

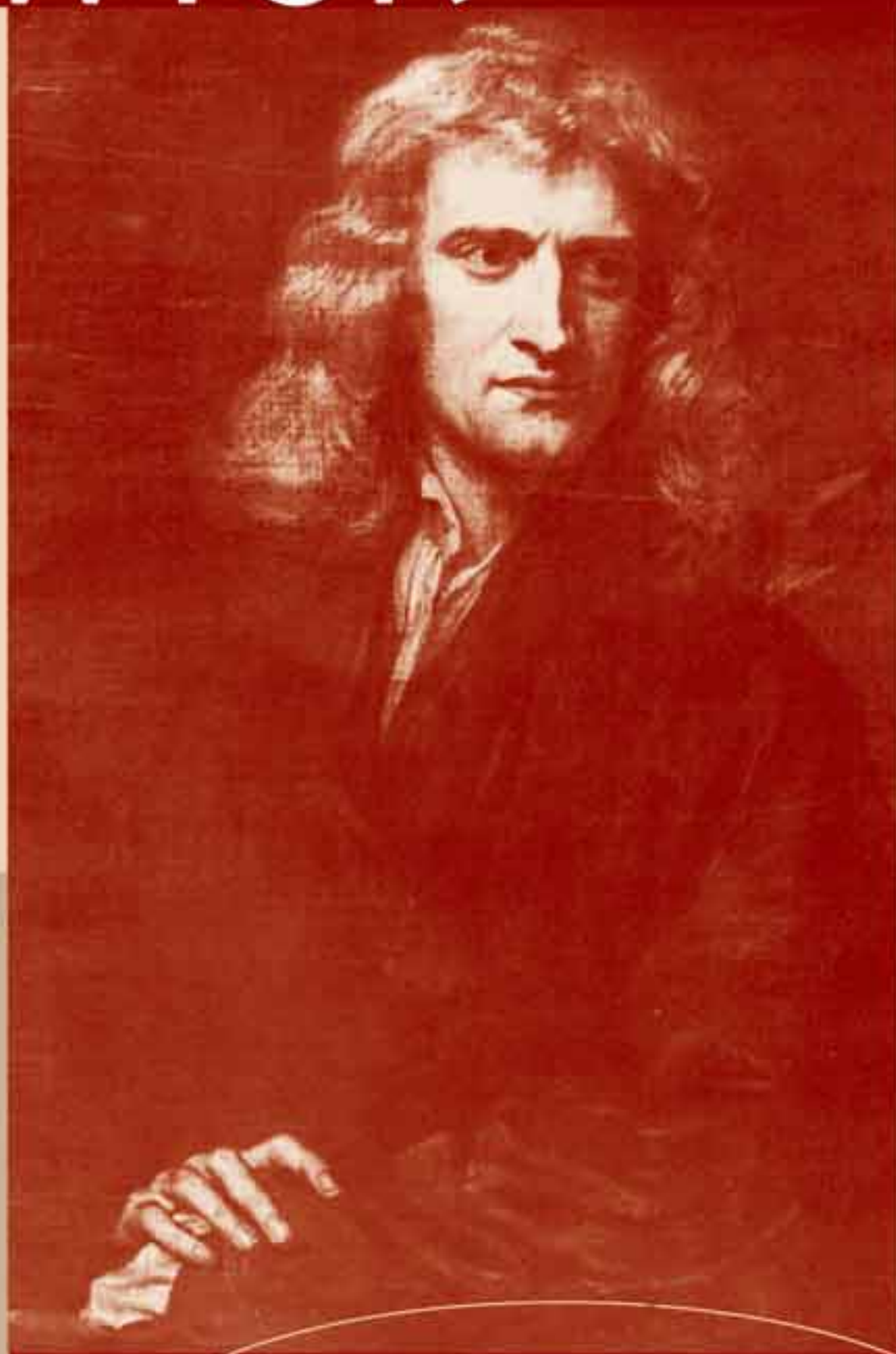
La dinamica di NEWTON

Copernico, Galileo, Keplero avevano avuto grandi intuizioni, rivoluzionando le fondamenta della visione aristotelica del mondo, ma ancora mancava un principio di unificazione, che in qualche modo, e su altre basi, riportasse l'armonia degli antichi. Galileo si era occupato della descrizione del moto, la **cinematica**, non considerando però le cause che lo provocano. È Isaac Newton che si preoccupa di queste cause, gettando le basi della **dinamica**. Durante l'autunno e l'inverno del 1684-1685 mette a punto la sua poderosa costruzione sulle **leggi del moto**. L'essenza della prima legge è il **Principio di Inerzia di Galileo**, in cui Newton aggiunge il concetto di forza: **Ogni corpo persevera nel proprio stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, eccetto che sia costretto a mutare quello stato da forze impresse.**

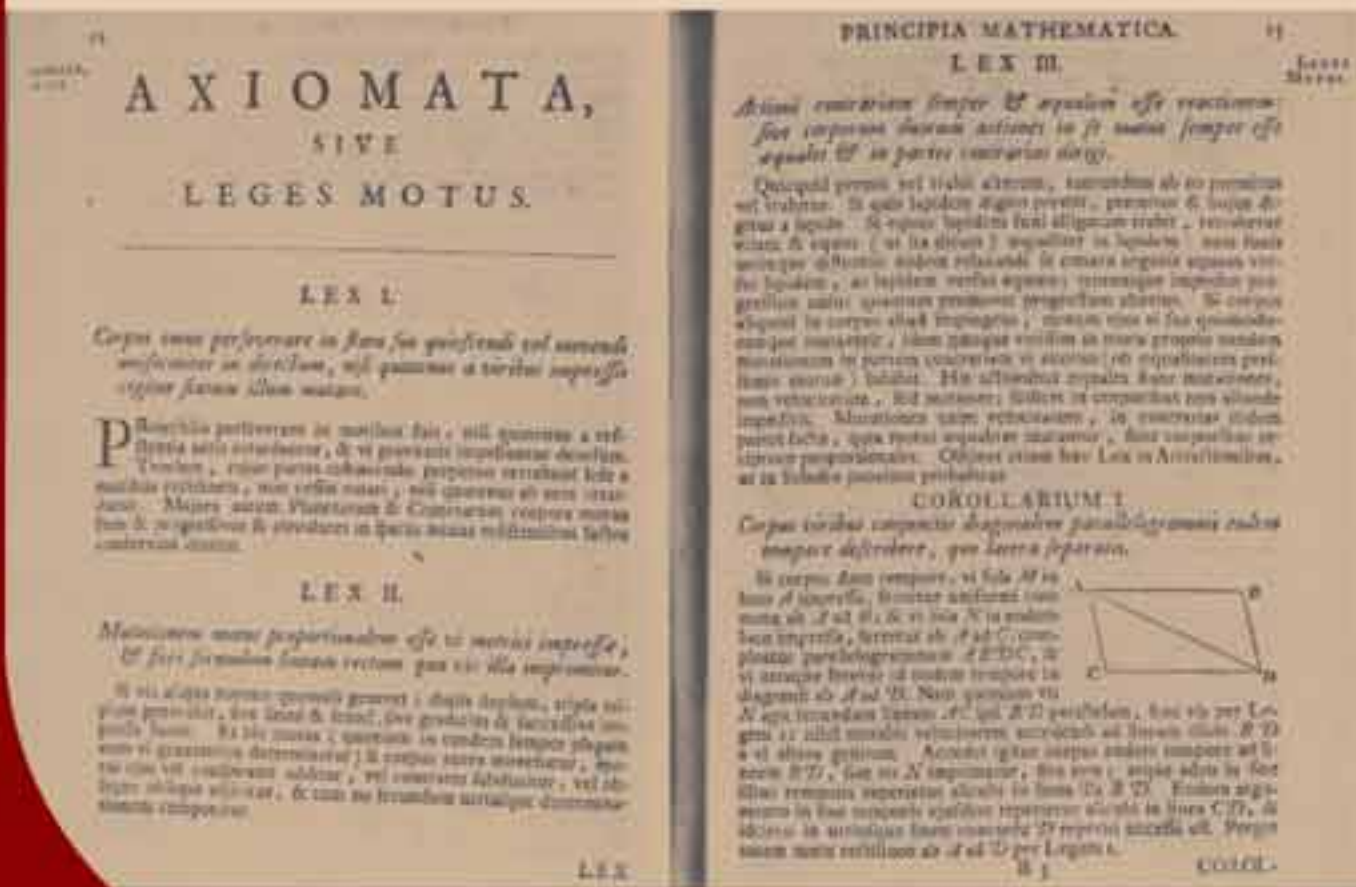
Come Galileo, Newton si rende conto che l'inerzia di un corpo è associata alla sua massa: quanto più grande è la massa di un corpo, tanto più difficile è variare lo stato di moto di esso.

E da qui nasce allora la seconda legge: **La variazione del moto di un corpo è direttamente proporzionale alla forza impressa e avviene lungo la linea retta secondo la quale la forza è impressa.** È importante sottolineare che moto per Newton significa qualcosa legato sia alla velocità sia alla massa di un corpo. Newton aggiunge un'altra legge, che riguarda l'interazione tra più corpi: **Le mutue azioni che due corpi esercitano l'uno sull'altro sono sempre uguali e hanno la stessa direzione ma versi opposti. È il cosiddetto Principio di azione e reazione.**

L'importanza di queste leggi è eccezionale: dovranno passare più di due secoli perché qualcuno, Albert Einstein, sviluppasse una nuova dinamica, quella **relativistica** che comunque si sostituirà a quella **newtoniana** solo nel caso di corpi che si muovano a velocità prossime a quelle della luce nel vuoto.

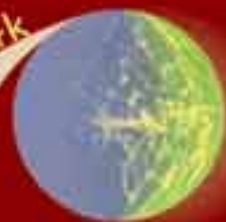


Ritratto di Newton (G.Kneller)



Le leggi della dinamica



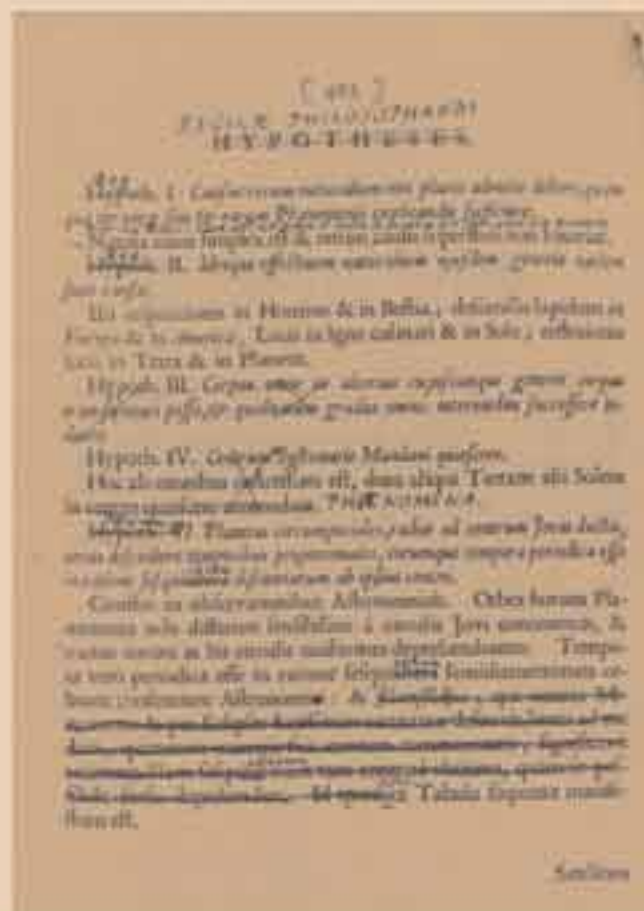
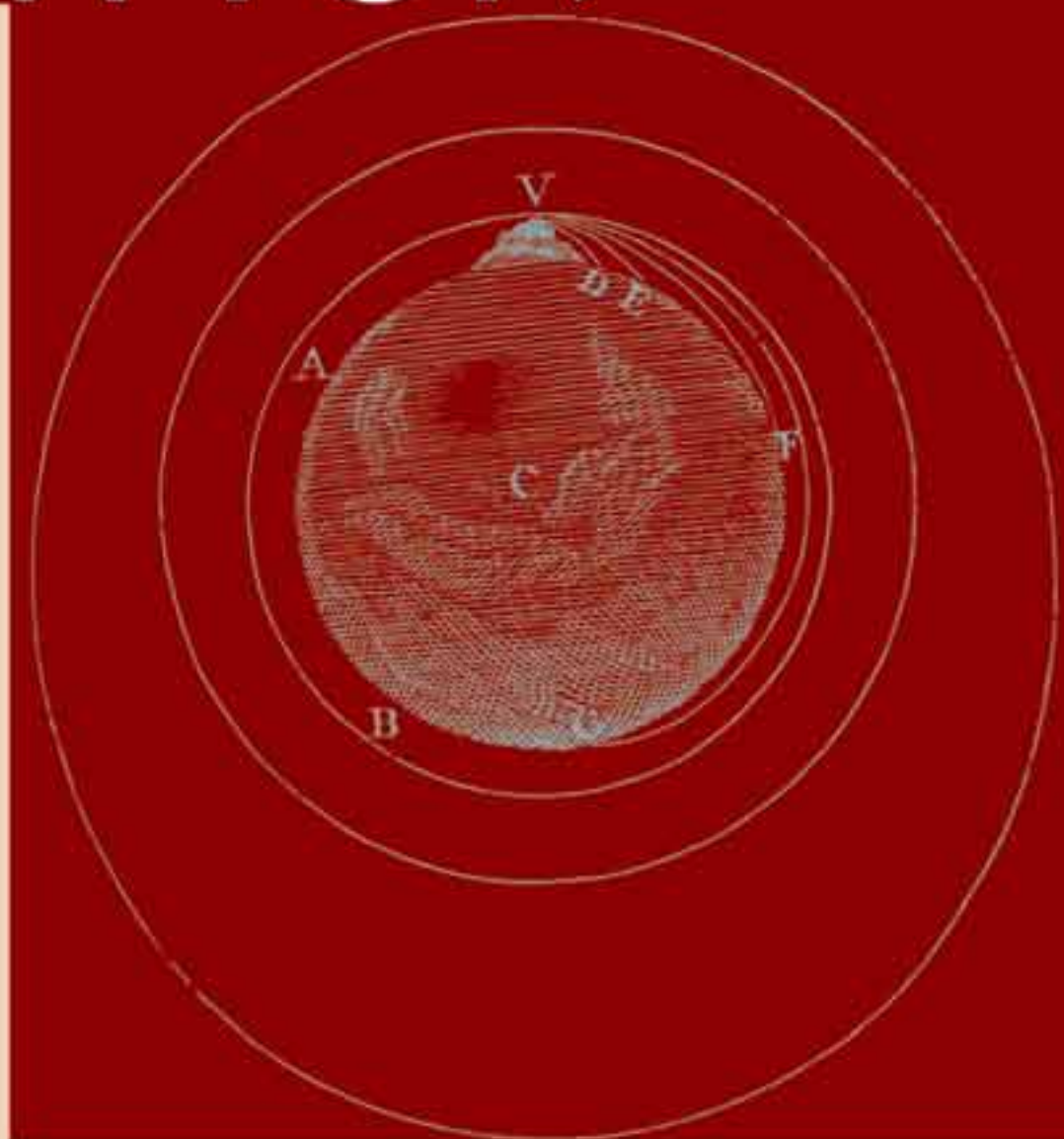


Il sistema del Mondo di NEWTON

I punti di partenza di Newton per lo studio del moto dei pianeti e della caduta dei gravi, sono le leggi di Keplero sul moto dei corpi celesti e quelle di Galileo sulla caduta dei gravi, ma nulla legava le due teorie, nulla assicurava che la fisica dei cieli valesse anche sulla Terra. Newton si accorge che i conti non tornano: per Galileo le orbite dei pianeti sono circolari, per Keplero ellittiche; per Keplero la causa del moto dei pianeti va ascritta a una specie di forza che emana dal Sole a causa della sua rotazione, per Galileo non serve una forza, perché il moto circolare è perpetuo. I problemi sono quindi, in sintesi, quello di capire quale forza faccia muovere i pianeti e quello di trovare il legame tra questa forza e la gravità terrestre. Uno dei "miti" che più spesso si tramandano nella fisica è quello della "mela di Newton". Isaac se ne sta tranquillo nella sua casa del Lincolnshire, aspettando la fine della peste. Passeggiando nel suo orto, vede una mela che cade e ha un lampo d'intuizione: la stessa forza gravitazionale che fa cadere la mela è anche responsabile del moto della Luna. È questo il punto di partenza che dovrà portare Newton, dopo venti anni di intenso lavoro, a formulare la legge di gravitazione universale. Il ragionamento di Newton segue questa linea: se si lancia un proiettile dalla cima di una montagna, l'attrazione della Terra lo fa deviare dalla sua traiettoria rettilinea: all'aumentare della velocità iniziale impartita, il proiettile seguirà le curve D, E, F, G, e, se la velocità iniziale supererà un certo valore critico, il proiettile "tornerà sulla montagna da cui è stato lanciato [...] e conservando la stessa velocità tornerà a descrivere la stessa curva secondo la stessa legge [...] e continuerà a girare attraverso i cieli come i pianeti sulle loro orbite" (curva VBA). Nel 1686, stimolato dal suo allievo Halley, Newton giunge alla sintesi del problema: calcola la forza di attrazione della Terra sulla Luna e mostra che, sotto l'azione combinata di questa forza con la forza centrifuga, si possono spiegare i movimenti del satellite così come appaiono dall'osservazione. Calcola quindi l'attrazione del Sole sui pianeti e mostra che l'orbita generata da un'attrazione che diminuisce secondo il quadrato della distanza è un'ellisse kepleriana di cui il Sole occupa uno dei fuochi. Newton dimostra anche che la forza di gravità cui è sottoposto ogni corpo sulla Terra è la stessa di quella che vi sarebbe se tutta la massa terrestre fosse concentrata in un punto al centro. Tutta la dinamica dell'Universo, compreso il vagare delle comete, è descritta alla

luce di questa teoria: tra due corpi qualsiasi agisce una forza direttamente proporzionale alle loro masse e inversamente al quadrato della loro distanza. La costante di proporzionalità è universale, ha cioè lo stesso valore sulla Terra e in tutto l'Universo. "Fin qui ho spiegato i fenomeni del cielo e del nostro mare mediante la forza di gravità, ma non ho mai fissato la causa della gravità. Questa forza nasce interamente da qualche causa, che penetra fino al centro del Sole e dei pianeti, senza diminuzione della capacità, e opera non in relazione alla quantità delle superfici dei corpi sui quali agisce - come sogliono le cause meccaniche - ma in relazione alla quantità di materia solida. La sua azione si estende per ogni dove a immense distanze, sempre decrescendo in proporzione inversa al quadrato delle distanze" (Principia).

Non si trovano nella storia dell'impresa scientifica figure che abbiano dato contributi maggiori e in così diversi campi, di quelli che Newton ci ha lasciato. Eppure... "Non so come posso apparire al mondo: ma a me sembra di essere stato come un ragazzo che gioca sulla riva del mare, divertendomi a trovare ogni tanto un ciottolo più liscio o una conchiglia più bella del solito, mentre il grande mare della verità giaceva sconosciuto davanti a me".



TRACTATUS DE Quadratura Curvarum.

Quantitates indeterminatas ut motu perpetuo crescentes vel decrecentes, id est ut fluentes vel defluentes in sequentibus considero, designoq; literis z, y, x, v , & earum fluxiones seu celeritates crescendi noto iisdem literis punctatis $\dot{z}, \dot{y}, \dot{x}, \dot{v}$. Sunt & harum fluxionum fluxiones seu mutationes magis aut minus celeres quas ipsarum z, y, x, v fluxiones secundas nominare licet & sic designari $\ddot{z}, \ddot{y}, \ddot{x}, \ddot{v}$, & harum fluxiones primas seu ipsarum $\dot{z}, \dot{y}, \dot{x}, \dot{v}$ fluxiones tertias sic $\ddot{\dot{z}}, \ddot{\dot{y}}, \ddot{\dot{x}}, \ddot{\dot{v}}$, & quartas sic $\ddot{\dot{\dot{z}}}, \ddot{\dot{\dot{y}}}, \ddot{\dot{\dot{x}}}, \ddot{\dot{\dot{v}}}$. Et quemadmodum z, y, x, v sunt fluxiones quantitatum z, y, x, v , & hae sunt fluxiones quantitatum $\dot{z}, \dot{y}, \dot{x}, \dot{v}$ & hae sunt fluxiones quantitatum primarum $\dot{z}, \dot{y}, \dot{x}, \dot{v}$: sic hae quantitates considerari possunt ut fluxiones aliarum quas sic designabo,

Newton scopre perché la Luna sta in orbita e anticipa il principio su cui saranno lanciati i satelliti artificiali

(figura di sinistra)
Una pagina delle copie personali di Newton dei Principia con sue correzioni

(figura di destra)
Primo lavoro di Newton sul calcolo; Treatise on the Quadrature of Curves (1704)



RENÉ DESCARTES e GOTTFRIED LEIBNIZ

materia e movimento

Per René Descartes (latamente Cartesio, 1596-1650) "ogni parte della materia [...] non tende mai a muoversi secondo linee curve, ma secondo linee rette". Per non pochi storici della scienza questa sarebbe la prima autentica formulazione della legge di inerzia. Per Cartesio "il moto non è un processo, ma uno stato dei corpi, ed è sullo stesso piano ontologico della quiete: il fatto di essere in quiete o in moto non provoca nei corpi alcun mutamento" (P. Rossi, 1997).

Movimento e materia sono i due soli ingredienti che costituiscono il mondo; poiché pensiero (*res cogitans*) ed estensione (*res extensa*) sono sostanze rigidamente separate, col termine *natura* Cartesio non intende "qualche divinità o qualche tipo di potenza immaginaria", ma semplicemente "la materia stessa [...] sotto la condizione che Dio continui a conservarla nello stesso modo in cui l'ha creata". Ma la materia non è altro che estensione, sicché essa è sempre uguale in tutto il mondo, si estende indefinitamente, risulta divisibile all'infinito, mentre il vuoto resta semplicemente inconcepibile. E poiché in natura non può darsi vuoto, la materia sottile che compone i cieli tende a muoversi in vortici, e quindi nel cosmo si realizzano movimenti non attorno a un unico centro, bensì intorno a molti centri diversi. In particolare, i vortici spiegano il movimento di rivoluzione dei pianeti intorno al Sole.

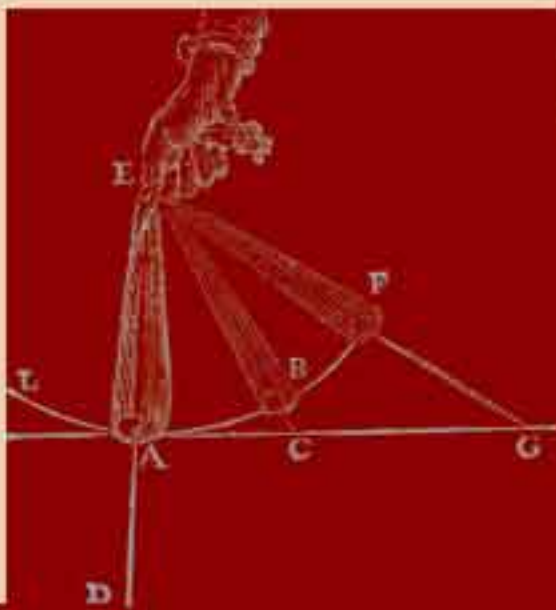
Nei suoi *Principia philosophiae naturalis* Cartesio scrive che "la materia assume in successione tutte le forme di cui è capace; se consideriamo tali forme per ordine, si potrà giungere a quella che è propria di questo mondo". Gli ribatterà Gottfried Wilhelm von Leibniz

(1646-1716) che questa è "la menzogna maggiore dell'ateismo": se la materia può assumere tutte le forme possibili, tutto ciò che si può immaginare di assurdo, bizzarro o "contrario alla giustizia" dovrà prima o poi realizzarsi. Il Dio di Cartesio "fa tutto ciò che è fattibile [...] seguendo un ordine necessario e fatale", e in questo non si distingue dalla "necessità" invocata da Spinoza (1632-1677). Nella fattispecie, Leibniz pubblica (1686) una *Brevis demonstratio erroris memorabilis Cartesii*: il memorabile sbaglio di Cartesio consisterebbe nell'aver ritenuto che in natura si conservi costante la quantità di moto (il prodotto della massa per la velocità di un corpo). Ciò che si conserva costante è, invece, la vis viva, ossia la forza viva (Leibniz allude a quella che verrà più tardi detta energia cinetica, una grandezza proporzionale al prodotto della massa per il quadrato della velocità). Infine, per Leibniz la forza viva non è altro che la realtà sottostante a fenomeni come materia e movimento - sicché i corpi fisici non sono che le apparenze fenomeniche di centri di forza o atomi spirituali o sostanze semplici create direttamente da Dio (e chiamate da Leibniz con termine pitagorico e bruniiano "monadi").

Anche Isaac Newton aveva scorto nella concezione cartesiana della materia il germe di un ateismo strisciante e clandestino, rivendicando "l'ammirevole disposizione del Sole, dei pianeti e delle comete" come opera di "un Essere onnipotente e intelligente". Ma Leibniz non accetterà mai la concezione delle forze fisiche di Newton come manifestazioni della volontà divina e in polemica (1715-1716) con il newtoniano Samuel Clarke (1675-1729) rifiuterà spazio, tempo e moto assoluti, dichiarandosi d'accordo con Cartesio nel respingere il vuoto e l'azione a distanza che a suo parere viziavano l'intera architettura del sistema newtoniano.



René



Le forze centrifughe, analizzate da Cartesio nei Principia philosophiae



Gottfried



Metodo di Leibniz per risolvere problemi di massimo e di minimo. Pagina di un suo articolo del 1684.



L'Universo a vortici di Cartesio



Macchina calcolatrice di Leibniz



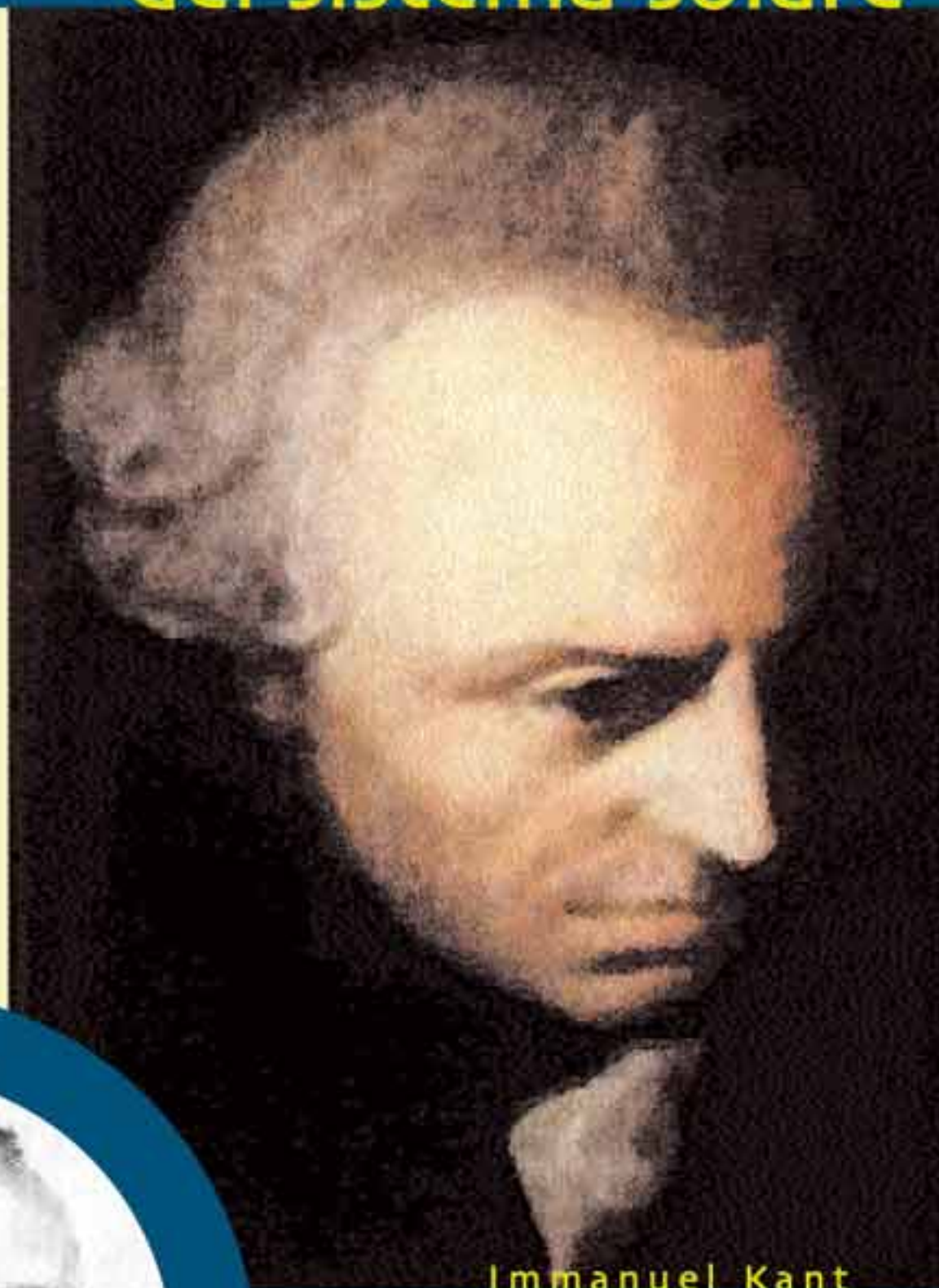
IMMANUEL KANT e PIERRE-SIMON DE LAPLACE: **La genesi del sistema solare**

"Il cielo stellato sopra di me, la legge morale dentro di me".

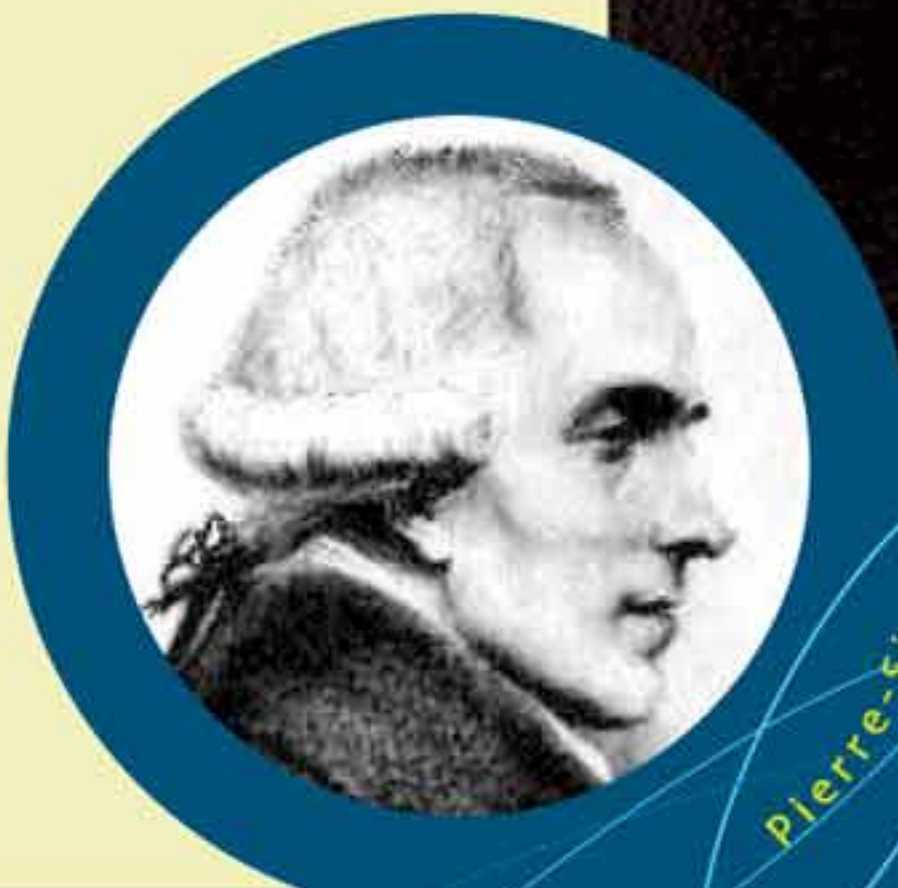
Chi non ricorda il celebre finale della *Critica della ragion pratica* (1788)? Ma Immanuel Kant (1724-1804), il grande filosofo di Königsberg, di famiglia di origine scozzese, emigrata in Prussia nel XVI secolo, aveva dedicato un'intera opera (*Storia universale della natura e teoria del cielo*, pubblicata anonima nel 1755) alla costituzione e all'origine dell'Universo "in base ai principi newtoniani". Influenzato indirettamente dalla *Original Theory, or New Hypothesis of the Universe* (1750) di Thomas Wright of Durham (1711-1786), sostenitore della teoria della pluralità dei mondi, di cui aveva letto un estratto nel 1751, Kant prospetta l'Universo come "progressione infinita di mondi e sistemi". In esso la nostra Via Lattea si rivela un enorme agglomerato di stelle, ed è presumibile che essa non costituisca un'eccezione nello "spazio infinito". Nella Galassia il Sistema solare non occupa una posizione particolarmente rilevante. Per Kant, comunque, è presumibile che esistano pianeti del Sistema *oltre* Saturno, anche se si tratta di corpi la cui orbita sarebbe "più affine a quella delle comete". In altri termini, Kant congetture che tali pianeti percorrerebbero ellissi fortemente eccentriche. Peraltro, non esclude che i pianeti possano essere abitati e alcune pagine della *Storia universale* contengono delle descrizioni congetturali di ipotetici Venusiani, Marziani, Gioviniani, ecc. Infine, Kant delinea una teoria della genesi del Sistema solare: "gli stessi elementi di cui sono fatti i pianeti, le comete, il Sole devono essersi trovati in uno stato di dispersione nello spazio del sistema planetario e aver assunto in seguito dei movimenti che hanno poi conservato quando si sono raccolti in agglomerati e hanno formato i corpi celesti, i quali dunque raccolgono in sé tutte le sostanze di quella materia cosmica un tempo dispersa". È l'ipotesi della *nebulosa primordiale* che sarà avanzata indipendentemente dal grandissimo Pierre-Simon de Laplace (1749-1827) nella sua *Exposition du Système du Monde* (1796), opera divulgativa rivolta a un pubblico di non specialisti. Più precisamente, Laplace ipotizza l'esistenza iniziale di una massa di gas a forma di disco lentamente ruotante; al contrarsi di tale nebulosa, a causa della mutua attrazione delle sue parti, la velocità angolare deve aumentare per la conservazione del momento angolare; ma, alla periferia della nebulosa, la forza centrifuga comincia a prevalere sulla gravità, causando la separazione di anelli di materia dal resto. (A un meccanismo analogo Laplace imputa la formazione degli anelli di Saturno).

La non uniformità della distribuzione della materia e degli anelli causa, a sua volta, il progressivo concentrarsi della materia intorno alla regione dell'anello di maggiore densità, costituendo così un pianeta. Anche se oggi è stata ampiamente rivista e criticata (e si sono prospettate delle valide alternative), non si deve dimenticare come l'*ipotesi di Kant-Laplace* abbia potentemente contribuito a farci concepire una parte dell'Universo (quella del nostro Sistema solare) non più come immutabile, bensì in evoluzione.

L'importanza di Laplace, ovviamente, non si limita all'ipotesi della nebulosa primordiale. Il matematico e fisico francese, che fu peraltro uno dei grandi sistematori del calcolo delle probabilità, è noto soprattutto al largo pubblico per il suo celebre enunciato del determinismo universale. Ma i suoi contributi alla meccanica celeste sono svariati e molteplici. Basti qui citare quelli relativi al problema degli *n corpi* e alla teoria delle *perturbazioni* che spiegano le deviazioni dalle ellisse "kepleriane" dei pianeti. Saranno tecniche matematiche di questo genere che permetteranno, una volta scoperto Urano, di individuare il pianeta "perturbatore" Nettuno da parte di John Couch Adams (1819-1892) e di Urbain Le Verrier (1811-1877).



Immanuel Kant



Pierre-Simon de Laplace



ALESSANDRO VOLTA:

... e la corrente fu (1745-1827)

Alessandro Volta nasce a Como il 18 febbraio 1745. Inizia a parlare molto tardi (4 anni) e fino a 7 anni ha problemi di linguaggio, ma subito dopo mostra uno spiccato interesse per l'osservazione e lo studio dei fenomeni naturali. A 18 anni, finiti gli studi nel Seminario, nonostante le pressioni dello zio per una carriera forense, abbandona gli studi regolari e continua a interessarsi da solo dei fenomeni elettrici studiando i testi del Nollet e del Beccaria, con i quali entra subito in corrispondenza.

Nel 1769 pubblica il suo primo lavoro in latino *De vi attractiva ignis electrici, ac phaenomenis inde pendentibus* dedicato al Beccaria, di cui ne critica però le teorie. Nel 1775 costruisce il suo primo strumento elettrico, l'elettroforo perpetuo, capostipite delle successive macchine elettrostatiche a induzione, e l'anno successivo scopre l'aria infiammabile delle palude (metano). Nel 1778 viene nominato per chiara fama Professore di Fisica Particolare all'Università di Pavia dove nel 1792 inizia a occuparsi di elettricità animale. Questa ricerca lo porterà alla realizzazione nel 1799 della pila. Muore a Como il 5 marzo 1827.

La realizzazione della pila costituisce l'epilogo di un lungo e acceso dibattito che interessò e appassionò l'intera comunità scientifica dell'epoca. Un dibattito che ebbe come attori principali due scienziati italiani, il medico Luigi Galvani (1737-1798) dell'Università di Bologna e il fisico Alessandro Volta dell'Università di Pavia, e come protagonista un piccolo e innocuo animale: una rana.

Iniziato nel 1792 con la pubblicazione del *Commentarius* di Galvani, il dibattito si concluse soltanto nel 1799 con la realizzazione di quel nuovo e rivoluzionario strumento che noi oggi chiamiamo **pila**.

Nuovo in quanto si trattava del primo generatore di una corrente elettrica continua, **"La base fondamentale di tutte le invenzioni moderne"** come ebbe a definirla A. Einstein. Rivoluzionario in quanto diede inizio alla moderna era dell'elettricità.

Secondo Galvani le contrazioni che si osservano in una rana morta e scorticata quando si collegano tra loro con un arco bimetallico il muscolo e il nervo sciatico sono dovute a un disequilibrio elettrico esistente nella rana (elettricità animale).

Secondo Volta invece le contrazioni della rana sono dovute a una corrente elettrica generata dal contatto dei due metalli diversi costituenti l'arco metallico (elettricità metallica).

Seguendo le proprie intuizioni Volta, dopo aver dimostrato la presenza di una tensione ai capi di due metalli diversi tra loro a contatto (effetto Volta) riuscì a sommare gli effetti di una serie di coppie bimetalliche, interponendo tra ogni coppia un conduttore umido (elettrolita), realizzando la pila.

Ma anche le idee di Galvani sull'elettricità animale ebbero un seguito e, grazie alle ricerche di altri due scienziati italiani, Matteucci e Nobile, diedero origine alla moderna elettrofisiologia.

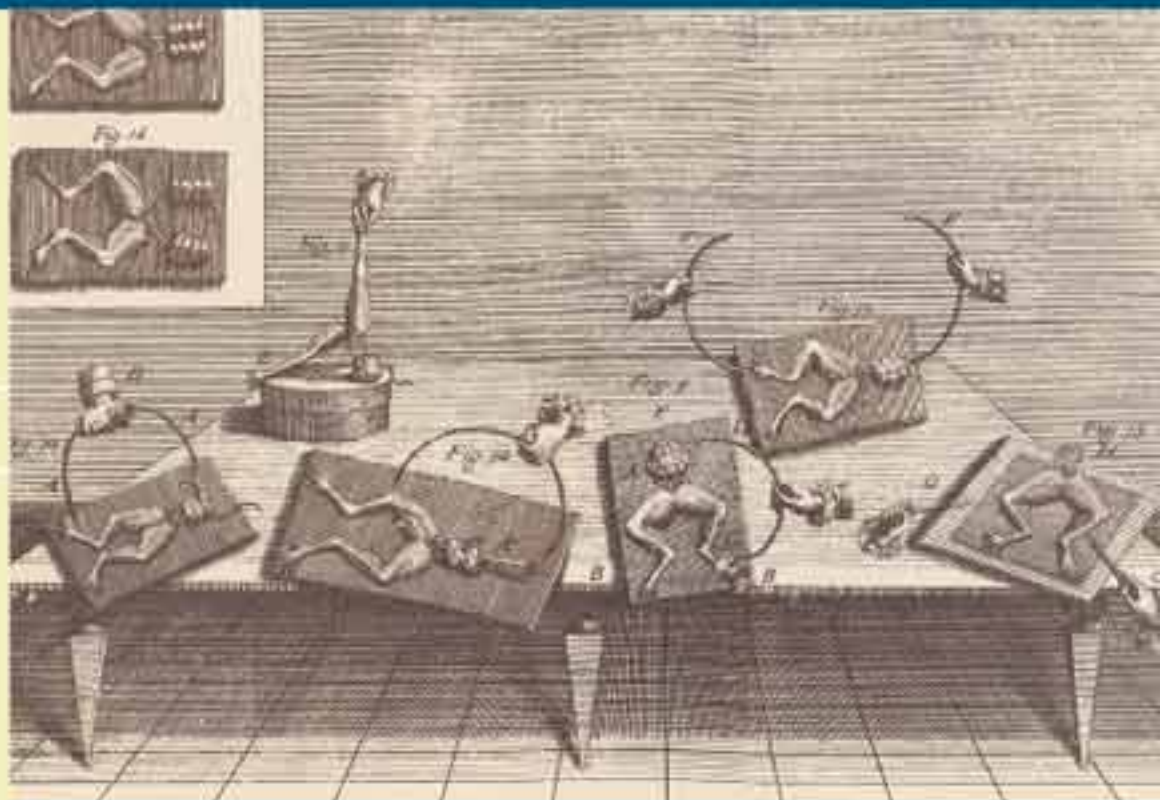
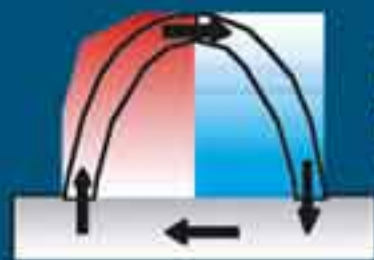
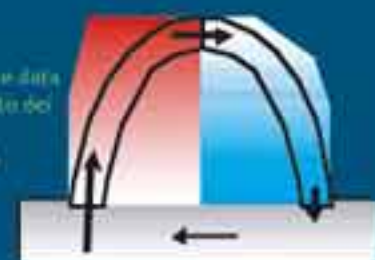


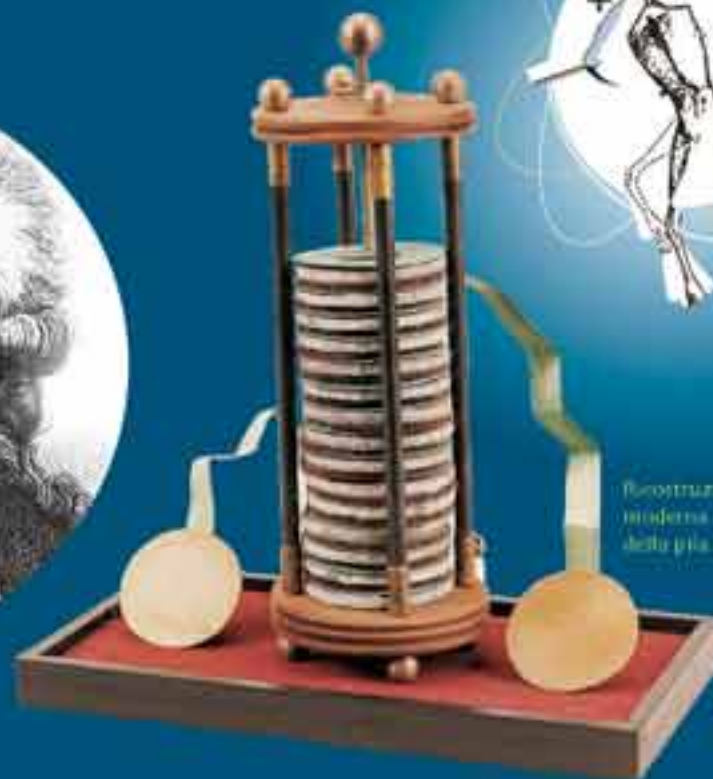
Illustrazione delle esperienze di Galvani sulle rane (tratta dal "Commentarius").



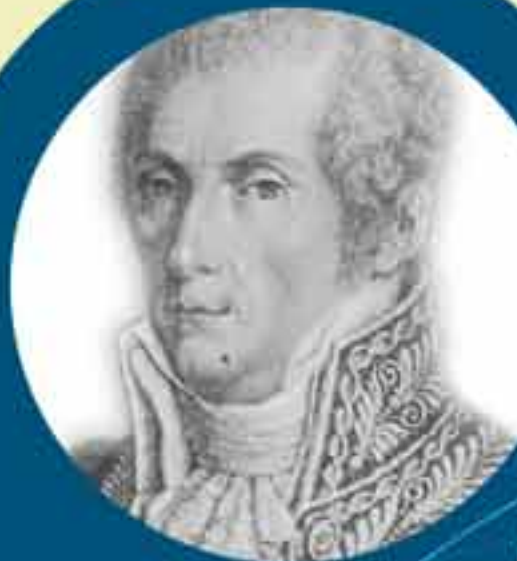
Schema dell'interpretazione data da Volta al contatto dei metalli con un conduttore umido.



Schema del contatto elettrico sulla gamba di rana.



Ricostruzione moderna della pila di Volta.



Alessandro



Luigi



CHARLES AUGUSTIN COULOMB:

forze tra cariche elettriche (1736-1806)

Charles-Augustin Coulomb, nasce a Angoulême (Francia) il 14 giugno 1736. Quando la sua famiglia si trasferisce da Angoulême a Parigi, il giovane Charles Augustin segue le lezioni al Collège Mazarin e al Collège de France e nel 1760 viene ammesso alla Scuola del Genio di Mezières. Nel 1761 si diploma con il rango di "lieutenant en premier" del corpo del genio e dal 1764 al 1772 è di stanza in Martinica, dove dirige i lavori di costruzione del Fort Bourbon; questa esperienza sarà fondamentale per alcuni dei suoi lavori di meccanica.

Ritornato in Francia, nel 1773 inizia a lavorare a una memoria sugli aghi magnetici, che gli varrà il primo premio nella competizione dell'Accademia di Parigi per il 1777. Dal 1779 si dedica a esperimenti e ricerche sull'attrito con tali risultati da ottenere nuovamente il primo premio all'Accademia di Parigi nel 1781 con una memoria che gli dà grande successo.

L'ammissione all'Accademia nel 1781 permette a Coulomb di risiedere a Parigi, dove può dedicarsi alle sue ricerche fisiche. Nel 1784 pubblica la memoria più importante sulla torsione, in cui presenta una bilancia basata sulla forza di torsione e sull'elasticità dei fili di metallo che permette la misura precisa di forze di piccolissima intensità. Questo strumento gli permette di affrontare in maniera nuova lo studio dell'elettricità e del magnetismo.

Con l'abolizione dell'Accademia (8 agosto del 1793) si ritira in una sua proprietà, La Justinière, ma nel 1795 ritorna a Parigi dove viene eletto all'Institut de France, come membro per la Fisica sperimentale.

Nel 1802 diventa ispettore generale per l'istruzione pubblica, e si occupa soprattutto dei "lycées". Nel 1806 una malattia contratta in gioventù in Martinica si aggrava e lo porta alla morte.

Verso la fine del XVIII secolo due teorie erano state avanzate per la spiegazione dei fenomeni elettrici. Quella di Franklin dell'unicità del fluido elettrico e quella risalente a Dufay e successivamente ripresa da Symmer, sulla base di nuovi esperimenti, che ipotizzava la presenza di due distinti fluidi elettrici presenti in eguale intensità nei corpi neutri e in diversa intensità nei corpi elettrizzati.

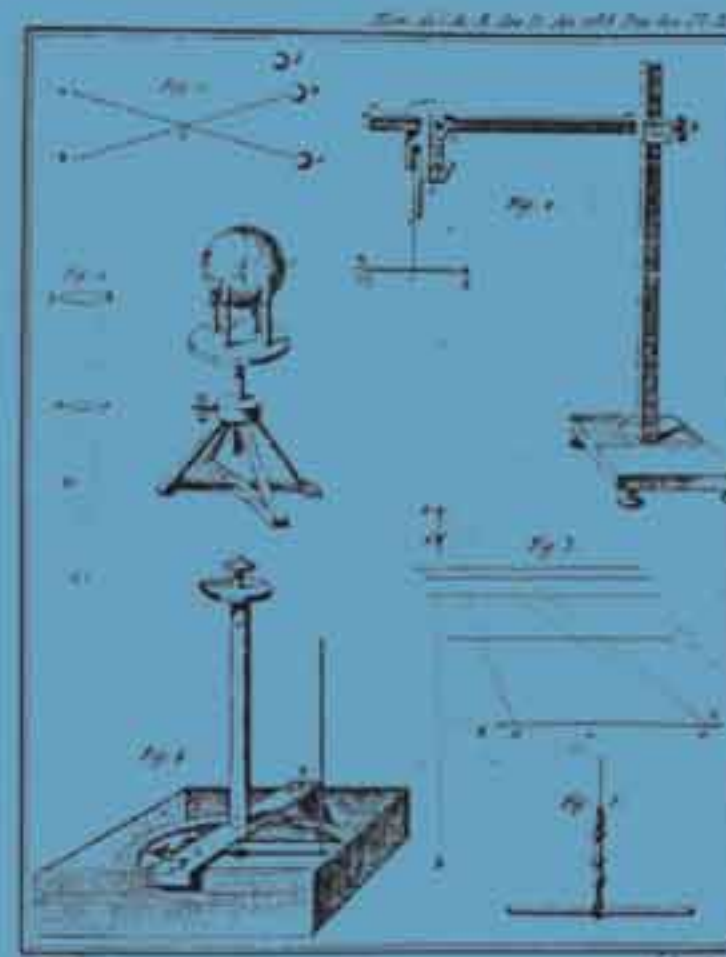
Coulomb, seguace della seconda teoria, estende il paradigma newtoniano dell'azione istantanea a distanza alle forze che si esercitano tra corpi elettricamente carichi, dimostrando sperimentalmente, mediante la sua bilancia a torsione, la validità della legge dell'inverso del quadrato. A differenza però della legge di gravitazione universale, cariche elettriche dello stesso segno si respingono, mentre cariche di segno contrario si attraggono. Egli mostra inoltre che il modello a un fluido e quello a due fluidi elettrici sono, da un punto di vista matematico, del tutto equivalenti.

La legge di Coulomb costituisce oggi la legge fondamentale dell'elettrostatica.

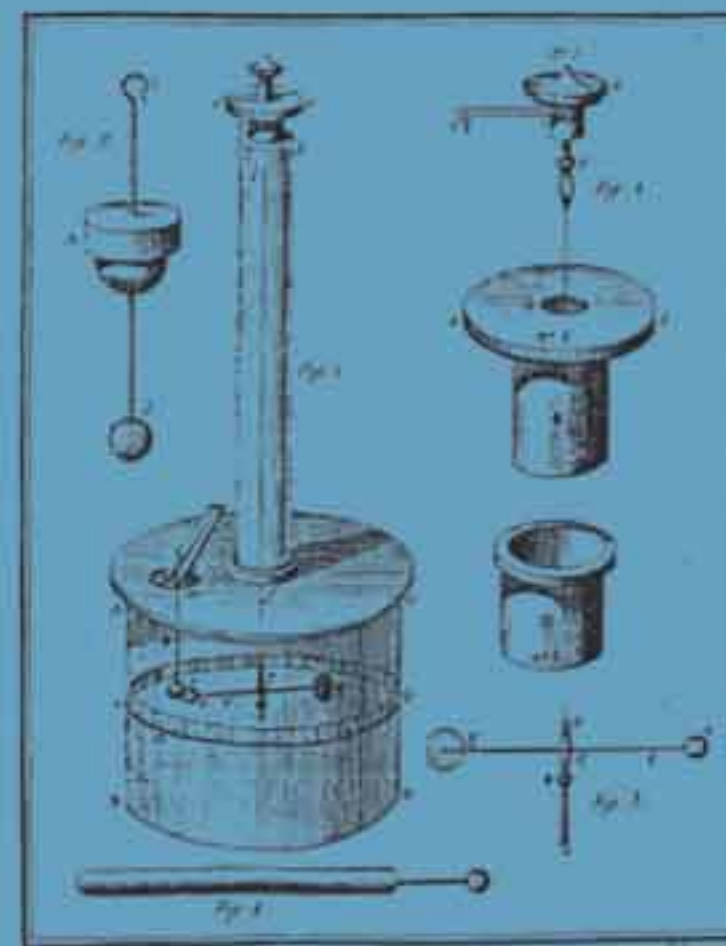
$$F = K \frac{Q_1 Q_2}{R^2}$$



Charles Augustin Coulomb



Sistemi per misurare l'intensità della forza tra cariche elettriche



Esperienze di induzione elettrostatica



ANTOINE-LAURENT LAVOISIER: la nascita della chimica (1743-1794)

"La Repubblica non ha mai bisogno di scienziati" - con queste parole nel 1794 un giudice della Rivoluzione giustifica la condanna alla ghigliottina di Lavoisier. È stato proprio l'impegno civile del grande chimico (Lavoisier era stato appaltatore di imposte per la Monarchia) a valergli l'odio del regime di Robespierre.

Nato da famiglia ricca, è un ragazzo prodigio: appena ventenne vince un premio all'Accademia Francese delle Scienze per un progetto sull'illuminazione di Parigi; poco dopo è ammesso "honoris causa" alla stessa Accademia.

Sulla spinta del razionalismo illuminista, nel '700 molti ambienti scientifici si occupavano del calore e delle reazioni chimiche in cui esso era implicato. Si pensava che il calore fosse un fluido materiale costituito di minuscole particelle dotate di massa. Lavoisier stesso era favorevole a tale idea, tanto che chiamò **calorico** questo ipotetico fluido.

Tuttavia, con l'apertura propria di chi usa correttamente la ragione, afferma:

"Rigorosamente parlando, non siamo obbligati a supporre che il calorico sia reale materia. È sufficiente ammettere che sia una causa che spinge le molecole della materia a separarsi; in questo modo si può guardare ai suoi effetti in maniera astratta e matematica"

Si pensava inoltre che tutte le sostanze contenessero varie proporzioni di una sostanza chiamata **flogisto**, responsabile della loro combustione. Lavoisier compiendo molti esperimenti con estrema precisione e pignoleria, dimostra che durante la combustione non si crea né si distrugge materia: la massa complessiva dei reagenti si trova tutta nei prodotti, divisa tra i gas che si sviluppano durante la combustione e le ceneri che rimangono. Egli demolisce l'ipotesi del flogisto e scopre che la combustione non è altro che una reazione di ossidazione durante la quale il corpo che brucia si combina con un gas presente nell'aria, a cui dà nome di ossigeno (= generatore di ossidi).

Lavoisier verifica inoltre che il rapporto tra la quantità di calore e di anidride carbonica (CO₂) emessi da un animale è circa uguale al rapporto tra gli stessi emessi dalla fiamma di una candela. Conclude quindi che, da un punto di vista puramente chimico, la vita è sostenuta da una continua reazione di ossidazione analoga alla combustione: per la prima volta nella storia della scienza viene proposta una connessione (suffragata da prove sperimentali) tra il mondo vivente e il mondo non-vivente.

Strumenti in vetro dal trattato di Chimica elementare di Lavoisier. Il disegno è della moglie



Lavoisier con sua moglie (J.C. David)

Arresto di Lavoisier



177 CHEMISTRY. 177

TABLE OF SIMPLE SUBSTANCES.

Simple Substances belonging to all the Kingdoms of Nature, which are to be considered as the Elements of Bodies.

Acid Names.	Composition of Acids.
Light	Light
Carbon	Phosphorus united to heat
Hydrogen	Phosphorus united to heat
Azote	Phosphorus united to heat
Hydrogen	Phosphorus united to heat
Oxygen and Azote	Phosphorus united to heat
Phosphorus	Phosphorus united to heat
Sulphur	Phosphorus united to heat
Iron	Phosphorus united to heat
Copper	Phosphorus united to heat
Lead	Phosphorus united to heat
Mercury	Phosphorus united to heat
Gold	Phosphorus united to heat
Platina	Phosphorus united to heat
Fluorine	Phosphorus united to heat
Chlorine	Phosphorus united to heat
Bromine	Phosphorus united to heat
Iodine	Phosphorus united to heat
Phosphorus	Phosphorus united to heat
Sulphur	Phosphorus united to heat
Iron	Phosphorus united to heat
Copper	Phosphorus united to heat
Lead	Phosphorus united to heat
Mercury	Phosphorus united to heat
Gold	Phosphorus united to heat
Platina	Phosphorus united to heat
Fluorine	Phosphorus united to heat
Chlorine	Phosphorus united to heat
Bromine	Phosphorus united to heat
Iodine	Phosphorus united to heat

Tavola degli elementi di Lavoisier da un testo inglese dell'epoca





JOHN DALTON:

atomi e chimica (1766-1844)

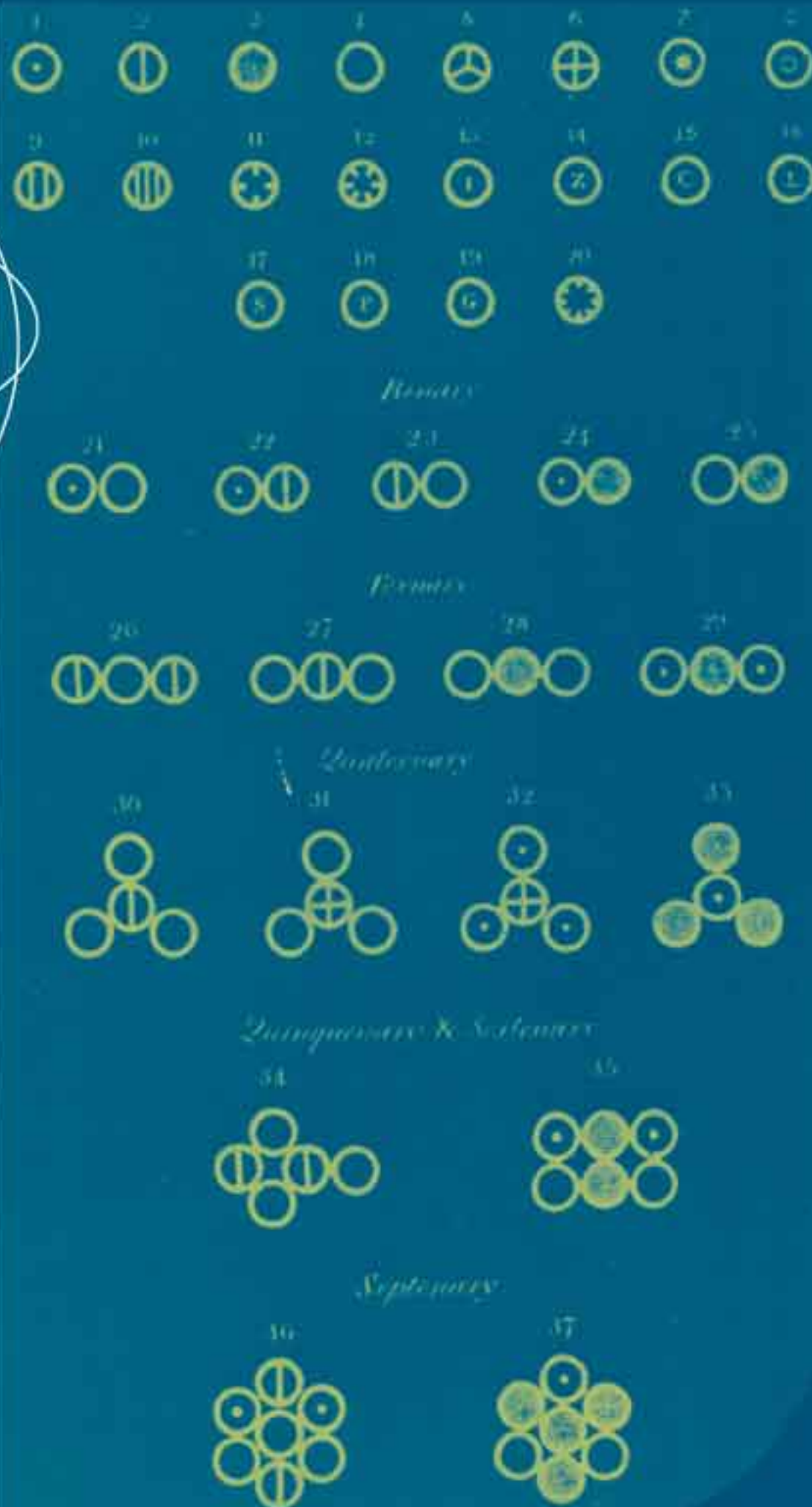
È uno dei più attenti e appassionati osservatori della realtà della sua epoca. Figlio di un tessitore, lavora dapprima come maestro elementare, approfondendo nel frattempo da autodidatta le proprie conoscenze scientifiche. Nel 1793 diviene professore al New College di Manchester e successivamente membro della Royal Society di Londra, la più importante società culturale dell'Inghilterra vittoriana.

È affetto da *acromatopsia*, un difetto ereditario incurabile che impedisce di distinguere alcuni colori. Compie appassionati studi su se stesso per indagarne gli effetti sottoponendosi persino ad alcuni esperimenti. Ancor oggi, in suo nome, questa malattia viene comunemente chiamata *daltonismo*.

Nel 1799 il chimico francese Proust (1755 - 1826) aveva osservato che in ogni reazione chimica gli elementi si combinano in un rapporto di masse determinato e costante. Per spiegare questa legge Dalton propone nel 1803 l'ipotesi atomica, rifacendosi agli antichi concetti di indivisibilità della materia degli atomisti greci. Dopo anni di studi e di esperimenti giunge alle seguenti conclusioni, che costituiscono il primo modello atomico basato su dati fisici e non semplicemente sull'intuizione filosofica:

- 1) La materia è costituita di atomi dotati di massa e volume; gli atomi sono entità indivisibili.
- 2) Ciascun elemento chimico è formato da specifici atomi, tutti uguali in massa e volume.
- 3) Atomi uguali o diversi possono unirsi tra loro a formare un composto, costituito da un numero di atomi sempre fisso e costante (legge della composizione costante)
- 4) Quando due atomi diversi formano più di un composto, a una quantità fissa del primo atomo corrispondono quantità multiple del secondo (legge delle proporzioni multiple)

Atomi e molecole da
un disegno originale
di Dalton



John Dalton

L'età del vapore e la Termodinamica

L'invenzione della macchina a vapore, nella quale il calore viene utilizzato per produrre lavoro meccanico, oltre a dare origine alla *prima rivoluzione industriale* alla fine della seconda metà del XVIII secolo, innesca una serie di studi volti a capire cosa sia veramente il calore: è la nascita della termodinamica.

Studiando il rendimento di tali macchine, Sadi Carnot intuisce la necessità di trascurare tutti i problemi tecnici pratici (perdite, attriti, ...) per concentrarsi sul funzionamento "ideale". Alla base della sua analisi sta il concetto di calorico, secondo l'opinione dell'epoca il fluido indistruttibile e imponderabile che costituisce l'essenza del calore. La produzione di lavoro nella macchine termiche viene spiegata con un'analogia sorprendente: come l'acqua, cadendo da una certa altezza, muove le pale di un mulino, così il calorico fluendo da una temperatura a un'altra minore genera "potenza motrice". La "potenza" (il rendimento) dipende soltanto dalla differenza di temperatura, non dal mezzo (aria, vapore o altro) né dalle condizioni di pressione e volume, che subentrano nelle macchine reali.

Figlio di Lazare, ministro della guerra di Napoleone, Sadi Nicolas Carnot nasce nel 1796 a Parigi. Tra i 16 e i 19 anni studia all'Ecole Polytechnique, dove viene sottoposto a un'educazione militare. Vivrà per buona parte della vita formalmente sotto le armi (con la carica di tenente), ma effettivamente dedito agli studi di termodinamica e seguendo i suoi molteplici interessi: violinista e ballerino, frequenta non solo Opéra e Sorbona, ma anche corsi di economia e chimica industriale. Nel '24 pubblica le "Réflexions sur la puissance motrice du feu", opera di capitale importanza, ma sostanzialmente ignorata. Muore di colera a soli 36 anni.



Carnot

L'idea di calorico è ben radicata nella cultura scientifica di inizio '800, poiché spiega egregiamente un gran numero di fenomeni, ma risulta insufficiente di fronte a osservazioni come quelle di B. Thomson (conte di Rumford) che nel 1798, assistendo alla fabbricazione di cannoni in un'armeria, osserva che i trapani, anche se non producono più trucioli di metallo quando sono consumati, riscaldano ugualmente il metallo, cioè lo "sprigionamento" di calorico non si può giustificare con la separazione di materiale. Questo lo porta a supporre che il calore possa avere un'altra natura.

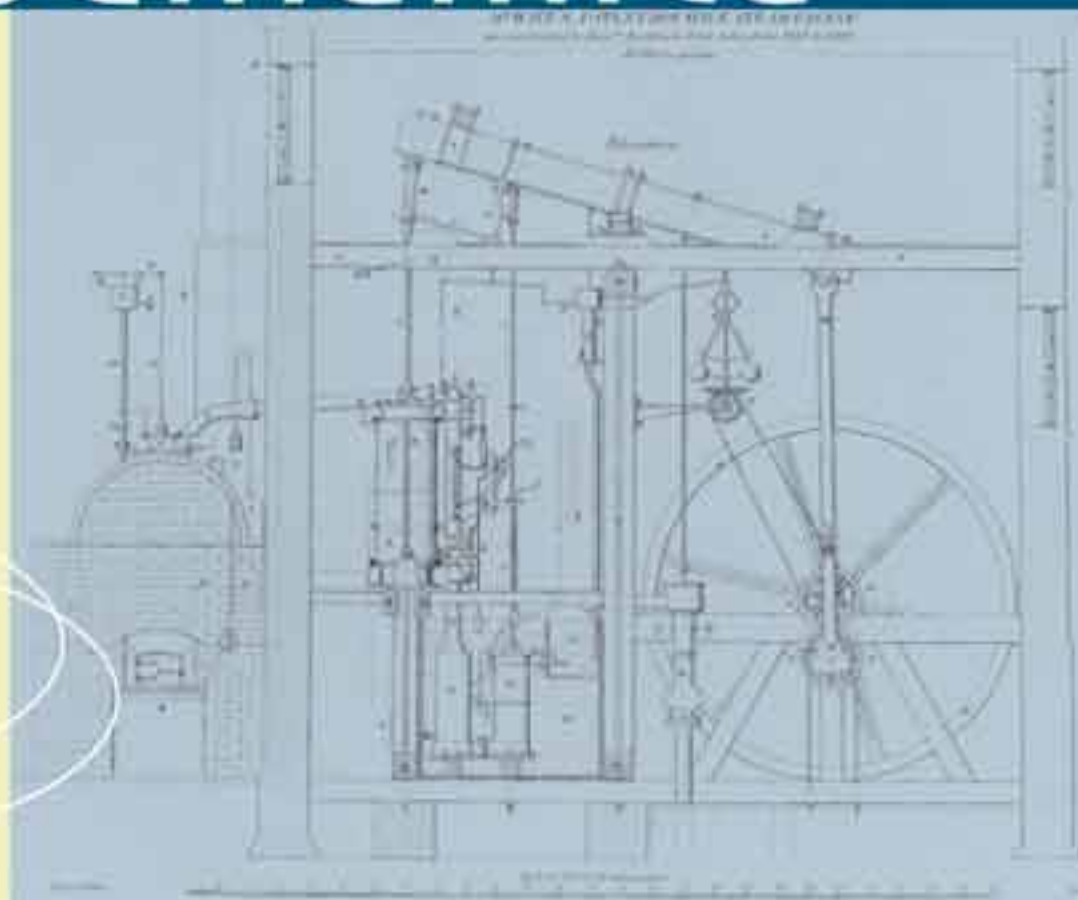
Carnot stesso negli ultimi anni della sua breve vita giunge a tali considerazioni:

"Quando un'ipotesi non è più sufficiente a spiegare i fenomeni deve essere abbandonata"

e, discutendo del calore portato dai raggi luminosi, aggiunge: "Un movimento (quello del calore radiante) potrebbe produrre un corpo (il calorico)? No, di certo: esso può produrre solo un movimento. Il calore è dunque il risultato del movimento". Di conseguenza, Carnot arriva anche a chiedersi a proposito del rendimento di una macchina: "Sarebbe in qualche modo possibile aumentare la quantità di calore utilizzata per la produzione di potenza motrice e ridurre quella trasferita al corpo freddo? O addirittura impiegare tutto il calore senza farne arrivare alcunché al corpo freddo? Se questo fosse possibile, si potrebbe produrre potenza motrice senza consumo di combustibile mediante la semplice distruzione del calore dei corpi".

Si chiarisce così la natura del calore, "movimento" delle particelle appunto, cioè una manifestazione, come il lavoro o la "forza d'urto" di un corpo in moto (energia cinetica), di una grandezza generale detta da lord Kelvin **energia**. Essa assume diverse forme ma la sua quantità nell'universo rimane costante. Questa affermazione costituisce il *primo principio della termodinamica*. Esso si può esprimere con la relazione $L = Q_1 - Q_2$, dove Q_1 è il calore assorbito dal sistema e Q_2 quello ceduto al corpo freddo. L'espressione più generale del primo principio della termodinamica è data da $Q = L + \Delta U$, dove Q è il calore assorbito dal sistema, L il lavoro prodotto e ΔU la variazione di energia interna.

Carnot sostiene l'indipendenza della potenza motrice da qualsiasi cosa che non sia quantità di calore e temperatura. In base a questo, Kelvin intuisce la possibilità di determinare una scala termometrica assoluta, vale a dire indipendente dalle proprietà del mezzo con cui è misurata, sfruttando a questo scopo le trasformazioni volumetriche di gas a bassa pressione. La scala Kelvin pone lo zero (zero assoluto) a $-273,16$ gradi della scala Celsius: a tale temperatura corrisponde lo stato di minima energia termica della materia.



Macchine a vapore

La caldaia C riscalda l'acqua, che vaporizzandosi produce lavoro per aumento della pressione, spingendo il pistone nel cilindro E: il sistema a bilanciere sfrutta il lavoro prodotto dal vapore. Perché il processo possa essere ciclico, è necessario che il vapore esca dal pistone, cedendo calore all'aria circostante o, come nel nostro caso, a un condensatore (H), che si trova a temperatura minore.

L'esperimento di James Joule, brillante fisico inglese contemporaneo di Kelvin e Clausius, i cui risultati vennero pubblicati diversi anni dopo la morte di Carnot, costituisce la prova della validità del primo principio.

Un peso, che, sollevato, costituisce un magazzino di energia potenziale, è legato da un sistema a carrucola a un mulinello immerso nell'acqua. Il lavoro delle pale nell'acqua provocato dalla discesa del peso si trasforma, agitando le molecole del liquido, in energia termica trasferita al liquido, che in questo modo si scalda. Vi è un'equivalenza di sostanza tra energia potenziale, lavoro e calore.



Energia ed Entropia

In base all'espressione del primo principio della termodinamica è possibile definire il rendimento di una macchina termica come $\eta = (Q_1 - Q_2)/Q_1$. Ma Carnot aveva osservato, studiando un particolare ciclo reversibile percorso da una macchina termica operante tra due sorgenti (ciclo di Carnot), che la "potenza motrice" (cioè il rendimento) dipende solo dalle temperature delle due sorgenti, quindi $\eta = (T_1 - T_2)/T_1$, da cui si ricava $Q_1/T_1 = Q_2/T_2$. In un ciclo ideale si conserva quindi il rapporto tra l'energia termica scambiata e la temperatura alla quale avviene il processo. Questo rapporto viene chiamato S nella descrizione di Clausius. "Possiamo dire che S indica il contenuto di trasformazione del corpo [...]". Tuttavia, poiché sono dell'opinione che i nomi delle quantità di questo tipo debbano essere ricavati dai linguaggi antichi al fine di introdurli senza modificazioni nei linguaggi moderni, propongo di chiamare la grandezza S con il nome di **entropia** del corpo, partendo dalla parola greca η $\sigma\pi\omega\tau\eta$, che significa "trasformazione". Intenzionalmente ho formato il termine "entropia" in modo tale da renderlo il più simile possibile al termine "energia": infatti queste quantità [...] sono strettamente connesse l'una all'altra [...]"

L'entropia di un sistema si può definire come la misura della quantità di energia non disponibile per compiere lavoro durante un processo.

L'energia, pur conservandosi, evolve sempre verso determinate forme, cosiddette degradate. Queste considerazioni vengono

formalizzate da Clausius e Kelvin, indipendentemente, a diversi anni di distanza, in modo apparentemente diverso ma con portata equivalente: non si può negare un enunciato senza negare l'altro.

"Non è possibile alcun processo ciclico il cui unico risultato sia la trasformazione in lavoro di un'equivalente quantità di calore sottratta ad un'unica sorgente." (Kelvin)

"Non si può realizzare una trasformazione il cui unico risultato sia il trasferimento spontaneo di calore da un corpo che si trova a una certa temperatura a un corpo a temperatura maggiore." (Clausius)

Clausius esplicita il suo ragionamento legato all'aumento dell'entropia, Kelvin invece è molto preoccupato di conciliare i risultati sperimentali ottenuti da Joule con l'evidenza che, per esempio, i sassi scaldati dal sole non si mettono in moto!

Un'altra sua frase sintetizza la generalità della sua intuizione:

"Quantunque l'energia meccanica sia indistruttibile, vi è una tendenza universale verso la dissipazione di questa energia, tendenza che determina un arresto graduale del movimento e un progressivo impoverimento dell'energia potenziale esistente nell'universo materiale."

Se l'universo fosse finito e continuasse a obbedire alle leggi esistenti, il risultato consisterebbe necessariamente di uno stato di morte e di quiete."

Un concetto simile è formulato da Clausius nel 1865: **"Se immaginiamo che la stessa grandezza, che nel caso di un singolo corpo ho chiamato entropia, si formi in modo coerente per l'intero Universo, e se nello stesso tempo usiamo l'altro concetto, cioè l'energia, con il suo significato più semplice, possiamo formulare le leggi dell'Universo corrispondenti alle leggi della teoria meccanica del calore nella seguente forma semplice:**

- 1) L'energia dell'Universo è costante.
- 2) L'entropia dell'Universo tende a un massimo.*

Un'interpretazione dell'entropia alla luce della teoria cinetica dei gas è frutto dell'intuizione di L. Boltzmann. Nato a Vienna nel 1844, dopo la laurea in fisica è docente all'Università di Vienna, Graz e Monaco. Compie studi approfonditi sulla cinetica dei gas e sull'ipotesi di applicare

criteri probabilistici, senza una rigida osservanza per il determinismo meccanicistico.

La concezione deterministica (conoscendo completamente la situazione di un sistema è possibile la conoscenza completa di tutto il passato e di tutto il futuro del sistema stesso) è molto ben radicata nella cultura scientifica dell'epoca, per cui le teorie di Boltzmann sono un'accoglienza assai tiepida.

Boltzmann muore suicida a Dainù (Trieste) nel 1906.

Boltzmann considera i gas costituiti da un grande numero di molecole, soggette alle leggi della dinamica di Newton. Tutte le posizioni e velocità di queste molecole sono un "insieme di numeri" che si può corrispondere a un numero, cioè una sua caratteristica. In termini di pressione e di temperatura, ogni macrostato può essere ottenuto da diversi microstati. L'entropia S è una grandezza definita dalla relazione $S = k \ln W$, dove k è una costante (costante di Boltzmann) e p è il numero di microstati componenti il macrostato di massima probabilità. Un sistema, a causa degli urti fra molecole, evolve verso lo stato più probabile, quello cui corrisponde il maggior numero di microstati e ciò porta a un aumento di entropia.

Il primo principio della termodinamica afferma che l'energia non si crea né si distrugge, ma si trasforma. In un sistema isolato, l'energia totale è costante. Questo principio è una conseguenza diretta della conservazione dell'energia meccanica. In un sistema aperto, l'energia può essere scambiata con l'ambiente esterno. Questo principio è una conseguenza diretta della conservazione dell'energia meccanica.

Il secondo principio della termodinamica afferma che l'entropia di un sistema isolato tende a aumentare nel tempo. Questo principio è una conseguenza diretta della irreversibilità dei processi naturali. In un sistema aperto, l'entropia può essere scambiata con l'ambiente esterno.

Il terzo principio della termodinamica afferma che l'entropia di un sistema si avvicina a zero quando la temperatura si avvicina a zero assoluto. Questo principio è una conseguenza diretta della quantizzazione dell'energia.



William Thomson, barone di Kelvin, detto Lord Kelvin, nasce a Belfast nel 1824. Dopo un'infanzia a Glasgow, si iscrive all'università di Glasgow nel 1841, dove si laurea in ingegneria nel 1845. Si occupa di ingegneria e di fisica. Fino al '52 svolge attività tecnica per essere poi impegnato in sviluppi ingegneristici della termodinamica, in cui formula alcune sue famose leggi, alcune delle quali sono state brevettate. Si interessa anche a lungo di elettromagnetismo. Muore nel 1907.



Rudolf E. Clausius nasce nel 1822, 14 giugno, figlio di un pastore protestante. Entusiasta di tutto il mondo naturale, fin da piccolo, viene educato dal padre fino al liceo di Braunsweig, si iscrive all'università di Berlino. Dopo la precoce morte di sua madre, continua a studiare occupandosi contemporaneamente di quattro fratelli minori. Finisce a ottenere il dottorato ma solo nel '50, con la pubblicazione della sua opera sull'energia. Ottiene una cattedra prestigiosa nella Scuola dell'Ingegneria e si occupa per passare presto al Politecnico di Zurigo. L'altro suo capolavoro, sull'entropia, è del '68. Muore nell'83.



Boltzmann

Lord Kelvin
Youis
M. Stran

Il ciclo di Carnot

