

Una teoria è tanto più importante quanto maggiore è la semplicità delle sue premesse, tanto più diversi sono i tipi di cose che correla e quanto più esteso è il campo della sua applicabilità. Di qui, la profonda impressione che ho ricevuto dalla termodinamica classica. È la sola teoria fisica di contenuto universale di cui sono convinto che nell'ambito di applicabilità dei suoi concetti di base non verrà mai superata.

Albert Einstein¹

Il merito principale di una teoria è quello di consentire di indirizzare gli esperimenti, senza impedire lo sviluppo della teoria vera quando questa si manifesta.

James Clerk Maxwell²

LA STAFFETTA DELLA TERMODINAMICA

Alla scoperta della termodinamica attraverso i personaggi che l'hanno studiata

Forse qualcuno già conosce il fenomeno della svestizione paradossale: se una persona cade nell'acqua fredda, il corpo reagisce immediatamente e trasferisce tutto il calore dalle zone periferiche agli organi vitali, facendo diventare la pelle più fredda dell'acqua. Per questo motivo, l'uomo percepisce l'acqua come calda ed il caldo è talmente insopportabile che è portato a svestirsi, accelerando la propria fine.

Questo è solo uno fra i tanti esempi che avrebbero potuto essere scelti per presentare la termodinamica. Il calore, conosciuto dall'uomo fin dalle origini e direttamente collegato alla vita, ha sempre suscitato domande e riflessioni, ma vedremo che le risposte non sono sorte facilmente. Lo studio della termodinamica si è sviluppato, principalmente, tra il 1700 e il 1850, in concomitanza con la Rivoluzione Industriale, dalla quale prende avvio. Esso costituisce un caso a sé nel campo della fisica: infatti, la riflessione è stata preceduta dalla tecnologia, ovvero la teoria ha seguito le applicazioni pratiche. Non è l'unico aspetto caratteristico della termodinamica: *I vari personaggi che la popolano realizzano una specie di staffetta che parte dal nulla e arriva ad affermazioni sofisticate.* [5]



Il punto di partenza è stato il tentativo di misurare il calore: Galilei inventò, proprio con questo scopo, il termoscopio (fine 1500) che, per quanto rudimentale, per l'epoca costituisce uno strumento avveniristico. Citando dal Catalogo multimediale dell'Istituto e Museo di Storia della Scienza di Firenze:

Il termoscopio è costituito da una caraffa di vetro della grandezza di un uovo con un lungo collo. Questa caraffa viene riscaldata con le mani e immersa parzialmente, in posizione rovesciata, in un recipiente pieno di acqua. Quando veniva sottratto alla caraffa il calore delle mani, si osservava che l'acqua saliva nel collo. L'esperienza evidenziava le variazioni della densità dell'aria prodotte dalle variazioni di temperatura.

Segré sostiene che “potremmo arbitrariamente segnare la data d'inizio dello studio scientifico del calore facendola risalire alla costruzione dei primi termometri dell'Accademia del Cimento, attorno al 1650”. Infatti, secondo Michael Guillen questo strumento permette la partenza della terza teoria del calore: “Il calore è ciò che modifica l'altezza della colonna di un termometro”. Questa teoria costituisce un serio passo avanti rispetto alle precedenti, di tipo più soggettivo: il primo tentativo risale agli antichi greci, “Calore è ciò che produce la sensazione di caldo”, ma l'esperienza stessa ci dimostra l'inconsistenza di questa definizione. Infatti, basta considerare l'esempio citato dallo stesso Einstein:

*Il nostro senso tattile ci avverte distintamente che un corpo è caldo ed un altro freddo. Tuttavia tale criterio è meramente qualitativo, affatto insufficiente per una valutazione quantitativa e talvolta perfino ambiguo. È facile provarlo con un notissimo esperimento, quello dei tre recipienti contenenti rispettivamente acqua fredda, tiepida e calda. Se immergiamo una mano nell'acqua fredda e l'altra nella calda riceviamo un messaggio di freddo dalla prima e di caldo dalla seconda. Se dopo ciò immergiamo ambo le mani nell'acqua tiepida, i due messaggi che riceviamo, uno per mano, sono contraddittori. Per la medesima ragione un eschimese ed un aborigeno delle terre equatoriali che s'incontrassero a Milano, in un giorno di primavera, manifesterebbero opinioni assai diverse nel giudicare se il clima è caldo o freddo.*³

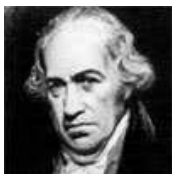
¹ [6] citato a pag. XIII nella Presentazione

² Lawrence Krauss, *Paura della fisica*, Raffaello Cortina Editore, Milano, 1994, citato a pag. 32

³ [4] pag. 49: “Il calore è una sostanza?”

Il secondo tentativo ha invece la seguente formulazione: “Quando il calore *fluisce all’interno* del nostro corpo, produce una sensazione di caldo; quando ne *fuoriesce*, produce una sensazione di freddo.” Ma il fenomeno della svestizione paradossale può essere utile proprio per spiegare l’inesattezza di questa nuova teoria.

Nel Seicento, gli scienziati continuarono l’opera di perfezionamento del termoscopio di Galilei e nel 1714 venne inventato il primo termometro standardizzato, ovvero nella forma in cui lo conosciamo noi oggi: il capillare di vetro contenente mercurio, la cui lunghezza è direttamente proporzionale alla temperatura. Il merito va a GABRIEL DANIEL FAHRENHEIT (1686-1736), fisico e ingegnere tedesco. Egli scelse una scala di misurazione molto particolare: il grado “zero” corrispondeva alla temperatura di congelamento dell’acqua salata⁴ e, per questo motivo, la temperatura di congelamento dell’acqua distillata è 32° F e la temperatura di ebollizione corrisponde a 212° F, con una differenza di 180° F tra le due temperature “estreme”⁵. Ma una simile scala di misurazione non era molto comoda, tant’è che



nel 1742 ANDERS CELSIUS (1701-1744), un astronomo danese, ideò una scala più semplice: lo zero corrispondeva al punto di ebollizione dell’acqua, il 100 al punto di congelamento. Successivamente, modificò ulteriormente la scala, scambiando fra di loro la temperatura di ebollizione e quella di congelamento. In ogni caso, *la realizzazione di una scala più scientifica e indipendente da qualsiasi tipo di sostanza richiese circa cento anni.* [1]



I nuovi termometri determinarono una piccola rivoluzione: nacquero stazioni meteorologiche per le rilevazioni di temperature e si poté utilizzare il termometro per misurare la temperatura corporea. In questo caso, il procedimento non era semplice e poteva volerci anche un’ora per avere un risultato attendibile, in quanto la persona doveva alitare sul bulbo contenente il mercurio. Ma nel 1866, il fisico britannico Thomas Clifford Allbutt (1836-1925) inventò il termometro come lo conosciamo oggi. Misurando la temperatura corporea si poté notare che si manteneva pressoché costante, a tutte le latitudini e in qualunque stagione: questo fatto generò perplessità e ulteriori domande riguardo la natura del calore.

LA RIVOLUZIONE INDUSTRIALE

Nel trattato *Spiritualia seu pneumatica* di Erone di Alessandria (matematico e ingegnere, la cui collocazione cronologica oscilla tra I sec. a.C. e II sec. d.C.), viene descritta la prima macchina termica, con la quale si utilizza il calore per generare movimento, ovvero si trasforma l’energia termica in energia meccanica. Bisogna però aspettare oltre 1500 anni per la realizzazione del primo motore a vapore. Secondo Jannamorelli⁶, le ragioni di questo ritardo sono numerose e variegata:

- arretratezza nella tecnologia dei metalli
- separazione tra lavoro intellettuale e lavoro manuale
- disponibilità di energia rinnovabile in grado di coprire il fabbisogno: energia umana (schiavitù), energia animale, energia data dalla costruzione dei mulini ad acqua.

Nel 1601, Giovanni Battista Della Porta (1535-1615) ideò una macchina in grado di spingere l’acqua ad una certa altezza, a partire da un recipiente nel quale era stato immesso del vapore. Nel 1615, Salomon de Caus (1576-1626) (*Les raisons des forces mouvantes*) utilizzò il vapore per ottenere degli zampilli d’acqua nel giardino reale di Luigi XIII.

Il progresso della fisica e la scoperta della pressione atmosferica da parte di Evangelista Torricelli (1608-1647) nel 1643 diedero un notevole impulso all’utilizzo del vapore per generare lavoro meccanico. *Verso la fine del XVII secolo furono fatti diversi tentativi miranti a ottenere il vuoto in un contenitore per sfruttare la pressione atmosferica allo scopo di produrre lavoro meccanico*⁷. Nel 1661, Otto von Guericke (1602-1686) ottenne del lavoro meccanico dalla pressione atmosferica e nel 1673 Christiaan Huygens (1629-1695) utilizzò in maniera del tutto pacifica la polvere da sparo, ottenendo con la sua esplosione il vuoto e, di conseguenza, l’innalzamento di un peso. DENIS PAPIN (1647-1712), suo assistente, continuò il suo lavoro, inventando la pentola a pressione:



Papin scoprì che quando l’acqua bolliva e si trasformava in vapore acqueo, occupava molto più spazio di quando era allo stato liquido. Un litro d’acqua, quando bolle, si trasforma in quasi duemila litri di vapore acqueo. In una pentola chiusa ermeticamente, lo spazio diminuisce sempre di più, man mano che l’acqua si trasforma in vapore. Di conseguenza, il vapore preme contro le pareti, il coperchio e il fondo della pentola. Si dice allora che aumenta la pressione, e da qui il nome della pentola. [3]

⁴ Secondo altre fonti, invece, corrispondeva alla temperatura più bassa che Fahrenheit era riuscito a raggiungere nel suo laboratorio

⁵ La scala Fahrenheit è tuttora utilizzata solo negli Stati Uniti e in Giamaica

⁶ Curatore dell’edizione critica e della traduzione de “La potenza motrice del fuoco”, di Sadi Carnot

⁷ [6] in “Le origini della termodinamica” di Jannamorelli

Proprio grazie alla pentola, Papin capì come il vapore poteva essere utilizzato per produrre lavoro. Ideò una pentola alla quale aveva applicato un pistone: il vapore, uscendo, azionava il pistone, generando lavoro meccanico. Purtroppo, non riuscì mai, con le sue macchine, a superare la fase della sperimentazione: restarono inutilizzate in laboratorio.

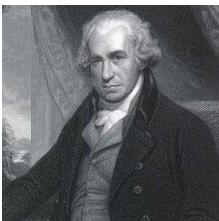
La necessità di queste macchine divenne sempre più forte: in Inghilterra, erano state disboscate aree estese per fornire legname come combustibile e per costruire le navi, era quindi necessario ricorrere ad un altro combustibile, il carbone, ma per averlo bisognava scavare profonde miniere. Le macchine a vapore servivano quindi per pompare l'acqua dalla miniera sottostante in superficie, rendendo meno disagiati le condizioni di lavoro dei minatori. Nel 1698, Thomas Savery (1650-1715), capitano del genio militare inglese, trasformò i cimeli da laboratorio di Papin nel suo *The miner's friend*⁸ (L'amico del minatore), macchina utile per aspirare l'acqua dai pozzi minerari.

Il più grande impulso allo sviluppo della macchina a vapore venne dato da Thomas Newcomen (1664-1729), commerciante di utensili di ferro e fabbro di Dartmouth, che inventò, nel 1712, una macchina indipendentemente da Savery e introdusse anche notevoli innovazioni, che risolsero i problemi dell'industria dello stagno in Cornovaglia e consentirono lo sfruttamento di miniere di carbone profonde, nell'Inghilterra settentrionale. Questa macchina ebbe un tale successo che in Inghilterra ne vennero costruite due all'anno per circa sessant'anni.

Un contenitore d'acqua veniva riscaldato, e il vapore acqueo finiva in un cilindro in cui spingeva verso l'alto un pistone. Quando il pistone arrivava in cima al cilindro, il vapore si raffreddava e, raffreddandosi, ritornava acqua, e occupava molto meno spazio, cosicché il pistone ridiscendeva nel cilindro. Quando arrivava in fondo, nel cilindro veniva immesso di nuovo del vapore, e il pistone tornava a salire. La macchina di Newcomen funzionava sul moto alternato del pistone del cilindro, che continuava finché lui aggiungeva acqua nel contenitore (che venne chiamato caldaia) e combustibile al fuoco. [3]

Queste macchine vennero perfezionate da John Smeaton (1724-1792), ingegnere inglese che riuscì quasi a raddoppiare il rendimento della macchina di Newcomen. Per quanto innovative, queste macchine avevano un basso rendimento, ma si diffusero comunque, perché utilizzate principalmente nelle miniere e, quindi, per il loro funzionamento gli imprenditori usavano il carbone più scadente, senza dover per questo motivo sopportare una spesa ingente. *L'ultimo esemplare fu demolito nel 1934 dopo che aveva funzionato per oltre un secolo senza seri inconvenienti*⁹.

La strada tracciata da Smeaton non generò ulteriori progressi, anche se l'ingegnere aveva intuito che la chiave del rendimento di una macchina era da ricercarsi negli urti che si creavano tra la ruota e l'acqua.



Le novità più grandi si ottennero da JAMES WATT (1736-1819), artigiano costruttore e riparatore di strumenti scientifici, assunto all'Università di Glasgow nel 1757. *La conoscenza dei maggiori scienziati dell'epoca, tra i quali Black e Maclaurin, fecero di Watt un inventore-imprenditore diverso da tutti gli altri in quanto nelle sue officine fu sempre dato spazio alla ricerca scientifica*¹⁰. Tra gli incarichi che gli vennero dati dall'Università, uno consisteva nella riparazione di un modellino della macchina a vapore di Newcomen. Per risolverlo, parlò con gli scienziati che aveva attorno ed ebbe così occasione di imparare le leggi della fisica. Il modello costruito per l'Università era troppo piccolo, secondo Watt, e non avrebbe mai funzionato. *Una*

domenica del 1780, mentre faceva una passeggiata nel parco [3], Watt ebbe la geniale idea di separare le due azioni della macchina: l'azione di raffreddamento del vapore per ottenere di nuovo l'acqua e l'azione di riscaldamento dell'acqua per ottenere il vapore. La prima macchina fu pronta già tre settimane dopo, ma a causa di difficoltà finanziarie e tecnologiche – era difficile e costosa da costruire – la produzione ebbe inizio solo nel 1776, grazie al finanziamento di Matthew Boulton, proprietario di una fabbrica inglese. *I macchinari di tale fabbrica erano azionati tramite una ruota idraulica, e dipendevano quindi dalla corrente del fiume, che ogni estate si prosciugava: le macchine dovevano essere fermate e i lavoratori licenziati. Il proprietario era interessato a far funzionare la fabbrica a tutte le ore della giornata, per l'intero anno.* [3] Watt e Boulton fondarono una ditta che avrebbe prodotto macchine a vapore e, in quattro anni, furono costruite 325 macchine.

Nel 1800, allo scadere del brevetto di Watt, cominciarono ad essere prodotte altre macchine, ottenute da ulteriori miglioramenti. Il ritmo di progettazione aumentò vertiginosamente, ma si era ancora lontani dalla sistemazione teorica.

Nel 1804, Richard Trevithick (1771-1833) utilizzò la macchina a vapore per far procedere un carrello lungo dei binari ed inventò così la locomotiva a vapore, perfezionata da George Stephenson (1781-1848) nel 1814. La prima ferrovia del mondo, tra Stockton e Darlington, venne inaugurata nel 1825 e nel 1840 si era già arrivati a ottomila chilometri.

Grazie all'invenzione del treno, i tempi per raggiungere i luoghi lontani diminuirono notevolmente e anche le invenzioni poterono diffondersi più facilmente.

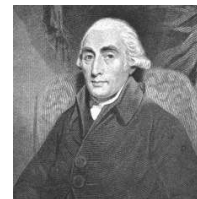
⁸ Per vedere un esempio dell'amico del minatore in funzione: <http://www.racine.ra.it/ungaretti/SeT/macvapor/saverani.html>

⁹ [6] in "Le origini della termodinamica" di Jannamorelli

¹⁰ [6] in "Le origini della termodinamica" di Jannamorelli

LA TEORIA DEL FLOGISTO

Nel 1760, JOSEPH BLACK (1728-1799), un chimico scozzese che lavorava all'Università di Glasgow (dal 1756), riscaldò in forno uguali quantità di mercurio e di acqua, controllando poi le rispettive temperature. Stranamente, il mercurio risultò molto più caldo dell'acqua. Il fenomeno pareva non avere alcuna spiegazione, visto che entrambe le sostanze erano state fatte scaldare nello stesso forno e per lo stesso tempo. Questo mise in evidenza che "supporre che due corpi contengano quantità eguali di calore soltanto perché le loro temperature sono eguali sarebbe, come diceva Black: ... *opinare assai avventatamente. Sarebbe confondere la quantità di calore in corpi diversi, con la sua forza generale od intensità, ancorché sia chiaro che queste sono due cose diverse, le quali dovrebbero essere tenute distinte nel riflettere sulla distribuzione del calore*". [4]



Il risultato a cui è arrivato Black è sotto gli occhi di tutti: è il fenomeno che *si riscontra normalmente al mare, sulla spiaggia, allorché, pur essendo la sabbia troppo rovente per passeggiarvi a piedi nudi e l'acqua troppo fredda per fare il bagno, l'aria è perfetta per starsene sdraiati su un asciugamano. La sabbia, l'acqua e l'aria hanno temperature completamente diverse tra loro, anche se tutte sono esposte allo stesso sole*. [2]

Secondo Guillen, dalla terza teoria del calore si passa, grazie a Black, a quella del flogisto: "*Il calore è un fluido calorico invisibile, privo di peso, indistruttibile*". E questo decretò la fine dell'era dei termometri, che servono per misurare la temperatura, non il calore contenuto in un oggetto.

La teoria del flogisto venne inventata da J.J. Becher (1635-1682), uno scienziato tedesco, e poi perfezionata da G.E. Stahl (1660-1734), medico e chimico tedesco:

La teoria del flogisto postulava l'esistenza di una 'sostanza' – il flogisto – che si pensava fosse contenuta in tutti i corpi combustibili: il flogisto si liberava sia quando veniva bruciato materiale organico, sia trattando metalli con il calore in aria libera. Quest'azione trasformava i metalli in metalli deflogisticati, quelli che noi oggi chiamiamo ossidi. [1]

La teoria del flogisto ha tenuto banco per parecchi anni, conquistando i fisici e aiutando a interpretare numerosi esperimenti:

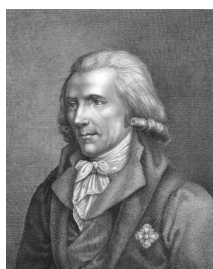
- la spiegazione all'esperimento di Black poteva basarsi sull'esempio della capacità delle persone di reggere gli alcolici: per quanto due persone diverse ingeriscano la stessa quantità di alcol, esse avranno una diversa reazione. Lo stesso dicasi per mercurio e acqua: evidentemente le due sostanze non avevano la stessa capacità di reggere il calore
- la dilatazione di un oggetto sottoposto a un aumento di temperatura è dovuta all'assorbimento del flogisto da parte dello stesso, un po' come avviene per una spugna imbevuta d'acqua
- due oggetti sfregati l'uno contro l'altro si scaldano, un po' come succede con la polvere che può uscire da un materasso quando lo si percuote.

Per individuare questo fluido invisibile e privo di peso, Joseph Black inventò il calorimetro:

Sostanzialmente, l'apparecchio di Black consisteva in un vaso ben isolato, attraverso il cui coperchio passava un termometro. Un materiale, bruciato al suo interno, emanava tutto il calore – tutto il fluido calorico – che conteneva nell'aria chiusa nel vaso; l'aumento di temperatura che ne derivava veniva misurato dal termometro.

Ma come si poteva essere sicuri che la lettura del termometro esprimesse l'effettivo calore emanato, dal momento che il termometro stesso era stato screditato? La spiegazione era che in questo caso lo strumento misurava sempre il calore rilasciato nell'aria chiusa all'interno di un vaso, reagendo costantemente nello stesso modo nei confronti della medesima quantità di calore: da un'unità di calore si ricavava una determinata rilevazione della temperatura, da una quantità due volte maggiore se ne ricavava una doppia, e così via. [2]

Per un intero secolo, nonostante i numerosi esperimenti, questa teoria continuò a resistere.



Con BENJAMIN THOMPSON, CONTE RUMFORD (1753-1814), ci fu un effettivo progresso, che incrinò la teoria del flogisto. Americano, durante la guerra di Indipendenza si schierò con gli inglesi e, abbandonata Boston nel 1776, si rifugiò in Inghilterra, dove divenne sottosegretario nel *Colonial Office*. Ma i suoi interessi in ambito tecnico lo spinsero a fare esperimenti anche su cannoni ed esplosivi e per questo venne eletto nella Royal Society, nel 1779.

America, Inghilterra, Germania... il conte Rumford ebbe una vita nient'affatto tranquilla e lasciò il segno nella storia della termodinamica grazie al suo lavoro sui cannoni: *egli mostrò infatti che una parte del lavoro compiuto durante l'alesatura della bocca da fuoco si trasforma in calore e, usando un attrezzo appositamente smussato, mostrò anche che il calore era prodotto in*

continuazione purché si fornisse lavoro e non era direttamente correlato al taglio del metallo. [1] Tale esperimento venne presentato nel gennaio 1798 alla Royal Society.

L'interpretazione dell'esperimento restò dubbia: secondo Rumford e, dopo di lui, Thomas Young (1773-1829), il risultato era incompatibile con la teoria del flogisto: la causa del calore doveva essere un moto molecolare o un insieme di vibrazioni.

Seguendo i lavori di Rumford, Humphry Davy (1778-1829), al quale venne conferita da Rumford stesso la direzione della Royal Institution a Londra, continuò ad avanzare i propri dubbi sulla teoria del flogisto: sfregando fra di loro due pezzi di ghiaccio si ottiene il loro scioglimento e siccome il calore specifico è maggiore di quello del ghiaccio, la teoria del flogisto non aveva più ragione di esistere.

Anche se la terminologia era ancora confusa, e venivano usate indifferentemente le parole "calore" e "calorico", le basi della termodinamica erano state gettate. Per questo motivo, tra il 1780 e il 1836, la teoria del calorico e la teoria del calore, considerato come lavoro, convivevano nell'ambiente dei fisici francesi. [6]

IL SECONDO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA

Per il secondo principio della termodinamica, l'uomo chiave si chiama SADI CARNOT (1796-1832). Carnot può essere considerato non solo il padre del II principio, ma anche il precursore del principio di conservazione dell'energia e, in questo senso, può essere ritenuto il fondatore della termodinamica. [6]

Carnot è una figura singolarissima nella scienza e, per la grandezza dei risultati raggiunti e per la brevità della vita, ricorda i suoi romantici contemporanei, i grandi matematici Niels Henrik Abel e Évariste Galois. [1]

Sadi Carnot è figlio di Lazare (1753-1823), che fu un brillante ministro della guerra di Napoleone I¹¹, ma scrisse anche vari saggi scientifici e dimostrò il teorema del coseno che porta il suo nome. Sadi crebbe nel periodo più fulgido per l'impero francese e, dopo aver assistito alla sconfitta del suo Paese a opera di Inghilterra, Prussia, Austria e Russia, egli cominciò a desiderare che la Francia recuperasse potenza e dignità sfruttando l'energia del vapore. [2]



Sadi studiò all'École Polytechnique, ebbe diversi incarichi nell'esercito e, come ingegnere, nei servizi civili. Nel 1828 abbandonò l'esercito, ritirandosi con il grado di capitano. Nel 1832 si ammalò gravemente di scarlattina e, ripresosi da questa, fu colpito dal colera e morì il 24 agosto del 1832 a soli 36 anni.

Studiando le macchine a vapore inglesi, Carnot si rese conto che erano più efficienti rispetto a quelle francesi, vale a dire producevano la stessa quantità di lavoro con meno carburante. Partendo dal presupposto che i risultati raggiunti fino a quel momento erano puramente empirici, ovvero non avevano alle spalle uno studio teorico del problema, Sadi cominciò a studiare con sempre maggiore coinvolgimento l'argomento. Voleva capire i fondamenti teorici, nella speranza che essi avrebbero aiutato il progresso pratico. [1]

Durante i suoi studi, Carnot seguiva la teoria del calorico e, per questo motivo, schematizzò il funzionamento della macchina a vapore ricorrendo all'analogia con una turbina ad acqua, ma gli sfuggì una differenza fondamentale: mentre la quantità d'acqua che entra nella turbina è uguale a quella che ne esce, ovvero è costante, la quantità di calore diminuisce, perché il calorico non si conserva.

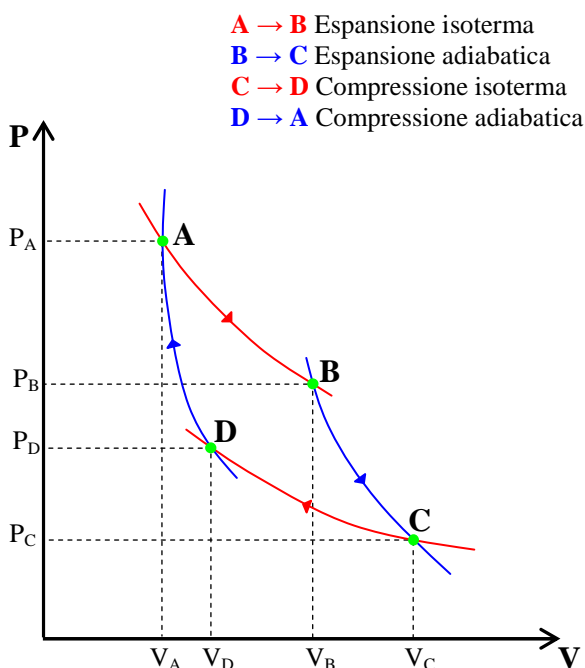
A seguito dei suoi studi, scrisse un libretto di sole 118 pagine, intitolato *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, pubblicato nel 1824, in un'edizione di 600 copie, a sue spese. Esattamente come nel caso del *Saggio sulle macchine in generale* del 1783, scritto dal padre, all'interno dell'opera di Carnot il formalismo è ridotto, per lasciare spazio ad una spiegazione discorsiva e accessibile a tutti.

Purtroppo il libretto passò praticamente inosservato tra i contemporanei, ma fu notato da Émile Clapeyron (1799-1864). Allievo, come Carnot, dell'École Polytechnique, dopo la laurea andò in Russia, dove rimase dodici anni, lavorando come ingegnere e insegnando presso la scuola di ingegneria di Pietroburgo. Rientrato in Francia, nel 1833 ebbe modo di conoscere il libretto di Carnot: lo studiò, lo riformulò in maniera meno discorsiva e lo pubblicò sul *Journal de l'École Polytechnique* nel 1834. Attraverso l'articolo di Clapeyron, nel 1849 Kelvin conobbe il libretto di Carnot e si rese conto che conteneva molte idee nuove e fondamentali per lo studio della termodinamica.

Carnot aveva notato che le trasformazioni eseguite dalla macchina dovevano costituire una successione di stati di equilibrio [1], in altre parole, la macchina doveva essere reversibile. Rappresentò la situazione mediante un ciclo, noto appunto come Ciclo di Carnot, ma attualmente esso è conosciuto attraverso la schematizzazione proposta da Clapeyron, in un diagramma pressione-volume. Il ciclo è composto da quattro trasformazioni tutte reversibili: due sono adiabatiche e due isoterme, come indicato nella figura della pagina seguente.

Tutte le macchine reversibili hanno lo stesso rendimento, inoltre non è importante quale sostanza si usi per il loro funzionamento: ciò che conta è che la macchina sia completamente reversibile.

¹¹ Dopo Waterloo, fu esiliato e morì a Magdeburgo



La grande scoperta di Carnot è costituita dal fatto che il rendimento di una macchina reversibile dipende solamente dalle temperature dei due serbatoi, ovvero:

Perché una macchina, che opera tra due serbatoi a temperatura costante, abbia il rendimento massimo, deve eseguire solamente trasformazioni reversibili. Tutte le macchine reversibili che operano tra le stesse due temperature, T_f e T_c , hanno lo stesso rendimento. [7]

Carnot ipotizzò che il calore ceduto al serbatoio freddo fosse uguale a quello ricevuto dal serbatoio caldo, commettendo un grave errore, ma, nonostante questo, la maggior parte delle deduzioni di Carnot restano valide e, modificando le affermazioni delle *Réflexions* sulla base della moderna teoria del calore, il libro resta attuale e fondamentale per la termodinamica.

Carnot aveva avuto alcune chiare premonizioni relative alla conservazione dell'energia (ovvero il primo principio), e la sua morte prematura probabilmente gli impedì di portarle a completa maturazione. [1] Lasciò in ogni caso delle note manoscritte, ma il fratello, che si occupò della sistemazione dei suoi lavori, non capì i risultati ai quali era pervenuto e le pubblicò solamente nel 1878, quando la termodinamica era ormai completata.

IL PRIMO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA

Carnot aveva creato la termodinamica, avviandone i metodi potenti e scoprendo il secondo principio. [...] Mayer, Joule ed Helmholtz avevano formulato il primo principio. [...] Il principio di conservazione dell'energia si sviluppò in un lungo periodo di tempo segnato da osservazioni e da generalizzazioni sempre crescenti, finché raggiunse, attorno alla metà del diciannovesimo secolo, una posizione centrale non solo per la fisica ma per ogni scienza. Esso è rimasto uno dei pilastri della scienza moderna, anche se, a causa delle scoperte di Einstein, ha dovuto essere combinato con il principio di conservazione della massa. [1]

È una strana coincidenza che quasi tutto il lavoro fondamentale concernente la natura del calore sia stato eseguito non già da professionisti, bensì da dilettanti di fisica. [4]

Nel 1814, in Baviera, nacque JULIUS ROBERT MAYER (1814-1878), un uomo la cui vita sarà tormentata, ma le cui idee, un giorno, sarebbero servite a Rudolf Clausius per cancellare la quarta teoria del calore. [2]

Dopo aver avuto un'educazione centrata sulla teologia, alla facoltà di medicina si rese conto che la teologia non poteva dare tutte le risposte. Inventò una teoria della creazione che non piaceva ai teologi, perché mancava il riferimento a Dio, ma non piaceva nemmeno agli scienziati, perché c'era il riferimento a una forza soprannaturale che lasciava pensare a Dio. A causa di questa eccentrica teoria, i pregiudizi da parte dei colleghi furono numerosi e lo segnarono per il resto della sua vita.

Nel 1840, a bordo di un mercantile olandese, partito da Rotterdam e in rotta per Surabaya in Indonesia¹², gli capitò, come medico, di praticare dei salassi (allora erano considerati un'ottima cura in molte occasioni). Si accorse così che più il mercantile si avvicinava ai tropici, più il sangue diventava rosso. La spiegazione di questo fenomeno per Mayer era che *solo una minima quantità dell'aria inspirata dai marinai era stata bruciata, mentre la maggior parte era stata assorbita dal sangue, che era diventato più rosso. Infatti il clima era diventato progressivamente più caldo. [2]*

Purtroppo, con i suoi precedenti e considerato che la teoria del calorico pareva avere solide basi, gli scienziati non presero nemmeno in considerazione le spiegazioni di Mayer. Le sue conclusioni lo portavano ad affermare che *il totale dell'energia dell'universo rappresentava una delle grandi costanti della vita; non era mai cambiato e non sarebbe mai cambiato in futuro. [2]*



¹² Secondo Segrè, il viaggio ricorda il viaggio di Darwin, che fu così importante per lo sviluppo della teoria dell'evoluzione



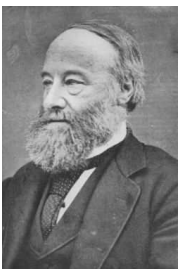
I pochi che lessero e studiarono l'articolo di Mayer, superando l'ostacolo dello stile filosofico che non coinvolgeva il lettore, bocciarono le sue teorie, in quanto parlava di trasformazioni dell'energia. Per gli studiosi dell'epoca, il calore era una forza indistruttibile e, come tale, non poteva essere trasformato.

Disperato perché le sue idee non trovavano consensi, sfiduciato perché non gli veniva riconosciuto alcun merito, assistette nel 1847 alla pubblicazione dell'opera di HERMANN LUDWIG VON HELMHOLTZ (1821-1894), *Sulla conservazione della forza*. Professore di fisiologia e, dal 1855, anche di anatomia a Bonn, alla stesura del saggio aveva già viaggiato in Inghilterra e stretto amicizia con alcuni scienziati inglesi, tra cui Kelvin. Nel suo saggio, si possono notare alcune analogie con il lavoro di Mayer (che lui non conosceva), anche se può vantare una struttura più solida e meno filosofica, visto che utilizza i valori numerici delle misure di Joule.

Il fatto che Helmholtz non avesse nemmeno citato il suo lavoro portò Mayer sull'orlo di un esaurimento nervoso. Toccò il fondo con l'arresto durante la rivoluzione del 1848. Liberato poco dopo, non riuscì più a riprendersi. Due anni dopo, a soli trentasei anni, si sentiva ormai finito: il suo lavoro non era stato considerato da nessuno, gli scienziati dell'epoca non lo annoveravano nemmeno nelle loro fila, il suo lavoro era stato completamente inutile. Disperato e frustrato, tentò il suicidio buttandosi dalla finestra del suo appartamento del secondo piano, ma non riuscì ad uccidersi. Fortunatamente.

Infatti, la sua opera, scarsamente considerata in un primo tempo, ebbe degli apprezzamenti maggiori solo in seguito. Helmholtz lesse il suo articolo solo nel 1852 e gli diede pieno credito, Clausius ebbe con lui uno scambio epistolare. Nel 1870 divenne socio corrispondente dell'Accademia francese e nel 1871 ricevette la 'Copley Medal' della Royal Society. Morì di tubercolosi nel 1878.

Pur riconoscendo i suoi meriti non sono convinto che Mayer abbia esercitato un grande influsso sulla fisica e – forse esagerando un poco – egli fu e rimase sempre un dilettante. Senza di lui, la conservazione dell'energia sarebbe emersa lo stesso. [1]



Il primo scienziato che impostò le nuove idee su solide basi sperimentali e che riuscì a determinare valori numerici precisi e duraturi fu Joule. [1] Figlio di un ricco birraio, JAMES PRESCOTT JOULE (1818-1889) nacque la vigilia di Natale del 1818 a Manchester. Educato privatamente, non godeva di buona salute, visto che era leggermente deforme; attratto dai giochi meccanici fin da piccolo, diciottenne comincia a realizzare delle ricerche, con le quali sperava di poter realizzare il moto perpetuo. Studiò la corrente e trovò che *la trasformazione di calore in lavoro e viceversa avveniva in rapporto costante.* [1] Lavorava da solo, senza alcuna sovvenzione, costruendo i propri macchinari nella birreria del padre o a casa propria.

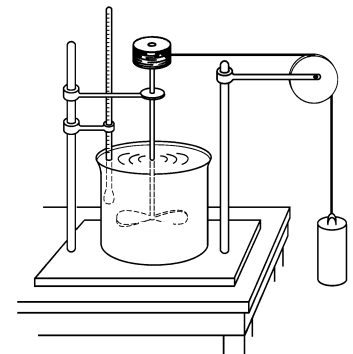
Per dimostrare l'equivalenza tra calore e lavoro, realizzò numerosi e ingegnosi esperimenti. A scuola, ci limitiamo a presentarne uno, ma esso non fu che uno dei tanti da lui realizzati.

Joule aveva un'eccellente tecnica di osservazione, sapeva ragionare in modo chiaro e quantitativo, pur non essendo un matematico e sapeva eseguire esperienze di precisione, eliminando gli effetti non importanti ai fini dell'esperimento (questo particolare aspetto ha del geniale, viste e considerate le condizioni nelle quali si trovava a lavorare nel suo laboratorio).

Ebbe occasione di incontrare Kelvin, con il quale avviò una proficua collaborazione.

Nel 1847 si sposò, ma la moglie morì nel 1854 lasciandogli due figli. Nel 1875 subì un tracollo finanziario e poté mantenersi solo grazie agli amici che gli assicurarono una pensione di 200 sterline l'anno per poter vivere, seppur modestamente.

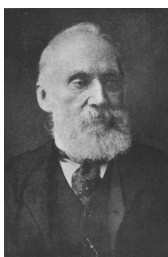
Nel 1850 venne eletto membro della Royal Society (a soli 32 anni) e ricevette la Royal Medal due anni dopo. I suoi meriti furono riconosciuti pubblicamente da varie istituzioni, ma purtroppo smise di lavorare e produrre in un'età ancora relativamente giovane. Infatti, mentre nella prima parte della termodinamica poté dare un grande contributo, nonostante le proprie lacune in campo matematico, non poté contribuire alla seconda parte, con Kelvin e Clausius. L'ultimo scritto porta la data del 1878 e Joule aveva solo sessant'anni. Visse fino all'età di 71 anni.



Due anni prima di morire disse al fratello: "Ho fatto due o tre cosette, ma nulla da farci del chiasso". [1]

LORD KELVIN E LA TEMPERATURA ASSOLUTA

Il 26 giugno 1824 nasce a Belfast WILLIAM THOMSON, LORD KELVIN (1824-1907); figlio di un professore di ingegneria, da lui apprese le basi della matematica. Il padre ottenne la cattedra all'università di Glasgow e il figlio poté



così frequentare l'università dall'età di dieci anni¹³. Fra il 1838 e il 1841 approfondì le proprie conoscenze in campo fisico e poté così rendersi conto dell'importanza della matematica per approfondire le teorie fisiche. Nel 1841 entrò a Cambridge, dove pubblicò alcuni articoli di matematica, raffinò il proprio gusto musicale e, nel complesso, si godette la vita, mentre il suo lavoro veniva rapidamente riconosciuto [1]. Si era creato una tale reputazione che quando, quell'anno, affrontò i tripos e si classificò secondo, fu una grande delusione, perché tutti si aspettavano che li avrebbe vinti.

Nel 1845 fu a Parigi, dove completò la propria educazione come assistente di laboratorio di Regnault¹⁴. Dopo aver conosciuto il lavoro di Carnot attraverso l'opera di Clapeyron, decise di leggerne il libro, ma solo nel 1848 poté vedere per la prima volta una copia de *La puissance motrice du feu*. Dopo l'intervento di Clapeyron, anche quello di Kelvin contribuì a proseguire ed estendere gli studi di Carnot.

Tornò a Glasgow nel 1846, per prendere possesso della cattedra di fisica, liberatasi proprio quell'anno, e per la quale non solo il padre agì perché potesse accedervi, ma ci furono anche le raccomandazioni di alcuni grandi, come Stokes, de Morgan e Regnault. Mantenne il posto da insegnante per ben 53 anni.

L'università aveva una lunga tradizione nel campo della ricerca applicata e, tra i suoi 'meccanici fabbricanti di strumenti', contava James Watt e Joseph Black. [1] Kelvin non sarebbe stato da meno, vista la reputazione che lo precedeva.

Come prima cosa, cominciò ad organizzare il proprio insegnamento: *adattò un seminterrato a uso di laboratorio dove i suoi studenti potevano esercitarsi su problemi pratici spesso connessi alle sue proprie ricerche. Quel laboratorio fu uno dei primi nel suo genere e col tempo crebbe fino a diventare un valido aiuto per ricerche di elettrotecnica intraprese da Thomson con fini pressoché commerciali.* [1]

Pare che fosse un insegnante brillante, ma non in grado di semplificare la lezione per i propri studenti, a causa di numerose digressioni, che non aiutavano certamente la comprensione. *Durante la lezione, la sua mente veloce e fertile poteva facilmente saltare a nuovi soggetti, dimenticando gli argomenti principali.* [1] Eppure, tra i suoi alunni, molti fecero strada nel campo dell'elettricità.

Nel 1848 (ha solo 24 anni!) propone la scala di temperatura assoluta, basandosi sui propri studi e sulla teoria formulata da Carnot. Kelvin ebbe l'idea di definire la temperatura per mezzo di una macchina di Carnot, il cui rendimento è indipendente dal fluido. Come Carnot, era convinto della bontà della teoria del flogisto e considerava il calorico una quantità che si manteneva costante nel suo passaggio attraverso la macchina termica. Tutto questo, nonostante fosse a conoscenza dell'opera di Joule, che metteva in dubbio questa teoria. Infatti, Kelvin e Joule si incontrarono durante un convegno della British Association del 1847, nel quale, come afferma lo stesso Kelvin, ebbe *"l'occasione di parlare e discutere insieme per una buona ora attorno a tutto ciò che ognuno di noi sapeva di termodinamica. Acquistai idee che prima di allora non mi erano mai venute in mente e credo di aver suggerito anch'io a Joule un qualcosa di degno delle sue riflessioni parlandogli della teoria di Carnot"*. [1] All'incontro fece seguito una collaborazione intensa e fruttuosa, non solo dal punto di vista teorico, ma anche sperimentale.

Nella sua lunga vita (morì nel 1907, all'età di 83 anni) finì con l'essere considerato come il maggior fisico dell'Impero britannico e fu parimenti ammirato e onorato da tutti gli scienziati del mondo. Egli meritava questi riconoscimenti, che peraltro erano facilitati dalle imprese di carattere pratico a cui si dedicò. Esse gli portarono non solo gloria, ma anche ricchezza e popolarità in ambienti non professionalmente legati alla fisica. [1]

Kelvin viene ricordato non solo per l'enorme contributo dato alla teoria della termodinamica, ma anche per la soluzione di numerosi altri problemi, con i quali mostrò di avere una grande professionalità. Non si può dimenticare, ad esempio, il contributo dato al progresso del telegrafo elettrico. *Il progetto di un cavo transatlantico capace di legare l'Europa all'America stava diventando un'impresa realizzabile ed economicamente redditizia.* [1] Venne eletto nel consiglio di amministrazione dell'Atlantic Telegraph Company e questo cambiò completamente la sua vita, con il nuovo peso di responsabilità che questo comportava. Ma Kelvin seppe farvi fronte e con grande professionalità affrontò i problemi tecnici che l'impresa si trovò ad affrontare. Cominciò il lavoro pratico nel 1856, con la messa in opera di un cavo che però si spezzò dopo 330 miglia nautiche. Dopo averne studiato le cause, si procedette con una nuova posa nel 1858 e, nonostante una violenta tempesta che mise in pericolo l'intera operazione, Kelvin riuscì ad effettuare le prime trasmissioni, il 5 agosto. Purtroppo il cavo funzionò solo per un mese circa. Nel 1865 ci fu un nuovo tentativo, con un cavo migliore, che però si ruppe nel mezzo dell'Oceano Atlantico. Nel 1866, finalmente, il tentativo ebbe successo e William Thomson ricevette il titolo di 'Sir'.

Per quanto riguarda la sua vita privata, nel 1860 cadde giocando sul ghiaccio e si ruppe malamente la gamba: per questo motivo, dato che la frattura era molto grave, restò zoppo per tutta la vita. Nel 1870 gli morì la moglie, dopo diciotto anni di matrimonio e la perdita fu molto dolorosa per lui. Nel 1871, dopo aver acquistato uno yacht da crociera, comincia a viverci, continuando a risolvere problemi di fisica, ed ispirandosi per le sue ricerche a quanto gli capitava di osservare durante la navigazione. Proprio durante i suoi viaggi, inventò, nel 1876, una speciale bussola magnetica, che funzionava anche per navi di ferro: venne adottata dalla flotta inglese e restò in uso fino all'introduzione della moderna

¹³ L'insegnamento universitario a Glasgow era, nei primi anni, elementare

¹⁴ Henri-Victor Regnault (1810 –1878) chimico e fisico francese. Si dedicò anche all'attività pratica e fu ingegnere capo delle miniere dal 1847.

bussola giroscopica. Nel 1873 incontrò Miss Blandy, figlia di un ricco proprietario terriero e la sposò l'anno dopo. Nel 1892 fu nominato *pari* ed entrò a far parte della Camera dei Lords. In tale occasione prese il titolo di *Baron Kelvin of Largs*.

Nel 1861 entrò a far parte di un comitato della British Association, per determinare delle unità di misura assolute per il mondo dell'elettromagnetismo. Dopo un lavoro di alcuni anni, al Congresso Internazionale di Parigi del 1881 e a quello di Chicago del 1893, le nuove unità furono accettate ed entrarono a far parte dell'uso comune.

Lord Kelvin continuò a essere straordinariamente attivo sino a tarda età, interessandosi di ogni nuovo sviluppo della fisica. Vide le scoperte dei raggi X e della radioattività, e fu uno dei primissimi ammiratori e protettori dei coniugi Curie. La sua fisica, però, stava diventando antiquata: criticò perfino la teoria elettromagnetica della luce [1] e tutto questo perché aspirava ad una fisica che potesse ridursi interamente alla meccanica.

Alla sua morte, avvenuta il 17 dicembre del 1907, il popolo inglese e gli scienziati di tutto il mondo lo rimpiansero profondamente. Fu sepolto accanto a Isaac Newton, nell'Abbazia di Westminster. [1]

CLAUSIUS E L'ENTROPIA

La vita, in fondo, era stata benevola con lui, pensava il cinquantatreenne Rudolf Clausius; tuttavia, il normale logorio quotidiano lo aveva affaticato sia fisicamente che psicologicamente. Quel che è peggio, proprio in quel periodo stava attraversando una crisi infinitamente peggiore del fastidioso dolore al ginocchio e di tutti gli altri mali minori che aveva sopportato nella vita: sua moglie Adelheid correva il rischio di non sopravvivere al parto del loro sesto figlio.

Sorridendo coraggiosamente agli altri cinque figli che sedevano preoccupati sul divano, cominciò a fantasticare di riportare indietro le lancette del tempo; poi, a un tratto, fu interrotto da questo pensiero: com'era fortunato a essere quello che era... il fisico più celebre di tutta la Prussia. Prima di lui, gli scienziati avevano cominciato a capire il misterioso comportamento di terra, aria e acqua; ma era stato proprio Clausius che, nel 1850, aveva scoperto per primo la vera natura del fuoco, presumibilmente il più misterioso dei quattro elementi terrestri di Aristotele. [2]

RUDOLF JULIUS EMMANUEL CLAUSIUS (1822-1888) è meno noto di Kelvin o di Helmholtz, nonostante occupi una posizione importante nella fisica del ventesimo secolo, come uno dei fondatori della termodinamica e della teoria cinetica. [...] Clausius, come dice Gibbs¹⁵, fu il primo a districarsi con chiarezza tra le apparenti contraddizioni presenti nelle teorie del calore allora prevalenti e a sviluppare una trattazione sistematica della nuova scienza. [1]

Nato a Koeslin, in Prussia, nel 1822, quattordicesimo figlio di un pastore protestante, inizialmente attratto dagli studi storici, si dedicò comunque presto all'ambito scientifico. Ebbe l'occasione di incontrare docenti di prim'ordine, come Ohm, Dirichlet e Steiner. *Il giovane Clausius capì che dedicarsi allo studio del calore avrebbe potuto rivelarsi affascinante e utile: affascinante perché il calore aveva un ruolo essenziale nelle origini della natura e nella vita del corpo umano; utile perché, nonostante le macchine a vapore fossero ancora marchingegni ansimanti e rumorosi, nel corso dell'ancora breve vita di Clausius il loro uso si era clamorosamente incrementato, rivoluzionando l'industria e creando lucrose possibilità di carriera per i tecnici esperti dei misteri del calore. [2]*



Nel 1844 completò i suoi studi e cominciò un corso di specializzazione presso l'università di Halle, 150 km a sud-ovest di Berlino. Per aiutare il padre con i fratelli più piccoli, dopo la morte della madre, faceva il pendolare a cavallo tra l'università e la sua casa e, per questo motivo, i professori gli concessero di svolgere la maggior parte del lavoro a casa: grazie a questo, poté studiare secondo i propri ritmi e scegliere quanto lo appassionava e nel 1848 ottenne il dottorato.

Di recente, la teoria calorica era stata messa in discussione, e il giovane Clausius era impaziente di partecipare all'eccitante disputa. [2] Joule aveva notato che l'elettricità scaldava il filo metallico in cui passava, ma secondo Kelvin questo non era che un esempio di attrito, insufficiente per mettere in discussione l'intera teoria. Fare questo, secondo Kelvin, avrebbe significato andare incontro a una completa riformulazione della stessa teoria del calore dalle sue fondamenta. [2]

Era inoltre sorta una disputa tra Joule e Mayer, riguardo la paternità di alcune idee contenute negli scritti di Joule e la disputa coinvolse anche altri scienziati, rinvigorendo la rivalità già esistente tra tedeschi e inglesi. Clausius si schierò dalla parte del connazionale, Mayer, reagendo da un lato come scienziato scrupoloso e meticoloso, dall'altra si comportava da perfetto prussiano, fedelissimo alla causa della riunificazione tedesca. [...] Negli emozionanti esperimenti di Joule, Clausius intravedeva la base effettuale e nelle osservazioni anticonformistiche di Mayer la base

¹⁵ Josiah Willard Gibbs (1839/1903) fisico e matematico statunitense. Contribuì allo sviluppo dei fondamenti teorici della termodinamica e fu uno dei fondatori dell'analisi vettoriale.

filosofica di un modo del tutto nuovo di concepire il calore. Si trattava semplicemente di tagliare, cucire e mettere insieme quelle due basi nell'ambito matematico. [2]

Lesse tutto ciò che riguardava il lavoro di Carnot, pur non avendo trovato le sue *Réflexions*, e cominciò ad elaborare una propria teoria. A soli ventotto anni, nel 1850, presentò all'Accademia Prussiana delle Scienze la sua prima memoria sulla termodinamica *Sulla forza motrice del calore e sui principi che possono derivarne per la teoria del calore*, dando sistematicità alle idee di Carnot e riconciliandole con il principio di conservazione dell'energia. In questo scritto, Clausius teorizzava che calore e lavoro non fossero altro che due aspetti di uno stesso fenomeno, chiamato poi energia da Kelvin: *il calore e il lavoro erano essenzialmente la stessa cosa, nel senso che un'unità di calore poteva essere scambiata con un'unità di lavoro senza compromettere l'energia totale dell'universo*. [2] Inoltre affermò che l'energia totale dell'universo si conserva: *l'unico elemento che cambiava davvero era la mescolanza dei diversi tipi di energia*. [...] *Il ragionamento di Clausius condannò a morte la teoria calorica, in quanto riconosceva nell'energia, e non nel calore, il fenomeno indistruttibile*. [2]

Per i suoi contemporanei, fu una consolazione rendersi conto che questa nuova idea del calore non condannava completamente i principi trovati in precedenza. *Secondo Clausius, il principio di Carnot era nel giusto quando sosteneva che la resa ideale di una macchina era determinata esclusivamente dalla differenza tra la temperatura della caldaia e quella del condensatore. Ma lo scienziato francese non aveva ragione quando paragonava le macchine a vapore alle ruote di mulino*. [...] *Dall'immaginazione giovanile di Clausius era scaturita la teoria del calore più radicalmente nuova che la storia ricordasse. Ciononostante, i suoi riferimenti alla fisica erano talmente precisi, la sua matematica così convincente, che gli scienziati non seppero resistere all'incanto*. [2]

Nel 1850 trovò un posto presso la Scuola Reale d'Artiglieria e divenne Privat Dozent all'università berlinese.

Nel 1855 fu chiamato all'Università di Zurigo, dove conobbe Adelheid Rimpau, che sposò il 13 Novembre del 1859 e con la quale ebbe un matrimonio felice fino al 1875, quando lei morì dando alla luce il loro sesto figlio. Rimasto solo con i bambini piccoli, si dedicò a loro trascurando gli studi scientifici. Precedentemente, intorno ai quarant'anni, aveva preso parte alla guerra contro la Francia, a capo di un corpo di soccorso ed era rimasto ferito nel 1870: la ferita al ginocchio lasciò un segno indelebile, causandogli forti dolori per il resto della vita. Venne insignito, per questo motivo, della Croce di Ferro.

Nel 1886, sposò una donna molto più giovane di lui, ma il matrimonio fu molto breve: ammalatosi di anemia perniciosa, Clausius morì a Bonn nel 1888.

Il nome di Clausius resta legato al concetto di entropia, termine che coniò partendo dal termine greco τροπή, che significa trasformazione e che introdusse nel 1865, anche se aveva già elaborato il concetto a partire dal 1851. La nozione di entropia *non aumenta concettualmente le fondamentali idee di Carnot sui cicli, ma permette un calcolo semplice e rapido che non coinvolge i ragionamenti complessi dei cicli*. [1]

“Ho voluto intenzionalmente adottare il termine entropia per rimanere il più vicino possibile alla parola energia”, spiegò Clausius, “in quanto le due grandezze... sono così affini in senso fisico che anche nella definizione questo accostamento pare opportuno”. [...] *L'entropia rappresentava una frontiera nuova e misteriosa del pensiero scientifico che il giovane pioniere prussiano era impaziente di esplorare*. [2]

Considerando positive le variazioni di entropia che avvengono naturalmente, come il raffreddamento di una tazzina di caffè, ad esempio, e negative le variazioni che avvengono per l'intervento di una macchina termica, poté notare che le variazioni di entropia in positivo erano decisamente superiori rispetto a quelle negative. In altre parole, la variazione di entropia dell'universo è sempre maggiore di zero:

$$\Delta S_{universo} > 0$$

L'entropia non si conserva, perché il nostro non è un universo perfetto: questo significa che l'energia non viene usata al meglio. *Il nuovo principio [di Clausius] fu il primo enunciato della storia a spiegare scientificamente perché tutto nell'universo invecchia e muore!* [2]

BIBLIOGRAFIA

- [1] Emilio Segrè, *Personaggi e scoperte della fisica*, Oscar Saggi Mondadori, Cuneo, 2000
 - [2] Michael Guillen, *Le cinque equazioni che hanno cambiato il mondo*, Longanesi, Milano, 1997
 - [3] Eirik Newth, *Breve storia della scienza*, Salani Editore, Milano, 1998
 - [4] A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*, Universale Bollati Boringhieri, Torino, 2000
 - [5] C. Bernardini, S. Tamburini, *Le idee geniali*, edizioni Dedalo, Bari, 2005
 - [6] Sadi Carnot (a cura di B. Jannamorelli), *La potenza motrice del fuoco*, Cuen, Napoli, 1996
 - [7] James S. Walker, *Fisica vol.B*, Zanichelli, Bologna, 2004
- www.wikipedia.it – l'enciclopedia libera