

# Mach, the principles of dynamics and Newton's bucket

Pietro Cerreta - Associazione Scienza Viva, Centro della Scienza, Calitri -  
pietro.cerreta@tin.it

*Abstract:* Some years ago we built *The Newton's bucket*, an interactive exhibit that shows the curvature of water in a rotating cylinder. In his *Principia*, Newton referred to it as a proof of the existence of the absolute motion. In the book *The science of mechanics; a critical and historical account of its development*, Ernst Mach demonstrated how weak Newton's conclusion was, affirming that "if we take our stand on the basis of facts, we shall find we have knowledge only of relative spaces and motions". The "facts", pertaining to the motions relative to the rotating bucket, can be well explained using our exhibit: we will do this also by means of some videos. At the same time, we will also take into account the conceptual aspects that made Mach's critical analysis of the statements in the *Principia* and his attempt to reformulate them so famous.

*Keywords:* *Principia*, Mechanics, historical-critical method, absolute space.

## 1. In ricordo di Ernst Mach, fisico e storico della Fisica

Leggendo le cronache culturali italiane di questo 2016, mi sono stupito di non aver trovato, almeno finora, alcun avvenimento che ricordasse Ernst Mach a cent'anni dalla morte. Eppure Mach è stato un fisico che ha occupato la scena scientifica di fine Ottocento e d'inizio Novecento in un modo del tutto singolare, sia per quel che ha prodotto da sé, sia per l'influenza che ha esercitato sugli scienziati contemporanei. Si pensi a Einstein il quale, grazie a quel che lui stesso definì come *Principio di Mach*, lo riteneva quasi un precursore della relatività. E si pensi alla reazione di Boltzmann di fronte all'affermazione sprezzante con la quale Mach, empiriocriticista, asseriva che non esistevano gli atomi, perché a quel tempo non erano osservabili.

Epistemologo e fisiologo oltre che fisico, la sua personalità si distinse in diversi campi del panorama scientifico del tempo in cui visse. Non è un caso che, oltre un decennio dopo la morte, nel 1929, sia sorto a Vienna un Circolo intitolato al suo nome. Tuttavia, quel che interessa di più, qui, è che egli sia stato principalmente uno storico della Fisica e che le sue idee storiografiche non cessino di far discutere.

Dovendo essere breve, mi limiterò a prendere in considerazione solo il suo libro sulla Meccanica: *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*. Esso, tradotto in diverse lingue e uscito in ben nove edizioni tra il 1883 e 1933, risultò un'opera di grande successo. Preferisco la traduzione del titolo con *I principii della meccanica esposti criticamente e storicamente nel loro sviluppo* della prima edizione

italiana del 1909, piuttosto che con *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico* (Mach 1977) con cui la Boringhieri in seguito, nel 1968, lo ripresentò al pubblico. Trovo che le parole “criticamente” e “storicamente” del primo titolo chiariscono bene ciò che vuol dire l’autore quando, nella prefazione, egli dichiara l’intento di voler mettere «a nudo» (Mach 1977, p. 27) il nucleo dei concetti della Meccanica, che col tempo si è «avviluppato» entro un particolare apparato concettuale, e di volerlo fare mediante l’analisi storica. Questo intento invece è nascosto nell’altro titolo, volutamente sintetico, il quale sembra anzi suggerire che sia stata la Meccanica stessa a essersi sviluppata, di per sé, in modo storico-critico, cosa che non avrebbe senso.

In realtà si definisce storico-critico un metodo di analisi e non un tipo di evoluzione. Il metodo storico-critico aveva mostrato la sua efficacia in campo umanistico, in particolare nell’esegesi biblica. Adottandolo nello studio della Meccanica, Mach introduce nell’ambito scientifico qualcosa di nuovo. Non esiste, tuttavia, nessuna evidenza documentale che ciò sia avvenuto in seguito a precise influenze metodologiche extra-scientifiche.

È bene chiarire subito che lo scopo ultimo di Mach non era quello di esaltare la Meccanica come eccezionale prodotto del pensiero umano, ma di mostrarne la fragile natura storica con l’intento di perfezionarla. Vista in tal modo, egli negava che i concetti meccanici fossero in grado di fungere da base a tutte le altre branche della Fisica, come molti sostenevano, e si opponeva al sopravvento della filosofia meccanicista, che traeva forza da quest’opinione. E mentre ad esempio Hertz era piuttosto morbido nell’osservare che

tutti i fisici concordano che il problema della fisica consiste nel ricondurre i fenomeni della natura alla meccanica. Ma, su quali siano tali semplici leggi, non sussiste già più lo stesso accordo (Hertz 1894),

il giudizio di Mach era molto più deciso. Egli, infatti, obiettava:

La concezione secondo cui la meccanica è il fondamento di tutte le altre parti della fisica, e perciò tutti i fenomeni fisici debbono essere spiegati *meccanicamente*, è per noi un pregiudizio. La conoscenza più antica in ordine di tempo non deve necessariamente *restare* il fondamento dell’intelligibilità di ciò che è scoperto più tardi. Concezioni del tutto nuove si affermano man mano che si va allargando la sfera dei fenomeni conosciuti e catalogati. Almeno per ora non ci è possibile stabilire se i fenomeni meccanici costituiscano la natura più profonda delle cose o ne siano invece l’aspetto più superficiale. Forse i fenomeni sono *tutti di uguale profondità*. Del resto nella stessa meccanica nessuno considera il principio più antico, quello della leva, come il fondamento di tutte le altre leggi. La concezione meccanicistica della natura ci appare come un’ipotesi storicamente comprensibile, giustificabile, forse anche temporaneamente utile, ma del tutto artificiosa (Mach 1977, p. 484).

Per parlare di Mach e del suo libro ho pensato di seguire un percorso – come si dice oggi – *hands-on*, il quale d’altra parte mette in atto la sua idea principale: in fisica contano i fenomeni, i fatti, più che le costruzioni teoriche ancora impregnate di metafisica.

E il fenomeno dal quale voglio iniziare è quello del secchio di acqua rotante, che Newton pose al centro della dimostrazione dell'esistenza del moto assoluto. Su questa prova si appunta, infatti, la critica di Mach diventata più famosa.

## 2. I Principia e il secchio di Newton

Nei *Principia* (Newton 1977, p. 109), Newton propose al lettore il seguente esperimento. Sospeso un secchio al soffitto con una corda, lo si faccia girare intorno a essa fino a quando questa, indurita dalla torsione, lo permette. Poi si versi dell'acqua nel recipiente e la si faccia riposare insieme a esso. Quando il pelo del liquido finalmente assume la forma piana, s'imprima al secchio un movimento circolare all'incontrario del precedente. La corda comincia a srotolarsi e l'acqua nel secchio, che prima era ferma, comincia a ruotare, assumendo via via una forma concava a causa della forza centrifuga. Tale forma è la prova, secondo lo scienziato inglese, che l'acqua rotante ora si muove di moto assoluto. Appena all'inizio, invece, quando essa era ancora piana, il moto dell'acqua, visto dal secchio, era solo relativo. Si noti che Newton non esibisce il sistema di riferimento assoluto ma lo dà per sottinteso, limitandosi a dire che il moto finale, in cui si manifesta la concavità, deve essere assoluto. È interessante la spiegazione di Mamiani:

Poiché il moto circolare gradualmente acquisito è del tutto opposto alla situazione iniziale, quando il moto relativo era massimo, Newton conclude che il moto circolare deve essere assoluto, perché aumenta in proporzione alla diminuzione del moto relativo rispetto alla secchia (Mamiani 1965, p. 60).

La prova del moto assoluto fornita da Newton, dunque, è di tipo logico, benché si appigli verbalmente al fenomeno descritto. Essa diventa convincente solo se il lettore è disponibile ad accettare che lo spazio o è assoluto o è relativo, come da lui ipotizzato poco prima nello stesso Scolio, o una via di mezzo. Ed è questa premessa che Mach rifiuta, non la dinamica del moto:

Rispondo che le cose stanno così solo se si accetta fin dall'inizio l'idea di uno spazio assoluto. Se si resta sul terreno dei fatti, egli conclude, non si conosce altro che spazi e moti relativi (Mach 1977, pp. 248-249).

Per Mach, dai fatti è lecito inferire soltanto che, alla fine, l'acqua ruota rispetto alla stanza, alla terra e, se si vuole, alle stelle fisse, ma non rispetto a uno spazio assoluto, che non si sa dove sia. Leggiamo le sue stesse parole al riguardo:

L'esperimento newtoniano del vaso pieno d'acqua sottoposto a moto rotatorio ci insegna solo che la rotazione relativa dell'acqua rispetto alle pareti 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. Non ci insegna nulla di più (Mach 1977, pp. 248-249).

Mantenuto fermo il secchio, suggerisce poi Mach, s'immagini di far ruotare relativa-

mente a esso tutte le masse del restante universo: chi ci dice che la curvatura dell'acqua non si manifesterebbe anche in tal caso?<sup>1</sup> Solo perché questa prova è impossibile,<sup>2</sup> dobbiamo forse convincerci che esiste uno spazio assoluto che non vediamo? Aggiungiamo a questo punto che le ragioni di Newton per affermare l'esistenza dello spazio assoluto e infinito non erano fisiche ma teologiche. Lo spazio assoluto presentato nei *Principia*, infatti, è coerente con l'idea dell'esistenza di un grande contenitore spaziale di cui egli parlerà nell'*Opticks*, ma che certamente aveva già in mente a quel tempo: il *Sensorium Dei* (Newton 1704, XXVIII questione), cioè il luogo delle sensazioni in cui Dio è presente alle azioni delle cose del mondo.

Ora, mettendo da parte le parole, passiamo ai fatti proprio come dice Mach, perché in genere l'esperimento del secchio è soltanto immaginato dai lettori dei testi citati e le tesi contrastanti di Newton e di Mach non hanno modo di essere comprese nella dimensione concreta.

Undici anni fa, nel 2005, nel corso delle celebrazioni dell'anno mondiale della Fisica, l'Associazione Scienza Viva, sollecitata da Fabio Bevilacqua, volle realizzare un exhibit ispirato al secchio di Newton. A questa scelta giunse, in parte, per ricordare un caso storico in cui si discutono concetti di relatività, peraltro legato al lavoro di Einstein nel centenario del suo articolo sulla relatività ristretta, e in parte per verificare sul campo l'impatto sui visitatori di fenomeni interpretati diversamente da Newton e da Mach. L'exhibit è ben conservato ed è ancora esposto nel nostro Centro della Scienza, a disposizione degli studenti in visita alla Mostra "Le Ruote Quadrate". Esso è costituito da un grosso cilindro di plexiglas trasparente fissato su una base metallica, la quale è stata tornita *ad hoc* da un artigiano locale. I due oggetti possono ruotare insieme, intorno al loro asse, mediante un ingranaggio a questo collegato, fatto girare da una manovella laterale. Alcuni litri d'acqua occupano stabilmente circa un quarto dell'intero volume del cilindro.

All'inizio, quando la superficie del liquido è in piano, se il visitatore ruota la manovella produce lo stesso fenomeno descritto da Newton. L'acqua comincia a sollevarsi sulle pareti di plexiglas a causa della forza centrifuga che agisce sul liquido a esso aderente. Poi l'ascesa diventa più netta o, come dice Newton, cresce il suo allontanamento dall'asse, fino ad assumere la forma concava, attaccata al cilindro. Visto attraverso il contenitore trasparente, il fenomeno è incantevole, sia quando la cavità pian piano va acquistando il tipico profilo uniforme, continuo e simmetrico come quello di un calice di cristallo, sia quando increspature involontarie vi si frammischiano in modo caotico, indotte da una rotazione troppo rapida. La figura che si ottiene, insomma, ha un'estetica rara, la cui eleganza plastica è tale da farla apparire una sorta di "scultura d'acqua" (Fig. 1).

<sup>1</sup> «Si cerchi di tenere fermo il vaso newtoniano, di far ruotare il cielo delle stelle e di verificare l'assenza delle forze centrifughe» (Mach 1977, p. 246).

<sup>2</sup> Impossibile perché «l'universo non ci è dato due volte» dice Mach (1977, p. 249). In altri termini ci è dato solo così com'è, ma non pure come sarebbe utile poterlo osservare in questo caso, dopo averlo messo in rotazione rispetto al secchio fermo. Questa idea di Mach, nonostante non sia verificabile, diventa il principio che Einstein definisce *Principio di Mach*.



**Fig. 1.** La concavità acquisita dall'acqua nel cilindro rotante del nostro "Secchio di Newton"

Tutto ciò può essere visto nel video pubblicato sul nostro sito [Il Secchio di Newton].

Comunque, essendo ineliminabili le vibrazioni causate dalla manovella rotante sul pelo libero dell'acqua, l'osservatore potrebbe essere spinto a interpretarle come segno che l'acqua nel cilindro, all'inizio, non stia veramente in quiete come nel caso del secchio descritto da Newton.

C'è da dire che l'acqua, pur vibrando leggermente, in realtà non ruota, anzi ci mette del tempo prima di cominciare a ruotare col cilindro. Insomma, anche nel nostro exhibit il moto di partenza dell'acqua rispetto al cilindro è del tutto relativo. Per convincersene, è consigliabile guardare anche il seguente video [Il Secchio di Newton col guscio di noce].

Esso mostra dapprima che un guscio di noce galleggia stabile al centro del cilindro, sull'acqua ferma. Cominciando a ruotare la manovella, detto guscio oscilla un po' ma non partecipa immediatamente al moto circolare del liquido. Anzi, è considerevole il ritardo con cui quest'ultimo lo raggiunge nella parte mediana su cui si trova, coinvolgendolo definitivamente nella vorticoso rotazione generale. Ed è proprio questo video a illustrare più adeguatamente la spiegazione data da Newton che abbiamo prima considerato: c'è un trasferimento di moto da quello iniziale, che è chiaramente relativo, con la superficie dell'acqua piana o leggermente vibrante, a quello finale, nel quale l'acqua è in quiete rispetto al cilindro, ma concava. Un moto siffatto, ripeto, è assoluto secondo Newton, a prescindere da quale riferimento si usi per considerarlo, poiché non può che essere tale, visto che non è più relativo al cilindro.

D'altra parte, se tutto a un tratto il cilindro è bloccato con le mani del visitatore, si osserva la progressiva cessazione del trasferimento: l'acqua periferica rallenta rapidamente e tende a diventare piana, mentre quella al centro, pur continuando ancora per un po' a mostrare il suo profilo incurvato, ne subisce man mano gli effetti (Fig. 2). Questa variante dell'esperimento, da noi realizzata, fa capire che il ragionamento di Newton basato sul "trasferimento di moto" da relativo ad assoluto o viceversa non è arbitrario, il suo difetto deriva solo dalla natura metafisica della sua ipotesi iniziale.

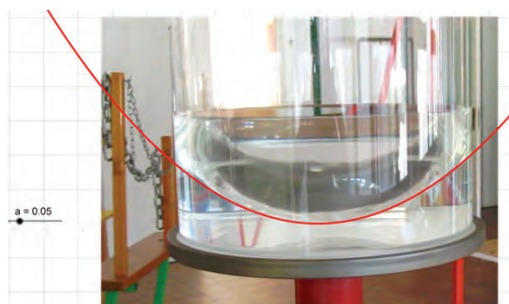


**Fig. 2.** Forma della superficie dell'acqua durante la frenata del cilindro

In definitiva, il visitatore che maneggia il nostro exhibit, oltre a vedere attualizzato con esso uno degli esperimenti più antichi nella storia della scienza moderna, può anche mettersi con la giusta disposizione intellettuale per capire le non facili questioni della relatività dei riferimenti del moto che ha davanti a sé. Il dialogo con l'explainer di Scienza Viva che gli sta di fronte lo aiuterà a comprendere le interpretazioni antitetiche di Newton e Mach. E, con esse, il filo concettuale che ha ispirato Einstein. Considerare Mach in rapporto ai due illustri scienziati è forse il miglior modo per ricordarlo.

Un altro livello di fruizione dello stesso exhibit è lo scoprire coi propri occhi che la forma cava dell'acqua rotante col cilindro è parabolica. La ragione deriva dalle azioni fisiche in atto, durante il moto, sulle singole piccole masse d'acqua messe in rotazione: l'equilibrio dinamico tra la spinta d'Archimede, la gravità e la forza centrifuga agenti su ciascuna di esse. Per convincersene graficamente, basta fotografare la cavità rotante e metterla sullo sfondo di Geogebra.

Non sarà difficile eseguire a questo punto il confronto della cavità fotografata con il profilo di una parabola generica, il cui primo coefficiente può essere variato opportunamente mediante lo slider del programma (Fig. 3).



**Fig. 3.** Prova grafica con Geogebra della forma parabolica assunta dall'acqua nel cilindro rotante

Prendiamo ora in considerazione un'alternativa ancora più semplice per realizzare il famoso esperimento newtoniano: sfruttare la versione inconsapevolmente presentata da un'insegnante polacca a "Science on Stage 2013", svoltosi a Slubice. A tal proposito, si veda l'altro video [La bottiglia rotante]. Una bottiglia di plastica contenente dell'acqua è sospesa per il tappo a una cordicella e, nel modo descritto da Newton, viene prima costretta a ruotare in un verso, con la cordicella che si attorciglia su se stessa, e poi lasciata ruotare in senso opposto, liberata definitivamente dalla precedente costrizione. Appena l'ho vista, ne ho subito intuito l'utilità perché è di facilissimo impiego, evitando il ricorso al secchio o al cilindro, che sono ingombranti e poco maneggevoli, nonché alla corda attaccata al soffitto o agli ingranaggi della manovella che non tutti possono permettersi di realizzare. L'unico difetto di questo dispositivo è che il moto parabolico esibito è alquanto effimero e, per questo, le riflessioni da esso concesse non permettono una interpretazione accurata, mentre i fatti avvengono.

Nel mostrare detto fenomeno, la collega sorrideva compiaciuta, ma non aggiungeva alcun commento, come se tutto si risolvesse in un bel gioco. Per lei quel che stava eseguendo era solo qualcosa gradevole a vedersi, una dimostrazione implicita degli effetti indotti sull'acqua dalla forza centrifuga, ma niente di più. Infatti, non sentiva il bisogno di accennare, almeno in poche parole, allo spazio assoluto di Newton, alla critica di Mach e alla deduzione di Einstein, con i loro scogli concettuali tanto duri per i fisici. Nulla vieta, però, a chi ha sensibilità storica ed epistemologica di adoperare proprio tale semplicissima apparecchiatura per avvertire gli alunni della profondità concettuale dell'esperimento.

### 3. I Principi della Dinamica e la loro riformulazione

Oltre che per l'argomento del secchio di Newton fin qui esposto, Mach va ricordato anche per l'analisi critica dell'intera struttura formale che lo scienziato inglese aveva dato alla Dinamica. Egli va ricordato inoltre perché, a seguito di detto esame, tentò di riformularla in modo a parer suo più adeguato, aggiornandola alle sue visioni epistemologiche. Che si sentisse in quei tempi la necessità di rivedere l'obsoleto impianto newtoniano lo rivela anche Hertz, il quale scrive:

È molto difficile esporre i concetti introduttivi della meccanica ad attenti ascoltatori, senza qualche imbarazzo, senza avvertire il bisogno di quando in quando di chiedere scusa, senza desiderare di passare al più presto oltre i primi elementi per giungere a degli esempi che parlino da soli. Immagino che anche Newton debba aver sentito lo stesso imbarazzo (Hertz 1899).

Ma torniamo a Mach, riassumendo brevemente le questioni più rilevanti da lui affrontate nella critica a Newton.

La definizione di massa è tautologica. La massa, definita come quantità di materia di un corpo, «è la misura della medesima ricavata dal prodotto della sua densità per il volume» (Newton 1977, p. 91). Ma cosa è la densità, dice Mach, se non la massa fratto il volume ( $d = m/V$ )? Allora  $m = (m/V)*V = m$ , cioè una definizione del tutto tautologica.

La prima legge della dinamica è contenuta nella seconda ( $F = ma$ ).

La prima legge enuncia: «Ciascun corpo persevera nel proprio stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, eccetto che sia costretto a mutare quello stato da forze impresse» (Newton 1977, p. 113). Invece la seconda legge afferma: «Il cambiamento di moto è proporzionale alla forza motrice impressa, e avviene lungo la linea retta secondo la quale la forza è stata impressa» (Newton 1977, p. 114). È del tutto ovvio dunque che, se la forza è nulla, il cambiamento di moto sia anch'esso nullo, e pertanto, non essendoci cambiamento di moto, che il corpo resti fermo o si muova di moto rettilineo uniforme.

C'è circolarità tra definizione di forza e la seconda legge della dinamica.

La definizione di Newton della forza impressa (la sua quarta definizione) è la seguente: «Una forza impressa è un'azione esercitata sul corpo al fine di mutare il suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme» (Newton 1977, p. 95). La seconda legge è stata appena ricordata. Mettendole insieme si ricava: «Il cambiamento di moto è proporzionale a ciò che ha il fine di mutare lo stato di quiete o di moto rettilineo di un corpo», dunque è proporzionale a se stesso. Si tratta dunque di un'altra circolarità concettuale.

Mach scrive a tal proposito:

Si vede subito che la prima e la seconda legge sono già contenute nella definizione della forza, secondo la quale senza forza non si verifica accelerazione, e quindi si verifica quiete o moto rettilineo uniforme. Dire che la variazione del moto è proporzionale alla forza, dopo che l'accelerazione è stata definita come misura della forza, significa cadere in una tautologia inutile. Per evitarla sarebbe stato sufficiente chiarire che le definizioni premesse non sono definizioni matematiche arbitrarie, ma proprietà dei corpi date dall'esperienza (Mach 1977, p. 262).

Con tale intento, Mach provò a riformulare la Dinamica sostituendo gli enunciati newtoniani con altri che avessero, a suo giudizio, «maggiore semplicità e migliore ordine metodologico» (Mach 1977, p. 263). Lo fece seguendo l'impostazione più coerente con il suo punto di vista di empiriocriticista: economica, per essere meglio appresa dagli studenti, e antimetafisica, depurata dagli orpelli che non vengono dall'esperienza.

La prima legge di Mach diventò una proposizione sperimentale: «Corpi posti l'uno in presenza dell'altro determinano, in circostanze che devono venire stabilite dalla fisica sperimentale, *accelerazioni* opposte l'una all'altra nella direzione della loro linea di unione. (La legge d'inerzia è già contenuta in questa proposizione.)» (Mach 1977, p. 263).

E per superare la difficoltà presentata dal concetto newtoniano di massa egli introdusse al suo posto la seguente definizione: «Il rapporto delle masse dei due corpi è il rapporto inverso delle loro rispettive accelerazioni preso con segno negativo» (Mach 1977, p. 263).

Non importava che questo significasse impiegare il contenuto sperimentale della terza legge di Newton:  $m_2 = -m_1 \cdot a_1 / a_2$ .

La seconda legge di Newton diventò la definizione del concetto di forza: «Una forza motrice è il prodotto della massa di un corpo per l'accelerazione impressagli» (Mach 1977, p. 263). La disinvoltura di questa decisione lascia davvero a bocca aperta chi ritiene che  $F = ma$  sia l'equazione fondamentale della Dinamica e non una definizione. È



interessante riportare a questo punto l'opinione di Poincaré, espressa sulla stessa scia riformatrice di Mach:

I principi della dinamica ci apparivano, in principio, come verità sperimentali. Ma siamo stati obbligati a impiegarli come definizioni. È per definizione che la forza è uguale al prodotto della massa per l'accelerazione. Ecco un principio posto ormai al di fuori degli attacchi di ogni altra ulteriore esperienza. Ed è ancora per definizione che l'azione è uguale alla reazione. Ma allora, si dirà, questi principi inverificabili sono assolutamente privi di ogni significato, l'esperienza non può contraddirli, ma non possono insegnarci nulla di utile. Perché allora studiarli? (Poincaré 1989, p. 119).

Lo stesso Poincaré, inoltre, sostenendo viepiù l'idea di Mach che la Meccanica è un prodotto storico e non una verità dogmatica, aggiunge poco dopo:

La legge dell'accelerazione, la regola di composizione delle forze, non sono, dunque, che convenzioni arbitrarie? Convenzioni, sì; arbitrarie, no. Lo sarebbero se si perdessero di vista gli esperimenti che hanno indotto i fondatori della scienza ad adottarle, e che, per quanto imperfetti siano, bastano a giustificarle. È utile, di tanto in tanto, riportare la nostra attenzione sull'origine sperimentale delle convenzioni (Poincaré 1989, p. 123).

Insomma, si andò affermando un filone di pensiero secondo il quale, come dice Alfonsina D'Elia:

i concetti e i principi, la teoria meccanica stessa possono essere detti convenzionali. Essi rispecchiano la conoscenza relativa di un'epoca storica, di una condizione umana (Mach 1977, Introduzione, p. 21).

Della riformulazione della Dinamica di Mach oggi nessuno ricorda granché, perché non ebbe successo. Tuttavia è certo che, attraverso Hertz e Poincaré e via via, in seguito, attraverso finanche il PSSC, il PPC ed altri importanti testi didattici ancora, essa ha alimentato la tendenza ad accettare la didattica della fisica come metodo convenzionale per risolvere i problemi. Kuhn avrebbe definito questo aspetto come paradigmatico. Non potendo sviluppare fino in fondo qui questo tema, ci limitiamo a coglierne la presenza in certe affermazioni che compaiono nei moderni libri di testo di fisica, ad esempio l'Halliday-Resnick, sul quale si sono formate generazioni di studenti universitari:

Anche se non capirete completamente ciò che le leggi della dinamica dicono, disponetevi a risolvere il vostro problema nella maniera approvata e tutto andrà bene (Halliday, Resnick 1960, pp. 88-89).

**Bibliografia**

- Halliday D., Resnick R. (1960). *Physics*. New York: Wiley & Sons.
- Hertz H. (1889). *Principles of Mechanics*. New York: Macmillan.
- Hertz H. (1894). *Die Prinzipien der Mechanik in neuen Zusammenhänge dargestellt*. Leipzig: Barth. [Traduzione italiana in Gottardi G. (a cura di) (1996). *I principi della meccanica (presentata in connessione nuova)*. Pavia: La Goliardica Pavese].
- Newton I. (1704). *Opticks, or a treatise on the reflexions, refractions, inflections and colours of light*. London: Smith.
- Newton I. (1977). *Principi Matematici della filosofia naturale*. Torino: UTET.
- Mach E. (1977). *La Meccanica nel suo sviluppo storico critico*. Torino: Boringhieri.
- Mamiani M. (1995). *Newton*. Firenze: Giunti Lisciani.
- Poincaré H. (1989). *La scienza e l'ipotesi*. Bari: Dedalo.

**Sitografia**

- [Il Secchio di Newton]. URL: <[http://www.scienzaviva.it/video\\_Newton\\_2017\\_03.php](http://www.scienzaviva.it/video_Newton_2017_03.php)> [data di accesso: 30/04/2017]
- [Il Secchio di Newton col guscio di noce]. URL: <[http://www.scienzaviva.it/video\\_Newton\\_2017\\_02.php](http://www.scienzaviva.it/video_Newton_2017_02.php)> [data di accesso: 30/04/2017].
- [La bottiglia rotante]. <[http://www.scienzaviva.it/video\\_Newton\\_2017.php](http://www.scienzaviva.it/video_Newton_2017.php)> [data di accesso: 30/04/2017].