

La candela

Questa immagine della conoscenza scientifica e del tipo di mondo che essa indagherebbe sta a fondamento di due derive opposte. Da un lato, scoraggiati da una visione del mondo così dura e fredda, così lontana dalla delicatezza dei bisogni umani, molti si sono allontanati dalla scienza in generale, finendo spesso in circuiti misticheggianti di superficialità inaudita, dove tuttavia hanno almeno trovato calore. Dall'altro, si è andata edificando l'immagine degli occidentali come eroi culturali del mondo intero: gli unici adulti abbastanza da sopportare il disincanto, e pertanto destinati a trarre tutti gli altri dalle tenebre della loro ignoranza e portarli alla luce glaciale della nostra conoscenza disincantata (Monod 1970, Stengers 2006).

In questa doppia deriva ancora siamo — e anzi, oggi più che mai. Ed è sintomatico quanto poco ci avvediamo che queste peste dipendono da un'idea di natura, di cultura, di scienza e di ragione che tutto il secolo scorso ha provveduto, sistematicamente, a smontare.

Ho riportato quella che a me pare la parte programmatica (pag. 23, seconda colonna) di un articolo di Stefania Consigliere, la cui prima puntata è apparsa sul n. 1 di quest'anno. La puntata prosegue per oltre tre pagine, con la dimostrazione (o almeno con ciò che l'autrice pensa essere una dimostrazione) della tesi appena enunciata circa lo sviluppo della scienza nel '900.

Come potete immaginare, è questa tesi, quest'immagine della scienza del secolo scorso, che ha attratto la mia attenzione. Se qualcuno ricorda il finale della mia ultima puntata, avevo scritto:

[...] Come capite bene, questa domanda ci porta diritti al problema più generale: in che misura è possibile oggi una divulgazione scientifica?

C'è ampia materia su cui ragionare... Ma non la prossima volta, per la quale ho già in mente qualcosa di diverso (anche se non senza relazione con l'ultimo punto che ho sollevato).

Ma che c'entra la divulgazione scientifica? C'entra, perché — come vedremo — chiunque non sia addentro alla ricerca scientifica non ha, ormai da tempo, altro modo per avvicinarsi ai problemi di fondo, quelli di cui dovremo occuparci, se non ricorrere alla divulgazione. Magari divulgazione “alta,” non la divulgazione da quattro soldi che riempie gli scaffali “scientifici” delle librerie, ma pur sempre una mediazione, un'interpretazione; con cui un autore, più o meno famoso (non difettano in questo i premi Nobel) si rivolge a un pubblico attento e “colto” nel senso corrente della parola, ma privo di conoscenze, spesso anche basilari, in ambito scientifico; e cerca di trasmettergli quelli che ritiene essere i caratteri distintivi di un qualche campo della ricerca scientifica.

Prima di entrare nel vivo dell'argomento debbo ancora fare una precisazione. Nel seguito mi appoggerò da vicino all'articolo di Consigliere e discuterò le sue affermazioni su ciò che è avvenuto nella scienza (in particolare nella fisica) nel corso del '900. Ma non vorrei che questo venisse interpretato come una diretta polemica contro di lei: prendo lo spunto da quell'articolo perché è recente e i lettori di questa rivista possono facilmente verificare e integrare le mie citazioni, ma le tesi che Consigliere presenta ho avuto occasione d'incontrarle più volte e ritengo siano piuttosto diffuse fuori dell'ambito dei fisici di professione. Inoltre l'articolo di Consigliere mi è parso interessante e capace di stimolare numerose riflessioni; su vari punti mi sento d'accordo, su altri no, ma non potrebbe esserci discussione se non ci fosse qualche dissenso. . .

* * *

Comincio l'analisi della descrizione che Consigliere fa dello sviluppo della scienza nel '900 dal suo primo capitolo: la termodinamica. Avverto che solo in punti particolari potrò produrre citazioni, dato che altrimenti dovrei riprodurre tutto l'articolo: molto più semplice invitare i lettori interessati a tenere sott'occhio lo scritto di Consigliere mentre leggono questo. . . Però una citazione è necessaria, perché indica la motivazione del suo lavoro. La trovate a metà della colonna di sinistra a pag. 24:

Nelle prossime pagine vedremo rapidamente quale magnifica progressione conoscitiva, filosofica e, per così dire, ontologica abbia attraversato la scienza novecentesca. È una storia nota, almeno sulla carta; ma nonostante ciò, essa continua a essere raccontata ma non vissuta, riconosciuta in astratto ma del tutto disattesa nella pratica quotidiana e nelle forme del ragionamento. Ma è proprio a partire da qui, dall'emergere del molteplice e dell'indeterminato al centro della formalizzazione conoscitiva scientifica, che è possibile, oggi, ripensare davvero l'antropologia e il discorso sull'umano.

Sull'antropologia non mi pronuncio: preferisco parlare di ciò di cui sono almeno un po' competente. Ma vedrete che condivido ben poco di quanto Consigliere annuncia, a cominciare dal "raccontata ma non vissuta." Cercherò di mostrare che chi racconta questa storia lo fa da un punto di vista molto particolare, che non è affatto condiviso dalla più gran parte della comunità scientifica, la quale vive la scienza seguendo strade ben diverse e assai più concrete (anche se non prive di problemi, ma spesso aventi tutt'altra origine). Ma non anticipiamo. . .

Poco prima, Consigliere ha scritto:

Il Novecento è stato un secolo di crisi continua, in cui nulla di ciò che componeva il panorama ottocentesco della modernità, si è conservato immutato.

Ecco: travalicando per un momento le mie competenze specialistiche, mi chiedo: sarebbe falso affermare che "l'Ottocento è stato un secolo di crisi continua,

in cui nulla di ciò che componeva il panorama settecentesco della modernità, si è conservato immutato”?

Voglio esprimere con questo la mia diffidenza verso simili generalizzazioni, e del resto Consigliere si contraddice subito, quando, cominciando a parlare della nascita della termodinamica, osserva che il nuovo capitolo della fisica, nato e cresciuto *in pieno Ottocento*, “introduce nella scienza l’irreversibilità,” “rovescia i termini del problema rispetto al modello della dinamica newtoniana.” Ancora: “Le leggi della termodinamica [...] sono universali solo in condizioni di equilibrio o vicine all’equilibrio.”

Ciò che viene dopo: la sensibilità alle condizioni iniziali, l’auto-organizzazione . . . sono invece prodotti del Novecento (in piccola parte di fine Ottocento, ad es. con Poincaré) e se per amore di tesi mettiamo tutto insieme, la specificità del secolo scorso diventa già discutibile.

Per esaminare le tesi sopra accennate sulla termodinamica, è utile concentrarsi su due parole chiave: “equilibrio” e “reversibile.” Ma è anche utile ricordare qualcosa della storia della fisica dell’800, e cioè che per buona parte di quel secolo meccanica e termodinamica camminano affiancate ma senza contatti: due settori non comunicanti, con campi d’indagine, concetti, addirittura paradigmi di base ben distinti. Questo nel breve excursus di Consigliere non appare, anzi *non pare*:

Rispetto al modello della dinamica newtoniana, la termodinamica rovescia i termini del problema: la condizione di equilibrio, che la dinamica suppone come livello fondamentale della spiegazione fisica, è in termodinamica una condizione rara, che può essere costruita solo riparando il sistema da tutti i flussi e perturbazioni.

Qui c’è una decisa confusione. . . Non è assolutamente vero che la dinamica newtoniana abbia come livello fondamentale di spiegazione la condizione di equilibrio. Nel moto dei pianeti attorno al Sole non c’è nessun equilibrio: c’è la forza di attrazione del Sole, che *non è equilibrata* ed è causa di accelerazione. Per di più la forza varia nel tempo, in direzione e anche in grandezza quando l’orbita, com’è la regola, non è circolare. Ne risulta un moto in linea di principio complicato, che per felice combinazione si lascia trattare in modo relativamente semplice, e produce traiettorie chiuse: le ellissi kepleriane.

Questo però solo in una prima approssimazione, in cui si trascurano le interazioni tra i pianeti. Ma le osservazioni astronomiche sono così precise che la detta approssimazione è insufficiente, e ben presto i meccanici del ’700 si trovano a dover tener conto di *tutte* le forze agenti su ciascun pianeta: nasce così uno specifico campo di lavoro, appunto la meccanica celeste (d’Alembert, Lagrange, Laplace) che celebra il suo trionfo con la scoperta di Nettuno (1846). Non posso dilungarmi sui successivi sviluppi, per es. sul “problema della Luna,” ma debbo ricordare che è appunto da un problema di meccanica celeste

(il famoso “problema dei tre corpi”) che Poincaré viene condotto a scoprire comportamenti “strani” anche di sistemi meccanici relativamente semplici; dai quali, ben avanti nel '900, nascerà la teoria del “caos deterministico.” Non a caso, il libro in cui ne tratta è intitolato *Les méthodes nouvelles de la mécanique celeste* (1899).

Ma allora, da dove viene questo riferimento all'equilibrio? È forse inventato? Sicuramente no; del resto presumo che la fonte da cui Consigliere ha tratto questa parte del suo ragionamento sia il saggio di Prigogine e Stengers *La nuova alleanza*, citato nella bibliografia. Ma Prigogine la termodinamica la conosce . . . e infatti dice tutt'altro. Riassumiamo brevemente, con qualche mia interpolazione storica.

* * *

È proprio nella termodinamica classica che il paradigma dell'equilibrio entra in modo determinante nella fisica. Questo accade fin da quello che si può considerare lo scritto fondativo della termodinamica: le *Réflexions sur la puissance motrice du feu* di Sadi Carnot (1824). È lì che si possono leggere frasi come queste (pag. 9, traduzione mia):

La produzione del movimento nelle macchine a vapore è sempre accompagnata da una circostanza sulla quale dobbiamo fissare l'attenzione. Questa circostanza è il ristabilimento dell'equilibrio nel calorico, ossia il suo passaggio da un corpo la cui temperatura è più o meno alta a un altro dove è più bassa.

(pag. 10)

La produzione della potenza motrice è dunque dovuta, nelle macchine a vapore, non a un consumo reale del calorico, ma al suo trasporto da un corpo caldo a un corpo freddo, ossia a un ristabilimento d'equilibrio, equilibrio che si suppone sia stato rotto da una causa qualunque, da un'azione chimica, come la combustione, o da qualsiasi altra.

(pag. 12)

Dovunque esista una differenza di temperatura, dovunque si possa avere il ristabilimento di equilibrio del calorico, si può anche avere produzione di potenza motrice.

Di passaggio: in questi brani sono notevoli due cose. La prima è solo terminologica: Carnot parla di “potenza motrice” dove noi oggi diremmo “lavoro.” La seconda è assai più significativa, ed è che Carnot è ancora lontano dall'idea del calore come energia (anche se in certi passi l'idea che Carnot ha del calorico sembra piuttosto vicina a quella che oggi chiamiamo “energia interna”). Al contrario: il suo “calorico” si conserva *di per sé*, e la produzione di “potenza motrice” è solo dovuta al ristabilimento dell'equilibrio. Notiamo che questa tendenza del calorico verso l'equilibrio è considerata un fatto naturale, che solo se abilmente instradato può produrre lavoro in una macchina termica; ma avverrebbe comunque, con “perdita di potenza motrice,” dice Carnot (pag. 23–24).

Dato che ogni ristabilimento di equilibrio nel calorico può essere causa della produzione di potenza motrice, ogni ristabilimento d'equilibrio che avvenga senza produzione di questa potenza dovrà essere considerato una vera e propria perdita: ovvero, per poco che ci si rifletta, ci si accorgerà che ogni cambiamento di temperatura che non sia dovuto a un cambiamento di volume dei corpi può solo essere un ristabilimento inutile di equilibrio nel calorico. La condizione necessaria del massimo [della potenza motrice prodotta] è dunque che nei corpi impiegati per realizzare la potenza motrice non avvenga alcuna variazione di temperatura che non sia dovuta a una variazione di volume. Inversamente, ogni volta che questa condizione sarà soddisfatta, il massimo verrà raggiunto.

Questo principio non deve mai essere perso di vista nella costruzione delle macchine termiche; ne è la base fondamentale. Se non lo si può osservare rigorosamente, occorre almeno allontanarsene il meno possibile.

Avevo parlato di “brevi” interpolazioni storiche, e invece mi sono dilungato non poco. . . Come mai? Direi che le ragioni sono due. La prima è che desideravo mettervi a parte della bellezza e chiarezza dei ragionamenti di Carnot. Mi è già capitato in passato di osservare che la lettura dei classici riserva spesso queste piacevoli sorprese: leggerli produce ammirazione, non solo per quello che hanno saputo capire, ma anche per come sanno esprimersi. Dobbiamo tutti tenere a mente questi modelli. . .

Ma c'è una seconda ragione, più pertinente al nostro tema. Scrive a un certo punto Consigliere (pag. 24, prima colonna):

Nello stesso periodo [metà '800] la crisi comincia a manifestarsi anche nella fisica classica, quando, col passaggio fra la prima e la seconda rivoluzione industriale, e quindi con l'impiego estensivo delle macchine termiche, si trattò di spiegare come mai il rendimento reale delle macchine fosse sempre inferiore a quello teorico previsto dal ciclo di Carnot.

Se uno vuole vedere crisi dappertutto, riuscirà sempre a trovarle . . . ma qui, dov'è il problema? Abbiamo visto che già Carnot sapeva benissimo che le macchine reali non possono avere il rendimento della sua macchina ideale, e sapeva anche perché. Mi sono chiesto che cosa potesse nascondersi dietro le parole che ho appena citato, ma confesso di non aver trovato risposta.

* * *

Torniamo a Prigogine e all'equilibrio. Sommariamente, la tesi di Prigogine è che nella termodinamica vi siano stati tre stadi di sviluppo:

- un primo stadio, in cui la termodinamica si è occupata solo di sistemi all'equilibrio:

[. . .] *Nonostante ciò, la maggior parte della termodinamica classica, come è stata sviluppata nel diciannovesimo secolo, si è limitata alle situazioni di equilibrio. Possono esservi state varie ragioni per questo. Prima di tutto, tutti i più*

stupefacenti risultati della termodinamica classica corrispondono a situazioni di equilibrio. Esempi noti sono la regola delle fasi di Gibbs e la legge dell'azione di massa, che sono divenute classiche parti integranti di ogni testo introduttivo di chimica fisica.⁽¹⁾

- un secondo stadio, in cui si sono studiate condizioni non di equilibrio, ma vicine all'equilibrio.

Mi riferisco a quelle situazioni alle quali si applicano le *relazioni di Onsager*, su cui non posso dire di più per le solite ragioni di brevità. Mi limito a un esempio, classico e di valore pratico: la relazione tra l'effetto Seebeck e l'effetto Peltier. Il primo, noto anche come effetto termoelettrico, consiste nella nascita di una differenza di potenziale tra punti di un metallo che si trovano a diversa temperatura. Usando giunzioni tra metalli diversi, si può ottenere una corrente elettrica (pile termoelettriche). L'effetto Peltier invece consiste in una differenza di temperatura causata dalla corrente elettrica che attraversa una successione di giunzioni. In questo caso la relazione di Onsager connette i due coefficienti di proporzionalità:

$$\text{(corrente termoelettrica)/(differenza di temperatura)}$$

nell'effetto Seebeck e

$$\text{(flusso di calore)/(differenza di potenziale)}$$

nell'effetto Peltier.

Ciò che per noi conta è che le relazioni di Onsager hanno carattere anche molto più generale, e si applicano a moltissimi fenomeni. Ma soprattutto, che per dimostrarle ci si basa su una *linearizzazione* delle relazioni tra *flussi* (es. corrente elettrica o termica) e *forze* (risp. differenza di potenziale o di temperatura). Sul tema della linearità e della linearizzazione vi ho intrattenuti in due puntate: la prima ben 14 anni fa, la seconda “solo” 12. Non posso certo pretendere che qualcuno se ne ricordi... Per i più volenterosi, le citazioni sono

<http://www.df.unipi.it/~fabri/candela/candel22.pdf>

<http://www.df.unipi.it/~fabri/candela/candel27.pdf>

(però la più importante per il nostro discorso di oggi è la prima).

Anche allora mi capitò di osservare che ai fisici si addossa spesso la colpa di avere una visione ristretta del mondo dei fenomeni, in quanto usano limitarlo a quelli *lineari*. Ho già polemizzato in varie occasioni con quella che giudico una pesante distorsione della realtà del lavoro dei fisici; ma oggi possiamo andare un pochino più a fondo, e rintracciare l'origine della distorsione. Credo che tutto nasca da Prigogine: è infatti lui che scrive

[...] *Al contrario, una creazione di ordine può aver luogo lontano dall'equilibrio e in presenza di specifiche leggi cinetiche non lineari, al di là del dominio di stabilità degli stati che presentano il comportamento termodinamico usuale. Tradizionalmente la termodinamica si è occupata del primo tipo di comporta-*

mento, ma la nuova estensione della termodinamica irreversibile ci permette di occuparci anche dell'altro aspetto.⁽²⁾

È questo il terzo dei tre stadi della termodinamica, di cui avevo parlato poco addietro.

Qui non posso permettermi di esaminare per bene il significato di ciò che Prigogine accenna. Ricordo solo che nel 1977 ricevette il Nobel per la chimica, proprio per le sue ricerche su questo argomento, e in particolare per aver introdotto il concetto di “struttura dissipativa.” Mi dispiace di non poter approfondire l'argomento, ma mi richiederebbe spazio (della rivista) e tempo (mio, di lavoro) al di là di quello che voglio spendere. Cito solo due esempi di strutture dissipative, forse i più famosi. Il primo, che credo sia anche il più antico, sono le *celle convettive di Bénard*, strutture esagonali che si formano in un liquido riscaldato dal basso, in opportune condizioni. Il secondo, anche più spettacolare, sono le *reazioni chimiche periodiche*, per es. quella di Belusov–Zhabotinskij. Chi volesse saperne di più, trova ampie notizie in internet.

Va detto che in seguito Prigogine propose principi generali che furono largamente messi in discussione, e avanzò anche tentativi di applicazione delle sue idee in ambiti parecchio lontani dalla termodinamica: biologia, etologia, perfino sociologia ... (il libro che sto citando ne accenna ampiamente). Non credo si possa dire però che questi tentativi abbiano avuto molto successo, sia in senso teorico sia pratico.

Viceversa, e forse proprio per i suoi tentativi di “apertura” verso le discipline umanistiche, a cui del resto allude anche il titolo del libro, di evidente derivazione biblica, Prigogine è risultato molto popolare tra tutti coloro che non hanno conoscenza professionale della scienza, e magari ne hanno una visione critica. Va detto che *La nuova alleanza* è almeno in parte un libro divulgativo, o meglio una raccolta di saggi di diverso livello, che anche quando sono discutibili restano in genere su un piano di correttezza scientifica; possono però essere facilmente fraintesi da chi non sia abbastanza vicino alla materia. Poi le successive divulgazioni della divulgazione hanno finito per trasformare gli argomenti di Prigogine in estrapolazioni arbitrarie e fantasiose, di cui la storiella dei fisici che si occupano solo di fenomeni lineari è un tipico esempio.

* * *

E ora occupiamoci un po' dell'altra parola chiave: “reversibile.” In che senso e in che misura è vero che la termodinamica introduce nella scienza l'irreversibilità? Vorrei anticipare il mio punto di vista, che poi cercherò di argomentare. È vero e non è vero, nel senso che da un lato fenomeni irreversibili erano ben noti e studiati prima della termodinamica; da un altro, in termodinamica la reversibilità (intesa in un modo diverso, che dovrò chiarire) ha un ruolo determinante, mentre l'irreversibilità appare in un primo tempo più come un disturbo, un difetto, che non come una caratteristica essenziale dei fenomeni studiati. In-

fine, va ricordato che il “problema della reversibilità” nasce con la meccanica statistica, ossia col tentativo di raccordare i due filoni della fisica (meccanica e termodinamica) che — come ho detto sopra — in gran parte dell’800 avevano viaggiato paralleli e quasi senza contatti.

Che la fisica, ben prima della nascita della termodinamica, abbia dovuto fare i conti con fenomeni irreversibili, è fin troppo ovvio. Certamente la meccanica newtoniana aveva conseguito risultati mirabili con la teoria della gravitazione applicata al sistema solare, dove le leggi del moto sono intese come esattamente reversibili; ma che nei fenomeni sperimentabili nei laboratori terrestri fossero all’opera forze di tipo diverso (attrito, resistenza del mezzo) che causavano moti non reversibili, era un fatto che non poteva sfuggire. Come esempio emblematico, chiunque avesse sperimentato coi pendoli non poteva non aver visto che il loro moto è inevitabilmente *smorzato*.

È probabilmente poco noto che tutto il secondo libro dei *Principia* di Newton è dedicato al moto di corpi in mezzi resistenti, con diverse ipotesi sulla dipendenza della resistenza del mezzo dalla velocità. In particolare, Newton studia proprio il moto smorzato di un pendolo. Ci si può chiedere perché Newton abbia voluto dedicare una parte importante del suo trattato alla resistenza del mezzo, fenomeno che a noi oggi appare molto meno fondamentale della gravitazione e della spiegazione dei fenomeni astronomici. Su questo c’illumina però lo *Scolio* che si trova alla fine del secondo libro, e in particolare questa frase:

Per cui l’ipotesi dei vortici urta totalmente contro i fenomeni astronomici, e conduce non tanto a spiegare quanto ad oscurare i moti celesti.

Come sappiamo, l’ipotesi dei vortici è legata a un nome: Cartesio. Si vede quindi che il secondo libro dei *Principia* ha una funzione nel trattato: quella di demolire il sistema cartesiano, dando la dimostrazione che un universo fatto di vortici sarebbe incompatibile coi moti osservati dei pianeti.

Tornando all’irreversibilità meccanica, ricordo ancora che le leggi dell’attrito, che sono ancor oggi il cavallo di battaglia di tutti i compilatori di problemi di fisica, risalgono alla *Théorie des machines simples, en ayant égard au frottement de leurs parties et à la roideur des cordages* di Charles Augustin de Coulomb (1781). Ben prima della nascita della termodinamica.

È vero che le leggi dell’attrito e quelle della resistenza dei mezzi hanno carattere *fenomenologico*, ossia sono indotte da esperimenti ma non si appoggiano su principi generali della fisica. (Anche se la distinzione tra leggi fenomenologiche e leggi fondamentali non è così ovvia, e ci porterebbe dritti in una discussione epistemologica, che qui non posso permettermi: posso solo rimandare alla già citata puntata 22, dove davo l’esempio di leggi lineari che differiscono proprio nella scala che va dal fenomenologico al fondamentale.) Tuttavia in ogni caso il problema meccanico viene studiato allo stesso modo: si dà una *legge di forza*, comunque ricavata; la si inserisce al posto di F in $F = ma$; si risolve l’equazione differenziale così ottenuta. Il paradigma meccanico è sempre lo stesso.

* * *

Quanto al ruolo della reversibilità in termodinamica, diamo ancora la parola a Carnot (pag. 35):

Tutte le operazioni descritte sopra possono essere eseguite in un senso e in ordine inverso. [Sta parlando del famoso “ciclo di Carnot”] [...] Si può evidentemente continuare una successione di operazioni inverse di quelle descritte in precedenza: basta mettersi nelle stesse circostanze ed eseguire per ogni fase un movimento di dilatazione in luogo di uno di compressione, e viceversa.

Come sarà già apparso chiaro, ho citato un brano del ragionamento (esposto in tutti i libri di termodinamica) col quale si dimostra che nessuna macchina termica può avere rendimento maggiore del ciclo di Carnot *reversibile*.

Ma perché ho detto prima che qui “reversibile” ha un significato diverso che in meccanica? Questo è un punto che merita di essere sviluppato, perché mostra come sia necessaria una certa attenzione (e una buona conoscenza della materia) per non trarre conclusioni affrettate o anche infondate da certe parole ed espressioni. . . Il fatto è che la reversibilità meccanica e quella termodinamica sono concetti ben diversi, e in certo senso addirittura in contrasto: vediamo.

Sulla reversibilità meccanica posso sbrigarmela in poche parole, trattandosi di questione che viene esaminata e spiegata in molte occasioni. In breve: scelte all’istante iniziale certe condizioni iniziali (posizione e velocità di tutti i punti che costituiscono il sistema) dopo un certo intervallo di tempo si troveranno certe altre posizioni e velocità. Partendo ora dalle posizioni finali, ma con tutte le velocità *cambiate di verso*, seguiamo l’evoluzione del sistema per un uguale intervallo di tempo. Se alla fine troviamo che i punti del sistema *hanno riacquisito le posizioni iniziali, e con le velocità opposte*, diremo che quel moto è *reversibile*.

Si noti che non abbiamo “invertito il tempo,” qualunque cosa ciò possa significare. Al più possiamo dire, con linguaggio divulgativo e perciò pericoloso, che *tutto va come se avessimo fatto tornare indietro il tempo, come se avessimo proiettato all’inverso il film*.

Per la reversibilità termodinamica, sentiamo di nuovo Carnot (pag. 38):

È qui sottinteso che ciascuno dei metodi di sviluppare la potenza motrice raggiunge la perfezione di cui è suscettibile. Tale condizione sarà soddisfatta se, come abbiamo osservato più indietro, non si produce nei corpi alcun cambiamento di temperatura che non sia dovuto a un cambiamento di volume, ovvero, dicendo la stessa cosa in altre parole, se non c’è mai contatto tra corpi a temperature sensibilmente diverse.

È opportuno osservare che il discorso di Carnot su questo punto è incompleto. Quanto dice si applica alle trasformazioni del suo ciclo in cui il fluido cede o acquista calore, e richiede (col linguaggio di oggi) che esse siano *isoterme reversibili*; ma nel ciclo ci sono anche compressioni ed espansioni *adiabatiche*,

e su queste Carnot sembra non richiedere alcuna condizione. In realtà sappiamo che anche le adiabatiche debbono essere reversibili, e ciò non ha a che fare con scambi di calore (che non ci sono) ma col fatto che le trasformazioni siano abbastanza lente da aver luogo lungo stati che differiscono pochissimo da quelli di equilibrio.

Non c'è da meravigliarsi di questa pecca, dato che siamo nella fase di costruzione della nuova scienza che poi verrà chiamata "termodinamica." Lo stesso Carnot ne è perfettamente consapevole, come si vede leggendo ciò che scrive nell'introduzione (pag. 8):

Le macchine che non ricevono il loro movimento dal calore, quelle che hanno per motore la forza degli uomini o degli animali, una caduta d'acqua, una corrente d'aria, ecc., possono essere studiate nei minimi dettagli con la teoria meccanica. Tutti i casi sono previsti, tutti i movimenti immaginabili sono sottoposti a principi generali solidamente stabiliti e applicabili in ogni circostanza. È questo il carattere di una teoria completa. Una simile teoria manca evidentemente per le macchine termiche. Non la possiederemo finché le leggi della fisica non verranno abbastanza estese, abbastanza generalizzate, per farci conoscere in anticipo tutti gli effetti che il calore produce quando agisce in maniera determinata su un corpo qualsiasi.

E altrove, in una nota (pag. 28):

La materia qui trattata essendo del tutto nuova, siamo costretti a impiegare espressioni ancora inconsuete e che forse non hanno tutta la chiarezza desiderabile.

Ancora, in un'altra nota (pag. 37):

Del resto, sia detto di passaggio, i principali fondamenti su cui riposa la teoria del calore abbisognerebbero dell'esame più attento. Parecchi fatti dell'esperienza sembrano quasi inesplicabili nello stato attuale di questa teoria.

Ma insomma, perché ho detto che la reversibilità termodinamica è cosa ben diversa da quella meccanica? Ci sto girando intorno da un po', ma non sono ancora arrivato al punto... Ora però ci siamo. Posso partire da quanto ho scritto poco sopra, a proposito delle adiabatiche reversibili, e che per comodità vi ripeto: la reversibilità richiede che le trasformazioni siano abbastanza lente da aver luogo lungo stati che differiscono pochissimo da quelli di equilibrio. E come sapete senz'altro, questo non è solo un requisito delle adiabatiche, ma di qualsiasi trasformazione termodinamica reversibile; e non solo per il gas nel solito cilindro con pistone mobile, ma per qualunque processo termodinamico, che potrebbe essere per es. una pila chimica o innumerevoli altri. La sola ragione per parlare sempre del solito gas, è che in questo caso le cose sono più semplici da descrivere e da mettere in equazioni.

Ma che cosa significa in pratica che la trasformazione passa attraverso stati che sono "quasi" di equilibrio? Pensiamo per es. all'espansione isoterma di

Carnot: se il gas si espande (e fa lavoro contro una forza esterna) tenderà a raffreddarsi. Se ciò non accade, è perché si trova in contatto termico con un corpo A di grande capacità termica, che gli cede il calore necessario per compensare l'energia interna perduta sotto forma di lavoro, e quindi per mantenere costante la temperatura. Questo non può accadere rigorosamente, come già Carnot aveva capito benissimo, perché non ci sarebbe flusso di calore senza una differenza di temperatura, sia pure piccola. Per di più, solo una parte del cilindro che contiene il gas sarà in contatto termico col corpo A; quindi dentro il gas ci dovrà essere un flusso di calore che tenda a uniformare la temperatura, la quale altrimenti sarebbe diversa da punto a punto: maggiore in vicinanza di A, minore nelle parti più lontane.

Orbene: questo flusso di calore, questa tendenza a ristabilire l'equilibrio, sono fenomeni niente affatto reversibili dal punto di vista della meccanica. Non possiamo girare il film all'indietro e ritrovare *esattamente* le condizioni di partenza: questo sarà vero solo in modo approssimato, e come media sul moto di tutte le innumerevoli molecole che costituiscono il gas. Nessuna molecola ripercorrerà, neppure approssimativamente, tutto il percorso complicato che ha seguito durante l'espansione, se proviamo a invertirla in una compressione; ma a noi (e a Carnot) questo non importa: importa solo che *da un punto di vista macroscopico* le variabili che possiamo misurare (temperatura, pressione, volume ...) ripercorrano all'indietro la strada fatta durante l'espansione. O meglio, andando un po' più a fondo: perché la trasformazione *termodinamica* sia reversibile, occorre e basta che *in tutte le fasi intermedie* il sistema si mantenga in uno *stato di equilibrio*. A questo serve che la trasformazione sia lenta: a dare al sistema il tempo di mettersi (quasi) in equilibrio man mano che percorre i successivi stati della trasformazione (per es. man mano che il suo volume aumenta durante un'espansione).

Insomma, e in breve: la reversibilità termodinamica è soltanto *macroscopica*, e non richiede né si accompagna a una vera reversibilità meccanica. Richiede anzi un'irreversibilità "nascosta": la tendenza spontanea a mettersi in equilibrio, purché ce ne sia il tempo. A livello microscopico le leggi del moto possono benissimo essere reversibili, ma la reversibilità termodinamica ha bisogno della *tendenza all'equilibrio*, che almeno a prima vista appare incompatibile con la reversibilità microscopica.

A prima vista? Oppure le due cose sono compatibili? Questo sarà il grande problema, nato nel tardo '800 e non del tutto risolto ancor oggi, della *riduzione della termodinamica alla meccanica* (statistica). Sarebbe bello parlarne, ma questa puntata è già diventata troppo lunga, ed è il momento di darci un taglio.

* * *

Posso inserire, a mo' di conclusione, un'ulteriore citazione di Consigliere (pag. 25, prima colonna):

Il mondo descritto dalla termodinamica del non equilibrio è quindi ontologicamente differente da quello della dinamica classica. In esso hanno posto evoluzioni non prevedibili, che non possono essere spiegate in base a una legge generale, valida ovunque universalmente, bensì solo in base all'intreccio della miriade di variabili attive localmente. Questo permette di pensare il divenire fisico non già come evoluzione deterministica derivabile dalle leggi universali che governano i sistemi, ma come produzione di piste singolari, dipendenti dal tempo e imprevedibili. La materia, sostrato universale della natura, si rivela dunque storica.

Purtroppo un commento a questa tesi non può essere fatto in breve, e d'altra parte la tesi ritorna, in forme diverse, anche nel seguito dell'articolo, di cui non ho ancora parlato. Dato che ho già scritto abbastanza, rimando le mie considerazioni a una prossima puntata, in cui dovremo occuparci (era facile prevederlo ...) di relatività e di meccanica quantistica.

Bibliografia

- (1) I. Prigogine: *La nuova alleanza* (Longanesi 1979) pag. 14.
- (2) I. Prigogine: *loc. cit.* pag. 320–321.