

SUSANNA INVERNIZZI (*), PAOLA MEINI (**)

(*) *Scuola di Cultura e Lingue, Marcelline, Milano*

(**) *ITIS di Tradate*

Unità di Milano GNDF (1)

L'insegnamento della meccanica al biennio della scuola media superiore. Parte seconda: la sperimentazione

Pervenuto il 15.12.1992, approvato il 29.1.1994

ABSTRACT

A research has been performed in classroom settings, in order to test the didactic effectiveness of original teaching approach to Newtonian mechanics proposed in a preceding paper. Two high school classes (students 14-15 years old) were involved in the teaching experiment. Pupils' conceptual understanding of Newtonian mechanics was carefully monitored and it seems significantly improved compared to classes where a more traditional approach is applied.

1. Introduzione

1.1 In un precedente articolo (2), qui citato come I, dopo aver illustrato brevemente le difficoltà che si incontrano nell'introdurre la meccanica newtoniana in situazione di classe con ragazzi di quattordici-sedici anni, era stato suggerito un itinerario didattico basato sulla differenziazione simultanea dei concetti di forza e di energia.

Per quanto riguarda la sperimentazione in classe della proposta ci si era limitati a un rapido cenno.

1.2 In questo secondo articolo, scritto direttamente dalle insegnanti delle due classi in cui la sperimentazione ha avuto luogo, si forniscono invece tutti i dati ed essa relativi.

L'accento non è posto sul racconto più o meno completo di quanto sia effettivamente avvenuto in classe, ma sugli aspetti di sperimentazione dell'intervento in classe.

Prima di tutto va notato che la traccia di itinerario proposta in I ha dovuto essere riprogrammata dalle insegnanti per tener conto dei diversi contesti scolastici in cui si operava: tipo di scuola, quadro orario, verifiche finali. Sotto questo aspetto è importante notare le notevoli differenze che le due sperimentazioni hanno assunto.

In particolare nella prima sperimentazione in principio di inerzia è stato presentato al termine della cinematica. Nella seconda durante l'itinerario qui proposto. Differente è anche il rapporto teoria-esperienza delle due sperimentazioni, lega-

to probabilmente non solo alla maggiore importanza che il laboratorio ha negli ITIS, ma anche alle preferenze personali delle due insegnanti e alla risposta delle classi.

Per quanto riguarda gli interventi degli alunni essi non vengono tanto riportati come prova del loro grado di apprendimento, ma per evidenziare il cammino che essi hanno dovuto percorrere per passare dalle concezioni spontanee, precedenti la fase di apprendimento formale, a una visione più vicina a quella scientifica dei fenomeni fisici.

Per lo schema teorico proposto e per i riferimenti bibliografici ci riferiamo all'articolo I.

2. La sperimentazione in una prima classe di istituto tecnico aziendale

Le lezioni che qui presentiamo sono state svolte nel primo anno di un istituto tecnico aziendale quando gli allievi avevano già affrontato gli aspetti cinematici del moto (concetto di traiettoria, velocità, accelerazione, grafici (t, s) e (t, v)) e la prima legge della dinamica.

La traccia di itinerario didattico proposta nell'articolo I è stata riprogrammata nel modo seguente:

2.1 Le attività proposte

• Attività di orientamento

– discussione introdotta dalla seguente domanda: "Che cosa sentite se spingete contro il muro, tirate la cattedra verso di voi, giocate con un estensore a molle?"

– elenco delle idee di forza ed energia emerse durante la discussione

– interpretazione della situazione sperimentale in termini di forza ed energia

– esame di forze elastiche in situazioni statiche (molle in serie e in parallelo)

(1) Gli autori del testo hanno lavorato in stretta collaborazione. In particolare sono dovuti interamente a:
S. Invernizzi - la Sezione 2
P. Meini - la sezione 3

(2) E. Giordano, C. Marioni: "L'insegnamento della meccanica al biennio scuola media superiore: la proposta", 1994

– giochi a squadre con l'utilizzo di dinamometri per introdurre la natura vettoriale delle forze

L'obiettivo principale che si è voluto raggiungere con queste prime attività è stato quello di insegnare ad analizzare situazioni di meccanica newtoniana in termini di forza ed energia.

• Attività intermedie

– analisi di una situazione dinamica: un oggetto scivola lungo un piano inclinato con partenza da fermo:

- analisi cinematica del moto
- analisi delle forze agenti sull'oggetto
- analisi energetica

– analisi di una situazione dinamica: oggetto sospeso a una molla e lasciato oscillare liberamente in verticale.

L'obiettivo principale di questa fase è stato quello di riconoscere che esiste una relazione fra la forza ed accelerazione.

• Attività di estensione e approfondimento

– analisi e confronto di situazioni dinamiche: masse diverse scivolano lungo piani inclinati uguali (o masse uguali scivolano lungo piani inclinati di altezza una doppia dell'altro).

L'obiettivo principale è stato verificare ed estendere le nozioni apprese.

2.2 Lavoro in classe e sua valutazione

Nella seguente presentazione verranno descritte le tappe principali e i passaggi che hanno permesso agli allievi di differenziare le loro nozioni intuitive di forza e di energia e di avviarsi verso un corretto formalismo scientifico. Per questo motivo non vengono riportate alcune delle sequenze elencate in 2.1 perché non significative a questo scopo.

• Attività di orientamento

La situazione di partenza è stata scelta in modo che rispondesse a questi requisiti: fosse familiare ai ragazzi, facilmente riproducibile anche in un'aula scolastica e non fosse mai stata analizzata precedentemente.

È stata scelta una gara di tiro alla fune a coppie. I ragazzi nelle loro previsioni su che cosa sarebbe successo nel caso in cui uno dei ragazzi impegnati nella gara vince e nel caso in cui nessuno dei due ragazzi vince hanno ragionato solo in termini di forza.

Per quasi tutti gli allievi le forze si presentano in coppie simmetriche (fig. 1) nella situazione in cui nessuno dei due ragazzi vince. Solo pochi ragazzi (tre su ventitre allievi) hanno interpretato questa situazione in modo diverso.

Questi ragazzi si esprimevano in questi termini: "se l'atleta A fa forza F e l'atleta B fa resistenza F' ", ma l'atleta A non si muove, allora $F' > F$.

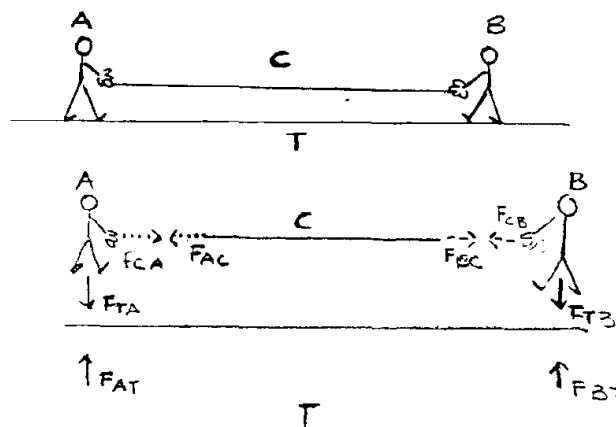


Fig. 1

Per tutti i ragazzi quando uno dei partecipanti alla gara vince si ha la situazione rappresentata nella fig. 2: $F_{CA} > F_{CB}$.

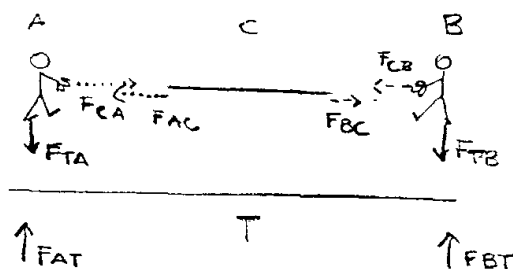


Fig. 2

La realizzazione concreta, più volte ripetuta, della gara di tiro alla fune ha mostrato con grande stupore dei ragazzi che i due dinamometri, applicati alla fune segnavano lo stesso valore sia nel caso in cui nessuno dei ragazzi vinceva, sia nel caso opposto.

Ciò voleva dire che nessuno dei due ragazzi esercitava una forza maggiore?

Qualche allievo ha cercato di dare una spiegazione introducendo le forze di attrito, che nella fase precedente la realizzazione della gara non erano mai state nominate, anche se alcuni ragazzi avevano fatto notare che:

- gli atleti che eseguono gare di tiro alla fune sono dotati di scarpe munite di chiodi;
- non è possibile eseguire una gara di tiro su di un pavimento molto lucido.

È stato quindi rifatto il diagramma delle forze includendo le forze di attrito e sono state analizzate le forze agenti su ogni singolo componente del sistema per arrivare a una spiegazione soddisfacente della situazione proposta.

– Se un corpo a esercita una forza su un corpo b allora il corpo b esercita sul corpo a una forza uguale e opposta.

– L'azione e la reazione non si elidono perché agiscono su corpi differenti.

– Il sistema $a + b$ può venire accelerato solo da una forza esterna.

L'invito da parte dell'insegnante a guardare la situazione fenomenologica anche sotto l'aspetto energetico ha permesso di arricchire e completare la precedente interpretazione. Nel momento in cui uno dei due ragazzi perde, cioè inizia a muoversi, chi vince, trasferisce energia a chi perde. Chi perde in questo caso, acquista energia di movimento (o cinetica).

Poiché il cedimento non è mai totale il movimento successivo avviene a velocità che si può considerare costante. In quest'ultimo caso non vi è più trasferimento di energia da un giocatore all'altro. A questo punto l'insegnante ha introdotto le definizioni di energia di movimento (o cinetica) e di energia potenziale gravitazionale e ha invitato i ragazzi ad analizzare situazioni già esaminate dal punto di vista cinematico: caduta libera di oggetti e lancio verso l'alto di palloni.

L'efficacia dell'introduzione simultanea delle nozioni di forza ed energia si è rivelata quando i ragazzi hanno esaminato la caduta libera di un oggetto e il lancio verso l'alto di una palla. I ragazzi per interpretare il lancio verso l'alto di una palla non sono in generale ricorsi allo schema "forze che si consumano" o "si esauriscono". Nel caso di oggetti in caduta libera da altezze differenti hanno interpretato correttamente come è dimostrato dalle frasi riportate:

– "il vaso che cade dal terzo piano fa più male di quello che cade dal primo perché trasferisce maggiore energia, non perché ha più forza";

– "il vaso che cade dal terzo piano ha più energia cinetica finale perché ha una velocità finale maggiore";

– "la forza è sempre la stessa, la forza è uguale al suo peso".

Quei ragazzi che invece davano, senza pensare più di tanto, risposte che restavano a livello "di senso comune", invitati a ragionare sul piano "scientifico" riuscivano anch'essi a dare risposte diverse da prima e corrette dal punto di vista fisico.

Le attività di orientamento si sono concluse con l'esame di forze elastiche in situazioni statiche (molle in serie e in parallelo) e l'introduzione della natura vettoriale delle forze mediante giochi a squadre con l'utilizzo di dinamometri. (*).

• Attività intermedie

La natura vettoriale delle forze è stata completata quando si è passati a considerare la discesa di un oggetto lungo un piano inclinato.

Alcuni ragazzi, per esperienze extrascolastiche, sapevano che un piano inclinato permette di "fare meno forza" per sollevare un oggetto a una certa altezza rispetto alla forza necessaria per sollevare

alla medesima altezza lo stesso oggetto lungo la verticale.

Tutti i ragazzi erano concordi nell'affermare che quanto più il piano inclinato si avvicina alla situazione limite della verticale tanto più è necessario fare forza: "la forza necessaria per sollevare un oggetto lungo un piano inclinato dipende dalla inclinazione del piano".

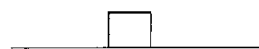
Ripetute prove con oggetti vari, dinamometri e piani inclinati di diversa inclinazione hanno confermato l'intuizione iniziale dei ragazzi. Inoltre le diverse prove hanno permesso di verificare che la forza è costante in ogni punto di un dato piano inclinato. Alcuni ragazzi erano giunti a questa conclusione con un ragionamento al limite, cioè considerando che la forza per sollevare un oggetto lungo la verticale (piano inclinato con $\alpha = 90^\circ$) è costante.

Alcuni ragazzi durante la discussione avevano però posto il quesito se la forza necessaria per sollevare un oggetto lungo un piano inclinato fosse uguale a quella a cui è sottoposto quando scende.

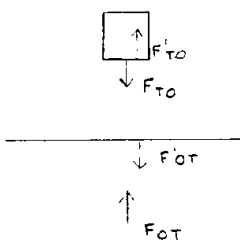
Per rispondere a questa domanda i ragazzi sono stati invitati ad analizzare le forze agenti su un oggetto che scivola lungo in piano inclinati con partenza da fermo.

- Analisi delle forze agenti su un oggetto che scivola lungo un piano inclinato partendo da fermo

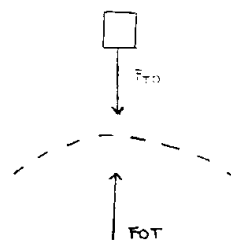
Per prima cosa i ragazzi sono stati invitati a disegnare i diagrammi delle forze agenti su un oggetto appoggiato a terra su un oggetto in caduta libera (fig. 3).



3a.



3a'.



3b

F_{TO} = FORZA DELLA TERRA SULL'OGGETTO

F_{OT} = FORZA DELL'OGGETTO SULLA TERRA

F'_{OT} e F'_{TO} = FORZA VINCOLARE

In analogia con i due casi precedenti i ragazzi hanno individuato per un oggetto che scende da un piano inclinato le seguenti forze:

- la forza della terra sull'oggetto (forza peso)
- la forza del piano inclinato sull'oggetto (for-

(*) M. Gagliardi, G. Gallina, P. Guidoni, S. Piscitelli: "Forze, deformazioni movimento; ed. Emme, 1989.

za vincolare) e la forza di attrito con verso opposto alla direzione del moto.

I ragazzi non sono riusciti a disegnare il diagramma delle forze: la difficoltà era dovuta alla necessità di scomporre la forza peso nelle due componenti: F_t e F_n .

Questa difficoltà è stata superata con l'intervento dell'insegnante che ha richiamato i giochi a squadre e la scomposizione vettoriale delle forze fatta in precedenza. A questo punto i ragazzi sono stati in grado di disegnare il seguente diagramma delle forze (fig. 4):

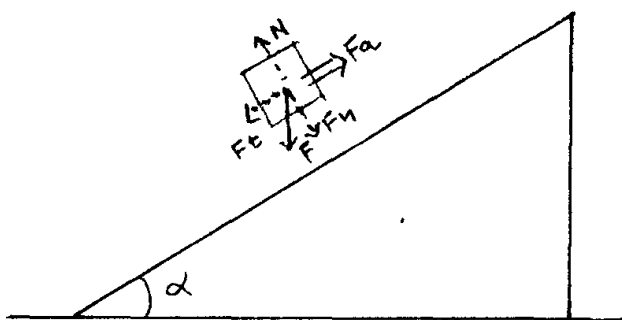


Fig. 4

F = Forza peso

F_n = Componente normale di F

F_t = Componente tangenziale di F

F_a = Forza di attrito

N = Reazione vincolare

e a stabilire le seguenti relazioni:

$$\vec{F}_n + \vec{N} = 0$$

$$\vec{F}_t + \vec{F}_a = 0 \text{ equilibrio}$$

$$\vec{F}_t + \vec{F}_a \neq 0 \text{ il corpo accelera verso il basso}$$

Per la situazione in cui lo stesso oggetto è sollevato lungo il piano inclinato i ragazzi hanno ridisegnato le stesse forze, ma con la forza di attrito con verso opposto a quello precedente. La risposta alla domanda iniziale è stata così soddisfatta.

- Analisi cinematica di un oggetto che scivola lungo un piano inclinato partendo da fermo

Nella attività precedente i ragazzi avevano osservato e verificato che:

- F è costante in ogni punto del piano inclinato.
- F cresce al crescere dell'inclinazione α fino al massimo per $\alpha = 90^\circ$.

Ora era necessario sapere come variavano velocità ed accelerazione in un corpo che scende lungo un piano inclinato.

L'analisi cinematica è stata svolta con l'aiuto di tre foto stroboscopiche che mostrano una biglia che scende da diverse altezze dello stesso piano inclinato.

L'analisi qualitativa ha portato a riconoscere che l'aumento di velocità è graduale nelle tre foto stroboscopiche. L'analisi qualitativa è stata seguita da una quantitativa: i ragazzi hanno riportato in

un grafico le misure delle distanze fra le posizioni successive della biglia e il punto di partenza in funzione del tempo. Il grafico risultante (t, s) è stato riconosciuto come quello proprio di un moto con accelerazione costante.

Dall'analisi delle tre foto stroboscopiche precedenti discendeva anche che l'accelerazione non dipende dall'altezza del piano inclinato, ma solo dalla sua inclinazione e che cresce al crescere di α fino ad $\alpha = 90^\circ$.

La stessa dipendenza dall'inclinazione della forza e della accelerazione ha permesso ai ragazzi di ipotizzare l'esistenza di una relazione fra forza ed accelerazione e che questa relazione dovesse essere di proporzionalità diretta. A questo punto l'insegnante ha introdotto in modo assiomatico la seconda legge della dinamica.

- Analisi dell'energia scambiata

Per quanto riguarda l'analisi dell'energia si è preso come livello di riferimento il piano del pavimento. Sulla sommità del piano inclinato si ha solo energia potenziale mentre alla base solo energia cinetica.

La relazione energia cinetica finale posseduta dall'oggetto alla fine del piano inclinato = energia potenziale iniziale non è stata subito accettata dai ragazzi in quanto avevano presente la seguente situazione sperimentale (fig. 5):

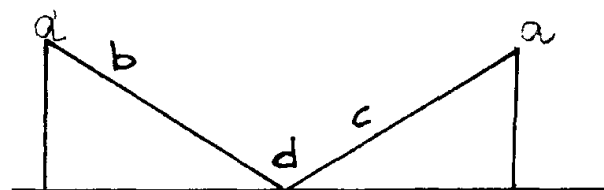


Fig. 5

in cui la biglia non raggiunge mai la sommità del secondo piano inclinato ma arriva solo fino a b, poi scende e risale fino a c e così via finché si ferma definitivamente in d. Una successiva attività ha approfondito il problema della conservazione dell'energia con l'introduzione anche del calore. A questo scopo è stato utilizzato un filmato del Dipartimento Scuola Educazione (DSE) (*).

- Attività di estensione e approfondimento

I ragazzi durante le sequenze precedenti avevano acquisito la capacità di vedere sotto l'aspetto cinematico, dinamico ed energetico situazioni di meccanica newtoniana. È stato proposto come verifica il seguente problema:

Sono dati due piani inclinati uguali da cui scendono da fermi due oggetti (fig. 6) rispettivamente

(*) a cura di C. Pontecorvo e M. Vicentini: "Calore ed energia".

di massa $m_1 = 1\text{kg}$ e $m_2 = 2\text{kg}$. Le due masse hanno uguale o differente velocità finale?

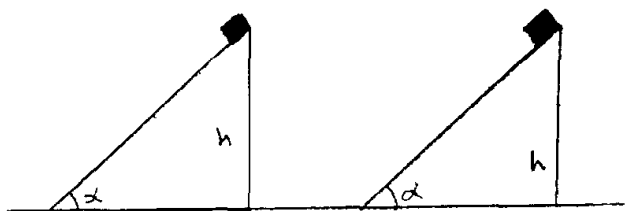


Fig. 6

I ragazzi hanno risposto in modo diverso: alcuni hanno privilegiato un ragionamento di tipo cinematico, altri hanno privilegiato l'aspetto energetico, altri ancora hanno risposto allestendo una situazione sperimentale.

Due ragazze, che per altro hanno ragionato anche in termini cinematici e quindi si aspettavano uguali velocità finali, hanno per esempio allestito un piano inclinato. Hanno preso due oggetti di uguale forma ma di peso differente e li hanno fatti scendere contemporaneamente lungo il piano inclinato osservando che arrivano insieme alla fine del piano inclinato.

L'esperienza confermava la loro aspettativa: le due masse avevano uguale velocità finale perché "percorrevano lo stesso spazio nello stesso tempo".

Gli allievi che hanno privilegiato l'aspetto cinematico hanno utilizzato un ragionamento al limite. Hanno osservato che due corpi di massa diversa lasciati cadere liberamente nel vuoto insieme e dalla stessa altezza arrivano contemporaneamente a terra e che la caduta libera può essere considerata come la caduta da un piano inclinato con $\alpha = 90^\circ$.

Un ragazzo infine ha suggerito di analizzare l'energia scambiata. Tutti i ragazzi sono intervenuti per impostare il seguente sistema di equazioni

$$m_1 gh = \frac{1}{2} m_1 \cdot v_1^2$$

$$m_2 gh = \frac{1}{2} m_2 \cdot v_2^2$$

che è stato risolto ottenendo

$$v_1 = v_2 = \sqrt{2gh}$$

2.3 Conclusioni

L'insegnante ha sempre cercato di svolgere un intervento di stimolo nei confronti dei ragazzi e ha cercato per quanto possibile di intervenire minimamente. La valutazione dal punto di vista didattico delle attività svolte può essere fatta tenendo presenti i seguenti parametri:

- l'interesse, che è sempre stato costante e in alcune attività in particolare quelle sperimentali, elevato;

- la capacità di applicare in modo corretto le nozioni fisiche apprese a situazioni ben precise (cfr attività finali);

- la capacità di passare rapidamente da risposte a livello "di senso comune" a risposte corrette dal punto di vista disciplinare (cfr attività iniziali in cui i ragazzi sono invitati a riesaminare situazioni di meccanica in termini di forza e di energia);

- la capacità di svolgere problemi di tipo, numerico come applicazione di nozioni acquisite, con discreti risultati.

3. Sperimentazione in prima I.T.I.S.

Le lezioni sulla dinamica, che qui illustriamo, sono state precedute da lezioni di cinematica, svolte con la stessa metodologia. In quelle lezioni la sperimentazione di laboratorio è stata molto più massiccia che in queste. Si è ampiamente utilizzata la strumentazione di Microcomputer Based Laboratory (*), che ha permesso di studiare in modo diretto e immediato un gran numero di movimenti di persone e di oggetti, e di effettuare accurate analisi di grafici, osservazioni generali sui moti, sviluppare, distinguere, gestire e correlare idee e formalismi circa traiettoria, spazio, tempo, velocità media e istantanea, accelerazione... Naturalmente queste lezioni sono state determinanti per la fase di cui riferiamo qui, sotto tutti gli aspetti.

Tra l'altro hanno fornito un grosso bagaglio 'sperimentale' cui ci siamo riferiti nel seguito.

Situazione iniziale

L'introduzione allo studio dinamico del moto è stata fatta mediante una sollecitazione volutamente ampia e generica:

"Quali elementi determinano le caratteristiche di un movimento?"

Avevamo l'intenzione di richiamare alla coscienza le concezioni spontanee per utilizzarle come materiale di inizio. Inoltre abbiamo ritenuto opportuno introdurre subito l'idea che è utile chiamare in causa più di una sola grandezza. In particolare sono importanti i termini "forza" ed "energia". Dico termini e non idee o concetti, perché inizialmente queste parole non corrispondevano per i ragazzi a due grandezze distinte e correlate tra loro in modo chiaro. Ecco alcuni stralci della registrazione:

Paolo sta riferendosi a un gesso da lavagna che cade da un'altezza considerevole: – "visto che è leggero, per lo spostamento d'aria può muoversi..."

(*) R.K. Thornton, la Fisica nella Scuola, XXIII, 2, pagg. 81-82, 1991

Insegnante: "Ma quello che fa l'aria che cos'è?"

Giacomo: "Una forza".

Valeria: "L'oggetto mentre scende deve sfondare l'aria".

Nelle argomentazioni dei ragazzi, tra altre cose, compariva con una certa frequenza il termine forza. In nessun caso invece hanno utilizzato spontaneamente la parola energia.

Insegnante: "Voi parlate di forze, attriti, aria eccetera... Non vi ho mai sentiti nominare l'energia".

Giovanni: "Si può parlare di energia quando un oggetto è sottoposto ad una energia come del vento o di un agente esterno al corpo. Quando c'è qualcosa che modifica la traiettoria".

Anna: "Parlando di forze parliamo già di energia. Quando lascio cadere l'oggetto c'è una energia legata all'attrito con l'aria".

Luca: "C'è energia nella caduta perché l'oggetto si muove e perché con l'attrito si riscalda".

Matteo: "Ma loro cosa intendono per energia?"

Anna: "L'energia è una forza".

Enrico: "L'energia c'è per forza. C'è perché quando è qua e lo lascio, ha energia potenziale, a metà energia cinetica, e quando è giù l'energia si disperde nelle particelle".

(Il ragazzo evidentemente riferisce reminiscenze scolastiche precedenti).

Anna: "Sarebbe la stessa cosa di dire forza. C'è una forza all'inizio, poi cade e alla fine non c'è più forza".

La semplice introduzione della parola energia, ha suscitato automaticamente una serie di spunti per la prosecuzione del lavoro, ed ha messo in luce alcuni problemi-chiave espressi esplicitamente dagli allievi stessi: cosa si deve intendere per energia? Forza ed energia sono due cose diverse o no? Personalmente, oltre le due sollecitazioni sopra riportate, non ho fatto altro che coordinare gli interventi e dare evidenza ai problemi che via via emergevano.

Si trattava ora di entrare nel vivo del lavoro. Prima di descriverlo, spendiamo alcune parole per illustrare l'organizzazione generale delle lezioni effettuate e la struttura della descrizione schematica qui fatta.

Le lezioni sono risultate organizzate in 3 grandi gruppi che qui chiamo sequenze. Ognuna di esse grossomodo sviluppava i temi che sono riassunti in un singolo quadro della "traccia di itinerario" (si faccia riferimento al precedente articolo che illustra metodologia e principi generali della ricerca). Per comodità del lettore riporto la tabella delle corrispondenze:

SEQUENZA 1: Casi statici	<->	QUADRO A
SEQUENZA 2: Casi stazionari	<->	QUADRO B
SEQUENZA 3: Casi dinamici	<->	QUADRO C

Ogni sequenza didattica era costituita da queste tappe:

1) L'insegnante proponeva uno spunto per la discussione, generalmente tramite la messa a fuoco di una "situazione-problema" (che poteva essere direttamente osservata ed analizzata in laboratorio o solo richiamata alla memoria da lezioni precedenti), oppure semplicemente tramite l'enunciazione di una "domanda-tema" opportunamente formulata.

2) I ragazzi liberamente facevano osservazioni e proposte, che via via sviluppavano tramite il confronto con i compagni e la guida dell'insegnante, che a volte introduceva anche sue proposte. Gli allievi erano coscienti del fatto che osservazioni ed interventi erano completamente liberi, e che questa era una fase di "lavori in corso", in cui ciò che via via emergeva non doveva essere considerato definitivo in alcun senso. Questa fase poteva comportare anche più lezioni.

3) Si chiarivano e si ricostruivano i fili più importanti dei discorsi fatti, chiarendo ciò che poteva essere considerato come scientificamente corretto, quello che doveva ritenersi semplicemente una approssimazione provvisoria, quelli che rimanevano problemi aperti da analizzare successivamente...

4) Infine si curava la acquisizione degli aspetti formali e matematici e il consolidamento delle conoscenze e delle abilità acquisite, tramite l'esame e la risoluzione dei problemi.

Per ognuna di queste sequenze di lezioni riporto qui soltanto stralci delle tappe 1) e 2), di discussione. Per quanto riguarda le tappe 3), le sintesi parziali coincidevano in generale con quanto già illustrato nei quadri della traccia di itinerario, perciò mi limito a qualche cenno.

Al termine, nel paragrafo intitolato "conclusioni", si riporta la formalizzazione finale, nella formulazione trattata dai quaderni degli allievi.

Seq. 1: Casi statici

Ho introdotto la discussione con questa domanda: "Posso avere forze senza moto?"

Gli allievi stessi hanno subito proposto una lunga serie di esempi in cui questo si verifica:

Matteo: "Quando spingiamo contro il muro, il muro non si muove ma noi applichiamo una forza".

Sandro: "Quando spingiamo un oggetto, se la forza che diamo non è sufficiente per spostarlo, questo oggetto ci ridà indietro la stessa forza".

Insegnante: "C'è energia?"

In questi casi l'idea di energia non riscuoteva alcun interesse. Per i ragazzi era evidentemente qualche cosa di strettamente legato a fenomeni in divenire e non a casi statici. Del resto non è del tutto in contrasto con quanto insegna la Fisica: non vi

è infatti trasferimento fra le varie forme di energia – potenziale, elastica e gravitazionale – in gioco.

Una situazione ideale per dare forma più strutturata al concetto di forza e per indurre gradualmente la convinzione che forza ed energia siano ben distinguibili, dato che ci sono situazioni in cui è naturale chiamare in causa l'una e non l'altra.

In questo ambito, abbiamo scelto di analizzare per prima cosa SISTEMI di oggetti in interazione, presi nel loro complesso, prima di soffermarci a considerare le azioni subite da un singolo corpo.

Abbiamo osservato la fotografia di due bambini seduti per terra uno di fronte all'altro con i piedi a contatto. I due bambini mantenevano in trazione una robusta molla elicoidale. I ragazzi hanno individuato due "zone" dove si localizzavano forze: le mani e i piedi dei due bambini. Anche mediante altri esempi (persona sul ghiaccio o sul tappeto, che cerca di spingere un oggetto molto massiccio) abbiamo evidenziato che le forze si presentano in sistemi chiusi. Nel linguaggio degli allievi: "L'uomo fa forza sull'armadio e contemporaneamente sul pavimento. Se mancasse una di queste 'azioni', non potrebbe esserci neppure l'altra. L'armadio fa 'resistenza' sull'uomo e contemporaneamente 'preme' sul pavimento. Anche per l'armadio le due azioni non possono sussistere che in contemporanea: eliminandone una si elimina anche l'altra. Il pavimento, oppure il tappeto, viene sottoposto a una trazione da parte dei piedi dei ragazzi (tant'è vero che se il tappeto è cedevole, si allunga leggermente)".

Questo tipo di analisi è sembrata intuitiva e veniva riapplicata ad altri casi, anche abbastanza diversi da quelli già esaminati:

- sostegno che regge una molla con un peso
- mattone appoggiato su un tavolo
- mattone appoggiato su una spugna cedevole, a sua volta appoggiata su un tavolo.

Tuttavia rimaneva un grosso interrogativo: le "azioni", "forze", "spinte", "trazioni", "resistenze", "pressioni", "compressioni", "pesi" erano da ritenersi grandezze tra loro omogenee?

Come appariva evidente dal linguaggio usato, non tutte le forze presenti venivano distinte l'una dall'altra: si sovrapponevano forze e pressioni (forze distribuite su superfici); alcune forze, soprattutto le reazioni vincolari non erano sempre individuate. Tenendo conto di questo stato di fatto, ho guidato il resto del lavoro agendo su vari fronti:

- 1) approfondimento critico dell'analisi dei sistemi meccanici
- 2) approfondimento delle relazioni tra forze e deformazioni, culminato nella classica trattazione della taratura di una molla e nel successivo utilizzo di dinamometri
- 3) natura della forza peso, sua identificazione con la forza gravitazionale, distinzione tra peso e massa

- 4) intensità e direzione della forza di attrito.

Illustro in particolare il punto 1) che ritengo sia il punto cruciale di questo approccio allo studio della forza. Schematizzo in due tappe il discorso:

a) La scomposizione di un sistema in determinate parti è sempre una scelta non univoca, che facciamo, a volte in modo semiosciente, e che invece è bene saper esplicitare con chiarezza. Esempio: un sistema come quello in figura 7 può essere scomposto in moltissimi modi, tutti leciti.

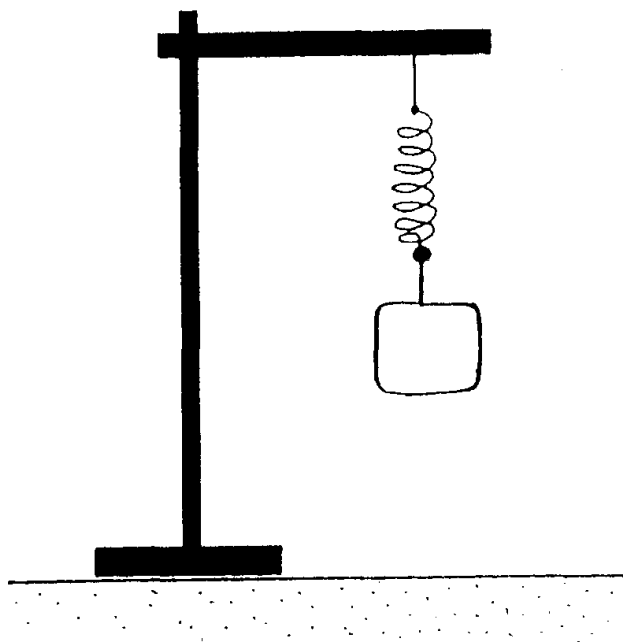


Fig. 7

Uno potrebbe essere: sostegno, molla, pesetto, terreno. Un altro: parte verticale del sostegno, parte orizzontale, molla, pesetto, terreno. Un altro ancora: come il precedente, immaginando in più di considerare la molla divisa in due parti una inferiore e una superiore...

Per ogni ulteriore suddivisione che si opera nel sistema, compare almeno una nuova coppia di forze. La scelta può essere guidata da considerazioni di economia e di semplicità. Una volta fatta, va mantenuta per non incorrere in errori di procedimento.

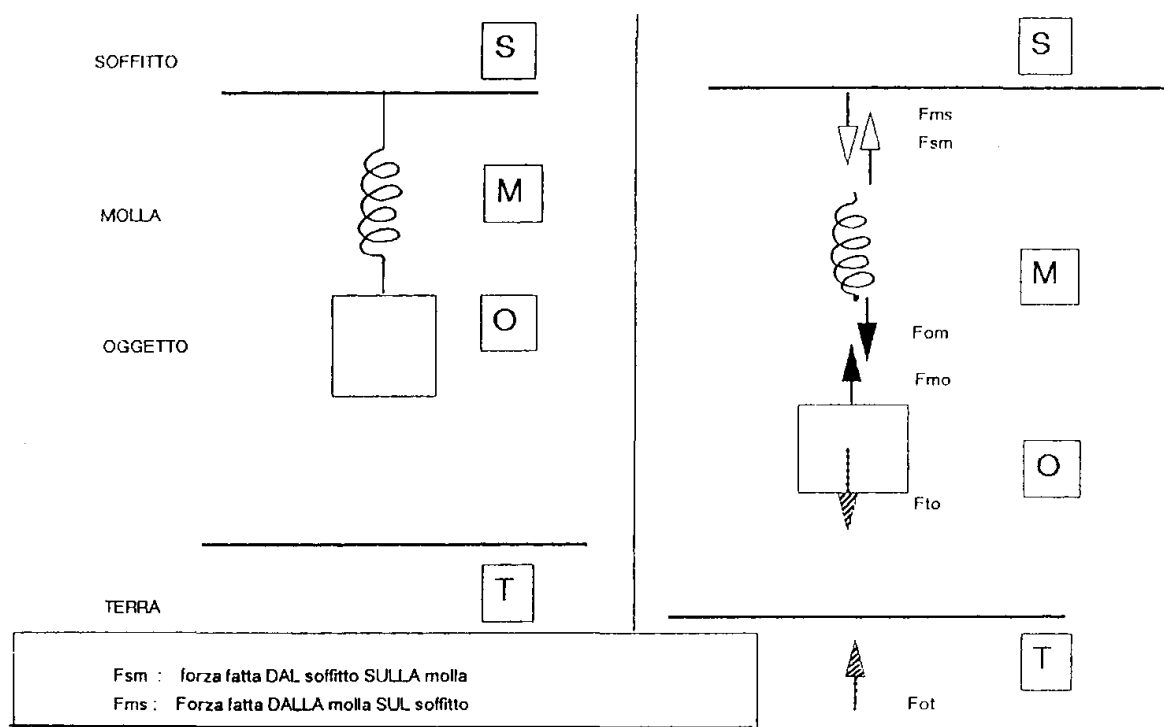
b) scelti gli elementi del sistema da prendere in considerazione, è importante saper effettuare visioni di insieme e nello stesso tempo saper fare degli "zoom" sui particolari, considerare singolarmente un oggetto, oppure una singola coppia di forze tralasciando per un momento la visione globale, per poi fare gli opportuni raccordi tra le diverse prospettive.

Per un esempio ci riferiamo ancora alla figura 7. La visione globale evidenzia il fatto che molla-sostegno terreno si fanno tutti forza RECIPROCA-

MENTE. Uno "zoom" ci ha portati a chiederci più in particolare quale fosse la natura della forza FATTA DA il terreno SU il pesetto e quale la direzione e il verso di questa forza e a chiederci lo stesso per la reciproca forza FATTA DA il pesetto SU il terreno... per scoprire che le due AZIONI sono due facce della stessa INTERAZIONE: la gravitazione.

Oppure un altro modo di fare uno "zoom" è stato quello di fissare l'attenzione solo sulle forze di cui la molla è OGGETTO. Nel mio linguaggio è evidente la metafora fotografica (lo zoom) e quella linguistica (le forze hanno un SOGGETTO che le fa e un OGGETTO che le subisce). È evidente che né il solo zoom né la sola visione globale portano ad una descrizione soddisfacente ma che vanno fatti entrambi e poi raccordati. Parlare solo di

soggetto e oggetto senza considerare il fatto che essi sono scambiabili avrebbe fatto perdere di vista che le forze sono INTERAZIONI; e d'altra parte parlare solo interazioni avrebbe portato a non saper fare diagnosi e previsioni sullo stato di un dato sistema: per esempio a non poter prevedere quali molle possono essere adatte per sostenere un dato pesetto senza deformarsi permanentemente. Accanto alle metafore usate, uno strumento di espressione e di interpretazione insostituibile è stata la rappresentazione grafica delle forze tramite frecce, che tra l'altro è risultata intuitiva e spontanea, almeno fino al momento in cui è stata utilizzata solo per rappresentare la direzione e la "zona" di applicazione delle varie forze, senza chiamare in causa aspetti quantitativi (fig. 8).



In un discorso articolato come ho illustrato è chiaro che i punti 2) 3) 4) sono stati inseriti e intesi all'interno dei singoli zoom.

Le conclusioni, espresse con le parole usate dai ragazzi, sono state:

A) Se due oggetti a e b sono in situazione tale da farsi forza, accade che il fare forza di a su b non può esistere senza che esista il viceversa.

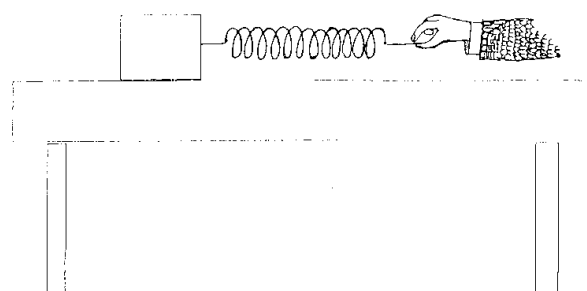
B) La forza fatta da b su a ha lo stesso valore della forza di a su b.

C) Due forze che agiscono sullo stesso elemento di un sistema possono sommarsi algebricamente (abbiamo considerato per questo solo gli esempi in cui le forze avevano la stessa direzione).(*)

(*) L'affermazione B) in realtà è stata data come 'legge'. Su questo punto non è stata consentita la discussione. I ragazzi l'hanno accettata, anche se inizialmente con qualche riserva.

Seq. 2: Casi stazionari

Abbiamo considerato il caso di una persona che trascina un oggetto appoggiato su un piano e attaccato ad una molla, a velocità costante come mostra la fig. 9.



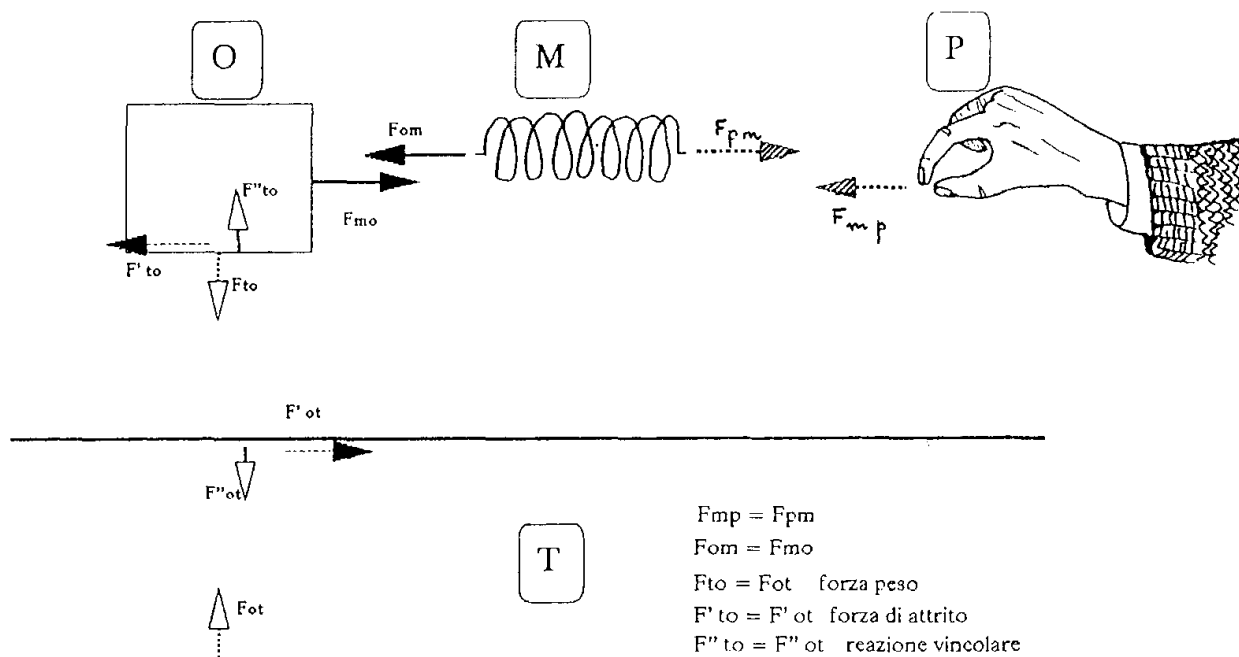
Un ragazzo trascina molla e blocco a velocità sensibilmente uniforme.

Il diagramma di forze del sistema considerato non è diverso dal diagramma del corrispondente caso statico: una persona che tenta di smuovere l'oggetto senza riuscirci.

La trattazione è stata fatta in due tappe:

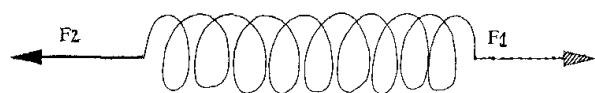
1) Analisi dell'intero sistema, tramite l'introduzione e il commento di diagrammi *éclatés*. Questo

non ha comportato problemi di rilievo né per quanto riguarda il numero né per la natura delle interazioni che i ragazzi individuavano. L'intervento dell'insegnante è stato principalmente volto a affinare e rettificare la correttezza della formalizzazione grafica, chiarendone i significati simbolici e le regole sintattiche. Riporto un esempio di diagramma concordato con la classe (fig. 10).



A questo punto si poteva essere relativamente sicuri del fatto che il concetto di forza delineato in statica, veniva riconosciuto e riapplicato con proprietà simili (interazione, azione e reazione) anche in casi di moto.

2) Zoom sulla molla (fig. 11): una volta fissata l'attenzione sull'elemento, ho chiesto previsioni sulla entità delle forze che essa subisce da parte del resto del sistema.



F1 : forza fatta dalla mano sulla molla
F2 : forza fatta dall'oggetto sulla molla

Fig. 11

Insegnante: "Se $f_1 = 10$ N quanto varrà f_2 ?"

Paolo: " $f_2 < 10$ N sennò starebbe fermo".

Marta: " $f_1 = f_2$ solo se tiriamo la molla contemporaneamente e uniformemente, senza scossoni. Questo va bene anche per un nastro rigido".

Umberto: "Quando la mano tira, fa un'energia".

Alessandro: "L'omino che tira, spende energia".

Giacomo: "L'attrito fa resistenza all'omino, allora anche lui spende energia".

Come è evidente forza ed energia non erano ancora chiaramente distinte. L'intenzione era condurre i ragazzi ad effettuare analisi più puntuali, non solo delle parole energia e forza, ma soprattutto dei metodi di analisi della realtà che sono sottesi ad esse.

Non ci interessava una definizione a priori, del resto piuttosto difficile da formulare, ma una graduale enucleazione delle due grandezze, tramite l'individuazione e la descrizione delle proprietà che le distinguono.

Insegnante: "Con l'energia devo fare un bilancio basato su simmetrie, istante per istante per istante come per le forze, oppure devo fare un bilancio dare/avere?"

Giacomo: "dare/avere: la mano perde energia e la molla la acquista".

Valeria: "Volevo chiedere se noi parlando di energia intendiamo una energia sola...".

I ragazzi hanno cominciato ad utilizzare per l'energia non più solo frasi del tipo: "L'energia c'è oppure non c'è", ma anche: "L'energia viene DATA e PRESA".

Ci si avvicina con gradualità a pensare all'energia come a qualcosa che si può immagazzinare, trasferire e trasformare. Ovviamente questa terminologia non era invece adatta per le forze così come erano state fin qui studiate, e questo favoriva l'idea della distinguibilità delle due grandezze.

Anna: "Non possiamo dire che le forze sono energie?"

Insegnante: "Nei due casi (statico e stazionario) hai SCAMBIO di forze più o meno nello stesso modo, ma non in entrambi i casi hai TRASFERIMENTI di energia".

Giacomo: "Per me nel caso di scambio di energia entra l'accelerazione. Quando passo da velocità zero e tiro, si fa maggior sforzo, quando la velocità si stabilizza, si fa uno sforzo minimo".

Il ragazzo evidentemente qui non ha colto appieno il senso del mio discorso.

Prendendo comunque spunto da lui, ho enfatizzato e illustrato dettagliatamente la distinzione tra fase transitoria accelerata e fase stazionaria, soffermandosi in particolare sulla descrizione cinematica dei due tipi di moto.

In seguito ho esposto alla classe queste considerazioni:

a) Istante per istante, sia quando la molla è ferma, sia quando è nella fase accelerata o in quella stazionaria, il diagramma delle forze è sempre perfettamente simmetrico: il principio di azione e reazione è rispettato per ogni singola coppia di forze. Se si fa uno zoom su un elemento solo del sistema, per esempio la molla, nella fase statica e in quella stazionaria si ottiene forza risultante zero, mentre nella fase transitoria la somma algebrica delle forze è diversa da zero.

b) Per "spiegare perché" il sistema mano-molla-oggetto incominciava a muoversi è possibile in un primo momento chiamare in causa l'energia. Il sistema in questione non è energeticamente chiuso: riceve energia dalla persona proprietaria della mano e cede energia al terreno, per la presenza delle forze di attrito.

L'inizio del moto coincide con l'inizio del trasferimento di energia. La fase transitoria si ha quando il bilancio dare/avere dell'energia alla molla è in attivo e la fase stazionaria quando il bilancio istante per istante è in pari.

c) A seconda della particolare scelta degli elementi che compongono il sistema, le modalità dei trasferimenti e delle trasformazioni di energia, appaiono descritte in modo diverso: Se per esempio scelgo di considerare il sistema mano-molla-oggetto, il trasferimento al sistema dell'energia può essere descritto in questi termini: "la persona perde energia 'muscolare', a vantaggio della mano e poi della molla, che comincia a muoversi, acquistando una energia cinetica che viene immediatamente

convertita (istante per istante) in energia potenziale elastica. Il moto dell'insieme del sistema verso l'uomo che tira, inizia quando ha inizio il trasferimento, interno, dalla molla all'oggetto. In questi casi si ha trasferimento di energia accompagnato da trasformazione di una forma di energia in un'altra".

Se si sceglie invece di effettuare uno zoom sul solo oggetto trascinato, l'analisi è più semplice: "l'oggetto è fermo finché non riceve energia, comincia a muoversi quando comincia a riceverne e la modalità del moto, se accelerato o uniforme dipenderà dal tipo di flusso energetico: se non stazionario o se stazionario". Naturalmente quest'ultima è stata la scelta ritenuta più comprensibile ed efficiente.

Seq. 3: Casi dinamici

Abbiamo studiato, come emblematico, il caso delle oscillazioni di una molla. In precedenza era stato fatto un approfondito esame del moto oscillatorio di una molla, giovandoci dell'ausilio della già citata strumentazione MBL (Thorthon 1991). Avevamo fissato l'attenzione sui grafici ottenuti sperimentalmente e avevamo ricavato anche una analisi istante per istante delle grandezze cinematiche s , v , a . Avevamo poi osservato lo smorzamento delle oscillazioni e la costanza del periodo. Lo smorzamento diventa evidente se si osserva l'oscillazione su tempi lunghi rispetto al periodo, ma se si confrontano due oscillazioni successive, il fenomeno si può trascurare. Ne segue che ogni singola oscillazione può considerarsi simmetrica rispetto alla posizione di riposo della molla. La molla utilizzata era una molla di acciaio a spire molto larghe e sottili, di diametro circa 10 cm, estremamente cedevole alle sollecitazioni, e molto lunga se lasciata appesa ad un supporto. (Si trattava di una di quelle in vendita nei negozi di giocattoli con il nome di 'molla che scende le scale').

A questo punto si è iniziata l'analisi delle forze e delle energie in gioco. Abbiamo studiato dapprima il sistema e in seguito abbiamo considerato un elemento singolo.

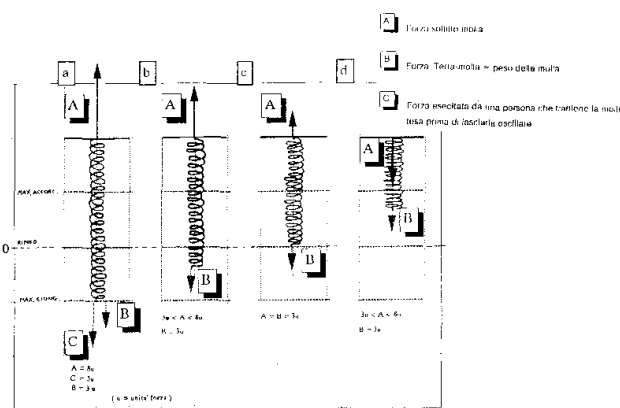


Fig. 12

Abbiamo immaginato di effettuare quattro foto istantanee della molla in quattro diverse posizioni in una singola oscillazione, come mostra la fig. 12. La istantanea a) mostra la molla nella sua massima elongazione, quando ancora è trattenuta dalla mano prima di lasciarla oscillare, la b) in un punto intermedio tra massima elongazione e posizione di equilibrio, la c) mentre passa per la posizione di riposo, la d) per una posizione intermedia tra questa e quella di massimo accorgimento.

Sono state analizzate le forze agenti sulla molla da parte del resto del sistema. La figura 12 è stata disegnata dai ragazzi dopo averne discusso animatamente, e dopo avere scartato altre ipotesi di rappresentazione e di interpretazione.

Riporto alcuni nodi della discussione a mio avviso significativi:

– Il fatto che la forza soffitto-molla andasse diminuendo tra a) e c) non è stato motivo di controversia.

– Così pure che la forza soffitto-molla aumentasse in modulo tra c) e d) e che il peso invece rimanesse costante.

– Il fatto che la forza asta-molla cambiasse verso, inizialmente non era osservato. Ci si è arrivati immaginando di far effettuare ad una mano le funzioni dell'asta, cioè riflettendo su esperienze percettive.

– L'immagine c) è stata, naturalmente la più controversa. Alcuni ragazzi facevano un ragionamento di questo tipo: se la forza complessiva diminuisce fino a c) per poi cambiare verso ed aumentare, in c) non può che valere zero. È un ragionamento di stile matematico che verte principalmente su una idea di continuità della variabile forza rispetto al tempo o rispetto allo spazio. Altri, meno portati al ragionamento astratto o più interessati agli aspetti concreti, pensavano che in tale ipotesi non potesse giustificarsi il moto della molla. Il conflitto è stato superato quando uno dei leader del secondo gruppo, si è convertito alla tesi del primo esclamando: "Hanno ragione loro, lì si muove per inerzia!".

Sono seguiti altri interventi:

Giacomo: "Quando tiriamo la molla verso il basso per farla iniziare ad oscillare, diamo energia potenziale che tende verso l'alto. quando si lascia la molla, diventa energia cinetica per attrito e calore. Quando arriva in d), viene scaricata questa forza sull'asta, l'asta si oppone e consuma un po' di questa energia. Poi la restituisce alla molla che scende.

Matteo: "Secondo me c) è una fase e d) un'altra. Per quanto riguarda l'energia, quando le forze sono uguali ed opposte, cioè in c), le energie sono uguali.

Insegnante: "Distingui chiaramente quando consideri gli istanti e quando consideri le fasi!".

Matteo: "Secondo me, l'istante c) in cui la molla è in equilibrio, è la parte terminale della fase iniziata con b). Nell'istante c), l'energia potenziale è diminuita diventando cinetica. Nella fase c)-d) la molla trasferisce energia cinetica all'asta che poi la restituisce ancora, cioè oppone resistenza.

L'intervento di Giacomo denuncia chiaramente il persistere tenace di una mancata distinzione fra energia e forza. Infatti secondo lui "l'energia potenziale si trasforma... e poi viene scaricata come forza sull'asta". Fin qui potrebbe trattarsi solo di una confusione nell'uso delle parole. Ma poi si nota che per lui "l'energia potenziale tende verso l'alto" e che "l'asta si oppone": una sorta di proprietà di tipo vettoriale, sicuramente incompatibile con il concetto fisico di energia.

Il primo intervento di Matteo presentava caratteristiche analoghe.

Nel secondo intervento, Matteo si esprimeva in modo già un poco più corretto.

Va notato che gli interventi dei ragazzi presentano grossi problemi di interpretazione. A noi interessava in primo luogo valutare se fosse in atto un avvicinamento al modo di espressione e di organizzazione delle idee tipico della fisica. Non va dimenticato quanto segue:

1) La non linearità dei processi cognitivi presuppone la possibilità che, pur essendo in atto un cambiamento, ci siano passi avanti e passi indietro.

2) Il tipo di contratto didattico instaurato autorizzava pienamente i ragazzi a scegliere se utilizzare o no le conclusioni di una precedente sequenza didattica, di fronte ad una situazione nuova.

Ciò premesso, ho osservato in moltissimi casi che i modi di ragionare "scorretti" diventavano via via più trattabili, nel senso che erano sufficienti da parte mia richiami sempre più coincisi ed allusivi per promuovere immediati cambiamenti nella direzione desiderata.

Conclusioni

Nel corso delle ultime lezioni si è effettuata una analisi retrospettiva dell'intero lavoro svolto, che ha portato alla formulazione delle conclusioni qui riportate:

A) RIGUARDO ALLA FORZA

1) $F_{ab} = F_{ba}$ Azione e reazione.

2) se $v = \text{costante} \Leftrightarrow F_{\text{risultante}} = 0$.

Corollari: a) Se $F_{\text{risultante}} \neq 0 \rightarrow$ moto accelerato

b) Se $F_{\text{risultante}} \neq 0$ e non cambia nel tempo $\rightarrow$ moto uniformemente accelerato

c) Se $F_{\text{risultante}} \neq 0$ e cambia nel tempo $\rightarrow$ moto accelerato vario (molla oscillante).

3) Si intuisce che tra forza ed accelerazione c'è una stretta dipendenza.

B) RIGUARDO ALL'ENERGIA

1) Energia $\neq$ Forza.

2) Le forze si bilanciano vettorialmente istante per istante, mentre l'energia è qualcosa che si trasferisce e/o si trasforma nel corso di una intera fase (in modo diacronico).

3) L'energia totale si conserva.

In una fase successiva, ma sempre nel corso della classe prima, abbiamo anche affrontato più esplicitamente la legge $F = ma$. All'inizio della seconda abbiamo affrontato lo studio più dettagliato e formalizzato dell'energia, e la messa a punto della formalizzazione e del calcolo vettoriale per le forze.

Valutazioni Generali

Le osservazioni che sto per esporre tengono conto anche dei risultati emersi nel secondo anno del biennio ITIS, durante lo svolgimento del successivo programma, effettuato in modo tradizionale e analogo nelle tre classi parallele a me affidate per l'insegnamento di fisica. In questo senso si possono ritenere risultati permanenti e osservabili anche fuori dal contesto in cui sono sorti. S posso-
no riassumere così:

Rispetto alle parallele classi di controllo abbiamo avuto risultati lievemente superiori per quanto riguarda i compiti scritti (esercizi di tipo tradizionale).

Risultati del tutto diversi invece si sono verificati nel clima generale della classe:

- Nelle classi tradizionali i ragazzi hanno uno stile di apprendimento molto più passivo.

- Pochi fanno domande e quando lo fanno è più per chiarire dettagli di tipo formale che per effettuare il senso generale.

- La capacità di esporre il proprio pensiero e le proprie teorie è meno sviluppata e lo è meno anche la capacità di esporre le teorie scientificamente accreditate.

Questo tipo di risultati è stato confermato anche dalla verifica conclusiva dell'intera parte di meccanica, effettuata nel dicembre del secondo anno, che consisteva in una prova mista di esercizi, domande e test. Tale prova certamente lunga e complessa ha dato risultati mediamente discreti, e si sono avuti casi anche di profitto decisamente ottimo. La stessa prova nelle classi di controllo è risultata invece decisamente improponibile, soprattutto per quanto riguarda i test e le domande.

Si può dunque concludere che in generale i ragazzi della classe sperimentale hanno sviluppato curiosità e interesse per la fisica, hanno acquistato

una certa autonomia nello studio e nella ricerca, buone capacità di orientamento e di analisi in problematiche complesse, e discrete capacità espressive nel campo specifico della fisica.

Un'ultima osservazione riguardante l'apprendimento individuale. Gli allievi di capacità basse o medie hanno dato risultati leggermente migliori rispetto alle altre classi e hanno subito un minor numero di insuccessi finali in fisica. Gli allievi di capacità buone ed ottime hanno acquisito livelli di preparazione nettamente superiori in qualità rispetto ai colleghi di analoghe capacità di classi tradizionali.

Riporto infine il testo dell'ultima verifica di cui ho parlato sopra.

Testo verifica

Esercizi:

1) Un pendolo viene lasciato oscillare a partire da una quota h . Arrivato nella posizione verticale il filo, subito sopra il pendente, incontra una lametta e viene tagliato. La pallina, liberata dal filo viene lanciata su un piano orizzontale con attrito. Qui si ferma dopo uno spazio s . Il pendente ha massa M .

Dati $h = 2$ m, $s = 12$ m, $M = 0,5$ kg, di chiede il valore della forza di attrito che frena la pallina lungo il piano.

2) Un'automobile arriva ai piedi di una salita con velocità V_0 . Subito prima di impegnarsi nella salita, spegne i motori. Sapendo che la salita è alta 10 m, che $V_0 = 80$ km/h, che la pendenza α è di 15° e che lungo la salita viene trasformato il 40% dell'energia disponibile in energia termica per effetto degli attriti, valutare se l'auto riesce a superare la salita. Se sì, calcolare a che velocità arriva in cima. Calcolare inoltre la decelerazione lungo la salita.

3) Un oggetto viene lanciato verso l'alto con velocità $V_0 = 75$ m/s in direzione verticale. Calcolare l'altezza cui arriva.

Quesiti

A) Un asino tira un carretto. Dato che il principio di azione e reazione dice che $F_{ac} = F_{ca}$, come spieghi che l'asino riesce a far muovere il carretto?

B) Il tempo di discesa di un oggetto da un'altezza h è lo stesso se un oggetto cade liberamente o se scivola su un piano inclinato senza attriti?

C) Devi illustrare a un ragazzino le principali differenze tra forza ed energia. Che argomenti usi?

Test*vero/falso**motivare*

a) in un moto armonico l'accelerazione è nulla nel punto medio della traiettoria.

b) la velocità finale di caduta di un corpo in assenza di attriti dipende dal valore del peso del corpo.

c) due squadre impegnate nel tiro alla fune esercitano l'una sull'altra forze uguali ed opposte anche quando una avanza e l'altra retrocede.

d) la quantità totale di energia da fornire ad un corpo per sollevarlo da una quota h_1 ad una quota h_2 dipende dalla rapidità con cui si compie l'operazione.

e) l'energia di cui sopra dipende dal percorso che faccio fare al corpo (senza attriti).

f) un'auto scende sul versante di una valle e risale dall'altra parte. Se la quota del punto di partenza e del punto di arrivo sono uguali, il carburante è stato usato solo per vincere gli attriti.

Sono riportate le figure dell'articolo "Storia di una goccia di rugiada", pubblicato nel numero 2.

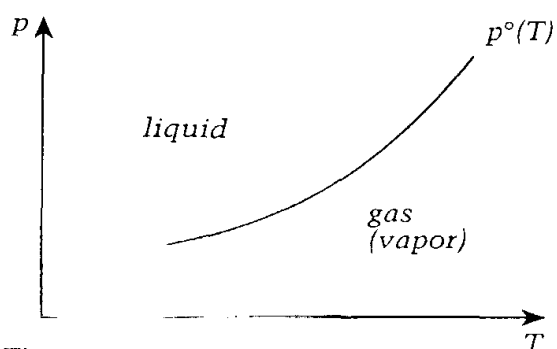


Fig. 1

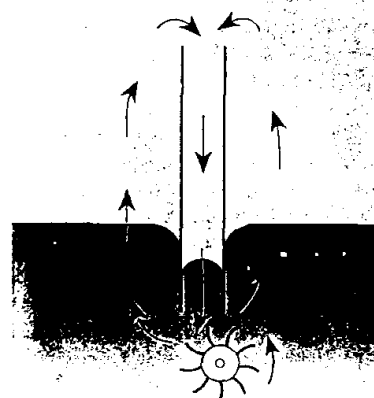


Fig. 2



Fig. 3

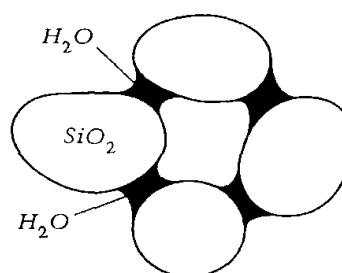


Fig. 4