

RICOSTRUZIONE SINTETICA DELLE *RÉFLEXIONS* DI S. CARNOT COME TEORIA PROBLEMÁTICA

P. IACONO

Gruppo di Storia della Fisica, Dipartimento di Scienze,
Università "Federico II", Napoli

1. Una teoria costruita su ragionamenti di logica non classica

Tra le teorie fisiche la termodinamica è una teoria relativamente giovane. Il merito incontestabile di aver prodotto quasi tutta la nuova teoria appartiene a Sadi Carnot. Il suo lavoro è stato solitario e fulmineo. Il suo punto di vista era del tutto originale e d'altra parte del tutto universale. Non ha pubblicato scritti scientifici oltre a quello sulla termodinamica, *Réflexions sur la puissance motrice du feu*.

Nel testo delle *Réflexions* (pp. 59-96) S. Carnot pone il problema di quale sia l'efficienza di una macchina termica; poi organizza la sua teoria in modo di trovare un nuovo metodo scientifico per risolvere tale problema. Quindi, non la sviluppa in una maniera deduttiva, basandosi cioè su principi a priori. Ciò indica che egli invece di dedurre deve indurre; e che quindi la sua logica è diversa da quella classica (quella che regola la deduzione, mediante la certezza del terzo escluso o della doppia negazione equivalente all'affermazione). Infatti, un'analisi del testo delle *Réflexions* ha evidenziato (Drago e Pisano) la presenza di una lunga serie di frasi doppiamente negate, non sono equivalenti alle corrispondenti positive (FDN). E' noto che quando "due negazioni non affermano" $\neg\neg A \neq A$ vale la logica non classica¹ (Dummett, Prawitz, Drago).

Vediamone il modo di procedere del testo di Carnot.

Prima egli pone (con alcune FDN) il problema della massima efficienza delle trasformazioni termiche ("il fenomeno della produzione di movimento per mezzo del calore *non* è stato considerato sotto un punto di vista *abbastanza* generale"); ci sono poi alcune FDN che esprimono principi metodologici, i quali forniscono un'indicazione della direzione da seguire, (=ignoriamo quali legge segue il calore relativamente alle *variazioni* di volume) quella di scoprire quanto più si può di quella A che non si può

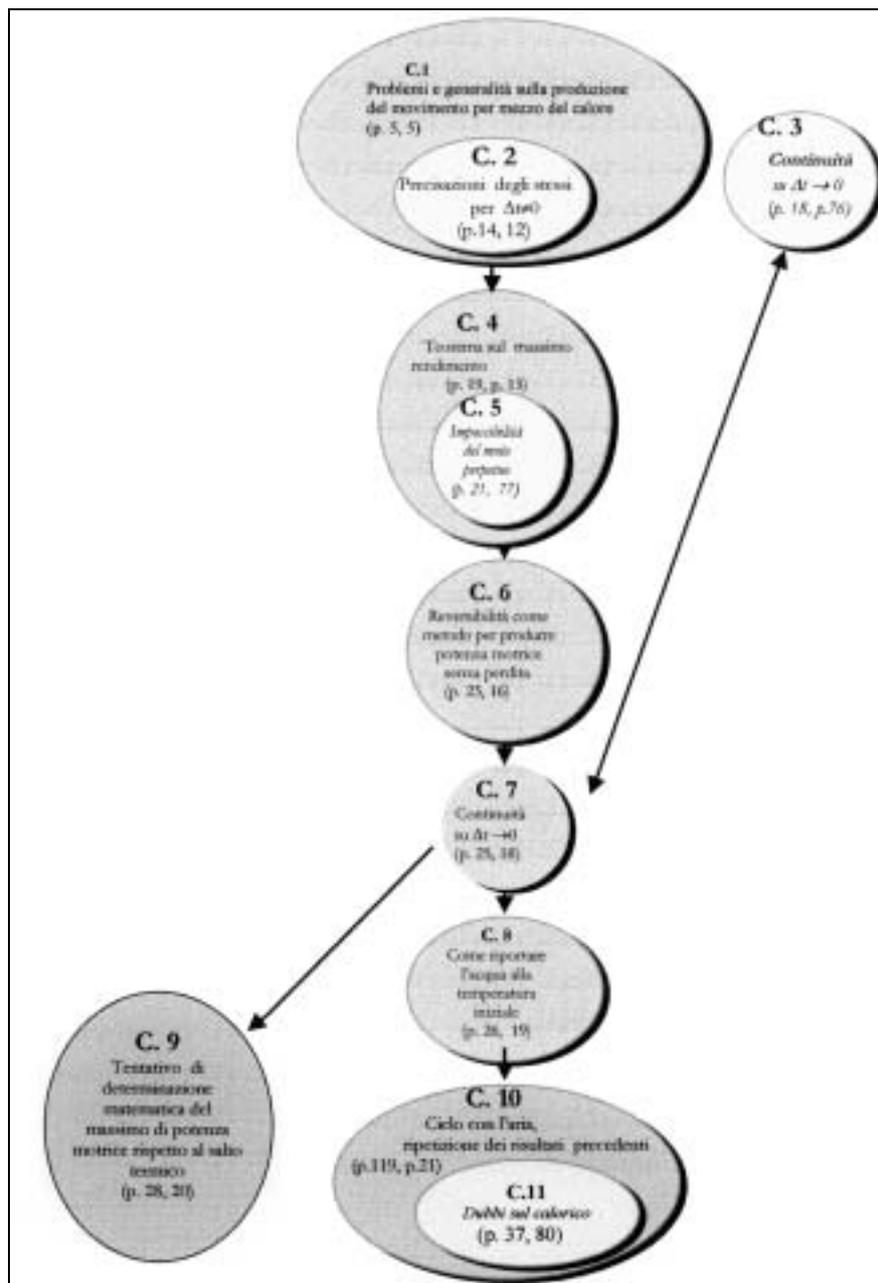
¹ Si noti che dire che non vale la legge della doppia negazione per l'affermazione A, non vuol dire che sappiamo dimostrare che $\neg\neg A$ non implica A, ma solo la che la legge non vale sempre, magari non sappiamo se essa vale.

affermare nella sua interezza. Perciò egli costruisce delle unità di ragionamento attorno al problema A. In particolare egli giunge ad una chiara conclusione mediante il suo celebre teorema per assurdo; che pur ragionando per assurdo dà conclusioni sulla realtà fisica; chiaro seguito di una logica alternativa a quella usuale delle teorie scientifiche basate su principi-assiomi.

Tutto ciò indica la natura non deduttiva della teoria di S. Carnot, ma induttiva e basata sulla logica non classica.

Un'analisi più accurata di quella di Drago e Pisano ha individuato nel testo 129 FDN (Iacono, elenco E.2, p. 212).

La lettura in sequenza di così tante FDN, è capace da sola di ridare non solo una esposizione particolare della sua teoria, almeno per le parti essenziali dei suoi ragionamenti, ma addirittura tutto il filo logico della teoria di S. Carnot; tanto che con esse si può distinguere una precisa struttura argomentativi che finora era rimasta inedita: spezzando la sequenza delle FDN allora quando una FDN ha il ruolo di porre un problema, si ottengono undici unità di ragionamento; (Iacono, p. 44) in ognuna delle quali egli parte da problemi o premesse teoriche e giunge, spesso con un teorema per assurdo, o a dimostrare la tesi di un teorema generalissimo o a principi operativi (vedi schema 1; in ogni cerchio indicate prima le corrispondenti pp. dell'edizione di Fox e poi quelle della edizione CUEN).



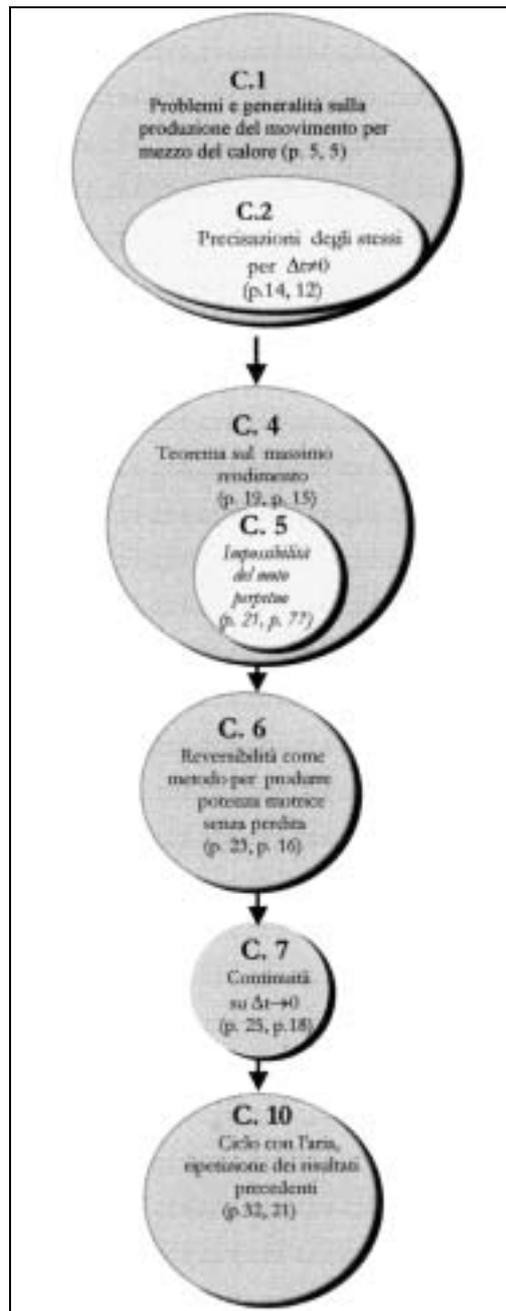
Tab. 1 – Le undici unità di argomentazione e le loro relazioni.

2. Ricostruzione ridotta, potenzialmente didattica delle Réflexions

Lo schema 1 fa notare che la sequenza argomentativa di Carnot ulteriormente sintetizzata: l'ordine logico, esistente tra le undici unità, evidenzia che ci sono delle ripetizioni (C3 e C7, C4 e C10) e che alcuni risultati sono di importanza laterale (C2, C5) per il filo del discorso.

Possiamo ben eliminare il C.9 [TENTATIVO DI DETERMINAZIONE MATEMATICA DEL MASSIMO DI POTENZA MOTTRICE RISPETTO AL SALTO TERMICO] (da p. 28, r. 15, a p. 31, r.5) e C.11 [DUBBI SUL CALORICO] (da p. 14 r. 9 a r. 19), perché, essendo essi contenuti in note, non interrompono il filo logico e i loro contenuti sono semplice aggiunte valide al tempo di Carnot; il primo è solo un tentativo di trovare la formula del massimo rendimento basata sulla teoria del calorico, il secondo è l'espressione dell'incertezza di Carnot, che, non avendo ancora ottenuto tutta la teoria, non sapeva ancora decidersi sulla natura del calore. Si possono eliminare anche C.3 [CONTINUITÀ IN $\Delta t \rightarrow 0$ (p. 6 a p. 7 r. 6)], perché è in nota e poi perché la sua affermazione verrà ripresa da C.7; e anche C.8 [COME RIPORTARE L'ACQUA ALLA TEMPERATURA INIZIALE], perché è relativo al ciclo termico con l'acqua; il che è un aspetto tecnico delle macchine a vapore, non più interessante per noi moderni che ci riferiamo alle macchine a gas.

Ne risulta il grafico seguente.



Tab. 2 – Versione ridotta delle undici unità di argomentazione.

Si ottiene lo schema 2, che mette in evidenza la relazione tra le rimanenti sette unità di ragionamento. Ad esse corrispondono 91 FDN; queste, da sole possono costituire una versione sintetica del testo; la quale è molto lineare, perché resa indipendente dai dubbi di Carnot e dalle particolarità tecniche su cui lui si è soffermato (ad es. il ciclo del vapore d'acqua).

Il testo corrispondente pur essendo molto adeguato all'esposizione originale, non è lungo e dà il quadro completo della sua teoria.

Allora con piccole integrazioni descrittive (aggiunte nostre in parentesi quadre e di Carnot tra virgolette) di fatti della serie suddetta di FDN, potremo ricostruire in maniera sintetica tutta la esposizione teorica delle *Réflexions*.

3. Testo sintetico della teoria delle *Réflexions*

Quindi ora ridurremo il testo di S. Carnot alle sue frasi essenziali: alle 91 FDN dei soli cicli della versione ridotta aggiungeremo in parentesi quadre: 1) le frasi positive, precedute dal segno \neq , corrispondenti alle FDN, in modo da verificare facilmente la loro natura di FDN, perché la frase positiva cambia il significato della FDN; 2) parole o frasi che rendano più chiaro o scorrevole il testo; 3) frasi che descrivono situazioni di fatto essenziali per la comprensione del testo; 4) le FDN contenute in note sono state scritte con un rientro maggiore.

Otterremo un testo di una quindicina di pagine in tutto.

Ricordiamo che la teoria di Carnot non è derivata da principi-assiomi, ma è fondata sulla ricerca di un metodo nuovo per risolvere un problema universale; e noi la ricostruiremo allo stesso modo, che corrisponde ad una ben precisa scelta sui fondamenti della fisica, coerente all'uso delle FDN (Drago 1991).

Di questa organizzazione problematica verranno rimarcati tipograficamente le caratteristiche salienti.

1. Nelle frasi doppiamente negate le parole negative sono in corsivo
2. Sono evidenziate **in grassetto** le frasi dei problemi presentati in ogni ciclo;
3. Sono sottolineate le frasi delle premesse teoriche o dei principi teorici di ogni ciclo;
4. Le FDN in ragionamento per assurdo sono indicate con un cerchietto nero iniziale ●;
5. Infine le soluzioni dei problemi iniziali (principi operativi o FDN in ragionamento per assurdo) sono indicate con un quadrato nero ■.

Per ogni FDN viene indicata la posizione nel testo originale (ref. Fox).

Per facilitare la lettura non abbiamo tradotto alla lettera alcune parole. Inoltre abbiamo sostituito l'arcaico termine "potenza motrice" con la sua dizione moderna "lavoro".

Inoltre Carnot afferma, nella nota 7 a p. 73, che egli usa "indifferentemente", le due espressioni "quantità di calore" e "quantità di calorico". Per evitare di introdurre un concetto antico, abbiamo sostituito alla parola "calorico" la parola "calore"; ma là dove non è stato possibile, perché l'espressione quantità di "calorico" si riferiva alla teoria del calorico, abbiamo sostituito l'espressione "calore a temperatura costante"; infatti come suggerì W. Ostwald (Ostwald), nel testo di Carnot spesso la parola calorico è traducibile in parole moderne con l'entropia.

Inoltre è importante precisare alcuni concetti di Carnot: 1) "ristabilimento dell'equilibrio del calore" è un concetto arcaico, definito da Carnot come "il passaggio da un corpo a temperatura più o meno elevata a un altro a temperatura più bassa" (p. 9); 2) la frase originaria è una FDN perché "squilibrio del calore" è una negazione dell'equilibrio, e "ristabilimento" è la negazione dello squilibrio; quest'ultima non è equivalente a "mantenimento", pertanto è una FDN; 3) il teorema di Carnot è stato ottenuto considerando una sola macchina (non due, come avviene modernamente); alla base del teorema c'è il principio dell'impossibilità del moto perpetuo, non i principi di Kelvin e Clausius, questo fatto però è positivo, perché l'impossibilità del moto perpetuo è un principio più intuitivo e più generale; 4) nel testo di Carnot una trasformazione è reversibile se e solo se ogni variazione di temperatura comporta un lavoro; il che sposta sugli effetti (lavoro) il concetto di reversibilità che noi definiamo sul calore; il quale concetto inoltre coincide con quello moderno solo se le variazioni sono infinitesime.

Nella ricostruzione che segue ogni ciclo di ragionamento è stato caratterizzato da un titolo, aggiunto all'inizio.

[C. 1 PRODUZIONE DEL MOVIMENTO PER MEZZO DEL CALORE]

[Il calore è un fenomeno che è alla base dell'universo e della vita terrestre. Il calore è alla base della vita sociale. Senza fonti energetiche la società va in crisi. Con l'invenzione della macchina a vapore nella società, nasce la necessità di una teoria delle macchine termiche.]

Spesso è stata dibattuta la *questione* se il lavoro è limitato, o è senza limiti [≠sappiamo che è illimitato, come tutte le variabili fisiche] (p. 6, r. 18), **se i possibili perfezionamenti delle macchine a fuoco hanno un *limite* assegnabile** [≠assoluto] (p. 7, r. 2), **che la natura delle cose *impedisce* di superare qualsiasi sia il mezzo** [≠ superare con qualche mezzo] (p. 7, r.3), o

se al contrario questi perfezionamenti sono suscettibili di un'estensione *indefinita* [≠ sappiamo essere finiti] (p. 7, r. 5).

Si è anche *cercato a lungo* [=non si sa] se *non esistano* [≠si sa che esistono] degli agenti preferibili al vapore d'acqua per sviluppare il lavoro [(p. 7, r. 6); se l'aria atmosferica *non presenti* [≠si sa che presenta] a questo riguardo, dei grandi vantaggi (p. 7, r. 8).

[Ma, finora] Il fenomeno della produzione di movimento per mezzo del calore *non è stato considerato sotto un punto di vista abbastanza generale* [= *non* dipendente dai particolari] [≠ è stato considerato in maniera dipendente dai particolari] (p. 7, r. 11); lo si è considerato *solamente* [=è scorretto considerarlo] in macchine che per la loro natura e il loro funzionamento *non hanno permesso* [≠è corretto considerarlo in macchine che ... permettono] di coglierne la praticità (p. 7, r.13). In tali macchine [*non adatte*] il fenomeno si trova in qualche modo interrotto, *incompleto* [≠ nelle macchine adatte il fenomeno è completo] (p. 7, r. 15)

[Invece] per riconoscere in tutta la sua generalità il principio della produzione del movimento per mezzo del calore, è necessario concepire quest'ultimo *indipendentemente* [≠separatamente] da qualsiasi meccanismo, da qualsiasi agente particolare. (p. 8, r. 1)

[Per la meccanica delle macchine esiste già una teoria universale].

E' evidente che invece una teoria simile [=generale] manca per le macchine termiche; *non la si otterrà se non* [≠avremo una tale teoria] quando le leggi della Fisica saranno abbastanza estese e generalizzate da far conoscere in anticipo tutti gli effetti del calore che agisce in un determinato modo su un corpo qualunque.(p. 8, r. 16)

[Incominciamo questa nuova teoria notando che “la produzione di movimento nelle macchine a vapore, è sempre accompagnata da una circostanza sulla quale dobbiamo fissare l'attenzione”]:

Questa circostanza è il ristabilimento [≠mantenimento] **dell'equilibrio del calore** (p. 9, r. 21),

[“cioè, il suo passaggio da un corpo a temperatura più o meno elevata ad un altro a temperatura più bassa.

Che cosa succede in effetti in una macchina a vapore in attività? Il calore, sviluppato nella fornace per effetto della combustione, attraverso la caldaia genera vapore e in qualche modo s'incorpora in esso. Il vapore, che trasporta il calorico, va nel cilindro e poi nel condensatore, dove si liquefa a contatto con l'acqua fredda che là incontra; quindi l'acqua fredda del condensatore si impadronisce del calore sviluppato dalla combustione. Essa si riscalda”.]

Qui il vapore non è che [≠è] un mezzo per trasportare il calore.(p. 10, r.2).

Si riconosce facilmente, nelle operazioni che abbiamo appena descritto, il ristabilimento [≠mantenimento] dell'equilibrio del calore (p. 10, r. 8);

[infatti, da un parte, si è avuto trasferimento del calore dalla fornace all'acqua di condensazione; “dall'altra parte, l'acqua del condensatore, dopo aver liquefatto il vapore, lascia la macchina con temperatura superiore a quella che aveva inizialmente”].

Il ristabilimento [≠mantenimento] dell'equilibrio del calore si compie tra di essi, se non completamente, almeno parzialmente (p. 10, r.11).

Dunque, nelle macchine a vapore, la produzione di lavoro è dovuta non ad un consumo [≠avviene con la conservazione] reale di calore [a temperatura costante], ma al suo trasporto da un corpo caldo a un corpo freddo (p. 10, r. 20), cioè al ristabilimento [≠mantenimento] dell'equilibrio, equilibrio rotto da qualche causa chimica come la combustione o da qualunque altra causa. (p. 11, r. 1)

Secondo questo principio per generare lavoro, non è sufficiente produrre calore [squilibrare il calorico] [≠ basta mantenere l'equilibrio del calore] (p. 11, r.6), è ancora necessario procurarsi del freddo: senza di esso, il calore sarebbe inutile.[≠ con il freddo il calore è utile] (p.11, r. 8) ¹

● E in effetti, se attorno a lui non ci fossero che [≠fossero tutti i] corpi alla temperatura della caldaia, come si arriverebbe a condensare il vapore? (p. 11, r. 9).

[Infatti, il vapore] Dove lo metteremmo una volta generato? Che non si creda di poterlo scaricare [indefinitamente] [≠se ne può scaricare una quantità finita] nell'atmosfera, così come si fa con certe macchine: (p. 11, r. 13) l'atmosfera non lo accetterebbe [indefinitamente] [≠ l'atmosfera ne accetterebbe una quantità finita] (p. 11, r. 4). Essa non lo riceve nello stato attuale delle cose se non [≠lo riceve] perché funziona da grande condensatore, perché si trova ad una temperatura più bassa; altrimenti ne sarebbe quanto prima riempita o piuttosto ne sarebbe satura (p. 11, r.14).

¹ Come col primo principio della termodinamica moderna, anche nella teoria di Sadi Carnot, nulla fa pensare che il lavoro non venga generato da una sola sorgente a temperatura fissata; solo con il secondo principio della termodinamica moderna, si esprime la necessità di due termostati funzionanti a temperature differenti; è sol così che anche nella moderna teoria dell'equivalenza viene introdotto il Δt per la produzione di lavoro.

■ [Quindi] dovunque esiste una differenza è possibile avere un *ristabilimento* [≠mantenimento] dell'equilibrio del calore e anche una produzione di lavoro (p. 12, r. 3).

[Anche tutti gli altri corpi che possono subire variazioni di volume, contrazioni e dilatazioni, possono sviluppare lavoro].

Abbiamo mostrato che, nelle macchine a vapore, il lavoro è dovuta a un *ristabilimento* [≠mantenimento] dell'equilibrio del calore a temperatura costante (p. 14, r.2). [Ma notiamo che] evidentemente il calore *non* può essere causa di movimento se *non* [≠è causa di movimento] in virtù del cambiamento di volume o di forma che fa subire ai corpi.(p. 14, r. 6).

Questi *cambiamenti* non sono causati da una temperatura costante, ma dalle *alternanze* [non costanza] [≠la costanza del volume è causata dalla costanza] di caldo e di freddo (p. 14, r.2)

[C. 2 PRECISAZIONE DEL CICLO PRECEDENTE PER UN $\Delta t \neq 0$]

[A questo punto ci si pone il problema:] **il lavoro del calore è immutabile** [≠sappiamo che è lo stesso] **in quantità o varia con l'agente impiegato per realizzarla, cioè con la sostanza intermedia, scelta come sede dell'azione del calore?** (p.14, r.18)

È chiaro che questa questione non può essere vista che [≠è da vedere] **per una quantità di calore data e anche per una data differenza di temperatura.** (p.15, r.2)

Si domanda [=non è certo] **se questa quantità di lavoro è necessariamente limitata** [≠sappiamo che il lavoro è come le altre variabili fisiche] (p. 15, r. 10), **se essa varia** [≠sappiamo che è costante] **con la sostanza impiegata per realizzarla** .(p. 15, r.11)

[Per iniziare la teoria, si ricorda quanto argomentato in precedenza]

■ Ovunque c'è una *differenza* di temperatura, si può avere una produzione [non nulla] di lavoro [≠se c'è uguaglianza di temperatura c'è produzione nulla di lavoro]. (p. 16, r. 7).

Reciprocamente, dappertutto dove si può *consumare* questo lavoro è possibile far nascere una *differenza* di temperatura [≠dove si mantiene il lavoro, $\Delta t=0$] (p. 16, r. 9), è possibile causare una *rottura* di equilibrio nel calore [≠dove si mantiene questa potenza, il calore è in equilibrio] (p. 16, r.11).

Non sono infatti la percussione e l'attrito fra due corpi, dei metodi per aumentare la loro temperatura [≠con essi aumenta la temperatura] (p. 16, r. 12), per farli arrivare da soli a un livello di temperatura *più alto* rispetto ai corpi circostanti [≠ essi sono metodi per dare Δt] (p. 16, r. 12), e

conseguentemente, per produrre lo *squilibrio* nel calore là dove esisteva precedentemente un equilibrio?.[\neq produrre equilibrio] (p.16, r. 13)

[“E’ un fatto sperimentale che la temperatura dei gas aumenta per compressione e diminuisce per rarefazione. Questo è un metodo sicuro per variare la temperatura dei corpi e per causare uno squilibrio del calore.... Anche il vapore d’acqua impiegato in maniera inversa di quella impiegata nelle macchine a vapore, può essere visto come un mezzo per causare lo squilibrio del calore”].

[Infatti, presi due corpi A e B a temperatura costante, con $T_A > T_B$, se si indica con A il corpo che funge da fornace e B quello da refrigeratore,]

questi due corpi, ai quali si può dare o sottrarre calore *senza far variare* loro la temperatura[\neq mentre la temperatura resta costante], avranno la funzione di due sorgenti infinite di calorico (p. 17, r. 9).

[Per produrre lavoro si può procedere in questo modo;

1. Produciamo del vapore alla temperatura del corpo A.
2. Facciamo espandere adiabaticamente il vapore contenuto nel cilindro chiuso da un pistone mobile.
3. Facciamo condensare il vapore mettendolo a contatto con il corpo B].

Il corpo B ha il ruolo che nelle macchine a vapore ha l’iniezione dell’acqua fredda, con la differenza però che B condensa il vapore *senza mischiarsi* [\neq restando isolato dal vapore] (p.18, r.9) e *senza cambiare* [\neq mantenendo] esso stesso la temperatura. (p.18, r. 10).

[C. 4 TEOREMA SUL MASSIMO RENDIMENTO]

[**Preso un corpo A a $t=100^\circ\text{C}$ e un corpo B a $t=0^\circ\text{C}$, possiamo produrre lavoro facendo passare una certa quantità di calore dal corpo A al corpo B. Le operazioni, compiute per il passaggio di calore da A a B si possono invertire perchè, *nulla impedita* di [\neq possiamo] formare vapore col calore del corpo B. (p. 19, r.2).**

[Anche in questo caso, si può immaginare di mantenere le temperature di A e B costanti, anche se A e B possono perdere o acquistare quantità di calore].

Ma se nei due casi si è agito sulla stessa quantità di vapore, se *non* si è avuto alcuna *perdita* [\neq c’è stata costanza] sia di lavoro che di calore, allora la quantità di lavoro prodotta nel primo caso sarà uguale a quella utilizzata nelle operazioni inverse, e così la quantità di calore passato dal corpo A al corpo B nel primo caso sarà uguale alla quantità che ritorna da B ad A nel secondo caso (p. 20, r. 2); di modo che si potrà fare un numero *indefinito* di

operazioni alternative di questo genere senza aver prodotto alla fine, lavoro [$\neq L \neq 0$] (p. 20, r. 9), nè [=senza aver prodotto] aver trasferito calore da un corpo ad un altro (p.20, r.9)

[Se con la stessa quantità di calore si potesse produrre un lavoro maggiore di quello prodotto con le prime operazioni, con il lavoro in più creato si potrebbe riportare il calore dal corpo B al corpo A],

● per ristabilire [così] lo stato iniziale e ricominciare un'operazione del tutto simile alla prima e così via: questo non solo sarebbe un moto perpetuo, ma anche una creazione indefinita di lavoro *senza consumare* [\neq mantenendo costante] né calore né qualsiasi altro agente.(p. 21, r. 1)

Una tale *creazione* risulta completamente *contraria* [\neq la conservazione della forza motrice si accorda] alle idee finora accettate, alle leggi della meccanica e della sana fisica (p. 21, r. 5): è *inammissibile* [\neq è ammissibile la conservazione]. (p. 21, r. 5)

[Si può giungere allora ad affermare che: “Il massimo di lavoro risultante dall’impiego del vapore è anche il massimo di lavoro realizzabile con qualsiasi mezzo”.

Leggendo questo enunciato sorge spontaneo chiedersi che cosa significa massimo? Come lo si raggiunge? Con quale criterio riconosciamo che il vapore ha prodotto vantaggiosamente lavoro?]

[C. 5 IMPOSSIBILITÀ DEL MOTO PERPETUO]

Forse si obietterà che il moto *perpetuo* dimostrato *impossibile* [\neq è dimostrato che ogni moto ha fine] **mediante azioni solo meccaniche**, (p. 21, n. 1, r. 1), **non lo sarebbe forse** [\neq l’affermazione vale] **se si usasse o il calore o l’elettricità;** (p. 21, n. 1, r. 1), ma si può concepire i fenomeni del calore e dell’elettricità come dovuti ad *altra cosa che* movimenti di corpi [\neq i fenomeni ...sono dovuti ai movimenti dei corpi] (p. 21, n. 1, r. 3) e come tali questi *non* dovrebbero essere soggetti alle leggi generali della meccanica? [\neq sono soggetti] (p. 21, n.1,r.5)

Non sappiamo inoltre, a posteriori? [\neq sappiamo] (p. 21, n.1, r. 6) che tutti i tentativi per ottenere il moto *perpetuo* con un qualsiasi mezzo sono risultati *infruttuosi*? [\neq essere fruttuosi i tentativi di ottenere un moto che ha fine] (p. 21, n. 1, r. 7). Che *non* siamo mai riusciti a produrre un moto veramente *perpetuo*[?] [\neq siamo riusciti a produrre un moto che ha una fine certa] (p. 21, n. 1 r. 8), cioè, un moto che continua per sempre *senza alterazioni* [\neq costante] nei corpi impiegati per realizzarlo? (p. 21, n.1, r.10).

Si è cercato di realizzare questa idea costruendo delle pile a secco, pretese *inalterabili* [\neq costanti]. (p. 21, n. 1, r. 12)

[Ma, l'apparecchio si è sempre deteriorato dopo l'uso. In effetti] l'accezione generale e filosofica del moto *perpetuo* dovrebbe includere non solamente un moto suscettibile di prolungarsi *indefinitamente* [≠un moto che si prolunga con un Δt finito] dopo ricevuto un impulso (p. 22, n.1, r.4), [ma l'azione di un dispositivo] capace di *creare il lavoro illimitato* [≠il moto con fine non crea lavoro] (p. 21, n. 1, r. 6), capace di *svegliare* successivamente dal *riposo* tutti i corpi della natura [≠ il moto con fine lascia in quiete] (p. 22, n. 1, r.7) di *distruggere* in essi il principio d'*inerzia* [≠ il moto mantiene il movimento] (p. 22, n. 1, r. 8), capace infine di trovare al suo *interno* [=senza chiedere ad altri] [≠il moto con fine chiede ad altri] le forze necessarie a muovere verso l'interro universo (p. 22, n.1, r.9), per *accelerare incessantemente* il suo moto [≠ mantenere le forze di altri costanti] (p. 22, n. 1, r. 10). *Tale* sarebbe una *creazione* di lavoro [≠ creare lavoro] (p. 22, n.1, r. 10).

● Se ciò fosse possibile, sarebbe *inutile* [≠se il lavoro è costoso allora è utile] cercare il lavoro nei combustibili o nelle correnti d'aria e d'acqua, (p. 22, n. 1,r. 11)

Noi ne avremmo a nostra disposizione una sorgente *inesauribile* dove potremmo attingere a volontà [≠poiché il lavoro è costoso, ogni sorgente si esaurisce].(p. 22, n.1, r. 13) ◆

[Si può giungere allora ad affermare che: “il massimo di lavoro risultante dall'impiego del vapore è anche il massimo di lavoro realizzabile con qualsiasi mezzo”.

Leggendo questo enunciato sorge spontaneo chiedersi: che cosa significa massimo? Come si raggiunge? Con quale criterio riconosciamo che il vapore ha prodotto vantaggiosamente lavoro?]

[C. 6 REVERSIBILITÀ COME METODO PER PRODURRE LAVORO SENZA EFFETTIVA PERDITA]

Dal momento che ogni *ristabilimento* [≠mantenimento] *di equilibrio può essere la causa della produzione di lavoro* (p. 23, r. 5), ogni *ristabilimento* [≠mantenimento] di equilibrio che si farà *senza* produzione di lavoro dovrà essere considerato come una vera *perdita* [≠ con produzione di lavoro dovrà essere considerato un guadagno] (p. 23, r. 7)

● Ora, anche con una breve riflessione ci si accorge che ogni *cambiamento* di temperatura che *non* è dovuto ad un *cambiamento* di volume dei corpi [≠ avviene a $\Delta V=0$] (p. 23, r.9) *non* può *che* essere [≠è] (p. 23, r. 10) un *ristabilimento* [≠mantenimento] (80, p. 23, r. 11) *inutile dell'equilibrio* del calore [≠ogni mantenimento è utile]. (81, p. 23, r.11)

■ La condizione necessaria per il massimo è, allora, che nei corpi impiegati per realizzare la potenza motrice del fuoco *non* avvenga alcun *cambiamento* di temperatura [\neq la temperatura sia costante] (p. 23, r. 12) che *non* sia dovuto ad una *variazione* di volume [\neq una costanza che sia dovuta ad una costanza]. (p. 23, r. 15). Questo principio *non* deve mai essere *perso* di vista [\neq deve essere considerato sempre] nella costruzione delle macchine a fuoco. (p. 24, r. 3) Se *non* lo si può osservare *rigorosamente* [\neq lo si osserva con approssimazione] (p. 24, r. 5), almeno ci si dovrà *allontanare* da esso il *meno* [\neq stargli vicino il più] possibile. (p. 24, r. 6)

[Allora] Ogni *cambiamento* di temperatura che non è dovuto a una *variazione* di volume [\neq avviene a volume costante] o ad un'azione chimica (azione che, per il momento supponiamo non avvenga) è necessariamente dovuto al passaggio diretto del calore da un corpo più o meno caldo a uno più freddo. (p. 24, r. 7) Questo passaggio avviene principalmente per il contatto di corpi aventi *diverse* temperature [\neq il passaggio utile avviene... tra corpi con temperature uguali] (p. 24, r. 10); quindi tale contatto va *evitato* [\neq occorre il contatto a $\Delta t=0$] il più possibile.²(p. 24, r. 11)

Senza dubbio [\neq certamente] (p. 24, r. 14) *non* può essere *evitato* completamente [\neq si incontra]; (p. 24, r. 14) ma almeno si dovrebbe fare in modo che i corpi messi a contatto abbiano temperature *poco differenti* [\neq molto uguali]. (p. 24, r. 14)

[C. 7 CONTINUITÀ IN $\Delta t \rightarrow 0$]

In verità le cose *non* possono avvenire *rigorosamente* come supposto. [\neq possono avvenire approssimativamente] (p. 25, r. 6)

Per determinare il passaggio del calore da un corpo a un altro è necessario che il primo sia a temperatura *maggiore*, ma questo eccesso in teoria possiamo considerarlo *nullo* [\neq vale l'uguaglianza] (p. 25, r. 8) *senza* che per questo i ragionamenti *perdano* nulla della loro esattezza. [\neq i ragionamenti restano esatti] (p. 25, r. 10)³

[La differenza di temperatura tra il corpo A e il corpo B è quindi infinitamente piccola, nel caso i corpi abbiano una sostanziale differenza di temperatura si può immaginare una serie di corpi con temperature intermedie tra quelle dei due corpi presi in considerazione.

² Per Sadi Carnot una trasformazione è reversibile se e solo se ogni variazione di temperatura comporta un lavoro, e viceversa è irreversibile se non comporta un lavoro; quindi ogni trasformazione irreversibile va evitata (FDN 89).

³ In questa frasi le parole dovrebbero esprimere che il Δt è infinitesimo.

Per quello che è stato detto finora, si può paragonare la produzione di lavoro con quella prodotta da una caduta d'acqua]⁴

[C. 10 CICLO CON L'ARIA; RIPETIZIONE DEI RISULTATI PRECEDENTI]

[Invece], **chiameremo il calore impiegato in queste occasioni dove non avviene alcun cambiamento di temperatura [≠dove la temperatura si mantiene costante], calore dovuto al cambiamento di volume.**(p. 32, r. 1)

[Il calore non appartiene al volume⁵;] non vi fa parte più di quanto non faccia parte della pressione. [≠ vi fa parte come fa parte la pressione] (p. 32, r. 4)⁶

[D'altronde] noi ignoriamo quali leggi segue il calore relativamente alle variazioni di volume [≠conosciamo le leggi del calore a volume costante]. (p. 32, r. 6)⁶

["L'esperienza non ci ha detto nulla a riguardo; ci ha mostrato come questo calorico viene sviluppato in quantità più o meno grande con la compressione dei fluidi elastici".

Facciamo un esempio:

Immaginiamo di avere due corpi A e B a temperatura costante ($T_A > T_B$), prendiamo un contenitore cilindrico *a, b, c, d*, che racchiude dell'aria e facciamo le seguenti operazioni (vedi Fig. 1)

⁴ L'analogia con la ruota d'acqua vale per S. Carnot, perchè a quel tempo, le macchine erano considerate in maniera la più astratta possibile e quindi solo geometricamente senza massa; perciò l'acqua come il calorico era considerato un fluido imponderabile.

⁵ Con questa FDN, Carnot, definisce il calore a temperatura costante, cioè di fatto dà l'attuale definizione di entropia; però non la sfrutta in seguito.

⁶ Per la prima volta si riscontra un salto nell'unità di ragionamento, infatti posto il problema S. Carnot, non lo risolve attraverso il solito percorso logico, subito arriva a principi operativi; nell'undicesima unità cerca di trovare rimedio, ma tutto rimane confuso.



Fig.1.

1. Mettiamo il cilindro a contatto con A (stato iniziale);
2. Il cilindro raggiunge la posizione *e f* e per tutta la trasformazione il corpo A fornisce il calore mantenendo T costante (espansione isoterma con $T = T_A$);
3. Il pistone staccato dal corpo continua a muoversi fino alla posizione *g h* (espansione adiabatica fino a $T = T_B$);
4. L'aria viene messa a contatto con il corpo B e il pistone torna alla posizione *c d* (compressione isoterma a $T = T_B$);
5. Il cilindro viene staccato al corpo B e la compressione raggiunge *i k* con temperatura uguale a quella del copro A (compressione adiabatica);
6. Il cilindro, viene messo a contatto con il corpo A e ritorna nella posizione *e f* (espansione isoterma alla temperatura del corpo A);
7. Si ripete partendo sempre dal numero 3 e così via.

Nelle diverse operazioni la forza elastica dell'aria è più grande nelle dilatazioni e quindi produce maggiore lavoro che di quello prodotto nelle compressioni]

■ L'aria, quindi, ci è servita come macchina termica; anzi l'abbiamo impiegata nel modo più vantaggioso possibile, perché *non* è stato effettuato alcun ristabilimento di equilibrio nel calore che fosse *inutile* [≠sono stati effettuati ristabilimenti utili].(p. 35, r.4)

[“Abbiamo scelto l'aria atmosferica come mezzo per sviluppare il lavoro del calore, ma è evidente che i ragionamenti sarebbero stati gli stessi per

ogni alta sostanza gassosa.... Siamo condotti a enunciare la seguente proposizione generale”:]

Il lavoro del calore è *indipendente* dagli [\neq è lo stesso per gli] agenti impiegati per realizzarlo; (p. 38, r. 4)

Questa condizione è soddisfatta se, come abbiamo sottolineato in precedenza nei corpi *non* avviene un *cambiamento* di t [$\neq t$ rimane costante] (p.38, r.10) che *non* sia dovuto ad un *cambiamento* di volume [\neq la t non varia con V], (p. 38, r. 12) oppure, il che è lo stesso ma detto in altre parole, se *non* c'è mai contatto tra i corpi con temperature sensibilmente *differenti* [$\neq c$ 'è sempre contatto tra corpi a t uguali].(p. 38, r. 14).

4. Conclusioni

Il libro di Sadi Carnot ha segnato la nascita della termodinamica, facendola scaturire dalla necessità di risolvere il problema del massimo rendimento delle macchine reali. La sua esposizione affronta questo tema con un nuovo metodo di ragionamento logico basato sulla logica non classica. Infatti, è importante sottolineare che tutta la sua opera è espressa da FDN tipiche della logica non classica, le quali offrono una “radiografia” di questo testo scientifico che presenta una teoria basata su un problema fondamentale: quale sia il rendimento di una macchina termica.

Tale teoria può essere utilizzata sia per una storia più dettagliata della termodinamica, sia come teoria per l'insegnamento della termodinamica nella scuola superiore:

- Uso storico: sottolineare la genialità di S. Carnot, malgrado l'incertezza sulla natura del calore, ha saputo costruire una teoria generale, fondato su ragionamenti per assurdo (situazioni impossibili sperimentalmente); novità rivoluzionaria per una teoria fisica, che piuttosto deve affermare verità di fatto.
- Uso didattico: la teoria di S. Carnot ricostruita con le FDN, è molto lineare, la rende indipendente dai suoi dubbi e dalle particolarità tecniche su cui lui si è soffermato, cioè il ciclo con il vapore d'acqua. Il testo non è lungo, è sintetico e concettoso e costituisce una parafrasi sintetica molto adeguata all'esposizione originale, e che può essere letto facilmente in classe per fare da base per la didattica della termodinamica.

Ringraziamento

Ringrazio il prof. Antonino Drago per la guida nello sviluppare questo lavoro prima nella mia tesi e poi nello scritto attuale.

Bibliografia

- Carnot S, *Sadi Carnot Réflexions sur la puissance motrice du feu*, édition critique par Fox Robert, Vrin J., Paris 1978.
- Drago A. e Pisano R., “Interpretazione e ricostruzione delle Réflexions di Sadi Carnot mediante la logica non classica”, *Giornale di Fisica*, 2000, 195-217.
- Drago A., *Le due opzioni*, La Meridiana, Molfetta BA 1991.
- Drago A., *Il ruolo della logica non classica nei fondamenti e nella didattica della scienza*, DN IRSSAE, Ancona 1997, 191-209.
- Dummett M., *Principles of Intuitionism*, Claredon, 1976.
- Iacono P., *La termodinamica di Sadi Carnot: reinterpretata e ricostruita sinteticamente*, tesi di laurea in Fisica, Univ. Federico II, Napoli, a.a. 1999-00.
- Ostwald W., *Klassiker der exakten Wissenschaften*, Englemann, Lipsia 1892, N° 37.
- Pisano R., *La termodinamica di Sadi Carnot: una nuova interpretazione basata su Logica e matematica*, tesi di laurea in Fisica, Univ. Federico II, Napoli, a.a. 1998-99.
- Prawitz D. e Melnnaas, “A survey of relations between classic, intuitionistic and minimallogics”.