

Il ciclo di Carnot

- 1) Le macchine termiche
 - 2) Il calorico
 - 3) Lazare Carnot e la meccanica applicata alle macchine
 - 4) Sadi Carnot ed il ciclo
 - 5) Clapeyron
 - 6) Kelvin e Clausius
 - 7) Maxwell e Boltzmann
 - 8) Planck
 - 9) Feynman
-

1. Le macchine termiche

Fin dall'antichità i fenomeni termici erano stati utilizzati per produrre movimenti, in particolare utilizzando il vapore: famosi sono i congegni inventati da Erone di Alessandria.

Fu solamente nel '700 però, sotto la spinta dei problemi posti dalla rivoluzione industriale inglese, che si cercò di utilizzare la produzione di vapore per compiere lavoro: in particolare per svuotare le miniere dall'acqua che vi si infiltrava in quantità.

L'evoluzione delle macchine a vapore fu relativamente rapida e si svolse indipendentemente dall'elaborazione teorica degli scienziati: essa rimase competenza quasi esclusiva di tecnici. È uno di quei casi in cui la tecnologia ha dato un contributo alla scienza e non viceversa. Lo sviluppo delle macchine è legato in particolare alla sempre migliore comprensione delle specifiche fasi del processo e quindi alla determinazione delle funzioni delle singole parti. Ad esempio la separazione della caldaia dal cilindro e di questo dal condensatore portarono ad un enorme incremento del rendimento, cioè del lavoro ottenuto in rapporto al combustibile consumato. Lo scozzese Watt giocò un ruolo tecnologico e industriale di primo piano. Rilevante in particolare il sussistere di una differenza di temperatura tra la caldaia ed il condensatore, l'uso pionieristico del diagramma pressione volume, ed il brevetto sul Principio espansivo. Importanti anche i contributi di Woolf sull'applicazione del principio espansivo e sul riuso dell'acqua del condensatore, che porterà al progetto di una macchina a ciclo chiuso. Da ricordare ancora il dibattito alta pressione/ principio espansivo per migliorare rendimento ed i contributi di Clement alla definizione dell'espansione adiabatica.



J. L. Heilbron



Historical Studies in the
Physical and Biological Sciences
Supplement to
Vol. 10, Part I

2. Il calorico

Nel Settecento la teoria prevalente sui fenomeni termici era quella che riteneva che il calore fosse una sostanza fluida, il calorico, che si trasmetteva dal corpo più caldo a quello più freddo. Sede di forze repulsive il calorico tendeva a far dilatare i corpi. Si supposeva inoltre che essendo una sostanza non potesse nè essere creato nè distrutto, ma solamente spostato. Si pensava inoltre che esistessero due tipi di calore: quello effettivo, percepibile, e quello latente, immagazzinato all'interno dei corpi.

Nel Settecento la teoria prevalente sui fenomeni termici era quella che riteneva che il calore fosse una sostanza fluida, il calorico, che si trasmetteva dal corpo più caldo a quello più freddo. Sede di forze repulsive il calorico tendeva a far dilatare i corpi. Si supposeva inoltre che essendo una sostanza non potesse nè essere creato nè distrutto, ma solamente spostato. Si pensava inoltre che esistessero due tipi di calore: quello effettivo, percepibile, e quello latente, immagazzinato all'interno dei corpi. La teoria del calorico si inquadrava nel “modello standard” dell’epoca.

La fisica del tardo XVIII secolo faceva infatti ricorso a un complesso di sostanze di tipo qualitativamente diverso che facevano da portatori di forze, introdotte ognuna per la spiegazione di uno specifico ambito di fenomeni. Queste sostanze si dividevano in materie comuni o ponderabili e in fluidi senza peso, in grado di agire sulla materia ponderabile e, in certi casi, uno sull'altro. La materia ordinaria porta e esercita su se stessa le forze di gravità, di coesione, le forze derivanti da affinità chimiche e la capillarità. Tra le sostanze imponderabili, le particelle di luce interagiscono con la materia ordinaria; i fluidi (o il fluido) elettrici agiscono sulla materia ordinaria e uno sull'altro; i fluidi magnetici si comportano in maniera simile e il fluido autorepulsivo del calore (calorico) si contrappone alle varie forze coesive che, senza il suo intervento, coagulerebbero tutta la materia terrestre ponderabile in un grumo compresso.

Prendendo in prestito un termine dalla fisica di oggi, questo insieme di materie è stato chiamato il Modello Standard del tempo. Esso rappresenta tutti i fenomeni fisici conosciuti alla fine del XVIII secolo; aveva l'unità data da una comune veste matematica, anche se non da una ontologia coerente. L'esempio del modello standard era la teoria della gravitazione e le allusioni alle sue estensioni ad altri fenomeni suggerite da Newton nelle Queries alla fine

dell'*Opticks*. Per gran parte del XVIII secolo, tuttavia, l'accostamento tra calcolo e osservazione che fece la fama della teoria gravitazionale non poté essere replicato in ogni branca della fisica sperimentale. Cominciando intorno al 1770, la situazione cambiò rapidamente e elettricità, magnetismo e calore cominciarono a sottostare al tipo di analisi che aveva ordinato i movimenti dei pianeti. Nel 1785 Coulomb diede un importante contributo in questa direzione per i fenomeni elettrici. Al passaggio tra il XVIII e il XIX secolo, i fenomeni di capillarità e il comportamento della luce rientrarono nello schema. Questi risultati ispirarono ed esemplificarono il programma descritto da Laplace nel 1796 e portato quasi alla realizzazione (o così egli pensò) da Gay-Lussac nel 1809: perfezionare la fisica terrestre con le stesse tecniche che Newton aveva usato per perfezionare lo studio della meccanica celeste.

3. Lazare Carnot e la meccanica applicata alle macchine

E' da notare che il "modello standard" non raccoglieva comunque l'unanimità dei consensi, in particolare qui occorre sottolineare il programma di ricerca di Lazare Carnot, che diede vita alla disciplina della meccanica applicata alle macchine e che si contrapponeva alla tradizione fisico matematica della meccanica analitica di Lagrange e Laplace. All'Ecole Polytechnique, fondata da Lazare Carnot nel 1795, entrambe queste tendenze furono rappresentate. Gli insegnanti e gli allievi dell'Ecole agli inizi dell'Ottocento furono i protagonisti del processo di matematizzazione delle scienze baconiane, successivo a quello della professionalizzazione e quantificazione di fine Settecento. E' notevole che numerosi famosi scienziati si rifiutarono di aderire al "modello standard" e proseguirono seguendo programmi di ricerca minoritari, ma molto fertili: tra questi Alessandro Volta, come pure Oersted e Faraday. Lo stesso Sadi Carnot, pur essendo un allievo dell'Ecole, e quindi esperto di tecniche analitiche, espone le proprie idee secondo un programma di ricerca molto più vicino alle idee di Volta che non alla scuola laplaciana.

Si ricordano solo quattro principi delle teorie di Lazare Carnot (1786):

- a) L'attenzione portata alle macchine in generale (e quindi l'indipendenza dal macchinario specifico)
- b) Ciò che si guadagna in forza si perde in tempo o velocità (prefaz., par.57), ovvero impossibilità del motore perpetuo (par. 62)
- c) Per produrre il più grande effetto possibile occorre necessariamente che non avvenga alcuna percussione, il moto deve cambiare sempre per effetti

insensibili (prefaz., par. 59). Pertanto occorre mettere a contatto solo parti delle macchine alla stessa velocità.

d) Ogni moto che sfugge con l'acqua che abbandona la macchina dev'essere minimo e quindi il ciclo ideale è chiuso (Principes 1803).

4. Sadi Carnot ed il ciclo

Una teoria dei fenomeni termici fu elaborata in Francia, il paese che ai primi dell'Ottocento era all'avanguardia nella ricerca scientifica. L'autore era un giovane ingegnere con un cognome famoso, Sadi Carnot, figlio di Lazare, famoso rivoluzionario e pioniere della meccanica applicata alle macchine. Carnot partì dalla teoria del calorico e dall'impossibilità del motore perpetuo. Si basò sull'analogia con il lavoro che si poteva ottenere da un dispositivo idraulico: quantità d'acqua caduta moltiplicata per l'altezza di caduta. Facendo corrispondere all'acqua il calorico e alla differenza di altezza la differenza di temperatura, asserì che il lavoro compiuto nelle macchine termiche era uguale alla quantità di calore trasmesso da una parte all'altra della macchina moltiplicato per la differenza di temperatura tra le due parti della macchina. Era estremamente importante quindi che quando il calore veniva trasmesso senza compiere lavoro le parti della macchina fossero alla stessa temperatura, altrimenti ci sarebbero state delle perdite inutili. In questo possiamo notare una precisa influenza del principio di trasmissione del lavoro elaborato dal padre Lazare per il caso delle macchine meccaniche: il lavoro va trasmesso tra parti della macchina che sono alla stessa velocità per minimizzare le perdite di forza viva. Sadi Carnot ipotizzò una macchina ideale in cui la trasmissione di calore avveniva tra due corpi alla stessa temperatura (a temperatura costante) e i movimenti meccanici (espansione e compressione) avvenivano invece a temperature diverse (ma senza scambio di calore). Il risultato fu il famoso ciclo di Carnot e la legge del rendimento di una macchina termica: relazioni che sono valide ancora oggi anche se il calore non viene più interpretato come sostanza ma come movimento, anche se oggi poniamo in relazione direttamente il lavoro con il calore e non come faceva Carnot con il calore moltiplicato per una differenza di temperatura. L'ipotesi dell'impossibilità del motore perpetuo portava Carnot a formulare una versione pionieristica del secondo principio della termodinamica: il calore non può essere trasmesso da un corpo più freddo ad uno più caldo. Il lavoro di Carnot non fa quasi uso della matematica e resta uno degli esempi più geniali di ragionamento scientifico.

I) Da una lettura delle *Rèflexion* si può osservare che nella prima parte Carnot elabora una teoria di principi (la reversibilità ideale è alla base della spiegazione dell'irreversibilità).

A) Ristabilimento dell'equilibrio del calorico.

Il calore è una sostanza, il fluido calorico, che può essere portata a varie temperature. Il calorico in un corpo ad una certa temperatura è in una condizione di equilibrio. Se il calorico viene portato ad un'altra temperatura l'equilibrio viene perturbato ed il calorico tenderà al ristabilimento dell'equilibrio termico, cioè a ritornare alla temperatura originaria. La temperatura è indice di questa tendenza/tensione e quindi assume il ruolo di grandezza in-tensiva. Aspetto fondamentale dell'approccio è quello del ristabilimento delle condizioni iniziali e quindi del ciclo. Notevoli le analogie (temperatura come tensione, calorico come fluido elettrico) con il programma di ricerca di Volta e la differenza rispetto al modello standard.

B) Analogia idraulica

Il lavoro è ottenuto dal calorico che “cade” da T_2 a T_1 . E' quindi dato dal prodotto di una grandezza intensiva (la differenza di temperatura) per una estensiva (la quantità della sostanza calorico): $Q\Delta T$. E' necessario avere due temperature per ottenere lavoro, indipendentemente dalla quantità di calorico disponibile. Viceversa, quando ci sono due temperature si può ottenere lavoro, il calorico ad una data temperatura ha una tendenza/tensione (data dalla temperatura) a passare “spontaneamente” dalla temperatura più grande alla più piccola. L'esistenza di *due* sorgenti di calore caratterizzate da una diversità di temperatura è quindi una condizione sufficiente e necessaria per la produzione di lavoro mediante calore.

C) Il principio del massimo rendimento nella trasmissione del lavoro ed il ciclo reversibile

Sadi Carnot adatta al caso delle macchine termiche il principio del massimo rendimento nella trasmissione del lavoro enunciato dal padre Lazare per le macchine. Il principio di Lazare asseriva che per ottenere il massimo rendimento lo scambio di lavoro doveva avvenire tra le parti di una macchina con la stessa velocità. Se fossero venute in contatto parti a velocità diversa, ci sarebbe stata perdita di forza viva, e quindi di lavoro, per urti o attriti. Sadi asserisce che nelle macchine termiche si ottiene il massimo rendimento se il calore viene scambiato tra parti della macchina che entrano in contatto alla stessa temperatura. Poiché il passaggio di calore da una temperatura più alta ad

una più bassa può sempre produrre lavoro, ragionò Carnot, un trasferimento di calore senza produzione di lavoro, quale si verifica quando un corpo caldo e uno freddo sono posti a contatto diretto, equivale a uno spreco del lavoro che la cessione di calore avrebbe potuto generare. Un motore termico ideale deve quindi tendere a evitare una trasmissione diretta di calore lungo una differenza di temperature, onde produrre tutto il lavoro in teoria ottenibile. Ogni volta che c'è un ΔT è necessario che ci sia anche un ΔV . In altre parole nel motore termico ideale tutti i passaggi di calore si debbono realizzare tra temperature uguali (isotermicamente) e tutti i riscaldamenti o raffreddamenti nell'ambito del motore si debbono effettuare senza flusso termico diretto (adiabaticamente) e quindi tramite cambiamenti di pressione-volume (espansioni e compressioni). Questo motore ideale, secondo Carnot, non sarebbe affatto in grado di funzionare, in quanto il calore non fluirebbe nel motore senza una differenza di temperatura, ma la minima deviazione dall'ideale, la più lieve diversità di temperatura sarebbero sufficienti ad azionare la macchina e al contempo a mantenere il rendimento vicino al valore massimo. In questo ciclo ideale gli scambi sono reversibili, avvengono in una direzione specifica per piccolissime differenze di temperatura, una concezione di differenze infinitesimali che di nuovo si può riallacciare al lavoro del padre. (p.38).

Per ottenere lavoro (evitare ciclo di Atkins) necessario portarsi ad un'altra temperatura (ΔT): ciò va fatto con delle adiabatiche. Il lavoro si ottiene perché la compressione lungo la seconda isoterma avviene a pressione più bassa (legge di Boyle). Quindi importanza alle temperature per l'efficienza e non alle pressioni.

Il ciclo è chiuso: si ritorna nelle condizioni iniziali, per garantirsi che tutto il calore che è passato attraverso la macchina è stato utilizzato per produrre lavoro e non per modificare la sostanza che evolve.

Tutto il ciclo è reversibile: se fatto in senso antiorario si perde lavoro invece di guadagnarlo, ma la macchina può funzionare ugualmente. In pratica lungo la prima isoterma (a temperatura più elevata) si cede calore dal primo serbatoio al cilindro, il che a temperatura costante provoca un'espansione; una seconda espansione e conseguente diminuzione di temperatura avviene lungo la prima adiabatica, quindi in queste due prime parti c'è cessione di calore al cilindro e guadagno di lavoro; lungo la seconda isoterma (a temperatura inferiore) si spende lavoro per effettuare una compressione con cessione di calore da parte del cilindro al secondo serbatoio, si spende ancora lavoro per effettuare la compressione adiabatica con relativo aumento di temperatura e riportare il

calorico della sostanza che evolve alle condizioni iniziali. Quindi il ciclo in senso orario produce lavoro (dato dalla differenza tra quello acquisito nelle prime due fasi e quello speso nelle seconde due); in senso antiorario, partendo dall'adiabatica si ottiene lavoro con l'espansione che ci porta a temperatura inferiore, cedendo calore lungo l'isoterma a temperatura inferiore ancora si ottiene del lavoro, ma se ne spende di più di quello ottenuto nelle due fasi della compressione lungo l'adiabatica che ci porta a temperatura superiore e della compressione lungo l'isoterma a temperatura superiore con relativa cessione di calore da parte del cilindro. Si spende dunque lavoro nel trasportare il calorico ad una temperatura superiore, ma la macchina può funzionare ugualmente.

D) Dal principio di impossibilità del motore perpetuo si ricava che la macchina reversibile è quella con il migliore rendimento.

Accoppiando una macchina ipoteticamente migliore con quella reversibile funzionante all'inverso si potrebbe ottenere lavoro ad ogni ciclo.

La macchina descritta nel ciclo di Carnot è inoltre indipendente dallo specifico macchinario e dalla sostanza.

La prova della prima affermazione è semplice e costituisce un esempio per molte altre prove avanzate dai seguaci di Carnot: "Se esistesse un metodo di impiego del calore preferibile a quello di cui ci siamo serviti, in altre parole se fosse possibile ottenere dal calore, con qualunque processo alternativo, una maggiore quantità di energia motrice... si potrebbe allora, dirottando una parte di questa energia, effettuare un riciclo di calore dal corpo B al corpo A, ovvero da refrigerante alla sorgente, e così ripristinare la situazione originaria in modo da dare il via a un'operazione esattamente simile alla prima, ripetendo il processo più volte. Ne deriverebbe non soltanto il moto perpetuo, ma un'illimitata creazione di energia motrice senza consumo di calore o di altro agente di sorta. Una simile creazione è completamente contraria alle idee oggi accettate, alle leggi della meccanica e della fisica razionale; è inammissibile" (Carnot, 1824, p. 11).

L'analogia calore-acqua suggerita da Carnot non era casuale. All'epoca di Carnot era d'uso tra gl'ingegneri progettare motori ad acqua capaci di funzionare anche in senso *contrario*, ossia come pompe idrauliche. Il rendimento di una tale macchina era definito come rapporto tra la quantità d'acqua restituibile all'altezza originaria mediante il ciclo invertito e la quantità totale di acqua motrice. Si sapeva che il motore idraulico ideale era quello completamente reversibile. Una macchina con rendimento superiore a quella reversibile è un *perpetuum mobile*. Poiché la teoria più diffusa sul calore era a

quell'epoca la teoria calorica, è perfettamente naturale che Carnot abbia fondato la sua analisi sull'analogia calore-acqua.

II) Seconda parte: dati sperimentali e dubbi teorici

A) Rendimento e temperatura

Il rendimento del ciclo dipende dalla temperatura? Carnot dice sì e intuisce che è maggiore a temperature più basse, basandosi sui dati, poi ritenuti erronei, di Delaroche e Berard. Il rendimento è dato dal rapporto tra il lavoro prodotto ed il calore assorbito. Per Carnot il lavoro è dato dal prodotto tra il calore e la differenza di temperatura, quindi il rendimento è proporzionale alla differenza di temperatura. Che la proporzionalità fosse legata all'inverso della T è un'altra intuizione di Carnot che non è facile spiegare.

B) Dubbi sull'ipotesi del calorico

Carnot dopo la redazione (prima della pubblicazione) inizia a dubitare dei dati sperimentali su cui si era basato e del modello del calore come sostanza.

Utilizza le esperienze di Clement e Desormes, ma in un manoscritto dello stesso periodo le espone in forma dubitativa, il che implica il dubbio sulla espressione dell'espansione adiabatica per un vapore saturo.

Infine un dubbio sulle osservazioni di Gay-Lussac e Welter sulla costanza di $\gamma = c_p/c_v$; dubbio importante perché Carnot sosteneva la costanza di $c_p - c_v$. La costanza di γ implicherebbe la non conservazione della quantità di calorico. (p.42, 53)

C) Calcolo dell'equivalente lavoro/calorico per ΔT .

In definitiva i dati sperimentali ancora incerti non garantivano a Carnot i fondamenti del proprio approccio. Quando effettivamente i dati si mostreranno erronei Carnot non sarà in grado di separare la parte ancora valida della propria teoria da quella non più sostenibile e non pubblicherà più niente.

D) Primo calcolo dell'equivalente calore/lavoro

In un manoscritto, pubblicato molto dopo (dal fratello Hyppolite nel 1878), calcola l'equivalente calore/lavoro. Molte le teorie su come abbia eseguito il calcolo.

In definitiva Carnot aveva raggiunto prima di ogni altro sia il secondo principio (per ottenere lavoro dal calore abbiamo bisogno di due temperature, il calore non può passare spontaneamente da un corpo freddo ad uno caldo), sia il primo principio (nella forma limitata alla correlazione calore-lavoro). Non era riuscito però a vederli insieme.

5. Clapeyron

La teoria di Carnot fu ripresa dall'ingegnere francese Clapeyron, cui si deve l'uso del diagramma PV e l'introduzione della cosiddetta funzione di Carnot.

6. Kelvin e Clausius

La teoria di Carnot era indipendente dalla sostanza utilizzata nella macchina termica e fu proprio questa caratteristica che permise a W.Thomson, poi Lord Kelvin, di elaborare la scala "assoluta" delle temperature. Kelvin utilizza l'indipendenza dalla sostanza del ciclo per definire la temperatura assoluta: dato che $W=Q\Delta T$ e che inoltre Q è una sostanza, la differenza di un grado di temperatura (ΔT) può essere definita da uguali quantità di lavoro. La funzione che uguaglia le quantità di lavoro è la temperatura assoluta. Carnot in una nota aveva indicato questa possibilità. In seguito W.Thomson definisce una seconda scala assoluta, in accordo con la scala basata sul termometro a gas.

Kelvin adotta quindi la teoria di Carnot, che produce intanto un nuovo successo: il fratello di W.Thomson prevede la diminuzione del punto di fusione del ghiaccio per un aumento di pressione e risolve così una possibilità di motore perpetuo.

Quando si cominciò a osservare, in particolare con le opere di Joule, che il calore non poteva più essere considerato una sostanza e che si poteva trasformare in lavoro sembrò ai maggiori scienziati dell'epoca che si aprisse un contrasto profondo tra la teoria di Carnot e la conservazione dell'energia: il calorico si conservava oppure si trasformava?

La soluzione di Clausius si basa sull'accettare entrambi i punti di vista: una parte del calore viene trasformato in lavoro, in accordo con i risultati di Joule, ed una parte viene trasferita ad un corpo a temperatura più bassa, in accordo con Carnot. Nell'elaborare questa sintesi Clausius utilizza la teoria di Carnot nella versione di Clapeyron.

Non rimane quindi costante il calorico nel ciclo reversibile, ma il calorico diviso la temperatura (Q/T): l'entropia (a maggiori temperature si acquisisce maggiore calore, a temperature minori si restituisce minore calore; la differenza di calore viene trasformata in lavoro).

Clausius e W.Thomson risolsero in maniera estremamente brillante il problema: abbandonando il modello del calorico riuscirono a salvare la parte importante della teoria di Carnot formulando i due famosi principi della termodinamica:

l'energia si conserva, ma si dissipa: non tutto il calore si può convertire in lavoro.

7. Maxwell e Boltzmann

L'elaborazione della termodinamica ricevette un grande sviluppo dalla teoria cinetica dei gas, alla quale contribuirono Clausius e Maxwell. L'interpretazione statistica della termodinamica data da Boltzmann è stata oggetto di accesi dibattiti.

8. Planck

La teoria di Carnot è in accordo con la conservazione dell'energia? Per Planck la risposta è sì, per l'accettazione da parte di Carnot dell'impossibilità del motore perpetuo, anche se il modello di lavoro $Q\Delta T$ non è più accettato. Per Planck i risultati di Carnot sono comunque corretti, come si vede ricalcolando l'equivalente portandosi alla temperatura assoluta zero.

9. Feynman