

Fabio Bevilacqua
- Dip. di Fisica "A.Volta" -
Università di Pavia

"LINEAMENTI DI STORIA DELLA MECCANICA"

Esistono numerosi modi di presentare la scienza ed esistono anche numerosi modi di presentare la storia della scienza. Non avendo molte informazioni su quelli che sono gli obiettivi di questa serie di seminari ho tentato di immaginare un modo di presentare la storia della scienza che potesse risultare interessante. Spero che questo mio immaginare non sia troppo lontano dalle vostre aspettative.

Vorrei dapprima precisare il tipo di lavoro che svolgiamo a Pavia. All'interno del Comitato per le scienze Fisiche del Consiglio Nazionale delle Ricerche si sono recentemente Costituiti due gruppi di coordinamento nazionali, uno di storia della Fisica e uno di Didattica della Fisica. A Pavia all'interno di una unità del Gruppo di Storia della Fisica svolgiamo un lavoro di ricerca sull'elettromagnetismo classico e sulla fisica dello stato solido, in collegamento anche con altri gruppi italiani oltre che internazionali. Svolgiamo poi un attività di ricerca, che consideriamo di tipo applicativo, che consiste nel tentativo di utilizzare i risultati delle nostre ricerche di Storia della Scienza per un rinnovamento dell'insegnamento scientifico. Ci rivolgiamo quindi sia agli studenti universitari, sia ai docenti delle scuole secondarie per cercare di compensare alcune lacune dell'insegnamento scientifico con elementi di Storia della Scienza. Infatti l'immagine della scienza che viene trasmessa nelle aule universitarie non è completa; una larga fetta della scienza, in particolare quella collegata ai problemi della ricerca, viene tagliata fuori dall'insegnamento. Il nostro tentativo è quello di recuperare i dibattiti scientifici del passato, tramite appunto un lavoro storico, e raccontare poi come si sviluppa la scienza. Ecco, questo è il contesto in cui io lavoro, in cui sono nate le mie ricerche. Dico questo perché, come probabilmente qualcuno di voi avrà letto, si svolgono accesi dibattiti sia in Italia che all'estero su cosa è la scienza, che cos'è la storia della scienza, che cos'è la filosofia della scienza. Esistono molteplici indirizzi metodologici, alcuni più a carattere sociologico, altri che si legano più specificamente ai problemi della conoscenza, quindi a problemi di carattere filosofico; esistono anche indirizzi a carattere più specificamente storico, orientati al recupero ed alla conservazione dei manoscritti, degli strumenti, e ad una analisi dettagliata dei testi. I risultati di ognuna di queste tendenze sono influenzati dalle metodologie scelte. Il tipo di approccio che io tenterò di presentare è orientato ad utilizzare risultati specifici delle ricerche di storia della scienza per delineare un'immagine dello sviluppo della scienza che sia più completa di quella offerta dai libri di testo. Quindi non verranno trattati qui problemi di carattere sociologico né problemi di carattere gnoseologico ma problemi più specificamente fisici. Mi è stato raccomandato di non utilizzare formule ed io ovviamente mi attengo a questa raccomandazione ma ciò, evidentemente, implica una grande limitazione perché come tutti sapete l'aspetto

matematico è una delle componenti basilari della scienza "esatta", quindi dovete tener presente che quello che dirò in questo seminario subirà questa grande limitazione. Prima di entrare nello specifico della storia della meccanica vorrei esporre alcuni schematici elementi dell'immagine di scienza cui farò riferimento nel seguito.

In fig. 1 vi é uno schema tratto da una lettera che Albert Einstein nel 1952 scrisse ad un amico. In questa lettera si parla del metodo scientifico in alcune brevi ma interessanti annotazioni.

Einstein parla del metodo scientifico come di un attività di carattere circolare, cioè da un sistema di assiomi A si deducono con delle regole logico matematiche delle proposizioni risultanti S, queste proposizioni risultanti vengono messe a confronto con la varietà delle esperienze immediate sensoriali E e da questo piano delle esperienze sensoriali si ritorna poi agli assiomi A. Il passaggio dagli assiomi alle proposizioni risultanti, le proposizioni osservative infatti sono pur sempre proposizioni, e una derivazione di carattere logico. Essa viene fatta con le regole della logica e della matematica. E' interessante notare che Einstein sottolinea in polemica anche con gli atteggiamenti di un filone della filosofia della scienza chiamata empirismo logico o neopositivismo, che invece il rapporto fra queste proposizioni e i fatti dell'esperienza, come pure il rapporto fra i fatti dell'esperienza ed il sistema degli assiomi, non segue un cammino specificamente logico, cioè entrano in questo rapporto una serie di elementi che non sono riconducibili alle regole della logica e alle regole della matematica. Questa è una sottolineatura, che fa Einstein, molto importante perchè permette di considerare come scientifici alcuni aspetti che erano (e sono) tradizionalmente esclusi dall'immagine della scienza e in particolare dall'immagine della scienza che viene trasferita agli studenti tramite libri di testo. Uno storico americano, Thomas Kuhn, divenuto famoso per aver scritto un libro intitolato "La Struttura delle Rivoluzioni Scientifiche", ha fatto questo disegno (v. fig. 2) per fare una parodia dell'immagine della scienza offerta dai manuali. Secondo Kuhn le teorie scientifiche presentate dai manuali sembrano formate da una serie di assiomi e di condizioni iniziali che vengono trasformati attraverso una manipolazione logico matematica; da questa manipolazione di carattere meccanico vengono fuori dei risultati teorici che nei libri di testo sono messi poi in diretto confronto con i dati sperimentali. Kuhn asserisce che questa immagine non riflette la vera attività scientifica perchè in realtà non c'è nella pratica scientifica un rapporto diretto fra risultati teorici e risultati sperimentali. Il contesto della corroborazione è molto più complesso e nell'insegnamento scientifico non viene analizzato, come pure non viene analizzato il cosiddetto contesto della scoperta, cioè come sono stati prodotti gli assiomi. In pratica vengono trascurati quelli che Einstein aveva definito come gli aspetti non logici, extralogici dell'impresa scientifica.

Sviluppando il discorso di Einstein risulta che da sistemi di assiomi differenti possiamo dedurre delle proposizioni osservative comuni. Quindi possiamo interpretare gli stessi risultati in due sistemi concettuali diversi.

Si arriva a questi sistemi di assiomi differenti partendo da un insieme di dati osservativi, che in prima approssimazione

Fig. 1

Fig. 2

possiamo considerare comuni, attraverso dei filtri che qui vengono definiti come "tematiche" da Gerald Holton (fig. 3), un altro storico americano. Ogni scienziato ha

una propria concezione del mondo, un proprio paradigma, un proprio modello, i propri principi di ricerca che lo portano a selezionare e ad interpretare i dati osservativi e da questi arrivare agli assiomi. Quindi non c'è da stupirsi per delle interpretazioni differenti di uno stesso insieme di dati osservativi. Anche nell'ambito scientifico quindi gli elementi così detti metafisici, quelli che i neopositivisti chiamavano gli elementi extrascientifici, non scientifici, le "tematiche", sono molto importanti nel procedere della ricerca, ne sono anzi una componente indispensabile.

Prendendo a prestito dalla psicologia della Gestalt un disegno (fig. 4), sempre Kuhn e altri epistemologi come Feyerabend, mostrano come l'interpretazione di un insieme di elementi osservativi sia soggetta agli schemi interpretativi, come il risultato dell'osservazione dipenda in maniera abbastanza considerevole dagli elementi interpretativi, dalle categorie adoperate dal soggetto. Infatti le linee della figura come tutti probabilmente avete notato, possono essere interpretate sia come rappresentanti un'anatra che un coniglio, interpretando la parte sinistra del disegno rispettivamente come un becco oppure come delle orecchie. Questo è ovviamente un semplice esempio, però indicativo della comune prassi scientifica: il dibattito sull'interpretazione di determinati fatti osservativi da parte di contesti concettuali molto spesso opposti, in ogni caso differenti. Un'ultima nota a proposito degli elementi non logici nello sviluppo della scienza: la scienza non si sviluppa linearmente verso la verità finale, definitiva, oggettiva; non esistono degli esperimenti cruciali che permettano di discriminare fra teorie. Esistono sempre problemi interpretativi molto complessi e di difficile soluzione. Pertanto in quello che vi dirò assumo che la scienza si sviluppi per l'interazione di alcune componenti fondamentali. In particolare considererò come essenziali quattro componenti: i principi regolativi (per esempio il principio di causalità, principi di conservazione e i principi teleologici); i modelli concettuali (per esempio i modelli di azione a distanza, i modelli di azione a contatto, i modelli specifici delle forze); un apparato matematico, ed infine, ovviamente, una componente sperimentale. Sebbene l'intreccio tra queste quattro componenti sia un intreccio molto complesso, non sempre chiaramente definibile, faremo un tentativo per capire meglio questo intreccio nel caso della storia della meccanica.

In generale nella Storia della Scienza il ruolo delle varie componenti presenta differenze molto nette fra i vari periodi storici (v. fig. 5). Ad esempio le componenti dei principi e dei modelli hanno avuto un peso relativo maggiore nell'antichità (sebbene già nell'antica Grecia si fossero risolti molti problemi matematici relativi alla statica, alla trigonometria, alla geometria ed in particolare all'ottica geometrica). Il peso di queste componenti durante i secoli è cambiato, talvolta sono sorte attività sperimentali (per esempio nel Seicento le scienze così dette baconiane: elettricità, magnetismo, termometria); talvolta si sono avuti periodi di notevoli sviluppi matematici (per esempio la matematizzazione delle scienze baconiane all'inizio dell'Ottocento). Si è avuta tutta una serie di intrecci sui quali qui, adesso, non è possibile soffermarsi.

Per quanto riguarda la fisica del nostro secolo c'è però da notare una divisione dei compiti che è abbastanza importante perchè si è passati dall'organizzazione della scienza tradizionale (compito di pochi scienziati) a quella della scienza moderna (organizzata come un'industria). Esiste per esempio all'interno della fisica contemporanea una separazione di ruoli fra fisici teorici, matematici e sperimentali. I fisici teorici, sempre parlando in maniera abbastanza schematica, si occupano

prevalentemente di principi e di modelli. I fisici matematici elaborano in una forma matematica più corretta e precisa i risultati dei fisici teorici, i fisici sperimentali sono quelli che spesso all'interno di grossissimi centri internazionali di ricerca, adoperano apparecchiature molto sofisticate per tentare di correlare i risultati dei fisici teorici e dei fisici matematici con i cosiddetti risultati osservativi, che ovviamente sono risultati osservativi sempre mediati da teorie molto sofisticate.

Comunque oggi ci riferiremo a dei periodi in cui lo sviluppo della scienza era meno sofisticato ed in particolare ci riferiremo prevalentemente a Galileo e a Newton. Per tentare di inquadrare lo sviluppo cronologico del problema vorrei dapprima presentare uno schema di quello che dirò. Penso che un quadro d'insieme possa aiutare. Entreremo poi nei particolari. In figura 6 tra i problemi del moto visti su un piano orizzontale sono distinti da quelli visti su un piano verticale perché questa è una distinzione che ha avuto una notevole importanza nello sviluppo della meccanica. Ho inoltre aggiunto nella terza colonna dei riferimenti alle concezioni astronomiche.

Aristotele visse nel IV sec. a.C., Galileo pubblicò i suoi contributi nel 1610 e poi negli anni 30 in due opere, l'opera fondamentale di Newton e del 1686, il "Trattato di Elettricità e Magnetismo" di Maxwell e del 1873, Mach è uno scienziato viennese che ha dato importanti contributi critici alla meccanica nel 1887 e infine Einstein ha pubblicato la sua Memoria sulla Relatività Speciale nel 1905 e sulla Relatività Generale nel 1916. Questi scienziati hanno in comune, nonostante la differenza di epoche, il problema del moto relativo e dell'inerzia: quindi ci soffermeremo in particolare sul concetto di relatività di Galileo, su quello di Newton e infine sul concetto di relatività in Einstein.

Il principio di relatività è uno di quei principi che possiamo dire principi regolativi, cioè principi molto generali che accompagnano tutto lo sviluppo della scienza e si legano di volta in volta a dei modelli fisici specifici, differenti. Quindi la relatività Galileiana è diversa dalla relatività Einsteiniana perché i modelli specifici a cui questi principi fanno riferimento sono differenti.

Molto brevemente, per Aristotele per quello che riguarda il moto orizzontale non può esserci moto senza una causa agente direttamente applicata al corpo in moto, cioè non esistono forze a distanza, ma solamente forze a contatto; per quello che riguarda il moto verticale tutti i corpi devono tendere verso determinati luoghi naturali, i loro luoghi particolari. Lo stato fondamentale non è quello del movimento, ma la quiete. Per essere messi in moto i corpi hanno bisogno di una forza applicata, la forza quindi modifica lo stato base dei corpi che è quello di stare fermi nei loro luoghi naturali. Aristotele poneva una netta separazione tra il mondo sublunare e il mondo celeste perché nel mondo sublunare possono aver luogo dei moti imperfetti, i moti violenti provocati appunto dalle forze, nel mondo celeste possono aver luogo solo dei moti perfetti, che sono poi i moti circolari dei pianeti; alla base Aristotele poneva una concezione geocentrica: la terra al centro e il sole e i pianeti che le ruotano intorno. Galileo si oppose a questo tipo di concezione, che era stata ripresa da Tolomeo ed era poi stata trasferita attraverso l'opera di San Tommaso anche all'interno della tradizione cristiana, quindi si oppone ad una visione che per oltre un millennio e mezzo aveva dominato nel mondo occidentale. Il modello tolemaico fu messo in discussione da Copernico, che propose un modello in cui il sole era al centro e i pianeti gli ruotavano intorno. È difficile apprezzare questa rivoluzione al giorno d'oggi, ci si può meravigliare del lungo successo del modello geocentrico. vorrei far notare che invece

l'opera di Copernico (il *De revolutionibus*) non portò immediatamente all'abbandono della teoria tolemaica, infatti ancora per lungo tempo dopo la sua pubblicazione i navigatori continuarono, con buone ragioni, ad usare le tavole astronomiche che erano state costruite sulla base della teoria di Tolomeo. Infatti le proposizioni osservative, quelle famose proposizioni che venivano dedotte dagli assiomi, portavano nei due casi a una piccolissima differenza con i dati sperimentali, con i dati della osservazione. Copernico inoltre pensava a delle traiettorie circolari dei pianeti e questo lo obbligava ad inserire tutta una serie di elementi aggiuntivi all'interno del suo modello, per cui il modello copernicano era un modello che presentava un grado di complessità inferiore ma paragonabile a quello di Tolomeo. In pratica, non c'erano delle argomentazioni conclusive a favore del modello copernicano. Galileo mise in discussione questa ancor valida concezione tolemaica ed in particolare mise in discussione con la sua "legge di caduta dei gravi", in maniera questa volta conclusiva, la concezione del moto di Aristotele. Aristotele supposeva che i corpi più pesanti cadessero più velocemente dei corpi più leggeri, invece Galileo, come tra poco illustrerò, dimostrò che la velocità di caduta dipendeva solamente dall'altezza ed era indipendente dalla massa dei corpi. Galileo inoltre diede una prima formulazione del principio d'inerzia, descrisse in maniera che noi consideriamo corretta il moto dei proiettili, asserendo ciò che per Aristotele era un'eresia: la composizione di un moto orizzontale e un moto verticale. Arrivò, come vedremo, alla formulazione molto chiara del principio di relatività. Da queste basi si svilupperà la teoria newtoniana.

Galileo non aveva indagato sulle forze che provocano i moti, li aveva semplicemente descritti con la legge di caduta non aveva cioè indagato sulle cause del moto. Ciò fu invece fatto da Newton che completò la radicale modifica della concezione Aristotelica unificando con la legge della "gravitazione universale" i moti di caduta sulla terra, con il movimento dei pianeti e della terra intorno al sole, nello spazio. Quindi Newton superò quella separazione tra mondo sublunare e mondo celeste che era stata tipica di Aristotele. Newton recepì il principio di relatività di Galileo, però lo recepì solamente in parte perché all'interno della teoria newtoniana il principio di relatività è un principio di relatività cinematico, cioè un principio di relatività che si riferisce solamente a sistemi di riferimento in moto rettilineo uniforme, dove cioè non ci sono accelerazioni. Per quello che riguarda i moti accelerati, Newton sostenne che non c'è un principio di relatività e che esiste invece uno spazio assoluto, quindi introdusse un sistema di riferimento privilegiato.

Adesso torniamo a Galileo. Galileo si pose il problema di determinare la legge di caduta dei gravi; abbiamo ricordato che secondo Aristotele i corpi pesanti cadono più rapidamente dei corpi leggeri e Galileo si propose di verificare in maniera sperimentale questa assunzione. Era un'esperienza molto complicata all'epoca, dovete considerare che gli orologi meccanici sono una conseguenza delle leggi della meccanica e che quindi, per Galileo, era molto complicato calcolare esattamente i tempi di caduta, tempi abbastanza piccoli. Galileo fu spinto da alcune osservazioni sui pendoli a considerare che poteva determinare la legge di caduta utilizzando i piani inclinati e diminuendo quindi l'accelerazione dei gravi (v.fig. 7). Se facciamo oscillare un pendolo, originariamente nella posizione P esso risalirà, dall'altra parte, in assenza d'attriti, alla stessa altezza dalla quale è caduto. Il fatto che ritorni alla stessa altezza è che non vada né più in alto né più in basso, in assenza di attriti, è una cosa che è stata sempre interpretata come connessa all'impossibilità del moto perpetuo, cioè

all'impossibilità di ottenere lavoro dal nulla (ma questa è un'annotazione che sarà poi importante per lo sviluppo dei principi di conservazione dell'energia e che qui sono costretto a tralasciare). Galileo notò che se poniamo dei vincoli, (dei chiodi nei punti F—G—H) la traiettoria del pendolo (dopo la verticale di simmetria) sarà ovviamente differente, però la pallina risale sempre alla stessa altezza dalla quale è caduta, indipendentemente dalla traiettoria di risalita. Se mettiamo il vincolo in H, il pendolo non potrà risalire alla stessa altezza di caduta per effetto del vincolo, però vediamo che la pallina si riavvolge intorno al vincolo, in realtà la velocità acquisita non è stata completamente esaurita nella risalita. Da questo tipo di considerazioni Galileo, ricavò l'idea che l'elemento fondamentale del processo è l'altezza di caduta. Pertanto pensò di sostituire al pendolo dei piani inclinati, su cui la pallina potesse scorrere e poi risalire con inclinazioni differenti. Vide (o immaginò) che la pallina risaliva sempre alle stesse altezze indipendentemente dall'inclinazione e, quindi, cominciò a sperimentare sui piani inclinati. Attraverso una serie di esperienze, abbastanza straordinarie, ricavò le leggi di caduta libera, cioè che gli spazi percorsi sono proporzionali ai tempi al quadrato ($s = 1/2 gt^2$), che le velocità sono proporzionali ai tempi alla prima potenza ($v = gt$), che la velocità finale dipende dalla radice quadrata dell'altezza di caduta () e, questa è una cosa importante, che la velocità finale, cioè la velocità che un corpo acquisisce alla fine della caduta, dipende sì dalla radice quadrata dell'altezza ma non dipende dalla massa del corpo. Quindi tutti i corpi in caduta libera cadono con la stessa accelerazione g . Infine, visto che le velocità finali sono le stesse e sono indipendenti dalla diversa inclinazione dei piani di caduta al variare dell'accelerazione (per una caduta vincolata dal piano inclinato) varieranno i tempi di caduta.

Una minore accelerazione (conseguenza di una minore inclinazione del piano), evidentemente implicherà maggiori tempi di caduta ma il prodotto (gt) è lo stesso, perché la velocità finale dipende solamente dall'altezza e non dall'inclinazione.

Quindi Galileo, dalle considerazioni iniziali, ricavò che la velocità finale di caduta di un corpo è la stessa per una caduta verticale o lungo un piano inclinato. Infatti il corpo raggiunge la stessa velocità finale in tempi diversi e con accelerazioni diverse. Una volta determinata la velocità finale delle esperienze con il piano inclinato, misurando il tempo di caduta verticale si poteva ottenere l'accelerazione di caduta libera, questa famosa g .

Questo direi è un risultato straordinario e non ambiguo che contraddice nettamente la teoria aristotelica. Estrapolando questo discorso, almeno secondo la ricostruzione storica di Mach, Galilei arrivò anche alla legge d'inerzia. Infatti se la pallina deve risalire sempre alla stessa altezza, diminuendo sempre più l'inclinazione del piano inclinato di risalita, fino ad arrivare ad un piano orizzontale, la pallina, in assenza di attrito continua a procedere sul piano orizzontale con la velocità che aveva ottenuto per effetto della caduta. Quindi prosegue indefinitamente un moto rettilineo con una velocità costante. Questa doppia considerazione sul moto orizzontale e sul moto verticale permise a Galileo di determinare con notevole esattezza il moto dei proiettili, applicazione militare non da poco in quell'epoca (v.fig. 8). Vediamo che Galileo considera la traiettoria che compiono i proiettili come la composizione di due moti. La componente orizzontale è una componente che permette una velocità costante, permette cioè di attraversare spazi uguali in tempi uguali. A questa si somma la componente verticale data dalla legge di caduta, in cui invece gli spazi percorsi sono proporzionali ai tempi al quadrato, per cui gli intervalli spaziali aumentano sempre più

in corrispondenza di uguali intervalli temporali. Il risultato è una parabola. Ora è da notare che, indipendentemente dalla velocità orizzontale, il tempo impiegato a raggiungere la posizione finale C dipende semplicemente dalla legge di caduta cioè, in pratica, il tempo di caduta tra la posizione A e la posizione B è uguale al tempo di caduta tra la posizione A e la C. Quello che cambia è solamente la sovrapposizione di una componente orizzontale della velocità, che quindi modifica la traiettoria complessiva ma non modifica la legge di caduta verticale. Questa è un altro risultato in profondo contrasto con la concezione aristotelica.

Tutto ciò porta a dei risultati straordinari per quello che riguarda il principio di relatività e tutto il problema dei moti relativi. Infatti, osservate la figura 9.

Il disegno è tratto da un'inchiesta fatta negli Stati Uniti. E' stato chiesto agli studenti dei primi anni d'Università di rispondere alla domanda: "c'è un signore che corre a velocità costante trattenendo una sfera, nella mano, ad un certo punto lascia cadere la sfera quale sarà la traiettoria percorsa dalla sfera?". Il 45% degli intervistati ha risposto che la traiettoria sarebbe stata la A, il 49% ha detto che la sfera avrebbe compiuto la traiettoria G, poi c'è stato un 6% che ha detto che la sfera sarebbe andata all'indietro, avrebbe compiuto la traiettoria C.

Fig. 7

Fig. 8

La risposta a questo problema è fondamentale, perché è proprio questa sovrapposizione tra moti orizzontali e moti verticali che permette di capire il discorso sulla relatività di Galileo e permette di capire la sua contrapposizione agli aristotelici. L'aspetto interessante di questo problema è che, mentre per noi (osservatori esterni) la traiettoria è la A se l'individuo è in moto e la B se è fermo; per l'individuo in questione, in ogni caso la palla cade lungo la stessa traiettoria. Quindi dal punto di vista di questo signore, che egli sia in moto oppure sia fermo, non ha importanza perché la palla cade sempre ai suoi piedi. Come si ricollega questo problema al dibattito che dovette fare Galileo contro i suoi avversari aristotelici dell'epoca? In pratica il problema era questo: se facciamo cadere una palla dalla torre di Pisa quale sarà la sua traiettoria? Tutti sostenevano che, ovviamente, la traiettoria sarebbe stata verticale e la palla sarebbe caduta ai piedi della torre. Non c'era contrasto sui "dati" osservativi, ma c'era sulle interpretazioni. Infatti: è possibile da questo risultato sostenere che la terra è ferma? Gli aristotelici evidentemente asserivano di sì; la terra è ferma perché la palla cade ai piedi della torre, se invece la terra fosse in movimento, evidentemente la palla cadrebbe secondo la traiettoria C. Infatti la torre (insieme con la terra) si sarebbe in questo caso spostata durante il tempo di caduta della palla, e quindi la palla dovrebbe cadere ad una certa distanza rispetto alla posizione della torre. Questa era l'impostazione dell'argomentazione aristotelica. Invece Galileo assume il principio di inerzia cioè assume che un corpo prosegue nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme se non intervengono delle forze che modificano questo stato. Quindi Galileo assume che, se questo signore è in moto con velocità costante e lascia la palla, la palla ha una componente orizzontale che è la stessa componente orizzontale della velocità che continua ad avere il signore in moto, quindi non c'è un moto relativo orizzontale fra il signore e la palla. La differenza tra le traiettorie è data dal moto verticale della

caduta della palla. Quindi, nel caso della torre, dice Galileo, è chiaro che la terra è in movimento, però, oltre al fatto che la terra è in movimento, abbiamo anche un principio di inerzia, per cui i corpi solidali con la terra, anche se a un certo punto questo vincolo viene sciolto, continuano a mantenere lo stato di moto che avevano in precedenza. Qui è la grande differenza di concezione del moto tra Aristotele e Galileo. Secondo Galileo c'è moto anche in assenza di forze, per lo meno moto uniforme, mentre invece, secondo Aristotele, in assenza di forze c'è lo stato di quiete. Il risultato della controversia può essere espresso con le stesse parole di Galileo, che offrono anche un punto di vista metodologico molto sofisticato. Dice Galileo: "pertanto io sin qui resto soddisfatto e capacissimo della nullità e del valore di tutte le esperienze prodotte in provar più la parte negativa che l'affermativa della conversione della Terra". In pratica, dice Galileo, da questa esperienza della caduta dei gravi, noi non possiamo dedurre che la terra sia in movimento oppure no, perché l'esperienza può essere interpretata in tutti e due i modi.

Secondo uno schema di un noto filosofo della scienza, P.K. Feyerabend, ci troviamo di fronte a un contrasto tra due paradigmi (v. fig. 10). Il primo è il paradigma aristotelico, che si basava sull'osservazione di moti di oggetti in ambienti stabili di grande estensione spaziale, per es. un cervo osservato da un cacciatore, cioè un movimento rispetto ad un sistema di riferimento fisso e l'interpretazione che si dava è che il moto è operativo, cioè che si vedono gli effetti del moto. Secondo questa interpretazione la caduta del sasso dalla torre prova l'immobilità della terra, mentre invece se la terra fosse in moto, il sasso cadrebbe in maniera obliqua. La seconda interpretazione, quella di Galileo, fa riferimento ad esperienze compiute e immaginate in ambienti diversi, per es. su una barca in moto rettilineo uniforme. Galileo afferma che se noi chiudiamo gli occhi e ci mettiamo all'interno di una cabina, vediamo che all'interno della cabina, sempre che la nave sia in moto rettilineo uniforme, tutte le esperienze danno risultati assolutamente uguali alle esperienze fatte sulla terra; quindi noi, all'interno della cabina, non abbiamo

Fig. 9

Fig. 10

alcun mezzo per capire di essere in moto rispetto alla riva. Questo è infatti il principio di relatività galileiano: le leggi della fisica della meccanica, sono le stesse in sistemi in quiete o in moto rettilineo uniforme. Quindi, secondo Galileo, facendo riferimento a questi esperimenti sulle barche ed in altri sistemi in movimento si osservano solamente gli effetti del moto relativo, ma il moto che è comune a tutti due gli oggetti, per es. comune all'osservatore sulla barca e alla barca, non è operativo, cioè non se ne osservano gli effetti. Quindi, secondo Galileo, la caduta verticale del sasso dalla torre prova che non c'è nessun moto relativo orizzontale tra il punto di partenza e la terra e, viceversa, se si assume il moto della terra si può predire che non c'è nessun moto relativo orizzontale tra il punto di partenza e il sasso (assumendo che la terra si muova di moto rettilineo uniforme). L'esperienza della caduta del grave dalla torre poteva pertanto essere interpretata in due modi differenti; da una parte poteva essere interpretata come una prova che la terra è ferma, o, con l'assunzione del principio di inerzia, poteva essere interpretata come una prova che la terra è in movimento.

Questo è un caso importante perché fa vedere come possano esistere interpretazioni concettuali alternative dello stesso insieme di fenomeni osservativi. La capacità di Galileo di elaborare un'interpretazione alternativa rispetto a quella aristotelica e inoltre l'insieme dei suoi studi di meccanica e le sue osservazioni fatte tramite il telescopio (i satelliti di Giove, le fasi di Venere, etc.), determinarono l'abbandono della teoria aristotelica. E da notare che però, singolarmente presi questi tre aspetti non sarebbero stati sufficienti. Infatti la teoria copernicana da sola non poteva sconfiggere quella tolemaica, l'interpretazione relativistica di Galileo, da sola, non poteva sconfiggere quella aristotelica e anche le esperienze fatte col telescopio non furono immediatamente accettate come delle prove inconfutabili. Voi sapete che nella teoria aristotelica si assumeva l'esistenza di sfere cristalline intorno alla terra e ciò contrastava con la scoperta galileiana dell'esistenza dei satelliti di Giove. Evidentemente la sfera cristallina, almeno quella di Giove, non poteva coesistere con i satelliti, questi l'avrebbero distrutta. Però la risposta dei tradizionalisti a queste e ad altre osservazioni che mettevano in crisi il paradigma aristotelico fu esemplare: "perché noi dobbiamo credere alle osservazioni che facciamo tramite il telescopio? Il telescopio può introdurre degli errori, dei disturbi, delle illusioni ottiche rispetto ai dati direttamente osservati con la vista, quindi, in realtà, accettare le osservazioni di Galileo, non vuol dire semplicemente accettare un dato osservativo immediato, ma vuol dire accettare l'uso dello strumento con cui viene eseguita l'osservazione. Ciò non era immediato. Infatti all'epoca, le lenti erano considerate come strumenti illusori, quasi magici. (Pochi anni prima Gian Battista della Porta in un libro sulla magia naturale aveva incluso anche una trattazione sull'uso delle lenti e la produzione di illusioni ottiche). L'uso delle lenti non era considerato all'epoca una pratica scientifica, e fu solamente quando Keplero, un anno dopo la pubblicazione delle osservazioni di Galileo, pubblicò una teoria matematica delle lenti, che l'ottica delle lenti entrò a far parte della scienza. Solo allora vennero accettate le osservazioni di Galileo. Nello sviluppo della scienza esiste sempre la possibilità di mettere in discussione determinati nuovi dati osservativi, ma quello che è importante è riuscire ad elaborare, sulla base sia di osservazioni che di specifici principi, dei precisi modelli, che possano essere utili come ribaltamento complessivo della concezione precedente. In questo consiste il grande merito di Galileo.

Adesso, risolto un problema (il rapporto tra relatività e inerzia) ne dobbiamo affrontare un secondo: il rapporto tra principio d'inerzia e riferimento privilegiato. Con Cartesio e poi con Newton viene formulato il principio di inerzia ancor oggi insegnato: un corpo prosegue nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, se non ci sono delle forze che modificano questo stato. Ora il nuovo problema da affrontare è legato al fatto che anche questa affermazione che sembra semplice, sembra scontata, in realtà nasconde tutta una serie di insidie concettuali. Io mi soffermerò solamente sulla prima: cosa vuol dire rettilineo? Come si fa a dire che un moto è rettilineo, rispetto a quale sistema di riferimento lo misuriamo? Abbiamo visto in fig. 9 che, rispetto al sistema di riferimento esterno la traiettoria della palla è una parabola, invece in un sistema di riferimento solidale al signore che corre, la traiettoria della palla è una verticale. Evidentemente è difficile stabilire se il moto è rettilineo o meno. Ancora un esempio: se tracciamo una riga su un disco in movimento, un riga che segua un andamento rettilineo rispetto a un sistema di riferimento esterno rigido come può essere una squadra, sul disco non verrà disegnata una retta, ma una spezzata del tipo in fig. 11.

Abbiamo pertanto di nuovo il problema: rispetto a che sistema definiamo il nostro moto come rettilineo? Eppure nella formulazione del principio di inerzia parliamo di moto rettilineo. Newton, evidentemente, si pose questo problema e lo risolse dicendo: "noi definiamo il moto rettilineo rispetto allo spazio assoluto", perché se lo definissimo rispetto ad un sistema solidale alla terra potremmo scoprire che anche la terra è in movimento, se lo definissimo rispetto a un sistema connesso col sole potremmo scoprire, come poi è stato scoperto, che anche il sole è in movimento, lo stesso per le stelle fisse e così via, qualunque riferimento empirico potrebbe essere, in definitiva, un sistema in movimento. Quindi Newton introdusse un riferimento privilegiato, un riferimento assoluto. Dal principio di inerzia consegue un paradosso: da una parte un principio di relatività e dall'altra un riferimento privilegiato. Abbiamo visto infatti che partendo dal principio d'inerzia Galileo pervenne a spiegare i moti relativi immediatamente; se un corpo è in movimento senza che su di esso siano applicate delle forze, evidentemente su questo sistema in movimento non si sperimenta nessuna forza, se non si sperimenta nessuna forza non si può dire di essere in movimento. Quindi tutte le leggi della fisica che si ottengono nel sistema in moto sono uguali a quelle che si ottengono facendo esperimenti sulla terra ferma. Se si ammette il principio d'inerzia si ammette dunque anche un principio di relatività. Viceversa, se ammettiamo il principio d'inerzia, abbiamo bisogno di un riferimento assoluto per definire il moto come rettilineo, abbiamo bisogno del tempo assoluto per dire che il moto è uniforme e così via. Newton asserì la necessità dello spazio e del tempo assoluti e la necessità di una netta distinzione tra sistemi inerziali, cioè tra sistemi in moto rettilineo uniforme e sistemi non inerziali. Il principio di relatività era valido solo per i sistemi inerziali. La famosa seconda legge di Newton, $F = m a$, è una legge che vale solamente se riferita ad un sistema inerziale; se invece noi la riferiamo ad un sistema non inerziale, per esempio ad un sistema in rotazione essa non; vale più. Infatti nei sistemi non inerziali esistono delle altre forze. E' un brutto gioco di parole, le forze che si chiamano inerziali sono quelle tipiche dei sistemi non inerziali. Per esempio, se saliamo su una giostra possiamo immediatamente capire di essere in un sistema non inerziale perché avvertiamo una forza inerziale, nel caso specifico la forza centrifuga; quindi se siamo su un sistema rotante, noi capiamo di essere su un sistema rotante, le leggi della fisica sono diverse rispetto a quelle di un sistema non rotante.

Newton disse che lo spazio assoluto è il sistema di riferimento per queste forze inerziali. Tentò di dimostrarlo con la famosa esperienza del secchio. Appendiamo un secchio pieno di acqua al soffitto e arrotoliamo la corda del secchio, poi apriamo le mani e lasciamo che il secchio si metta in rotazione per effetto della torsione della corda, Newton considerò quattro momenti di questo processo: il primo è il momento in cui il secchio è fermo, la corda è arrotolata, la superficie dell'acqua è piatta, cioè non c'è deformazione e non c'è neanche moto relativo tra secchio e acqua, sia il secchio che l'acqua nel secchio sono fermi. Nella seconda fase se lasciamo che il secchio si metta a ruotare per effetto della torsione della corda, quando il moto del secchio non è ancora stato trasmesso all'acqua la superficie dell'acqua è ancora piatta; abbiamo un moto relativo però non abbiamo la deformazione. Nella terza fase un po' alla volta l'acqua si mette a ruotare e, ruotando, la superficie si deforma per effetto delle forze centrifughe, assumendo il tipo di configurazione indicato in fig. 12, a questo punto l'acqua ha la stessa velocità di rotazione del secchio per cui non c'è moto relativo tra acqua e secchio e, invece, c'è deformazione della superficie

dell'acqua. Infine nella quarta fase blocchiamo il secchio, ma l'acqua continuerà a ruotare, quindi c'è ancora una deformazione della superficie dell'acqua e c'è moto relativo perché il secchio, a questo punto, è fermo. Cosa ne ricaviamo? Ne ricaviamo che non possiamo stabilire una correla-

Fig. 11

Fig. 12

zione tra la deformazione e il moto relativo, perché non abbiamo deformazione sia quando non c'è moto relativo sia quando c'è e abbiamo una deformazione sia quando c'è, sia quando non c'è moto relativo tra acqua e secchio.

Quindi, dice Newton, non possiamo riferire queste forze d'inerzia che causano deformazione al moto relativo tra acqua e secchio; dobbiamo riferire queste forze allo spazio assoluto. Le potremmo riferire alla terra, ma vediamo che anche la terra è schiacciata ai poli per effetto delle forze d'inerzia, anche il sistema solare presenta delle caratteristiche dovute alle forze d'inerzia e così via. Da qui la necessità dello spazio assoluto. Quindi, ripeto, abbiamo da una parte il principio della relatività, dall'altra uno spazio assoluto. Questa è una contraddizione intrinseca al principio d'inerzia. La storia della fisica post-galileiana si può anche interpretare come un dibattito tra coloro che ponevano l'accento sul principio di relatività e coloro che ponevano l'accento sul riferimento privilegiato. All'interno della meccanica la soluzione di Newton, che accettava il principio di relatività per il moto rettilineo uniforme e lo negava per i moti accelerati, ebbe molto successo. La meccanica, come tutti sapete, si sviluppò sulla base di una concezione di azione istantanea a distanza, cioè le forze di Newton sono forze direttamente proporzionali alle masse dei due corpi ed inversamente proporzionali al quadrato della loro distanza. Non compare il tempo nella legge di gravitazione, il che implica che le forze Newtoniane si trasmettono con una velocità infinita, istantaneamente. Invece all'interno dell'elettromagnetismo, che è una teoria che venne matematizzata e si sviluppò prevalentemente nell'800, prevalse un'idea d'azione a contatto, cioè interazioni che non si propagano istantaneamente: si assume l'esistenza di un intervallo di tempo tra la causa e l'effetto, intervallo considerato necessario per la propagazione delle interazioni. Nella concezione specifica di Maxwell si abbandona dunque l'idea dell'azione a distanza per un'idea di azione a contatto e si denomina "campo" questa nuova entità che si propaga in un tempo finito con la velocità della luce. Era necessario un riferimento privilegiato rispetto al quale misurare la velocità della luce e quindi mentre per la meccanica valeva un principio di relatività per i moti rettilinei uniformi, si assumeva che nell'elettromagnetismo questo principio non valesse. Il riferimento privilegiato nell'elettromagnetismo fu chiamato etere. Furono fatti molti tentativi per dimostrare l'esistenza dell'etere, però questi tentativi fallirono; ad ogni fallimento sperimentale si faceva fronte con argomentazioni teoriche per salvare l'ipotesi dell'esistenza dell'etere. Si tendeva pertanto ad abbandonare, all'interno dell'elettromagnetismo, l'idea del principio di relatività a favore di quello del riferimento privilegiato.

All'interno della meccanica Ernst Mach, un fisico e filosofo viennese della seconda metà dell'800, sosteneva invece che Newton aveva sbagliato con l'introdurre lo spazio assoluto e che era necessario assumere un principio di relatività anche per i moti

accelerati. Per Mach le forze inerziali vanno riferite alle masse distanti e non allo spazio assoluto. Secondo Mach infatti l'interpretazione di Newton dell'esperienza del secchio non è corretta: "secondo me non esiste che il moto relativo ... Possiamo tener fermo il vaso di Newton e far girare il cielo delle stelle fisse, in modo da provare la mancanza di forze di allontanamento? Questa esperienza è irrealizzabile questa idea è priva di significato, poiché i due casi non possono essere distinti dai sensi. Perciò li considero non due, ma un solo caso, e giudico illusoria la distinzione di Newton". Quindi Mach aveva una posizione opposta a quella che si veniva sviluppando nell'elettromagnetismo.

Einstein affrontò proprio questi problemi e fu molto stimolato proprio dalla critica di Mach a Newton. Einstein dapprima modificò l'interpretazione dell'elettromagnetismo introducendo un principio di relatività e poi modificò radicalmente la formulazione della meccanica. Accettò, ovviamente, il principio di relatività cinematica della meccanica, ma fece ancora di più, perché introdusse un principio di relatività anche per i moti accelerati. Quindi modificò completamente le concezioni alla base della meccanica newtoniana. La prima innovazione fu fatta nella memoria sulla relatività speciale nel 1905 la seconda nella memoria sulla relatività generale nel '16. Però nonostante il tentativo di Einstein di eliminare lo spazio assoluto, questo non è definitivamente scomparso dalla fisica contemporanea perché poi lo sviluppo e l'analisi delle equazioni della relatività generale e l'analisi delle loro soluzioni, hanno portato a dubitare del completo successo dell'originario programma einsteiniano. Einstein nel '53 scrisse la prefazione ad un bel libro, che forse qualcuno di voi avrà letto dal titolo "Storia del concetto di spazio" di Max Jammer, in cui riconosceva per l'appunto che la concezione dello spazio assoluto non era stata ancora completamente superata. Quindi esistono due fondamentali categorie concettuali, il riferimento privilegiato ed il principio di relatività che hanno accompagnato il dibattito in fisica per vari secoli e che ancora si contrappongono.

Abbiamo visto che all'interno del sistema newtoniano esiste una differenza molto netta tra le forze definite sul piano verticale. Questa "m" che c'è nella famosa formula per cui la forza è uguale alla massa per l'accelerazione, questa massa è una massa inerziale, cioè rappresenta, secondo la concezione newtoniana, una caratteristica dei corpi che si oppongono al moto; per capire la definizione di massa inerziale si può fare l'esperienza seguente. Diamo con un martello un impulso ad una sfera, la sfera acquisterà una differente accelerazione, se la massa è più grande l'accelerazione sarà minore, a parità di forza agente nell'unità di tempo. Quindi la "m" della $F = m a$ rappresenta una massa inerziale. Invece, nella caduta verticale, Newton fa riferimento alla sua legge di gravitazione, cioè afferma che la forza è proporzionale al prodotto delle masse e inversamente proporzionale al quadrato delle distanze. Ora, per dei corpi che cadono sulla terra, questa M è la massa della terra e r^2 è la distanza tra i due corpi e quindi, in pratica, noi possiamo racchiudere la costante di proporzionalità, la M e la r^2 nella G, nell'accelerazione di gravità e questa accelerazione non dipende dal corpo che cade, però la forza che si esercita sul corpo dipende dalla massa gravitazionale del corpo stesso. Ora, il punto è il seguente: se noi sosteniamo due corpi di massa differenti e li teniamo fermi evidentemente noi dobbiamo contrastare una forza peso che nel due corpi è differente, però se lasciamo i corpi, questi cadono con la stessa accelerazione: questo è un evento abbastanza paradossale che viene spiegato all'interno della teoria newtoniana, come un risultato di due effetti contrastanti. Da

una parte abbiamo una massa inerte, che resiste alla forza peso, dall'altra parte abbiamo una forza peso che è proporzionale alla massa gravitazionale, per cui il fatto che i corpi cadono con la stessa accelerazione dipende dal fatto che la massa gravitazionale e la massa inerziale sono uguali per tutti i corpi. In pratica il discorso di Newton è che ci sono due effetti contrastanti nella caduta, da una parte c'è una forza che sollecita il moto che è proporzionale alla massa gravitazionale del corpo, dall'altra parte c'è una forza che resiste al moto e che dipende dall'inerzia del corpo, dato che la massa inerziale è uguale alla massa gravitazionale, il risultato è che l'accelerazione di caduta è la stessa; però essa è la stessa solo perché c'è una compensazione tra questi due effetti differenti. Questo è un problema molto importante perché si basa su un risultato sperimentale: effettivamente la massa inerziale, cioè la massa definita su un piano orizzontale, e la massa gravitazionale, cioè quella definita su un piano verticale, sono quantitativamente esattamente identiche, con una precisione di misura molto notevole, pur essendo concettualmente differenti. Queste misure erano già iniziate con Newton e poi sono state portate avanti fino ai nostri giorni. Tutte confermano che non c'è nessuna differenza quantitativa tra la massa inerziale e la massa gravitazionale delle varie sostanze; in definitiva questi due numeri sono uguali. Costituiscono, però, da un punto di vista teorico, due concetti differenti all'interno del sistema newtoniano e, quindi, il risultato che l'accelerazione di caduta è costante, indipendente dai corpi, è spiegato dalla compensazione di due effetti differenti (l'inerzia e la gravitazione).

Siamo però ancora di fronte al non risolto problema della dicotomia tra un principio di relatività e un riferimento assoluto. Questa dicotomia è stata messa in discussione da Einstein, sulla base di famosi esperimenti ideali, Einstein definisce come l'indizio negletto dalla meccanica newtoniana l'uguaglianza della massa inerziale e della massa gravitazionale. Egli sostiene che, in realtà, l'inerzia e la gravitazione non sono due concetti differenti ma sono lo stesso concetto e che, tramite la considerazione di campi gravitazionali, noi possiamo stabilire un'equivalenza tra sistemi inerziali e sistemi non inerziali, un approccio che è assolutamente contrario allo schema newtoniano. In pratica, dice Einstein, se noi lasciamo cadere un oggetto in questa aula esso andrà a colpire il pavimento: noi interpretiamo l'evento asserendo di essere in un sistema inerziale in cui agisce una forza gravitazionale. Einstein, che condivideva una concezione di azione a contatto, definiva l'interazione di gravità un campo gravitazionale; quindi possiamo dire di essere in un sistema inerziale con un campo gravitazionale. Se appendiamo il secchio di Newton al soffitto, asseriamo, sulla base dell'interpretazione precedente, che la corda è tesa per un effetto della massa gravitazionale del secchio, cioè che esiste una forza peso che tira il secchio verso il basso e la tensione della corda darà un'indicazione di questa forza peso, che dipende dalla massa gravitazionale del secchio. Se però noi adesso immaginiamo che ci sia un gancio sul tetto di questa aula e che tutta l'aula sia sollevata verso l'alto, come un ascensore con una accelerazione uguale e contraria all'accelerazione di gravità, siamo ancora in accordo con i dati osservativi, cioè la tensione della corda del secchio appesa al soffitto è esattamente la stessa del caso precedente. Questa volta interpretiamo la forza come dovuta alla massa inerziale, cioè alla resistenza che la massa oppone all'accelerazione. Dato però che la massa inerziale e la massa gravitazionale sono uguali noi non possiamo discriminare tra le due interpretazioni. La seconda interpretazione asserisce che se per esempio apriamo la mano e lasciamo la penna, questa penna rimane nella sua posizione inerziale però il pavimento dell'aula, che ora è

un grande ascensore, viene ad urtare contro la penna con una accelerazione che è uguale e contraria a quella della gravità. Quindi Einstein utilizza i campi gravitazionali per stabilire un ponte tra sistemi inerziali e sistemi non inerziali; supera quella distinzione introdotta prima da Galileo e poi canonizzata nella fisica newtoniana. Con questo Einstein tentava di abolire l'idea dello spazio assoluto e del riferimento privilegiato e di portare argomenti a favore della teoria della relatività, del principio di relatività esteso anche a sistemi non inerziali.

Riassumendo: si è tentato di illustrare come determinati principi, come quello di relatività, come quello dello spazio assoluto, che possiamo chiamare dei principi metafisici, quando sono uniti a specifiche concezioni fisiche, a specifici modelli, determinano delle interpretazioni molto sofisticate dei fenomeni osservativi. Ciò che è interessante notare è che in ognuno dei casi illustrati, nel caso dell'ascensore, nel caso del secchio e nel caso dell'omino che correva con velocità uniforme, in ognuno di questi casi c'è più di una interpretazione; è sempre possibile avere più di una interpretazione e quasi sempre è impossibile decidere quale sia l'interpretazione corretta di un singolo fenomeno. Quello che è possibile fare, sebbene molto difficile, è tentare di valutare l'insieme delle implicazioni dei vari modelli concettuali e scegliere il modello che offre le maggiori possibilità di sviluppo. Probabilmente si continuerà a parlare ancora per molto tempo di questa dicotomia tra sistemi relativi e riferimenti privilegiati. E' da notare che nell'Ottocento la teoria di Maxwell dell'elettromagnetismo costituì uno straordinario progresso nella fisica anche se si basava su un riferimento privilegiato. Infatti non esistono principi "buoni" e principi "cattivi" a priori. Occorre esaminare nella specifica situazione storica, quale sia l'interazione tra principi e modelli che offra delle novità che offra una reinterpretazione di tutti i risultati precedenti e in più offra una possibile strada per sviluppare delle nuove idee e delle nuove misure. In pratica, la dicotomia tra conservazione (sintesi del precedente) e innovazione rimane sempre aperta nello sviluppo della scienza, perché quando si raggiunge una maggiore capacità di sintesi, immediatamente si raggiunge una maggiore capacità di predizione, cioè ogni successiva più ampia sintesi dei risultati già raggiunti, permette anche di prevedere, di immaginare dei risultati più sofisticati. Esiste una dialettica costante tra gli aspetti di novità e gli aspetti di conservazione nella scienza, tra lo sforzo che fanno sempre gli scienziati verso nuove sintesi e il fatto che queste nuove sintesi offrono immediatamente la capacità e la possibilità di predire e analizzare sempre nuovi fenomeni.

Per ritornare a quello che avevo detto all'inizio, di solito nell'insegnamento scientifico viene completamente trascurato questo aspetto della dinamica, dello sviluppo della dinamica, dello sviluppo delle teorie scientifiche. Il realtà quello che si fa, ed è anche una cosa necessaria e utile, è di trasmettere agli studenti l'insieme delle conoscenze acquisite in una data epoca per permettere loro di entrare in contatto con l'insieme dei risultati di quell'epoca. Questo è quello che noi chiamiamo insegnamento conservativo, cioè si insegna a risolvere dei problemi in ambiti che sono già stati definiti. Ciò è ovviamente valido ma limitativo, e solamente un aspetto della scienza. Un altro aspetto della scienza, altrettanto importante, è appunto quello della ricerca, della definizione di nuovi problemi; il corrispondente didattico di questo secondo aspetto, ciò che noi chiamiamo insegnamento innovativo, oggi non trova posto purtroppo, nell'insegnamento scientifico. Nell'impossibilità di mettere gli studenti a

contatto con la ricerca scientifica contemporanea (ciò che avverrà solo per quella piccola percentuale che svolgerà ricerca scientifica) ciò che viene loro trasmesso e, nel migliore dei casi, un insieme di risultati. I processi che hanno portato a questi risultati vengono trascurati. In un mondo in cui si susseguono rapidamente risultati differenti e profonde modificazioni concettuali l'insegnamento conservativo, pur necessario, non è sufficiente.

La storia della scienza, se legata allo specifico sviluppo della scienza, può offrire un utile ricaduta didattica.

Infatti lo studiare come i grandi scienziati del passato abbiano definito dei problemi complessi, in maniere alternative ma singolarmente consistenti può aiutare gli studenti a capire che si possono interpretare i fenomeni in maniera differente (anatra o coniglio?) purché si abbiano le capacità di definire in maniera consistente le singole interpretazioni, e queste a loro volta possano stimolare nuove ricerche. Grazie.