

PER SAPERNE DI PIÙ

Le parole della Fisica: Energia Physical terms: Energy

Clara Frontali (*)

Via del Giuba 10, 00199, Roma, Italia

Riassunto. Il termine “energia” è entrato nell’uso scientifico solo intorno al 1850. Il concetto stesso di energia infatti non avrebbe potuto emergere fino a che non fossero stati rimossi due ostacoli dalle radici lontane: la rappresentazione del calore come un fluido materiale da un lato, e dall’altro la convinzione che gli esseri viventi fossero caratterizzati da una *vis vitalis* capace di fornire sia calore che lavoro meccanico. L’eliminazione di questo secondo ostacolo si è resa possibile con lo sviluppo della fisiologia che, sull’onda della rivoluzione iniziata da Lavoisier, ha aperto la via alle prime enunciazioni di un principio di conservazione dell’energia ad opera di un medico, Robert von Meyer, e di un fisiologo (votato alla fisica), Hermann von Helmholtz, entrambi sostenitori della visione meccanicistica del calore. La visione sostanzialistica, ancora valida per Carnot, fu definitivamente accantonata ad opera di Kelvin nel 1851.

Abstract. That of energy is a recent term. In fact the very concept of energy could not emerge until, around 1850, two long-standing obstacles were removed, namely the representation of heat as a material fluid on the one hand, and on the other the ancient view according to which a *vis vitalis*, capable of producing both heat and mechanical work, characterized living beings. Removal of the latter obstacle required the physiological approach which, on the wake of the revolution initiated by Lavoisier, culminated with the first enunciations of a conservation principle by a physician, Robert von Meyer, and a physiologist (committed to physics), Hermann von Helmholtz, both adhering to the mechanical view of heat, while the material view, still valid for Carnot, was finally disproved by Kelvin in 1851.

1. Introduzione

Introdurre il concetto di energia, questa multiforme grandezza così rilevante negli scambi ma di delicata definizione in un sistema statico isolato ⁽¹⁾ è notoriamente

(*) Già Dirigente di Ricerca presso l’Istituto Superiore di Sanità, Roma.
E-mail: clara.frontali@inwind.it

⁽¹⁾ È dubbio che si possa parlare di energia “contenuta” in un tale sistema, a meno che non siano sottintesi il tipo di trasferimento e lo stato finale della trasformazione attesa.

difficile. È forse la prima volta che gli studenti si confrontano con una modellizzazione cui non corrisponde un'immagine intuitiva. A questo proposito viene spesso citata la frase di Feynman (vedi 4-1 in [1]): “*It is important to realize that in physics today we have no knowledge of what energy is*”.

Tale difficoltà riflette il lento e tortuoso cammino che ha portato a quella costruzione concettuale che chiamiamo energia. Il termine (oggi così di uso così diffuso, a proposito e a sproposito) è entrato nella terminologia scientifica nella sua accezione moderna solo intorno al 1850. Di fatto, l'idea che grandezze apparentemente disomogenee rappresentassero aspetti diversi di un unico ente, e che per un dato sistema la loro somma dovesse mantenersi costante, non avrebbe potuto sorgere se non fossero stati prima rimossi due ostacoli concettuali dalle radici lontane: da un lato la persistente visione del calore come un fluido materiale, dall'altro l'antica convinzione che una *vis vitalis*, capace di produrre calore e lavoro meccanico, caratterizzasse gli esseri viventi. Lo studio di questi ultimi, peraltro, era condizionato non solo e non tanto dalla complessità dei processi che in essi si svolgono, quanto dal fatto che metteva in questione fatti che riguardano la vita, da sempre dominati dalla religione e dal pregiudizio per cui tali processi non potevano essere ricondotti ai meccanismi validi per il mondo inanimato.

Per giungere al concetto unificante di “energia” occorre dunque mettere insieme conoscenze provenienti da ambiti diversi del sapere, ed è solo nel secolo che intercorre tra gli anni '50 del 1700 e gli stessi anni del 1800 che—in concomitanza con le grandi realizzazioni della rivoluzione industriale— si assiste alla nascita ed alla affermazione di nuove discipline, dotate di propria struttura teorica e metodologica, quali la chimica e la termodinamica, ma anche la fisiologia umana ed animale. Il contributo di quest'ultima alla fisica rappresenta un caso esemplare di fecondazione tra discipline nate come saperi indipendenti. È questo percorso, relativamente poco esplorato, che qui cercheremo di isolare dal fitto contesto di acquisizioni ed elaborazioni che si intrecciano nel periodo indicato, e che sono portate ad esempio di “scoperta simultanea” [2]. Nel farlo distingueremo volta per volta le considerazioni riguardanti l'interconvertibilità di forme diverse di energia da quelle relative alla conservazione dell'energia totale.

In ambito strettamente meccanico, un'idea di interconvertibilità tra quelle che per noi sono l'energia cinetica e l'energia potenziale è presente già nell'opera di Galileo, cui è chiaro che, in assenza di attrito, la velocità acquistata da un grave durante la caduta a partire dalla quiete (o dal pendolo nel punto più basso della sua traiettoria) è sufficiente a riportarlo all'altezza originale, ma non più in alto.

Un'idea di conservazione (sempre in ambito esclusivamente meccanico) è sentita come esigenza sia da Cartesio che da Leibniz. Se per Newton erano necessari ripetuti interventi divini per spiegare la stabilità nel tempo della meccanica celeste, nella visione post-rinascimentale di un universo creato da Dio come un sistema meccanico, che una volta caricato funziona autonomamente come un orologio, dovevano invece esistere leggi di conservazione del moto impresso al momento della creazione. La lunga diatriba tra seguaci di Cartesio e di Leibniz riguarda la grandezza che si conserva,

che in termini moderni è la quantità di moto per Cartesio, l'energia cinetica (per l'esattezza, il prodotto mv^2 , o *vis viva*) per Leibniz.

Circa la storia della rappresentazione del calore molto è stato scritto: l'annosa dicotomia tra l'ipotesi sostanzialistica (che prevede che il fluido calorico si conservi come tale) e l'ipotesi meccanicistica non verrà qui approfondita, lo scopo principale essendo invece quello di capire come gli studi sul calore animale, e quindi sulla fisiologia della circolazione e della respirazione — a partire dai fondamentali lavori di Lavoisier — abbiano portato un medico come Robert von Meyer ed un fisiologo (votato alla fisica) come Hermann von Helmholtz ad introdurre nel novero delle forme di energia le cui variazioni possono compensarsi anche l'accumulo, da parte degli organismi viventi, di energia chimica sotto forma di “composti complessi”. Entrambi utilizzano il termine “forza” in luogo di quello che successivamente verrà ad indicare il concetto che essi hanno contribuito ad introdurre.

Il termine “energia” (da “*energhéia*”, termine coniato da Aristotele per una forza che trasforma l'ipotetico in realtà) è presente nel linguaggio letterario fin dal XV secolo. Per Machiavelli (1469-1537) l'energia è tra le doti del Principe. Sia Jonathan Swift (1667-1745) che Daniel Defoe (1660-1731) utilizzano il termine *energy* per indicare l'efficacia e l'espressività di una lingua. Nel linguaggio scientifico il termine compare almeno fin dal XVII secolo, in particolare in rapporto con la dottrina dell'irritabilità. Tale dottrina, proposta nel 1672 da Francis Glisson (1597-1677) nel suo “*Tractatus de natura substantiae energeticae*” fu ripresa su base sperimentale dal fisiologo e anatomista svizzero Albrecht von Haller (1708-1777): l'ampiezza della contrazione muscolare in risposta ad uno stimolo “irritante” (veicolato dai nervi) anche di modesta entità presupponeva l'apporto di una “forza ingenita”, insita nei tessuti. Negli stessi anni il medico scozzese William Cullen (1710-1790) attribuiva lo stato di salute del corpo ad una “*nervous energy*”: un difetto, ma anche un eccesso di questa era responsabile di stati patologici, fisici o mentali. Nel saggio del 1769 di William Irvine (1743-1789) “*On the Effect of Heat and Cold on Animal Bodies*” [3] questa “*nervous energy*”, necessaria alla vita animale, risultava tanto concreta da essere distrutta a temperature anche di poco più elevate di quelle fisiologiche, ma meno sensibile ad un abbassamento della temperatura corporea.

Occorreva probabilmente una vastità di competenze come quella posseduta da Thomas Young (1773-1829) — fisico, medico e linguista — per traghettare alla terminologia della fisica la parola “energia”, come egli fa nel 1807 con riferimento al prodotto mv^2 [4]. Nel 1853 la parola verrà ripresa da William Rankine (1820-1872), che introdurrà il termine “energia potenziale” [5], e nel 1856 da Lord Kelvin (1824-1907), cui si deve l'introduzione del termine “energia cinetica”.

Il concetto, che così lentamente ha preso finalmente forma alla metà del 1800, nel secolo seguente, con la teoria della relatività, sarà protagonista di sviluppi (non affrontati nel presente lavoro) che ne chiariranno definitivamente la portata.

2. Il calore animale, la circolazione e la respirazione

L'idea che la vita sia legata all'esistenza di un “fuoco interno” è antica quanto l'osservazione che uomini e animali quando muoiono diventano freddi. Aristotele

parla di un “fuoco innato”: l’aria inspirata svolgerebbe solo il ruolo di ventilazione per temperarne il calore, mentre l’espiazione rimuoverebbe i vapori prodotti. Per Galeno l’aria inspirata dai polmoni arriva al cuore, dove —utilizzando il prodotto della digestione raffinato nel fegato— ha luogo la formazione del sangue: quando il sangue è esposto all’aria si produce la sostanza detta “pneuma” che gli conferisce il colore rosso vivo. Il sangue scorre dal fegato o dal cuore ai vari organi attraverso sia vene che arterie, rifornendo i tessuti dei materiali consumati nella loro funzione.

Il piccolo circolo (cuore-polmoni-cuore) è stato descritto tra il 1550 e il 1560 da Michele Serveto (1511-1557) e, in modo più completo, da Realdo Columbus (1516-1559), entrambi peraltro seguaci della visione galenica per cui il sangue si consuma nei tessuti, cui giunge attraverso sia vene e che arterie. È intorno al 1616 che William Harvey rovescia questa concezione: con un semplice calcolo mostra che il sangue che viene “pompat” dal cuore nelle arterie è in una quantità eccessiva per essere poi assorbito nei tessuti; dimostra poi sperimentalmente in modo inequivocabile che esso ritorna al cuore attraverso le vene. La successiva osservazione al microscopio della rete di capillari che connette il sistema arterioso al sistema venoso, ad opera di Marcello Malpighi (1628-1694), consentirà alle idee di Harvey di affermarsi definitivamente verso la fine del secolo.

Per Cartesio e gli “iatromeccanicisti” suoi seguaci, il calore animale viene prodotto per attrito nei movimenti del corpo, mentre per gli “iatrochimici” seguaci di Paracelso (1493-1541) negli esseri viventi il calore è prodotto o da una fermentazione analoga a quella che trasforma l’uva in vino, oppure (in analogia con l’accensione della polvere da sparo) dalla reazione tra una sostanza nitrosa contenuta nell’aria respirata e qualche materiale sulfureo presente nei tessuti. Così pensano anche Boyle (1627-1691) e Hooke (1635-1703).

È proprio con il lavoro in collaborazione tra Boyle e Hooke, circa gli effetti della rimozione dell’aria su carboni accesi o su piccoli animali, che si opera la svolta tra vaghe supposizioni basate esclusivamente su analogie, e la realizzazione di esperimenti che forniscono evidenze per accettare o scartare le teorie esistenti, e suggerire nuove ipotesi.

Così come la fiamma si estingue rapidamente nel recipiente in cui (con la pompa realizzata da Hooke) è stato fatto il vuoto, nelle stesse condizioni l’animale sopravvive per poco tempo (fig. 1). Che ciò non sia dovuto semplicemente all’accumulo di “gas mefitici” espirati dall’animale lo dimostra il fatto che esso sopravvive (e respira) più a lungo se il recipiente viene chiuso in presenza di aria. Inoltre l’aria contenuta in un recipiente in cui si sono spenti dei carboni inizialmente accesi, così come l’aria esaurita dalla respirazione animale, non è più in grado di sostenere altra fiamma né la vita di un altro animale: in entrambi i casi, dunque, è venuto a mancare un componente che è essenziale sia alla vita che alla combustione (anche se la pressione interna al recipiente, misurata con uno strumento a mercurio, non mostra variazioni apprezzabili).

Viene così esclusa qualsiasi interpretazione della respirazione come mero effetto di ventilazione di immaginarie “fiamme vitali”. L’ipotesi che ne consegue è che nella respirazione un componente dell’aria, uno “*spiritus nitro-aereus*”, venga assorbito dal sangue a livello del circolo polmonare. Qui, combinandosi con particelle sulfuree

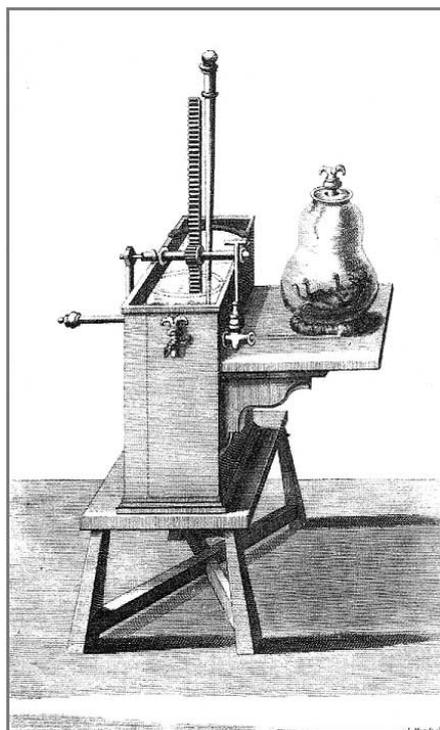


Fig. 1. – L'esperimento di Boyle e Hooke: il topo non sopravvive in mancanza d'aria.

causerebbe una marcata fermentazione, fonte del calore poi distribuito dal sangue a tutti i tessuti. A questa combinazione sarebbe dovuto anche il cambiamento di colore del sangue da venoso a arterioso.

Il fiorire di attività sperimentali e di nuove elaborazioni della seconda metà del XVII secolo non trovò seguito nella prima metà del secolo seguente. Paradossalmente forse proprio il successo della meccanica Newtoniana e della visione meccanicistica del calore (cui peraltro aderiva anche il "chimico scettico", Boyle) allontanò l'interesse per le trasformazioni chimiche e spostò le preferenze dei fisiologi verso rappresentazioni che, per spiegare l'origine del calore animale, facevano ricorso all'attrito esercitato dalle pareti dei vasi sul flusso sanguigno. Inoltre, con l'affermarsi della teoria del flogisto sostenuta da Georg Ernst Stahl (1660-1734) che interpretava la combustione, la calcinazione e la respirazione come una cessione di flogisto dai corpi (inanimati o animati) all'aria, risultava poco credibile l'idea che un componente di questa potesse fissarsi al combustibile (e provocarne l'aumento di peso come osservato proprio da Boyle e Hooke nei metalli sottoposti a calcinazione).

3. Joseph Black

Medico di formazione, convinto dell'importanza delle conoscenze di chimica in medicina, Joseph Black (1728-1799) fu chiamato nel 1756 a ricoprire la cattedra di

chimica all'università di Glasgow, precedentemente tenuta dal suo maestro William Cullen (1710-1790). Nelle lezioni da lui tenute [6] durante i 10 anni ivi trascorsi si trovano esposti gli argomenti e le prove sperimentali che lo portano a distinguere —per la prima volta— la quantità di calore dalla grandezza intensiva che si misura col termometro.

Dobbiamo ancora a Black il concetto (ed i termini) di “capacità termica” di un corpo, e di “calore latente”, assorbito o ceduto senza variazione di temperatura nei cambiamenti di stato. La distinzione tra calore e temperatura operata da Black gli consente infatti di concepire trasferimenti di calore a temperatura costante. Circa la natura del calore Black non si esprime chiaramente, ma propende per l'interpretazione sostanzialistica. (Anche per il suo giovane tecnico di laboratorio, destinato a grande notorietà, James Watt, il calore è una sostanza capace di combinarsi chimicamente col vapor d'acqua conferendogli “elasticità”.)

Mentre all'epoca erano già disponibili termometri affidabili, sorgeva ora l'esigenza di realizzare dispositivi per misure calorimetriche: saranno il calorimetro a ghiaccio (usato per primo da Lavoisier, cui sarebbe dovuto il termine stesso di “calorimetro”) ed il calorimetro delle mescolanze (usato da Crawford) che permetteranno di mettere in relazione diretta il calore animale con la respirazione.

Ma è proprio sulla respirazione che è fondamentale un altro contributo di Joseph Black. Nei suoi esperimenti [7] sulla calcinazione del carbonato di calcio (*limestone*) o di magnesio (*magnesia alba*) egli aveva osservato l'emissione di quella che chiama “aria fissa” (*fixed air*), un'aria più densa dell'aria comune che non sostiene né la combustione né la respirazione animale ⁽²⁾. Black dimostrò sperimentalmente che l'aria esaurita dalla respirazione di un animale e quella esaurita dalla combustione di carbone hanno la stessa natura chimica dell'aria fissa, in quanto facendo gorgogliare l'una o l'altra attraverso una soluzione di idrossido di calcio (*limewater*) si ri-ottiene, come per l'aria fissa, carbonato di calcio insolubile. Tale test di precipitazione fornisce identico risultato se eseguito per il “fluido elastico” (il gas) prodotto nella fermentazione alcolica. Perfezionato dal punto di vista quantitativo, il metodo messo a punto da Black sarà utilizzato sia da Crawford che da Lavoisier per la misura dell'anidride carbonica emessa nella respirazione.

4. La rivoluzione scientifica di Lavoisier

Ben più conosciuta, rispetto a quella dell'aria fissa è la storia della scoperta, negli anni 1770, di una “aria di fuoco” ad opera di Karl Wilhelm Scheele (1742-1786) e, indipendentemente, da parte di Joseph Priestley (1733-1804) di una “aria deflogisticata” o avida di flogisto, particolarmente favorevole alla respirazione. Fu merito di Lavoisier (1743-1794) non solo l'aver sgombrato il campo dalla teoria del flogisto ma anche l'aver riconosciuto che quella sostanza, da lui denominata ossigeno

⁽²⁾ Jan Baptiste van Helmont (1577-1644), l'inventore della parola “gas”, aveva denominato “gas silvestre” questa stessa *aria*, da lui osservata come prodotta dalla combustione del legno.

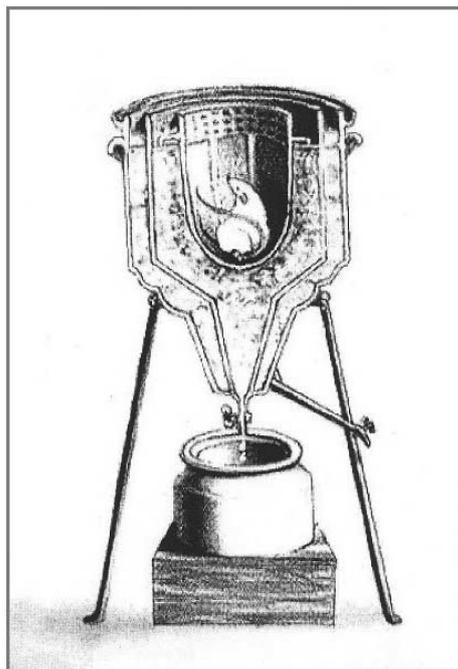


Fig. 2. – Il calorimetro a ghiaccio di Lavoisier.

(così come altre *arie*, ad esempio l'azoto) non era caratterizzata dal presentarsi in forma gassosa, ma poteva entrare nella composizione chimica di solidi e liquidi.

È negli anni 1776-77 che Lavoisier, in collaborazione con Pierre-Simon de Laplace (1749-1824), confermò, sulla base di esperimenti condotti su cavie, che nella respirazione viene consumata aria respirabile (ossigeno) ed emessa "aria fissa", e dimostrò che in questo processo si ha liberazione di calore (fig. 2) in un rapporto, rispetto alla quantità di aria fissa (CO_2) emessa, *grosso modo* equivalente a quello della combustione di una quantità nota di carbone. L'accordo migliorava se in luogo del carbone veniva utilizzata cera d'api, il che li portò a supporre che alla produzione del calore animale contribuisse anche l'ossidazione dell'idrogeno, con formazione di vapor d'acqua. Propose che nei polmoni avvenisse un processo di lenta combustione risultante nella combinazione dell'ossigeno a formare anidride carbonica e acqua, il combustibile via via consumato (carbonio e idrogeno) essendo fornito dagli alimenti.

Negli stessi anni Adair Crawford (1748-1795), che aveva pubblicato con un anno di anticipo su Lavoisier un lavoro sull'equivalenza tra combustione, calcinazione e respirazione, eseguiva esperimenti analoghi utilizzando, anziché il calorimetro a ghiaccio, un calorimetro delle mescolanze. Ciò permetteva di misurare la quantità di anidride carbonica e la quantità di calore prodotte dall'animale mantenendolo nelle stesse condizioni, e di correggere così le discrepanze che negli esperimenti di Lavoisier erano causate dall'aver eseguito le misure di calore alla temperatura del ghiaccio fondente e quelle di respirazione a temperatura ambiente.

In una serie di esperimenti condotti in collaborazione con il suo giovane assistente Armand Séguin (1767-1835) —che si prestò anche a fare da cavia umana, sollevando un peso di 15 libbre per un'altezza di 613 piedi— Lavoisier, misurò l'aumento nel ritmo della respirazione e delle pulsazioni provocato dallo sforzo fisico, e concluse che la quantità di ossigeno inspirato (e di anidride carbonica espirata) è “in ragione diretta del prodotto delle inspirazioni per le pulsazioni”, e che l'aumento nel numero delle pulsazioni è proporzionale “alla somma dei pesi sollevati a determinate altezze”. Se il combustibile è rifornito dagli alimenti, ne segue che un lavoro faticoso richiederà un nutrimento più ricco.

È questa la prima volta che il lavoro muscolare (misurato in pesi sollevati) —ma anche quello intellettuale, come efficacemente espresso nel brano qui appresso citato— viene messo in rapporto con le trasformazioni chimiche che hanno luogo nell'organismo. Con le parole di Lavoisier e Séguin [8]:

“Questo tipo di osservazioni porta a confrontare tra loro delle forze tra le quali non sembrerebbe esistere alcun rapporto. Si può conoscere per esempio a quante libbre di peso corrispondono gli sforzi di un uomo che recita un discorso, di un musicista che suona uno strumento. Si potrebbe perfino valutare ciò che vi è di meccanico nel lavoro del filosofo che riflette.”

Per quanto riguarda la natura del calore, Lavoisier tende a considerarlo come un elemento chimico che può combinarsi con altre sostanze (conferendo loro “elasticità”) oppure essere rilasciato in forma libera, ma ne parla anche —seguendo in questo le idee di Laplace— come di una sostanza che riempie gli spazi vuoti tra le particelle di un corpo, o addirittura semplicemente come di una forza repulsiva tra queste particelle, che ne bilancia le forze di mutua attrazione.

La rivoluzione operata da Lavoisier e Laplace, che trattava la respirazione —la funzione vitale per eccellenza— alla stregua di un processo chimico ordinario, fu accolta dalla comunità scientifica tagliando trasversalmente tra coloro che ritenevano in linea di principio inadeguata a spiegare fenomeni biologici una teoria basata esclusivamente su fenomeni chimico-fisici, e quanti —biologi, matematici, chimici e fisici— l'accettarono invece con entusiasmo, dedicandosi a completarla e affinarla, in particolare per quanto riguarda la sede della respirazione.

Al matematico (italiano di nascita e di formazione) Joseph Louis Lagrange (1736-1813) è attribuita l'ipotesi —avanzata nel 1790— che i processi di ossidazione alla base della produzione del calore animale non avvenissero nei polmoni, come ritenuto da Lavoisier, ma che l'ossigeno inspirato venisse interamente assorbito dal sangue e trasportato in soluzione fino alle parti più periferiche del corpo. I processi di ossidazione avverrebbero dunque nel sangue arterioso accumulando anidride carbonica, poi liberata dal sangue venoso nei polmoni.

Il naturalista Lazzaro Spallanzani (1729-1799), vulcanico sperimentatore nel campo della riproduzione e della digestione (per non parlare dei suoi esperimenti a confutazione della teoria della generazione spontanea) e convinto sostenitore della “luminosa teoria di Lavoisier”, nei suoi ultimi anni di attività mostrò come possano sopravvivere rane private dei polmoni, mentre non sopravvivono se se ne vernicia la pelle,

identificandone così la respirazione cutanea. L'esploratore-scienziato Alexander von Humboldt (1769-1859) dimostrò il consumo di ossigeno da parte di tessuto muscolare isolato, precorrendo gli esperimenti del chimico Justus von Liebig (1805-1873) sulla produzione di CO_2 da parte di fibre muscolari perfuse con acqua anziché con sangue, nonché del giovane Hermann von Helmholtz sulla produzione di calore nella contrazione (stimolata elettricamente) di un muscolo di rana isolato.

5. Le macchine termiche

L'estrazione dell'acqua che, infiltrandosi, limitava la possibilità di lavoro sotterraneo nelle miniere era stata per secoli affidata a pompe azionate dal lavoro muscolare, di uomini o di animali. La rivoluzione industriale iniziò, nel corso del XVIII secolo, con lo sfruttamento del vapore in macchine destinate proprio a questo scopo, ma la realizzazione di tali macchine —ad opera di Savery, Newcomen, Smeaton e Watt— non fu accompagnata dalla comprensione dei fenomeni implicati nel loro funzionamento (come abbiamo visto, Watt riteneva che il calore fosse una sostanza che combinandosi chimicamente con il vapore gli conferiva elasticità). Non per nulla la nuova scienza della termodinamica nasce tra la fine del secolo e i primi decenni del secolo seguente.

Il grande lavoro teorico di Sadi Carnot (1796-1827) mirava appunto a stabilire il massimo rendimento possibile per le macchine termiche [9]. Se i risultati della sua indagine costituiscono ancora oggi una pietra miliare, va ricordato che la sua analisi partiva dal presupposto errato che il lavoro prodotto dalla macchina fosse dovuto alla caduta di temperatura del fluido calorico assorbito a temperatura più alta e integralmente restituito alla sorgente a temperatura inferiore, in analogia con il lavoro prodotto da una massa d'acqua che cade da una quota maggiore ad una minore ⁽³⁾.

6. Julius Robert von Meyer

Medico di formazione (le sue conoscenze di fisica erano piuttosto elementari), Robert von Meyer (1814-1878) si imbarcò nel 1840 —più come studioso che come medico di bordo— sul *trealber* "Giava" che faceva rotta verso Giacarta. Durante i tre mesi di viaggio fece diverse osservazioni: l'acqua del mare era più calda subito dopo una tempesta che quando il mare era calmo; in occasione di salassi sui passeggeri della nave notò che il sangue venoso era più chiaro che non alle latitudini del suo paese natale, la Germania. (Analogia osservazione era stata fatta da Crawford sul sangue venoso prelevato da un cane che era stato immerso in acqua moderatamente calda.) Convinto seguace di Lavoisier, ne dedusse che alle temperature tropicali occorreva consumare meno ossigeno per mantenere la temperatura corporea. Si pose il problema di capire quanto il fenomeno dipendesse dallo sforzo fisico (come sollevare pesi o

⁽³⁾ Da note postume, ritrovate dopo la sua morte prematura, risulta però che successivamente Carnot avrebbe abbandonato questa interpretazione a favore di una visione del calore come movimento.

impegnarsi nelle attività di bordo) giungendo alla conclusione che nel corpo umano —capace di produrre sia calore che lavoro— queste due entità potevano trasformarsi l'una nell'altra.

Convinto, su un piano filosofico-metafisico, di un principio di eguaglianza tra cause ed effetti, in una memoria del 1842 [10] afferma l'indistruttibilità delle cause: sono cause le *forze* —tra loro interconvertibili— quali: la “forza di caduta” (*Falkkraft*) posseduta da un grave sollevato ad una data altezza (la nostra energia potenziale) e il “movimento” (*Bewegung*) dello stesso peso che cade (energia cinetica), nonché il calore (*Wärme*), dato che il movimento che si perde per attrito si converte in calore.

Il discorso è portato avanti nella memoria del 1845 “*Die organische Bewegung in Ihrem Zusammenhang mit dem Stoffwechsel*” [11] che contiene i suoi contributi più importanti. Contro la visione prevalente che attribuiva il lavoro di una macchina termica alla caduta di temperatura di un fluido calorico che si conserva, egli afferma che il lavoro meccanico prodotto da una macchina a vapore (l'esempio utilizzato è quello di una locomotiva) è dovuto alla conversione di quella frazione del calore che non viene restituita all'ambiente, mentre quest'ultima è perduta ai fini del lavoro meccanico.

“... la forza che opera nelle locomotive è il calore. L'utilizzazione del calore, ovvero la conversione del calore in movimento, si basa sul fatto che la quantità di calore che viene assorbita dal vapore è sempre maggiore di quella che il vapore cede all'ambiente nella compressione. La differenza fornisce il calore impiegato utilmente, cioè trasformato in effetto meccanico.

Uguale quantità di combustibile forniscono, a parità di condizioni, uguali quantità di calore, ma i carboni che bruciano sotto la caldaia liberano meno calore quando la macchina lavora di quando sta ferma. Il calore liberato si distribuisce nell'ambiente e va perduto per fini meccanici.”

Per calcolare “quanto è grande la quantità di calore che corrisponde a una data quantità di movimento o di forza di caduta”, Meyer sfrutta la differenza tra il calore specifico misurato per un gas a pressione costante (quando oltre ad aumentare di temperatura si compie un lavoro sollevando un pistone) e quello misurato a volume costante. Utilizzando i valori sperimentali disponibili per C_p e C_v riesce così a dare una stima dell'equivalente meccanico della caloria.

Infine, considerando che la forza di caduta, il movimento, il calore, la luce, l'elettricità ed anche “*la differenza chimica tra corpi ponderabili*” costituiscono un solo oggetto sotto apparenze diverse, ritiene questo oggetto indistruttibile, e ne enuncia la conservazione, affermando:

“In tutti i processi fisici e chimici la forza data rimane una grandezza costante”.

L'inclusione di una “differenza chimica” tra le *forze* ha conseguenze estremamente importanti. Infatti, ritornando agli esseri viventi, nello stesso lavoro egli afferma che questi traggono la loro *forza* dai raggi solari che vengono immagazzinati dalle piante in forma chimica. È il loro metabolismo (*Stoffwechsel*) che opera la trasformazione.

Le sue pubblicazioni, poco note anche in Germania, trovarono una forma organizzata e completa solo nel 1851 [12], mentre già dal 1848 era in atto l'accesa polemica con Joule: oggetto della controversia era la priorità sul punto della interconvertibilità tra lavoro e calore, e non sull'enunciazione di un principio di conservazione, che non si trova nell'opera di Joule.

7. Hermann von Helmholtz (1821-1894)

Medico di formazione, ma naturalmente portato al ragionamento fisico e matematico, fisiologo studioso della percezione sensoriale nonché della conduzione nervosa (di fondamentale importanza la sua misura della velocità finita di trasmissione degli impulsi nervosi, all'epoca ritenuta istantanea in quanto attività spirituale), geniale ideatore di nuove tecniche sperimentali e teorico rigoroso, a lui si devono notevolissimi contributi a campi diversi quali l'ottica, l'acustica, l'elettrodinamica, la dinamica dei fluidi, ma anche alla filosofia della scienza. Aveva solo 26 anni quando, in "*Über die Erhaltung der Kraft*" [13], dà la prima enunciazione completa del principio di conservazione dell'energia meccanica.

Avendo introdotto il concetto di "forze di tensione" (*Spannkräfte*) per quelle forze che "cercano di muovere il punto m fino a tanto che esse non abbiano ancora prodotto il movimento", egli afferma:

"la perdita della quantità di forza di tensione è sempre eguale all'aumento di forza viva, e l'aumento della prima è uguale alla perdita della seconda. Quindi la somma delle forze vive e di tensione che sono presenti è sempre costante. In questa forma del tutto generale possiamo indicare la nostra legge come il Principio della conservazione della forza".

Nel prosieguo Helmholtz include nel computo delle forze vive: la luce, intesa —seguendo Fresnel— come vibrazione di particelle; i raggi "calorifici" (infrarossi) e "chimici" (UV), forze elettriche e magnetiche, e il calore (sposandone dunque l'interpretazione meccanicista):

"... l'acquisto di calore costituisce per noi una forza attraverso la quale possiamo produrre effetti meccanici ... Resterebbe da chiedersi ... se per una certa perdita di forza meccanica sorga ogni volta una determinata quantità di calore e fino a che punto una quantità di calore possa corrispondere a un equivalente di forza meccanica."

Nel 1847, anno della pubblicazione di "*Über die Erhaltung der Kraft*", von Helmholtz non conosce le memorie di Meyer del 1842 e del 1845, e considera ancora preliminari i valori sperimentali dell'equivalente meccanico della caloria determinati da Joule. Solo più tardi riconoscerà di essere stato preceduto da Meyer nel concepire la conservazione della "forza" (per noi energia).

Quanto ai fenomeni biologici, von Helmholtz è più cauto, anche se nel dibattito sull'esistenza di "forze vitali" egli ha una posizione pregiudiziale dettata dall'impossibilità del moto perpetuo, che sarebbe invece reso possibile da una forza inesauribile, di natura non riconducibile a fenomeni chimico-fisici. Nell'ultima

parte dell’*“Erhaltung”* [13], dopo aver discusso le “forze” meccaniche, elettriche e magnetiche, scrive:

“Tra i processi naturali ci rimangono ancora da esaminare quelli degli organismi viventi. Nelle piante i processi sono essenzialmente chimici In esse viene depositata una notevole quantità di forze di tensione chimiche, il cui equivalente viene poi fornito a noi sotto forma di calore nella combustione delle sostanze vegetali. L’unica forza viva che viene da loro assorbita durante la crescita —al meglio delle nostre conoscenze attuali— sono i raggi chimici [UV] del sole, ma ci mancano ancora tutti i dati necessari per una miglior comparazione degli equivalenti di forza che qui vengono persi o acquistati. Per gli animali abbiamo già alcuni punti di riferimento più vicini. Essi assumono i composti ossidabili complessi che vengono elaborati dalle piante, e ossigeno, e li restituiscono per la maggior parte come prodotti di combustione sotto forma di acido carbonico e acqua, e in parte ridotti a composti più semplici: utilizzano dunque una certa quantità di forze di tensione chimiche e sviluppano così sia calore che forze meccaniche.”

Si noti che negli animali il combustibile non si identifica più con gli elementi, C e H, come suggerito da Lavoisier, bensì con i “composti complessi” che hanno immagazzinato energia solare e la cui degradazione a composti più semplici contribuisce al bilancio energetico. Si tratta di una visione completamente nuova che schiude la via al vasto campo di studi sui processi intracellulari coinvolti nel metabolismo energetico.

8. James Prescott Joule e William Thomson

James Prescott Joule (1818-1889) nacque e visse presso Manchester, al tempo il centro delle applicazioni industriali delle macchine a vapore. (La prima ferrovia al mondo per trasporto passeggeri alimentata interamente a vapore fu la Manchester-Liverpool, inaugurata nel 1830.) Ma per il giovane Joule l’obiettivo era la realizzazione di un motore elettrico (alimentato a batterie). Egli era infatti convinto che macchine così alimentate permettessero di ottenere un rendimento più alto di quello delle macchine termiche. Nel suo percorso verso questo obiettivo osservò quello che a noi è noto come effetto Joule e fu indotto ad approfondire la relazione tra la quantità di sostanza chimica consumata dalla pila, la quantità di calore che riscalda i fili ed il lavoro prodotto dalla macchina alimentata dalla corrente.

Ben presto (già dal 1840) dovette riconoscere che —nonostante i miglioramenti da lui portati agli elettromagneti— l’efficienza dei motori elettrici restava al di sotto di quello delle macchine a vapore, ma l’osservazione dell’effetto che ha preso il suo nome lo portò a studiare direttamente la relazione tra lavoro e calore. Il suo semplice e geniale metodo per la misura dell’equivalente meccanico della caloria. illustrato in tutti i testi elementari di fisica, compare nel 1845, in una lettera al *Philosophical Magazine*, e in forma più completa nel 1850 [14]. I suoi risultati ebbero larga risonanza, anche grazie alla sponsorizzazione di Michael Faraday, al tempo già socio della Royal Society.

Nel 1847, alla fine di una conferenza da lui tenuta presso la British Society for the Advancement of Science, un giovane fisico di nome William Thomson pose una domanda cruciale: come si poteva conciliare l'equivalenza tra lavoro meccanico e calore con l'interpretazione data da Carnot circa la produzione di lavoro da parte della sua macchina ideale? ⁽⁴⁾. Ancora due anni più tardi Thomson (il futuro Lord Kelvin) si interrogava sull'assenza di qualsiasi effetto meccanico quando la stessa quantità di calore fluiva per contatto diretto dalla sorgente a temperatura più alta a quella a temperatura più bassa. La soluzione al problema fu pubblicata nel 1851 dallo stesso Thomson nel suo saggio "*On the Dynamic Theory of Heat*" [15] in cui riconosceva che solo una parte del calore assorbito dalla macchina termica veniva trasformato in lavoro, mentre "*il restante era irreversibilmente perduto per l'uomo e quindi "sprecato" (wasted), anche se non annullato*", frase da confrontare con l'espressione "*perduto per fini meccanici*" presente nel lavoro di Meyer del 1845 [11]. Si apriva così la strada alla formulazione sia del primo che del secondo principio della termodinamica.

9. Uno sguardo d'insieme

Il lungo cammino che ha portato a cristallizzare nel suo significato attuale il concetto di energia —oggi tra i concetti base della fisica— ha richiesto il contributo di altre discipline: i progressi della biologia (e in particolare della fisiologia) a partire dalla fine del XVII secolo —intrecciandosi con quelli della fisica e della chimica— hanno consentito di giungere verso la metà del 1800 alla formulazione del principio di conservazione che ha dato corpo a questa grandezza affermando la natura unitaria delle diverse forme sotto cui si presenta (a meno di fattori di conversione, come l'equivalente meccanico della caloria). Questo contributo non viene generalmente riconosciuto nei corsi di fisica, se si escludono le lezioni di Feynman, il quale (vedi 3-3 in ref. [1]) ricorda come "*biology helped physics in the discovery of the conservation of energy*". È questo gioco di rimandi che abbiamo esplorato nel presente articolo.

Ma anche la storia della filosofia ha avuto un peso in questo processo. In Germania l'influenza esercitata sul pensiero scientifico dalla *Naturphilosophie* di Schelling aveva propagato l'idea di una fondamentale unità tra mondo organico e inorganico. È questo l'ambiente culturale e scientifico in cui si formano sia Meyer che Helmholtz, anche se in altri autori, come Justus von Liebig, permangono tracce del perseverante vitalismo. Contro tali posizioni si schierano nettamente Carl Ludwig, Ernst Brücke, Emil DuBois-Raymond e lo stesso Hermann von Helmholtz nel formulare il programma riduzionista della società di fisiologi da loro fondata nel 1842, programma che mira ad una interpretazione della fisiologia su basi chimico-fisiche. Al di là dei contrasti, sia nella visione di Liebig che in quella dei fisiologi riduzionisti è riconoscibile un'idea di unità del mondo che è estranea alla tradizione empirica britannica. Nel percorso degli autori inglesi (Joule, Rankine, Kelvin) verso la conservazione dell'energia

⁽⁴⁾ L'interesse di Thomson per la contraddizione tra interconvertibilità calore/lavoro e conservazione del fluido calorico nasceva dal suo sforzo diretto a stabilire una scala assoluta della temperatura, indipendente dalla particolare sostanza termometrica impiegata.

—percorso caratterizzato anche da un ritardo, rispetto ai tedeschi, nell'accettare la concezione meccanicistica del calore— il punto di partenza sono le macchine, termiche od elettriche, mentre la problematica relativa al vivente non viene affrontata.

Esulano dall'ambito del presente lavoro gli sviluppi che con la teoria della relatività hanno portato —poco più di mezzo secolo dopo— ad una nuova rivoluzione: l'identificazione tra energia e massa di un sistema, a meno di un fattore c^2 di conversione tra le unità di misura.

Bibliografia

- [1] FEYNMAN R. P., LEIGHTON R. B. e SANDS M., *The Feynman Lectures on Physics I* (Addison-Wesley Publ. Co., Reading) 1963, 4-1 e 3-3.
- [2] KUHN TH. S., "Energy conservation as an example of simultaneous discovery", in MARSHALL CLAGETT (editor) *Critical problems in the history of science* (University of Wisconsin Press, Madison) 1969, pp. 321-355.
- [3] IRVINE W., "On the Effect of Heat and Cold on Animal Bodies", in *Essays, chiefly on Chemical Subjects*, edited by his son IRVINE W. (Mawman, London) 1805, pp. 191-206.
- [4] YOUNG TH., "On collision", in *A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts* (London, Taylor & Walton) 1845, pp. 57-62.
- [5] RANKINE W., "On the General Law of Transformation of Energy", *Philos. Mag.*, **34** (1853) 106.
- [6] CUMMING SIMPSON A. D., *J. Black: A Commemorative Symposium* (Royal Scottish Museum, Edinburgh) 1982; MAGIE W. F., *A Source Book in Physics* (McGraw Hill, New York) 1935.
- [7] BLACK J., *Experiments Upon Magnesia Alba, Quicklime and Some Other Alkaline Substances* (W. Creech, Edinburgh) 1777.
- [8] SÉGUIN A. e LAVOISIER A. L., "*I^{er} mémoire sur la respiration des animaux*", in LAVOISIER A. L., *Mémoires sur la respiration et la transpiration des animaux* (Gauthier-Villars, Paris) 1920, pp. 31-51.
- [9] CARNOT S., *Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu* (Bachelier, Paris) 1824; *Reflexions on the Motive Power of Fire*, edited by FOX R. (Manchester University Press, Manchester) 1986.
- [10] VON MEYER J. R., "Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur", *Annalen der Chemie und Pharmacie von Wohler und Liebig* 1842, Bd XLII, p. 233, ristampato in MAYER J. R., *Die Mechanik der Wärme: gesammelte Schriften* (Cotta'schen Buchhandlung, Stuttgart) 1867, pp. 1-12.
- [11] VON MEYER J. R., "Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhang mit dem Stoffwechsel (1845) ristampato in MAYER J. R., *Die Mechanik der Wärme: gesammelte Schriften* (Cotta'schen Buchhandlung, Stuttgart) 1867, pp. 13-126.
- [12] VON MEYER J. R., *Bemerkungen über das mechanische Aequivalent der Wärme* (Landherr JU, Heilbronn) 1851.
- [13] VON HELMHOLTZ H., *Über die Erhaltung der Kraft, eine physikalische Abhandlung* (Reimer, Berlin) 1847.
- [14] JOULE J. P., "On the Mechanical Equivalent of Heat", *Philos. Trans. R. Soc. London*, **140** (1850) 61.
- [15] THOMSON W., "On the Dynamical theory of Heat", *Trans. R. Soc. Edinburgh*, March 1851.