

TRA FISICA E BIOLOGIA: DAL CALORE ANIMALE ALLA CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA

di Clara Frontali clara.frontali@inwind.it

On peut connaître par exemple à combien de livres en poids répondent les efforts d'un homme qui récite un discours, d'un musicien qui joue un instrument. On pourroit même évaluer ce qu'il y a de mécanique dans le travail du philosophe qui réfléchit.

Séguin e Lavoisier, 1789

Introduzione

Può apparire sorprendente il fatto che la parola 'energia' (oggi di uso così diffuso, a proposito e a sproposito) nella sua accezione moderna sia entrata nella terminologia scientifica solo dopo il 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 dalla difficoltà ad ammettere, per tali processi, meccanismi non diversi da quelli del 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. E' 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' [1]. 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 Leibniz¹.

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 analizzata in dettaglio, 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 di organismi viventi, di energia chimica in forma di 'composti complessi'.

Sia Meyer che Helmholtz (anche sotto l'influsso della Naturphilosophie che da Schelling in poi vede alla base della stessa esistenza del mondo - sia vivente che inorganico - un conflitto tra 'forze'), utilizzano il termine 'forza' in luogo del termine 'energia', che solo successivamente verrà universalmente utilizzato per indicare il concetto che essi hanno contribuito a formare.

Oltre che nel linguaggio letterario², il termine 'energia' (da 'energhéia', termine coniato da Aristotele per una forza che trasforma l'ipotetico in realtà) è presente nel linguaggio scientifico 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 energetica'* 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'* [2] 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 fisica la parola 'energia', come egli fa nel 1807 con riferimento al prodotto mv^2 [3]. Nel 1853 la parola verrà ripresa da

¹ Accanto alla *vis viva* Leibniz introduce una *vis mortua*, una forza statica, che tuttavia non può essere confrontata quantitativamente con la *vis viva*, né compensarne le variazioni.

² Per Machiavelli (1469-1537), l'energia è una delle 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 un linguaggio.

William Rankine (1820-1872), che introdurrà il termine ‘energia potenziale’, e nel 1856 da William Thomson (Lord Kelvin) cui si deve l’introduzione del termine ‘energia cinetica’.

Il calore animale

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 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. E’ 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, e dimostra 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 consentirà alle idee di Harvey di affermarsi definitivamente verso la fine del secolo.

Nel suo trattatello sul calore del 1620 (inserito nel *Novum Organum*) Francis Bacon (1561-1626) include tra le *Instances of the Form of Heat*, oltre ai raggi del sole, alle fiamme di ogni tipo, alle sorgenti termali, ai corpi strofinati violentemente, anche ‘*gli animali, in modo particolare al loro interno; benché il calore non sia percepibile al tocco negli insetti, a causa della loro piccolezza*’³, mentre, a proposito delle *Comparative Instances of Heat* osserva che questo calore aumenta a seguito di movimento, febbre, ingestione di cibi e vino, ecc. (Si noti che ‘ciò che è percepibile al tocco’ viene chiamato ‘calore’, mentre in un altro passo del trattato a proposito di una cessione di calore Bacon parla di ‘perdita di temperatura’. Questo uso intercambiabile dei due termini è peraltro la norma fino alla metà del XVIII secolo).

Per Cartesio e gli ‘iatromeccanicisti’ il calore animale viene prodotto per attrito nei movimenti del corpo, mentre per gli ‘iatrochimici’ seguaci di Paracelso (1493-1541) 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

³ ‘*Animals, particularly internally; although the heat is not perceivable by the touch in insects, on account of their small size.*’

contenuta nell'aria respirata e qualche materiale sulfureo presente nei tessuti. Così pensano anche Boyle (1627-1691) e Hooke (1635-1703).

E' 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. Che ciò non sia dovuto semplicemente all'accumulo di 'gas mefitici' espirati lo dimostra il fatto che l'animale sopravvive (e respira) più a lungo nello stesso recipiente se 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, ulteriormente sviluppata da John Mayow (1640-1679) e Richard Lower (1631-1691) è che nella respirazione una componente dell'aria, uno '*spiritus nitro-aereus*', venga assorbita dal sangue a livello del circolo polmonare. Qui, combinandosi con particelle sulfuree causerebbe una marcata fermentazione, fonte del calore poi distribuito dal sangue a tutti i tessuti. Lower attribuisce alla penetrazione nel sangue di questo 'nitrous spirit of the air' la variazione di colore del sangue da venoso a arterioso.

Tale fiorire di attività sperimentali e di nuove elaborazioni nella 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 facevano ricorso all'attrito esercitato dalle pareti dei vasi sul flusso sanguigno per spiegare l'origine del calore animale. 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 osservato da Boyle e Hooke nella calcinazione dei metalli).

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 tenute durante i

10 anni ivi trascorsi (prima di essere chiamato all'università di Edinburgo) si trovano esposti [4] gli argomenti e le prove sperimentali utili a distinguere -per la prima volta- la quantità di calore dalla grandezza intensiva che si misura col termometro⁴:

'Il calore può essere considerato sotto l'aspetto della sua quantità o della sua intensità. Così due libbre d'acqua, a parità di riscaldamento, devono contenerne una quantità doppia di quanto non faccia una sola di esse (benché il termometro applicato loro quando sono separate oppure unite si fermi esattamente allo stesso punto) perché per riscaldare due libbre si richiede un tempo doppio di quello necessario a scaldarne una.'

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 operata da Black gli consente infatti per la prima volta 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 pubblicati nel 1756 [5] 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. (Si tratta di quella che van Helmont (1579-1644) aveva chiamato 'gas silvestre'). 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. Lo stesso test di precipitazione fornisce identico risultato se eseguito per il 'fluido elastico' 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.

Antoine-Laurent Lavoisier e Adair Crawford

⁴ 'Heat may be considered either in respect of its quantity or of its intensity. Thus two lbs. of water, equally heated, must contain double the quantity [of heat] that one of them does (though the thermometer applied to them separately or together stands at precisely the same point) because it requires double the time to heat two lbs. as it does to heat one.'

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) l'aver sgombrato il campo dalla teoria del flogisto e l'aver riconosciuto che quella sostanza, da lui denominata ossigeno (così come altre *arie*, ad esempio l'azoto) non era caratterizzata dal presentarsi forma gassosa, ma poteva entrare nella composizione chimica di solidi e liquidi.

Negli anni 1776-77 Lavoisier, in collaborazione con Pierre-Simon de Laplace (1749-1824), confermò, sulla base di esperimenti condotti su cavie, che nella respirazione si consuma aria respirabile (ossigeno) e si emette 'aria fissa', e dimostrò che in questo processo si ha liberazione di calore in un rapporto, rispetto alla quantità di aria fissa (CO₂) 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 la conversione dell'aria respirabile in aria fissa avvenisse nei polmoni, 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 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 ripetutamente 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 ricco⁵.

E' questa la prima volta che il lavoro muscolare (misurato in pesi sollevati) - ma anche quello intellettuale, come efficacemente espresso nel brano qui riportato in apertura - viene messo in rapporto con le trasformazioni chimiche che hanno luogo nell'organismo. Con le parole di Lavoisier e Séguin [6, pag.43]:

'Ce genre d'observations conduit à comparer des emplois de forces entre lesquelles il semblerait n'exister aucun rapport'.

⁵ Il rapporto tra stati psichici (oltreché fisici) e circolazione del sangue, o quantità e tipo di cibi ingeriti, è portata in chiave anti-cartesiana (contro il dualismo anima/corpo) dal medico e filosofo Julien Offray de la Mettrie (1709-1751) nel suo *L'homme-machine* (dedicato a Haller) del 1747, lo stesso testo in cui afferma *'Le corps humain est une machine qui monte elle-même ses ressorts'*.

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 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 sede della respirazione

La rivoluzione operata da Lavoisier e Laplace, che trattava la respirazione come 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 CO₂ 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.

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 trealberi 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 Germania⁶. Convinto seguace di Lavoisier, ne dedusse che alle temperature tropicali occorreva bruciare meno ossigeno per mantenere la temperatura corporea. Si pose il problema di capire quanto il fenomeno dipendesse dallo sforzo fisico (come sollevare pesi o 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 [7] afferma l'indistruttibilità delle cause: sono cause le *forze* -tra loro interconvertibili- quali: la 'forza di caduta' (*Falkraft*) dovuta all'innalzamento di un peso (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*' [8] 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 meccanico⁷.

'...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, uguale 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' 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.

⁶ Analoga osservazione era stata fatta da Crawford sul sangue venoso prelevato da un cane che era stato immerso in acqua moderatamente calda.

⁷ '... Die in den Lokomotiven wirksame Kraft ist die Wärme. Der Aufwand der Wärme, oder die Verwandlung der Wärme in Bewegung beruht nun darauf, dass die Wärmemenge, welche von den Dämpfen aufgenommen wird, fortwährend grosser ist als die, welche von den Dämpfen bei ihrer Verdichtung an die Umgebung wieder abgesetzt wird. Die Differenz gibt die nutzbar verwendete, oder die in mechanischen Effekt verwandelte Wärme... Gleiche Menge von Brennmaterial geben unter gleiche Umständen gleiche Wärmemengen; die Kohlen aber, welche unter dem Kessel verbrennen, geben weniger Wärme frei, wenn die Maschine arbeitet, als wenn sie stille steht. Die frei Wärme teilt sich der Umgebung mit, und geht so für mechanische Zwecke verloren'

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 anche se cambiano le sue apparenze, ed afferma⁸:

'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 afferma che essi traggono la loro *forza* dai raggi solari che vengono immagazzinati dalle piante in forma chimica. E' 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 [9], mentre già dal 1848 era in atto l'accesa polemica con Joule.

Per James Prescott Joule (1818-1888) il punto di partenza era la realizzazione di un motore elettrico (alimentato a batterie) che desse un rendimento più alto delle macchine termiche. Nel suo percorso verso questo obiettivo osservò quello che a noi è noto come effetto Joule e riscontrò che esiste una 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. 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 [10].

Oggetto della aspra polemica tra Joule e Meyer 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.

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), 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*' [11], dà la prima enunciazione completa del principio di conservazione dell'energia.

Partendo dalla meccanica, in presenza di forze newtoniane, e introducendo 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*', afferma⁹:

⁸ 'Bei allen physikalischen und chemischen Vorgängen bleibt die gegebene Kraft eine constante Grösse' *ibidem* p.48

⁹ 'In allen Fällen der Bewegung freier materiellen Punkte unter dem Einfluss ihrer anziehenden und abstoßenden Kräfte, deren Intensität nur von der Entfernung abhängig sind, ist der Verlust an Quantität der Spannkräfte stets gleich dem Gewinn an lebendiger Kraft, und der Gewinn des ersteren dem Verlust des letzteren. Es ist also stets die Summe der vorhandenen lebendigen und Spannkräfte constant. In dieser allgemeinsten Form können wir unser Gesetz als das Prinzip von der Erhaltung der Kraft bezeichnen.'

‘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 calore¹⁰ (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’*, dopo aver discusso le ‘forze’ meccaniche, elettriche e magnetiche, scrive¹¹:

*‘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*

¹⁰ Dabei ist aber nicht aber nicht berücksichtigt worden dass ... uns sowohl die gewonnene Wärme eine kraft represäntiert, durch welche wir mechanische Wirkungen erzeugen können. ... Es bliebe also zu fragen übrig .. ob für einen gewissen Verlust an mechanischer Kraft jedesmal eine bestimmte Quantität Wärme entsteht, und inwiefern eine Wärmequantität einem Aequivalent mechanischer Kraft entsprechen kann.

¹¹ ‘Es bleiben uns von den bekannten Naturprocessen noch die des organischen Wesen übrig. In den Pflanzen sind die Vorgänge hauptsächlich chemische... Vornämlich wird in ihnen eine mächtige Quantität chemischer Spannkkräfte deponiert, deren Äquivalent uns als Wärme bei der Verbrennung der Pflanzensubstanzen geliefert wird. Die einzige lebendige Kraft, welche dafür nach unseren bisherigen Kenntnissen während des Wachstums der Pflanzen absorbiert wird, sind die chemischen Strahlen des Sonnenlicht. Es fehlen uns indessen noch alle Angaben zur näheren Vergleichung der Kraftäquivalente, welche hierbei verloren und gewonnen werden. Für die Tiere haben wir schon einige nähere Anhaltspunkte. Dieselben nehmen die complizierten oxydablen Verbindungen, welche von den Pflanzen erzeugt warden, und Sauerstoff in sich auf, geben dieselben meistens verbrannt, als Kohlensäure und Wasser, teils auf einfachere Verbindungen reduziert wird von sich, verbrauchen also eine gewisse Quantität chemischer Spannkkräfte, und erzeugen dafür Wärme und mechanische Kräfte. Da die letzten eine verhältnissmässig geringe Arbeitsgrösse darstellen gegen die Quantität der Wärme, so reduziert siche die Frage nach der Erhaltung der Kraft umgefähr auf die, ob die Verbrennung und Umsetzung der zur Nahrung dienenden Stoff eine gleiche Wärmequantität erzeuge, als die Tiere angeben?’.

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. Poiché queste ultime rappresentano una grandezza trascurabile rispetto alla quantità di calore, la domanda circa la conservazione della forza si riduce con buona approssimazione alla domanda se la combustione e la trasformazione della materia che serve da nutrimento sviluppino una quantità di calore uguale a quella prodotta dagli animali'.*

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.

Uno sguardo d'insieme

A valle di alcune tendenze settecentesche (cfr. Haller e La Mettrie) a trovare nei meccanismi fisiologici l'origine di quanto era ritenuto di natura spirituale, e soprattutto a valle della rivoluzione lavoisieriana, l'ambiente culturale e scientifico tedesco della prima metà del 1800 in cui formarono Meyer e Helmholtz era ancora diviso circa la possibilità di ricondurre i fenomeni del mondo vivente a quelli studiati dalla fisica e dalla nascente chimica.

Del 1828 è la sintesi chimica della molecola organica dell'urea ad opera di Friedrich Wöhler (1800-1882). Questo risultato non impedisce al suo amico e prestigioso collega, Justus von Liebig (1803-1873), di sostenere che - anche se è possibile produrre chimicamente in laboratorio singoli componenti di organismi biologici - la formazione di cellule e di tessuti organizzati richiede invece l'azione di una *vis vitae*, che egli tuttavia pone sullo stesso piano di altre azioni (come quelle termiche o quelle elettriche) cui le 'forze chimiche' sono sottoposte.

Nel 1842 viene enunciato il programma anti-vitalista del gruppo di fisiologi/fisici formato da Carl Ludwig (1816-1895), Ernst Brücke (1819-1892), Emil Du Bois-Reymond (1818-1896) e dallo stesso von Helmholtz, programma che aspira ad una interpretazione della fisiologia su basi chimico-fisiche, portandola allo stesso rango della fisica.

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 verso la conservazione dell'energia (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, e la problematica relativa al vivente resta del tutto marginale.

Bibliografia

- [1] T. S. Kuhn, 'Energy conservation as an example of simultaneous discovery' in Marshall Clagett (editor) *Critical problems in the history of science* Madison, Univ. of Wisconsin Press, 1959, pp 321-355. <http://books.google.it/books?id=WboPReSZ668C>
- [2] W. Irvine, 'On the Effect of Heat and Cold on Animal Bodies' in *Essays, chiefly on Chemical Subjects*, edited and introduced by his son W. Irvine, London 1805, pp 191-206. <http://books.google.it/books?id=bDQJAAAAIAAJ>
- [3] Th. Young, 'On collision' (1807) in *A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts*, Taylor & Walton, London 1845, pp. 57-62. <http://books.google.it/books?id=lyQEAAAAQAAJ>
- [4] J. Black, 1728-1799: A Commemorative Symposium, A.D. Cumming Simpson, Royal Scottish Museum, 1982, p. 16;
W.F. Magie A Source Book in Physics New York, McGraw Hill, 1935
- [5] J. Black, Experiments Upon Magnesia Alba, Quicklime and Some Other Alkaline Substance, *Essays and Observations of the Philosophical Society of Edinburgh*, 1756, riportato in http://archive.org/stream/ExperimentsUponMagnesiaAlba1782/Cullen_EssayOnTheCold_1782#
- [6] A. Séguin e A.L. Lavoisier, I^{ere} mémoire sur la respiration des animaux, Mémoires de l'Académie des Sciences 1789 in A.L. Lavoisier. *Mémoires sur la respiration des animaux*, Gauthier-Villars, Paris 1920, pp. 31-51 <http://archive.org/stream/mmoiresurlere00lavo#>
- [7] R. von Meyer, Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur, *Annalen der Chemie und Pharmacie von Wohler und Liebig*, 1842, Bd XLII, p. 233 e segg, riprodotto in *Die Mechanik der Wärme: gesammelte Schriften*, Stuttgart, 1867 pp. 1-12. http://books.google.it/books?id=Y4YEr8ci_oIC
- [8] R. von Meyer, Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhang mit dem Stoffwechsel, *ibidem* pp. 13-126
- [9] R. von Meyer, Bemerkungen über das mechanische Aequivalent der Wärme', Heilbronn, 1851, *ibidem* pp. 235-248
- [10] J. Prescott Joule, On the Mechanical Equivalent of Heat, *Philosophical Transaction*, Part I, 1850, riprodotto in *The Scientific Papers of James Prescott Joule*, Cambridge University Press, p. 298-328, <http://books.google.it/books?id=-9JCYkJrOF8C>

[11] H. von Helmholtz, Über die Erhaltung der Kraft, eine physikalische Abhandlung, Reimer, Berlin, 1847 <http://books.google.it/books?id=NXcLAAAAMAAJ>