, cioè quello che attualmente chiamiamo *condensatore ad aria*
- Il fatto che tale dispositivo funzionasse, comportava l'esigenza di riesaminare criticamente un punto centrale della concezione di Franklin relativa alla bottiglia di Leida, ossia quello che indicava l'essenzialità del vetro nella descrizione dei fenomeni elettrici connessi a tale dispositivo
- A tale disamina critica delle concezioni di Franklin si aggiunse quella sulle atmosfere statiche ed anche a questo proposito Aepinus trovò che portavano a paradossi

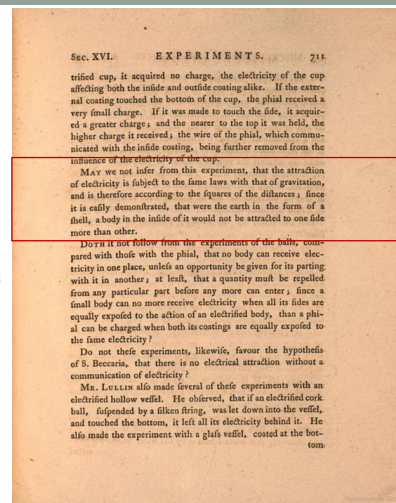


- Aepinus quindi respinse completamente il concetto di atmosfera elettrica e non solo ipotizzò che le particelle di fluido elettrico si respingessero reciprocamente, mentre erano attratte dalla materia ordinaria, ma che anche quest'ultime, quelle della materia ordinaria, si respingessero mutuamente
- Aepinus mostrò inoltre che senza tali assunzioni le ipotesi di Franklin avrebbero implicato che i corpi non carichi avrebbero esercitato tra loro una attrazione elettrica. Partendo da ciò, e facendo uso di forze che agivano opportunamente, Aepinus riuscì a giustificare in maniera quasi quantitativa molteplici fenomeni di induzione elettrostatica
- Aepinus non cercò mai di completare la descrizione matematica di tali fenomeni non volendo speculare sulla forma della legge secondo cui le forze elettriche variano con la distanza, sebbene sospettasse che fossero inversamente proporzionali al quadrato della distanza
- I risultati delle sperimentazioni di Aepinus e le sue ipotesi furono pubblicate nel 1759 nella memoria di difficile leggibilità *Tentamen Theoriae electricitatis et magnetismi*



Leggi di forza

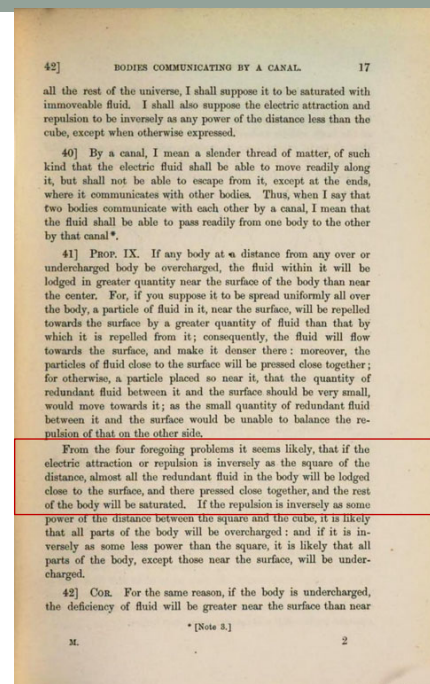
- L'onore di aver identificato per primo la legge secondo la quale la forza tra due cariche elettriche varia con la distanza tra di loro spetta a Joseph Priestley
- Priestley, che era un amico di Franklin, era stato informato da quest'ultimo di aver scoperto che le palline di sughero non erano influenzate dall'elettricità di una tazza di metallo all'interno della quale erano tenute; Franklin chiese a Priestley di ripetere l'esperimento per accertare questo risultato
- Di conseguenza, il 21 dicembre 1766 Priestley realizzò degli esperimenti, i quali mostrarono che, quando un recipiente metallico cavo è elettrizzato, non si forma alcuna carica sulla superficie interna (tranne vicino all'apertura) e non si osserva nessuna forza elettrica nello spazio all'interno
- Da tale risultato Priestley ne trasse la conclusione, pubblicata l'anno dopo nel volume *The History and Present State of Electricity with Original Experiments*:
 - non possiamo dedurre da questo esperimento che l'attrazione dell'elettricità è soggetta alle stesse leggi di quella della gravitazione, ed è quindi secondo i quadrati delle distanze; poiché è facilmente dimostrabile che se la Terra avesse la forma di un guscio, un corpo nel suo interno non sarebbe attratto da una parte più che dall'altra?



- Tra i lettori dell'opera di Aepinus c'era la singolare figura di un contemporaneo di Priestley, Henry Cavendish che seguendo la linea tracciata dal *Tentamen* contribuì ad una radicale ristrutturazione dell'ambito delle ricerche elettriche che pareva destinato ad estendersi senza che emergessero tuttavia grandi regolarità
- Nel 1771 Cavendish presentò alla Royal Society la monografia dal titolo *An attempt to explain some of the principal phenomena of Electricity, by means of an Elastic fluid*
- L'ipotesi adottata da Cavendish era quella del fluido unico, più o meno nella stessa forma di quella di Aepinus che formulò indipendentemente da questo, sebbene successivamente



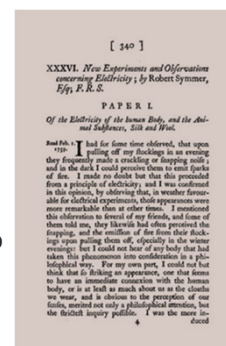
- In questa memoria Cavendish non fa alcuna ipotesi sulla legge della forza tra cariche elettriche, tranne che agisce *inversamente come una potenza della distanza inferiore a quella del cubo* ma evidentemente tende a credere nella legge del inverso del quadrato della distanza.
- In effetti, mostra che è
 - *probabile, che se l'attrazione o repulsione elettrica è inversamente [proporzionale] al quadrato della distanza, quasi tutto il fluido ridondante nel corpo sarà depositato vicino alla superficie, e lì pressato strettamente insieme, e il resto del corpo sarà saturo;*
- risultato che si avvicina molto alla scoperta fatta quattro anni prima da Priestley.



- Cavendish, infatti, scoprì poco dopo la legge dell'inverso del quadrato; ma, indifferente alla fama, trascurò di comunicare ad altri questa come molti altri risultati importanti.
- Il valore delle sue ricerche non si apprezzò fino alla metà del XIX secolo, quando William Thomson (Lord Kelvin) trovò nei manoscritti di Cavendish la soluzione di alcuni notevoli problemi di elettrostatica. Thomson ne esortò la pubblicazione che avvenne nel 1879 a cura di James Clerk Maxwell
- Si è poi visto che Cavendish aveva anticipato i suoi successori in molte valutazioni, tra le quali, quelle sulla resistenza, sulla capacità e sulla costante dielettrica relativa.



- Un modello alternativo a quello del fluido unico di Franklin, Aepinus e Cavendish fu proposto nel 1759 dal fisico inglese Robert Symmer attraverso il breve trattato *New Experiments and Observations concerning Electricity*:
 - *La mia idea è che le operazioni dell'elettricità non dipendano da un unico potere positivo, secondo l'opinione generalmente ricevuta; ma da due poteri distinti, positivo e attivo, che, per contrasto, e, come era, contrastandosi, i vari fenomeni di elettricità; e che, quando si dice che un corpo è elettrizzato positivamente, non è semplicemente che esso possiede una quota di materia elettrica maggiore che in uno stato naturale; né, quando si dice elettrizzato negativamente, di una minore; ma che, nel primo caso, possiede una porzione maggiore di una di queste potenze attive, e nel secondo, una porzione maggiore dell'altra; mentre un il corpo nel suo stato naturale rimane non elettrizzato, da un uguale equilibrio di quei due poteri al suo interno.*
- La proposta di Symmer fu raccolta freddamente nel suo paese ma ebbe maggiore attenzione all'estero
- Gli stessi Nollet, Aepinus e Wilcke, sebbene avessero proposto teorie dissimili, sostennero la teoria dei due fluidi di Symmer, sebbene fosse di fatto una riproposizione di quella di du Fay dell'elettricità *vitrea* e *resinosa*



Magnetismo

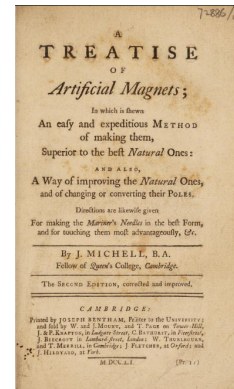
- Mentre la teoria dell'elettricità cominciava a consolidarsi nel XVIII secolo, uno sviluppo non meno notevole stava avvenendo nella scienza affine del magnetismo
- La legge di attrazione tra i magneti fu oggetto di studio in una data precedente rispetto alla legge corrispondente per i corpi elettricamente carichi. Nei *Principia* Newton affermava:
 - *Il potere di gravità è di natura diversa dal potere del magnetismo, perché l'attrazione magnetica non è come la materia attratta. Alcuni corpi sono attratti di più dal magnete, altri meno; la maggior parte dei corpi non lo è affatto. Il potere del magnetismo, in uno stesso corpo, può essere aumentato e diminuito; ed è talvolta molto più forte, per la quantità di materia, della forza di gravità; e allontanandosi dal magnete, diminuisce non nel duplicato, ma quasi nella proporzione triplicata della distanza, per quanto ho potuto valutare attraverso alcune rozze osservazioni*
- L'edizione dei *Principia* pubblicata nel 1742 contiene una nota su questo corollario, in cui si ottiene il corretto risultato che la coppia esercitata su un magnete da un altro è proporzionale al cubo inverso della distanza



- Lo scopritore della legge della forza tra i poli magnetici fu John Michell che nel 1750 pubblicò *Treatise of Artificial Magnets* in cui viene mostrato un metodo per costruire dei magneti artificiali.
- Michell scoprì che strofinando delle strisce di acciaio contro dei magneti naturali poteva creare magneti permanenti più forti dei magneti originali. Inoltre i magneti prodotti in questo modo erano molto più economici dei magneti presenti in natura.
- Ripercorrendo le orme di Gilbert, nel *Treatise* Michell ristabilisce i principi della teoria del magnetismo:
 - *Ovunque si trovi del magnetismo, sia nel magnete stesso, sia in qualsiasi pezzo di ferro, ecc., eccitato dal magnete, si trovano sempre due poli, che sono generalmente chiamati nord e sud; e il polo nord di un magnete sempre attrae il polo sud e respinge il polo nord di un altro, e viceversa.*



- Poi continua formalizzando la forza di attrazione:
 - *Ogni polo attrae o respinge esattamente allo stesso modo, a distanze uguali, in ogni direzione. L'attrazione magnetica e la repulsione sono esattamente uguali tra loro.*
- Questo, per quanto ovvio possa apparire, costituisce un progresso importantissimo, poiché, come osserva,
 - *La maggior parte delle persone, che hanno menzionato qualsiasi cosa relativa a questa proprietà del magnete, hanno convenuto, non solo che l'attrazione e repulsione dei magneti non sono uguali tra loro, ma anche che non osservano la stessa regola di aumento e diminuzione. L'attrazione e la repulsione dei magneti diminuisce, man mano che aumentano i quadrati delle distanze dai rispettivi poli.*
- Questa notevole scoperta, che è alla base della teoria matematica del magnetismo, fu dedotta in parte dalle sue stesse osservazioni, e in parte da quelle di ricercatori precedenti, quali, ad esempio, Brook Taylor e Musschenbroek, che, come Michell osserva, avevano svolto esperimenti accurati, sebbene non corroborati da una corretta valutazione teorica

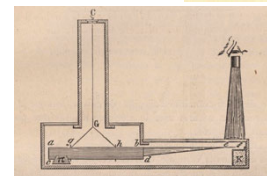
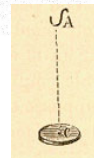
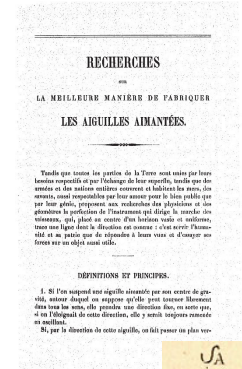


Coulomb

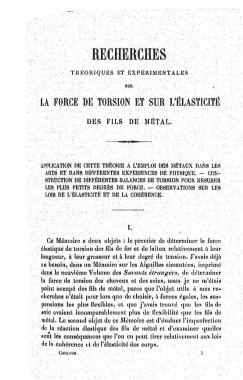
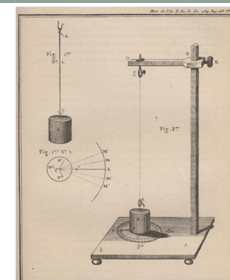
- Il fisico ed ingegnere Charles-Augustin Coulomb trasformò la fenomenologia elettrica e magnetica della seconda metà del XVIII, ponendo le basi per indagini sempre più accurate
- I suoi studi sulla torsione di fili sottili lo portarono allo sviluppo di un dispositivo sensibile e preciso per la misura dell'interazione tra cariche elettriche e tra corpi magnetizzati, riuscendo a stabilire che la forma di questa interazione è analoga a quella newtoniana per l'interazione gravitazionale
- L'accettazione delle leggi coulombiane ebbe però quale contropartita l'affermazione di una autonomia tra i fenomeni elettrici e quelli magnetici che costituì di fatto un ostacolo nello sviluppo dell'elettrodinamica



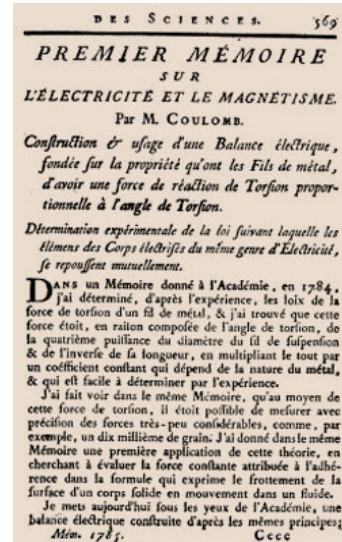
- Nel 1777 Coulomb pubblicò la memoria *Recherches sur la meilleure Manière de fabriquer les Aiguilles Aimantées* che di fatto raccoglie i principali argomenti dei suoi studi fisici: lo studio quantitativo del magnetismo, la torsione e l'equilibrio di torsione, l'attrito e la resistenza ai fluidi
 - Questa prima pubblicazione in particolare tratta del modo migliore per costruire una bussola magnetica. L'articolo contiene il progetto di una bussola di declinazione a sospensione e la dimostrazione che le forze di torsione sono proporzionali all'angolo di torsione.
- La memoria viene premiata dall'*Académie de Paris* per la sua soluzione semplice ed elegante al problema della torsione nei cilindri e il suo uso dell'equilibrio di torsione nelle applicazioni fisiche. In particolare, Coulomb sviluppò la teoria della torsione nei fili di seta e nei capelli sottili, mettendo in luce come la sospensione di torsione possa fornire un metodo per misurare con precisione forze estremamente piccole.
- Alla fine della memoria Coulomb prende una netta posizione sulle teorie del magnetismo, affermando:
 - *Sembra quindi che non siano i vortici a produrre i diversi fenomeni magnetici, e che, per spiegarli, occorra ricorrere a forze attrattive e repulsive della natura di quelle che siamo obbligati ad usare per spiegare la gravità di corpi e fisica celeste*



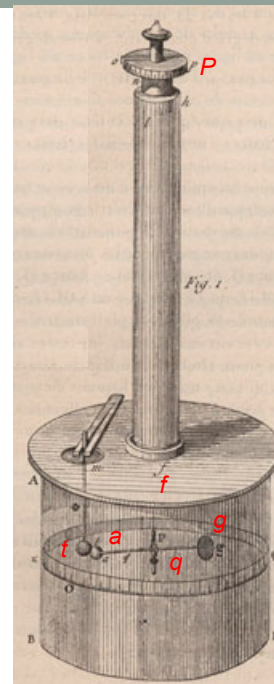
- Nel 1784 Coulomb presenta un secondo lavoro intitolato *Recherches théoriques et expérimentales sur la force de torsion et l'élasticité des fils de métal* in cui la teoria elaborata nella precedente memoria era applicata alla costruzione di bilance a torsione adatte a *misurare i più piccoli gradi della forza*
- Nella prima delle due parti in cui era divisa la memoria si trattava uno studio delle forze di torsione mentre nella seconda era analizzata l'elasticità dei metalli e in generale dei corpi solidi.
- Tra le due parti Coulomb informava che:
 - *Da quando ho presentato questa Memoria, ho costruito, secondo la teoria della reazione alla torsione che ho appena spiegato, una bilancia elettrica e una bilancia magnetica; ma questi due strumenti, come pure i risultati relativi alle leggi elettriche e magnetiche che fornirono, saranno descritti nei seguenti Volumi delle nostre Memorie; credo che qui basti annunziarli*



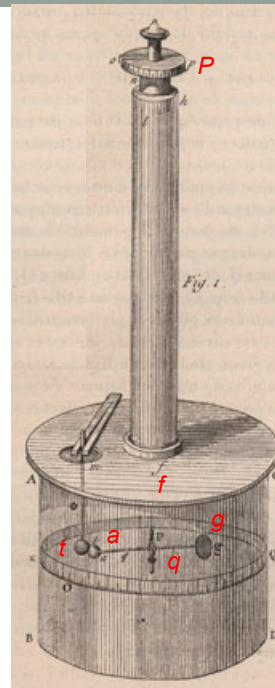
- Il tema annunciato da Coulomb è oggetto di una specifica memoria del 1785 dal titolo *Premier mémoire sur l'électricité et le magnétisme* dedicata all'applicazione della teoria dei fili sottili alla sperimentazione in ambito elettrico e magnetico esponendo sia gli strumenti sviluppati che i risultati delle misure
- Da tale sperimentazione Coulomb dopo aver riconosciuto il valore fondamentale della legge secondo cui gli elementi di corpi elettrizzati dello stesso genere di elettricità si respingono reciprocamente deduce che
 - La forza repulsiva fra due sferette elettrizzate dello stesso genere di elettricità è in ragione inversa al quadrato della distanza tra le due sferette



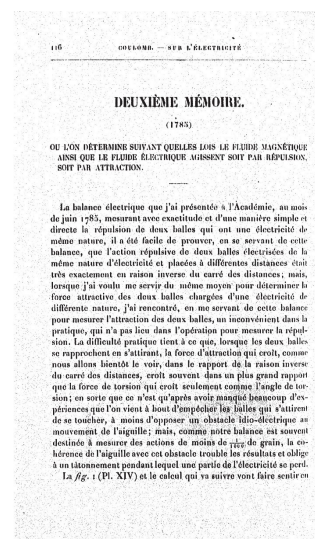
- La bilancia descritta da Coulomb nella Memoria è costituita da un equipaggio sospeso ad un filo sottile f e costituito da una leggera sbarretta isolante q ad una delle cui estremità è collocata una sferetta di sughero a mentre all'altra è situato un contrappeso g
- In assenza di forze, la sbarretta si dispone in una certa posizione di equilibrio
- Se sferetta a viene posta a contatto con un'altra sferetta di sughero t elettricamente carica ne trasferisce parte della carica e la forza elettrica agente sulla sferetta mobile a determina la rotazione della sbarretta fino a quando la torsione del filo equilibra la forza agente.



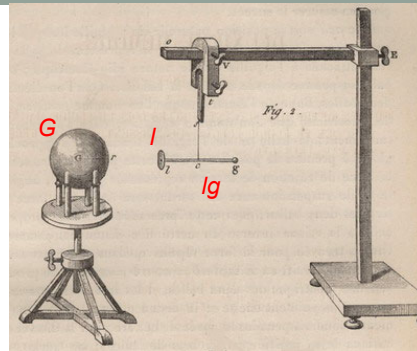
- Siccome il filo è sottile, l'azione di una debole forza sulla sferetta mobile è in grado di determinare una notevole deviazione della sbarretta rispetto alla posizione di equilibrio originaria e, come provato da Coulomb nelle precedenti Memorie, l'angolo di rotazione risulterà proporzionale a tale forza.
- A questo punto si agisce sul micrometro **P** costringendo la sferetta **a** a riavvicinarsi alla sferetta **t**. Si può quindi misurare la forza necessaria per il riavvicinamento in quanto è proporzionale all'angolo di torsione leggibile mediante il micrometro
- Poche misure furono sufficienti per stabilire la forma della legge fondamentale



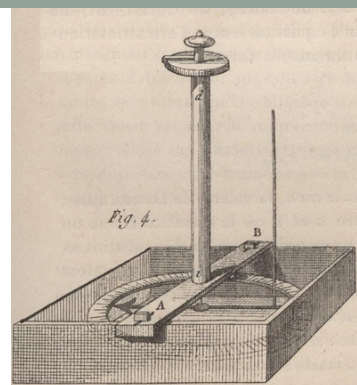
- La misura di forze attrattive, cioè quando le sferette portano cariche si segno opposto non può essere effettuata con la medesima bilancia poiché al diminuire della reciproca distanza cresce l'intensità della forza portando le sferette ad entrare in contatto
- La soluzione fu trovata nel 1785 e descritta in nella seconda memoria *Où l'on détermine suivant quelles lois le fluide magnétique ainsi que le fluide électrique agissent soit par répulsion, soit par attraction* e richiede l'uso di un diverso apparato



- Una sfera di rame **G** era disposta in modo che il suo centro fosse nello stesso piano della sbarretta **lg** sospesa al centro con un filo di seta
- La sfera isolata veniva caricata d'una *elettricità detta elettricità positiva* mentre la placchetta **I** costituita da un disco di carta dorata era caricata di segno opposto
- Una volta fissata la distanza tra la sfera e la placchetta, se si ruotava la sbarretta **lg** questa compiva delle oscillazioni per tornare all'equilibrio
- Quindi si misurava il tempo necessario a compiere un certo numero di oscillazioni
- Se la forza agente tra la sfera e la placchetta è inversamente proporzionale sia al quadrato del tempo d'oscillazione che al quadrato della distanza, allora deve potersi osservare una proporzionalità tra il tempo e la distanza
- Con buona approssimazione i risultati ottenuti da Coulomb erano conformi alla previsione, portandolo a concludere che la legge fondamentale dell'elettricità coinvolgeva una forza del tipo $1/r^2$ sia nel caso delle repulsioni che delle attrazioni



- Successivamente Coulomb affrontò il problema della legge secondo cui agisce il fluido magnetico
- A tal fine, non potendo separare i poli di un magnete, Coulomb ritenne opportuno adoperare dei corpi sottili e relativamente lunghi in modo che avessero polarità magnetiche il più possibile puntiformi e tra loro separate
- Il risultato della sperimentazione era di nuovo positivo sebbene era esposto da Coulomb in una forma da implicare una correlazione non direttamente riconducibile ai dati empirici, infatti Coulomb affermava
 - *Il fluido magnetico agisce per attrazione o per repulsione secondo il rapporto tra la densità del fluido e il quadrato della distanza delle sue molecole*
- Ritenendo per altro che *la prima parte di questa proposizione non ha alcun bisogno d'essere provata*
- In realtà i ragionamenti sui dati empirici autorizzavano solo l'enunciato di leggi del tipo $1/r^2$ per cui probabilmente Coulomb si lasciò influenzare da analogie qualitative tra masse gravitazionali e densità dei fluidi e da interpretazioni di dati sperimentali connessi a misure sulla perdita di elettricità da parte di corpi isolati

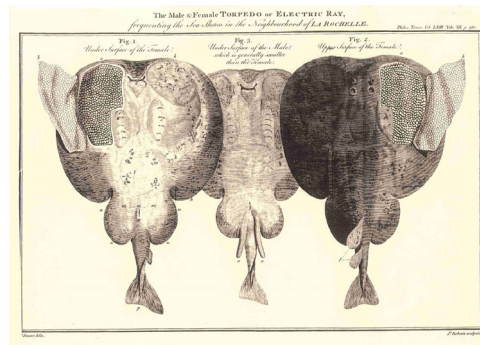


- Come è facile dedurre dalle descrizioni dei suoi esperimenti Coulomb non accettò la teoria del fluido unico ma preferì l'ipotesi dei due fluidi avanzata da Simmer, infatti nella sesta memoria del 1788 *Suite des recherches sur la distribution du fluide électrique entre plusieurs conducteurs. Détermination de la densité électrique dans les différents points de la surface de ces corps* scrive
 - *Qualunque sia la causa dell'elettricità, possiamo spiegare tutti i fenomeni supponendo che ci siano due fluidi elettrici, le parti dello stesso fluido che si respingono secondo il quadrato inverso della distanza, e attraendo le parti dell'altro fluido secondo la stessa legge del quadrato inverso.*
- Infine, nella sua quarta memoria del 1786 Coulomb mostrò che l'elettricità in equilibrio è confinata alla superficie dei conduttori e non penetra nella loro sostanza interna e nella sesta memoria stabilisce il risultato che la forza elettrica vicino a un conduttore è proporzionale alla densità superficiale dell'elettricità

- La ristrutturazione della base empirica dell'elettricità e del magnetismo compiuta da Coulomb segnò una netta demarcazione tra queste due scienze. Attraverso le leggi di Coulomb la fenomenologia nota poteva finalmente essere ordinata secondo schemi teorici di carattere generale. Guidati da tali schemi si potevano aprire nuovi campi di indagine
- Tuttavia le leggi di Coulomb non vennero immediatamente accettate soprattutto perché era estremamente difficile riprodurre i suoi esperimenti per l'estrema delicatezza delle misure
- Inoltre si osservava che al variare delle geometrie o per distanze piccole cambiavano i risultati ed emergevano altre forme di interazione che si discostavano dalla legge $1/r^2$. Infatti solo sessanta anni dopo William Thomson dimostrò che tali scostamenti erano da ricondurre al fatto che i corpi carichi coinvolti nelle misure non possono considerarsi puntiformi
- Nondimeno la trattazione coulombiana portava all'auspicata semplificazione della materia elettrica e magnetica di cui trassero profitto i ricercatori che seguirono

Dall'elettricità animale alla pila

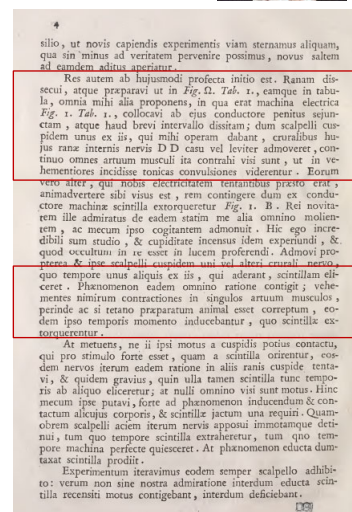
- Il fenomeno dell'elettricità animale era ben noto nel XVIII secolo e, come molti altri, sfuggiva ad una soddisfacente interpretazione
- Le scariche di pesci elettrici, quale ad esempio la torpedine, avevano stimolato l'interesse di Willem s'Gravesande, Musschenbroek e successivamente anche di Cavendish e portavano a pensare che tali fenomeni non fossero limitati a questi casi particolari ma si estendessero a tutto il regno animale, compreso l'uomo



- Pertanto, lo studio illustrato nel 1791 nella memoria *De viribus electricitatis in motu musculari. Commentarius* dal professore di anatomia ed ostetricia presso l'Università di Bologna, Luigi Galvani, suscitò rapidamente un grande interesse tra i ricercatori
- I fenomeni descritti da Galvani erano di difficile interpretazione ed erano così descritti:

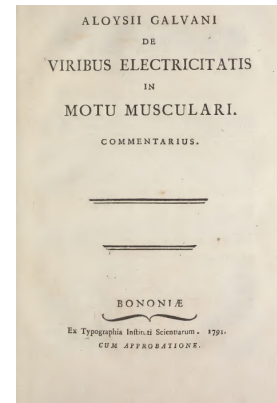


- [...] dissecai una rana, la preparai [...] e la collocai sopra una tavola sulla quale c'era una macchina elettrica, dal cui conduttore era completamente separata e collocata a non breve distanza; mentre uno dei miei assistenti toccava per caso leggermente con la punta di uno scalpello gli interni nervi [...] crurali di questa rana, a un tratto furono visti contrarsi tutti i muscoli degli arti come se fossero stati presi dalle più veementi convulsioni tossiche.
- A un altro dei miei assistenti che mi era più vicino, mentre stavo tentando altre nuove esperienze elettriche, parve di avvertire che il fenomeno succedesse proprio quando si faceva scoccare una scintilla dal conduttore della macchina.

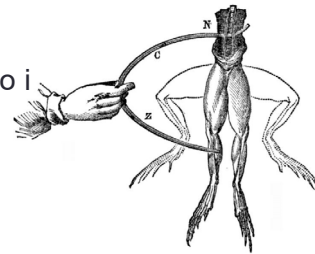


- Galvani osservò inoltre, sebbene con scarsa attenzione, che le contrazioni comparivano anche se muscoli e nervi della rana erano messi a contatto con una struttura metallica costituita da metalli diversi:

Così, per esempio, se l'arco fosse stato di ferro e di ferro l'uncino, molto spesso le contrazioni mancavano o erano eccezionalmente esigue. Se invece uno di essi fosse stato, per esempio, di ferro e l'altro di rame o, molto meglio, d'argento (l'argento infatti ci apparve più idoneo tra gli altri metalli a trasportare l'energia animale) si producevano contrazioni assai più evidenti e assai più a lungo



- Da tali esperienze Galvani concluse che all'interno della struttura biologica dovesse esistere una sorta di elettricità animale in grado di fluire dai nervi ai muscoli attraverso i conduttori metallici
- Quindi, secondo Galvani, i conduttori svolgevano il ruolo passivo limitandosi a consentire il passaggio di tale elettricità

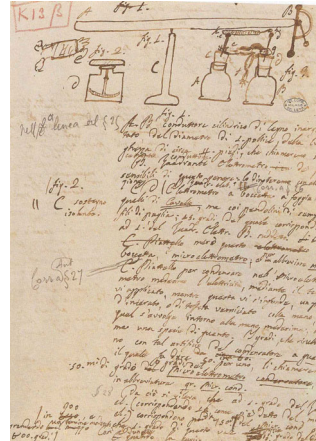


- La pubblicazione degli esperimenti di Galvani attirò l'attenzione del mondo accademico e diede origine a un'animata controversia tra coloro che sostenevano il punto di vista di Galvani, coloro che credevano che il galvanismo descrivesse un fluido distinto dall'elettricità ordinaria e una terza scuola che si rifiutava del tutto di attribuire gli effetti a un presunto fluido contenuto nel sistema nervoso.



- Tra questi ultimi, Alessandro Volta, un professore di filosofia naturale presso l'Università di Pavia, nel 1792 avanzò l'opinione che lo stimolo, nell'esperimento di Galvani, fosse provocato dalla connessione di due metalli diversi attraverso un corpo umido.
 - Quello [...] di cui non ho potuto ancora trovare una ragione, che mi soddisfi neppur mezzanamente, si è la necessità delle armature dissimili, mi nasce il dubbio, se veramente i conduttori metallici, diversi, o applicati in differente maniera in due luoghi dell'animale altro non facciano dal conto loro, allorché si viene a stabilire tra essi una comunicazione, che prestar la via al fluido elettrico che naturalmente tende a trasportarsi dall'uno all'altro luogo, come pare si debba credere; se in una parola siano meramente passivi, o non anzi agenti positivi che muovono cioè di loro posta il fluido elettrico dell'animale, e da quieto ed equilibrato che era, lo determinano, rompendo essi tale equilibrio, a entrare quindi in un'armatura di tal foggia, e a sortire per l'altra di tal altra foggia*
- Volta dapprima propendeva a combinare questa teoria dello stimolo metallico col l'ipotesi dell'esistenza del fluido supposto da Galvani, tuttavia dopo la fine del 1793 negò completamente l'esistenza dell'elettricità animale.

- Nel maggio del 1793 Volta pubblicò le sue conclusioni:
 - Le convulsioni della rana non sono dovute al flusso dell'ipotetica elettricità animale, quanto ad una causa fisica riconducibile ai metalli diversi posti a contatto attraverso le strutture biologiche e gli effetti osservati sono conseguenza di un nuovo fenomeno fisico, cioè che i metalli non agiscono solo quali buoni conduttore del fenomeno elettrico quanto da *motori dell'elettricità* stessa
- il fluido elettrico stimola anche gli organi di senso, rammentando che, costruendo un arco con due diversi metalli, appoggiati
 - l'uno alla punta della lingua, l'altro ad altre parti della medesima
- si percepisce un sapore
 - acidetto o alcalino tirante all'amaro



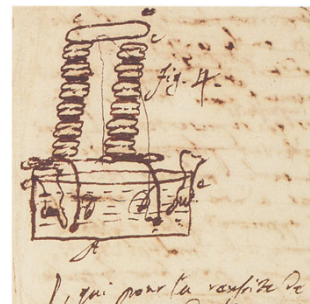
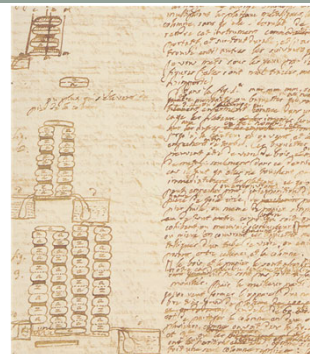
- In effetti già nel 1752, in un'opera intitolata *Recherches sur l'origine des sentiments agréables et désagréables*, Johann Georg Sulzer aveva affermato che, se due pezzi di metallo, quello di piombo e l'altro d'argento, si uniscano insieme in modo tale che i loro bordi si tocchino, e se sono poste sulla lingua, si percepisce un sapore
 - simile a quello del vetriolo di ferro
- sebbene nessuno di questi metalli applicati separatamente dia alcun traccia di un tale sapore.
- Pertanto Sulzer propose:
 - [...] è probabile che questo contatto dei due metalli provochi una soluzione dell'uno o dell'altro, liberando particelle che potrebbero intaccare la lingua; e quindi dobbiamo concludere che il contatto crea una vibrazione nelle loro particelle, che, toccando i nervi della lingua, produce il gusto in questione
- Non si sospettava che questa osservazione avesse alcun legame con i fenomeni elettrici, e si ritiene non ebbe alcun ruolo nelle ipotesi fatte successivamente da Volta





- Volta aveva cominciato a fare esperimenti nel campo dell'elettricità sin da giovane, lesse i libri che riuscì a trovare sull'argomento e intraprese presto una fitta corrispondenza con gli studiosi del suo tempo, come l'abate Nollet e Beccaria il quale, in particolare, lo stimolò a privilegiare l'aspetto della sperimentazione.
- Col passare del tempo Volta approfondì la conoscenza dell'elettricità statica e cominciò a costruire strumenti originali, in particolare Volta realizzò l'*elettroscopio a condensatore*, il primo strumento in grado di misurare piccole differenze di potenziale in modo riproducibile
- Inoltre Volta aveva colto a pieno il concetto di carica Q , quello di differenza di potenziale V e della capacità elettrica C , giungendo alla relazione di proporzionalità $Q = CV$

- Adoperando l'elettroscopio a condensatore, Volta misurò le differenze di potenziale tra metalli diversi posti a contatto ordinando i metalli in relazione all'intensità degli effetti elettrici che producevano
- Quindi comprese che la tensione agli estremi di una catena di conduttori diversi alternati era la stessa che si otteneva collegando i conduttori più estremi della catena
- Invece si conseguiva un aumento della tensione se un disco di panno imbevuto di acqua acidulata veniva disposto tra i conduttori diversi della catena così costituita



- Il 20 marzo del 1800 Volta comunicò la sua invenzione in una lettera indirizzata al presidente della Royal Society, Sir Joseph Banks che comincia:

Dopo un lungo silenzio di cui non cercherò di scusarmi, ho il piacere di comunicarvi, Signore, e, per mezzo vostro, di comunicare alla Società reale alcuni stupendi risultati ai quali sono arrivato.

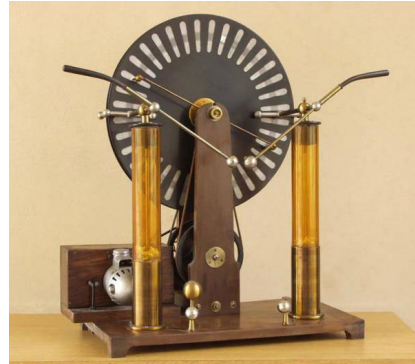
- Il principale di questi risultati, e che comprende press'a poco tutti gli altri, è la costruzione di un apparecchio che per effetti, cioè per la commozione che è capace di far sentire nelle braccia ecc. rassomiglia alla bottiglia di Leida e meglio ancora alle batterie elettriche debolmente caricate, che agiscono però senza posa, ossia la cui carica, dopo ciascuna esplosione, si ristabilisce da se stessa, in una parola, che fruisce di una carica indefettibile, d'un'azione, o impulso perpetuo sul fluido elettrico



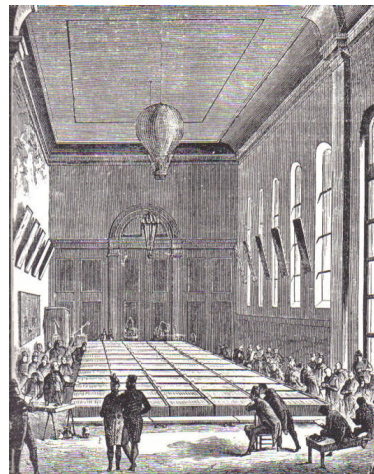
- L'inconciliabilità tra il punto di vista di Galvani e quello di Volta è riconducibile al fatto che i due studiosi si riferivano a fenomeni distinti:
 - La ricerca di Galvani era Fisiologica
 - La ricerca di Volta era Fisica
- Galvani morì nel 1798, ancora convinto che l'elettricità animale fosse diversa dall'elettricità ordinaria
- Tuttavia i suoi studi portarono a comprendere come le azioni dei nostri muscoli possono essere ricondotte a segnali elettrici e non, per esempio, alla volontà di qualche ente superiore. Inoltre condussero alla formazione di una nuova scienza che, considerando il ruolo dell'elettricità nei processi biologici, ha portato nuova luce sulla comprensione della fisiologia umana



- L'invenzione della pila e la conseguente disponibilità di intense correnti elettriche condussero ad una nuova dimensione lo studio dei fenomeni elettrici
- Le macchine elettrostatiche fornivano tensioni dell'ordine delle decine di migliaia di volt e l'energia che si liberava dipendeva dai condensatori collegati alle macchine, tuttavia le scariche si susseguivano solo agli intervalli di tempo necessari a ricaricare i condensatori e l'ordine di grandezza medio della potenza generata era dell'ordine del watt



- Con le pile introdotte da Volta la tensione dipendeva unicamente dal numero di unità adoperate, essendo di poco superiore ad un volt per unità
- In Europa i più grandi laboratori si dotarono di batterie costituite da molte unità, ad esempio a Parigi Napoleone fornì l'École Polytechnique con una batteria di 600 unità mentre in Inghilterra i laboratori della Royal Society disponevano di una batteria costituita da 3000 unità
- La differenza tra gli effetti osservati era tale che ci volle del tempo per comprendere che la natura dell'elettricità prodotta dalle macchine elettrostatiche e dalle batterie di pile fosse la medesima



- Il XVIII secolo si chiudeva con due importanti risultati per la scienza dell'elettricità:

- La scoperta delle leggi di forza coulombiane
- L'invenzione della pila elettrica

- Mentre Volta si recava a Parigi per illustrare davanti a Napoleone Bonaparte i pregi della sua invenzione, Pierre-Simon Laplace suggeriva l'applicazione al fenomeno elettrico dei risultati già conseguiti nell'ambito della meccanica razionale relativamente alla descrizione della forza di gravità



Matematizzazione dell'elettrostatica

- Attorno al 1777 Laplace aveva introdotto una funzione V delle coordinate spaziali attraverso la quale, per derivazione, era possibile dedurre le componenti della forza e che, inoltre, obbediva ad una condizione generale che ora prende il nome di *equazione di Laplace*, sebbene fosse già nota a Leonhard Euler, che l'aveva ottenuta nel 1752 in un lavoro nel quale descriveva il moto di un fluido incompressibile



- Nel *Traité de mécanique céleste*, pubblicato a partire dal 1803, Laplace, aveva inizialmente adoperato la funzione V nello studio della dinamica dell'anello di Saturno per poi comprenderne l'efficacia nella trattazione di numerosi problemi connessi ai moti planetari

Sil'on représente par ζ , la fonction $\{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2\}^{-\frac{1}{2}}$;
on aura $V = \int \zeta \cdot p \cdot dx' \cdot dy' \cdot dz'$,
L'intégration n'étant relative qu'aux variables x', y', z' , il est clair
que l'on aura
$$\left(\frac{ddV}{dx^2}\right) + \left(\frac{ddV}{dy^2}\right) + \left(\frac{ddV}{dz^2}\right) = \int p \cdot dx' \cdot dy' \cdot dz' \cdot \left\{ \left(\frac{dd\zeta}{dx^2}\right) + \left(\frac{dd\zeta}{dy^2}\right) + \left(\frac{dd\zeta}{dz^2}\right) \right\};$$

Mais
mais on a
$$0 = \left(\frac{dd\zeta}{dx^2}\right) + \left(\frac{dd\zeta}{dy^2}\right) + \left(\frac{dd\zeta}{dz^2}\right);$$

on aura donc pareillement
$$0 = \left(\frac{ddV}{dx^2}\right) + \left(\frac{ddV}{dy^2}\right) + \left(\frac{ddV}{dz^2}\right); \quad (\mathcal{A})$$

- Nel 1782, nella *Théorie des attractions des sphéroïdes et de la figure des planètes*, studiando l'attrazione su un punto materiale esercitata da uno sferoide col centro situato nell'origine di un sistema di riferimento cartesiano, Laplace aveva mostrato come la derivata cambiata di segno di V calcolata rispetto ad una direzione, fornisse la componente della forza attrattiva esercitata dallo sferoide sul punto materiale in quella direzione

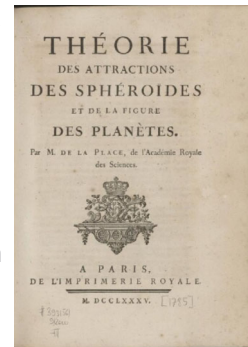
- Le componenti della forza sono rappresentate dalle relazioni

$$F_x = -\frac{dV}{dx}; \quad F_y = -\frac{dV}{dy}; \quad F_z = -\frac{dV}{dz}$$

- Due anni dopo, nel 1784 presentò la *Théorie de l'Anneau de Saturne* in cui la funzione V è espressa in coordinate cartesiane nell'equazione:

$$\frac{d^2V}{dx^2} + \frac{d^2V}{dy^2} + \frac{d^2V}{dz^2} = 0$$

- In cui lo 0 al secondo membro indica che ogni elemento di volume nello spazio considerato è privo di materia



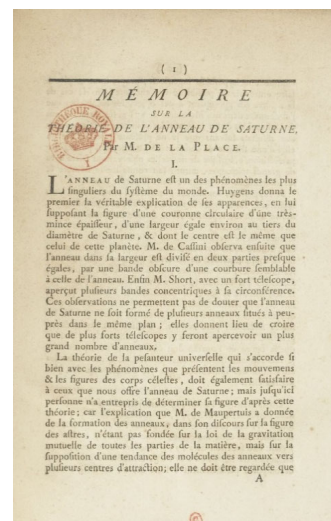
- Nella stessa memoria V è espresso come il rapporto tra la massa M dello sferoide e la distanza r del suo centro dal punto materiale, cioè

$$V = \frac{M}{r}$$

- Immaginando di dividere M in piccoli elementi $dm_1, dm_2, dm_3, \dots$, se questi elementi distano $r_1, r_2, r_3, \dots$ dal punto considerato, il potenziale in tale punto è dato dalla relazione

$$\sum_i \frac{dm_i}{r_i} \approx \int \frac{dm}{r}$$

- Tale espressione si ottiene a partire dalla relazione che esprime la forza agente sul punto materiale attraverso la funzione V e dimostra come tale funzione dipenda inversamente dalla distanza



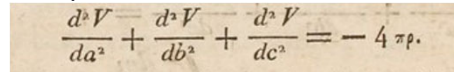
- L'analogia formale delle leggi di Coulomb con la legge della gravitazione permise di adattare alle quantità elettriche e magnetiche i modelli matematici già ampiamente collaudati sui corpi materiali
- Le componenti che rendevano efficace l'analogia erano le *cariche magnetiche* e le *masse magnetiche* che nella teoria formulata da Coulomb diventano quantità materiali definibili sperimentalmente attraverso numeri
- Malgrado le evidenti difformità tra i fenomeni elettrici e magnetici, questi argomenti posero la questione dell'omologazione di tutte le forze naturali alle leggi della meccanica che veniva di conseguenza riguardata quale supporto a tutta la Fisica

- Siméon-Denis Poisson si propose di determinare le leggi dei fenomeni elettrici e magnetici attraverso l'approccio indicato da Laplace
- Il punto di forza della descrizione di Laplace era rappresentato dalla funzione V successivamente definita *funzione potenziale* da Georg Green nel 1828 e poi semplicemente *potenziale* da Johann Friedrich Carl Gauss nel 1838 e di cui Thomson espresse una definizione:
 - *Il potenziale elettrico in un punto è il lavoro che dovrebbero compiere le forze elettriche sull'unità di carica positiva [...] per trasportarla da quel punto a distanza infinita [...] ovvero per portarla dall'infinito in cui il potenziale è zero, fino a quel punto*
- Senza l'impiego di tale concetto la matematizzazione dei fenomeni elettrostatici e magnetostatici avrebbe incontrato notevoli difficoltà



- Nel 1813 Poisson generalizzò l'equazione di Laplace in modo che potesse descrivere anche il potenziale in punti in cui è presente una distribuzione di massa di densità ρ :

$$\frac{d^2 V}{dx^2} + \frac{d^2 V}{dy^2} + \frac{d^2 V}{dz^2} = -4\pi\rho$$



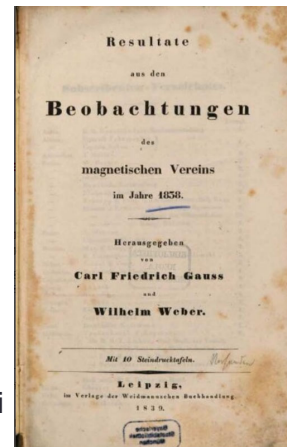
- Quindi introdusse il potenziale elettrostatico in analogia a quello gravitazionale come

$$V = \frac{Q}{r}$$

- In cui la massa M è sostituita dalla carica elettrica Q , intuendo che la funzione V poteva essere definita in tutto lo spazio in cui non sono significative le sole forze gravitazionali ma anche quelle elettriche e magnetiche.
- Nell'equazione di Laplace modificata, Poisson riconduce la densità di massa alla densità delle cariche elettriche o magnetiche e seguendo tale approccio risolve dei problemi con geometrie relativamente semplici, quali sfere o ellissoidi, nel presupposto che i risultati conseguiti si sarebbero agevolmente potuti estendere a conduttori di forma generica

- Seguendo tale approccio Poisson in due pubblicazioni dal titolo *Mémoire sur la distribution de l'électricité à la surface des corps conducteurs* (1-2), riportò i risultati seguenti, qui descritti usando la nomenclatura moderna:
 - Il potenziale elettrostatico all'interno di ellissoidi e sfere conduttrici in equilibrio elettrico risulta ovunque costante. Di conseguenza fra due punti interni qualsiasi di tali corpi è nulla la differenza di potenziale. Ciò comporta che all'interno di un conduttore in equilibrio non agisce alcuna forza ed è solo possibile la distribuzione superficiale delle cariche elettriche
 - L'intensità del campo elettrico E in un punto dello spazio prossimo ad un elemento di superficie dS della superficie di un conduttore elettrizzato con densità superficiale $\sigma = dq/dS$ è proporzionale alla densità σ . Cioè in termini moderni $E = \sigma/\epsilon_0$. Tale risultato era già stato verificato sperimentalmente da Coulomb nel 1786 ed ora è detto *Teorema di Coulomb*.
 - La pressione elettrostatica a cui è soggetta una carica superficiale σdS di un conduttore elettrizzato da parte delle altre cariche del conduttore è diretta contro l'aria circostante ed è proporzionale al quadrato della densità σ accumulata di ciascun punto della superficie, ovvero $p = \sigma^2 / 2\epsilon_0$.
- Nelle memorie, Poisson osservò come l'aumento della pressione elettrica in corrispondenza di una estremità appuntita del corpo è in grado di superare la resistenza offerta dall'aria ed in tal caso *il fluido esce* [dal corpo] *come da una apertura*, spiegando così il potere delle punte descritto da Hopkinson nel 1747

- Nel 1773 Laplace nella memoria *Sur l'attraction des sphéroïdes elliptiques* per primo formulò la legge del flusso che, sempre nel contesto dello studio delle attrazioni di sferoidi, fu successivamente presentata da Gauss nella memoria *Resultate aus den Beobachtungen des Magnetischen Vereins im Jahre 1839*
- La memoria di Gauss raccoglieva i risultati di vari studi relativi alle forze agenti secondo la legge dell'inverso del quadrato della distanza
 - *La natura ci presenta molti fenomeni spiegati col l'ipotesi di forze [...] agenti tra le particelle dei corpi in ragione inversa dei quadrati delle loro rispettive distanze, la prima ad essere manifestata è quella della gravitazione universale [...]. La stessa cosa è vera per la mutua azione di particelle di fluidi elettrici uno sull'altro, e di fluidi magnetici*
- Nella memoria, Gauss comprese il caso della gravitazione, della forza magnetica e di quella elettrica



- Nel primo paragrafo della memoria, dal titolo *Allgemeine Lehrsätze in Beziehung auf die im verkehrten Verhältnisse des Quadrats der Entfernung wirkenden Anziehungs- und Abstossungskräfte* sono enunciati due teoremi, il 22 e il 23 che descrivono una proprietà delle forze dipendenti dal quadrato della distanza che è riconducibile alla legge del flusso

LEHRSATZ. Ist ds das Element einer einen zusammenhängenden endlichen Raum begrenzenden Fläche, P die Kraft welche irgendwie vertheilte Massen in ds in der auf die Fläche normalen Richtung ausüben, wobei eine nach innen oder nach außen gerichtete Kraft als positiv betrachtet wird, je nachdem anziehende oder abstossende Massen als positiv gelten: so wird das Integral $\int P ds$ über die ganze Fläche ausgedehnt $= 4\pi M + 2\pi M'$, wenn M das Aggregat der im Innern des Raumes befindlichen, M' das der auf der Oberfläche nach der Stetigkeit vertheilten bedeuten.

Sind demnach im Innern des Raumes gar keine Massen enthalten, so ist, wenn jedenfalls unter $\frac{dV}{dp}$ der auf die Innenseite sich beziehende Werth verstanden wird, $\int \frac{dV}{dp} \cdot ds = 0$.

THEOREM.—If ds be the element of a surface bounding a coherent finite space, P the force which masses, distributed in any manner, exert at ds in a direction normal to the surface, a force directed towards the interior or towards the exterior being considered as positive, according as attracting or repelling forces are deemed positive; then the integral $\int P ds$, extended through the whole surface $= 4\pi M + 2\pi M'$, M denoting the aggregate of the masses in the interior, and M' that of those on the surface distributed continuously.

Consequently, if there are no masses in the internal space, then, if we understand in every case by $\frac{dV}{dp}$ the values belonging to the interior, $\int \frac{dV}{dp} ds = 0$.

- La legge non è espressa in termini di campo, che al tempo non era stato ancora introdotto, e fa uso della funzione potenziale V già usata da Laplace
- Nel teorema si considerano i contributi di distribuzioni di masse interne ad una superficie e disposte sulla superficie di un corpo.
- Il fatto che la forza agisca in proporzione inversa al quadrato della distanza è fondamentale per la dimostrazione dei due teoremi