Il contributo di Mach sull'origine dell'inerzia

Enrico Gasco (*) (**)

1. Introduzione

A metà Ottocento il quadro compatto della fisica che si era venuto formando nel corso del XVII secolo entrò in crisi sia per il presentarsi di nuove scoperte nelle scienze naturali sia per il rinnovato interesse degli scienziati sui fondamenti della loro disciplina. Un contributo di importanza decisiva al realizzarsi di questo processo fu fornito da Ernst Mach che mostrò i pregi ed i difetti concettuali della Meccanica Classica tramite una sapiente analisi storica. Alla base dell'opera machiana infatti, accanto ad una posizione filosofica che si riallaccia all'empirismo tradizionale, vi è la consapevolezza che solo lo studio storico dei principi fisici ne chiarisce l'origine, il significato e la correttezza. I concetti di spazio e tempo, ad esempio, furono sostituiti con una formulazione più attinente all'esperienza dopo aver mostrato le debolezze e incongruenze logiche delle definizioni newtoniane.

L'opera di Mach generò un proficuo dibattito fra i fisici di area tedesca e alcuni di essi tentarono di sviluppare, approfondire e trasformare in forma matematica le sue molteplici critiche ed idee. Fra questi spicca la figura di Einstein che trasse numerosi spunti dalla lettura della *Meccanica nel suo sviluppo storico-critico* [1], come risulta sia nell'articolo sulla Relatività Ristretta del 1905, sia nel percorso faticoso che lo porterà alla formulazione della Relatività Generale.

I concetti chiave della Relatività Ristretta sono un'insieme di considerazioni sullo spazio e sul tempo che Einstein propone nelle prime pagine dell'articolo: egli ad esempio afferma che “ *Dobbiamo tenere presente che tutti i giudizi in cui il tempo gioca un qualche ruolo sono sempre affermazioni su eventi simultanei. Se per esempio dico ‘quel treno è arrivato alle sette’ sto affermando un qualcosa di simile a: ‘La posizione della lancetta dell'orologio sulle sette e l'arrivo del treno sono eventi simultanei’* ” [2]. Il passo citato richiama la filosofia machiana [3] almeno sotto due aspetti: anzitutto nasce dall'osservazione di esperienze quotidiane come l'arrivo del treno o la rotazione delle lancette dell'orologio e non da considerazioni astratte senza riscontro immediato;

(*) Un ringraziamento particolare va rivolto a Silvio Bergia che mi ha seguito con pazienza durante le mie ricerche.

(**) E-mail: EnricoGasco@Libero.it

in secondo luogo è simile alle riflessioni di Mach sul “tempo assoluto”. Nei *Principia Matematica* Newton aveva introdotto la definizione di “tempo assoluto” come un qualcosa che fluisce uniformemente senza riferimento ad alcun oggetto esterno; Mach, invece, sostiene che quando constatiamo il mutamento temporale di un oggetto A – egli aveva in mente le escursioni del pendolo – stiamo semplicemente dicendo che gli stati di A dipendono, sono in rapporto con quelli di un altro oggetto B – ad esempio la rotazione terrestre (cfr. Par. 3). Se confrontiamo la critica alla simultaneità di Einstein, espressa nella frase riportata, con le considerazioni di Mach sul tempo assoluto, notiamo che vi è una analogia fra le due argomentazioni; la prima infatti confronta due eventi quali l’arrivo del treno e la posizione delle lancette dell’orologio e la seconda, in modo simile, paragona gli stati di A (le escursioni del pendolo) con quelli di B (la rotazione terrestre)[3].

Più sottile ma ugualmente efficace fu l’influenza di Mach nella costruzione della Relatività Generale. Uno dei principi cardine della nuova teoria è il Principio di Equivalenza fra massa gravitazionale e massa inerziale, a cui Einstein giunge dopo un tormentato percorso che parte proprio dalla lettura di alcuni passi sull’inerzia presenti nella Meccanica. Il Principio di Mach, che Einstein formula per la prima volta nel 1912 [4] e che lega le proprietà inerziali di un corpo alla presenza delle altre masse dell’universo, rappresenta da un lato un punto di arrivo nella riflessione einsteiniana sull’opera di Mach e dall’altro lo stimolo per approfondire la ricerca e per giungere ad una formulazione completa del Principio di Equivalenza [5].

Se Einstein portò alle estreme conse-

guenze le idee proposte da Mach fino alla costruzione di una nuova teoria, non bisogna dimenticare che alcuni fisici di secondo piano dell’area tedesca, quali Immanuel e Benedict Friedländer e August Föppl, furono i primi a svilupparle in ambito strettamente meccanico. La loro ricerca fu in primo luogo sperimentale ed essi proposero una serie di esperimenti volti ad individuare forze centrifughe e sistemi di riferimento inerziali slegati dai concetti newtoniani di spazio e tempo assoluti.

Gli esperimenti nascono tutti dalla lettura della critica machiana ai concetti di spazio e tempo assoluti e alla sua applicazione all’esperienza del secchio di Newton. Lo scienziato inglese aveva proposto il seguente esperimento: si appenda un vaso pieno d’acqua ad una corda e si imprima un moto circolare continuo fino a che la corda non sia divenuta rigida. Lasciando poi srotolare la fune, il secchio inizia a compiere un moto rotatorio, mentre l’acqua al suo interno rimane in quiete. Il moto prosegue e la rotazione viene trasmessa dal vaso al liquido fino a quando si presenta il caso del secchio oramai fermo e del pelo libero dell’acqua che assume una forma concava. L’innalzamento dell’acqua lungo le pareti del vaso non è dovuto alla rotazione relativa rispetto alle pareti, in quanto non si verifica il medesimo effetto quando il secchio ruota mentre l’acqua rimane in quiete (verificandosi in ogni caso una rotazione relativa) ma rappresenta il moto vero del liquido. L’effetto osservato è spiegato con la presenza di una *forza centrifuga* che allontana le particelle d’acqua dall’asse di rotazione.

Il concetto di forza centrifuga fu formulato da Huygens, approfondito da Newton e accettato dalla comunità scien-

tifica durante il 600 senza particolari difficoltà: la forza centrifuga derivava dall'inerzia di un corpo ed era considerata una proprietà intrinseca al suo stato di moto. Newton utilizzò questa proprietà per dimostrare l'esistenza del moto assoluto: l'osservazione infatti di accelerazioni centrifughe, quindi di un qualcosa intrinseco allo stato di moto, permetteva di discernere fra moto assoluto e moto relativo.

Nella Meccanica Mach prende in esame l'esperimento e giunge alla conclusione che le forze centrifughe sono “*prodotte*” dal *moto relativo* dell'acqua rispetto alla massa della terra e “*agli altri corpi celesti*”, mentre il suo moto relativo rispetto alle “*pareti del secchio*” non produce alcun effetto osservabile.

Il risultato a cui perviene è una spiegazione dell'esperienza in termini esclusivamente relativi in cui sono assenti concetti quali spazio, tempo e moto assoluti; le forze centrifughe sono descritte tramite il moto relativo dell'acqua rispetto all'insieme delle stelle fisse e non sono l'espressione di una rotazione vera in riferimento ad uno spazio assoluto.

Ma si può interpretare il ragionamento machiano anche da un altro punto di vista. Infatti egli afferma che le forze centrifughe sono “*prodotte dal moto relativo*” alla massa delle stelle fisse, quasi come se le stelle avessero un ruolo attivo nella determinazione delle forze. Sembrerebbe quindi che Mach suggerisca un “*nuovo meccanismo fisico*” che spieghi l'origine delle forze inerziali in una qualche interazione causale fra l'acqua nel secchio e le altre masse dell'universo [9].

Fra le due interpretazioni quella che ebbe maggiore successo fu la seconda, tanto che sia Einstein sia i fisici tedeschi di cui si è detto indirizzarono la ricerca

per chiarire con considerazioni teoriche e con esperimenti pratici se la seconda lettura dei passi machiani potesse portare a nuovi risultati di rilevanza fisica.

Se ammettiamo che le accelerazioni centrifughe osservate nell'esperimento del secchio *sono dovute al moto relativo* rispetto alle masse lontane, deduciamo che un qualunque moto rotatorio di corpi sufficientemente massivi genererà forze centrifughe direttamente osservabili. Questa conclusione è alla base sia dei lavori dei Friedländer, di Föppl e dello stesso Einstein.

Analizziamo ora brevemente le opere di questi autori per mostrare come le considerazioni machiane sull'esperimento del secchio abbiano avuto una notevole influenza.

In una monografia del 1896 Immanuel Friedländer, in collaborazione con il fratello Benedict, espone un'analisi del moto in parte prendendo spunto dall'opera machiana ed in parte proponendo un contributo originale [6].

Immanuel parte dalla convinzione – ottenuta dopo lunghi studi personali – che “*data una formulazione corretta della meccanica, il fenomeno della forza centrifuga dovrebbe essere spiegato solamente in termini di moti relativi del sistema fisico considerato, senza fare ricorso ad alcun concetto di spazio assoluto*”. Questa convinzione lo porta ad indicare due linee di ricerca: la prima riformula il concetto di forza viva di una massa in movimento e di qui giunge ad una nuova versione del Principio di Inerzia, la seconda mostra per via sperimentale che l'attuale formulazione della meccanica risulta inadeguata. La scelta di Immanuel e del fratello si indirizza sulla seconda via ed essi (in particolare Benedict) escogitano un esperimento per determinare forze centri-

fughe generate da moti relativi. L'esperienza infatti è costituita da un anello rotante massivo al cui interno è posizionata una bilancia di torsione; l'obiettivo è quello di verificare se il moto relativo dell'anello rispetto alla bilancia di torsione genera forze centrifughe misurate proprio da quest'ultima.

Nel febbraio del 1904 [7] esce una memoria del fisico tedesco Föppl in cui è descritto un esperimento, simile a quello del pendolo di Foucault, per determinare la corretta posizione di un sistema di riferimento inerziale. Föppl è interessato a comparare due sistemi di riferimento: quello delle stelle fisse e quello individuato dall'esperimento del pendolo. Abitualmente essi sono ritenuti inerziali e coincidenti, ma secondo il nostro autore potrebbero differire per una piccola influenza dovuta alla rotazione terrestre. Il risultato dell'esperimento - di cui la memoria era il resoconto - fu negativo, ma è interessante scoprire quali siano state le sue basi concettuali.

Una risposta ci viene dal secondo articolo pubblicato a novembre del 1904 in cui Föppl [8] cita Mach come sua fonte di ispirazione. Come nel caso dei fratelli Friedländer, Föppl ipotizza che i moti rotatori relativi (la rotazione della terra) generino in qualche modo forze inerziali. Egli considera un insieme di n punti massivi suddivisi in due ulteriori sottogruppi G_1 e G_2 ; il primo, inoltre, è molto più grande, mentre il secondo compie un moto rotatorio. Se consideriamo i due gruppi come due sistemi di riferimento fisici, possiamo individuare facilmente l'insieme G_1 con la sfera delle stelle fisse e l'insieme G_2 con la terra. Ci troviamo ora nelle condizioni dell'esperimento descritto nella prima memoria del 1904. In base alle osservazioni machiane il sotto-

gruppo G_2 , in moto rotatorio relativo rispetto a G_1 , eserciterà un'influenza su G_1 che si manifesta in una *forza di coriolis* direttamente osservabile.

Consideriamo infine l'articolo di Einstein del 1912[4]. Egli considera un guscio sferico di materia K , un punto massivo P al suo interno e mostra come il moto di K modifica le proprietà inerziali di P . ⁽¹⁾

Alla conclusione dell'articolo Einstein introduce il Principio di Mach "*... la presenza del guscio sferico inerziale K incrementa la massa inerziale del punto materiale P posto al suo interno. Questo fatto rende plausibile l'idea che l'intera inerzia di un punto massivo sia l'effetto della presenza di tutte le altre masse, risultante da una qualche interazione con esse. Questo è esattamente il punto di vista che Mach ha argomentato in modo persuasivo nelle sue penetranti ricerche sulla questione.*" [4].

Abbiamo descritto in modo conciso come una certa interpretazione dei passi machiani sia stata alla base di innovative ricerche fisiche; rimane però da verificare la sua correttezza. Nelle pagine seguenti cercheremo di chiarire questo punto e giungeremo alla conclusione che la via seguita dai Friedländer, da Föppl e da Einstein è una forzatura delle argomentazioni machiane.

⁽¹⁾ Il risultato raggiunto da Einstein con una preliminare teoria scalare della gravitazione è il seguente:

- 1) La presenza del guscio sferico di massa M e raggio R aumenta la massa inerziale m del punto al suo interno di una quantità pari a $k(\frac{mM}{Rc^2})$ dove k la costante di gravitazione universale.
- 2) Un'accelerazione Γ del guscio sferico induce un'accelerazione $\gamma = \frac{3}{2}k(\frac{M}{Rc^2})\Gamma$ del punto massivo m .

2. Il rapporto fra Meccanica e Fisica e la scoperta del Principio universale.

L'opera filosofica e scientifica di Mach è caratterizzata dall'analisi di alcuni antichi problemi filosofici che acquistano significato in quanto coinvolgono i fondamenti della scienza dell'800. Questioni quali che cosa sia un'osservazione, un esperimento, una massa, le forze oppure una legge di natura sono tutti temi che Mach affronta durante il suo percorso intellettuale, sia utilizzando le sue capacità di fisico e di matematico, sia le sue conoscenze storiche. Sono proprio queste ultime che lo guidano nell'analisi dei fondamenti della fisica e della meccanica e che lo indirizzano nella ricerca della natura del loro stretto rapporto reciproco. Il legame fra meccanica e fisica è un tema tipico della riflessione filosofica del XIX secolo e Mach partecipa al dibattito con un contributo innovativo e determinante.

A metà 800 la dipendenza della fisica dalla meccanica è un risultato acquisito grazie in primo luogo all'opera di d'Alembert, ma è Helmholtz ad esplicitare in modo dettagliato il programma meccanicistico (*"Sulla conservazione della forza"* – 1847[10]). La metodologia di ricerca del meccanicista si fonda sul principio della riduzione di ogni trasformazione naturale ad una causa sufficiente; i fenomeni naturali dunque devono essere scomposti in quelli più semplici attraverso la ricerca delle loro cause, fino a giungere alle cause ultime e quindi ai fenomeni elementari. Il riduzionismo per la prima volta suddivide la ricerca in due attività distinte: una scienza sperimentale ed una teorica. La prima ha il compito *"di cercare le leggi, attraverso le quali i singoli processi della natura possono essere ricondotti a rego-*

le generali" [10], ne sono un esempio la legge di Mariotte o quella di Gay Lussac per i volumi, ma presenta il difetto di non fornire le cause del comportamento naturale.

Se ad esempio consideriamo la legge di Boyle, sappiamo tramite essa come collegare fra loro alcune proprietà dei gas quali il volume e la temperatura, ma rimaniamo incerti sul motivo per cui si verifichi questo comportamento. La ricerca delle cause del fenomeno va dunque al di là della semplice descrizione delle apparenze sensibili e supera la scienza sperimentale per approdare a quella teorica: essa ha il preciso compito di *"trovare le cause ignote dei processi dai loro effetti visibili e cerca altresì di comprenderli attraverso la legge di causalità"* [10].

Ma come si esplicitano in fisica le cause ignote dei fenomeni? Gli oggetti esterni sono raggruppati sotto il concetto astratto di materia che gode sia di qualità descrittive, quali la posizione o la massa, sia di una proprietà efficiente come ci informa l'esperienza. In Fisica il fattore efficiente si traduce nel concetto di forza e quindi studiare le cause ultime dei fenomeni equivale a ricercare le forze fondamentali. Helmholtz compie un passo successivo e specifica alcune proprietà di tali forze. Se infatti gli elementi fondamentali a cui ridurre ogni spiegazione devono mantenere le loro caratteristiche, ne consegue che gli unici cambiamenti ammessi sono quelli di posizione; le forze non sono altro che *forze motrici*. Al fine poi di utilizzare il modello meccanico dei punti materiali e delle forze centrali di attrazione e repulsione, i sistemi naturali vengono suddivisi in parti via via più piccole e le forze interagenti sono scomposte nelle loro componenti elementari.

Il compito della fisica, e della scien-

za in generale, risulta ora ben individuato: “*ricondere fenomeni naturali a forze immutabili, attrattive o repulsive, la cui intensità dipende dalla distanza*” [10].

Il riduzionismo di Helmholtz viene criticato da Mach nello scritto del 1872 [11] in cui si studia la storia e la radice del principio di conservazione del lavoro (oggi diremmo dell’energia). Il punto di partenza dell’analisi machiana è il concetto di materia affrontato da una posizione sensistica. Il mondo che ci presenta la nostra sensibilità ha una straordinaria ricchezza di qualità e considerare la materia per le sue semplici proprietà geometriche e meccaniche, vuole dire privilegiare senza alcun motivo caratteristiche che non presentano alcuna diversità ontologica rispetto alle altre. La realtà che attingiamo mediante un senso non è più reale, quindi non ha un valore diverso da quello con cui ci mettono in contatto gli altri sensi.

Mach utilizza un termine particolare per rendere conto dei dati fornitici dalla sensibilità: egli li considera come un insieme di elementi. Il loro utilizzo ha il pregio di eliminare il soggettivismo che risiede in ogni forma di ancoraggio della scienza alla sensibilità, purificando il linguaggio delle sensazioni da ogni possibile interpretazione personale. Si dice allora che gli elementi rappresentano una base comune *impersonale* su cui costruire un sapere scientifico [12] [13] [14].

Essi consentono inoltre di superare la distinzione mente-corpo che è il fondamento della riduzione meccanica: la fallacia della nostra sensibilità, che ci costringe ad oltrepassare i limiti dell’esperienza, è ammessa solo considerando una separazione effettiva fra mente e corpo. Per Mach invece gli oggetti esterni sono sì un qualcosa che differisce da noi, ma ne possiamo conoscere il comporta-

mento solo attraverso costruzioni mentali che si basano sugli elementi; in altri termini “*le sensazioni non sono rappresentazioni di cose; ma al contrario, una cosa è una rappresentazione mentale di un insieme di sensazioni relativamente stabili*.” [13]. L’obiettivo della scienza viene dunque ridotto al semplice compito di riprodurre nel pensiero le relazioni che intercorrono fra i dati sensibili. Un’operazione in poche parole descrittiva ma che deve possedere un aspetto qualitativo come si addice ad ogni sapere scientifico. In fisica ne è un esempio il principio che stabilisce la convertibilità del calore in lavoro meccanico, in cui si individua un rapporto numerico fra una qualità meccanica ed una che ai sensi non risulta tale. La scienza dunque possiede lo strumento per collegare fra di loro diversi processi naturali, e per collegarli senza trasformarli qualitativamente, senza sopprimere cioè le differenze intuitive e senza supporre che i sensi ingannino dandoci la sola apparenza delle cose.

La base su cui costruire la scienza è determinata: sono gli elementi. Ogni concetto della fisica deve ricondursi ad essi e quando ciò non avviene il motivo è da ricercarsi nella non perfetta corrispondenza con l’esperienza. Ci troviamo ora di fronte ad un errore tipico del pensiero metafisico che concepisce come reali entità fittizie.

Ma come individuare i danni della nostra inclinazione alla metafisica? L’unica nostra possibilità è il ricorso alla storia della scienza che ci illumina attorno a certi processi mentali, apre uno spiraglio su certe abitudini della nostra mente. Così ad esempio lo studio storico dell’evoluzione della meccanica ci mostra che la scienza maggiormente conosciuta, quella usata come paradigma, poggia su fundamenta

tutt'altro che stabili e sicure. Il tentativo poi di ridurre tutto il conoscibile ad essa si rivela fallace in quanto si ricerca qualcosa che va oltre l'esperienza, quello che sta al di sotto. Ecco allora che compaiono nella discussione scientifica imponderabili o fluidi a cui si attribuisce esistenza, si discute attorno a proprietà non misurabili, si creano problemi senza soluzioni. Un esempio di questo atteggiamento metafisico, a parere di Mach, è la generalizzazione operata da Helmholtz del *Principio dell'assenza del perpetuum mobile* che attua la riduzione di ogni fenomeno naturale allo schema meccanico.

Consideriamo un sistema di n particelle che evolva da un istante iniziale ad uno finale. Il passaggio garantisce una produzione di lavoro equivalente alla variazione della *forza viva* delle particelle. Supponiamo di voler riportare il sistema allo stato iniziale: possiamo compiere questo passaggio senza spendere lavoro? Se ciò fosse possibile avremmo creato un perpetuum mobile che crea lavoro dal nulla, in quanto produrremmo lavoro facendo transire il sistema dallo stato iniziale a quello finale e non spenderemmo nulla nel farlo ritornare al punto iniziale. Che questo comportamento sia impossibile è garantito dall'esperienza. Nella sua forma matematica il principio dell'assenza del perpetuum mobile si traduce nella *legge della conservazione della forza viva*, dove il lavoro speso dal sistema nel passare da uno stato al successivo equivale alla differenza della sua energia cinetica. La legge può essere estesa se ammettiamo che il lavoro sia generato da forze centrali (assunzione che Helmholtz accetta in quanto le forze fondamentali sono forze centrali) ottenendo così il *principio della conservazione della forza*. Il lavoro che equipara l'energia cinetica del siste-

ma è ora scomponibile nella somma dei prodotti fra la forza (*forza di tensione*) interagente tra due singole particelle e la loro distanza reciproca.

La forma matematica del principio diviene:

$$\frac{1}{2} \sum_n mv^2(t_2) - \frac{1}{2} \sum_n mv^2(t_1) = \int \sum_n (Xdx + Ydy + Zdz) \quad (1)$$

dove la forza di tensione ha componenti (X, Y, Z) e $v(t_1)$ e $v(t_2)$ sono le velocità agli istanti t_1 e t_2 .

Con la legge (1) abbiamo uno strumento per affrontare la riduzione meccanica di ogni fenomeno naturale. Nello scritto del 1847 Helmholtz applica il principio della conservazione della forza non solo ai campi già noti, quali la gravitazione universale, la trasmissione di movimenti per mezzo di corpi incompressibili, i movimenti di corpi solidi e liquidi perfettamente elastici, ma anche a quelli che si stanno studiando per la prima volta in quel periodo (fenomeni termici, elettrici e magnetici).

Il principio dell'assenza del perpetuum mobile conduce dunque alla legge (1) ma ha una valenza del tutto generale. Esso si trova inoltre alla base della ricerca di ogni grande naturalista del passato. Ad esempio Stevin lo considera un'esperienza *istintiva*, il cui contrario è assurdo. Ne ricava la certezza che la catena posta su un corpo solido di forma triangolare non si muove e arriva per questa via a scoprire le leggi del piano inclinato. Galileo concepisce lo stesso principio nella forma della legge secondo cui un corpo, in virtù della velocità acquisita

nella caduta, si innalza alla stessa altezza; se ne serve nella trattazione del moto del pendolo e anche nell'analisi della legge di inerzia. Anche Huygens e i fratelli Bernoulli utilizzano il medesimo principio nei lavori sulla conservazione della forza viva. Sebbene abbia avuto una grande influenza nell'evoluzione della fisica rimane incerto il suo significato fattuale. Mach osserva che tale principio asserisce un qualcosa che tutti hanno sotto gli occhi: che i corpi di per sé non vanno verso l'alto. Essi non compiono questo movimento in quanto sono vincolati alla terra dall'attrazione gravitazionale. In altre parole, una massa non si muove spontaneamente verso l'alto in quanto violerebbe la dipendenza che lo lega agli altri corpi. Mach esprime la conclusione con le seguenti parole: *“il principio dell'impossibilità del perpetuum mobile è il principio della relazione universale della natura”*; *“esso dipende dalla conoscenza della universale dipendenza naturale”*. Oppure, il principio esprime:

il risultato dell'esperienza: gli elementi sensibili del mondo $\alpha \beta \gamma \dots$ si presentano come dipendenti gli uni gli altri. L'esperienza insegna che gli elementi sensibili $\alpha \beta \gamma \dots$ in cui il mondo può essere scomposto sono soggetti a variazioni e insegna anche che alcuni di questi elementi sono connessi ad altri, di modo che si presentano insieme e scompaiono insieme, o il presentarsi degli elementi di un tipo è legato allo scomparire degli elementi di un altro.

La conoscenza della dipendenza reciproca fra fenomeni è dunque il punto di partenza di ogni sapere scientifico e toccherà ai diversi domini della scienza definire e misurare le molteplici relazioni. Se per indi-

care questa connessione di fatti, preferiamo servirci del termine “causalità”, possiamo allora identificare il principio dell'impossibilità del perpetuum mobile con il principio di causalità.

Alla base del concetto di causa vi è la rappresentazione di un fatto particolare: la modificazione prodotta dalla nostra volontà nell'ambiente in cui viviamo. La connessione fra volontà e moto ha dato il primo tipo di relazione di causa ed effetto, ma essa rimane qualitativa e fortemente indeterminata. Solo con la nascita della scienza vi è la necessità di scoprire connessioni precise. Il ricercatore procede circoscrivendo una serie di relazioni dalla totalità delle connessioni che la sensibilità gli fornisce; considera poi la relazione che ha messo in evidenza come il fatto nella sua totalità e ha la tendenza ad attribuire al fatto determinante un carattere di sostanzialità. Mach descrive questa metodologia nel modo seguente

Quando parliamo di causa e di effetto mettiamo arbitrariamente in evidenza quelle circostanze, sul cui rapporto, nella rappresentazione di una cosa, poniamo attenzione in vista di un risultato per noi importante

Vi è dunque una “modellizzazione” dell'esperienza alla base del concetto di causalità, una modellizzazione che non tiene conto di tutti i dati fornitici dalla sensibilità, ma che ne enfatizza solo alcuni. L'attività dello scienziato, però, non si limita alla creazione di modelli descrittivi dell'esperienza, come ha insegnato proprio la posizione filosofica di Helmholtz, ma ha la tendenza a generalizzare i principi ed i risultati raggiunti (un esempio è dato dall'estensione del principio della conservazione della forza viva a quello della conservazione della forza) in modo tale

da creare nuovi modelli e nuove esperienze. Come si pone Mach di fronte a questa abitudine? Egli ritiene che l'attività teorica sia una parte importante del lavoro scientifico, ma sottolinea che proprio lo scienziato più scrupoloso non deve scambiare questa modellizzazione con ciò che viene osservato. Il suo obiettivo è giungere ad una descrizione *completa* dei fenomeni naturali superando i modelli ipotetici e provvisori. Se dunque l'esperienza è prodotta da modelli teorici, come nel caso di Helmholtz, essa deve essere integrata, in modo tale che tutto il fenomeno sia fornito, senza tralasciarne aspetti importanti. Nella Meccanica Mach ricorda che l'esperienza non può essere "costruita" ma bisogna aspettare che si presenti lei stessa. L'obiettivo finale rimane dunque quello espresso dal principio universale: *la descrizione della dipendenza fra gli elementi sensibili in cui è scomposta l'esperienza.*

3. La rappresentazione del moto in Mach e l'analisi di alcuni passi equivoci.

Il punto più alto dell'analisi storico-concettuale machiana è raggiunto in alcune pagine della Meccanica, raggruppate nel paragrafo "*Le idee di Newton su tempo, spazio e movimento*". In esse Mach mostra le debolezze concettuali e le numerose incongruenze logiche di fondamenti fisici quali lo spazio ed il tempo assoluti.

Accanto a questa funzione di analisi e chiarimento, i medesimi passi hanno rappresentato un forte impulso al rinnovamento della fisica, come testimoniano alcune idee cardine dell'opera einsteiniana che affondano le loro radici in queste pagine (cfr. Introduzione). Proprio

l'effetto propositivo porta a pensare Mach come il "precursore" di intuizioni che avranno notevole successo in ambito fisico; si pensi ad esempio all'ipotesi di un legame causale fra le proprietà inerziali di un corpo e la presenza delle altre masse dell'universo (il *Principio di Mach*).

Sulla base della filosofia machiana analizzeremo i passi indicati e arriveremo ad alcune conclusioni che in parte sconfessano questa opinione.

Ogni critica ai fondamenti della meccanica ha come suo punto di partenza il principio della universale dipendenza dei fenomeni.

Prendiamo in esame il concetto di *tempo*: esso è una nozione istintiva che nasce dallo stretto rapporto esistente fra il contenuto della nostra memoria e la percezione sensibile. Quando osserviamo, ad esempio, le oscillazioni del pendolo, le rapportiamo alla nostra coscienza e abbiamo l'impressione che descrivano un qualcosa che fluisce indipendentemente da noi. Ecco allora che nasce l'opinione dell'inutilità degli oggetti esterni e la conseguente *assolutezza* del concetto che ne deriva. In realtà quando affermiamo che un oggetto A muta nel tempo, stiamo confrontando gli stati di A con quelli di un altro oggetto B i cui stati sono presi come unità di misura. Se riprendiamo l'esempio del pendolo, notiamo che le sue oscillazioni non sono un moto a se stante su uno sfondo inerte costituito dagli altri oggetti, ma rappresentano un movimento che è confrontato con la posizione della terra nella sua rivoluzione diurna. In modo del tutto analogo, il rapportare la nozione di tempo al flusso della coscienza non ci deve far dimenticare che noi "*con i nostri pensieri siamo una parte della natura*". Il tempo assoluto inoltre è rappresentato da un moto uniforme, ma questo

non è concepibile se non lo confrontiamo con un altro movimento. Chiamiamo infatti uniforme quel moto nel quale incrementi uguali di spazio corrispondono ad incrementi uguali di spazio in un moto preso come campione. A ben vedere ci troviamo in una situazione simile a quella della termometria: come nello studio dei fenomeni termici si sceglie un indice volumetrico che varia parallelamente alla nostra sensazione di calore e che non sia soggetto alle perturbazioni incontrollabili della nostra sensazione, in modo equivalente useremo per misurare il tempo un moto arbitrario di andamento parallelo alla nostra sensazione di tempo (ad esempio il moto di rotazione terrestre). Questa definizione operativa elimina ogni oscurità metafisica e riallaccia la nozione ad un confronto fra movimenti: il tempo diviene dunque la *misura delle posizioni relative* fra corpi in moto.

Se il tempo rappresenta l'espressione più intima della dipendenza reciproca dei fenomeni naturali - in quanto interviene anche la nostra coscienza - qual è la forma in cui si manifesta più apertamente? La risposta è da ricercarsi nei principi della dinamica ed in particolare nel terzo.

Consideriamo un semplice esempio: prendiamo in esame una tavola L su cui è poggiato un peso P. Il terzo principio della dinamica garantisce che il corpo non cade, in quanto P esercita una pressione sulla tavola a cui essa reagisce con una forza contraria. I due corpi L e P sono in dipendenza reciproca in quanto si scambiano forze-pressione per mantenere l'equilibrio. Ma come si manifesta questa interazione? Sappiamo che la pressione esercitata da P è data dal prodotto della sua massa per l'accelerazione di gravità g . Se facciamo cadere la tavola con una accelerazione pari a g osserva-

mo che non vi è alcuna pressione su L; se invece imponiamo alla tavola un'accelerazione a , diversa da g , otteniamo che la pressione di P su L è direttamente proporzionale a $(g + a)$. Concludiamo dunque che la pressione di P su L è determinata dalla loro accelerazione relativa o, in altre parole, che *la loro interazione reciproca si manifesta con uno scambio di accelerazioni*.

In modo analogo anche il concetto di massa viene modificato. Consideriamo due corpi A e B che sono in mutua dipendenza; ne consegue che essi si comunicano le accelerazioni $-a$ e $+a'$. Diciamo allora che B ha $-a/a'$ volte la massa di A. Se scegliamo poi il corpo A come unità di misura, attribuiremo la massa m a quel corpo che imprime ad A una accelerazione pari a m volte l'accelerazione che esso riceve da A.

Che le masse dell'universo si scambino accelerazioni è dunque un dato di fatto; la fisica ha il compito di descrivere questi rapporti senza alterare o oltrepassare i dati fornitici dalla sensibilità. È importante far notare che questa ipotesi accomuna fenomeni diversi: vi è infatti il caso dell'interazione gravitazionale in cui corpi distanti si comunicano accelerazioni di gravità, ma vi sono anche i casi dei moti rotatori in cui sono presenti accelerazioni centrifughe fra il corpo in rotazione e l'insieme di masse rispetto a cui si valuta il moto. In questo ultimo caso affermare che le masse si scambiano accelerazioni può essere "fuorviante" e portare a descrivere il dato sperimentale in modo del tutto nuovo.

Nelle pagine seguenti cercheremo di mostrare come si debba compiere questa descrizione e nel medesimo tempo indicheremo la corretta interpretazione di alcuni passi equivoci che portano a pen-

sare a Mach come il precursore di idee innovative.

Esaminiamo in primo luogo il *Principio di Inerzia*.

La meccanica newtoniana considera la presenza di una accelerazione come la manifestazione di un allontanamento da uno stato privilegiato (l'inerzia) e spiega questo allontanamento con l'introduzione del concetto di forza. Il moto inerziale è accompagnato dalla scelta di un preciso sistema di riferimento - quello inerziale - che rappresenta in forma matematica i concetti di *spazio e tempo assoluti*.

In formule un moto inerziale è descritto dall'equazione

$$(2) \quad \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{d^2z}{dt^2} = 0$$

dove (x, y, z) sono le coordinate assolute.

Invece di agganciare il moto ad un sistema inerziale, quindi ad uno spazio assoluto, conviene rapportarlo agli stessi corpi dell'universo che, d'altra parte, rappresentano l'unica maniera di determinare in modo affidabile un sistema di riferimento. L'esperienza ci insegna che un corpo in moto rettilineo uniforme mantiene costanti la velocità e la direzione in rapporto alla sfera delle stelle fisse. Sostituiamo dunque le coordinate (x, y, z) della vecchia impostazione newtoniana riferendo il comportamento del corpo alle altre masse dell'universo. Il Principio di Inerzia assume ora la forma seguente: una massa n mantiene costanti il modulo e la direzione della sua velocità rispetto agli altri corpi dell'universo $m_1, m_2, m_3 \dots$ posti alle distanze $r_1, r_2, r_3 \dots$ se vale la relazione

$$(3) \quad \frac{d^2}{dt^2} \left[\frac{\sum_i m_i r_i}{\sum_i m_i} \right] = 0$$

La (3) si riduce alla (2) se consideriamo corpi sufficientemente lontani e se ne prendiamo in esame un numero sufficiente. Compriamo alcune osservazioni.

In primo luogo la (3) è un'equazione scalare e dunque non determina in modo completo il moto del corpo K; la velocità, essendo un vettore tridimensionale, ha necessità di tre equazioni scalari per individuare in modo univoco il suo comportamento.

Inoltre la (3) ha un chiaro effetto dinamico per la presenza delle masse m_i ; se indichiamo con μ la massa del corpo K, l'equazione (3) sarà espressa in modo più corretto da

$$(4) \quad \mu \left[\frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\sum_i m_i r_i}{\sum_i m_i} \right) \right] = 0$$

un'equazione che discende da una lagrangiana in cui sono presenti termini di interazione (μm_i). Da questo punto di vista la (3) stabilisce un'interazione fra le masse dell'universo e il corpo K, suggerendo un legame fra il comportamento inerziale di K e la presenza delle masse m_i [15]. Cerchiamo di chiarire il punto.

Il passaggio dalla (3) alla (4) è corretto, ma non rappresenta il pensiero di Mach, bensì una sua interpretazione. Si può pensare che Mach, scrivendo la (3), avesse in mente la (4) o una sua formulazione lagrangiana e non sia giunto ad un risultato più preciso per mancanza di capacità teoriche, ma negli scritti machiani non è mai presente la (4) e tanto meno un'argomentazione che la supporti. Certo a sostegno di questa interpretazione del Principio di Inerzia si possono riportare frasi e considerazioni di Mach, ma un ragionamento compiuto come quello di associare una lagrangiana di interazione alla (4) non è mai presente.

I passi più equivoci che possono essere indicati a sostegno dell'interpretazione "dinamica" della (3) (vi sono termini di interazioni e si suggerisce anche una lagrangiana) si trovano nell'appendice allo scritto del 1872. In essa Mach analizza la legge di inerzia ed evidenzia che il concetto di spazio assoluto, a cui riferiamo il moto di un corpo, è una descrizione abbreviata della presenza delle altre masse ed è di solito associato ad un preciso sistema di riferimento: la sfera delle stelle fisse. Si pone in seguito il quesito di come risulterebbe la legge se le stelle iniziassero a compiere un moto rotatorio. Varrebbe ancora il Principio di Inerzia espresso dalla (2)? Poco dopo egli prosegue:

... quale contributo fornisce ogni massa nella determinazione della direzione e della velocità nella legge di inerzia? Nessuna conclusione può essere tratta con l'esperienza attuale. L'unica cosa che sappiamo è che il contributo delle masse più vicine è molto inferiore a quello fornito da quelle più lontane ... potremmo ad esempio fare l'assunzione che ogni corpo contribuisca in modo proporzionale alla sua massa ed indipendentemente dalla distanza, oppure fornisca un contributo proporzionale alla distanza e così via... (5)

La (5) è forse il passo in cui Mach sembra esprimere in modo più preciso l'idea di una qualche influenza esercitata dalle masse stellari nella determinazione dell'inerzia di un corpo; infatti egli si chiede "quale contributo fornisce ogni massa nella determinazione della direzione e della velocità nella legge di inerzia?". Dobbiamo dunque considerare Mach come un "precursore" delle posizioni einsteiniane? Come bisogna interpretare i

termini quali "contributo" e "determinazione" presenti nel passo riportato? Per fare chiarezza partiamo dalla considerazione che la (5) è presente nell'opera del 1872 ed è quindi il punto di partenza delle analisi machiane sull'inerzia. È possibile confrontare la (5) con il risultato finale espresso in modo compatto dall'equazione (3)? A ben vedere questo confronto si può fare; egli ad esempio nella (5) afferma che per esprimere il contributo di ogni corpo potremmo supporre che esso sia proporzionale alla sua massa e alla sua distanza, ma nella (3) la somma pesata a numeratore esprime per l'appunto questa idea. Inoltre data la (3) si deduce che le masse in prossimità del corpo di prova forniscono un contributo inferiore a quelle lontane proprio come egli prefigura nello scritto del 1872 quando afferma "L'unica cosa che sappiamo è che il contributo delle masse più vicine è molto inferiore a quello fornito da quelle più lontane." Questo aspetto spiega anche il motivo per cui Mach nella (3) abbia inserito le masse invece di limitarsi a dare una formulazione in cui fossero presenti solo le distanze relative. Se Mach infatti non avesse voluto rendere conto dell'osservazione sperimentale che le masse vicine hanno un'influenza molto minore di quelle lontane nella determinazione del comportamento inerziale, non si spiegherebbero i termini massivi presenti nella (3). L'introduzione delle masse nella formula non è dunque ricondotta alla proposta di un'interazione effettiva con il corpo in esame, ma come un tentativo di descrivere un dato di fatto sperimentale.

Vi è inoltre un'ulteriore considerazione da compiere. Se ammettiamo che il ragionamento corretto sia quello dinamico, non possiamo in ogni caso proseguire su questa strada per un consiglio sem-

pre presente nell'opera machiana che è indicato nella stessa citazione (5). In essa Mach avverte “ *Nessuna conclusione può essere tratta con l'esperienza attuale* ” ; un monito dunque a non oltrepassare i dati fornitici dall'esperienza. A dimostrazione poi del fatto che lo scienziato austriaco si mantenga a questa euristica negativa, possiamo riportare la considerazione che Mach compie a conclusione della discussione sull'inerzia nella Meccanica. Egli riprende in esame la validità della legge di inerzia nel caso in cui le stelle iniziassero a muoversi, ma si limita ad affermare

È impossibile dire se la nuova espressione [la nuova definizione del Principio di Inerzia] potrebbe ancora rappresentare la situazione delle cose se le stelle iniziassero a muoversi tra di loro. Un'esperienza così generale non può essere costruita dal caso particolare che noi conosciamo. Dobbiamo, al contrario, aspettare fino a che questa esperienza non si presenti lei stessa. (6)

Superata dunque l'interpretazione ‘dinamica’ del Principio di Inerzia, rimane da specificare come possa avvenire la descrizione dell'interazione reciproca fra le masse dell'universo. Su questo punto Mach non fornisce un ragionamento preciso, ma solo alcuni spunti che rappresentano – crediamo – la linea da seguire per una corretta riformulazione dei fondamenti della Meccanica.

Egli ad esempio prende a prestito alcuni risultati della termodinamica o dell'elettromagnetismo e li utilizza come analogie per chiarire il fatto che le accelerazioni abbiano una parte importante nelle relazioni fra le masse. Mach ricorda che nei fenomeni naturali le *differenze*

fra certe grandezze svolgono un ruolo fondamentale: così ad esempio le differenze di Potenziale danno origine a processi che tentano di portare il sistema ad un livello energetico più basso, oppure rappresentano l'allontanamento dello stato del sistema dalla media degli stati contigui ⁽²⁾. Proviamo a riportare questa considerazione anche al caso dell'accelerazione. Se consideriamo corpi molto distanti fra loro che si muovono con direzione e velocità costanti rispetto a corpi fissi lontani, notiamo che essi variano le loro distanze in funzione del tempo. Possiamo anche dire che corpi molto distanti mutano le loro distanze in modo tale che esse mantengano la loro proporzionalità. Se ad esempio consideriamo il caso di due distanze r e ρ avremo $dr/d\rho = cost$. Supponiamo ora le masse in interazione, in modo tale che si presenti almeno un'accelerazione $d^2r/dt^2 = a$ e teniamo presente che il tempo a denominatore è esprimibile come la *misura* delle distanze fra i corpi celesti (o degli angoli di rotazione). L'accelerazione di conseguenza assume la forma $d^2r/d\rho^2 = a$ e rappresenta un allontanamento dallo stato privilegiato individuato da $dr/d\rho = cost$.

Il punto cruciale in questo ragionamento è quello di associare la presenza di una accelerazione al confronto fra le distanze dei corpi celesti, cosa possibile solo in quanto si è considerato il tempo come la misura di posizioni relative. L'accelerazione è dunque pensata come un potenziale e ricondotta alle posizioni relative fra corpi celesti.

Che questa sia la linea da seguire è anche confermato dalle considerazioni

⁽²⁾ Di solito si utilizzano espressioni quali $\frac{d^2U}{dx^2}$, $\frac{d^2U}{dy^2}$, $\frac{d^2U}{dz^2}$ dove U è il potenziale

che Mach compie al termine dell'analisi del moto assoluto. Egli è riuscito a ripulire il sistema di riferimento da ogni assurdità metafisica, ma esso rimane un'astrazione che non ha un diretto riscontro nell'esperienza: lo ritiene un riferimento *esterno*. Lo scienziato prova il desiderio di *procedere avanti e di conoscere le relazioni immediate, cioè i rapporti fra le masse dell'universo*; suo programma è dunque ridurre le velocità e le accelerazioni alle posizioni relative fra i corpi celesti (*le relazioni immediate*) o in termini machiani "*Suo programma è l'istituzione di un principio dal quale derivino insieme i moti accelerati e i moti inerziali*".

Mach ci indica dunque la strada che lo scienziato dovrà seguire per una formulazione completa della Meccanica: esprimere l'interazione fra i corpi come un rapporto fra le loro posizioni relative.

Rimangono da affrontare le argomentazioni machiane sull'esperimento del secchio, ma ora abbiamo sviluppato gli strumenti necessari per interpretare in modo corretto le considerazioni di Mach. Nell'Introduzione avevamo brevemente mostrato come nella meccanica newtoniana le forze centrifughe rappresentino una proprietà dello stato di moto del corpo e dipendano dalla sua inerzia. Ora invece, tenendo presente che le masse sono in interazione reciproca secondo il Principio Universale, l'accelerazione centrifuga dell'acqua non corrisponde ad un *moto vero* del liquido – come riteneva Newton – ma rappresenta solamente il rapporto esistente fra la massa dell'acqua e quella dei corpi celesti, la loro *interazione*.

Entriamo in qualche dettaglio. Notiamo in primo luogo che nell'analisi dell'esperienza del secchio sono presenti alcuni passi che sono di difficile interpre-

tazione; vengono infatti utilizzati termini come *interazione, produzione...* che possono avere significati differenti a seconda dello sfondo filosofico utilizzato. Sono proprio questi passi che fanno pensare a Mach come il precursore delle considerazioni sull'inerzia di cui si è detto, ma essi assumono un corretto significato solo alla luce della filosofia machiana.

Quando ad esempio Mach afferma in modo perentorio "*Si cerchi di tener fermo il vaso newtoniano, di far ruotare il cielo delle stelle fisse e di verificare l'assenza delle forze centrifughe*" sembra quasi che voglia proporre – se un tale caso si verificasse – che la rotazione relativa delle masse stellari induca la presenza di forze centrifughe. In realtà egli vuole sottolineare che l'esperienza del vaso può essere descritta in due modi diametralmente opposti; da una parte si può infatti considerare il vaso in rotazione e le stelle fisse immobili (come avviene di solito) e dall'altra immaginare invece il vaso fisso e l'insieme delle stelle in rotazione attorno ad esso. Mach non distingue fra le due descrizioni, le ritiene anzi equivalenti in quanto gli unici moti che considera sono quelli relativi. Infatti sottolinea poco sopra che "*il sistema del mondo ci è dato una sola volta [in corsivo], e che la teoria tolemaica e quella copernicana sono soltanto interpretazioni [in corsivo], ed entrambe ugualmente valide*". L'obiettivo rimane dunque la descrizione di ciò che accade attraverso concetti relativi, eliminando le astrusità metafisiche quali lo spazio ed il tempo assoluti. Egli inoltre afferma a sostegno della duplice descrizione che "*I principi fondamentali della meccanica possono essere formulati in modo che anche per i moti rotatori relativi risultino presenti forze centrifughe*".

Se prendiamo in esame le conclusioni sull'esperimento del vaso rotante notiamo la stessa ambiguità (cfr. Introduzione). Riportiamo due brani significativi:

L'esperimento newtoniano del vaso pieno d'acqua sottoposto a moto rotatorio ci insegna solo che la rotazione relativa dell'acqua rispetto alle pareti [in corsivo] del vaso non produce forze centrifughe percettibili, ma che tali forze sono prodotte dal moto rotatorio relativo alla massa della terra e agli altri corpi celesti (7)

e più avanti prosegue

Nessuno può dire quale sarebbe l'esito dell'esperimento, in senso qualitativo e quantitativo, se le pareti del vaso divenissero sempre più massicce, fino ad uno spessore di qualche miglio. (8)

Ad una prima lettura sembrerebbe che le stelle fisse abbiano una qualche influenza sulla presenza delle forze inerziali e che queste ultime siano prodotte dal moto relativo alle altre masse dell'universo (lettura della (7)). L'idea viene confermata dalla considerazione successiva – la (8) – dove, con un'argomentazione retorica di difficile interpretazione, Mach sembra proporre una nuova versione dell'esperimento del secchio in cui le pareti divengano molto più massicce ed in tal modo inducano forze centrifughe all'interno dell'acqua.

Per superare questa interpretazione è necessario rileggere la (7) e la (8) alla luce della filosofia machiana. Dato che in questi passi sembra comparire un legame di tipo causale fra le masse dell'universo e le forze inerziali, bisogna tenere a mente il concetto di causalità proprio del pensiero machiano (riconducibile – come si detto – al principio dell'universale dipendenza

dei fenomeni). Assumendo che tutte le masse dell'universo sono in relazione reciproca e che l'obiettivo dello studio scientifico diviene il descrivere queste relazioni, deduciamo che l'osservazione di forze centrifughe fra l'acqua e le masse dell'universo è l'espressione della loro relazione. Quando Mach afferma che le forze inerziali sono prodotte in riferimento alla sfera delle stelle fisse, non sta ad indicare una qualche influenza, un qualche rapporto causale fra queste ultime e il liquido, quanto piuttosto egli esprime a parole la relazione che interviene fra gli elementi del sistema fisico osservato.

La *rigida legalità fra i fenomeni* – come egli afferma nello scritto del 1872 – è la descrizione economica delle relazioni intercorrenti fra gli elementi della sensibilità. Nel nostro caso tale descrizione si riduce ad esprimere la connessione fra le forze centrifughe nel vaso e l'insieme delle stelle fisse.

Inoltre, se dobbiamo attenerci a ciò che ci è fornito dalla sensibilità, risulta privo di fondamento il chiedersi quale sarebbe il risultato dell'esperimento se le pareti del secchio divenissero più massicce. Egli infatti subito dopo la (8) afferma che “*Davanti a noi sta quell'unico fatto [le forze centrifughe fra l'acqua e le stelle fisse]; il nostro compito è metterlo d'accordo con gli altri fatti che già conosciamo, non con le nostre arbitrarie fantasticherie*”. La (8) è un invito a non superare i limiti dell'esperienza (cosa che avverrebbe se ipotizzassimo una qualche influenza fra le pareti del secchio e le forze inerziali) per non correre il rischio di ideare sia nuove entità metafisiche, quali lo spazio ed il tempo assoluti, sia relazioni fra elementi della sensibilità che non ci sono date e che non hanno alcuna utilità pratica o concettuale.

Compiamo ora alcune osservazioni conclusive. Il *Principio della universale dipendenza dei fenomeni naturali*, che Mach espone nell'opera del 1872, si traduce nella Meccanica nell'assunzione che le masse si scambiano accelerazioni. Come descrivere questo dato sperimentale crea alcune problematiche interpretative. Vi è infatti il rischio di considerare i passi machiani come la proposta di un qualche meccanismo causale per la determinazione dell'inerzia. Alla luce delle posizioni filosofiche di Mach questa interpretazione è scorretta per una duplice ragione:

- 1) egli utilizza alcuni termini che sembrano indicare un legame causale fra le masse dell'universo e il comportamento inerziale (in special modo nell'esperienza del secchio) ma le sue idee sulla causalità conducono solo ad una descrizione di ciò che è osservato. Lo scambio di accelerazioni fra le masse dell'universo è ricondotto ad un rapporto fra le loro posizione relative.
- 2) La ricerca scientifica deve attenersi scrupolosamente all'esperienza e non "produrla" in alcun caso. Il pericolo che lo scienziato corre nell'abbandonare questa euristica negativa è l'utilizzo di concetti astratti che non hanno riscontro nella realtà (vedi lo spazio ed il tempo assoluti). Mach non fornisce mai uno "schema dinamico" che permetta di ricavare le forze inerziali in rapporto alle masse celesti, si limita solo a riportare le connessioni funzionali fra i fenomeni naturali. Le sue argomentazioni sull'esperimento del secchio vanno inquadrare in quest'ottica e rappresentano dunque una descrizione dei fatti osservati.

4. Conclusioni.

Di solito si attribuisce a Mach la considerazione che le masse celesti hanno un'influenza causale nella determinazione dell'inerzia. Questa opinione è facilmente osservabile sia nell'opera dei fratelli Friedländer, sia in quella di Föppl ed è infine ben presente nel lavoro di Einstein. Essa nasce dalla lettura della Meccanica e trae la sua origine in una certa interpretazione del principio dell'universale dipendenza dei fenomeni naturali. Abbiamo osservato che nella studio storico della Meccanica il principio si concretizza nell'assunzione che le masse si scambiano accelerazioni. Esso nasce da una serie di evidenze sperimentali (quali l'interazione gravitazionale, l'esempio proposto del peso sulla tavola, la definizione operativa di massa, l'esperimento del secchio di Newton ...) ed è dunque l'espressione di un dato comune ad un insieme di esperienze. Per ognuna di esse il fisico costruisce un modello concettuale il cui scopo è quello di descrivere nel modo più completo possibile i dati fornitici dalla sensibilità. L'assunto che le masse si scambiano accelerazioni reciproche fa riferimento dunque ad un "grappolo" di modelli che spiegano una serie di esperienze. I legami causali che ogni modello porta con se si riducono a descrivere certe dipendenze fra gli elementi in cui è stata scomposta l'esperienza o – in termini machiani – a rendere conto dell'osservazione che certi elementi della sensibilità sono in dipendenza con altri, si presentano insieme, scompaiono insieme o il presentarsi degli elementi di un tipo è legato allo scomparire degli elementi di un altro. Quando dunque Mach afferma che le masse sono in interazione scambiandosi accelerazioni

non dobbiamo porci la domanda di quale sia la causa dell'interazione, ricercando un qualcosa che oltrepassa i dati fornitici dalla sensibilità, ma nostro compito è descrivere le dipendenze funzionali estratte dall'esperienza. Nel caso di un fenomeno meccanico, ad esempio, Mach ci indica come compiere una descrizione completa riducendo il comportamento del sistema a rapporti fra le posizioni relative delle sue parti. In ogni caso l'esperienza è sempre il punto di partenza della modellizzazione e il loro rapporto non si deve mai invertire.

La nostra attitudine alla teorizzazione ci induce però a ricercare un'origine, una causa nel senso del meccanicismo tradizionale, un *meccanismo causale* che spieghi l'osservazione dello scambio di accelerazioni fra le masse dell'universo. Il Principio della dipendenza universale si svincola in questo modo dalle esperienze su cui si fondava e diviene uno stimolo per l'attività teorica. Vengono dunque creati modelli di sistemi fisici non ancora osservati e conseguenze sperimentali che dovranno essere controllate: la modellizzazione in questo modo precede l'esperienza, anzi la "produce". È su questa linea che si pongono i contributi dei fratelli Friedländer, di Föppl e di Einstein: interpretando in modo *più forte* le conclusioni dell'esperimento del secchio essi hanno sviluppato modelli concettuali ed esperimenti per ricercare *l'origine* delle forze inerziali. Quale sia la posizione di Mach al riguardo ci è fornita dall'autore stesso (almeno per i Friedländer e Föppl, ma l'osservazione può essere estesa anche ad Einstein): a conclusione dell'analisi sul moto assoluto egli afferma che non bisogna sottovalutare "*idee proposte in via ipotetica, come quella dei Friedländer e di Föppl, sebbene da esse non si sia ottenu-*

to ancora alcun risultato". Sono comunque idee ipotetiche che hanno bisogno di un maggiore controllo. Anzi egli sostiene che bisogna attenersi a ciò che è più immediatamente osservabile, ma *a volte lo scienziato prova il bisogno di gettare lo sguardo nel profondo dell'inesplorato.*

Bibliografia

- [1] MACH, ERNST, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Historisch-kritisch dargestellt* (Leipzig, 1883)
- [2] EINSTEIN, ALBERT, *Ann. Physik*, **17** (1905) 893.
- [3] HOLTON, GERARD J, *Mach, Einstein and the search for reality*, **Boston Studies in the Philosophy of Science**, **VI** (...) 165.
- [4] EINSTEIN, ALBERT, *Vierteljahrsschrift für gerichtliche Medizin und öffentliches Sanitätswesen*, **44** (1912) 37-40.
- [5] HOEFER, CARL, *Einstein's formulations of Mach's Principle*, **Einstein Studies**, **VI** (1995) 67.
- [6] FRIEDLÄENDER, BENEDICT E IMMANUEL, *Absolute oder Relative Bewegung?* (Berlino, 1896)
- [7] FÖPPL, AUGUST, *Über einen Kreisversuch zur Messung der Umdrehungsgeschwindigkeit der Erde*, **Akademie der Wissenschaften, München, Mathematisch-Wissenschaftliche Klasse, Sitzungsprotokolle**, **6**, **Febbraio** (1904) 5-28.
- [8] FÖPPL, AUGUST, *Über absolute und relative Bewegung*, **Akademie der Wissenschaften, München, Mathematisch-Wissenschaftliche Klasse, Sitzungsprotokolle**, **5**, **Novembre** (1904) 5-28.
- [9] NORTON, JOHN D, *Mach's Principle before Einstein*, **Einstein Studies**, **VI** (1995) 9.
- [10] HELMHOLTZ, HERMANN, *Über die Erhaltung der Kraft* (Berlino, 1847)
- [11] MACH, ERNST, *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit* (Praga, 1872)
- [12] MACH, ERNST, *Erkenntnis und Irrtum. Skizzen zur Psychologie der Forschung* (Lipsia, 1906)
- [13] MACH, ERNST, *Die Prinzipien der Wärmelehre historisch-kritisch dargestellt* (Lipsia, 1896)
- [14] MACH, ERNST, *Die Analyse der Empfindungen und das Verhältnis des Physischen* (Lipsia, 1886)
- [15] BARBOUR, JULIAN B, *General Relativity as a Perfectly Machian theory*, **Einstein Studies**, **VI** (1995) 214.