

2. Metodo e finalità dell'insegnamento della fisica

2.1 Una riflessione sul concetto di forza

➤ *Introduzione del concetto di forza in un tipico testo universitario*

Premessa: il problema centrale della meccanica classica è il seguente:

- dato un corpo di caratteristiche note (massa, carica elettrica, volume, ecc),
- note la sua posizione e velocità iniziali,
- qual è la posizione occupata dal corpo agli istanti successivi?

L'approccio tipico è di enunciare le *leggi della dinamica* (empirismo):

- Prima legge della dinamica → “Principio d'inerzia”: forza come interazione con “l'ambiente circostante”: se la forza è nulla, la velocità è costante (spazio omogeneo, equivalenza fra sistemi di riferimento “inerziali”)
- Seconda legge → serve per definire e misurare le forze, o le masse (*definizioni “operative”*):
 - si inizia con una massa fissa (1 kg),
 - una forza doppia produce accelerazione doppia, a parità di massa,
 - una massa doppia ha una accelerazione metà, a parità di forza,
 - ne segue che, a parità di accelerazione, massa doppia richiede forza doppia.
- Terza legge → azione e reazione: l'interazione è fra due corpi e la forza di “azione” è uguale e contraria a quella di “reazione”

Difficoltà concettuale: nella “definizione operativa” di forza manca una giustificazione del perché si arriva a quella definizione e non ad altre. L'intuizione di Newton fu che l'*interazione fra due corpi* (non con “l'ambiente”) è caratterizzata da una grandezza fisica, la *forza*, che è *funzione della posizione*, cioè della distanza fra i corpi, e che tale grandezza è legata con proporzionalità diretta alla *variazione nel tempo della velocità* (non, ad esempio, alla variazione nello spazio della velocità, come verrebbe di pensare avendo in mente fenomeni, come la frenata, in cui ciò che conta direttamente è lo spazio di frenata, mentre il tempo interviene solo indirettamente). Dall'intuizione, basata sull'osservazione sperimentale, Newton passò all'enunciato del “secondo principio”, cioè del *postulato* della proporzionalità fra la grandezza così definita e l'accelerazione (o meglio la variazione della quantità di moto nell'unità di tempo), attribuendole così validità generale.

Un altro approccio, più avanzato (meccanica analitica), passa attraverso il *concetto di campo* e le *leggi di invarianza*. Infatti, al di sotto dell'idea di forza come grandezza fisica dipendente dalla posizione, sta sostanzialmente l'idea di *campo* e quindi il *postulato* che

- lo spazio uniforme e isotropo, non c'è nessun motivo per cui i fenomeni debbano cambiare se ci si sposta di un certo tratto (invarianza traslazionale) oppure se si ruota il sistema di riferimento di un certo angolo,
- un corpo che si muove in uno spazio completamente uniforme *conserva la propria quantità di moto*,

- se lo spazio non è uniforme a causa della presenza di una grandezza F (forza) funzione della posizione rispetto ai corpi che producono il campo¹, la quantità di moto varia nell'intervallo di tempo dt in modo proporzionale a F e a dt (c'è "qualche causa" che produce la variazione della quantità di moto).

Questo è l'approccio che porta poi alla formulazione *quantistica* della legge della dinamica, in cui la grandezza fisica rilevante per descrivere il moto diventa l'*azione*, che è il prodotto della variazione dp_x della componente della quantità di moto lungo la direzione x per il tratto dx . L'azione h è la grandezza che stabilisce la *granularità intrinseca* della natura, perché, nella descrizione del moto, non si può scendere a variazioni di azione minori di h : se dx diventa molto piccolo, corrispondentemente non potrà esserci un dp_x minore di h/dx (principio di indeterminazione). Anche se di meccanica quantistica si parlerà solo alla fine del corso di fisica, conviene fin dalle prime discussioni sul modo di calcolare un moto introdurre alcune riflessioni di base che, senza oscurare il significato delle leggi della meccanica classica, aiutino a introdurre gradualmente i concetti quantistici di base.

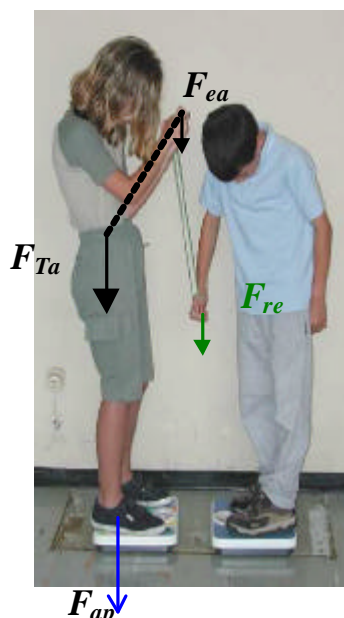
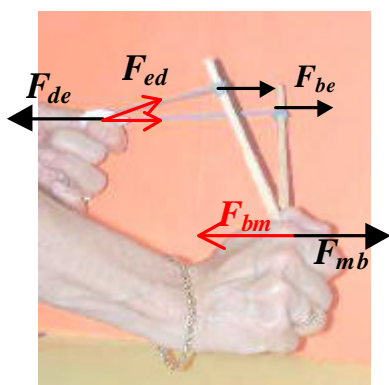
➤ **Come si può introdurre il concetto di forza a un allievo medio di scuola secondaria?**

Non si deve partire dall'enunciazione delle leggi, ma dall'esperienza empirica quotidiana in situazioni "statiche" o "dinamiche"

Partendo dall'esperienza empirica quotidiana in situazioni statiche:

- la forza è l'espressione dell'interazione fra due corpi
- ci accorgiamo dell'interazione perché essa ha diversi effetti (deformare, spingere, tirare, mettere in moto, frenare, accelerare, ecc.)
- per interagire occorre essere in due: chi applica la forza e chi la subisce (il "nome della forza")
- la forza si applica in una ben determinata direzione
- a ogni forza applicata corrisponde una reazione uguale e contraria (terza legge della dinamica)
- la forza si trasmette dentro un solido

Tipiche "immagini": una fionda, una catapulta, . . . ma anche una bilancia pesa - persone



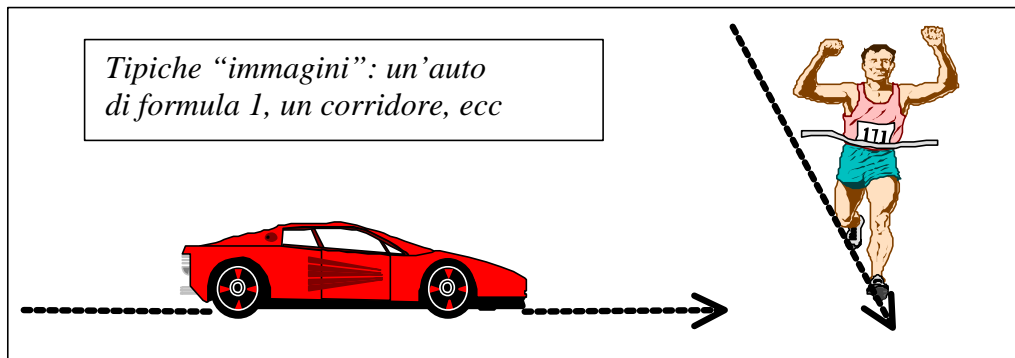
Partendo dalle situazioni dinamiche

Ci si accorge che è utile ed economico "costruire" teoricamente il concetto relativo alla grandezza fisica "forza" passando prima attraverso il concetto di "quantità di moto". Infatti:

¹ Questo vale supponendo che il campo sia "statico", prodotto da corpi che sono fermi, il che ovviamente non è mai rigorosamente vero; nel caso generale si pone il problema del tempo che occorre perché la variazione del campo si propaghi da un punto all'altro.

- nei cambiamenti di velocità ci si accorge anzitutto che non è solo questione di *variazione di velocità* ma anche di *massa* e quindi di *quantità di moto* p
- tuttavia non basta la variazione di quantità di moto, perché è rilevante anche *l'intervallo di tempo* $\mathbf{D}t$ in cui tale variazione avviene
- quindi occorre “inventarsi” un'altra grandezza, la *forza*, che è direttamente proporzionale alla variazione di p e inversamente proporzionale all'intervallo di tempo $\mathbf{D}t$

$$F = \mathbf{D}p / \mathbf{D}t \quad (\text{legge di Newton})$$



Così come nella statica alla forza F_{AB} che il corpo A applica al corpo B corrisponde la forza uguale e contraria F_{BA} che il corpo B applica al corpo A, anche in dinamica alla variazione $\mathbf{D}p_B$ della quantità di moto del corpo B corrisponde una variazione uguale e contraria, $\mathbf{D}p_A$, della quantità di moto del corpo A: ad esempio se l'auto acquista quantità di moto verso destra, la Terra rincula con una eguale quantità di moto verso sinistra.

Il raccordo fra i due approcci:

- per mettere in moto o per frenare o per accelerare occorre sempre un'interazione,
 - bisogna quindi scoprire la forza responsabile dell'interazione e i due corpi fra cui essa agisce.
- Ad esempio, supponiamo che un atleta riesca a fermarsi in una corsa in due passi. Se sta correndo a una velocità di circa 2m/s e fa un passo in circa 0,4 s, la sua decelerazione è di circa $2 \text{ ms}^{-1}/0,4 \text{ s} = 5 \text{ m s}^{-2}$, cioè circa il 25% dell'accelerazione di gravità. Ciò significa che i suoi muscoli sono in grado di interagire con il terreno esercitando una forza media pari al 25% della forza peso. Simile è l'accelerazione allo scatto di partenza.

Analogamente un'auto che in 10s passa da ferma a 100 km/h, cioè a $100000\text{m}/3600\text{s} \approx 30\text{m/s}$, ha una accelerazione di circa 3 m s^{-2} , molto vicina a quella di un corridore! Quale è la differenza? Che l'auto accelera per 10 s, il corridore solo per 0,8 s, quindi non raggiungerà mai la stessa velocità! Domanda: perché il corridore non può continuare ad accelerare?

➤ **Il problema della separazione fra i concetti di “massa”, “peso”, “forza di gravità” e “forza peso” e il problema della “massa relativistica”**

- La *massa* è una caratteristica del corpo, legata alla “quantità di materia” che c'è nel corpo (numero e tipo di atomi).
- La *forza di gravità* è la forza con cui il corpo è attirato dalla Terra: NON può essere una caratteristica del corpo, perché, essendo l'espressione di una interazione, dipende dall'altro “attore” dell'interazione, cioè dalla Terra (sulla Luna, ad esempio, sarebbe diversa).
- La *forza peso* è la risultante di tutte le forze che attirano il corpo verso il basso: ad esempio, un corpo all'equatore ha una forza peso minore che ai poli, perché è maggiore la forza centrifuga, così un astronauta nella navicella spaziale ha forza peso nulla, ma sente una forza di gravità poco minore di quella che sentirebbe a terra (quando si parla di “assenza di gravità” non si intende che la forza di gravità è nulla, ma che la forza peso è nulla!). Così pure un corpo che

galleggia ha forza peso nulla, ma forza di gravità non nulla. Anche la forza peso NON è una proprietà del corpo, perché dipende dalle interazioni con tutti i corpi che lo circondano.

- Il termine “*peso*” è da evitarsi, perché ambiguo, dato che, nel linguaggio comune, può indicare sia massa che forza peso (così pure va evitato il termine “peso specifico” al posto di “densità”).
- Una *bilancia* è in realtà un *dinamometro* tarato in unità di massa anziché in unità di forza; poiché la taratura è stata fatta in situazioni in cui l’accelerazione è quella di gravità, 9.8 m s^{-2} , si può riconvertire la misura a unità di forza moltiplicando la massa in kg per 9.8 m s^{-2} , quindi 1 kg massa corrisponde a 9.8 N (attenzione: “corrisponde” non “equivale”, perché massa e forza non sono *grandezze omogenee*)
- *Relatività*. La teoria della relatività fa fare un passo avanti nella comprensione del concetto di massa, perché si dimostra che solo a velocità v basse rispetto alla velocità della luce c , la massa determina l’*inerzia* del corpo, cioè il coefficiente di proporzionalità tra forza e accelerazione. Relativisticamente invece, l’inerzia è data dalla massa per il fattore relativistico

$$g = \frac{c}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$
 dove c è la velocità della luce; sviluppando in serie di Taylor per piccoli valori di v/c si ottiene:

$$g m = m \left(1 + \frac{1}{2} m v^2 / c^2 \right)$$

alla massa m si aggiunge cioè un termine pari all’energia cinetica divisa per c^2 .

- Impropiamente il prodotto $g m$ viene chiamato “massa relativistica”, che è un termine da evitare perché suggerisce che la massa possa cambiare con la velocità, mentre ciò che cambia è l’inerzia. La massa infatti resta costante, pensata come “invariante relativistico” $m^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2$, dove E è l’energia totale e p la quantità di moto.

➤ **L’unità di misura di massa e forza e le “dimensioni naturali” delle grandezze dinamiche** In fisica classica mancano le “dimensioni naturali” dei fenomeni, perché la fisica classica è la fisica del continuo (passaggio al limite per Δx che tende a zero): se c’è una forza F che agisce nella direzione x e si esamina ciò che avviene per uno spostamento Δx infinitesimo, si osserva una variazione Δp infinitesima della quantità di moto. Secondo la meccanica quantistica invece, la minima variazione Δp che si può associare a un certo Δx è dell’ordine della costante di Planck, cioè del quanto di azione $h=2\pi\hbar$ (“principio di indeterminazione”, $\Delta x \Delta p \geq \hbar$). Tutti i corpi “reagiscono” quindi allo stesso modo a una misura di posizione con una incertezza Δx : essi hanno cioè una incertezza Δp sulla misura della quantità di moto che dipende unicamente dal quanto di azione:

$$\Delta p = \hbar / \Delta x \quad (1)$$

Poiché la costante h è piccolissima ($h \approx 6,6 \cdot 10^{-34}$ Js), la minima variazione di Δp non è apprezzabile per Δx misurabili nel mondo macroscopico, quindi spazio e quantità di moto possono essere considerate, ai fini del calcolo, grandezze che variano con continuità, come fece appunto Newton. Concettualmente però la granularità intrinseca dei fenomeni naturali non va dimenticata perché altrimenti non si comprenderebbero fenomeni e concetti importanti anche in fisica classica (ad esempio quelli legati all’irreversibilità).

La (1) mostra anche qual è la “dimensione naturale” e quindi “l’unità di misura naturale” della quantità di moto: è il quanto di azione diviso per una distanza, che è ovviamente una unità scomodissima per un oggetto macroscopico, ma è molto comoda per un oggetto microscopico.

Anche le dimensioni dell’energia si possono legare a quelle di h , perché l’energia non è altro che una azione divisa per un tempo, oppure un’azione moltiplicata per una frequenza. Questa è

appunto la relazione di Planck, per cui l'energia E di un corpo è associata a una frequenza caratteristica f tale che

$$E=hf \quad (2)$$

e quindi a una lunghezza caratteristica $\lambda=c/f$. Per un corpo massivo, questa lunghezza è detta lunghezza d'onda Compton $\lambda_{Compton}$: facendo tutte le sostituzioni si ottiene, a basse velocità alle quali $E=mc^2$:

$$\lambda_{Compton} = c/f = hc/hf = h/mc \quad (3)$$

Potremmo quindi misurare le energie in s^{-1} e le masse in m^{-1} . Ciò sarebbe scomodissimo per masse macroscopiche e questo è il motivo per cui, anche dopo aver capito, con l'avvento della relatività e della meccanica quantistica, che la massa è in realtà una frequenza, oppure, alternativamente, l'inverso di una lunghezza, si è continuato a misurare le masse dei corpi macroscopici in kg. Tuttavia, anche per i corpi macroscopici, la relazione (2) (oppure la 3) aiuta a capire il significato della grandezza "massa", perché esso viene ricondotto al significato della grandezza "tempo" (oppure a quello della grandezza "lunghezza"), che è più intuitivo, ma non per questo meglio "capito"!

➤ **Punti da esaminare indipendentemente dall'approccio:**

- oggetti e fenomeni del mondo reale da cui partire
- il metodo di indagine: ipotesi, verifiche
- i termini e il linguaggio: come *formalizzare* la forza (la "matematica" delle frecce, il "nome" della forza)
- quali *immagini* associare al concetto di forza
- gli aspetti *formativi, addestrativi e informativi*
- le *conoscenze disciplinari e procedurali*
- le *capacità e le competenze*

2.2 Il metodo di indagine scientifica

La paternità del metodo di indagine scientifica, spesso chiamato impropriamente "metodo scientifico", viene abitualmente attribuita a Galilei. In realtà, in embrione, il "metodo di indagine scientifica", nei suoi elementi essenziali di osservare il fenomeno, individuare gli aspetti significativi, ipotizzare e modellizzare, è esistito da sempre. Aristotele stesso è un filosofo naturale in questo senso (a differenza, ad esempio, di Platone), anche se le sue osservazioni erano quasi sempre solo qualitative, le sue ipotesi e quindi i suoi "modelli" spesso non erano verificabili (come si fa, ad esempio, a verificare se un oggetto cade perché la Terra è il suo luogo naturale?); la deformazione del metodo aristotelico nel corso dei secoli, che lo fece diventare un metodo "non scientifico", è largamente responsabilità dei suoi seguaci, che sostituirono il principio di autorità (ipse dixit) all'indagine diretta. Inoltre misure quantitative erano sicuramente fatte anche nell'antichità (si pensi ad Archimede e la corona del tiranno Gerone!)

Galilei introdusse tre elementi fondamentali:

- a) il ricorso a misure quantitative controllate e controllabili, eseguite con strumenti sviluppati ad hoc;
- b) l'inquadramento teorico e la modellizzazione in termini matematici ("il libro della natura è scritto in linguaggio matematico");
- c) la descrizione del metodo di indagine e la pubblicizzazione del medesimo.

Nella figura: Galileo mostra l'esperimento del piano inclinato a Giovanni dei Medici.



Tipicamente il metodo di indagine scientifica consiste, semplificando, di quattro passaggi:

- 1) osservare ed eventualmente misurare le grandezze rilevanti e le loro correlazioni in un fenomeno,
- 2) ipotizzare una relazione fra grandezze, in modo più o meno complesso, e quindi formulare una legge, un modello o una teoria,
- 3) sottoporre le ipotesi a verifica sperimentale,
- 4) controllare la validità del modello, eventualmente modificarlo e ripartire dal punto 1) per sottoporre il modello così modificato a nuova verifica.

In realtà l'indagine scientifica non segue mai una linea così netta e precisa, perché a) non succede mai che ci si metta a "osservare" un fenomeno, a fare misure, ecc., partendo completamente da zero, perché c'è sempre nella mente qualche conoscenza precedente, qualche modello anche solo spontaneo, ma più spesso ancora si ha in mente già una propria interpretazione e un proprio pregiudizio su come si svolge il fenomeno; b) il modo stesso con cui si sottopone il modello a verifica sperimentale spesso è già viziato in partenza dallo stesso risultato che si pensa si debba ottenere; anche gli strumenti che vengono usati possono influenzare il risultato o l'interpretazione del risultato. L'indagine scientifica quindi non è mai così lineare e semplice come i quattro punti sopra esposti lasciano sottintendere.

È possibile verificare in modo "definitivo" un certo modello o una certa teoria? Anche qui non c'è una risposta netta, perché ogni risultato ha un suo "livello di confidenza", cioè ha una sua *incertezza statistica*; inoltre, in generale, dimostra solo che *certi* aspetti del modello o della teoria in certe condizioni sono probabilmente corretti, ma non che *tutti* gli aspetti in *tutte* le condizioni sono corretti.

Le domande da farsi in ogni indagine sperimentale sono quindi:

- che cosa ho *veramente* osservato e misurato?
- che cosa ero autorizzato a dedurre dalle osservazioni e misure fatte, che cosa invece ho dedotto pensando che fosse una *ragionevole estensione* a condizioni simili ma non identiche a quelle sperimentate o sulla base delle mie conoscenze precedenti?

2.3 Il linguaggio

Il linguaggio, anche quello quotidiano, ha sempre una duplice funzione: "semantica", cioè di descrizione delle caratteristiche degli oggetti, e "sintattica" cioè di descrizione delle relazioni fra tali caratteristiche.

Ciò vale anche nel *linguaggio scientifico*, nel quale il legame fra il termine usato e il relativo *concetto* è in generale più rigoroso. Il concetto relativo a una grandezza fisica è un "oggetto del pensiero", creato per esprimere in modo *utile* ed *economico* determinate caratteristiche dei corpi o degli eventi o determinate relazioni fra grandezze e il termine scientifico associato al concetto porta con sé quelle relazioni e non altre.

Ad esempio il concetto di velocità è un concetto utile ed economico per esprimere la relazione fra distanza percorsa e tempo impiegato; l'accelerazione è un concetto utile ed economico per esprimere la relazione fra variazione di velocità e il tempo in cui tale variazione avviene, ecc.. Perché non si è pensato di definire invece un concetto legato alla variazione di velocità su una certa distanza? Apparentemente potrebbe essere utile per descrivere ad esempio una frenata, e invece si è visto che non serve a capire meglio il fenomeno, perché mentre l'accelerazione è legata alla forza necessaria per la frenata, quest'ultima ipotetica grandezza non è legata direttamente ad altre grandezze significative e quindi non aiuta a capire meglio il fenomeno.

Nel linguaggio quotidiano, quando si parla di accelerazione, spesso si intende solo variazione di velocità, senza specificare se tale variazione è vista rispetto al tempo o allo spazio!

Tipico del linguaggio scientifico è il progressivo passaggio dall'uso di termini con prevalente significato "semantico" a termini in cui è più importante il significato "sintattico": ad esempio

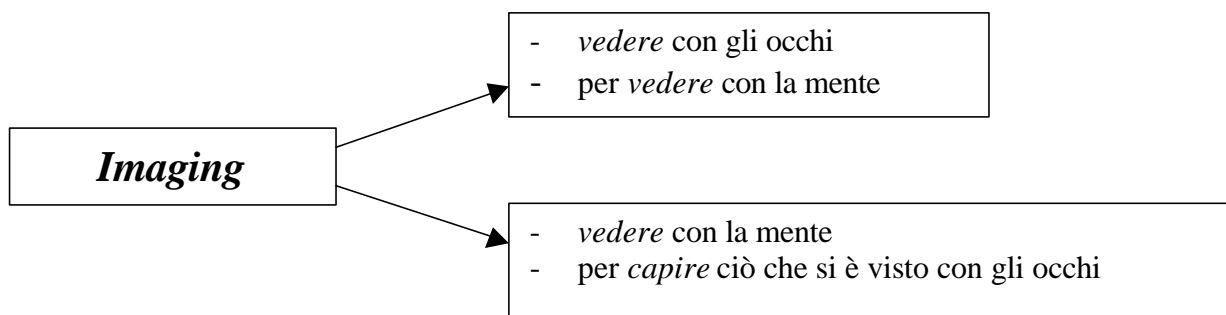
l'onda in meccanica è ancora in parte un concetto con significato descrittivo, anche se già contiene la relazione fra le grandezze fisiche che la descrivono (ampiezza, lunghezza d'onda, periodo, fase), in elettromagnetismo è solo il termine sintetico per descrivere il modo in cui si propagano i campi, che implica una precisa relazione fra ampiezza, lunghezza d'onda, periodo, fase.

2.4 “Imaging”: pensiero "concreto" e pensiero "astratto" in fisica

Per la “costruzione” dei concetti va tenuto presente che il ragazzo nell'età dello sviluppo è sostanzialmente ancora un "pensatore concreto" ed è quindi essenziale innescare un processo di evoluzione verso il "pensiero astratto".

Le “immagini” possono svolgere un ruolo importante, se si pensa che circa il 50% dei neuroni del nostro cervello sono addetti alla decodifica del segnale visivo (il ricorso alla visualizzazione come supporto all'apprendimento viene chiamato “imaging”).

A sua volta, la formalizzazione attraverso il processo di astrazione aiuta a “vedere” meglio, perché indirizza l'attenzione *in modo selettivo* su aspetti che emergono come più importanti e che vengono meglio compresi. Tuttavia “vedere” non implica automaticamente “capire”, perché capire è una operazione della mente, non degli occhi!



2.5 Finalità principali dell'insegnamento della fisica

Formativa

- Sviluppo dell'intelligenza:
 - concetti relativi alle grandezze fisiche rilevanti e alle loro relazioni,
 - organizzazione gerarchica dei concetti,
 - “metodo di indagine scientifica”,
 - senso critico,
 - uso di capacità logico-razionali
- Sviluppo di atteggiamenti e valori

Addestrativa

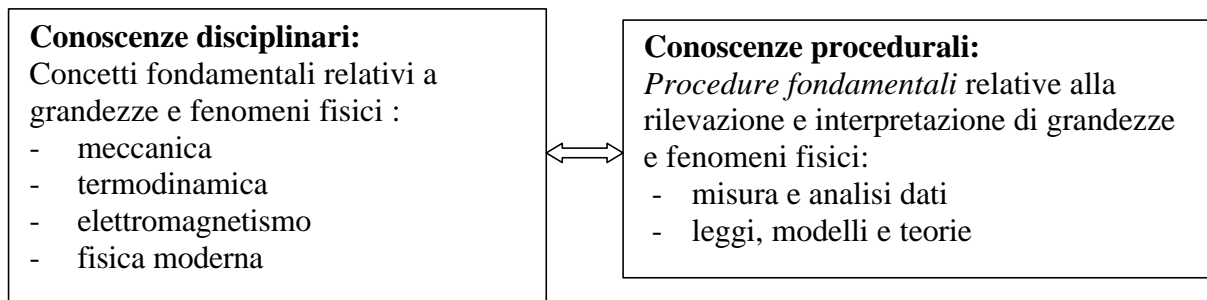
- capacità specifiche
- abilità generali
- uso di strumenti e di tecniche di analisi dei dati
- area psicomotoria

Informativa

- apprendimento di nozioni, leggi, formule, dati
- a scopo professionalizzante, propedeutico, o di "cultura generale"

Le finalità formative, addestrative e informative concorrono alla creazione di *competenze*, che è l'insieme di tutto ciò che l'allievo *conosce* e *sa fare*, in un certo contesto, per impostare e risolvere un problema oppure per raggiungere un obiettivo conoscitivo o applicativo.

2.6 Conoscenze, competenze e capacità



Competenze (generali) e capacità (specifiche):

A livello logico-conoscitivo: usare le proprie conoscenze (disciplinari e procedurali) per interagire e conoscere l'ambiente esterno,

A livello operativo: utilizzare le proprie capacità nell'uso di strumenti e tecniche di misura e di analisi dati a scopo di conoscenza o per applicazioni specifiche,

A livello espressivo: usare il linguaggio nelle varie forme (scritto, verbale, non verbale, grafico) per uso proprio e per comunicare con gli altri,

A livello organizzativo/cooperativo: organizzare il proprio lavoro, agire consapevolmente e costruttivamente nel rapporto con gli altri (lavoro di gruppo) anche con ruolo di *leader*.

Esercizio

1. Misure e calcoli sulla forza (obbligatorio)

Procuratevi un dinamometro, oppure costruitene uno, oppure usate una bilancia come dinamometro ed eseguite delle misure di forza, semplici ma significative, che mettano in evidenza aspetti importanti, statici e/o dinamici, del concetto di forza.

2. Discutete un possibile approccio al concetto di *forza* che favorisca l'organizzazione dei concetti e la loro formalizzazione anche matematica; in particolare

- discutete come tenere conto degli interessi degli studenti, in particolare che tipo di "attacco" e quali agganci alla realtà quotidiana proponete,
- analizzate perché il concetto di forza in fisica è "utile ed economico" e quali aspetti disciplinari del tema considerate importanti dal punto di vista della rilevanza concettuale e della struttura logico/formale della disciplina,
- esaminate le possibili rappresentazioni mentali, spontanee o indotte, che possono avere sul tema gli studenti di scuola secondaria,
- presentate una possibile *modellizzazione* del fenomeno o dei fenomeni che avete preso in considerazione.

Esaminate inoltre come il tema è trattato in un testo universitario e discutete se, in questa trattazione, emerge chiaramente il quadro epistemologico.

Fate la stessa analisi sulla trattazione del tema in un testo di scuola secondaria, discutendo anche se si tiene conto in qualche modo dei possibili problemi di apprendimento ed esaminate **criticamente** il tipo di formalizzazione proposto.