

**ISTITUTO DI DISCIPLINE SCIENTIFICHE E TECNICHE**

**FACOLTA' DI ARCHITETTURA**

**UNIVERSITA' DI GENOVA**

**ANNO ACCADEMICO 1977-78**

**Pre - print**

"SE LE LEGGI DELLA STATICA E DELLA MECCANICA SIANO DI  
VERITA' NECESSARIA O CONTINGENTE"

1. INTRODUZIONE AL PROBLEMA

La distinzione tra verità necessarie e verità contingenti é come una linea di spartiacque che attraversa , nel corso dei secoli, paesaggi filosofici e scientifici molto diversi e prende nomi e figure nuove secondo la giogaia su cui é tracciata. Vi sono imparentate infatti e vi sono legate per una linea di continuità la distinzione tra razionalismo ed empirismo, tra qualità primarie e secondarie, tra verità di ragione e di fatto, tra deduzione e induzione, tra giudizi analitici e giudizi sintetici, tra proposizioni tautologiche e proposizioni fattuali, tra scienze esatte e scienze sperimentali, eccetera.

E' una distinzione che difficilmente potrebbe essere disconosciuta. Una volta che vi sia dimostrato rigorosamente un teorema, non ha senso moltiplicare gli "esperimenti" numerici per averne conferma; invece una volta che si sia stabilita una certa legge sperimentale fenomenologica, ogni verifica successiva é senz'altro dotata di significato, poiché può non solo confermarla, ma anche migliorarla o esigerne una revisione. La cosa é banale se si mettono a confronto, ad esempio, un teorema di algebra e un'esperienza meccanica sul comportamento a rottura di un provino. E' già meno banale se il confronto riguarda, anziché l'algebra, la geometria: é noto che presso gli antichi il concetto di baricentro si fece luce sotto vesti empiriche. Comincia a divenir significativa se il confronto verte sulla statica: che senso avrebbe un'attrezzatura sperimentale per valutare la regola del parallelogramma delle forze? Nessuna esperienza, per quanto raffinata e sofisticata, "aggiungerebbe" qualcosa, o potrebbe dare speranze di un approfondimento conoscitivo; mentre comprimer cubetti di calcestruzzo o il tendere provini di acciaio é sempre una conferma aperta a un pur minimo rischio che la rende significativa.

Ora: qual é il momento discriminante tra i due versanti dello spartiacque? La storia della meccanica e, in generale, del pensiero scientifico, mostra quanto sia stato difficile arrivare a una conclusione certa in proposito.

Il riferimento alla geometria -modello perfetto di una scienza "esatta", estranea alla verifica sperimentale, ma

legata all'intuitività della realtà estensionale- ha prodotto inizialmente un tentativo di riconduzione alla geometria delle "nuove scienze" alla statica e alla cinematica; in GALILEO,[ 1 ] il problema di resistenza limite della trave é ricondotto a proporzioni tra le dimensioni geometriche, la lunghezza, la larghezza, il quadrato dell'altezza. Del resto, la vecchia legge "quadrato-cubo" che orientava, sia pur grossolanamente, il dimensionamento strutturale presso gli antichi, si iscrive nel medesimo ordine di idee: la resistenza strutturale cresce proporzionalmente a una lunghezza al quadrato (essendo legata all'area della sezione trasversale), mentre il peso cresce proporzionalmente a una lunghezza al cubo.

I progressi delle teorie costruttive condussero, nei secoli XVII e XVIII all'introduzione di nuovi enti, come il momento di inerzia, che assolvevano il ruolo di trasformare in generalizzate misure geometriche la proprietà vitruviana della "firmitas". Sotto il profilo speculativo la questione assunse ben presto una diversa angolatura con la distinzione proposta da GALILEO e tematizzata da J. LOCKE tra qualità primarie e qualità secondarie: le prime si riferiscono rigorosamente all'oggetto e all'oggetto soltanto, come l'estensione; le seconde invece riguardano un certo rapporto con i dati sensoriali e quindi con le modalità esperienziali, ovvero con il soggetto conoscente, come il colore, il suono eccetera.

Orbene, la "firmitas", questa qualità essenziale delle costruzioni che secondo VITRUVIO deve essere unita alla "pulchritudo" e alla "utilitas", a quale delle due classi appartiene? Il buon senso suggerisce che la "firmitas" é una qualità obiettiva, indipendente dalla conformazione dei sensi. Ma la tradizione scientifico-filosofica che ha sorretto la nuova scienza dai suoi albori post-medioevali era improntata a un radicale meccanicismo, sì da ricondurre tutta la realtà fisica a "estensione e movimento". Già CARTE-SIO aveva stabilito nella dicotomia tra "res extensa" e "res cogitans" la tonalità fondamentale della realtà fisica, privilegiandone appunto l'estensione. Dunque, l'individuazione di misure geometriche che (sulla linea dell'obiettivo geo-metrico di esprimere in lunghezze, in aree, in volumi, l'estensione) riassumessero le proprietà meccaniche attinenti alla "firmitas" aveva ancora un significato filosofico preciso, per assicurare al rango obiettivo delle qualità primarie i risultati della meccanica strutturale.

Naturalmente, su questo sentiero la via percorribi-

le non é molta, anche perché il riferimento alla resistenza é troppo restrittivo rispetto al tema in questione. La meccanica infatti riguarda da vicino i principi generali dell'interpretazione fisica del reale. Nello schema scolastico (di tradizione aristotelica) essa é il coronamento della Physica Prior, volta a discernere i principi costitutivi dei corpi, ed é quindi legata alla metafisica il cui piú vasto obiettivo é comprendere i principi generali dell'"essere", di tutto ciò che esiste.

Già GALILEO, che pur s'opponeva alla tendenza razionalista-deduttiva della Scolastica, deduce il principio di inerzia dall'organizzazione globale della cosmologia, per la quale tutti i corpi tendono a ricongiungersi al centro comune dei gravi: é allora evidente che un corpo costretto a muoversi su un piano orizzontale che si estende a ugual distanza da detto centro non può manifestare alcun "impeto" o "talento nel discendere". L'orientamento sperimentale di GALILEO suscitò, come si sa, un'estesa polemica che troppo sbrigativamente vien oggi revocata in termini ideologici. CARTESIO, ad esempio, si opponeva radicalmente a GALILEO, col tentativo di spiegare il profondo perché delle esperienze meccaniche che GALILEO, a parer suo, si limitava a descrivere esteriormente. In una lettera a Mersenne diceva: "Pour ce qu'a écrit Galilée touchant la balance et le levier, il explique fort bien le quod ita fit, mai non pas curata fit, comme je le fais par mon Principe" [2]

Il riferimento al principio di causalità é appunto l'anello di congiunzione tra scienze della natura e metafisica, e quindi tra una visione della realtà del tutto astrattiva e generale, governata da leggi necessarie, e una visione empirica, sorretta dai dati incerti dell'esperienza e aperta al rischio, all'opinabilità, all'induzione. Come vedremo, nel secolo XVIII, il richiamo al principio di causalità é all'origine del dibattito intorno alla legge fondamentale della meccanica e alla sua natura razionale o fattuale.

Ma in CARTESIO la matrice metafisica delle ipotesi di base-matrici del resto non molto discosta dall'orizzonte aristotelico e scolastico- conduce a precise indicazioni sulle leggi del moto dei corpi. Il principio "nihil movetur nisi ab alio movetur" é infatti implicito, col tramite di una definizione, alla legge della "conservazione della quantità di moto". Nei Principi del 1644, [3] CARTESIO parte dall'assioma quasi-teologico: "Dieu, par sa toute-puissance, a créé la matière avec le mouvement et le repos de ses parties, et conserve maintenant en l'Univers, par son concours

ordinaire, autant de mouvement et de repos qu'il en a mis en le créant", per stabilire alla fine le leggi dell'urto.

Le quali sarebbero perfette se CARTESIO non avesse errato nella sua definizione della quantità di moto  $q$ , da lui posta pari a  $q = m |v|$ , anziché a  $m \chi$  (dove  $m$  è la massa e  $v$  la velocità). E ciò ha favorito l'insorgere di una delle grandi querelles del secolo XVIII tra cartesiani e leibniziani. LEIBNIZ, [4] operando nel rispetto del medesimo principio metafisico, ma in polemica con CARTESIO, era giunto alla legge delle "forze vive", definite come prodotto della massa per il quadrato della velocità ( $m v^2$ , senza il coefficiente  $\frac{1}{2}$  oggi in uso). Non ha interesse in questo contesto riferire su tale accesa discussione che, come tutte le diatribe più veementi, era dovuta a un qui-pro-quo. Interessa invece menzionare, sia pur di sfuggita, il fatto che nello scontro tra le correnti avverse era sottintesa una questione d'ordine metafisico. LEIBNIZ infatti, rinnegando nei suoi scritti scientifici della maturità le sue primitive concezioni cartesiane e gassendiane, cessò di vedere nell'estensione e nel movimento gli elementi originari del mondo fisico, per affermare il primato, l'originarietà del la forza. Fu appunto il riconoscimento del "memorabile errore di Cartesio" a fargli intraprendere questa nuova strada.

E' bensì vero, egli dice, che le nozioni di figura e di movimento possono render ragione esatta di qualsiasi fenomeno particolare; ma "i principi stessi della meccanica e le leggi del movimento nascono da alcunché di superiore, che dipende piuttosto dalla metafisica e non dalla geometria, e che non si può raggiungere con l'immaginazione, benché lo spirito lo possa concepire benissimo". Tale principio metafisico risiederebbe nella forza, distinta in forza viva e in forza morta. L'una e l'altra si compensano, essendo legate tra loro dall'equivalenza di causa ed effeto. Nello Specimen dynamicum del 1695, [5] LEIBNIZ annuncia infatti il cosiddetto "teorema delle forze vive", affermando che "la forza viva nasce da un'infinità di impressioni continue della forza morta"; in formola, con ovvia simbologia, tale proposizione diventa:

$$d \left( \frac{m v^2}{2} \right) = F ds \quad (1.1)$$

e la (1.1) conduce alla legge fondamentale:

$$m \frac{dv}{dt} = F \quad (1.2)$$

( $m$  costante) che identifica la forza morta con la forza statica.

Si noti tuttavia che il riferimento utilizzato da LEIBNIZ per illustrare la (1.1) é pur sempre l'urto tra masse in moto, un caso cioè in cui la sollecitazione che é causa del moto successivo si esprime, a sua volta, in moto. L'ideale geometrico di riduzione a "estensione e movimento" di ogni aspetto della realtà fisica fa comunque sentire il suo influsso, riacciandosi al problema sulla natura razionale o empirica delle leggi meccaniche fondamentali.

La considerazione del puro movimento é stata l'altra via, storicamente in concomitanza o in alternativa a quella della causalità, per affrontare tale problema epistemologico. Che per la velocità valga una legge di composizione secondo la regola del parallelogramma era noto sino da ARISTOTELE nei suoi Physicorum. L'identificazione, o meglio la riducibilità delle forze al movimento, mediante una proporzione tra causa ed effetto, aveva condotto VARIGNON [6] alla usuale regola di composizione delle forze, su cui egli riformulò organicamente tutta la meccanica; la statica dunque prendeva una veste rigorosamente geometrica.

Di che natura é la regola del parallelogramma? Ha la consistenza dei teoremi della geometria o quella di un modello sperimentale? Si occupò della cosa Daniele BERNOULLI in un saggio del 1726 [7]. Secondo BERNOULLI la trattazione di VARIGNON renderebbe la composizione delle forze una "verità contingente", ossia di natura sperimentale: infatti essa verrebbe a dipendere dalla composizione della velocità e quindi da un'ipotesi di proporzionalità tra forze e movimenti nonché da un principio di sovrapposizione degli effetti secondo il quale "una forza agente su un corpo già mosso da un'altra forza imprime ad esso la medesima velocità che si avrebbe se il corpo fosse inizialmente in riposo".

Invece, BERNOULLI si propone di "dimostrare" la regola del parallelogramma, assegnandola così al dominio delle "verità necessarie". A tale scopo egli introduce tre ipotesi: 1) che la composizione delle forze sia associativa; 2) che la composizione di due forze agenti nella stessa direzione si riconduca alla somma algebrica; 3) che la risultante di due forze uguali sia diretta secondo la bisettrice interna. Di qui in poi il procedimento "dimostrativo" corre abbastanza piano, lo stesso CAUCHY [8] lo riproporrà nel

secolo XIX (1). Va osservato che la terza ipotesi deriva, secondo BERNOULLI, da un "assioma metafisico", ossia, in ultima analisi, dal principio di ragion sufficiente. Con ciò, BERNOULLI riprende una linea di argomenti che era stata già di ARCHIMEDE [9] e, nel medio evo, di GIORDANO DI NEMORE [10] per il problema della leva: partire da una situazione simmetrica dove appunto la soluzione è necessariamente dedotta, e tentare di generalizzarne la portata, sempre per via deduttiva.

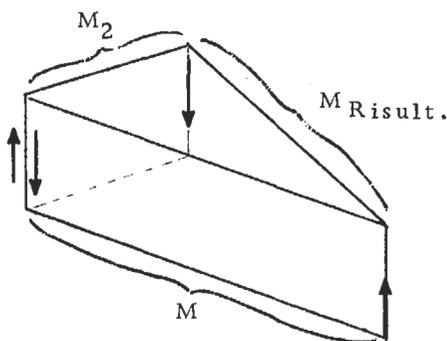
Quale che sia il valore della dimostrazione, la tesi di BERNOULLI si colloca in posizione mediana, equilibrata: da un lato egli ritiene, è vero, che la statica sia retta da leggi pre-esperenziali, necessarie, di ragione, ma dall'altro egli afferma il carattere contingente della legge fondamentale della meccanica che, in termini incrementali, può scriversi come proporzionalità tra cause ed effetti:

$$d\Pi = m dv \quad (d\Pi = F dt) \quad (1.3)$$

Ben più radicale è la concezione di EULERO: l'obiettivo della sua Mechanica, sive motus scientia analytice exposita del 1736 [11] è quello di rendere la meccanica una scienza rigorosamente razionale, a partire da definizioni e catene deduttive; le sue leggi non sono soltanto certe, ma vere necessariamente.

EULERO non si discosta in verità dalla sistemazione organica delle idee newtoniane: egli però intende fondare deduttivamente il concetto di massa, grazie all'equivalenza tra cause ed effetti, ovvero grazie al riconoscimento che  $v'$  è proporzionalità tra la "potenza" e la "quantità di materia" per un assegnato effetto. L'affermazione che "l'incremento della velocità  $dv$  è proporzionale a  $F dt$ " ne segue allora per logica inevitabilità, a tal segno che, secondo EULERO, una legge che ponesse  $dv$  proporzionale a  $F^2 dt$  (ad esempio) sarebbe addirittura contraddittoria.

(1) Il RANKINE [12] suggerisce una via ancor più semplice, partendo dalla composizione dei momenti, che richiede soltanto la considerazione di forze parallele (cfr. fig.), e definendo successivamente la risultante  $\mathcal{R}$  di due forze  $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2$  in termini di momenti.



## 2. LE GRANDI SOLUZIONI NELL'ETA' DELL'ILLUMINISMO

### 2.1. D'ALEMBERT

Il dibattito scientifico, su questo punto, era assai vivo nel secolo XVIII: tant'è vero che l'Accademia di Berlino mise a concorso proprio la questione di cui stiamo parlando: "Se le leggi della Statica e della Meccanica siano di verità necessaria o contingente".

L'Autore che probabilmente diede il contributo più fecondo in proposito, e il più originale, fu D'ALEMBERT [13]. Estendere i principi riducendoli, come è noto, era il suo motto. Egli aveva un alto concetto della Meccanica, sì da ritenere che, se essa fosse fondata su "verità contingenti", "ciò ne rovinerebbe la certezza e ridurrebbe la Meccanica ad esser nulla più che una Scienza sperimentale". Eppure - e qui sta il tratto caratteristico - il suo è un obiettivo di razionalismo a-metafisico: i principi della Meccanica debbono essere di verità necessaria (e quindi pre-esperenziale), ma non debbono essere connessi ad alcuna tesi metafisica in termini di causalità o di finalità. Criticando EULERO, egli si domanda: "perché mai dovremmo ricorrere al principio che tutti oggi usano, che cioè la forza acceleratrice è proporzionale all'elemento di velocità, sulla base di questo unico assioma vago e oscuro, per cui l'effetto è proporzionale alla sua causa? "

Ma come si può perseguire l'ideale delle verità universali e necessarie, nella conoscenza della realtà, senza cadere in metafisica? Era questo il problema che di lì a qualche anno avrebbe affaticato KANT, col suo proposito di fondare stabilmente la "scienza" nel dominio dei puri "fenomeni" coordinati dal "soggetto legislatore". La mirabile sintesi di KANT che, trasferendo l'universale e il necessario alle forme a priori e alle categorie intellettive riusciva a unificare le istanze opposte del razionalismo e dell'empirismo, si dimostrerà scarsamente utilizzabile nel successivo sviluppo della critica scientifica post-illuministica; e infatti KANT animerà, nel secolo XIX e nel secolo attuale, orientamenti di pensiero filosofico di grande interesse, ma piuttosto marginali rispetto alla epistemologia contemporanea.

Invece la soluzione offerta da D'ALEMBERT era destinata a prender sempre più terreno -naturalmente in modi diversi e secondo interpretazioni assai più late. Si trattava, in ultima analisi, di una soluzione antica, da sempre minoritaria nella repubblica filosofica, che aveva trovato una sua prima chiara anticipazione forse in ABELARDO, quel filosofo medioevale noto ai più soltanto per la sua truce vicenda amorosa: la soluzione consisteva in un'alternativa sia al realismo metafisico, sia al nominalismo; l'universale, diceva ABELARDO, non è una cosa e non è neppure un nome, ma è un discorso. La trama linguistica, il codice implicito o esplicito che dà alle parole una capacità di senso e un'apertura al significato, comincia dunque ad affiorare, benché per soli indizi embrionali.

Ebbene, D'ALEMBERT ritiene appunto di poter superare la controversia sullo statuto necessario o sperimentale dei principi meccanici, ponendo la forza acceleratrice come risultato di una definizione. Il carattere razionale della Meccanica è così fondato oltre ogni dubbio: nulla è più vero di quel che è vero per definizione, e non v'è esperimento fattuale che ne possa scalfire l'evidenza. La relazione:

$$\frac{d}{dt} (m v) = F \quad (2.1)$$

diventa perciò il principio da cui  $F$  è definita [14]. Ma nel medesimo tempo la (2.1) perde il suo originario significato di descrizione e di esplicazione fenomenologica, per dimostrarsi piuttosto una norma metodologica o addirittura una convenzione linguistica, per la quale è improprio domandare una rispondenza fattuale, mentre è giusto verificare semmai la convenienza, la versatilità applicativa, l'"economicità". Un certo colore convenzionalistico comincia a farsi visibile, preparando, nel secolo successivo, alla grande corrente epistemologica che ha promosso uno scottimento alle basi della logica, della matematica e, si può dire, della scienza in genere.

Naturalmente, sarebbe improprio ritenere che D'ALEMBERT potesse presagire gli esiti collegati alla sua impostazione. La riflessione settecentesca era impigliata su altri problemi: ne è esempio probante la polemica che divide in opposti schieramenti numerosi meccanici e filosofi intorno al principio della minima azione di MAUPERTUIS [15]. E' fondamentalmente la causalità il centro su cui gravitano gli interessi. La scienza "moderna", da GALILEO in poi,

aveva tentato con grande dispendio di energie intellettuali, di emarginare dal discorso scientifico qualsiasi riferimento alle cause finali. In verità, il finalismo, la teleonomia, possono esser fondati solo metafisicamente o teologicamente: da una simile base "razionalmente indubitabile" deriverebbe allora una lettura deduttiva di ogni legge naturale, quasi per corrispondere a quella premessa esterna al discorso scientifico, come se un immenso teorema razionale governasse la molteplice fenomenologia della realtà fisica, una volta che fosse ammesso, per via teologica-metafisica, che "nulla di ciò che si verifica nell'universo non é in relazione con qualche condizione di massimo o di minimo, poiché la fabbrica dell'universo é la più perfetta ed é l'opera del più saggio Creatore". In tal caso, prosegue EULERO, non potrebbe "esservi alcun dubbio che ogni effetto dell'universo consente d'esser spiegato dalle cause finali, con l'aiuto dei massimi e dei minimi, così come anche delle cause efficienti". [16]

## 2.2. CARNOT

Su posizioni diverse, forse meno chiare sul piano speculativo, ma importanti per il loro ruolo storico nella comune prassi scientifica dell'ottocento, si situa L. CARNOT nell'opera "Principes généraux de l'équilibre et du mouvement", pubblicata nel 1803, [17] che, pur essendo apparsa dopo la "Mecanique Analytique" di LAGRANGE (1788), può considerarsi "culturalmente" anteriore.

Qui la premessa filosofica che sostiene l'impostazione é di stampo prettamente empirico: CARNOT cita esplicitamente il Saggio di LOCKE al proposito. E dunque, é dall'esperienza che gli uomini -secondo l'Autore- hanno trattato le prime nozioni della meccanica. Il carattere universale e necessario, ossia "razionale", di tali principi non é perciò dovuto alla possibilità di fare a meno dell'esperienza nello stabilirli, ma, al contrario, al fatto che l'evidenza sperimentale del moto e dell'equilibrio é così familiare, così comune, da non lasciar distinguere sino a qual punto essa determini la ragion pura, con i suoi astratti teoremi e con le sue definizioni.

Lasciata in questi termini, la prospettiva di CARNOT non sembra suggerir nulla di particolarmente promettente. Tuttavia é probabile che in essa vi sia il germe di un'idea molto interessante sulla quale si incrociano diversi percorsi del pensiero filosofico contemporaneo. Il carattere

"contingente" dei dati empirici é generalmente connesso al fatto che lo scienziato "isola" il particolare fenomeno studiato dal resto delle esperienze familiari e comuni che non soltanto gli appaiono scontate, ma che sono anche il necessario presupposto della sua attività di sperimentatore. Ad esempio, se l'obiettivo é quello di misurare il peso di un grave, non avrebbe senso verificare preliminarmente l'ipotesi della gravità, o il principio della bilancia, e ancora a monte, l'obietività dei dati sensoriali, le condizioni che garantiscono la ripetibilità dell'esperimento, la certezza che il grave non muti la propria identità nel corso della misura, o a causa della misura, la permanenza di un "rischio" di falsificazione dei risultati conseguibili che ad essi conferisca un sigillo scientifico (cfr. POPPER [18]) e così via.

Questa ampia zona pre-giudiziale delinea l'orizzonte in cui il singolo fenomeno esperito vien valutato e connotato. Si può senz'altro concedere la provenienza empirica di tale orizzonte: solo che ad esso non può essere riferito il medesimo giudizio che l'analisi sperimentale rivolge ai suoi dati. Infatti, la zona pre-giudiziale coordina la possibilità stessa del giudizio e non può dunque esserne soggetta.

Nell'opera citata qui in nota [19], la questione di cui si é fatto ora cenno, era stata approfondita in vista di una rilettura del discorso metafisico: contro la tendenza di interpretare la metafisica come la pretesa di cogliere il noumeno, o anzi la "cosa in sé", oltre i fenomeni esibiti dall'esperienza la tesi era appunto questa: che la metafisica deve riguardare le certezze originarie che sfuggono a ogni successiva verifica empirica, non perché estranee, ma perché in esse implicite; la linea di demarcazione tra scienza e metafisica non si situa propriamente nella verificabilità o nella falsicabilità, ma nelle esperienze così familiari e comuni da esser ritenute "ovvie" rispetto a qualsiasi particolare indagine scientifica. E' per questo, allora, che la metafisica trascende i confini della verifica empirica: perché in ogni esperimento sarebbero date per pre-supposte quelle condizioni che la ricerca meta-fisica vuole individuare.

Possiamo ora intendere in che senso sia interessante la indicazione di CARNOT sui principi della meccanica: allacciando l'universalità di questi all'evidenza dei dati empirici più comuni e familiari, CARNOT fa balenare l'ipotesi, seppur da lui non sviluppata, che i principi meccanici

ci non riguardino direttamente gli eventi sperimentabili, ma la zona pre-giudiziale in cui i singoli fenomeni debbono essere coordinati; ossia non riguardino i fatti, quanto piuttosto la sintassi e il lessico per descriverli. Ma, su questo punto, non possiamo indugiare oltre e rinviemo alla parte "propositiva".

Aggiungiamo solo un'osservazione: per tener fede al suo discorso, CARNOT é sospinto a rifiutare il concetto di forza come concetto primitivo, poiché ciò richiamerebbe la nozione causale, con tutti i suoi gravami metafisici. Le "evidenze" cui si deve fare appello sono soltanto quelle relative al moto: le leggi dell'urto assumono così un ruolo fondativo per ogni altra legge meccanica. L'azione della forza é ricondotta a una serie di urti infinitesimi. "La gravità e tutte le forze di questo genere operano per gradi insensibili e non producono alcun cambiamento brusco. Tuttavia sembra assai naturale considerarle come se imprimevano, ad intervalli infinitesimi, urti pure infinitesimi ai mobili che esse animano".

Più esplicitamente CARNOT sottolinea che la forza, se proprio non può ricondursi a moto attuale, può comunque esser ricondotta a moto virtuale: "Le forze, quali le considera la meccanica, non sono enti metafisici e astratti: ognuna di esse risiede in una massa determinata ed é il prodotto di questa massa per la velocità che il corpo prenderebbe, se esso non fosse impedito da quegli altri corpi il cui movimento é incompatibile col suo". Come si vedrà, questi concetti di CARNOT ebbero notevole seguito in Autori ottocenteschi.

### 2.3. LAGRANGE

La splendida, conclusiva sintesi di LAGRANGE, nella meccanica analitica, si pone al termine non soltanto della discussione illuministica, ma anche del lungo itinerario del pensiero meccanico nel corso dei secoli precedenti. Lo intento di LAGRANGE non é specificamente speculativo: rispetto ad altri scienziati maggiormente rivolti al problema dei fondamenti, egli manifesta uno "spirito" moderno, attento piuttosto alla coerenza formale e all'efficacia operativa. Ecco i suoi obiettivi: "Réduire la théorie de la mécanique et l'art d'y résoudre les problèmes qui s'y rapportent à des formules générales, dont le simple développement donne toutes les équations pour la solution de chaque problème. Réunir et présenter sous un même point de vue les

différents Principes trouvés jusqu' ici pour faciliter la solution des questions de mécanique... Les méthodes que j'expose ne demandent ni constructions ni raisonnements géométriques ou mécaniques, mais seulement des opérations algébriques assujetties à une marche régulière et uniforme".

E' ben noto come LAGRANGE riuscì a unificare entro un sistema rigorosamente deduttivo, a partire dagli "assiomi" newtoniani, i quattro principi su cui s'era costruita la meccanica: la conservazione della quantità di moto, la conservazione delle forze vive, la "conservazione" dei momenti, il principio della minima azione. Basterà però qui sottolineare solo un aspetto, del resto quasi emblematico del procedimento lagrangiano, che riveste un certo significato dal punto di vista fondativo e metodologico. Si sa che la tecnica di "appendere" all'equazione dei lavori virtuali le condizioni di vincolo:

$$L = 0 \quad M = 0 \quad N = 0$$

dove L, M, N sono funzioni (finite) delle coordinate dei punti del sistema, conduce alla definizione di termini aggiuntivi del tipo  $\lambda dL$ ,  $\mu dM$ ,  $\nu dN$  ( con  $\lambda, \mu, \nu$ , "multiplicatori") che "peuvent être regardés comme représentant les moments o lavori virtuali de certaines forces appliquées au système". Ne risulta che "l'état d'équilibre du système sera le même, soit qu'on emploie la considération de ces forces, ou qu'on ait égard aux équations de condition!" [20]

La cosa é concettualmente importante perché, con un semplice gioco di prestigio analitico, vien del tutto superata la questione relativa alla causalità. Le forze, in generale, erano introdotte in virtù di un principio causale, e ciò richiama ad un discorso metafisico "vago e oscuro". Scorgendo invece nelle forze il risultato di un artificio per rappresentare in modo sintatticamente efficace la nuda geometria di un vincolo, questo richiamo é -almeno parzialmente- soppresso. L'ideale geometrico trova ancora una volta la sua conferma: estensione e movimento tornano ad essere i concetti primari di cui gli altri costrutti concettuali sono debitori.

#### 2.4. LAPLACE

Per esigenze di brevità non é possibile ora richiamare i successivi sviluppi della meccanica analitica e i

contributi fondamentali di scienziati come Poisson, Hamilton, Jacobi, eccetera, che accentuarono vieppiù l'aspetto "razionale" della disciplina, non tanto però sotto il profilo dei suoi fondamenti, quanto invece per il compimento della sua struttura formale. Dei meccanici post-lagrangiani menzioniamo soltanto LAPLACE per un suo tentativo di estendere in astratto le leggi fondamentali della dinamica, sino a stabilire la forma delle equazioni possibili, tra le quali l'esperienza consentirà di operare la scelta reale [21]

Prima di commentare un simile proposito, con riferimento al nostro tema e alla luce di alcuni orientamenti attuali della meccanica, è bene ricordare di che si tratta: secondo LAPLACE, non è possibile fissare a priori quale sia la relazione tra la "forza" e la "velocità"; escludendo il ricorso al principio di causa, si può dire solo che una relazione pur deve esserci, poiché solo il movimento merita il titolo di concetto primitivo, in funzione del quale la forza deve essere espressa. Quindi LAPLACE limita il suo intervento ad accogliere "tutte le relazioni matematicamente possibili tra la forza e la velocità", ponendo:

$$F = \phi(v) \quad (2.2)$$

L'equazione generale della meccanica dei sistemi, scritta al modo di D'ALEMBERT, è:

$$\sum_{k=1}^N m^{(k)} \left\{ \sum_{j=1}^3 \delta x_j^{(k)} (dF_j^{(k)} - P_j^{(k)} dt) \right\} = 0 \quad (2.3)$$

dove  $m^{(k)}$  è la massa del k-mo elemento del sistema,  $P_j^{(k)} dt$  è la componente secondo l'asse  $x_j$  della forza "agente" in maniera continua, come il peso" la cui azione è esprimibile come successione di impulsi infinitesimi (è chiara qui l'influenza di CARNOT), e  $dF_j^{(k)}$  l'analogica componente dell'incremento di forza  $F$  connessa alla velocità.

Avendo poi:

$$F_j = F \frac{dx_j}{ds} \quad (2.4)$$

$$\text{ne segue: } dF_s = d\left(\phi(v) \frac{dx_j}{ds}\right) = d\left(\phi(v) \frac{dx_j}{dt}\right) = d\left(\frac{\phi(v)}{v} \frac{dx_j}{dt}\right) \quad (2.5)$$

$$\sum_{k=1}^N m^{(k)} \sum_{j=1}^3 \delta x_j^{(k)} d\left(\frac{\phi(v)}{v} \frac{dx_j^{(k)}}{dt}\right) - P_j^{(k)} dt = 0 \quad (2.6)$$

Di qui derivano le altre grandi leggi di conservazione e di estremo: l'equazione delle forze vive, il teorema della quantità di moto, il principio della minima azio-

ne, in forma rinnovata e più generale. La struttura di questa estensione della meccanica é tale da poter esprimere, quali specificazioni interpretative, sia la meccanica classica, sia quella relativistica. V'è tuttavia una differenza tra il principio informatore dell'estensione Laplaciana e il senso della modifica introdotta da EINSTEIN, anche se le equazioni finali convergono, ove si ponga la massa funzione della velocità, ossia:

$$M = m \frac{\phi(v)}{v} .$$

In Laplace v'è infatti il tentativo di sospendere qualsiasi riferimento all'esperienza, indagando il più esteso campo delle possibilità matematiche, dove appunto non é più necessario supporre la proporzionalità tra la "forza" e la "velocità"; in EINSTEIN invece v'è l'intento di offrire una teoria più rigorosa, che convenga a quella classica per piccoli valori della velocità, una teoria però che s'attiene a una ben definita e specifica legge  $F = \phi(v)$ , stabilendo ulteriormente la variazione della massa in movimento.

In altri termini, mentre la relatività rappresenta un affinamento del modello descrittivo-esplicativo della realtà fisica, la trattazione laplaciana scavalca il singolo modello, per dare unità formale a una "classe di modelli"; l'interesse si sposta dalla configurazione di una "teoria" all'indagine meta-teorica, riguardando non più di rettamente la referenza esperenziale, bensì l'orizzonte linguistico entro il quale il meccanico e il fisico debbono comunque operare. La recente storia del pensiero scientifico dimostra quanto fosse feconda la direttiva preannunciata da LAPLACE: gli sviluppi dell'algebra moderna, della geometria, delle teorie assiomatiche in logica, esprimono il medesimo orientamento, per riportare gli oggetti di studio via via incontrati a possibili interpretazioni di strutture formali precedentemente costruite. Si viene con ciò a delineare una via alternativa, rispetto al procedimento classico dell' "astrazione", per giungere all'universale : [22] in una teoria assiomatizzata, la configurazione progressiva degli oggetti di studio che, nei contesti interpretativi, sono plasmati per successive generalizzazioni astrattive, vien conseguita in modo inverso, lasciando che la iniziale indeterminazione resti connotata dalla applicazione delle "regole del gioco" costituite dalla lista degli assiomi e dalle regole deduttive.

Si sa che il nostro secolo ha valorizzato altri set

tori delle scienze "esatte", fuori dal dominio della meccanica, per condurre a termine un programma assiomatico che sciogliesse antichi enigmi (ad es. sulla natura degli enti numerici o geometrici) e nuove antinomie (ad es. quelle che gettarono ombra sulla teoria "ingenua" degli insiemi). Tuttavia, anche la meccanica ha conosciuto una sua stagione assiomatica, e il programma laplaciano, seppur non riconosciuto come antecedente storico, è stato ripreso nella moderna teoria dei legami costitutivi di TRUESDELL e della sua scuola [23]: il comportamento dei materiali è stato studiato non più con l'animo dello sperimentatore che costruisce i suoi modelli a partire dai fatti sperimentali, ma con l'animo di chi costruisce una mappa di tutte le possibilità concettualmente coerenti, ossia con l'animo di chi si limita a descrivere la sintassi e il lessico di un linguaggio, senza impegnarsi a verificare la reale rispondenza di qualsiasi discorso in esso dicibile. All'esperienza è allora riservato soltanto il compito di riconoscere a quale casella della mappa possano essere ascritti i fenomeni di volta in volta esperiti, ovvero di assegnare il giusto "nome" ai diversi casi che si possono presentare in laboratorio.

E' questo, se si vuole, un nuovo modo di affrontare la vecchia questione dell'Accademia di Berlino: se le leggi della meccanica siano necessarie o contingenti. I suggerimenti metodologici di D'ALEMBERT e di LAPLACE si ritrovano in mutate spoglie e immensamente dilatati. Si potrebbe dire che la questione è virtualmente risolta sdoppiando il concetto di meccanica, ossia associando all'insieme delle leggi che descrivono e spiegano l'esperienza, un sosia razionalistico astratto che è in grado di coordinare - senza poterle discernere - l'esperienza "reale" e quella "possibile".

Resta però il problema di allacciare i due costrutti paralleli, l'uno generale, necessario, ma vuoto, e l'altro concreto, positivo, ma cieco. La coppia degli attributi vuoto-cieco non è qui usata senza intenzione: poiché è pertinente il richiamo a KANT che la ha introdotta per primo; come vedremo però -allo stato attuale delle conoscenze epistemologiche- la soluzione kantiana non è più sufficiente, perché in essa è sottovalutato il momento della mediazione linguistica che, da HUMBOLDT in poi ha preso invece il sopravvento, orientando, direttamente o meno, i sentieri più promettenti della critica scientifica attuale. Ma torneremo su questo punto in seguito.

### 3. SVILUPPI EPISTEMOLOGICI NEL SECOLO XIX

Durante la seconda metà del secolo XIX e all'inizio del nostro, si è svolta un'ampia e coraggiosa riflessione sui principi della meccanica classica: la varietà degli spunti e la complessa articolazione dei riferimenti filosofici rende impossibile condensare in breve spazio una rassegna pur sommaria ma completa. E' quindi necessario limitarsi a citare soltanto alcune posizioni emergenti e significative ai fini della proposta che tenteremo di formulare sul tema specifico dal quale ci siamo mossi, ossia la natura razionale o empirica delle leggi fondamentali.

#### 3.1. BARRE DE SAINT-VENANT

Ricorderemo dunque quella corrente di pensiero che, sviluppando l'impianto teorico di CARNOT, intende fondare la meccanica sull'analisi del moto e sulle sue leggi di comunicazione. B. DE S. VENANT<sup>[24]</sup> portò a atreme conseguenze tale direttiva e introdusse un'idea molto geniale, quasi al limite del paradosso: ma si tratta in verità di una lettura metodologica che merita di essere considerata con attenzione soprattutto oggi, dinanzi alle interpretazioni attualmente egemoni del sapere scientifico. Le epistemologie di un POPPER o di un BACHELARD, solo per citare due protagonisti molto influenti, vedono le leggi fisiche come "congetture" falsificabili, come costruzione progressiva di modelli che lo scontro con i fatti sperimentali corregge, sviluppa, capovolge.

Il principio generale della meccanica annunciato da SAINT-VENANT sembra fatto apposta per contraddire una simile interpretazione: esso non attende alcuna verifica empirica, anzi non è aperto neppure al rischio di una falsificazione, ma deliberatamente rinnega i dati dell'esperienza e, nella sua immutabile validità, si pone quale permanente riferimento di ogni successiva valutazione dei fatti. SAINT-VENANT sembra voler dirigere la sua attenzione non sul mondo reale, ma su un universo astratto dove la varietà è rimossa, dove i corpi sono assimilabili a sistemi di punti, dove l'uniformità e la simmetria regnano sovrane. "I corpi si muovono come sistemi di punti che hanno, in ogni istante nello spazio, delle accelerazioni le cui componenti geometriche, dirette secondo le loro linee di giun-

zione e variabili con la lunghezza di tali linee, ma non con la velocità dei punti, sono costantemente uguali e opposte per i due punti di cui ogni linea misura la distanza".

Tale principio generale é direttamente utilizzabile soltanto nell'ipotesi che i corpi siano tra loro identici: é allora evidente che, ad esempio, nell'urto tra corpi identici, l'uguaglianza delle velocità acquistate o perdute trova conferma sperimentale. Ma in ogni altro caso, come si sa, le cose vanno diversamente. Ebbene, ciò, secondo SAINT VENANT, non costringe a modificare il principio, ma obbliga piuttosto ad arricchire il modello descrittivo dei dati empirici, in modo che essi si adeguino alla legge universale precedentemente stabilita. Nascono così i concetti di massa e di forza: "si dà il nome di massa a dei numeri proporzionali a quelli dei punti elementari che occorre supporre nei corpi (...) per spiegare i loro diversi movimenti, alla luce della legge generale, conformemente al suo enunciato. Si dà il nome di forze attrattive o repulsive dei corpi, considerati a due a due, a delle linee proporzionali alle risultanti delle accelerazioni reciproche dei loro punti elementari, gli uni rispetto agli altri, secondo la medesima legge". Come si vede, il programma di CARNOT é seguito da SAINT-VENANT con decisa determinazione e con efficace incisività.

### 3.2. HERTZ

In HERTZ, l'analogo tentativo di reductio ad unum della meccanica accentua vistosamente un aspetto paradossale. I concetti di forza, di energia, valorizzati dall'impostazione classica, sarebbero, secondo HERTZ [25] degli "attori nascosti" dietro le cose che noi vediamo, meri fantasmi, semplici congetture d'altre cose invisibili, che servono a render conto della varietà e della diversità dei fenomeni sperimentati. Ecco allora che un'altra via si presenta: nulla ci impedisce di ammettere che quei fantasmi, quelle idealizzazioni di attori nascosti, appartengano alle medesime categorie degli "oggetti visibili", e cioè siano descrivibili in termini di massa e di movimento. "Ciò che noi siamo abituati a designare col nome di forza e di energia si riduce allora a una azione di massa e di movimento; ma non é necessario che si tratti sempre dell'azione di una massa o di un movimento percettibile ai sensi". Il mondo della meccanica si duplica così in un insieme di corpi visibili e in un insieme di corpi nascosti; a questo arricchimento moltiplicativo degli enti corrisponde però una dra

stica semplificazione dei loro connotati e quindi anche delle leggi che li governano.

HERTZ pone infatti a priori, quale legge fondamentale della meccanica, la seguente: "Un sistema isolato, composto di elementi materiali, percorre con velocità costante una traiettoria di curvatura minima, ossia una traiettoria la cui curvatura in ogni punto è minore di quella di qualsiasi traiettoria tangente". In formule, essendo la curvatura definita secondo la:

$$k = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^3 m^{(k)} (x_j^{(k)})^2 \quad (3.1)$$

la legge fondamentale -memore, senza dubbio, dell'armonia teleonomica sottintesa dei principi di estremo- diventa:

$$\delta k = 0 \quad (3.2)$$

Naturalmente un sistema osservabile deve essere interpretato, in genere, come parte di un sistema isolato dal quale l'altra porzione resta nascosta. Abbiamo citato la proposta "formalissima" di HERTZ soprattutto per una ragione: perché essa è indicativa di una vena convenzionalistica che si fa presente nella critica della scienza, e della meccanica in particolare, verso la fine dell'ottocento. I "corpi nascosti" sono, si può dire, il simbolo di un costrutto arbitrario, ormai estraneo al proposito di una descrizione accurata e aderente dei fatti e ciò nonostante capace di rispondere ai requisiti che rendono "scientifico" il discorso. Tali requisiti -sottolinea HERTZ- possono riguardare appunto "certe immagini o simulacri interiori" ai quali non va chiesto di rispondere alla realtà, ma va chiesto soltanto che le loro conseguenze necessarie siano in accordo con la realtà. La costruzione delle immagini è fondamentalmente arbitraria, a patto che se ne verifichi la coerenza interna, la corrispondenza sperimentale nei risultati, e infine la comodità. (Zweckmässigkeit).

### 3.3 MACH - DUHEM - MEYERSON - POINCARÉ'

E' noto che l'Autore più attento all'aspetto "economico"-e dunque connesso alla Zweckmässigkeit- dei costrut-

ti scientifici fu E. MACH: nella sua opera più importante, Die Analyse der Empfindungen (1900), il principio di economia -a partire dai dati sensoriali- é dilatato in tal misura da farne il fondamento dei concetti scientifici, i quali altro non sono se non segni riassuntivi delle reazioni possibili dell'uomo dinanzi ai fatti, tecniche economiche di classificazione, per conferire a classi di sensazioni caratteri di uniformità e di costanza.

Nel 1883, MACH aveva pubblicato un saggio sulla meccanica [26] nel suo sviluppo storico, dove é sottolineato un obiettivo anti-metafisico, a favore di una concezione empirica. Ciò non toglie a MACH la possibilità di rilevare l'aspetto "tautologico" di taluni principi, laddove il medesimo fatto é enunciato, con parole diverse, due volte. E' il caso del principio di azione e reazione: se si parte da una opportuna definizione di massa (simile a quella già proposta da SAINT-VENANT) (1) tale principio diventa superfluo o, secondo un diverso punto di vista, necessario. [27] Tuttavia, MACH non sembra trarre da questa considerazione spunti positivi: la sua critica lucida e serrata ha del resto finalità più estese rispetto al tema che qui ci interessa, per cui é anzi opportuno non soffermarsi oltre.

Ormai, il carattere convenzionale delle costruzioni scientifiche é ribadito con crescente insistenza: i principali esponenti <sup>deil'</sup> epistemologia che ha caratterizzato gli ultimi anni del secolo scorso e i primi decenni dell'attuale, manifestano su questo punto una certa uniformità, benché per mangano ovviamente differenze d'accento e anche divergenze di indirizzo. Così, per DUHEM, "la teoria fisica non é una spiegazione, ma un sistema di proposizioni matematiche dedotte da un piccolo numero di principi, che hanno lo scopo di rappresentare nel modo più semplice, completo ed esatto un insieme di leggi sperimentali" [28]: ossia, l'esperienza fornisce le proprietà fisiche misurabili "semplici" alle quali si fa corrispondere un simbolo; successivamente si inventano, con largo margine di libertà, salvo il rispetto della non-contraddizione, ipotesi atte a stabilire relazioni tra i simboli, e lo sviluppo matematico delle ipotesi dà luogo alla teoria; infine, il controllo sperimentale decide il valore della teoria, soprattutto alla luce di criteri di economia concettuale, ma anche alla luce di una istanza teoretica: "la teoria fisica non ci dà mai la spiegazione delle leggi sperimentali, né mai ci rivela la real

---

(1) - Supponiamo che due corpi  $A_1$  e  $A_2$  si comunichino le accelerazioni  $a_1$ ,  $a_2$ : si dice allora che il corpo  $A_2$  ha la massa di  $A_1$  moltiplicata per  $a_1/a_2$ .

tà che si cela dietro le apparenze sensibili, ma più essa si perfeziona e più noi sentiamo che l'ordine logico nel quale essa vien sistemando le leggi é il riflesso di un ordine ontologico, e più noi sentiamo che i rapporti che essa pone tra i fenomeni corrispondono a rapporti tra le cose" [29]

Così, per MEYERSON il lavoro della ragion scientifica consiste nell'immane e inattuabile sforzo di ricondurre all'identità dell'essere con se stesso e all'immutabilità parmenidea dell'essere, la molteplicità e il mutamento che sono i dati dell'esperienza. I grandi principi della fisica, quelli di conservazione e di bilancio, sono espressione di tale programma e infatti sono ammessi a monte della loro verifica sperimentale; il loro fondamento deriva piuttosto da un'esigenza di uniformità e di identificazione tra gli elementi del "diverso sensibile", e in questo senso deriva dal ruolo epistemologico della spiegazione causale che tende a rintracciare nell'effetto la causa e nella causa l'effetto, sino a riconoscere l'ultimativa identità del causante col causato. [30]

Così, infine, per POINCARÉ la convenzionalità del formalismo caratterizza le scienze esatte, esibendole come insiemi di "definizioni mascherate", mentre le scienze empiriche conservano una referenza ai fatti che il principio economico convenzionalistico non può cancellare, poiché, se pure é vero che tali scienze definiscono anzitutto "regole di azione" più che un rispecchiamento della realtà, non si può fare a meno di avvertire in esse "regole d'azione che riescono". [31]

Il margine convenzionale risiede nell'interpretazione della stessa esperienza, derivante dalla scelta dei principi che vengono mantenuti fissi, quali strumenti di giudizio per gli stessi dati sperimentali.

Parlando di POINCARÉ é d'obbligo ricordare il contributo epistemologico da lui dato al dibattito -assai vivo in quegli anni- sulle geometrie non euclidee. Anche in questo caso POINCARÉ propone una soluzione "moderatamente" convenzionalistica: "Gli assiomi geometrici non sono né giudizi sintetici a priori, né fatti sperimentali. Sono convenzioni. La nostra scelta fra tutte le convenzioni possibili é guidata da fatti sperimentali, ma resta libera ed é limitata soltanto dalla necessità di evitare la contraddizione". Tuttavia, anche in quest'ambito un certo riferimento all'esperienza é inelimi-



me é lecito sotto un'ipotesi di associatività, nella forma  $R = P \varphi (b)$ , la sola statica<sup>(1)</sup> consente di dedurre l'equazione funzionale:

$$\varphi(b)^2 = \varphi(2b) + 2 \quad (3.3)$$

che ammette quale soluzione:

$$\varphi = \exp \left( \frac{b}{c} \right) + \exp \left( - \frac{b}{c} \right) \quad (3.4)$$

con  $c =$  costante in generale complessa; specificando per  $c$  i tre casi possibili, reale, immaginario, infinito, si ottengono tre leggi possibili per la composizione delle forze, e conseguentemente, tre tipi distinti di relazioni tra i lati e gli angoli di un triangolo, espressivi delle proprietà geometriche del piano e dello spazio. [37]

Geometria e statica appaiono dunque fuse come in un unico discorso, due letture alternative ma equivalenti della medesima realtà concettuale.

---

(1) - Ossia, il solo impiego della proprietà associativa nella somma di forze parallele.

#### 4. NUOVAMENTE ALL'OBIEZIONE DI CARTESIO

Siamo giunti così alle soglie della grande rivoluzione scientifica che nel nostro tempo ha aperto visuali nuove con la teoria della relatività, con gli sviluppi della fisica atomica e nucleare, con i tentativi sia pur parziali di assiomatizzazione della meccanica razionale. Ma a questo punto è opportuno interrompere il "resoconto" storico. Buone ragioni confortano in tale decisione, oltreché un'ovvia esigenza di brevità.

Anzitutto, i termini stessi della questione sopra esaminata - sulla natura razionale o empirica delle leggi meccaniche - ha perduto l'incidenza culturale che in passato la rendeva intelligibile e attuale: la scienza non persegue più l'ideale di una conoscenza universale e necessaria, a un tempo aderente al reale e svincolata dalla soggettività dei dati sensoriali; la dicotomia che è venuta in uso nell'epistemologia contemporanea tra proposizioni tautologiche e proposizioni fattuali ha modificato riduttivamente l'alternativa antica tra verità necessarie e verità contingenti, spingendo piuttosto verso posizioni di impronta nominalistica ed empiristica.

In secondo luogo, la meccanica - e la meccanica classica in particolare - ha perduto il suo ruolo centrale che nei secoli scorsi le avevano conferito una vera egemonia nell'universo scientifico: la riflessione critica oggi è rivolta alle teorie fisiche in genere, di cui la meccanica rappresenta solo un capitolo. Il discorso si allarga sulla struttura della ricerca scientifica e sul permanente scontro tra i modelli teorici e l'arricchimento delle conoscenze sperimentali. La stessa scoperta delle analogie formali che legano tra loro contesti fisici differenti conduce alla necessità di un allaccio interdisciplinare: concetti come equilibrio, bilancio, stabilità, ecc., trovano riscontro in ogni campo della fisica matematica, o addirittura della lettura "scientifica" del reale. Gli sviluppi della teoria dei sistemi, o i più recenti capitoli della cosiddetta "termodinamica di non equilibrio" (cfr. DE GROOT, ONSAGER, PRIGOGINE [38] et al.) hanno dimostrato come fosse possibile riferire le medesime procedure analitiche non soltanto ai sistemi fisico-chimici, ma anche e principalmente ai sistemi biologici, agli ecosistemi, addirittura alle società umane.

E infine, la grande espansione che si è verificata - durante gli ultimi anni - di proposte assiomatiche, come

quelle già sopra citate per una teoria generale delle equazioni costitutive, ha valorizzato di norma esigenze di raffinamento e di sintesi formale più che di interpretazione epistemologica e di approfondimento critico dei principi. Ad esempio, l'organismo razionale elaborato da NOLL ed esposto con esemplare chiarezza da TRUESDELL, [39], assume la seguente definizione, in certo senso sbrigativa, della meccanica: "La meccanica intende connettere tre elementi - il corpo, il moto e la forza - in modo tale da condurre a buoni modelli del comportamento dei materiali nella natura. Vi sono due tappe. Dapprima, noi postuliamo principi comuni a tutti i corpi, e precisamente le leggi di conservazione per la forza e per la coppia, o in altri termini, per il momento lineare e per il momento di momento. Quando il campo è sufficientemente regolare, questi principi assumono la ben nota forma delle leggi di Cauchy del moto:

$$\operatorname{div} \underline{T} + \rho \underline{b} = \rho \underline{\ddot{x}} \quad \underline{T} = \underline{T}^T \quad (4.1)$$

dove  $\rho$  è la densità,  $\underline{b}$  è la forza di volume,  $\underline{\ddot{x}}$  l'accelerazione [e  $\underline{T}$  il tensore di tensione]. Questi principi sono soddisfatti da tutti i corpi, indipendentemente dalle loro proprietà materiali. (...) La seconda parte del programma della meccanica è rappresentare la varietà dei materiali. A questo fine noi costruiamo le equazioni costitutive, che determinano la tensione da sufficienti dati del moto. Ciò che sappiamo esser vero e ciò che crediamo esser ragionevole per questo o quest'altro materiale reale serve di guida nella scelta di forme differenti delle equazioni costitutive. Una teoria generale delle equazioni costitutive può essere fondata sui tre seguenti principi: 1) Principio di determinismo, 2) Principio di azione locale, 3) Principio di indifferenza del riferimento materiale".

Come si vede, il discorso possiede una struttura semplice e rigorosa. Per riprendere una osservazione già ricordata di CARTESIO, si può dire che esso spiega molto bene il quod ita fit: da un lato le leggi valide per tutti i corpi, dall'altro la complessa toponomastica delle equazioni costitutive. Resta però il medesimo dubbio che Cartesio aveva esternato: come venire a capo del cur ita fit? Quale è la ragione profonda di questa radicale eterogeneità che attraversa le equazioni della meccanica: le une che nella loro immutabile generalità sono presupposte come chiave interpretativa di ogni possibile esperimento, le altre

che sono invece "utili" soltanto se l'osservazione diretta del comportamento dei materiali riesce a farle riconoscere come attinenti alla realtà dei fatti, e che richiedono dunque di essere esse interpretate come risultato di un qualche esperimento ?

## 5. UN TENTATIVO DI RIFLESSIONE: L'EQUAZIONE DI BILANCIO

Queste domande richiedono almento un tentativo di sintesi, una proposta di riflessione. Nelle poche pagine che ancora ci restano vorremmo soltanto indicare una strada che ci sembra promettente, benché se ne riconosca ben presto la sottile difficoltà: ma qui ci limiteremo ai primi passi, come per una recognizione preliminare, non ancora impegnativa.

E dunque rinunciamo alla vastità dei temi richiamati nella parte storica, fermando l'analisi su un solo caso: l'equazione di bilancio. Come é noto, tale equazione afferma, con riferimento a una grandezza fisica  $\Psi$ , che in una certa regione dello spazio, durante un intervallo di tempo, la quantità prodotta di  $\Psi$  eguaglia la somma della quantità uscita e di quella accumulata; in formula:

$$\Psi_{\text{prod.}} = \Psi_{\text{usc.}} + \Psi_{\text{acc.}} \quad (5.1)$$

Astenendoci pure dal citare le interessanti e profonde considerazioni d'ordine crono-geometrico che TONTI [40] ha recentemente sviluppato a partire dalla (5.1), ci chiediamo subito quale sia il significato, il fondamento epistemologico di un'equazione di bilancio. La sua evidenza é così facilmente disponibile, da render superflua la verifica sperimentale, ovvero anzi da costringere a reinterpretare in modo opportuno gli esperimenti che eventualmente la contraddicessero onde appropriate equivalenze la ristabiliscano; e, d'altra parte, il ruolo del bilancio nelle teorie fisiche é così importante, da escludere la sua riduzio

ne a semplice tautologia, o a convenzione arbitrariamente adottata.

Ebbene, la strada su cui desideriamo dirigersi riguarda un approfondimento di quella attenzione linguistica per la lettura della teoria fisica che abbiamo intravvisto nel pensiero di molti Autori precedentemente considerati: ciò vuol dire, in particolare, tentar di risalire "dietro la facciata" dell'enunciato oggettivo che la teoria esibisce formalmente nel suo "discorso esplicito", per coglierne i legami con quel che vi é sottinteso e che delinea uno "strato discorsivo" antecedente e implicito. La cultura contemporanea é fortemente segnata da un simile progetto critico, sia là dove viene indagato, in campo epistemologico, il rapporto tra linguaggio e meta-linguaggio, o tra teoria e meta-teoria, sia là dove vien studiato il rapporto tra giudizio e pre-giudizio che mette in causa il problema della "coscienza storica" (Gadamer), o vien operato quello Schritt-zurück che consente di "prender le distanze" dal pensiero, cogliendo la sua storicità e riconoscendo il suo oscuro "da-dove" (Heidegger).

Ci dobbiamo dunque domandare quale sia l'implicito di una equazione di bilancio, quali remote ipotesi metodologiche ne consentano la scrittura. Una prima indicazione é spontanea: perché valga la (5.1) occorre preventivamente riconoscere che le quantità prodotte, uscenti e accumulate siano riducibili a un'unica grandezza. Ad esempio, il bilancio termodinamico é legato all'equivalenza del calore e del lavoro, e anche nelle relazioni di equilibrio é supposta generalmente l'ipotesi del "rinforzo dei vincoli", eccetera. Non é facile però discernere se il riconoscimento di un'unica grandezza capace di omologare ciò che entra e ciò che esce, ciò che é prodotto e ciò che é accumulato nel sistema, preceda o segua l'affermazione di un bilancio, poiché tale riconoscimento sembra esso stesso derivare da un'esigenza di bilancio, così come il bilancio sembra "formalizzare" il riconoscimento.

Occorre pertanto risalire ancora a monte, per scorgere l'origine di tutta la faccenda. E a monte v'è, crediamo, un atto metodologico fondativo che la teoria fisica nel suo complesso, in genere, pre-suppone: é l'atto metateorico della riduzione in virtù della quale una equivalenza possa risolversi in identità. E' noto, sin dal tempo di Leibniz, che la relazione di identità tra a e b può es-

ser descritta dicendo che, per ogni possibile proposizione P, se  $P(\underline{a})$  é vera, é vera anche  $P(\underline{b})$ : ossia:

$$\forall P (P(\underline{a}) \leftrightarrow P(\underline{b}))$$

Invece l'equivalenza tra  $\underline{a}$  e  $\underline{b}$  delimita l'inciso "per ogni possibile proposizione P" imponendo a P di appartenere a una prefissata classe C di proposizioni "ammissibili"; cioè

$$(\forall P \in C) (P(\underline{a}) \leftrightarrow P(\underline{b}))$$

L'atto riduttivo consiste, in ultima analisi, nell'omettere tale delimitazione, riferendo il campo delle possibilità a una scelta originaria d'ordine sintattico o lessicale.[41]

Ora, in un'equazione di bilancio i concetti di identità e di equivalenza sono implicitamente utilizzati e sono ricondotti anzi a un tutt'uno, entro il contesto che circoscrive la teoria fisica in esame. Ad esempio, la legge di Mayer sull'equivalenza in un ciclo termodinamico di lavoro e calore ( $L = JQ$ ), presuppone che sia lecito identificare il sistema all'inizio e al termine del ciclo, ove siano uguali i valori delle variabili di stato. Ciò che soggiace a tutto il successivo svolgimento é perciò la scelta delle variabili, ossia la risoluzione metodologica per cui ciò che avviene nel sistema é completamente connotato dalla conoscenza dei parametri presi in considerazione. Si noti che tale opzione conoscitiva, selezionando i dati molteplici e amorfi dell'esperienza, definisce l'oggetto di studio su cui opererà in seguito l'indagine teorica.

Quando sia accettata la riduzione nel senso sopra chiarito, il riconoscimento dell'equivalenza e l'equazione di bilancio diventano conseguenze meramente deduttive. Lo stesso fatto, direbbe Mach, é affermato due volte, la prima in veste di premessa meta-teorica ai confini del discorso disciplinare, la seconda in veste di tautologia che nulla aggiunge ai dati sperimentali coordinati dalla teoria. Tuttavia, e questo é il punto più delicato, nella equazione di bilancio, la scelta metodologica del lessico prende un aspetto apparentemente fattuale, e anziché riferirsi alla meta-teoria sembra volersi riferire agli oggetti immediati del discorso scientifico, esprimendo nella forma di una legge empirica e oggettiva la traccia del sottile filo

che collega l'esplicito all'implicito, il giudizio al pre-giudizio.

Ecco: é appunto la coerenza tra due strati linguistici (Waissmann) [42] o discorsivi all'origine di proporzioni che, a un tempo, non siano "contingenti" e non siano tautologiche. La metafisica classica conosce bene -non senza incertezze e oscurità interpretative- tale classe di relazioni, che pure le correnti sinora dominanti dall'epistemologia scientifica hanno forse sottovalutato. Basti un solo esempio: la trattazione aristotelica sul principio di identità (o di non contraddizione) [43] dimostra abbastanza chiaramente che il significato profondo di tale principio non era affatto la tautologia  $A = A$ , ma una formale istanza di coerenza: "ciò che é presupposto non può essere contraddetto", ovvero: "l'implicito che precede e fonda il discorso attuale non può essere contraddittorio con l'esplicito che il discorso stesso esprime". [44] Naturalmente, non é questa la sede per offrire le doverose spiegazioni e gli approfondimenti che sarebbero necessari, e rimandiamo perciò il lettore eventualmente interessato all'opera citata in nota.

Nel pensiero scientifico moderno, invece, sia nelle discipline orientate alle applicazioni, sia in quelle attente piuttosto alla critica dei fondamenti, ha prevalso l'intesa di ignorare l'implicito, chiudendo tra due parentesi l'oscura zona pre-giudiziale e perseguendo l'obiettivo di una accentuata o addirittura esclusiva formalizzazione. Il metodo assiomatico in logica é un esempio preminente in questo senso. E per questo, allora, il principio di identità é stato calato nel solo "discorso esplicito", facendone una tautologia: cioè una proposizione necessaria ma vuota, simile in tutto a qualsiasi altra proposizione tautologica, e quindi non esente da una certa convenzionalità. Quella propensione verso il convenzionalismo che già avevamo segnalato presso alcuni epistemologi della meccanica, ha trovato nella logica matematica -come si sa- formulazioni particolarmente radicali e incisive: "in logica non vi sono morali" diceva Carnap. Ma tale riduzione esteriore dei principi logici a tautologie radicalmente convenzionali non riesce, ad esempio, a render conto del perché, una volta che siano adottate certe convenzioni, ad esse si debba tener fede, il che é appunto il senso del principio di non contraddizione inteso come attinente alla coerenza interdiscorsiva. [45]

Nel saggio or ora richiamato, le proposizioni non "contingenti" e non tautologiche erano riferite alla "metafisica", utilizzando, non senza reticenze, questo termine in modo alternativo rispetto alle divergenti e globalizzanti interpretazioni che lo hanno reso -come disse Tarski- "un'invettiva tra filosofi". Per noi invece, "metafisica" vuol indicare soltanto una conoscenza che definisce i suoi oggetti in relazione alla coerenza tra gli "strati linguistici" o discorsivi, e riguarda perciò non tanto una descrizione o una spiegazione dei fatti -in sé-, quanto piuttosto il loro inserimento nella pienezza del rapporto conoscitivo, da ciò che in esso è implicito a ciò che affiora alla superficie del discorso scientifico.

Ebbene, con questa precisazione terminologica, si può forse affermare che il rapporto tra la iniziale riduzione e il successivo riconoscimento del bilancio afferisce a una lettura "metafisica" dei dati esperiti. Infatti, come si è veduto, l'equazione del bilancio interpreta l'esperimento: ha dunque una referenza meta-esperenziale, in cui l'indagine fenomenologica è fondata. Inoltre, l'equazione di bilancio si limita a esprimere, nel lessico disciplinare, la precedente scelta riduttiva delle variabili o dei parametri considerati sufficienti a connotare completamente la realtà: essa dunque non descrive la realtà, ma descrive una descrizione della realtà, anzi descrive il proprio fondamento. Ciò la fa apparire tautologica all'interno della "teoria", e quindi necessaria, ma nel medesimo tempo non vuota, bensì meta-teoricamente significativa, quale riflessione coerente sulla struttura del discorso scientifico. Infine, l'equazione del bilancio esibisce il carattere essenziale di una proposizione "metafisica": ossia la sua "infalsificabilità".

La storia della meccanica e, più in generale, della fisica, ha provato come lo scontro con i dati sperimentali non si sia mai risolto nel rinnegare la validità della (5.1), ma all'opposto, nel modificare la interpretazione dei dati stessi affinché essi la confermassero in rinnovata e più stabile forma. Come giustamente osserva Popper, la non-falsificabilità produce un vuoto esplicativo: una teoria che nessuna osservazione possa confutare "non ha il carattere di una teoria empirica". Ciò non implica, secondo lo stesso Popper, "che le teorie inconfutabili sono false o che sono prive di significato; ma implica che, fintantoché non possiamo dare una descrizione dell'aspetto che ha una possibile confutazione della teoria, allora quella teoria è al di fuori della scienza empirica". [46]

Una simile conclusione non può essere riferita al caso specifico del bilancio. Se è vero che il contenuto descrittivo -esplicativo di una teoria fisica è condizionata alla falsicabilità delle sue "congetture", è anche vero che tale contenuto non è tutta la teoria, la quale anzi trae la propria identità dal linguaggio, dalla sintassi che la governa ancor più che dalla sua referenza fattuale. L'equazione di bilancio merita dunque a buon diritto di essere ascritta alle leggi fondamentali di una scienza empirica, ove ne sia colto il vero ruolo, relativo al linguaggio e alle sue capacità espressive, e non alla descrizione della realtà sperimentata.

Occorre allora capire come si esplichino questo vuoto esplicativo e descrittivo che conferisce all'equazione di bilancio la sua dimensione meramente linguistica. [47] Torniamo per un momento all'esempio sopra considerato del principio di non contraddizione: la traccia esplicita di tale principio e la tautologia, ossia un "non dir nulla" sul reale. Nel caso del bilancio, invece, la traccia esplicita della remota riduzione che non sta a fondamento non è per nulla tautologica, poiché un'equazione come la (5.1) è un ingrediente prezioso che sembra offrire insostituibili informazioni per la descrizione accurata di molti fenomeni. Qual è dunque l'aspetto qui assunto dallo svuotamento esplicativo che è implicato nel carattere non falsificabile della (5.1)?

Per fissare le idee, consideriamo un'equazione di bilancio, ad es. nella forma di "conservazione energetica" per un sistema complesso S costituito da N elementi j; la (5.1) può essere allora scritta così:

$$\Delta \Psi_S = \sum_{j=1}^N \Delta \Psi_j = 0 \quad (5.2)$$

dove  $\Delta \Psi_j$  indica lo scambio energetico per l'elemento j tra due assegnati istanti. Come sappiamo, v'è a monte la riduzione che rende gli elementi del sistema completamente identificati quando sia identificato lo scambio energetico ad essi riferito. Ossia gli oggetti di S sono a un tempo denotati e connotati dai termini  $\Delta \Psi_j$ : e questa unità denotativo-connotativa fa emergere gli oggetti che realmente intervengono nel "discorso. Il "discorso" è esplicativo su

di essi proprio perché ne esprime il contenuto concettuale più adeguato.

Ora l'equazione di bilancio (5.2) si presta alla seguente curiosa interpretazione. La formula

$$\Delta \Psi_S = 0 \quad (5.3)$$

afferma che per l' "universo" considerato quella capacità connotativa vien meno: mentre ogni addendo della (5.2) identifica gli elementi del sistema S connotandoli con lo scambio energetico  $\Delta \Psi_j$  che li rende "presenti" nell'equazione, il sistema nel suo complesso é, come dire? , eliminato dalla relazione di bilancio (5.3). La connotazione di S, in termini di scambio energetico é nulla, nel senso che ogni sistema gode della (5.3), e la (5.3) non può divenire strumento di identificazione.

In una terminologia imprecisa, deteriormente "metafisica", ma efficace, si potrebbe dire che il vuoto referenziale della (5.2) é ottenuto compensando l'essere degli elementi col non essere del tutto! Più semplicemente, sarà meglio però limitarsi ad avvertire in  $\Delta \Psi_S = 0$  la traccia apparentemente fattuale del significato linguistico che é implicito nell'equazione di bilancio.

Vien qui pertanto confermata una tesi che abbiamo scorto essere stata una linea storicamente emergente del pensiero scientifico degli ultimi secoli, da D'Alembert a Poincaré; ma nel medesimo tempo quel suo orientamento convenzionalistico é in certo senso cancellato. La convenzione richiama infatti a un possesso assoluto del linguaggio da parte dello scienziato. Invece questo possesso é illusorio: i percorsi che legano tra loro la conoscenza del reale e il linguaggio per comunicarla sono ben più intricati, sì da rendere ancor oggi indecifrata e aperta a sviluppi interessanti la questione posta a concorso dall'Accademia di Berlino: se le leggi della statica e della meccanica siano di verità necessaria o contingente.

Edoardo Benvenuto

N O T E

- [ 1 ] Galilei G. : Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nove scienze attinenti alla meccanica ed i movimenti locali, Leiden (1638).
- [ 2 ] Cartesio R. : Lettera a Mersenne del 15. 11. 1638.
- [ 3 ] Cartesio R. : Principia Philosophiae, Amsterdam (1644).
- [ 4 ] Leibniz G.W. : Courte démonstration d'une erreur mémorable de Descartes et d'autres savants, touchant la prétendue loi naturelle en vertu de laquelle Dieu conserverait toujours la même quantité de mouvement, loi dont ils font un usage fautif même en mécanique. Acta eruditorum, Leipzig (1686).
- [ 5 ] Leibniz G.W. : Specimen dynamicum (1695). In Die Mathematische Schriften, (ed. G.J. Gerhardt) 6 , 325, Berlin u. Halle (1848-63).
- [ 6 ] Varignon P. : Nouvelle Mécanique ou Statique, Paris (1725)
- [ 7 ] Bernoulli D. : Examen principiorum mechanicae et demonstrationes geometricae de compositione et resolutione virium (1726). Cit. in Dugas R. : Histoire de la Mécanique, Neuchatel (1950)
- [ 8 ] Cauchy A.L. : Exercices de Mathématiques. Ma la dim. è riportata in appendice a G. Monge: Traité de Statique, Paris (1810)
- [ 9 ] Archimede : Traité de l'équilibre des plans et de leurs centres de gravité, Trad. fr. Paris (1807)
- [ 10 ] Cfr. in Duhem P. : Les Origines de la Statique, 1 , 121, Paris (1905).
- [ 11 ] Euler L. : Mechanica, sive motus scientia analytice exposita, St. Petersburg (1736).
- [ 12 ] Rankine J. : Manuel de Mécanique Appliquée, Trad. fr. Paris (1876).
- [ 13 ] Alembert (J. le Rond d'): Traité de Dynamique, Paris (1743 - 1758<sup>2</sup>).
- [ 14 ] Ibidem, cor. VI, 25 (ed. 1758).
- [ 15 ] Maupertuis P.L. : Accord de différentes lois de la Nature qui avaient jusqu'ici paru incompatibles Mém. de L'Académie des Sciences, 250 (1744).
- [ 16 ] Euler L. : Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes Lausanne (1744). Cfr l'Annesso II .
- [ 17 ] Carnot L. : Principes généraux de l'équilibre et du mouvement, Paris (1803).
- [ 18 ] Popper K. : The Logic of Scientific Discovery, New York (1959).
- [ 19 ] Benvenuto E. : Materialismo e pensiero scientifico, Milano (1974)

- [20] Lagrange L.: Mécanique analytique, 1, 69 e ss., Paris (1788).
- [21] Laplace P.L.: Mécanique céleste, I, 1, Paris, An VII.
- [22] Benvenuto E.: L'itinerario di Duns Scoto di fronte alla epistemologia contemporanea, Acta IV Congr. Scot. Intern. Sectio Gen. 1, 499 (1978)
- [23] Truesdell C. & W. Noll: The Non-linear Field Theories of Mechanics, Berlin, Heidelberg, New York (1965).
- [24] Saint-Venant (A. Barré de): Principes de Mécanique fondés sur la Cinématique, 421, Paris (1851).
- [25] Hertz H.: Die Prinzipien der Mechanik in neuem Zusammenhang dargestellt, 430, Leipzig (1894).
- [26] Mach E.: Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch kritisch dargestellt, Leipzig (1883)
- [27] Ibidem, 212 (dell'ed. franc. Paris (1925). )
- [28] Duhem P. : La Théorie physique, 26, Paris (1906).
- [29] Ibidem, 35.
- [30] Meyerson E.: Identité et Réalité, 38, Paris (1926)<sup>3</sup>.
- [31] Poincaré H.: La valeur de la Science, 218, Paris (1905).
- [32] Poincaré H.: La Science et l'hypothèse, 66, Paris (1903)
- [33] Lagrange L.: Oeuvres, 11, 4-5, (ed. J.A. Serret). Paris (1867 - 1892)
- [34] Laplace P.L.: Recherches sur l'intégration des équations différentielles etc. Mém. Ac. d. Sciences Paris (Savants étrangers) 7; (1773).
- [35] Alembert J. (d'): Sur les principes de la Mécanique, Mém. Ac. d. Sciences Paris (1769).
- [36] Foncenex D. (de): Sur les principes fondamentaux de la Mécanique, Miscell. Taurinensia 2, 305 (1760 - 61).
- [37] Genocchi A.: Dei primi principii della meccanica e della geometria in relazione al postulato di Euclide, Ann. Soc. Ital. delle Scienze (3), 2, 153 (1869)  
Cfr. Bonola R.: La Geometria non euclidea, 173 e ss., Bologna (1906).
- [38] Prigogine I.: Introduction to thermodynamics of Irreversible Processes, Springfield (Ill.) (1955)
- [39] Truesdell C.: Six Lectures on Modern Natural Philosophy, 3 - 5, Berlin Heidelberg New York (1966).
- [40] Tonti E.: Sulla struttura formale delle teorie fisiche, Rend. Sem. Mat. e Fis. di Milano, 46, 163 - 257 (1976)

- [41] Benvenuto E.: Loc. cit. 176.
- [42] Waissmann F.: Analisi linguistica e filosofica, trad. it. Roma (1970)
- [43] Aristotele : Metafisica, Libro IV ( ), 4 , 1006 a .
- [44] Benvenuto E.: loc. cit. 14 .
- [45] Ibidem 79 .
- [46] Popper K. : Scienza e filosofia, 130, tr. it., Torino (1969)
- [47] Benvenuto E.: La filosofia come linguaggio, Renovatio 4 , (1978).