



Dipartimento di Fisica
di Messina



Complesso Universitario
Monte S. Angelo



Politecnico di Torino

Complesso Universitario Monte S. Angelo

Napoli, 28-30 Settembre 2006

Atti del Convegno

Innovazione nella didattica della fisica di base

La Fisica di Karlsruhe: risultati e prospettive

Il concetto di Energia
Fenomeni Termici
Fenomeni Elettrici
Meccanica e Relatività

a cura di
F. DI LIBERTO,
M. SERPICO ed I. TESTA



LOFFREDO EDITORE - NAPOLI

Complesso Universitario Monte S. Angelo

Napoli, 28-30 Settembre 2006

Atti del Convegno

INDICE

- 5 *Premessa*
- 7 F. DI LIBERTO, A. DI DONATO, R. TORTORA
Apertura dei lavori
- 11 Abstracts dei contributi
- 15 F. HERRMANN
Introduzione alla Fisica di Karlsruhe
- 25 M. VICENTINI
Energia: tanto necessaria, tanto poco conosciuta. E l'entropia poi
- 43 M. POHLIG
Teaching Electricity in the KPK
- 57 M. D'ANNA
Le analogie: una chiave di lettura dei fenomeni naturali
- 71 F. HERRMANN
Insegnare Termologia secondo il KPK
- 81 H. FUCHS
Differenze e Cambiamento e il Corso di Fisica di Karlsruhe
- 99 A. DRAGO
I paradigmi nell'insegnamento della Fisica: il caso della termodinamica
- 115 H. HAUPTMANN
Teaching Mechanics in the KPK
- 125 M. D'ANNA
Massa, inerzia ed energia
- 135 C. TARSITANI
Dalla meccanica classica alla meccanica quantistica



La Loffredo Editore Napoli Spa azienda certificata del sistema di qualità aziendale in conformità ai canoni delle norme UNI EN ISO 9001.

© 2009 by LOFFREDO EDITORE S.P.A.
Via Capri, 67 80026 Napoli
<http://www.loffredo.it> E-mail: info@loffredo.it

Appendice

- 149 BENIAMINO GINATEMPO
Note a margine del convegno
- 153 *Domande sulla Fisica di Karlsruhe, poste dai partecipanti al Convegno e le relative risposte di Herrmann ed Agnes*
- 159 *Le prime pagine del capitolo 3 della Fisica di Karlsruhe :
"Quantità di moto". A chiarimento dell'intervento di Hauptmann*
- 165 *Le prime pagine del capitolo capitoli 16 del Volume II della Fisica di Karlsruhe: "Elettricità e correnti elettriche" a chiarimento dell'intervento di Pohl*

PREMESSA

Il convegno ha consentito di mettere a confronto le sperimentazioni che sono state fatte sia in Italia che all'estero del metodo di insegnamento della fisica di Karlsruhe. Nelle discussioni è stata sottolineata la utilità di tale metodo di insegnamento rispetto alle attuali condizioni dell'insegnamento scientifico. La continua riduzione delle ore dedicate alla didattica delle Scienze ed in particolare della Fisica, dovuta ai recenti provvedimenti legislativi, sia scolastici che universitari, impone agli insegnanti di riuscire a trasmettere contenuti difficili in tempi molto ridotti rispetto a quelli previsti nei vecchi programmi scolastici e nei vecchi corsi di studi. Da ciò scaturisce la necessità di attuare un ripensamento del modo di insegnare la fisica. Un'altra necessità che spinge ad un ripensamento nasce dal calo vertiginoso delle "vocazioni scientifiche": gli iscritti alle Facoltà Scientifiche calano di anno in anno e dalla necessità di dare più spazio alla Fisica Moderna. È più che mai necessario quindi, nell'insegnamento delle materie scientifiche e della Fisica in particolare, adottare una presentazione concisa e sintetica, accompagnata da esperimenti di facile realizzazione, al fine di favorire l'apprendimento e richiamare l'attenzione sulla fenomenologia fisica. Si è potuto constatare che entrambe le caratteristiche su menzionate sono presenti nell'approccio della "Fisica di Karlsruhe" (che prende il nome dalla città in cui sono state fatte le prime sperimentazioni).

La Fisica di Karlsruhe, attraverso l'uso combinato dell'acquisizione di dati in tempo reale e la modellizzazione dei processi osservati, crea un ponte tra la ricchezza dei fenomeni fisici, che permeano la quotidiana esperienza, e la costruzione dei modelli con cui tali fenomeni vengono descritti. Si tratta di una impostazione che privilegia le analogie tra i vari campi della fisica, sia classica, che moderna. Utilizza i concetti di grandezze estensive (a cui è devoluto spesso il compito di portatori di energia) e di grandezze intensive (o potenziali) le cui differenze provocano i processi in cui avvengono i trasferimenti delle corrispondenti grandezze estensive. Il convegno ha avuto un'ampia partecipazione di docenti della scuola superiore e di docenti universitari sia Campani che provenienti da altre regioni. C'è stata anche la partecipazione delle varie componenti SICSI (docenti Supervisor, docenti tutor ed allievi della SICSI).

Dicembre 2006

Franco di Liberto,
Corrado Agnes e Beniamino Ginatempo

Programma del Convegno

Innovazione nella didattica della fisica di base e la Fisica di Karlsruhe: risultati e prospettive.

Napoli 28-30 Settembre 06

28 Settembre

Aula Blu del Centro congressi di Monte S. Angelo

09:00 Apertura Lavori

Interventi di: Guido Trombetti (Rettore) Alberto Di Donato (Preside Facoltà SMFN)
Franco Cevenini (Direttore del Dipartimento SF) Roberto Tortora (Direttore SICSI)
Franco di Liberto, Corrado Agnes, Beniamino Ginatempo (Organizzatori convegno)

09:30 Chair: B. Preziosi

09:30 F. Herrmann (Karlsruhe) Introduzione alla Fisica del KPK

10:15 M. Vicentini (Roma) Didattica dell'energia

11:15 M. Pohligh (Durmshheim) Teaching Electricity in the KPK

12:00 Discussione su Fenomeni Elettrici

Problemi didattici e proposte di soluzione-Introduzione di E. Sassi (Napoli)

15:00 - 19:00 Workshops

W1 Esperimenti e Modelli nella Struttura del KPK (Coordinatore M. D'Anna)

W2 Relazioni d'insegnamento nella pratica del KPK (Coordinatori H. Fuchs e C. Agnes)

29 Settembre

09:00 Chair: G. Rinaudo (Torino)

09:00 F. Herrmann (Karlsruhe) Insegnare Termologia secondo il KPK

09:45 H. Fuchs (Winterthur) Differences cause change and the KPK

11:00 A. Drago (Napoli-Pisa) Paradigmi nell'insegnamento della Fisica: il caso della Termodinamica

11:45 Discussione sui Fenomeni termici

Problemi didattici e proposte di soluzione-Introduzione di M. Michelini (Udine)

15:00 - 19:00 Workshops - Replica

W1 Esperimenti e Modelli nella Struttura del KPK (Coordinatore M. D'Anna)

W2 Relazioni d'insegnamento nella pratica del KPK (Coordinatori H. Fuchs e C. Agnes)

30 Settembre

09:00 Chair G: Monroy

09:00 H. Hauptmann (Karlsruhe) Teaching Mechanics in the KPK

09:45 M. D'Anna (Locarno) Massa, inerzia ed energia: riflessioni sulla didattica della dinamica relativistica

11.00 C. Tarsitani (Roma) Dalla meccanica classica alla meccanica quantistica

11:45 Discussione sul Concetto di Energia

Problemi didattici e proposte di soluzione

Introduzione di C. Agnes (Torino)

13:00 Discussione finale e chiusura del convegno

APERTURA DEI LAVORI

Intervento di Franco di Liberto (comitato organizzatore)

La ricerca in Didattica della Fisica è un campo molto vasto. In Italia quasi in ogni città vi sono autorevoli gruppi che lavorano con passione. Questo Convegno dunque è limitato rispetto al panorama Nazionale. Infatti il convegno pone l'accento su questo particolare metodo didattico che è la Fisica di Karlsruhe. Il convegno vuole anche essere un luogo di formazione e confronto sulle tematiche e le idee del KPK. La parte formativa si svolge nei due pomeriggi di oggi e domani (28 e 29 settembre). Nelle mattinate ci sono sia relazioni sull'approccio di Karlsruhe sia relazioni su altri importanti risultati della Ricerca Nazionale in Didattica della Fisica. Con la collaborazione di Corrado Agnes e di Beniamino Ginatempo ho organizzato questo Convegno con entusiasmo e spirito di servizio. Nell'approccio della Fisica di Karlsruhe ci sono tante idee stimolanti che possono portare a nuove strade per insegnare. Sono dunque persuaso che abbiamo fatto lavoro utile.

Sono un neofita dell'approccio di Karlsruhe. Solo nel 2001, sono venuto a conoscenza di questo approccio. Ne ho avuto notizia da Mario Rasetti al convegno StatPhys21. Tramite Rasetti ho conosciuto Corrado Agnes che ha tenuto a Napoli nel Maggio 2002 uno splendido seminario sul KPK e nel giugno di quello stesso anno, su indicazione di Corrado, ho invitato a tenere un Seminario a Napoli anche il geniale fisico svizzero che con lui collabora: Michele D'anna.

Il contributo di Michele è stato essenziale per l'organizzazione del Convegno. Lo ringrazio vivamente. Vedo tanti volti di colleghi e amici, spero sul loro contributo alle discussioni sui singoli temi in cui sono articolate le mattinate del Convegno. Ringrazio vivamente quanti sono presenti e passo la parola ai colleghi che hanno reso possibile questo convegno: Franco Cevenini, Roberto Tortora, Alberto di Donato e Guido Trombetti

Intervento di Alberto Di Donato-Preside della Facoltà di Scienze

È con grande piacere che porgo il mio saluto e quello dell'intera Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali della nostra Università ai partecipanti al Convegno sull'Innovazione nella Didattica della Fisica e la Fisica di Karlsruhe. Vi assicuro che la mia presenza all'inaugurazione del Convegno non è un puro atto formale ma scaturisce dal grande interesse che ha la Facoltà, e non solo il Corso di Laurea in Fisica, per i temi che verranno discussi. Come tutti sappiamo, il riordino degli studi universitari attuato con il Decreto n.509 ha causato, e continua a causare, grandi difficoltà per studenti e docenti, a causa

della sua grande innovatività che è stata inizialmente colta solo come diversa articolazione dei percorsi didattici che da quinquennali o quadriennali si trasformavano in triennali, seguiti da una fase di approfondimento biennale: la Laurea Specialistica. Abbiamo attentamente monitorato, sin dal 2000, l'andamento dei nuovi Corsi di Studio e sulla base dei dati a disposizione la Facoltà sta ora provvedendo a una necessaria riflessione sugli esiti. Orbene, la diffusa convinzione che emerge da questa analisi è che l'improvvisa accelerazione impartita alla attivazione dei nuovi percorsi formativi ha generalmente oscurato, certamente a causa della nostra inesperienza, l'elemento base fondante il processo di riforma: il cambiamento dei percorsi didattici, oltre che temporale, prevede una sostanziale revisione dei metodi e dei programmi di insegnamento, ponendoci molte sfide e molte difficoltà. In altri termini, la diversa articolazione temporale non può essere interpretata esclusivamente come semplificazione e compattamento delle nozioni, ma deve prevedere la risposta alla domanda: quali sono i contenuti e quale deve essere la loro esposizione *in rapporto agli obiettivi formativi e alla tempistica del percorso didattico*? Occorre ancora tenere presente che le questioni relative ai contenuti degli insegnamenti e alle metodologie della loro esposizione sono centrali, in particolare nelle Facoltà scientifiche, anche tenendo presente che da anni si osserva un calo delle "vocazioni scientifiche" che ha certamente le sue radici anche nel come si insegna la scienza. Non scorrelato da questo fenomeno è anche il dato che una percentuale preoccupante degli iscritti nella nostra Facoltà abbandona gli studi dopo il primo anno. Pertanto un Convegno nel quale si discute di contenuti e di metodologie di insegnamento, ancorché relativo al campo della Fisica, non può che suscitare il più vivo interesse mio e della Facoltà che rappresento. Infatti, dopo aver letto alcuni dei riassunti degli interventi previsti, ed essermi con entusiasmo informato a riguardo, mi pare di vedere nell'approccio della "Fisica di Karlsruhe" una delle possibili strade per superare i nostri problemi. A mio parere infatti, se vogliamo rendere più efficaci i vari insegnamenti, è necessario adottare una presentazione concisa e sintetica, sostenuta da esperimenti di facile realizzazione al fine di favorire l'apprendimento e abituare gli studenti ad una domestichezza con la fenomenologia. Per la Fisica mi pare di capire che l'approccio a cui gran parte del Convegno è dedicato presenti entrambe le caratteristiche di cui sopra. Infatti esso è da un lato estremamente "sintetico", facilita lo studente nel costruire l'unità concettuale e favorisce la costruzione di modelli a partire dall'osservazione dei fenomeni fisici. Il Progetto "Fisica di Karlsruhe" è tuttavia pensato per le classi dei Licei, anche se vi sono alcuni autori (Fuchs e Rasetti) che ne hanno proposta una trasposizione a livello universitario. Spero che questo Convegno possa costituire una spinta ad attualizzare, nel contesto delle Lauree Triennali, l'approccio di Karlsruhe. Concludo esprimendo di nuovo

il nostro piacere nell'ospitare il Convegno e ringrazio gli organizzatori Franco di Liberto, Corrado Agnes e Beniamino Ginatempo per aver fatto in modo che Napoli sia stata scelta come sede del Convegno. Vi auguro dunque buon lavoro

Intervento di Roberto Tortora –Direttore della Sicsi

Mi è assai gradito porgere a tutti i convenuti il saluto mio personale e quello della SICSI. Ed esprimere agli organizzatori del convegno Corrado Agnes, Franco di Liberto e Beniamino Ginatempo l'apprezzamento per l'iniziativa intrapresa, che mi sembra in questo momento giunga molto a proposito.

Siamo, come è sotto gli occhi di tutti, in un periodo di grande sofferenza della scuola italiana, in generale, e in particolare per quanto riguarda l'insegnamento delle materie scientifiche. E' noto come siano sempre meno gli studenti delle scuole superiori che decidono di iscriversi ad una facoltà scientifica e quanto debole sia il risultato medio che gli studenti italiani, soprattutto qui nel meridione, conseguono nelle competenze nelle materie scientifiche. La Scuola di Formazione Insegnanti che qui rappresento si sente quotidianamente impegnata nella battaglia per fronteggiare questa situazione, che ci impone fra le altre cose il compito di fornire solidi strumenti di innovazione alle nuove leve di insegnanti di matematica e fisica.

Questo Convegno mi sembra dunque giunga a proposito, visto che vi si discute di metodi di insegnamento della Fisica innovativi rispetto a una tradizione didattica non sempre rispettosa né delle più recenti acquisizioni della ricerca né degli aspetti più propriamente cognitivi, che vanno invece tenuti ben presenti in ogni attività educativa. In particolare l'idea di rivedere l'insegnamento della fisica mettendo bene in evidenza alcuni fondamentali invarianti mi sembra assai promettente.

Permettetemi allora di esprimere qualche brevissima riflessione non tanto nella veste di Coordinatore della SICSI, ma in quella di modesto studioso di didattica della matematica. Molto si discute nella scuola del ruolo e dei rapporti tra le nostre due discipline, e non mancano anche al riguardo accenti polemiaci. La estrema specializzazione del mondo accademico comporta in particolare che i matematici tendano a concepire la propria materia come bastante a se stessa, la più pura tra le discipline scientifiche, come talvolta si usa dire. Secondo questo punto di vista la fisica appare nel migliore dei casi come un ricco territorio dal quale attingere esempi ed applicazioni per le strutture e i metodi della matematica. Viceversa sono troppi i fisici che tendono a vedere la matematica solo come uno strumento per descrivere in termini rigorosi i fenomeni del mondo reale.

Entrambe queste posizioni, che, se fatte proprie dagli insegnanti delle scuole superiori, hanno come diretta conseguenza un'accentuata separazione delle due

materie sia nell'organizzazione scolastica che nella strutturazione dell'insegnamento, sono a mio avviso assai riduttive e rischiano perciò di occultare, agli occhi degli studenti, gli aspetti più interessanti della conoscenza scientifica, favorendo in loro disinteresse per questo tipo di studi. La storia invece ci insegna che il progresso scientifico è quasi sempre stato il frutto di continui intrecci tra fisica e matematica, tra sperimentazione e speculazione astratta, in cui la formulazione di ipotesi, la costruzione di modelli, il loro studio teorico, la loro validazione e i successivi raffinamenti costituiscono i vari passi in cui le due discipline si sono differenziate all'occorrenza nelle varie fasi per approcci e per metodologie, ma ogni volta sono tornate a trarre reciprocamente linfa e ispirazione. Se nella scuola si riuscisse a dar conto di questo processo, forse se ne vedrebbero limpidi risultati in termini di coinvolgimento degli allievi.

Questo è uno dei punti dei quali mi sento più convinto in quanto operatore della formazione insegnanti; al riguardo mi preme anche dire che l'integrazione profonda tra fisica e matematica è una delle linee ispiratrici nell'organizzazione didattica dell'indirizzo Fisico matematico della SICSI di Napoli. Mi auguro perciò che questo convegno aiuti fra le altre cose a perseguire questo obiettivo.

Rivolgo a tutti il mio più vivo augurio di buon lavoro e interazione feconda.

ABSTRACTS DELLE COMUNICAZIONI E DEI WOKSHOPS

1. F. Herrmann, (Karlsruhe) Introduzione alla Fisica di Karlsruhe

I contenuti della scienza e in particolare della fisica aumentano continuamente. Invece, il tempo disponibile per l'insegnamento rimane costante. L'obiettivo che ha portato allo sviluppo del corso è costituito da una modernizzazione e una razionalizzazione dell'insegnamento della fisica. Per raggiungere questo scopo le varie aree della fisica sono state affrontate e descritte da un punto di vista unitario. Da un canto questo procedimento presenta dei vantaggi nell'economia dell'insegnamento. Nelle principali aree della fisica appaiono le stesse relazioni e le stesse strutture: nella meccanica, nell'elettrologia, nella termologia e nella chimica. Di conseguenza queste relazioni, di validità generale, devono essere imparate una volta sola. D'altro canto, già il fatto di percepire che queste strutture esistono, è un obiettivo didattico significativo per un insegnamento che abbia l'ambizione di trasmettere cultura generale.

2. M. Vicentini (Roma) Energia: tanto necessaria, tanto poco conosciuta. E l'entropia poi...

L'intervento illustrerà, a partire da un esame dei manuali, i problemi della didattica dell'energia a livello universitario e di formazione degli insegnanti. Alcuni brevi riferimenti storici focalizzeranno i nodi concettuali presenti nello sviluppo della termodinamica. Un esame delle idee di studenti, insegnanti e ricercatori guiderà poi la presentazione delle più recenti proposte che emergono dalla ricerca didattica.

3. M. Pohlig (Durmshheim) Teaching Electricity in the KPK

Introduciamo il potenziale elettrico prima della tensione. Il problema che sorge cominciando dalla tensione o addirittura limitandosi alla tensione è noto alla maggior parte dei docenti: gli studenti tentano di assegnare una tensione a un solo punto di un circuito. Operare con il potenziale permette inoltre l'applicazione, per i vari segmenti di conduttore di un circuito, del metodo della marcatura con i colori.

4. M. D'Anna Alta Scuola Pedagogica Locarno (Svizzera) Wokshop.

Le analogie: una chiave di lettura dei fenomeni naturali (esperimenti e formalizzazione) Struttura del workshop

Il workshop è costruito in due parti distinte: nella prima verranno presentati alcuni esperimenti che vogliono costituire un esempio concreto di quanto discusso nelle relazioni introduttive del mattino, in particolare in relazione all'utilizzo delle

analogie all'interno di un percorso didattico; nella seconda parte verranno presentati gli elementi costitutivi che permettono una adeguata formalizzazione.

5. F. Herrmann (Karlsruhe) Insegnare Termologia secondo il KPK

Entropia e temperatura hanno nei processi termici lo stesso ruolo di carica elettrica e potenziale elettrico nei processi elettrici, e di quantità di moto e velocità in quelli meccanici. Entropia, carica elettrica e quantità di moto sono grandezze estensive; temperatura, potenziale elettrico e velocità, sono le rispettive grandezze intensive "coniugate all'energia". Da questo confronto capiamo che l'entropia ha per la termologia la stessa importanza della carica elettrica per l'elettrologia e della quantità di moto per la meccanica. E le correnti di entropia hanno in termologia un ruolo importante come le correnti elettriche in elettrologia e le forze (correnti di quantità di moto) in meccanica. È quindi coerente cominciare l'insegnamento della termologia con l'entropia.

6. H. Fuchs (Whinterthur) Differenze e Cambiamento nel Corso di Fisica di Karlsruhe (seminario e Workshop)

Una particolare manifestazione della natura—quella della differenza di quantità intensive—ci porta ad introdurre i processi naturali da un punto di vista dinamico. Questa idea è stata usata un poco nel corso "Energy and Change" di Boohan and Ogborn, ma molto poche delle sue potenzialità sono state utilizzate a fondo. Quando noi investighiamo l'uso del linguaggio naturale nel campo dei processi fisici, sembra che gli esseri umani percepiscano fenomeni come i fluidi, l'elettricità, il calore ed il moto come forme (gestalts) strutturate che hanno tre aspetti indispensabili: sostanza, intensità, e forza (o potenza). Un curriculum che non sottolinei l'unità di questi aspetti fa un cattivo servizio a chi deve imparare le scienze. Il Corso di Fisica di Karlsruhe (Falk, Herrmann, Job, et al.) è un esempio di come i più importanti elementi della gestalt percettiva dei processi fisici possano essere implementati in modo strettamente analogo nei differenti campi della fisica. Esso sottolinea fin dall'inizio il ruolo delle quantità che possono essere pensate come una specie di sostanza (ciò che prima abbiamo indicato come l'aspetto di sostanza), e mostra come esse ed i potenziali a loro associati (le grandezze intensive) sono collegate ai trasferimenti di energia (che per noi hanno il significato che l'aspetto di forza o potenza ha nella gestalt). Aggiungendo la nozione di come le differenze di potenziale e gli scambi di energia sono legati nei processi fisici, noi chiudiamo il cerchio presentando un curriculum che mette insieme gli aspetti di differenze e cambiamenti e gli aspetti del Corso di Fisica di Karlsruhe. Faremo vedere come si possono usare speciali diagrammi per una introduzione qualitativa ma completa della fisica che è anche una implementazione fedele della gestalt dei processi fisici.

7. A. Drago (Pisa-Napoli) I paradigmi nell'insegnamento della Fisica: il caso della termodinamica

La didattica della fisica è passata attraverso diversi paradigmi, contrassegnati dai dogmi seguenti: 1° le verità fisiche, ricavate dagli esperimenti, sono assolute; 2° solo il linguaggio degli esperimenti e della matematica (e della logica matematica) è valido per la didattica; 3° tutti i problemi della didattica della fisica sono superabili con la 'nuova' pedagogia; 4° anche la pedagogia deve essere scientifica (computer, scienze cognitive). Ma dopo cinquanta anni di innovazioni, la didattica della fisica non ha risolto i suoi problemi; i quali hanno al centro la domanda cruciale che implicitamente è stata posta dopo aver superato il secondo dogma: oltre gli esperimenti e la matematica, che cosa c'è nella fisica? Cioè la didattica della fisica non conosce bene l'oggetto del suo insegnamento; perciò spesso si riduce ad una praticoneria o ad un indottrinamento. La pratica didattica, al seguito di quella umanistica, si riferisce ai "concetti" in fisica. I quali possono corrispondere a singole grandezze fisiche (ad es. massa), ma possono essere anche molto più ampi (ad es. inerzia, stabilità, determinismo, meccanicismo, ecc.). Qui c'è la difficoltà che nessuno controlla questo linguaggio (la filosofia della scienza è dentro una crisi secolare). Qui si inserisce la esplorazione (filosofica) della didattica della scuola di Karlsruhe. Essa nota che all'interno di una teoria un concetto fisico può avere più ruoli, o fondamentale o derivato (ad es. la quantità di moto in meccanica). Questa variazione di ruolo *cambia i ruoli* (ad es. forza) *ed i significati* (ad es.; l'energia: cosa o flusso?) *degli altri concetti della teoria*. Il che porta a scoprire nuove formulazioni della stessa teoria. Inoltre un medesimo concetto può corrispondere a grandezze fisiche differenti (ad es., l'entropia può essere concepita come calorico o come carica elettrica, senza danno per la matematica). Infatti ho mostrato che i concetti fisici dipendono poco dalla base sperimentale; quelli della termodinamica (di S. Carnot) sono, come ci si aspetta, molto diversi da quelli della meccanica di Newton; ma sono quasi gli stessi dei concetti della meccanica di L. Carnot. Cosicché formulazioni diverse di una stessa teoria (ad es. meccanica) possono essere molto diverse concettualmente. Questa forte diversità a livello concettuale si aggiunge alla ben nota diversità matematica (finora frettolosamente spiegata, anche dal grande epistemologo E. Mach, con la sola facilità nel risolvere i problemi fisici). Ambedue le diversità rendono incommensurabili le differenti formulazioni di una stessa teoria (che ad es. sono più di dieci, sia in meccanica classica che in meccanica quantistica)? Ma allora quali sono le caratteristiche con le quali si possono distinguere con precisione le diverse formulazioni? Qui è inevitabile un discorso sui fondamenti della fisica teorica. La termodinamica, quando si risalga alla formulazione originaria di S. Carnot, suggerisce due opzioni come fondamento di ogni formulazione. Questa concezione dei fondamenti delle teorie fisiche ha avuto due verifiche:

- 1) la ricostruzione della storia della fisica (da Galilei alla meccanica quantistica); ne risulta un quadro storico molto più articolato e profondo di quello della usuale storia unilineare;
- 2) la didattica della fisica (e anche la didattica della chimica) è vincolata ad insegnare quattro teorie, quelle che sono le più rappresentative delle possibili quattro coppie di scelte sulle due opzioni. Alla luce di questa concezione viene rivisitata la esperienza della scuola di Karlsruhe sul caso della termodinamica.

8. H. Hauptmann (Karlsruhe) Teaching Mechanics in the KPK

In generale, oggigiorno la meccanica si insegna sostanzialmente nella forma che le diede Newton, cioè come una teoria di azione a distanza. Si dice, per esempio, che un corpo A esercita una forza su un corpo B senza menzionare il ruolo del mezzo che si trova tra A e B nella trasmissione di questa forza. Invece, almeno da Maxwell in poi, si è dell'opinione che le forze siano meglio descritte come fenomeni locali. Questa concezione non solo semplifica la teoria, ma è anche concettualmente più facile. Nella struttura della fisica che sta alla base del presente corso, la meccanica viene caratterizzata come quell'area della fisica che tratta della grandezza estensiva *quantità di moto* e delle sue correnti. Da questo punto di vista appare logico cominciare il corso trattando le grandezze p e F . Questo modo di procedere è molto diverso da quello della didattica tradizionale dove la forza viene introdotta molto presto, ma dove di quantità di moto si parla, se lo si fa, molto più tardi.

9. M. D'Anna (Locarno) Massa, inerzia ed energia

Nella prima parte viene presentata la struttura concettuale dell'approccio tradizionale alla relatività ristretta, mettendo in luce alcuni punti cruciali relativi ai concetti di massa, inerzia ed energia. Nella seconda parte, ponendo a fondamento l'identità tra massa ed energia, viene presentato l'approccio alla dinamica relativistica proposto dal KPK.

10. C. Tarsitani (Roma) Dalla meccanica classica alla meccanica quantistica

Si intende discutere in generale il problema dell'insegnamento della Fisica Quantistica negli ultimi anni dei licei scientifici e tecnologici. Il tema sarà trattato dal punto di vista delle ricerche in Didattica della Fisica, tenendo conto delle diverse proposte già esistenti, anche a livello internazionale, e dello stato attuale delle cose nelle scuole (in particolare, nei libri di testo liceali). Si cercherà inoltre di esplorare la possibile connessione e la compatibilità tra l'indirizzo dato dalla scuola di Karlsruhe all'insegnamento della fisica classica e un approccio coerente alla fisica quantistica che non ne semplifichi eccessivamente i presupposti fondamentali.

INTRODUZIONE ALLA FISICA DI KARLSRUHE

FRIEDRICH HERRMANN, Università di Karlsruhe

Introduzione

Perché la fisica necessita di una nuova struttura? Perché ha bisogno di una cura?

I contenuti della scienza e in particolare della fisica vanno crescendo continuamente. Invece, il tempo disponibile per l'insegnamento rimane costante. Come possiamo risolvere questo problema?

Una delle strategie è un rinnovamento continuo dei contenuti, e in particolare dei contenuti classici. L'80 % dei contenuti dei nostri programmi e dei libri di testo riguarda temi della fisica prima del 1900. C'è bisogno di una rielaborazione di questi temi, di una compattazione.

C'è un'altra ragione per cambiare l'insegnamento della fisica: la fisica è la materia che agli allievi piace meno di tutte. La fisica è la materia più odiata di tutte le materie scolastiche.

Quindi, sovrabbondano ragioni per preoccuparsi dell'insegnamento della fisica.

Questa conferenza è divisa in tre parti:

1. concetti antiquati (costituisce una breve introduzione);
2. il linguaggio della fisica;
3. strutture nella fisica (e questa è la parte principale).

1. Concetti antiquati

Esiste un parallelismo tra lo sviluppo storico della scienza e l'evoluzione biologica.

Ogni insegnante delle scienze, ogni autore di un libro di scienza ha dovuto imparare la scienza lui stesso. Quando, più tardi, sta insegnando la scienza lo farà in una forma un po' diversa da come la ha imparata lui stesso. Perché? Perché qualche volta pensa che una modifica renda più chiara la presentazione o qualche volta pensa di introdurre alcuni risultati della ricerca moderna. Si possono paragonare queste modificazioni con le *mutazioni* nell'evoluzione biologica.

Adesso, in generale, ogni insegnante o scienziato conosce bene soltanto una piccola parte della fisica. Del resto ha solo alcune conoscenze piuttosto globali. Per conseguenza, i cambiamenti che effettua nel suo corso o libro si riferiscono solamente a dettagli e non alla struttura basilare della fisica. In altri termini: il sapere basilare non viene sottoposto alla stessa *pressione selettiva* come i dettagli

più recenti. Questo significa che si aggregano, si appiccicano i risultati nuovi ai più antichi, non si integrano.

Una conseguenza di quest'osservazione è che nella rappresentazione attuale della scienza si riconosce lo sviluppo storico della scienza. Ed ogni studente deve riprodurre questo corso storico. Fino ai dettagli, il processo di apprendimento riflette o riproduce o copia il processo tortuoso di evoluzione della stessa scienza.

Quest'osservazione ricorda una legge della teoria dell'evoluzione: la conosciuta *legge biogenetica fondamentale* di Ernesto Haeckel, secondo la quale l'ontogenesi è una ricapitolazione della filogenesi. In questo modo si conservano le deviazioni dell'evoluzione. Si mantengono idee che, in un contesto moderno, risultano svantaggiose o superflue. Persino, sopravvivono errori evidenti.

Sviluppando il nostro corso abbiamo cercato di eliminare questi fardelli o residui storici, questi concetti superflui o erronei.

2. Il linguaggio della fisica

Inizio con alcuni commenti relativi al linguaggio della fisica.

Il linguaggio che parliamo quando insegniamo la fisica necessita di cambiamenti, per ragioni diverse.

Ne menzionerò tre.

1. **Semplificazione.** Ci sono troppi termini tecnici. Sono state realizzate analisi che hanno mostrato che nei libri scolastici di fisica, ci sono più termini tecnici che vocaboli in un corso di una lingua straniera, ad esempio nell'insegnamento dell'inglese. Imparano più vocaboli in fisica che in inglese. Di più, si è scoperto che molti termini tecnici si introducono, ma non si utilizzano più tardi.
2. **I termini composti.** E' particolarmente dannoso nel caso dei nomi di grandezze fisiche. Infatti, ho contato più di 40 forze particolari. Questi sono alcuni esempi:
Forza elastica, forza gravitazionale, forza elettrica, forza magnetica, forza di richiamo, forza centripeta, forza frenante, forza peso, forza d'attrito, forza di marea, forza di Archimede, forza di Coriolis, forza di Lorentz. Un vantaggio importante dell'uso delle grandezze fisiche è che una grandezza ha un valore diverso in sistemi diversi. C'è la massa di una stella, la massa di una mela e la massa di un elettrone. Così possiamo comparare questi tre oggetti. Troviamo la stessa proprietà nei tre oggetti: l'inerzia. Se conferiamo nomi diversi alle grandezze, secondo il sistema a cui corrispondono, provochiamo la impressione che si tratta di grandezze distinte – la differenza è soltanto nel valore della forza, ma non nella sua natura. Tutti conoscete i numerosi nomi di energie, come per esempio:

Energia meccanica, energia cinetica, energia potenziale gravitazionale, energia potenziale elettrostatica, energia potenziale elastica, energia elettrica, energia termica, energia chimica, energia nucleare, energia elettromagnetica, energia interna, energia luminosa, energia eolica, energia solare, energia idraulica, energia muscolare, energia tellurica, energia geotermica, energia rinnovabile, energia di ionizzazione, energia di legame, energia di attivazione, energia di rotazione, energia di oscillazione, energia di traslazione, energia dissipata.

3. **Il linguaggio antiquato:** Si usano espressioni che erano adeguate in un tempo passato. Avevamo idee diverse da oggi su un tema e quindi usavamo una descrizione verbale diversa. Un esempio: diciamo: „Un corpo A compie lavoro su un corpo B“, invece di dire: „C'è un flusso di energia da A a B“. Questa maniera di parlare suggerisce un'azione a distanza: Si parla soltanto di A e di B, ma non si menziona il sistema tra A e B, responsabile per il trasferimento dell'energia. Questa maniera di parlare viene da un'epoca in cui non esisteva ancora l'idea di campo. Non c'era altra possibilità che postulare azioni a distanza. Ma da più di 150 anni già non crediamo in tali azioni. Ma nel linguaggio della fisica l'antica convinzione si è conservata.

Un altro esempio: il termine potenza. Viene da un'epoca in cui non ancora si poteva localizzare l'energia e tanto meno una corrente di energia. Oggi si chiamerebbe questa grandezza corrente di energia o flusso di energia. Ma l'antiquata potenza si conserva.

3. Strutture nella fisica

Passo al mio terzo argomento: la struttura della fisica.

Una particolarità del nostro corso è che una certa classe di grandezze fisiche ha una parte importante.

Esse giocano il ruolo di grandezze basilari. Queste sono le quantità estensive. Appartengono a questa classe le grandezze seguenti: la massa, l'energia, la carica elettrica, la quantità di moto, l'entropia, la quantità di sostanza e altre.

Le particolarità delle quantità estensive sono le seguenti:

- il valore di una quantità estensiva si riferisce sempre a una regione di spazio. All'opposto di temperatura o pressione, che si definiscono nel singolo punto.
- poi, a ogni quantità estensiva corrisponde una corrente: corrente elettrica, corrente di energia, corrente di massa, di entropia ecc.
- e, finalmente c'è questa particolarità: di ogni quantità estensiva si può affermare se è una quantità conservata o no. Così, l'energia, la quantità di moto o la carica elettrica sono conservate. L'entropia e la quantità di sostanza invece non sono conservate. Al contrario, non fa senso di dire che la temperatura, la pressione o velocità siano conservate o non conservate.

Ciò che ho detto si può riassumere in quest'equazione:

$$\frac{dX}{dt} = I_X + II_X$$

Che si riferisce a una regione di spazio, figura 1.

La X rappresenta una quantità estensiva qualsiasi. Il termine a sinistra rappresenta il cambiamento della quantità di X all'interno della regione. Il primo termine alla destra è la corrente di X attraverso la superficie della regione, e il secondo termine alla destra è il tasso di produzione. Quindi: l'equazione ci dice, che la quantità X all'interno della regione può cambiare in due modi:

1. per mezzo di una corrente attraverso la superficie o
2. per mezzo di produzione o annientazione all'interno della regione.

Si nota che l'equazione non è altra cosa che l'espressione di una legge di bilancio. Possiamo dire che le quantità estensive sono quantità che soddisfano una legge di bilancio.

Per le quantità conservate, la II alla destra è sempre nulla. Non c'è produzione o annichilazione. Per le non conservate la II non è necessariamente nulla.

Consideriamo alcuni esempi:

Sia X la carica elettrica.

In questo caso l'equazione si scrive così:

$$dQ/dt = I.$$

Attenzione: il significato dell'equazione non è la definizione dell'intensità di corrente. L'equazione esprime il bilancio della carica elettrica, ed esprime la conservazione della carica, poiché non c'è un termine II di produzione.

Altro esempio:

$$dp/dt = F$$

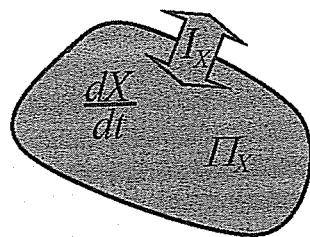


Figura 1

È molto conosciuta. Infatti si tratta della seconda legge di Newton. Si nota che si può interpretare la forza come la corrente della quantità di moto.

Terzo caso: l'energia:

$$dE/dt = P$$

La potenza non è altra cosa che la corrente di energia.

Poi, l'entropia:

$$dS/dt = I_S + II_S$$

I_S è la corrente di entropia, II_S è il tasso di produzione. La particolarità di questo caso è che la II può essere soltanto positiva. C'è produzione ma non c'è mai distruzione.

Perché è interessante mettere queste grandezze al centro di un corso di fisica? Ci sono parecchie ragioni. Ne menzionerò alcune. La prima già si vede nella tabella 1 dove sono evidenti le analogie nella fisica.

	grandezza estensiva	grandezza intensiva	intensità della corrente	corrente di energia
meccanica	quantità di moto p	velocità v	forza F (intensità della corrente meccanica)	$P = v \cdot F$
elettrologia	carica elettrica Q	potenziale elettrico φ	intensità della corrente elettrica I_Q	$P = \Delta\varphi \cdot I_Q$
termologia	entropia S	temperatura T	intensità della corrente di entropia I_S	$P = T \cdot I_S$
chimica	quantità di sostanza n	Potenziale chimico μ	intensità della corrente di sostanza I_n	$P = \Delta\mu \cdot I_n$

Tabella 1

Come funzionano queste analogie? Si corrispondono grandezze fisiche, le une alle altre. E al primo posto, sono le quantità estensive che si corrispondono. Carica elettrica, quantità di moto, entropia e quantità di sostanza. Poi ci sono le cosiddette grandezze intensive: potenziale elettrico, velocità, temperatura assoluta e potenziale chimico.

Poi si nota che ogni linea di questa tabella corrisponde a uno dei campi classici della fisica: elettricità, meccanica, termologia e persino la chimica.

Già abbiamo visto che a ognuna di queste quantità estensive corrisponde una corrente: la corrente elettrica, la corrente della quantità di moto, che non è altro che la forza, la corrente di entropia, la corrente di quantità di sostanza. Si possono aggiungere molte altre colonne, come resistenza, capacità, ecc.

Ora, si osserva che le relazioni tra le grandezze di una linea si ritrovano analogamente nelle altre linee. Già abbiamo visto un esempio: per ogni linea vale un'equazione di bilancio. Ma ce ne sono altre.

Quindi, si può considerare questa tabella come un dizionario. Cominciamo con una linea. Consideriamo una relazione tra grandezze fisiche di questa linea; possiamo costruire una relazione analoga tra grandezze di un'altra linea eseguendo una traduzione formale per mezzo della tabella.

Ma si nota che manca una cosa. Dov'è l'energia? L'energia è una quantità particolare. Non corrisponde a nessuna linea in particolare. Passando da una linea all'altra l'energia si trasforma in energia, non si traduce. L'energia è una quantità che ha la stessa importanza in tutti questi campi. È una quantità che può servire per un'integrazione dei campi particolari della fisica.

Mettiamo per esempio il flusso di energia: con la seconda equazione si calcola una corrente di energia elettrica, con la prima un flusso di energia meccanica (per mezzo di una cinghia di trasmissione), la terza corrisponde a un flusso di energia termica e l'ultima a una corrente di energia chimica.

Adesso, è importante che si corrispondono non soltanto grandezze e relazioni, ma anche fenomeni, dispositivi tecnici, modelli mentali. In conseguenza, si possono presentare tutti questi campi in un modo simile. Si può unificare l'insegnamento della fisica.

Nell'insegnamento tradizionale non si approfitta di questa possibilità. La trattazione della meccanica è molto distinta dalla trattazione dell'elettricità e ancora distinta della termologia. Noi proponiamo di mettere in evidenza questa struttura comune e di utilizzare gli stessi modelli quando insegniamo la meccanica, l'elettricità, la termologia e persino la chimica.

Ma qual è il modello da impiegare? Proponiamo di utilizzare il modello che tradizionalmente già si usa in elettricità, e che già ho impiegato quando ho spiegato l'equazione di bilancio.

In che cosa consiste questo modello?

Si immagina la quantità X nell'equazione di bilancio come una sostanza, come un fluido.

Con "immaginare" voglio dire che si parla correttamente di esse, nel senso della fisica, quando se ne parla come se si trattasse di una sostanza, quando si

applica lo stesso vocabolario che si usa nel linguaggio comune quando parliamo di una sostanza.

Questo modello ci risulta familiare nel campo dell'elettricità, ma non negli altri campi della fisica. Né nella meccanica, né nella termologia. Il fatto che sia permesso parlare così di una grandezza e farsene una rappresentazione mentale di tipo sostanza è della massima importanza per l'insegnamento.

Gli altri tre campi guadagnano molto in questo modo. Risultano molto più facili.

Già possiamo notare che se si prende sul serio questa analogia, le quantità estensive sono le protagoniste del campo corrispondente. Per queste ragioni, nel nostro corso cominciamo la meccanica dalla prima ora di lezione con la quantità di moto, e cominciamo la termologia dalla prima ora di lezione con l'entropia.

La scelta di questo modello comporta un altro vantaggio. Questo ha a che fare con il linguaggio. Quando introduciamo una nuova grandezza fisica, non basta dare la sua definizione e spiegare il modo in cui essa è misurata. Gli studenti devono anche imparare l'impiego dei verbi relativi alla grandezza. Un esempio:

- consideriamo la grandezza, "forza" e domandiamoci quali sono i verbi che occorre usare accanto alla parola forza in fisica. Sappiamo che in italiano sono essenzialmente tre:
- una forza *agisce*, una forza è *esercitata*, e infine *si applica* una forza. Questi sono i verbi e nient'altro.

Un altro esempio: il lavoro. Se non erro, in italiano un lavoro si *compie*. Un verbo non molto frequente nel linguaggio comune.

Si vede che lo studente deve imparare non soltanto i nomi delle grandezze, ma anche verbi, preposizioni, avverbi. Tutto un linguaggio segreto.

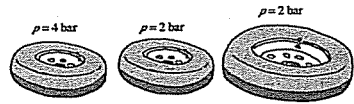
Adesso, passiamo a un terzo esempio: la carica elettrica. Però, qui le cose sono molto diverse. Ci sono molte possibilità di esprimersi: la carica elettrica è *contenuta* in un corpo, il corpo *ha* carica elettrica, la carica è nel corpo, esso ha *molta* o *poca* carica, o *nessuna* carica. La carica *fluisce* o *scorre* o *va* da A a B. La carica può *abbandonare* A e *arrivare* in B. La si può *accumulare* o *concentrare*. La si può *distribuire*, *perdere* e *diluire* e la si può *raccogliere*.

Da dove viene questa particolarità? È fondata sul fatto che la carica elettrica è una quantità estensiva e che per essa utilizziamo il già menzionato modello di *sostanza*.

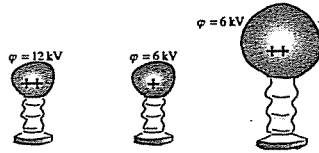
Ora, viene l'ultima parte della mia conferenza.

Mostrerò alcune conseguenze delle analogie. Descriverò alcune situazioni analoghe in quattro versioni nelle figure 2, 3 e 4.

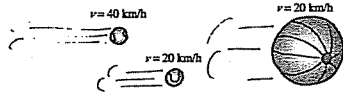
La prima versione è la versione pneumatica o idraulica, la seconda è quella elettrica, poi la meccanica e infine la termica. Sono alcuni esempi, ognuno in 4 versioni.



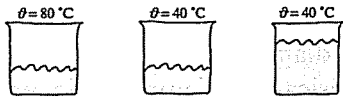
Uno pneumatico contiene tanta più *aria*
 - quanto più esso è grande;
 - quanto più la sua pressione è alta.



Un corpo contiene tanta più *carica elettrica*
 - quanto più esso è grande;
 - quanto più il suo potenziale elettrico è alto.

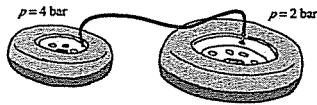


Un corpo contiene tanto più (*quantità di*) *moto*
 - quanto più la sua massa è grande;
 - quanto più la sua velocità è alta.

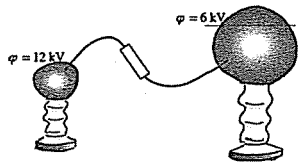


Un corpo contiene tanta più *entropia*
 - quanto più esso è grande;
 - quanto più la sua temperatura è alta.

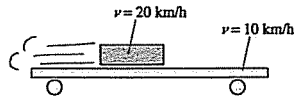
Figura 2



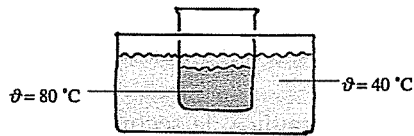
L'aria fluisce spontaneamente da punti a pressione elevata verso punti a pressione più bassa.



La carica elettrica fluisce spontaneamente da punti a potenziale elevato verso punti a potenziale più basso.

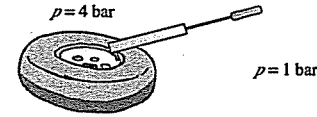


Il moto fluisce spontaneamente da corpi a velocità elevata verso corpi a velocità più bassa.

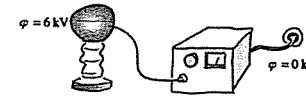


L'entropia fluisce spontaneamente da corpi a temperatura elevata verso corpi a temperatura più bassa.

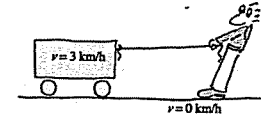
Figura 3



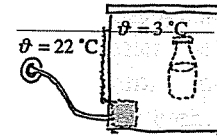
La pompa trasporta l'aria dalla pressione bassa alla pressione alta.



La "pompa di carica" (batteria, generatore) trasporta la carica elettrica dal potenziale basso al potenziale alto.



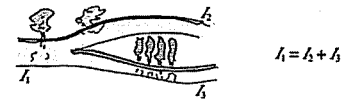
La "pompa di moto" (motore) trasporta il moto dalla velocità bassa alla velocità alta.



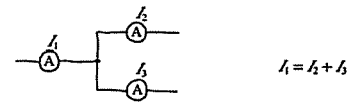
La "pompa di entropia" (pompa di calore) trasporta l'entropia dalla temperatura bassa alla temperatura alta.

Figura 4

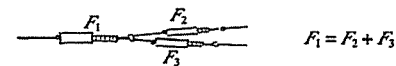
Altre analogie sono nella Figura 5



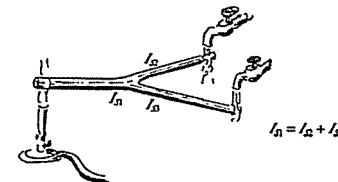
Le intensità delle correnti che fluiscono verso un nodo sono uguali alle intensità delle correnti che escono dal nodo.



Le intensità delle correnti che fluiscono verso un nodo sono uguali alle intensità delle correnti che escono dal nodo.



Le intensità delle correnti che fluiscono verso un nodo sono uguali alle intensità delle correnti che escono dal nodo.



Le intensità delle correnti che fluiscono verso un nodo sono uguali alle intensità delle correnti che escono dal nodo.

Figura 5

Sommario

Ecco secondo noi i vantaggi del corso: le parti corrispondenti alla fisica classica non soltanto sono più corte, più compresse, ma anche più facili da capire. Così disponiamo di più tempo per l'insegnamento della fisica moderna.

Il corso è stato sviluppato dai collaboratori del mio gruppo di lavoro. La prima sperimentazione, il primo test, è stato realizzato da noi stessi al liceo. Soltanto poi, quando avevamo già una versione presentabile, alla sperimentazione hanno iniziato a partecipare un maggior numero di persone, tutti professori di liceo.

Fino ad oggi il corso è stato sperimentato con 20 000 (ventimila) allievi, approssimativamente.

Uno dei problemi maggiori della fase di sperimentazione è stato il seguente: come maneggiare le deviazioni rispetto al programma ufficiale. Siamo riusciti a convincere l'autorità scolastica dei vantaggi del nostro approccio, di modo che oggi il programma ufficiale dà la libertà ai professori di scegliere tra il metodo tradizionale e il metodo KPK

ENERGIA: TANTO NECESSARIA, TANTO POCO CONOSCIUTA E L'ENTROPIA POI...

M. VICENTINI

Dipartimento di Fisica, Università di Roma "La Sapienza"

1. Introduzione

Crisi energetica, effetto serra, inquinamento, il prezzo del petrolio, pregi e rischi del nucleare, le fonti alternative.....

Queste parole sono un esempio di parole che oggi appaiono nei titoli dei giornali e telegiornali e che, probabilmente, continueranno ad apparirvi negli anni a venire.

E noi lasciamo che ci scorrano addosso a volte senza nemmeno chiederci cosa dovrebbe sapere sull'energia un cittadino comune in modo da saper affrontare con consapevolezza e razionalità i problemi sottostanti a tali parole.

Tali problemi hanno a che fare essenzialmente con i due concetti fisici correlati di energia e entropia. Pertanto dovrebbe essere compito dei corsi di fisica della scuola secondaria l'affrontarne la comunicazione didattica affinché gli studenti ne comprendano la valenza scientifica ma anche sociale.

In questo articolo vorrei avviare una discussione scientifica su come impostare tale comunicazione. A tal fine dopo una presentazione di come i concetti sono presentati nei manuali e nella divulgazione (par.2) e ad una riflessione storica (par.3) esporrò le idee di studenti e insegnanti (laureati in fisica o in matematica) in proposito (par.4).

Un esame dei problemi evidenziati dalla ricerca didattica (par.5) completerà l'esposizione dei punti utili alla discussione che riprenderò nella forma di domande nel paragrafo conclusivo nella speranza di sollevare un dibattito tra i ricercatori in didattica della fisica e i fisici docenti universitari.

2. La presentazione dei concetti nei manuali e nella divulgazione

Generalmente l'itinerario seguito nei libri di testo universitari per l'introduzione del concetto di energia parte dal secondo principio della dinamica nel modello del punto materiale. Il teorema delle forze vive permette quindi la definizione delle energie potenziale e cinetica e l'affermazione della conservazione dell'energia meccanica.

Ovviamente si accenna al lavoro delle forze non conservative che sembra mettere in crisi tale conservazione ma raramente l'effetto del riscaldamento per attrito viene messo in evidenza (dopotutto la temperatura non è una variabile meccanica).

Successivamente la considerazione del modello del corpo rigido permette di allargare il concetto di energia cinetica includendovi quello dell'energia di rotazione. Il concetto di energia è comunque strettamente collegato a quello del lavoro delle forze e ne consegue la definizione "l'energia è la capacità di compiere lavoro".

Tale definizione non viene ridiscussa nel capitolo della termodinamica in cui si connette al concetto di lavoro il concetto di calore per definire l'energia interna in un modello di sistema termodinamico non sempre ben correlato con i modelli usati precedentemente.

È interessante notare che il tempo, variabile essenziale nella meccanica per descrivere il moto, viene messo da parte dopo un accenno ai processi di conduzione-convezione-irraggiamento del calore per entrare nel mondo senza tempo della Termodinamica¹

Il concetto di entropia sembra poi quasi un accidente legato alle macchine termiche e il legame tra i concetti di energia e entropia non risulta affatto chiarito dalla introduzione dell'entropia statistica. Emerge invece il concetto di "forme di energia", principalmente "calore e lavoro" che possono trasformarsi l'uno nell'altro. Raramente si trattano le sorgenti di energia.

Il mondo del movimento della dinamica e il mondo apparentemente quasi statico della TD sono, in qualche modo, connessi con l'identificazione del calore con l'energia cinetica di movimento dei costituenti microscopici del sistema.

Non sempre ci si rende conto che tale identificazione – che sostanzialmente lascia intendere che il calore è una funzione di stato – è in contraddizione con quanto enunciato nel 1° principio della termodinamica che introduce la funzione energia interna relegando calore e lavoro a "forme di energia in transito". Può essere utile ricordare in proposito che Clausius propose (1) la distinzione tra calore e lavoro interni al sistema e calore e lavoro esterni.

È importante citare due approcci di corsi di lezioni oggi considerati più come testi di riferimento per studenti bravi che come manuali. Mi riferisco alle presentazioni date da Rogers in "Physics for an inquiring mind" (2) e da Feynman nelle sue Lectures (3).

Rogers, che affronta il problema dell'energia nel capitolo 26, esordisce affermando che "è facile dire che l'energia spiega tutto in fisica, chimica... forse biologia. Ciò è praticamente privo di senso... per fare un buon uso dell'idea di energia si deve sapere la storia del concetto e capire cosa significhi".

Parte quindi con una definizione piuttosto vaga descrivendo l'energia come "qualcosa che paghiamo, il prodotto di un combustibile". L'energia quindi è pos-

¹ Truesdell in proposito commenta che il tempo era così scomparso da liberare il simbolo t con cui verrà indicata la grandezza temperatura.

seduta dal combustibile e può essere usata per fare "cose". La prima cosa discussa è il lavoro come forza per la distanza, energia trasferita tra due sistemi. Segue una discussione delle forme di energia (cinetica, potenziale, elastica) e della loro misura.

Viene poi introdotto il calore e la sua misura ($mC_p \Delta T$).. [Anche qui vi è il problema del calore visto come energia cinetica molecolare]. Una classificazione delle varie forme di energia in relazione alle sorgenti di "combustibile" conclude il capitolo con un breve accenno all'entropia di cui è significativa l'affermazione: "il futuro appartiene a coloro che possono manipolare l'entropia, coloro che capiscono l'energia saranno solo i contabili.... La prima rivoluzione industriale riguardava l'energia, ma l'industria automatica del futuro è una rivoluzione entropica" (tratto da Keffer...).

Feynman (3) parte dalla conservazione dell'energia, legge esatta che "afferma l'esistenza di una certa quantità, chiamata energia, che non cambia mai attraverso i molteplici mutamenti della natura". Idea piuttosto astratta che "si può comprendere solo se abbiamo una espressione per ognuna delle forme in cui si presenta". Segue quindi la discussione di tali forme.

Sono anche disponibili alcuni nuovi approcci sia in ambito italiano che internazionale che pongono il concetto di energia come centrale per la spiegazione dei fenomeni di cambiamento.

Citiamo in proposito i testi di Buontempo et al (4) e Baracca per la Scuola Secondaria italiana, la Fisica di Karlsruhe (5) sviluppata in Germania per la Scuola Secondaria e l'approccio inglese "Energy and change" (6).

La fisica di Karlsruhe (oggi disponibile anche in italiano) è interessante in particolare per l'approccio al concetto di entropia introdotto sostanzialmente come la controparte scientifica del concetto comune di calore. Nella analisi di processi stazionari le varie forme di energia vengono poste in relazione con i cosiddetti "portatori di energia": l'energia fluisce sempre insieme con il fluire di un'altra quantità estensiva: la massa per l'energia meccanica, la carica per l'energia elettrica... e l'entropia per l'energia termica.

L'approccio inglese punta invece in primo luogo l'attenzione sui processi non stazionari e sulle variabili intensive le cui differenze sono l'origine (o la causa) dei cambiamenti. Nei cambiamenti si hanno dei "trasferimenti di energia" e si sottolinea da un lato che "è importante pensare all'energia come una cosa che rimane la stessa, un valore che può essere calcolato" e dall'altro si sostiene che "parlare di forme di energia non è altro che un ornamento verbale alla descrizione dei cambiamenti".

L'energia non è la causa dei cambiamenti. Per calcolare l'energia si fa uso del modello microscopico.

A differenza dei manuali i libri divulgativi in genere non puntualizzano le definizioni formali del concetto di energia (anche perché in questa letteratura si

tende ad evitare l'uso della matematica) e il legame fra i concetti di energia ed entropia non viene spesso evidenziato. L'attenzione viene focalizzata sulla conservazione dell'energia in tutte le sue forme. Tra le forme vengono spesso citate il calore e l'energia termica, parole usate sostanzialmente come sinonimi con poca o nulla considerazione del concetto di temperatura. Così si può trovare una "morte per colpo di calore" (senza fonti di calore) (7) e il processo di riscaldamento (aumento della temperatura) di un oggetto viene interpretato come "produzione di calore" in parziale contraddizione con il principio di conservazione in base al quale l'energia non può essere creata o distrutta. In alcuni casi si usa proprio la dizione "riscaldamento creato" o si dice che "la luce riscalda cioè produce energia termica nel corpo" (8).

Anche in un libro che ha come concetto portante il concetto di temperatura (9) a proposito di calore si usano aggettivi come assorbito, sviluppato, generato, si parla di energia termica come "un altro modo di descrivere l'energia del moto" con ovvio riferimento ad un modello particellare della materia. Anche in questo caso manca la connessione calore-entropia in quanto l'entropia è introdotta su basi statistiche.

La definizione macroscopica di entropia si accompagna alla definizione statistica e ai concetti di calore ed energia in alcuni libri divulgativi di autori non fisici che tendono a far conoscere la portata dei principi della termodinamica in altre discipline, anche con attenzione alla Termodinamica dei processi (10) totalmente assente nei manuali che ignorano gli sviluppi nel campo posteriori alla nascita della termodinamica classica. Così per la geologia si può citare il libro "Mother nature two laws" (11), per l'economia il libro di Rifkin (12) "Una nuova concezione del mondo: l'entropia" e per la biochimica il libro di De Rosnay "Il macroscopico verso una visione globale" (13).

È interessante notare che le applicazioni della termodinamica nelle altre discipline sono spesso rappresentate nei termini di diagrammi di flusso con attenzione alle sorgenti di energia.

Questo breve excursus su alcuni testi di divulgazione scientifica fa sorgere alcune domande riguardo alla connessione con la conoscenza fornita dai manuali. In particolare ci possiamo chiedere se tale conoscenza (a parte gli approcci più innovativi sopra citati) favorisce o meno la comprensione delle applicazioni dei concetti di energia e entropia a contesti non fisici.

Possiamo anche chiederci se l'apparente confusione tra calore ed energia cinetica e la scarsa attenzione al concetto di temperatura ricalcano le problematiche dello sviluppo storico. Può essere pertanto utile una breve riflessione su tale sviluppo.

2. Intermezzo storico

Lo spunto per questo intermezzo è tratto principalmente da due fonti: i saggi di Crosbie Smith (14, 15) sulle voci "energia" e "calore" nella Enciclopedia della Fisica e i volumi dei Benchmark Papers on Energy a cura di Bruce Lindsay (questi volumi raccolgono un insieme di articoli scientifici sul tema) (16).

Nella introduzione a questi volumi Lindsay afferma che l'idea chiave per capire l'energia è semplice: costanza in mezzo ai cambiamenti. I cambiamenti, caratteristica ovvia della esperienza umana, potrebbero essere trattati ciascuno per sé. Fin dall'antichità vi è stato tuttavia un desiderio di porre ordine tra esperienze apparentemente scorrelate. Un primo esempio è la leva semplice, macchina il cui significato scientifico di ricerca di invarianze non è citato nei libri di testo. L'invarianza della leva come macchina è la somma dei prodotti del peso per le distanze di sollevamento.

Questi prodotti richiamano alla mente il concetto di lavoro come forza per la distanza. La parola forza quindi ci suggerisce di guardare allo sviluppo dell'energia in tempi più recenti a partire da Newton che ne introdusse il concetto.

Dice tuttavia Crosbie Smith che vedere la storia della fisica come una successione logica di deduzioni ricavate dalle leggi di Newton è del tutto inadeguato:

"Alla luce dell'evidenza storica, una presentazione del genere appare inadeguata; in primo luogo, quasi tutti i matematici europei del Settecento – e alcuni dei principali protagonisti della storia della fisica – in realtà non discussero mai a fondo le leggi di Newton. In secondo luogo, questo tipo di storie non prende in considerazione le aspre controversie sorte in merito ai fondamenti della meccanica, le quali hanno il pregio di mostrare come nella fisica l'emergere di principi fondamentali raramente sia un problema di deduzioni logiche accurate o di contributi oggettivi. In terzo luogo, l'introduzione dei principi dell'energia non può essere compresa correttamente senza valutare il ruolo avuto dalle trasformazioni economiche e sociali che si verificarono in Europa, e soprattutto in Gran Bretagna, all'epoca della Rivoluzione Industriale."

L'autore fa quindi risalire la ricerca della invarianza nei cambiamenti in primo luogo al "principio di conservazione del moto" formulato da Descartes da cui segue la conservazione della quantità di moto nell'Universo.

Newton accetta tale conservazione e introduce la forza come rapidità di cambiamento della quantità di moto, un principio attivo per la conservazione del moto. Vi sono tuttavia problemi sulla definizione di forza come dimostra il dibattito iniziato da Leibniz con l'introduzione del principio di conservazione della vis viva.

Tale dibattito inizialmente sembra far riferimento ad esperimenti di urti fra oggetti che, a seconda della loro elasticità, conservano o meno i prodotti mv ed

mv^2 . Per Leibniz il moto (mv^2) in assenza di elasticità, si trasmette alle parti più piccole: "Io avevo sostenuto che nel mondo le vis vivae si conservano. Mi è stato obiettato che nella collisione due corpi morbidi o non elastici perderebbero la loro forza. Rispondo che non è così. È vero che i corpi nella loro interezza la perdono rispetto al loro movimento totale, ma le parti l'acquistano, poiché la forza di collisione crea un'agitazione interna. Così questa perdita è solo apparente. Le forze non sono distrutte, ma dissipate tra le parti più piccole. Non c'è alcuna perdita, ma è come se qualcuno volesse cambiare una moneta con pezzi più piccoli".

Nel brano la parola "forza" esplicita le ragioni del dibattito. La forza coinvolta negli urti è, presumibilmente, ciò che si esplica nel contatto tra i due corpi. Con il beneplacito di tutti coloro che sostengono che il concetto di forza è intuitivo il dibattito sulla misura della forza motrice come mv o mv^2 indica che la percezione di un urto o una spinta coinvolge, di fatto, ambedue le grandezze.

Gli esperimenti di Gravesande in cui l'urto era fra oggetti delle stesse dimensioni e masse diverse lasciati cadere da diverse altezze su un materiale deformabile (in cui era possibile misurare le impronte lasciate dalla caduta e il cui risultato dava che si avevano impronte uguali per uguali vis vivae) fa propendere la bilancia in favore di Leibniz.

Il dibattito tuttavia prosegue nell'ambito matematico astratto della meccanica razionale.

Altri erano i problemi sollevati dal funzionamento delle macchine e altre le soluzioni proposte in ambito ingegneristico ed economico.

Qui si pone la definizione del concetto di lavoro e della relazione con la vis viva, ora ridefinita come $1/2 mv^2$.

Il concetto di lavoro utile per confrontare l'efficienza delle macchine viene riferito alla misura che si ottiene dal "potere di elevazione" (ovvero il peso per la distanza cui viene sollevato – ci ricorda le leve degli antichi).

Ancora in ambito ingegneristico fa la sua comparsa, con le macchine termiche, il concetto di calore. Tale concetto era, nella teoria del calorico in cui si consideravano i processi verso l'equilibrio termico in assenza di lavoro, un buon indicatore di invarianza nelle trasformazioni.

Le macchine termiche pongono ora i due problemi del "valore meccanico del calore" e del "valore termico del lavoro". Problemi affrontati negli esperimenti di Joule che, è d'uopo ricordare, non si limitano alla presentazione data dai libri di testo che è limitata alla produzione di riscaldamento per via meccanica in quanto venivano utilizzate anche le sorgenti elettromagnetiche.

L'attenzione al funzionamento delle macchine termiche – ovvero alla produzione di lavoro dal calore sembra spostare l'accento più sul valore meccanico del calore che non sul valore termico del lavoro. Non è raro quindi trovare che la

catena che dal lavoro dissipativo che provoca un aumento della temperatura del sistema e che successivamente, in opportune condizioni sperimentali può essere azzerato da un flusso di calore verso l'ambiente esterno venga semplificata nella affermazione che il lavoro si trasforma in calore.

In realtà il ruolo della temperatura, pur presente ad esempio nel lavoro di Carnot (che indica l'analogia tra il flusso di calore dovuto ad un ΔT e il flusso di materia dovuto ad un Δh), non sembra essere molto sottolineato.

Ampie sono invece le discussioni sulla interpretazione del calore come movimento di particelle di materia o di etere che sembrano indicare la credenza diffusa nel principio di conservazione del movimento.

Calore, lavoro, energia cinetica... manca ancora un ingrediente per la conservazione dell'energia. Sulla definizione della energia potenziale vanno ricordati i lavori di Rankine e di Thomson (17) che si inseriscono in un dibattito più ampio sulla transizione tra potenzialità e attualità che risale addirittura ad Aristotele. Nel dibattito appaiono i termini "vis viva virtuale" (Carnot), "vis potentialis" (Eulero), "energia statica" (Thomson). Rankine introduce l'aggettivo "potenziale" per tale energia anche con riferimento al nome (e concetto) "potenziale" già introdotto da Green per la funzione il cui gradiente dà le intensità gravitazionali, elettriche e magnetiche. Rankine definisce poi anche l'energia potenziale come energia di configurazione.

Apparentemente la convinzione che l'energia fosse legata a qualche forma di attività (movimento o lavoro) pone difficoltà ad interpretare l'energia potenziale come una vera energia.

Si affermano comunque le definizioni di Rankine sulla energia come capacità di eseguire lavoro sia come attività reale che come attività potenziale. Tali definizioni hanno mantenuto la loro validità fino ai nostri giorni anche se nello scorso secolo altri tipi di energia sono entrati nel linguaggio scientifico (quali l'energia radiante, l'energia di riposo, l'energia nucleare).

Come abbiamo visto nei manuali l'energia potenziale presentata agli studenti è essenzialmente l'energia di configurazione attribuibile ad un sistema in una particolare situazione di equilibrio vincolato che può dar luogo ad un processo per rimozione del vincolo (una molla compressa, una massa ad una certa altezza, un oggetto ad una certa temperatura). Manca la discussione delle vere energie potenziali ovvero quelle che richiedono trasformazioni significative prima di essere in grado di produrre lavoro, ovvero le sorgenti di energia.

Questo breve excursus storico pone anche in evidenza che alcuni problemi dei manuali e dei libri divulgativi, e come vedremo nel prossimo paragrafo, degli studenti e degli insegnanti, siano la sopravvivenza di problemi presenti nella evoluzione storica del concetto di energia.

3. Le idee di studenti, insegnanti e ricercatori

Dalle ricerche sulle concezioni alternative è possibile trarre informazioni da un lato sulle idee degli studenti riguardo al concetto di energia e ad altri concetti termodinamici e dall'altro sulla posizione scientifica dei ricercatori in didattica autori di tali ricerche (18).

Non molte ricerche sono state rivolte ad individuare le concezioni degli insegnanti ma è possibile trarne indicazioni dalle attività svolte nell'ambito della Scuola di Specializzazione all'insegnamento della Regione Lazio.

È possibile quindi inferire un quadro della evoluzione delle idee di senso comune degli studenti alle idee scientifiche.

a) La conoscenza comune sul concetto di energia

Possiamo definire le caratteristiche di tale conoscenza dalle ricerche sulle idee degli studenti di scuola primaria che non hanno ancora ricevuto precise informazioni di conoscenza scientifica.

Vediamo così che possono presentarsi i seguenti quadri di conoscenze:

- Energia associata con l'attività, degli esseri umani o di oggetti;
- Energia come qualcosa contenuta in particolari oggetti;
- L'energia può essere generata, essere attiva, essere persa;
- L'energia è come un fluido che può essere trasferito in particolari processi;
- L'energia è la causa che fa succedere qualcosa.

Chiaramente gli studenti associano alla parola energia diverse istanze della vita comune focalizzando l'uno o l'altro aspetto. In qualche modo emergono caratteristiche del concetto scientifico di energia oltre ad aspetti che possono essere correlati con i problemi visti nello sviluppo storico.

b) Dalla conoscenza comune alla conoscenza scientifica

Man mano che la scuola trasmette informazioni scientifiche si vedono emergere problemi. Ad esempio: -studenti di scuola superiore non capiscono bene la differenza fra "forza" ed "energia" in quanto vedono ambedue i concetti come qualcosa che produce azioni ed effetti; -gli studenti hanno difficoltà a connettere energia ed effetti termici; -gli studenti hanno difficoltà con l'accettare la conservazione dell'energia.

c) Le idee degli insegnanti

In una attività della SSIS è stato richiesto (in vari anni) ai laureati in matematica e fisica iscritti alla scuola di indicare le correlazioni tra la terna di concetti "forza-energia-entropia". Nella maggioranza dei casi i laureati tendevano a stabilire la correlazione forza-energia tramite il concetto di lavoro in quanto l'energia veniva definita come "la capacità di compiere lavoro". L'entropia: molte le dichiarazioni di scarsa comprensibilità della applicazione del concetto definito variamente come "la misura del disordine" o la "misura dell'irreversibilità". Vediamo quindi come la definizione scientifica di

energia come "capacità di compiere lavoro" finisce col far trascurare le caratteristiche pur presenti nella conoscenza comune relative alle sorgenti e alla dissipazione di energia. Quest'ultima non viene connessa con il concetto di entropia.

d) Le idee dei ricercatori

Negli articoli di ricerca sull'argomento in esame si possono trovare varie definizioni di energia:

- energia come una sostanza quasi-materiale;
- energia come la capacità di produrre lavoro;
- l'energia è un numero che ha lo stesso valore prima e dopo le eventuali trasformazioni.

Nel dibattito sulla natura dell'energia emergono due posizioni estreme: i materialisti e i concettualisti. Per i materialisti l'energia è una sostanza che può fluire tra diversi sistemi accompagnata da opportuni portatori. Per i concettualisti l'energia è un concetto astratto che vuole spiegare la natura da un punto di vista teorico. Queste due posizioni riflettono posizioni analoghe rintracciabili nello sviluppo storico. Possiamo oggi affermare che non ha senso porre le due posizioni in contrasto ma che è necessario trovare un possibile accordo alla luce delle moderne concezioni scientifiche. È anche necessario valorizzare, e non deprimere, le conoscenze comuni che possono fornire un ancoraggio per la comprensione scientifica.

Vediamo quindi le recenti proposte per una sensata didattica.

4. Suggerimenti della ricerca didattica

Anche se, come abbiamo visto nel paragrafo precedente, si hanno varie posizioni dei ricercatori in didattica rispetto alla comprensione del concetto di energia, si possono rintracciare nelle varie proposte alcuni punti chiave comuni. In particolare si indicano come aspetti fondamentali per l'insegnamento dell'energia i concetti di trasferimento, trasformazione, conservazione, dissipazione e immagazzinamento.

La difficoltà di comprensione del principio di conservazione, anche in relazione con le esperienze comuni, viene generalmente indicata e sono avanzati suggerimenti per il trattamento contestuale di conservazione/dissipazione o anche di trattare la degradazione prima della conservazione (19).

Ciò implica la considerazione dei processi, non solo meccanici, in generale. I processi sono causati da differenze (20) non dell'energia (se questa rimane costante): fra caldo e freddo, fra concentrato e diluito, fra racchiuso e diffuso.

A causa delle differenze in ogni processo si può parlare di un flusso di energia che si accompagna al flusso di altre quantità estensive: la quantità di moto per l'energia cinetica, la carica per l'energia elettrica, il calore per l'energia termica.

Vediamo qui che gli aggettivi cinetica, elettrica e termica caratterizzano la quantità che accompagna il flusso di energia (o, nel linguaggio del progetto di Karlsruhe, il "portatore" di energia).

Può essere interessante rilevare che è possibile, nel caso del movimento, rileggere il dibattito vis-vis viva come una incomprensione dello stretto legame tra le due vis: la quantità di moto è il portatore della vis viva.

Le difficoltà del passaggio dal concetto di energia in meccanica al concetto generale di energia che include l'energia interna della termodinamica, sono ben illustrate da Arons (21, 22).

Dice Arons: un ostacolo serio alla comprensione dei concetti di energia – e del concetto di lavoro..... risiede nella loro introduzione via il teorema delle forze vive nel modello del punto materiale. In particolare suggerisce la necessità di definire il sistema in esame distinguendo tra sistemi aperti e chiusi. Infatti il passaggio dalla meccanica alla termodinamica necessita dell'esame accurato dell'attrito che provoca riscaldamento e dissipazione di energia: l'attrito si ha per l'interazione tra le superfici degli oggetti in esame. Il modello del punto materiale (in cui tali superfici non esistono) è totalmente inadeguato. Vi è di più: nella meccanica del punto il teorema delle forze vive trasforma una relazione dinamica fra forza e accelerazione in una seconda (perfettamente equivalente) relazione dinamica tra energia cinetica e energia potenziale o lavoro delle forze conservative.

Domanda quindi Arons quale sia il concetto di lavoro da inserire nel 1° principio della Termodinamica e presenta una serie di esempi in cui il prodotto forza per spostamento non contribuisce al bilancio termodinamico (oggetto accelerato su un piano orizzontale, persona su pattini, persona che compie un salto verticale).

Per Arons la soluzione si ha nella introduzione del concetto di energia interna attraverso le esperienze di Joule facendo attenzione a che tali esperienze siano presentate correttamente nelle due fasi del riscaldamento dovuto all'attrito viscoso in assenza di trasferimento di calore e del raffreddamento per sottrazione di calore.

Recentemente è interessante citare alcuni approcci didattici che suggeriscono di introdurre il concetto di energia contestualmente al concetto di forza (23) (Lemmer) anche per spiegare alcuni aspetti dei fenomeni di movimento.

Vi sono approcci che connettono il concetto di energia con i problemi della alfabetizzazione scientifica in relazione all'ambiente (24).

Hobson sostiene infatti che la comunicazione scientifica verso un cittadino comune dovrebbe includere temi sociali come le risorse energetiche e l'ambiente. I temi usati nei suoi corsi sono: l'uso dell'energia nei trasporti, il riscaldamento globale, la perdita globale di ozono.

Concludiamo il quadro della ricerca con due considerazioni di carattere più epistemologico che didattico. La prima considerazione (25) riguarda l'uso dei modelli nei problemi di conservazione dell'energia.

"Il teorema lavoro-energia come introdotto nella meccanica... è di limitata applicabilità. Una analisi di un sistema è corretta solo nei limiti del modello che è stato scelto. Un modello di particella materiale non può trattare l'energia interna".

Il suggerimento è quindi di comunicare agli studenti gli usi e le limitazioni dei modelli in generale. La seconda considerazione è di tipo più filosofico. "Energia: tra Fisica e Metafisica" è infatti il titolo di un articolo di Bunge (26) in cui l'autore sostiene che sia il concetto di energia che il relativo principio di conservazione, pur radicati nella fisica, ne straripano.

"Come concetto che si manifesta in vari settori, il concetto di energia deve essere un concetto filosofico e in particolare metafisico (ontologico). Esso appartiene alla classe dei concetti di cosa e proprietà, processo e evento, spazio e tempo, causa e probabilità, legge e tendenza..."

La sua definizione di energia viene quindi correlata con il concetto di possibilità di cambiamento (in inglese *changeability*) di ogni oggetto materiale o concreto (in cui sono inclusi anche i campi).

L'energia è una proprietà non una cosa, stato o processo ed è l'unica proprietà comune a tutti gli oggetti materiali.

Concludiamo quindi con la morale avanzata da Bunge: "Senza la filosofia la scienza perde profondità, senza la scienza la filosofia ristagna".

5. Una proposta didattica a partire dai cambiamenti

Voglio qui presentare una proposta didattica elaborata dal nostro gruppo di ricerca (27) che, pur avendo in comune alcuni aspetti con il progetto di Karlsruhe, se ne discosta in quanto assume come punto di partenza l'analisi di alcuni processi di cambiamento. La presentazione sarà ovviamente molto sintetica.

La proposta va nella direzione di guidare gli studenti di riconoscimento delle somiglianze fenomenologiche tra i cambiamenti in quanto tali somiglianze suggeriscono la possibilità di una spiegazione unificata attraverso i concetti di energia e entropia come organizzatori cognitivi.

Il riconoscimento di un comportamento "cinematico" simile (da cui la denominazione di "cinematica generalizzata" con cui si è data una prima presentazione dell'approccio (28)) può essere iniziato a partire dalle analisi dei cambiamenti che possono avvenire in un sistema tra due situazioni di equilibrio vincolato per l'azione di un trigger che elimina il vincolo che definisce la situazione iniziale.

L'esempio percettivamente osservabile è quello di un tubo ad U contenente un liquido mantenuto inizialmente con un dislivello fra i due rami del tubo. Si

noti che, pur considerando in primis un cambiamento dovuto ad un movimento, il sistema considerato è un oggetto macroscopico, il fluido vincolato a muoversi nel tubo. L'osservazione del cambiamento verso la situazione di equilibrio con lo stesso livello del fluido nei due rami permette di introdurre la coppia di variabili estensiva X (legata alla quantità di fluido) e intensiva Y (legata al livello).

L'andamento anche qualitativo, del livello di liquido nei due rami in funzione del tempo è illustrato nella fig.1.

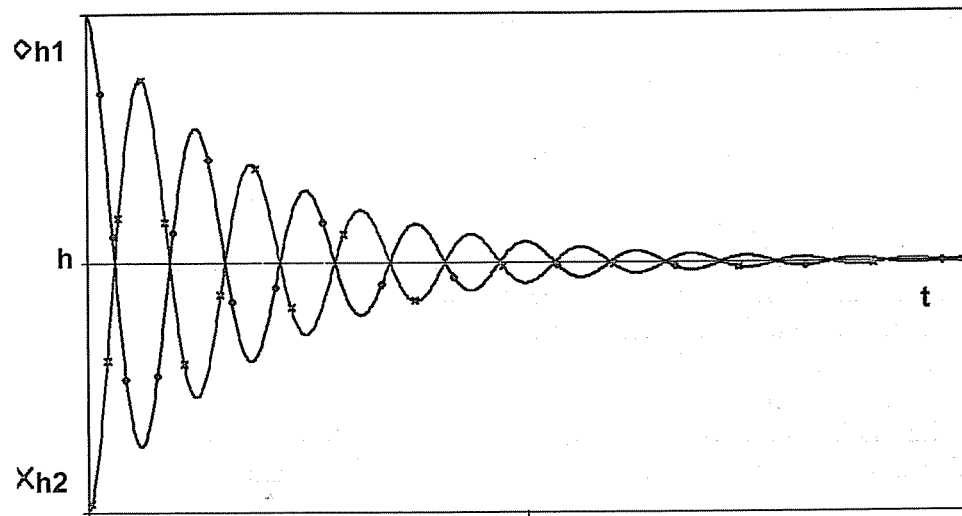


Fig. 1 - La descrizione grafica del fenomeno

In tale andamento si possono individuare due tempi caratteristici: il periodo T , che caratterizza l'aspetto conservativo del movimento e la costante di smorzamento τ , che ne caratterizza l'aspetto dissipativo. Si può far notare, sempre a livello qualitativo, come cambia il rapporto fra la durata delle oscillazioni e il loro smorzamento quando si operi un restringimento in un punto del tubo (con un tubo di plastica ciò è facilmente ottenibile): più il tubo si restringe più aumenta lo smorzamento fino a far scomparire del tutto le oscillazioni.

Emergono pertanto, già a livello di osservazione qualitativa, i due aspetti contemporaneamente presenti in un fenomeno della conservazione e dissipazione di un qualcosa da definire nel cercare una spiegazione. Esempi di comportamento analogo si hanno in altri fenomeni di movimento ma anche nella scarica di un condensatore e nel processo verso l'equilibrio termico. Quest'ultimo sembra inizialmente anomalo per l'assenza di oscillazioni ma è facilmente riconducibile al caso generale come istanza del caso in cui $T \ll \tau$.

Nel passaggio dalla osservazione alla spiegazione è utile soffermarsi sulla descrizione dei fenomeni nei termini di un modello di sistema e un modello di interazione. La discussione del modello di sistema come quantità macroscopica di materia in uno spazio confinato permette la generalizzazione delle coppie di variabili estensive X ed intensive Y e l'introduzione di una equazione di continuità per le variabili estensive.

Tale equazione può essere formulata in primo luogo in termini verbali come: [l'aumento di X nel tempo] = flusso entrante di X - flusso uscente di X + la produzione di X nel tempo e successivamente tradotta in linguaggio matematico:

$$\frac{dX}{dt} = \Phi_{ent} - \Phi_{usc} + \dot{X}_p$$

(con ovvio significato dei simboli).

Per il processo di cambiamento di X si può introdurre, in modo analogo, la relazione che lega la differenza nelle variabili intensive Y e il flusso di X . Verbalmente:

$$\text{flusso di } X + \text{variazione nel tempo del flusso} \propto \Delta Y.$$

La variazione nel tempo sarà nulla nei casi stazionari mentre in generale, usando il linguaggio matematico, si ha:

$$\Phi_x + \frac{d\Phi_x}{dt} \propto \Delta Y$$

in cui il termine lineare in X corrisponde all'aspetto dissipativo e il termine contenente la derivata all'aspetto conservativo.

Si può ora procedere verso un tentativo di spiegazione sottolineando che l'unificazione nella descrizione dei fenomeni suggerisce la ricerca di organizzatori cognitivi applicabili nei diversi casi.

Si può quindi introdurre il concetto di energia ragionando sul comportamento fenomenologico della fig.1: nella situazione statica iniziale vincolata si assume che il sistema possiede una potenzialità di cambiamento che dipende dal valore di Y corrispondente a tale situazione e dalla proprietà X del sistema.

La più semplice definizione di tale potenzialità è data da:

$$E_p = a X \cdot Y$$

La chiamiamo "energia di configurazione o potenziale". La rimozione del vincolo attiva l'interazione e il sistema inizierà a perdere la potenzialità E_p mentre acquista velocità.

Si può correlare alla velocità una "energia di cambiamento" o "energia cinetica" ponendo:

$$E_c \propto X^2$$

ovvero l'espressione più semplice in grado di soddisfare la richiesta di simmetria nel caso di oscillazioni.

In assenza di smorzamento la somma $E_p + E_c$ rimane costante mentre in generale si dovrà introdurre un altro termine E_i nell'ipotesi di conservazione della grandezza energia così introdotta.

La strada è quindi aperta per introdurre le variabili energia ed entropia attraverso i due principi della termodinamica che saranno scritti nel linguaggio del cambiamento:

$$\frac{dU_i}{dt} = \frac{dQ}{dt} + \frac{dL}{dt}$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{T} \frac{dQ}{dt} + \frac{dSp}{dt}$$

La produzione di entropia contribuisce alla variazione totale di una quantità tanto più piccola quanto più il processo è lento. Ne consegue che per i processi termici l'ordine di grandezza della variazione di entropia è dato dal flusso. In assenza di flusso termico tutta la variazione è dovuta alla produzione valutabile dalla formula

$$\frac{dSp}{dt} = \Phi_x \Delta Y$$

Si può notare che la proposta accoglie alcuni dei suggerimenti provenienti dalla ricerca.

Infatti si esaminano i processi introducendo le variabili estensive ed intensive e si trattano contestualmente la conservazione e la dissipazione dell'energia. Si introduce inoltre la produzione di entropia come il processo determinante la dissipazione dell'energia.

6. Che fare?

Una analisi del percorso fatto (a partire da un esame dei manuali fino ad arrivare, attraverso una riflessione sugli aspetti storici e sulle idee di studenti e insegnanti, ai suggerimenti emersi dalla ricerca didattica) permette di focalizzare alcuni punti che dovrebbero essere tenuti presenti nella impostazione di un percorso didattico sul concetto di energia. In particolare:

- Il concetto generale di energia richiede attenzione ad esplicitare gli aspetti epistemologici con particolare attenzione all'uso dei modelli, la considerazione degli aspetti termodinamici con particolare attenzione ai processi irreversibili. In altre parole non si può parlare di energia senza entropia (29).
- Nel mondo reale tutto è soggetto a cambiamenti che avvengono nel tempo. Per gli studenti è quindi difficile immaginare il mondo senza tempo della ter-

mostatica. È necessario pertanto premettere alla introduzione dei concetti di energia interna ed entropia la descrizione fenomenologia dei processi verso l'equilibrio. L'esame dei processi che avvengono con oscillazioni smorzate permette di introdurre i concetti di energia cinetica e potenziale ma anche di indicare l'apparente perdita di energia (da collegare in seguito al concetto di entropia). Può essere opportuna una analisi dei processi nei termini di flussi di energia guidati dalle differenze nelle variabili intensive.

- Le esperienze di Joule vanno discusse facendo attenzione alle due fasi: la fase dell'aumento di temperatura generato dal lavoro dissipativo e la fase della successiva diminuzione per contatto con una sorgente di temperatura. Si noti che l'esperienza avviene nel tempo e che la conclusione nei termini della differenza ΔU tra due stati di equilibrio richiede una riflessione sui dati sperimentali. Può essere opportuno indicare che la relazione

$$\Delta U = Q - L$$

connette il cambiamento ΔU interno al sistema con le azioni esterne Q e L . La trasformazione di lavoro in calore (vista anche nella evoluzione storica) non è pertanto diretta ma indiretta e può essere evitata con opportune pareti.

- Attenzione al concetto di lavoro se introdotto come il prodotto scalare di forza e spostamento. Non tutti i prodotti sono lavori termodinamici. Può essere qui opportuna l'analisi storica relativa al lavoro delle macchine.
- L'energia si trasforma: è meglio sottolineare che l'energia fluisce insieme ad altre variabili estensive. Questo collegamento non è immediato (basti pensare al dibattito vis-vis viva come un tentativo di non stabilire il collegamento tra energia cinetica e quantità di moto).
- Attenzione agli aggettivi: essi possono essere riferiti da un lato alle variabili estensive che trasportano il flusso di energia e dall'altro ai tipi di sorgenti di energia. Occorre fare le opportune distinzioni. In particolare pone un problema l'uso del termine "energia termica" spesso (anche storicamente) confuso con "energia interna". Analoghi problemi linguistici sono evidenti nell'uso della locuzione "forme di energia". La locuzione, abbinata all'uso del termine "energia termica" può indurre a pensare che all'interno di un sistema termodinamico l'energia si distribuisca in cassetti non comunicanti.
- Calore, calori specifici, calori latenti.... Anche qui vi è un problema linguistico (30) che mescola variabili di stato (calori specifici e latenti) con la variabile di processo (calore)
- Il 2° principio nella forma

$$\Delta S \geq \frac{Q}{T}$$

presenta una anomalia rispetto alle usuali relazioni fisiche con l'uso di una disuguaglianza. Anche in questo caso è opportuno far notare che la relazione

stabilisce un legame tra una variazione interna al sistema, ΔS , con una azione esterna. Tale legame può essere meglio esplicitato eliminando il segno di disuguaglianza e introducendo il concetto di entropia prodotta S_p :

$$\Delta S \geq \frac{Q}{T}$$

che può essere letta indicando che la variazione di entropia è data dalla somma dell'entropia che fluisce come calore e dell'entropia prodotta. Nei processi quasistatici l'entropia prodotta può essere trascurata. Ciò permette di valutare la variazione di entropia come se fosse dovuta ad opportuni flussi di calore. In un processo adiabatico reale tutta la variazione di S è dovuta alla produzione.

È ovvio che le affermazioni che propongo, pur se suffragate (a mio parere) dalla ricerca didattica, riflettono la mia personale rappresentazione mentale. Vorrei quindi terminare con alcune domande sulla cui ricerca di risposte sarebbe opportuno un dibattito allargato tra i ricercatori in didattica e i fisici (impegnati in altre ricerche) coinvolti nei corsi di fisica di base.

Traggo le domande (parafrasandole) dai temi suggeriti alla discussione nella organizzazione del convegno "What physics should we teach" (31) che si è svolto a Durban (SA) nel luglio 2004.

- 1) Cosa riteniamo importante sappiamo, sui concetti di energia e entropia, i cittadini comuni?
- 2) È importante che la conoscenza appresa a scuola non sia frammentata in capitoli scarsamente comunicanti. Quale ruolo possiamo attribuire ai concetti di energia ed entropia per evitare la frammentazione?
- 3) Non dovremmo fare uno sforzo per collegare l'uso che si fa di tali concetti in fisica con l'uso che si fa in altre discipline scientifiche?
- 4) Quale ruolo attribuire nella didattica alla discussione degli aspetti storici ed epistemologici?
- 5) Quali abilità dovrebbe possedere un cittadino comune per affrontare razionalmente i problemi relativi a questioni energetiche o entropiche?
- 6) La termodinamica dei processi si può inquadrare nella cosiddetta "fisica moderna" da comunicare nella scuola secondaria e all'Università?


Referenze

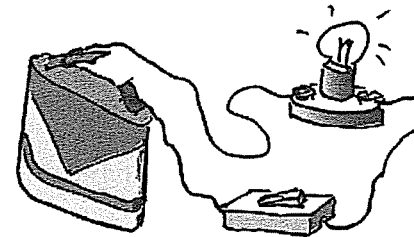
- 1) Clausius M.R. – On the moving force of heat, *Philos. Mag. Ser. 4*, 2, pp.1-20, 1851
- 2) Rogers E.M. – *Physics for the inquiring mind*, Princeton Univ. Press (NJ), 1960
- 3) Feynman R.P. – *Sei pezzi facili*, Adelphi, Milano, 2000
- 4) Buontempo U., Cortini G., Tamburini S. – *Orientarsi nella fisica*, Sansoni, Milano 2000
- 5) Hermann F. *Der Karlsruhe Physikkurs – Univ. Karlsruhe*, 1993
- 6) Bohan R., Ogborn J. – *Energy and change*, Univ. Of London, Institute of Ed., 1996
- 7) Bruce C. – *Sherlock Holmes e i misteri della scienza*, Raffaello Cortina, Torino, 1997
- 8) Selleri F. – *Le forme dell'energia*, Dedalo, Bari, 2001
- 9) Segrè G. – *A qualcuno piace freddo*, Bollati Boringhieri, Torino, 2002
- 10) Prigogine I. – *Introduction to thermodynamic of Irreversible Processes*, Wiley New York, 1967
- 11) Kirwan A.D. – *Mother Nature two laws*, World Scientific Singapore, 2000
- 12) J. Rifkin – *Una nuova concezione del mondo: l'entropia*, Mondadori, Milano, 1982
- 13) De Rosnay J. – *Il microscopio, verso una visione globale*, Dedalo, Bari, 1977
- 14) Crosbie Smith – *Energia*, in *Enciclopedia della Fisica*, pp.412-420, vol. II
- 15) Crosbie Smith – *Calore*, in *Enciclopedia della Fisica*, pp.413-423, vol. I
- 16) B. Lindsay – *Energy, Benchmarks papers*, Halsted Press, Wiley, 1975
- 17) Roche J. – *What is potential energy?* *Eur. J. Phys.* 24, pp.185-196, 2003
- 18) Multimucuo I.V. – *Improving students' understanding of energy*, VU Huisdrukkerij, Amsterdam, 1998
- 19) Duit R. – *In search of an energy concept in Energy matters* (ed. Driver e Millar) univ. Leeds, 1986
- 20) Ogborn J. – *Teaching about why things change* Internal paper Inst. of Education, Univ. London, 1993
- 21) Arons A.B. – *Development of energy concepts in introductory physics courses*, *Am. J. Phys.*, p.67, 1999
- 22) Arons A.B. – *Teaching introductory Physics*, Wiley New York, 1997
- 23) Lemmer M. e Lemmer T.N. – *Contextualization as a didactical approach for Physics Education*, *Proceeding of a Conference*, Durban, 2005
- 24) Hobson A. – *Teaching relevant science for scientific literacy*, *Journ. Of College Science Teaching*, 30, 238-243, 2000
- 25) Legge K.A., Petrolino J. – *The use of models in problems of energy conservation*, *Am. J. Phys.*, 72, 436-438, 2004

- 26) Bunge M. – Energy: between Physics and Metaphysics, Science and Education, 9, 457-461, 2000
- 27) Amati V., Danusso L., Fioravanti E., Mangani V., Sidoretti S., Vicentini M. – “Not chapters but phenomenological similarities and unified conceptual explanation” in Proceedings of the Durban Conference, 2004
- 28) Vicentini M., Wanderlingh F. – Cinematica Generalizzata, La Fisica nella Scuola, XXX, pp.6067, 1997
- 29) Wanderlingh F. – The big game of energy and entropy, in “Thinking Physics for teaching” (ed. Bernardini C., Tarsitani C., Vicentini M.), Plenum Press, N.,Y., 1995
- 30) Vicentini M. – Dal calore all’entropia, La Nuova Italia Scientifica, Roma, 1992
- 31) What Physics should we teach? Proceedings of a Conference Durban SA

TEACHING ELECTRIC IN THE KPK
INSEGNARE L'ELETTRICITÀ CON IL KPK

MICHAEL POHLIG
WHG-Durmshheim Germany


 The electric circuit - Il circuito elettrico

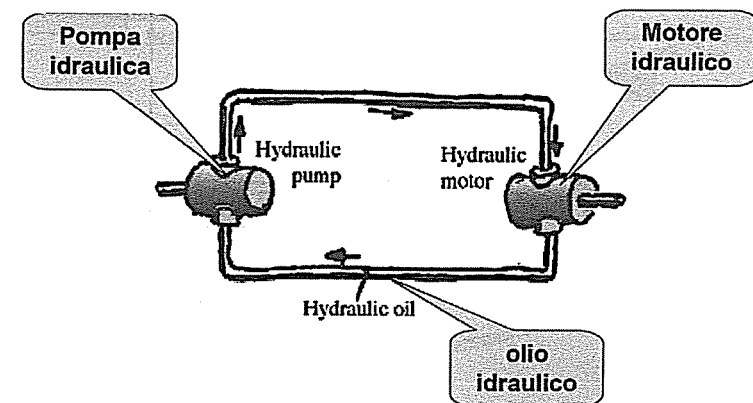


Electric circuit / circuito elettrico

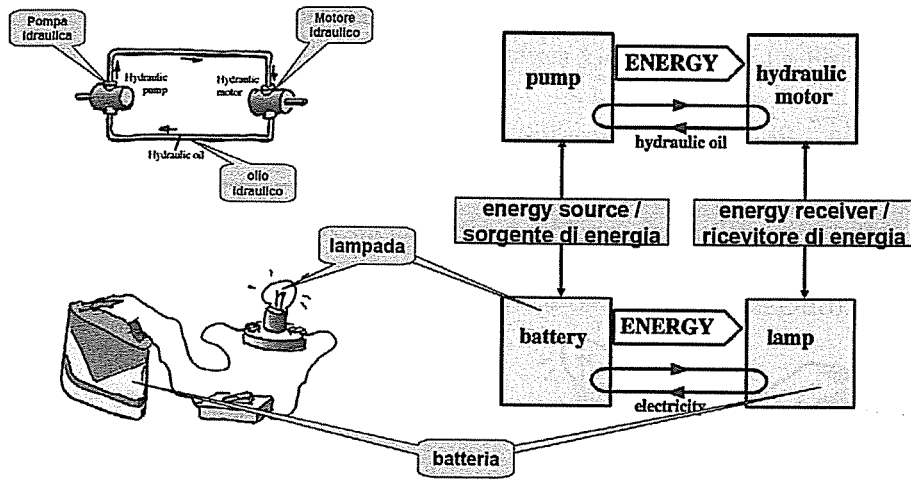
Electric current / corrente elettrica

Conductors – insulators / conduttori - isolanti

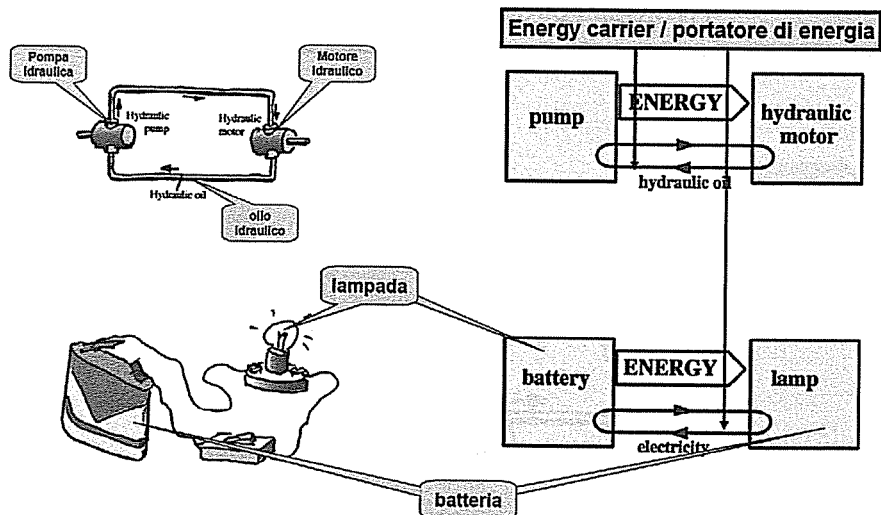
 Hydraulic circuit - Circuito idraulico



Hydraulic circuit - Circuito idraulico



Hydraulic circuit - Circuito idraulico



electricity pumps - pompe di elettricità

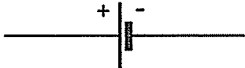





Batteries, dynamos, and solar cells are electricity pumps.

Batteria, dinamo e cellula solare sono pompe di elettricità.

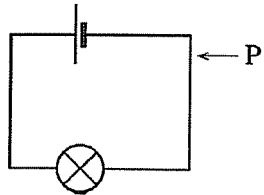
Symbols of some electric components
Simboli di alcuni componenti elettrici



-  battery / batteria
-  switch / interruttore
-  light bulb / lampadina
-  electric motor / motore elettrico



Electric current - L'intensità della corrente elettrica



A certain amount of electricity per second flows past location P of the circuit.

Nel punto P del circuito scorre una determinata quantità di elettricità al secondo.

electric current = $\frac{\text{electricity}}{\text{duration}}$

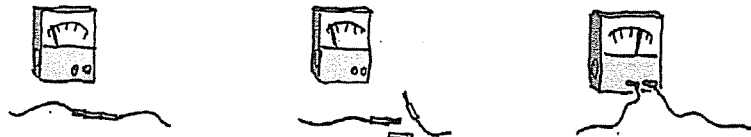
intensità della corrente elettrica = $\frac{\text{quantità di elettricità}}{\text{intervallo di tempo}}$

$$I = \frac{Q}{t}$$

Measuring the electric current in a wire



Come misurare l'intensità della corrente elettrica in un filo

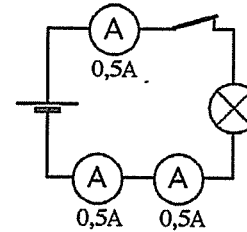


In order to measure the electric current in a wire, the wire must be cut through and the two new ends must be attached to the terminals of the ammeter.

Per misurare l'intensità della corrente elettrica in un filo, tagliamo il filo e allacciamo le due nuove estremità ai collegamenti dell'ampmetro.



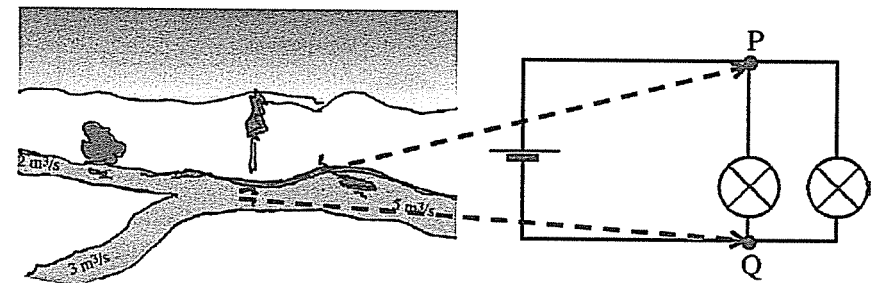
Ammeters in series Diversi amperometri inseriti "in serie"



Several ammeters "in series" show the same as a single one.

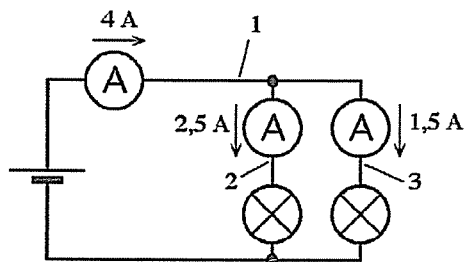
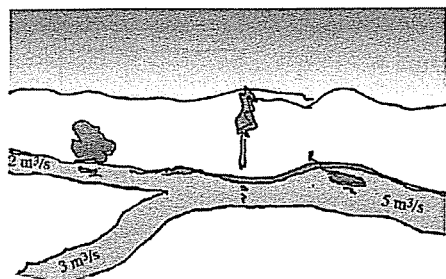
Diversi amperometri inseriti "in serie" segnano lo stesso valore di uno solo.

The junction rule - La regola dei nodi





The junction rule - La regola dei nodi

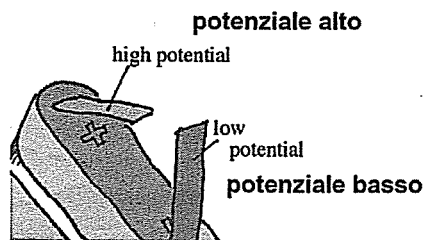
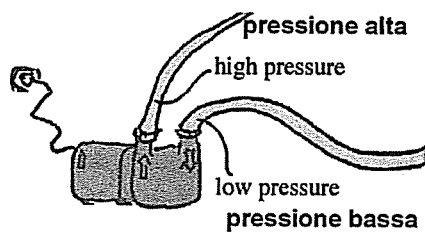


The currents flowing into a junction are, in total, equal to the ones flowing away from it.

Le intensità delle correnti che fluiscono in un nodo sono complessivamente uguali alle intensità delle correnti che escono dal nodo.



Electrical potential - Il potenziale elettrico

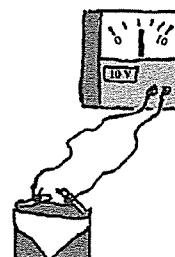


An electricity pump (battery, dynamo) creates a potential difference. This potential difference is a driving force for an electric current. The potential is higher at the positive terminal than at the negative terminal.

Una pompa di elettricità (batteria, dinamo) genera una differenza di potenziale. La differenza di potenziale è la spinta per una corrente elettrica. Al polo positivo il potenziale è più elevato che al polo negativo.



Voltage - Tensione



Potential difference is called voltage
Una differenza di potenziale viene detta tensione

$$\phi_+ - \phi_- = 4,5 \text{ V or / oppure } U = 4,5 \text{ V}$$

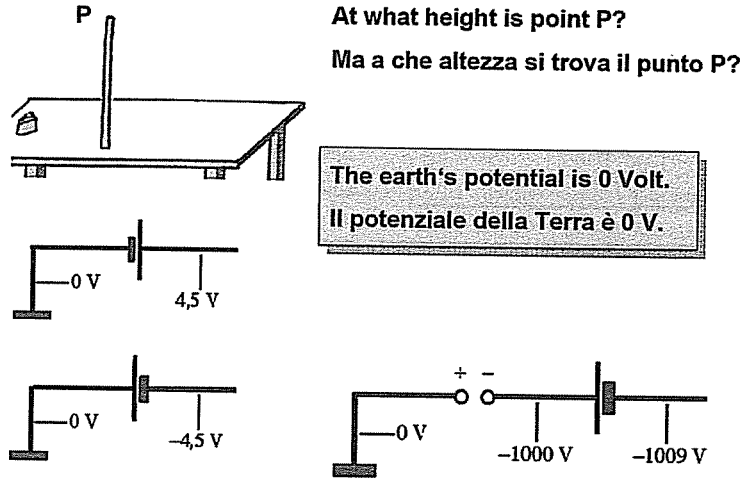
Name of quantity	Electric potential	voltage	Nome della grandezza	potenziale elettrico	tensione elettrica
Abbreviation	ϕ	U	Abbreviazione	ϕ	U
Name of unit	Volt	Volt	Nome dell'unità di misura	volt	volt
Abbreviation	V	V	Abbreviazione	V	V



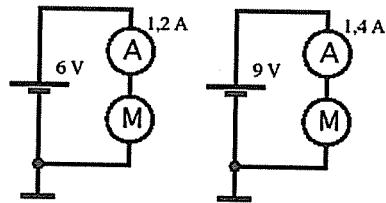
analogy - analogie

	corrente dell'acqua	corrente elettrica
sostanza	acqua	elettricità
causa la corrente	pompa	batteria, dinamo, cellula solare,...
differenza tra due punti	all'uscita della pompa idraulica la pressione è maggiore che all'entrata	all'uscita (+) della batteria il potenziale è più elevato che all'entrata (-)
„spinta“ per una corrente	la differenza di pressione tra uscita e entrata della pompa	la differenza di potenziale tra i collegamenti della batteria
		tensione = differenza di potenziale
direzione della corrente (dell'aria esterna)	da punti a pressione più alta verso punti a pressione più bassa.	da punti a potenziale più alto verso punti a potenziale più basso.

The zero point of electric potential
Lo zero del potenziale



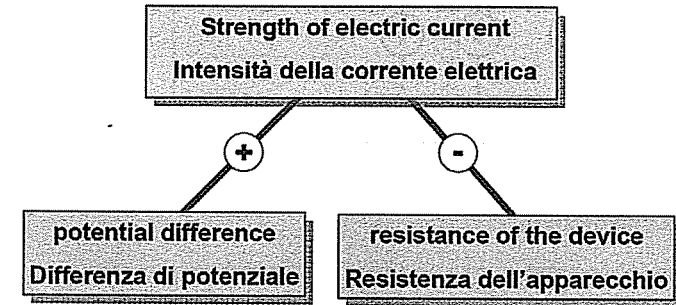
Driving force and currents
Spinta e intensità di corrente



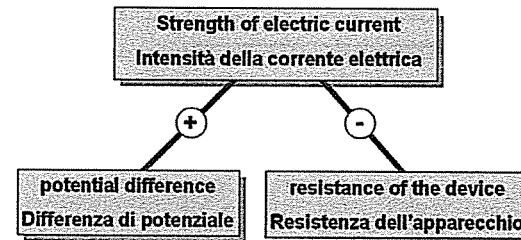
The greater the electric potential difference between two points (the greater the driving force), the stronger the electric current flowing from one point to the other.

Più la differenza di potenziale elettrico tra due punti è grande (più la spinta è grande), maggiore sarà l'intensità della corrente che fluisce da un punto all'altro.

The strength of an electric current..
L'intensità della corrente..



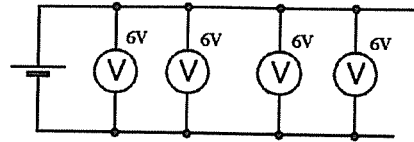
The strength of an electric current..
L'intensità della corrente...



The strength of an electric current flowing through a device is greater,
– the greater the potential difference between the terminals of the device;
– the smaller the resistance of the device to the current.

L'intensità della corrente che attraversa un apparecchio è maggiore quando:
– la differenza di potenziale tra i collegamenti dell'apparecchio è maggiore;
– la resistenza che l'apparecchio oppone alla corrente è minore.

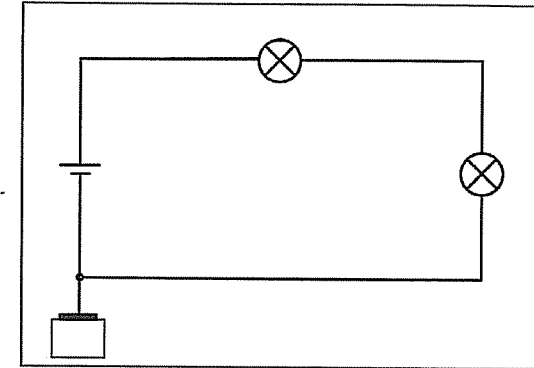
Several voltmeters „in parallel“... -
Parecchi voltmetri „collegati in parallelo“..



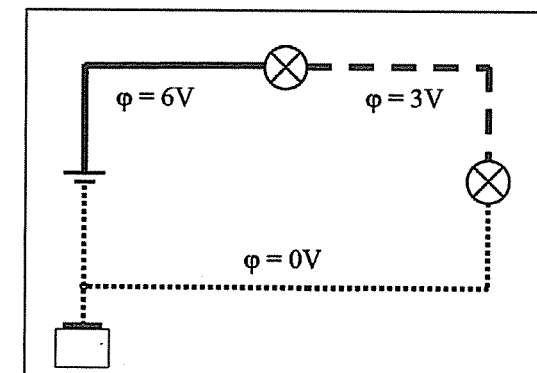
Locations that are connected to each other by a cable, have the same potential. This is why the four voltmeters all show the same voltage.

I punti collegati tra loro da un cavo si trovano allo stesso potenziale. Di conseguenza i quattro voltmetri indicano la stessa tensione.

Applications 1: Problemi 1

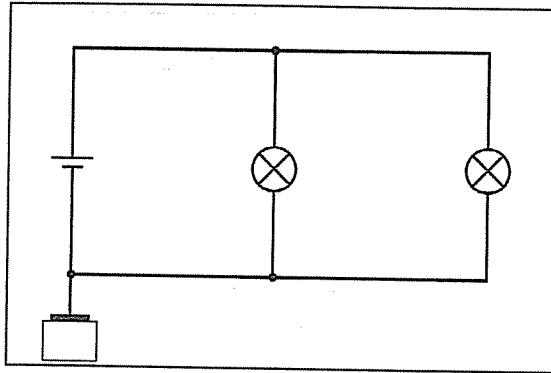


Applications 1: Problemi 1

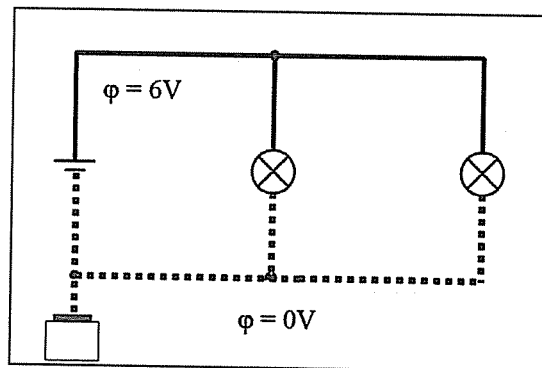


Both lamps are built identically and the battery voltage is 6 V.
Le lampadine sono assolutamente identiche, la tensione della batteria vale 6 V.

Applications 2: Problemi 2



Applications 2: Problemi 2



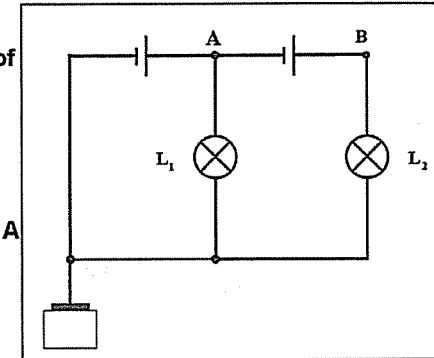
Both lamps are built identically and the battery voltage is 6 V.
Le lampadine sono assolutamente identiche, la tensione della batteria vale 6 V.

Applications 3: Problemi 3



Both lamps are built identically and the batteries are 4,5 V batteries.
Le lampadine sono assolutamente identiche, le batterie sono batterie piatte da 4,5 V.

Give the potentials of the conductor sections A and B.
Color-label the conductors.
Trova i valori del potenziale nei punti A e B.
Marca i punti allo stesso potenziale.



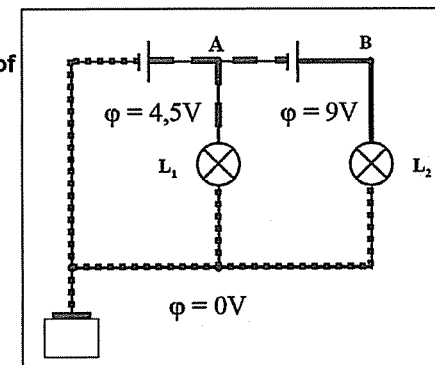
Which lamp burns more brightly?
Quale lampadina brilla con maggiore intensità?

Applications 3: Problemi 3



Both lamps are built identically and the batteries are 4,5 V batteries.
Le lampadine sono assolutamente identiche, le batterie sono batterie piatte da 4,5 V.

Give the potentials of the conductor sections A and B.
Color-label the conductors.
Trova i valori del potenziale nei punti A e B.
Marca i punti allo stesso potenziale.

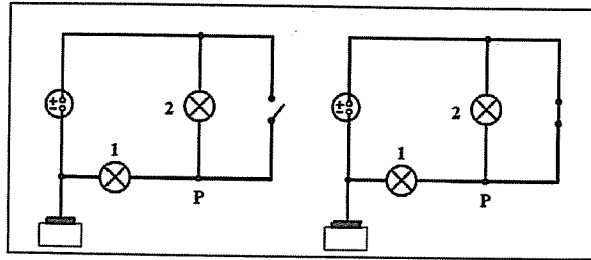


Which lamp burns more brightly?
Quale lampadina brilla con maggiore intensità?

Applications 4: Problemi 4



The voltage of the power supply is 12 V. The lamps are built identically.



La tensione dell'alimentatore è di 12 V. Le lampadine sono assolutamente identiche.

Color-label the conductors.

Give the value of the potential in point P.

Marca i punti allo stesso potenziale.

Trova il valore del potenziale nel punto P.

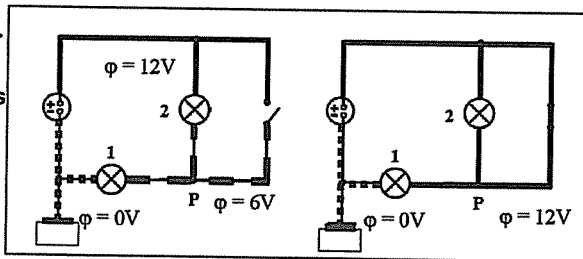
Is the current stronger in lamp 2, when the switch is open or closed?

Quando la corrente attraversa la lampadina 2 è più intensa: con l'interruttore aperto o chiuso?

Applications 4: Problemi 4



The voltage of the power supply is 12 V. The lamps are built identically.



La tensione dell'alimentatore è di 12 V. Le lampadine sono assolutamente identiche.

Color-label the conductors.

Give the value of the potential in point P.

Marca i punti allo stesso potenziale.

Trova il valore del potenziale nel punto P.

Is the current stronger in lamp 2, when the switch is open or closed?

Quando la corrente attraversa la lampadina 2 è più intensa: con l'interruttore aperto o chiuso?

LE ANALOGIE: UNA CHIAVE DI LETTURA DEI FENOMENI NATURALI (ESPERIMENTI E FORMALIZZAZIONE)

MICHELE D'ANNA

Alta Scuola Pedagogica Locarno (Svizzera)

Struttura del workshop

Il workshop è costruito in due parti distinte: nella prima verranno presentati alcuni esperimenti che vogliono costituire un esempio concreto di quanto discusso nelle relazioni introduttive del mattino¹ in particolare in relazione all'utilizzo delle analogie all'interno di un percorso didattico; nella seconda parte verranno presentati gli elementi costitutivi che permettono una adeguata formalizzazione.

Gli esperimenti

La scelta è di partire da *esperimenti qualitativi* per far emergere a poco a poco gli elementi necessari per la descrizione dei fenomeni naturali. Si tratta di semplici situazioni sperimentali, di facile manipolazione e con un buon grado di flessibilità, in modo da consentire un dialogo il più diretto possibile tra gli studenti e il mondo dei fenomeni.

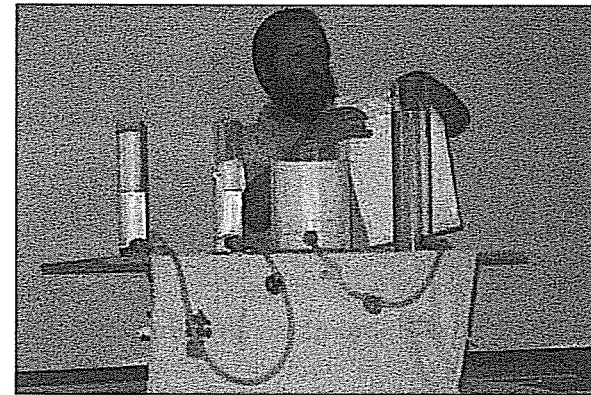


Fig. 1 - Vasi comunicanti. Attraverso alcune semplici esperienze idrauliche è possibile avviare la costruzione del modello di riferimento generale. Qui, in particolare, si vuole far riconoscere il ruolo del volume d'acqua e della differenza di pressione nella descrizione qualitativa dei fenomeni di raggiungimento dell'equilibrio.

Non si vuole quindi proporre una sequenza rigida, ma piuttosto un canovaccio con alcuni passaggi chiave e grande libertà di variazione sulla base di come si sviluppa il dialogo. Per quanto riguarda la scelta, si tratta per la maggior parte dei casi di esperimenti che già fanno parte del consueto corredo scolastico; non si tratta quindi di far capo ad attrezzature particolari o specifiche, quanto piuttosto di un loro diverso utilizzo: diverse risultano

¹ Si veda in particolare la relazione di F. HERMANN. *Introduzione alla fisica di Kalvucke.*

essere la sequenza con cui esse vengono presentate e la lettura che ne viene data. L'obiettivo principale consiste infatti nel far emergere la consapevolezza che nei diversi campi di studio, pur con tutte le differenze legate alla loro specificità, ritroviamo i medesimi, pochi elementi strutturanti. I primi esperimenti sono dedicati alla manipolazione di *quantità di acqua*; questa scelta ha diverse ragioni: in primo luogo, esperimenti con l'acqua non creano particolari ansie né in chi li conduce né in chi li osserva; inoltre risulta abbastanza agevole renderli adatti all'osservazione diretta, per esempio con l'utilizzo di un colorante. Non da ultimo si tratta di esperimenti praticamente a costo zero.

Si può iniziare con una serie di vasi comunicanti: due cilindri identici, due cilindri con sezione diversa, bottiglie di plastica a fantasia, collegati a due a due da un tubo provvisto di rubinetto e di una "rotellina" che funge da indicatore (spia) per il flusso di acqua. Dall'insieme delle osservazioni qualitative è agevole trarre alcune conclusioni: innanzitutto si osserva che vi è un trasferimento di acqua da un recipiente all'altro. Questo "fluire" è reso visibile dalla rotellina; un'osservazione accurata permette anche di concludere che la quantità di acqua che per unità di tempo passa da un recipiente all'altro diminuisce nel corso del tempo: la rotellina infatti gira sempre più lentamente fino a fermarsi. Può risultare utile in prospettiva esplicitare, attraverso la ripetizione delle esperienze in forma quantitativa², che la diminuzione del volume di acqua in un recipiente ha esattamente il medesimo valore dell'aumento del volume nell'altro, di modo che il volume totale resta costante³. Un secondo evidente aspetto è che nella situazione finale l'acqua raggiunge il medesimo livello in entrambi i recipienti: nella situazione finale non vi è più quindi nessun dislivello. Dalla discussione emerge una prima importante relazione: il flusso di acqua è in qualche modo collegato alla presenza di un dislivello. In realtà è utile affinare un po' la discussione, magari presentando esperienze che coinvolgono fluidi diversi, per passare dalla descrizione puramente geometrica (livello) ad una più fisica, in cui per finire si riconosce la grandezza intensiva che pilota il processo, ossia la pressione. Otteniamo così una prima immagine per i processi "idraulici": quando ai capi del collegamento vi è una *differenza* di pressione, possiamo aspettarci un flusso spontaneo da un recipiente all'altro. Questo cesserà quando la differenza di pressione a poco a poco si sarà annullata, ossia quando viene raggiunta la situazio-

² Tipicamente queste esperienze possono essere eseguite direttamente a gruppi dagli studenti in laboratorio.

³ Può essere importante indicare esplicitamente che in natura esistono processi che portano ad una variazione della quantità totale dell'acqua contenuta nei recipienti: dalla semplice evaporazione a più sofisticate reazioni chimiche, come ad esempio processi di elettrolisi. Nelle situazioni sperimentali scelte tuttavia questi processi possono essere del tutto trascurati o esclusi.

ne di equilibrio. L'insieme degli esperimenti permette anche l'introduzione, almeno a livello qualitativo, dei due concetti che regolano la rapidità con cui avvengono i processi di raggiungimento dell'equilibrio: quello di *resistenza* (qui: idraulica, che caratterizza il collegamento) e di *capacità* (qui: idraulica, che caratterizza le proprietà di immagazzinamento del *volume d'acqua* dei due recipienti) e del loro ruolo nell'evoluzione temporale.

Quale secondo ambito di indagine possono essere scelti i *fenomeni elettrici*: qui ci serviamo di sfere metalliche, di opportuni collegamenti e di apposite "spie" (costituite da piccoli tubi a scarica) che permettono di mettere in evidenza la presenza di una "corrente elettrica"⁴. Una sfera metallica, montata su di un supporto isolante, viene caricata per contatto con una bacchetta precedentemente elettrizzata per strofinio con un panno di lana. Quando essa viene messa in contatto elettrico con una seconda sfera metallica, oppure direttamente "messa a Terra", la spia inserita nel collegamento ci dice che per un breve intervallo di tempi vi è una corrente.

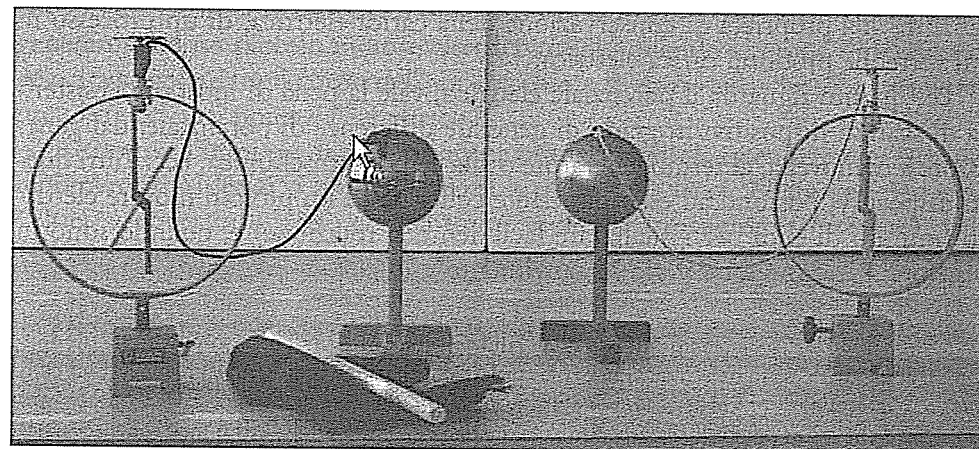


Fig. 2 - *Fenomeni elettrici*. Anche nella descrizione dei fenomeni elettrici si ritrovano gli elementi costitutivi di base: la carica elettrica (quale grandezza estensiva) e il potenziale elettrico (con il ruolo di grandezza intensiva). Inoltre anche la carica elettrica è una grandezza conservata.

In analogia a quanto proposto nel caso idraulico, la descrizione di questi fenomeni viene ricondotta alla presenza di una grandezza fisica estensiva specifica dei fenomeni elettrici, chiamata *carica elettrica*, e di una grandezza intensiva, chiamata *potenziale elettrico*, alle cui differenze sono riconducibili i processi

⁴ Può essere interessante analizzare in dettaglio le operazioni mentali che ci portano ad una tale conclusione: in realtà ciò che viene osservato è unicamente un bagliore emesso dalla "spia".

di trasporto messi in evidenza dalla spia. Così, ad esempio, quando la sfera portata ad un potenziale positivo, è messa in contatto elettrico con la Terra, essa si "svuota", ossia cede alla Terra tutta la sua carica elettrica. È interessante notare in questo contesto come il potenziale elettrico della Terra, per via della sua enorme capacità, non venga modificato. Le proprietà che solitamente vengono ascritte alla grandezza carica elettrica, in particolare il fatto che essa è una grandezza conservata⁵, meritano una dettagliata discussione dal punto di vista didattico. Ciò è particolarmente vero per quanto riguarda la proprietà di essere una grandezza conservata: o si dispone di attrezzature in grado di darne un'evidenza sperimentale diretta (determinando ad esempio le quantità di carica portate da due sfere prima e dopo il contatto⁶), oppure lo si adotta come modello interpretativo, avendo allora particolare cura nel mettere in evidenza il suo ruolo nelle varie situazioni sperimentali incontrate. Ad esempio, lo strofinio della bacchetta di plastica con il panno di lana dovrebbe essere ripreso, discusso e interpretato⁷: in particolare occorre mettere in evidenza come nel processo in questione si tratta di un trasferimento di carica da un oggetto ad un altro, e in nessun caso, coerentemente alla proprietà di conservazione della carica elettrica, di un processo in cui verrebbe prodotta carica elettrica.

Per quanto riguarda il potenziale elettrico, vale la pena di mostrare l'esistenza di svariati dispositivi in grado di generare differenze di potenziale: dal generatore a manovella, al termogeneratore o alla cella elettrochimica, ecc. Tutti questi dispositivi possono ad esempio essere collegati ad un piccolo motore elettrico (munito di elica per visualizzare facilmente la rotazione) e, quando sono in funzione, riescono a metterlo in movimento⁸.

⁵ Con *grandezza conservata* si intende una grandezza che in nessun processo può essere prodotta oppure annichilata, ossia una grandezza per la quale nell'equazione istantanea di bilancio non compaiono *mai* termini di produzione (v. più avanti). È importante non confondere questa caratteristica con il fatto che in un determinato processo il valore della quantità totale resti o meno, per un determinato sistema, costante.

⁶ I moderni sensori di carica elettrica on-line possono costituire una soluzione interessante, accessibile a costi relativamente contenuti.

⁷ Può essere interessante riconsiderare da questo punto di vista la procedura idraulica che porta al riempimento di un recipiente: le medesime domande (Da dove l'ha presa? Chi gliel'ha data?) trovano risposte diverse, in ragione dei meccanismi specifici sostanzialmente diversi. Mentre nel caso idraulico la riflessione porta alla "scoperta" del ciclo dell'acqua (dove in particolare viene messo in risalto la funzione del Sole come "pompa"), nel caso elettrico la proprietà della carica elettrica di poter assumere valori sia positivi che negativi permette una semplice descrizione fenomenologica. Questa situazione mostra come ragionare per analogia non può quindi voler dire appiattire le specificità dei singoli ambiti, ma piuttosto mettere in evidenza le relazioni strutturali di validità generale.

⁸ Dal punto di vista sperimentale risulta utile un cambiamento nella scelta della "spia": dal piccolo tubo a scarica si può passare prima ad una lampadina ad incandescenza e in seguito ad un piccolo motore elettrico. Questo cambiamento porta con sé anche la possibilità di mettere in evidenza la pola-

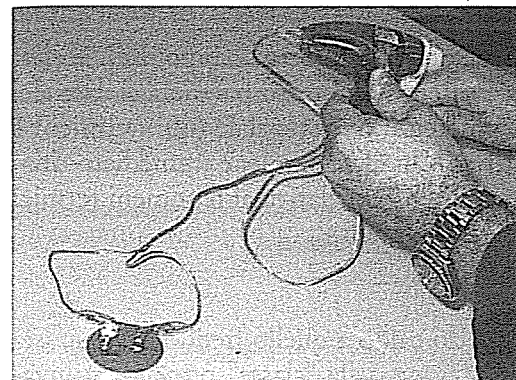


Fig. 3 - Il generatore a manovella. Questo dispositivo permette di mettere in funzione delle piccole lampadine ad incandescenza, oppure dei motori elettrici o ancora di caricare dei condensatori. Un'analisi dettagliata mostra che anche in questo caso per creare la voluta differenza di potenziale elettrico è fondamentale la presenza di un'altra "differenza".

Può essere utile sottolineare sin da subito che la differenza di potenziale elettrico compare unicamente quando vi è a disposizione un'altra differenza di potenziale: meccanico, termico, chimico o altro, a seconda dei casi. Questo aspetto del tutto generale può essere messo in evidenza in modo molto chiaro con il generatore a manovella: come si può facilmente osservare collegando il generatore ad un piccolo motore elettrico, è solo quando vi è una differenza di velocità angolare tra il corpo dell'apparecchio e la manovella che viene generata una differenza di potenziale elettrico⁹.

Attraverso l'impiego di un termogeneratore è possibile estendere il campo dei fenomeni considerati ai *processi termici*: quando sulla faccia libera dell'elemento Peltier si pone un oggetto che ha una temperatura maggiore (o minore) della

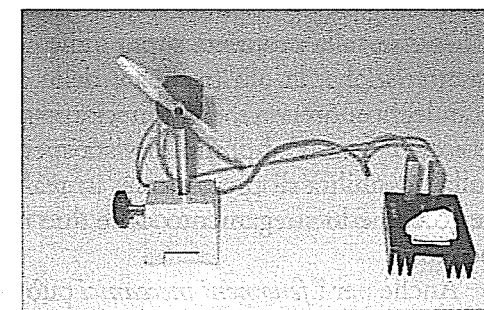
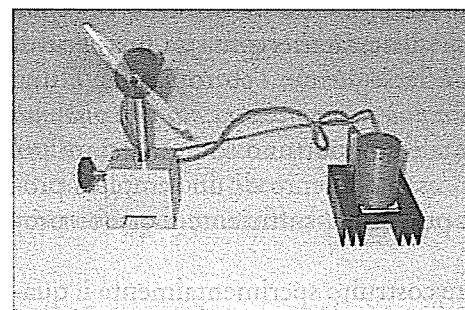


Fig. 4 - Termogeneratore. Questo dispositivo, basato essenzialmente su di un elemento Peltier, permette di mettere in evidenza il ruolo delle differenze di temperatura nei fenomeni di conduzione termica.

rità della differenza di potenziale che si genera. Come potrà poi essere approfondito in un secondo tempo, ciò fornisce nel contempo un'interessante possibilità per una prima discussione della distinzione tra fenomeni reversibili e no.

⁹ A questo scopo si può ad esempio mostrare che è facile mettere in rotazione il motore mantenendo fissa la manovella (ma facendo ruotare il corpo del generatore) oppure che la rotazione simultanea e solidale di manovella e corpo del generatore non porta a nessuna rotazione del motore.

temperatura ambiente (alla quale risulta essere ancorata la faccia inferiore), si osserva che il dispositivo è in grado di generare una differenza di potenziale elettrico. La verbalizzazione di questo processo corre del tutto parallela al caso del generatore a manovella: di nuovo, una differenza di potenziale (qui: termico) è in grado di generarne un'altra (qui: elettrico). In altre parole: è immediato riconoscere la temperatura come la grandezza intensiva relativa ai fenomeni termici e in particolare le differenze di temperatura come responsabili dei processi in questione.

Ma che "cosa" viene trasferito dall'oggetto caldo a quello freddo? La risposta verbale, indipendentemente dalla composizione della "classe" presente, è invariabilmente: calore. Molto diversificato invece risulta essere il significato fisico attribuito a questo vocabolo, che in questo contesto, indubitabilmente, deve essere riferito ad un registro di "linguaggio comune". Quando la "classe" è costituita, come nella nostra presente situazione da laureati in fisica o matematica, può bastare far notare la discrepanza con il significato dato a questo vocabolo nella teoria riconosciuta¹⁰; quando si tratta di studenti reali, occorre indagare più in dettaglio. Per finire, in entrambe le situazioni appare utile introdurre anche per la descrizione dei fenomeni termici una grandezza estensiva specifica, che nei processi in questione pilotati da differenze di temperatura può fluire dal corpo a temperatura più elevata al corpo a temperatura inferiore. Fissato il suo ruolo all'interno del quadro interpretativo che si vuole sviluppare, darle un nome è questione di economicità: per garantire un raccordo privo di difficoltà con il linguaggio scientifico accreditato, chiameremo questa quantità *entropia*. Oltre che dalla proprietà sopra indicata, essa viene caratterizzata da una serie di caratteristiche, la più peculiare delle quali è la seguente: l'entropia *non* è una grandezza conservata, e più precisamente *essa può essere prodotta ma non può mai essere distrutta*. Dal punto di vista sperimentale è opportuno soffermarsi un po' sulla possibilità di produzione: in realtà un esame attento di un semplice processo come lo sfregamento delle due mani può essere sufficiente a questo proposito¹¹.

Anche per i *fenomeni meccanici* può essere costruito sperimentalmente il quadro di riferimento specifico. Limitandoci per semplicità ai fenomeni di traslazione in una dimensione, da una parte avremo la quantità estensiva (qui rap-

¹⁰ Al di là dell'esigenza di una correttezza disciplinare, è interessante notare dal punto di vista didattico che l'interpretazione dei fenomeni termici sulla base di una grandezza intrinsecamente afferente all'ambito energetico introdurrebbe una palese asimmetria nella descrizione dei fenomeni naturali.

¹¹ Infatti, il fatto che *entrambe* le mani si scaldano permette di escludere che si tratti di un processo di conduzione, in cui vi è semplicemente un flusso di entropia da una mano all'altra.

presentata dalla *quantità di moto*) e dall'altra la grandezza intensiva, riconoscibile dal fatto che una sua "differenza" risulta essere la "causa" di molti trasferimenti di quantità di moto. Un esame attento di alcune situazioni permette di far emergere che il "potenziale meccanico" (relativo alle traslazioni) non è nullo che la *velocità*¹².

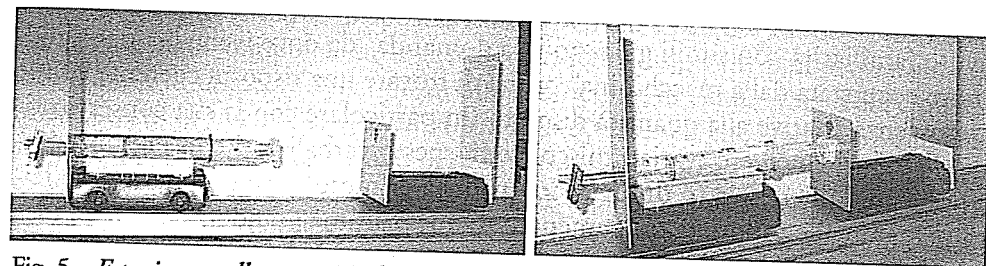


Fig. 5 - Esperienze sulla quantità di moto. Il dispositivo montato su uno dei carrelli permette di realizzare urti "lenti", di modo che risulta possibile seguire passo passo l'evolversi della collisione.

Per quanto riguarda i *trasferimenti* di quantità di moto, è importante notare che anche in questo caso abbiamo a disposizione delle "spie", rappresentate semplicemente da molle, cosa di cui ci si convince facilmente "inserendo" una molla in una cordicella che viene utilizzata ad esempio per trascinare un oggetto. In questo modo si può concludere che il concetto tradizionale di "forza" descrive trasferimenti di quantità di moto, ossia che il valore della forza può essere identificato con l'intensità del trasferimento di quantità di moto in atto. Da questo punto di vista può risultare opportuno spendere qualche riflessione per ritrovare in questo linguaggio le ben note proprietà che caratterizzano le situazioni di equilibrio meccanico, da noi incontrate solitamente nell'ambito della statica. Anche la proprietà di *conservazione* della quantità di moto deve essere chiarita a livello sperimentale: a questo proposito va osservato che per poter utilizzare urti (anelastici e non) per ricavare sperimentalmente questa proprietà, occorre saper quantificare in modo indipendente la quantità di moto di un oggetto¹³. Alcune

¹² Sempre in ambito meccanico, nel corso di uno dei due pomeriggi del workshop, sono stati presentati dal collega M. Rutz-Lewandowski anche alcuni esperimenti dedicati alle rotazioni e in particolare al *momento angolare*.

¹³ Questo aspetto può essere convenientemente trattato ricavando sperimentalmente la legge costitutiva che lega quantità di moto e velocità per un qualsiasi oggetto. Concretamente si può prendere una slitta su di un binario a cuscino d'aria, applicare una forza conosciuta (ad esempio perché viene misurata in tempo reale durante l'intervallo di azione) e determinare sperimentalmente l'andamento temporale della velocità. Il risultato è la ben nota relazione di proporzionalità diretta, che può essere anche utilizzata per introdurre il concetto di *massa inerziale* (interpretabile quindi come capacità dell'oggetto ad immagazzinare quantità di moto).

situazioni concrete permettono poi di consolidare questo modo di vedere le cose: in particolare molto istruttivo (ma particolarmente ostico per chi lo ha già incontrato nella presentazione tradizionale senza porsi soverchie domande) è il caso di una palla che viene messa in movimento grazie all'azione di un "pugno", oppure quello di una macchinina a molla che viene prima "caricata" e poi lasciata libera di muoversi. Al di là del fatto che probabilmente tutti da piccoli hanno avuto familiarità con simili giocattoli, la domanda "da dove viene la quantità di moto acquistata dalla macchinina" prima di trovare una risposta coerente con le conoscenze relative alla quantità di moto (in particolare con la sua conservazione) fa infatti emergere svariati misconcetti, spesso verbalizzati con presunte trasformazioni di energia (o di forza) in quantità di moto¹⁴. Solo dopo un esplicito richiamo alle proprietà fondamentali di quest'ultima grandezza emerge l'idea che il processo consiste in un trasferimento di quantità di moto dalla superficie di appoggio alla macchinina, come poi è facile confermare sperimentalmente ponendo quest'ultima su di una superficie d'appoggio di massa ridotta ed isolata meccanicamente dal tavolo con dei rulli: si osserva infatti che il moto "in avanti" della macchinina è accompagnato dal moto "all'indietro" del supporto, una situazione facilmente ricollegabile a quella "elettrica" dello strofinio della bacchetta con il panno di lana.

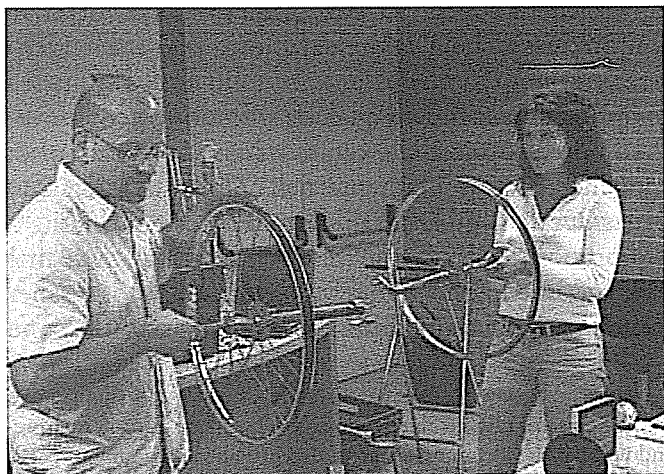


Fig. 6 - Esperienze sul momento angolare. Anche nell'abito delle rotazioni è possibile proporre delle esperienze qualitative che permettono allo studente di cogliere l'essenziale dei processi in questione. In particolare qui si tratta di mostrare che la grandezza momento angolare può essere trasferita da un oggetto ad un altro. Disponendo ad esempio di sensori di rotazione, è poi possibile mostrare anche che si tratta di una grandezza conservata.

¹⁴ Una situazione che presenta parecchie somiglianze è costituita da un oggetto lasciato cadere da fermo verso il pavimento; anche in questa situazione è istruttivo chiedersi qual è il corpo da cui proviene la quantità di moto che viene via via immagazzinata nell'oggetto. La differenza sostanziale rispetto al caso della macchinina sta nel meccanismo di trasporto, non più costituito da un processo conduttivo dovuto ad una differenza velocità, ma ad un "meccanismo" che coinvolge il campo gravitazionale.

L'ultima parte è dedicata all'introduzione dell'energia¹⁵, o meglio alle modalità con cui vengono ricavate a livello sperimentale le relazioni che ci permettono di descrivere e quantificare i trasferimenti di energia. Nei vari ambiti la strategia rimane immutata: si osserva infatti che è possibile generare un determinato effetto utilizzando modalità diverse. Ad esempio nel caso meccanico possiamo fissare come "effetto" lo spostamento a velocità costante tra due punti e in un determinato tempo di un oggetto trascinato lungo un piano orizzontale. Con l'aiuto di una cordicella, di un dinamometro e di alcune carrucole è possibile costruire situazioni sperimentali tra loro diverse ma che realizzano il medesimo effetto. I valori determinati per l'intensità della forza agente (ossia per l'intensità della corrente di quantità di moto) e per lo spostamento della mano (ossia del punto di applicazione) permettono di riconoscere che quando l'effetto sortito è il medesimo, anche il prodotto tra "forza agente e spostamento" assume un ben determinato valore. Questa combinazione può quindi essere impiegata a buon diritto come misura fisica della "causa" che origina l'effetto desiderato, ossia come una misura per la potenza in gioco, per l'energia che per unità di tempo viene trasferita al sistema. Operazioni analoghe possono essere realizzate in ambito elettrico, termico o idraulico, di modo che è possibile ottenere sperimentalmente nei vari ambiti le espressioni che ci permettono di descrivere quantitativamente i trasferimenti di energia.

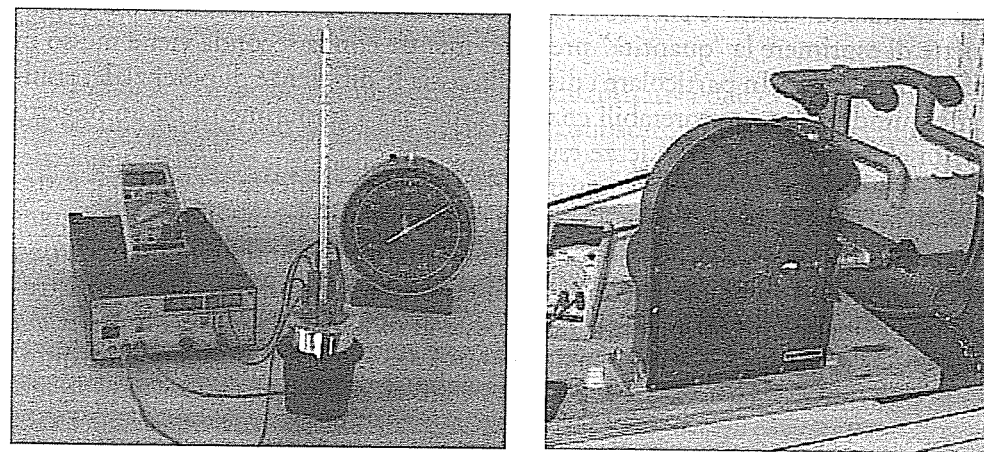


Fig. 7 - Potenza elettrica e potenza idraulica. La figura presenta le apparecchiature impiegate per ricavare la relazione tra l'intensità della corrente, la differenza di potenziale e la potenza nel caso elettrico e in quello idraulico.

¹⁵ L'introduzione del modello per l'energia attraverso le sue proprietà verrà discussa nella seconda parte del workshop: qui l'obiettivo è unicamente di delineare la parte operativa relativa ai trasferimenti di energia.

La quantità totale per l'energia trasferita in un determinato intervallo di tempo può quindi semplicemente essere determinata "sommando" istante per istante tutti i contributi: si tratta di un'operazione che almeno nei casi più semplici può essere risolta graficamente senza ricorrere a tecniche matematiche disponibili solo negli ultimi anni liceali. In questo modo, ad esempio, è facile determinare l'espressione per l'energia immagazzinata in un corpo in movimento: l'espressione per l'energia cinetica può pertanto essere ricavata dal grafico in funzione del tempo della potenza trasferita ad un oggetto messo in movimento dall'azione di una forza costante. Analogamente si può procedere ad esempio per determinare l'espressione per l'energia immagazzinata in un condensatore di una data capacità: l'accorgimento didattico importante è di servirsi di un generatore in grado di mantenere costante l'intensità della corrente durante tutto il processo di carica.

La formalizzazione

Nella seconda parte del workshop, sulla base delle osservazioni compiute, viene presentata e commentata la formalizzazione del quadro concettuale di riferimento. Qui di seguito essa viene delineata unicamente per sommi capi, mentre per una descrizione più dettagliata si rimanda ad altre pubblicazioni¹⁶.

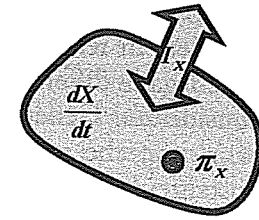
Grandezze estensive e grandezze intensive. Per la descrizione della fenomenologia osservata, in ogni campo di studio viene introdotta una coppia di grandezze: una con *carattere estensivo*, l'altra con *carattere intensivo*. La prima ci permette di esprimere la "quantità" presente, mentre con la seconda viene messo in rilievo il "livello". In particolare i dislivelli, ossia le differenze di potenziale, risultano quindi essere interpretabili come le cause per i trasferimenti da un oggetto ad un altro delle varie grandezze estensive¹⁷.

L'equazione di bilancio. Per quanto riguarda le grandezze estensive, è estremamente utile poter collegare il tasso istantaneo di variazione di una data grandezza riferita ad un dato sistema con l'intensità degli scambi che intercorrono tra il sistema e l'ambiente circostante e il tasso istantaneo di produzione/distruzione. Lo strumento formale che lega queste grandezze è denominato *equazione istantanea di bilancio*; per una generica grandezza estensiva X , essa prende quindi la seguente forma:

¹⁶ Si vedano ad esempio i contributi di M. D'Anna, *Il Karlsruher Physikkurs: nuove correnti nell'insegnamento della fisica*, Atti del XLIV Congresso Nazionale AIF, Rimini, 2005, Rimini, p. 44 e di M. D'Anna e A. Merletti, *Il ruolo dell'energia nei fenomeni naturali*, Atti del XLVI Congresso nazionale AIF, Montesilvano, 2007, p. 3.

¹⁷ Vale la pena di osservare che questo approccio può essere esteso alla descrizione dei fenomeni chimici attraverso l'introduzione delle grandezze *quantità di sostanza* (estensiva, ma non conservata) e *potenziale chimico* (con il ruolo di grandezza intensiva coniugata).

$$(1) \quad \dot{X} \equiv \frac{dX}{dt} = I_x + \pi_x$$



È importante notare che per le grandezze estensive *conservate* il termine di produzione/distruzione risulta essere identicamente nullo per qualsiasi processo. Così ad esempio avremo:

per la meccanica (traslazioni)
la *quantità di moto* è una
grandezza conservata

$$\dot{p}_x \equiv \frac{dp_x}{dt} = I_{p_x} \equiv F_x$$

per i fenomeni elettrici
la *carica elettrica* è una grandezza
conservata

$$\dot{Q} \equiv \frac{dQ}{dt} = I_Q$$

per i fenomeni termici
l'*entropia* NON è una grandezza
conservata

$$\dot{S} \equiv \frac{dS}{dt} = I_S + \pi_S \quad \text{dove} \quad \pi_S \geq 0$$

Resistenza e capacità. Per una descrizione quantitativa dell'evoluzione temporale di un determinato sistema è necessario conoscere in dettaglio anche le sue relazioni costitutive specifiche. In particolare occorre conoscere: a) le sue proprietà di immagazzinamento, ossia la relazione funzionale che lega, per la grandezza in esame, quantità e livello. Generalmente questa relazione viene espressa

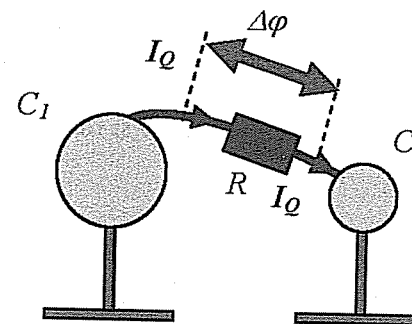


Fig. 8 - *Leggi costitutive.* Oltre che dalle leggi di validità generale (come la legge di bilancio o le leggi di conservazione), la dinamica di un determinato processo è determinata anche dalle specificità degli elementi che vi prendono parte. Si tratta di relazioni capacitive (che descrivono la relazione tra le variazioni del "contenuto" e quelle del potenziale) e di relazioni conduttive (che mettono in relazione la differenza di potenziale con l'intensità della corrente). Nel caso elettrico sono date dalle ben conosciute leggi di Volta e di Ohm.

con il concetto di *capacità*, che nei casi più semplici può assumere un valore costante; b) le sue proprietà in relazione con gli scambi con l'esterno, ossia la relazione funzionale che lega la differenza di potenziale con l'intensità del flusso della grandezza considerata. Generalmente questa relazione viene espressa con il concetto di *resistenza*, che nelle situazioni più semplici può assumere anch'essa un valore costante. In generale tuttavia non sarà possibile determinare la dinamica di un sistema per via algebrica o risolvendo in modo esplicito le relative equazioni differenziali; in queste situazioni risulta quindi di particolare interesse avere a disposizione uno strumento numerico¹⁸.

Il ruolo dell'energia. Il modello utilizzato per l'energia si differenzia da quello tradizionale soprattutto per il fatto che esso mette in evidenza che non vi è

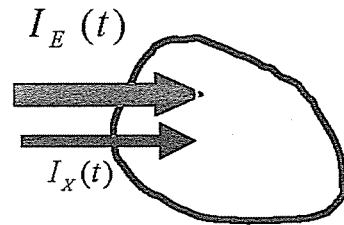


Fig. 9 - Portatori di energia. La figura cerca di mettere in evidenza che nei fenomeni di trasporto un flusso di energia è sempre accompagnato dal flusso di una seconda grandezza estensiva.

trasporto di energia senza che parallelamente vi sia anche il trasporto di un'altra grandezza estensiva. Tale associazione viene espressa indicando quest'ultima con il termine di *portatore di energia*; così l'aggettivazione che di tanto in tanto accompagna l'energia non sta ad indicare una "forma" particolare di energia, ma semplicemente la natura del portatore che nel trasporto preso in esame le è associata.

Degno di nota è anche il fatto che le varie differenze di potenziale introdotte in precedenza "agiscono" sulle grandezze estensive loro coniugate, e non direttamente sull'energia.

All'interno del quadro generale concettuale delineato, per quanto riguarda gli aspetti energetici risulta fondamentale saper descrivere i trasferimenti di energia istante per istante. Ciò viene realizzato introducendo i concetti di *intensità del trasporto* di energia e di *potenza*, ossia della quantità di energia che in un dato processo viene liberata (o richiesta) istante per istante. Come già discusso in precedenza, per i *fenomeni di tipo conduttivo*, nei vari ambiti di studio si ricava sperimentalmente la seguente relazione:

¹⁸ Si veda a questo proposito anche M. D'Anna, *Modelling in the classroom: linking Physics to other disciplines and real-life phenomena*, in Proceedings of the GIREP 2006 Conference, Amsterdam, p. 121. Parte dei contenuti sono stati ripresi anche nel seminario tenuto a Napoli nel giugno 2006: la relativa documentazione può essere scaricata direttamente dal sito <http://innovazione.na.infn.it/docs/1%20Prima%20parte%20Napoli%202009-VI-06.pdf>.

$$(2) \quad \mathcal{P} = I_X \Delta\varphi_X = I_X (\varphi_{Xin} - \varphi_{Xout}) = I_X \varphi_{Xin} - I_X \varphi_{Xout} = I_{E,in} - |I_{E,out}|$$

dove I_X e $\Delta\varphi_X$ rappresentano rispettivamente l'intensità della corrente del portatore e l'ampiezza della "caduta di potenziale". Nell'insieme questa relazione può essere letta come un bilancio istantaneo per l'energia: la differenza tra l'intensità in entrata e quella in uscita dà la quantità di energia che istante per istante è messa a disposizione nel processo considerato. A seconda delle caratteristiche del dispositivo in questione, questa energia viene "caricata" o "trasferita" su di un altro portatore preesistente ed esce dal sistema, oppure viene immagazzinata nel sistema o ancora viene "dissipata", ossia, nei casi in cui vi è produzione di entropia, viene associata alla quantità di entropia prodotta nel processo.

Una rappresentazione grafica. Molto utile risulta a questo punto far uso dei diagrammi di flusso per l'energia ed i vari portatori¹⁹: attraverso delle frecce vengono indicati tutti gli scambi di energia tra il sistema considerato e l'ambiente circostante, accompagnandole anche con le indicazioni relative ai flussi (e agli eventuali processi di produzione/distruzione) che riguardano i portatori in questione, nonché i vari livelli dei potenziali associati. All'interno del sistema vengono indicati i *trasferimenti* di energia da un portatore all'altro attraverso l'indicazione della potenza associata ai vari processi. Questi strumenti permettono di descrivere adeguatamente le diverse situazioni incontrate. Ad esempio, conside-

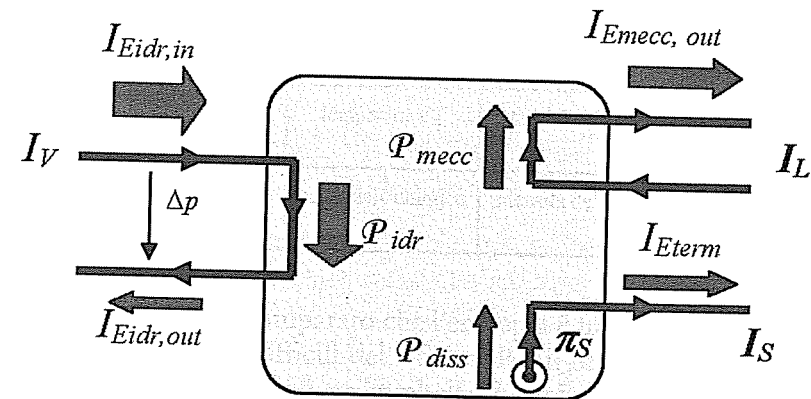


Fig. 10 - Rappresentazione schematica di una turbina idraulica reale: il dispositivo è in grado di trasferire sul portatore desiderato solo parte dell'energia liberata nel processo.

¹⁹ Per una trattazione più dettagliata si vedano le referenze citate nella nota 16, nonché il testo di H.U. Fuchs, *The Dynamics of Heat*, Springer, 2006.

riamo una turbina idraulica reale: la differenza di pressione funge da "forza motrice" per l'intero processo. Dato che si tratta di un dispositivo in cui sono presenti effetti dissipativi, esso è in grado di trasferire sul portatore meccanico desiderato solo una *parte* dell'energia che viene liberata istante per istante dalla "parte" idraulica del processo: una parte dell'energia viene così associata all'entropia prodotta.

INSEGNARE LA TERMOLOGIA SECONDO IL KPK

FRIEDRICH HERRMANN
Università di Karlsruhe

Per prima cosa consideriamo alcuni aspetti di base, che sono sviluppati nei punti 1, 2 e 3. Poi darò una descrizione di alcune lezioni, tali e quali come si sviluppano nell'aula.

1. L'entropia sin dall'inizio

Riconsideriamo la tabella 1 delle analogie: se la prendiamo sul serio, i protagonisti dei campi della scienza nella prima colonna sono proprio queste quantità. Il protagonista dell'elettricità è la carica elettrica, come evidentemente già sappiamo. Il protagonista della meccanica è la quantità di moto. Ma ora ciò che ci interessa è la termologia: vediamo che il protagonista della termologia è l'entropia.

	grandezza estensiva	grandezza intensiva	intensità della corrente	corrente di energia
meccanica	quantità di moto p	velocità v	Forza F (intensità della corrente meccanica)	$P = v \cdot F$
elettrologia	carica elettrica Q	potenziale elettrico φ	intensità della corrente elettrica I_Q	$P = \Delta\varphi \cdot I_Q$
termologia	entropia S	temperatura T	intensità della corrente di entropia I_S	$P = T \cdot I_S$
chimica	quantità di sostanza n	potenziale chimico μ	intensità della corrente di sostanza I_n	$P = \Delta\mu \cdot I_n$

Tutti noi abbiamo imparato che l'entropia è una quantità molto astratta, difficile. Una delle più difficili della fisica. Per il momento prescindiamo da questo ostacolo e confidiamo nella tabella. La tabella ci dice che l'entropia è così importante per la termologia come la carica elettrica per l'elettrodinamica. Formuliamo questa osservazione in termini un po' drastici o provocatori:

La termologia senza entropia e senza corrente di entropia è come la meccanica senza quantità di moto e senza forza o come l'elettricità senza carica elettrica.

Forse pensate che questa asserzione sia esagerata. Tutti sappiamo che non si può insegnare elettricità senza carica elettrica, poiché senza carica elettrica non

si sa di che parlare. Ma possiamo fare termologia senza entropia e tutti noi lo facciamo. Però, è possibile fare elettrodinamica senza carica elettrica. Ma come mai? Facile. Tutto ciò che bisogna fare è cominciare con la termodinamica, tale e quale la si insegna oggi, e poi tradurre con l'aiuto di questa tabella. Risulta una elettrodinamica assolutamente consistente. Ma difficile da capire e molto brutta. In altri termini: così brutta com'è la termodinamica nei nostri libri. Questo gioco, vorrei aggiungere, questa traduzione è stata effettivamente fatta da un nostro collega, il professor H.U. Fuchs qui presente, ed è anche stata pubblicata in una rivista internazionale di primo piano [1]. L'articolo in questione è molto divertente, poiché è una specie di satira.

Ora, arriviamo alla domanda del perché la termodinamica o la termologia si trova in uno stato così deplorabile. Effettivamente, vi è stato uno sviluppo storico particolarmente infelice. Cercherò di darvi uno schizzo dello sviluppo storico del concetto di calore.

2. La ricerca di una misura per il calore

Il primo contributo che ci interessa è stato fatto da Joseph Black (1728 - 1799). Black fu il primo a distinguere tra una *intensità* di calore e una *quantità* di calore. L'intensità era la temperatura, già conosciuta a quell'epoca. Ma Black introdusse un'altra grandezza, la *quantità di calore*, o semplicemente il calore, in inglese *heat*. Si tratta di un'introduzione assolutamente rigorosa, cioè con metodo di misura. Il calore di Black era una quantità estensiva e evidentemente una grandezza di stato. Quindi, non era identica al concetto di calore che si usa in fisica oggi. Black introdusse anche una capacità termica.

Nel secolo seguente, vi fu l'invenzione e la diffusione delle macchine a vapore. E al principio del XIX secolo venne un altro contributo importantissimo al concetto di calore: Sadi Carnot trovò la relazione tra lavoro e calore. Del punto di vista odierno, si può dire che Carnot trovò la relazione tra entropia e energia. Effettivamente se nel testo di Carnot sostituiamo la parola calore o *chaleur* con entropia, quasi tutto rimane corretto. E sappiamo che ciò che a quell'epoca si chiamava lavoro, più tardi venne chiamato energia.

Poi venne l'evento infelice: all'incirca verso il 1850 Joule e Mayer introdussero l'energia. Ciò, evidentemente non costituisce l'evento infelice. L'infortunio fu che essi tolsero il nome calore, la parola calore, alla quantità introdotta da Black e Carnot, e la utilizzarono per una grandezza che fu indicata come forma di energia, cioè per un oggetto matematico che non è una grandezza fisica e che con un eufemismo venne poi indicata come quantità di processo. Il calore di Black e Carnot non soltanto perse il suo nome, ma sparì anche completamente. Tuttavia, la fisica aveva bisogno di una misura di calore, di una quantità estensiva, di una quantità di stato.

Ma pochi anni dopo, il defunto calore riapparve, ma con altro nome, introdotto da Clausius col termine di entropia. L'introduzione era così complicata che nessuno si rese conto che si trattava dell'antico calore. L'entropia appariva come una quantità pallida, difficilissima, quasi esoterica.

Dovettero passare ancora 40 anni per il completamento di questa intricata vicenda: solo nel 1911 infatti Callendar fece una pubblicazione molto importante, molto lucida, in cui mostrava con chiarezza che l'entropia di Clausius è identica all'antico concetto di calore e, di più, che essa corrisponde al concetto di calore della gente comune, del linguaggio comune. Però, disgraziatamente era già troppo tardi. Il lavoro di Callendar non ebbe praticamente nessun impatto, sebbene Callendar fosse uno scienziato conosciuto e rispettato. Il suo lavoro fu completamente dimenticato. E soltanto nel 1972 apparve un libro in tedesco con la stessa idea, per opera di Georg Job, anche lui qui presente. È interessante notare come Job non conoscesse il lavoro di Callendar.

Adesso, possiamo trarre la nostra conclusione. L'entropia è ciò che in termini del linguaggio comune si chiama calore. Capito questo, possiamo renderci conto che l'entropia non soltanto non è una quantità difficile, ma che l'entropia è effettivamente una delle quantità più facili di tutta la fisica. La si può paragonare alla massa o alla lunghezza.

3. Grandezza di stato, grandezza di processo

Per ultimo un'osservazione che riguarda il concetto di calore come viene impiegato in fisica. Impariamo che esistono due tipi di variabili: di stato e di processo. Si insiste che il calore della fisica tradizionale è una grandezza di processo, mentre l'entropia è una grandezza o una funzione di stato.

Però questa affermazione non coglie nel segno. Perché praticamente tutte le grandezze di tutta la fisica sono grandezze di stato. È la cosa più normale del mondo che una grandezza si riferisca a uno stato, non vale la pena di menzionarlo. L'eccezione è costituita dalle grandezze di processo, perché ce ne sono soltanto due in tutta la fisica: il calore e il lavoro. In realtà queste non sono grandezze, ma piuttosto oggetti matematici di un'altra natura. Sono difficili da manipolare e se ne può facilmente fare a meno. Secondo la mia esperienza con gli studenti universitari, quasi nessuno ha capito la ragione per la quale non è corretto dire che il calore (nel senso tradizionale della fisica) non è contenuto in un corpo. Oppure perché abbiamo bisogno della seguente affermazione: „Forniamo calore al sistema. Per questo cambia la sua entalpia.“

Allora, ecco nuovamente la nostra conclusione: costruiamo una termologia con l'entropia. L'entropia non è nient'altro che il calore del linguaggio comune. È una quantità estensiva, è una funzione di stato. E è una grandezza che non ha niente di misterioso o di trascendente.

4. Le prime cinque lezioni del corso

Passiamo alla descrizione del corso. Si tratta di un corso per studenti di 15 anni di età. Descriverò le prime cinque lezioni. In tutto sono molte di più: venti più o meno. Lo farò di modo che si riconoscano i dialoghi tra il professore e gli allievi.

Lezione I (P professore, S studente)

P: Oggi cominciamo con un nuovo argomento. Ci occupiamo di termologia.

La termologia ha a che fare con il calore.

Sapete che in fisica si usano le grandezze fisiche, vuol dire che descriviamo il mondo quantitativamente, con i numeri. Conoscete tutti una grandezza con la quale descrivere il caldo e il freddo.

S: La temperatura.

P: Giusto. La temperatura. Introduciamo il simbolo e l'unità di misura, i gradi centigradi.

Ma con una sola grandezza non si può ancora fare fisica. La fisica si occupa sempre delle relazioni tra varie grandezze. Abbiamo bisogno di un'altra grandezza con cui descrivere l'essere caldo e l'essere freddo. Anche questa la conoscete già. Ci dice quanto calore c'è in un oggetto, è contenuto in un oggetto. Per così dire la quantità di calore.

Per esempio, in una borsa dell'acqua calda c'è del calore.

E questa è la nostra nuova grandezza. I fisici danno spesso dei nomi alle grandezze, per non confonderle con qualcos'altro. Il calore di cui abbiamo parlato viene detto entropia.

L'abbreviazione, cioè il simbolo, è *S*. La sua unità di misura è il Carnot, abbreviato Ct. Quanto vale 1 Ct lo vedremo più tardi... Bene, vediamo se avete capito. Ora farò delle domande dove c'è sempre la parola entropia. Ogni volta che dico „entropia“ voi pensate semplicemente: „calore“. Allora: qui (figura 1) ho dell'acqua fredda: dieci gradi..., qui dell'acqua calda, settanta gradi, la quantità è la stessa. In quale recipiente c'è più entropia?

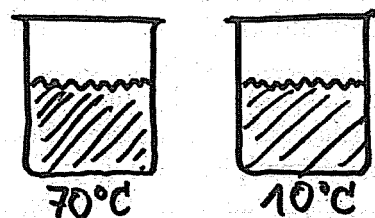
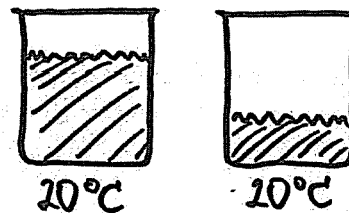


Fig. 1

S: In quello dove c'è l'acqua calda.

Più la temperatura di un corpo è alta, più entropia contiene

P: Quindi abbiamo: *Più la temperatura di un corpo è alta, più entropia contiene.*
Ora facciamo in un altro modo (figura 2). L'acqua ha la stessa temperatura. Adesso in quale c'è più entropia?



Più la massa di un corpo è grande, più entropia contiene.

Fig. 2

S: Dove c'è più acqua.

P: Quindi: *Più la massa di un corpo è grande, più entropia contiene.*

Allora... Aspettate... Immaginate che in quest'acqua ci siano 12 Ct. Ne verso un terzo nell'altro bicchiere. Quanti sono rimasti in questo bicchiere?

S: Otto

P: Otto Carnot. Giusto. E dove sono rimasti gli altri 4?

S: Beh, nell'altro.

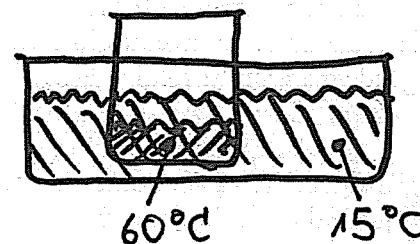
P: Sì, giusto.

Lezione II

P: Bene, ora vogliamo studiare a fondo alcune proprietà dell'entropia. Io farò sempre delle domande. Non dimenticate: Ogni volta che dico entropia voi traducete mentalmente in calore.

Qui abbiamo una scodella o un acquario (figura 3). Con acqua di rubinetto, fredda. Qui dentro c'è dell'acqua calda... qui 15 gradi e di qua 60 gradi.

Bene. Mi potete dire cosa succede se metto il bicchiere qui dentro?



L'entropia fluisce spontaneamente dai corpi caldi a quelli freddi.

Fig. 3

S: ... l'acqua si raffredda?

- P: Quale?
 S: Quella nel bicchiere.
 P: Sì. E l'acqua nella scodella?
 S: ... diventa più calda, però solo un po'.
 P: Perché solo un po'?
 S: Perché nella scodella ce n'è molto di più.
 P: Bene, ora state attenti. Voglio una spiegazione di quanto abbiamo osservato. E quando chiedo una spiegazione, penso sempre a: cosa fa l'entropia? Quindi in questo processo, cosa fa l'entropia?
 S: Va dall'uno all'altro.
 P: Cosa intendi quando dici dall'uno all'altro?
 S: Da quello più piccolo a quello più grande.
 P: Ahà. Quindi abbiamo una regola: l'entropia va sempre dal piccolo al grande. D'accordo?
 S: Ma no, non ha senso.
 P: Come no?
 S: Da quello caldo a quello freddo.
 P: Giusto, è così. Annotiamoci la regola: *L'entropia fluisce spontaneamente dai corpi caldi a quelli freddi.*
 Ma l'acqua calda non resta calda. Cosa fa?
 S: Si raffredda.
 P: Si raffredda sempre di più?
 S: No, solo fino a quando le temperature sono uguali.
 P: Sì! Questo stato viene detto *equilibrio termico*. Si vede che l'entropia fluisce solo fintanto che c'è una differenza di temperatura. Quindi la differenza di temperatura è una specie di *spinta per la corrente di entropia*.

Lezione III

- P: Nelle ultime ore abbiamo imparato che l'entropia fluisce spontaneamente dai corpi caldi a quelli freddi. Ma ora immaginate che qualcuno voglia che l'entropia vada nella direzione opposta, risalendo la temperatura per così dire. Possiamo supporre che qualcuno abbia interesse a farlo. Se inventassimo un apparecchio che ci riesce, forse potremmo guadagnare molti soldi. Qualcuno sa come fare?
 S: non so...
 P: In fondo è un problema che conosciamo già. Qualcosa va spontaneamente da qui a là e noi vogliamo che vada da là a qui. Ad esempio l'aria va da qui a là se qui la pressione è alta e là è bassa. Pensate a un pneumatico d'auto. L'aria esce da sola. Se vogliamo che entri nel pneumatico, cioè dalla pressione più bassa a quella più alta, dobbiamo servirci di uno strumento ...

- S: una pompa d'aria!
 P: Ora, se vogliamo che l'entropia vada dal freddo al caldo, abbiamo bisogno di una...?
 S: ... una pompa ... di entropia.
 P: Bravo! Se la inventassimo noi, potremmo fare un bel po' di soldi. Purtroppo qualcuno ci ha preceduto. Tutti voi avete una pompa di entropia a casa vostra.
 S: ... (In generale, non c'è risposta.)
 P: (Quindi, aiuto:) È in cucina...
 S: In cucina? Aaaaahhh... il frigorifero.
 P: Sì, la macchina nera nel frigorifero. (A questo momento, faccio entrare un vero frigorifero. E lo studiamo.)
 Tra l'altro il termine tecnico non è pompa di entropia ma pompa di calore. Ma, da dove a dove pompa l'entropia?
 S: Da dentro a fuori.
 Da dove entra l'entropia nella macchina? (Scopriamo i tubi all'interno del frigorifero.)
 E da dove esce l'entropia?
 S: Dietro ci sono anche dei tubi.
 P: Quindi abbiamo: *una pompa di calore trasporta entropia da punti a temperatura bassa verso punti a temperatura più alta.*

Lezione IV

- P: Vedete questo libro?
 S: Sì, e allora?
 Quanta entropia c'è dentro? Quanta entropia possiamo estrarre? (Nessuna risposta.)
 Avete notato almeno che ho posto due domande?
 S: Perché due? Era una sola.
 P: Sì, erano due: prima: quanta entropia c'è dentro e (accentuo) seconda: quanta entropia possiamo estrarre.
 S: Ma è la stessa cosa! Se nella bottiglia c'è mezzo litro di birra posso bere solo mezzo litro di birra.
 P: Ben detto. Eppure... conosco una cosa da dove si può estrarre più di quanto contiene...
 S: Aaaaahhh! Il conto in banca!
 P: Se ci sono 80 Euro nel conto e se ne ritiri 100, quanti rimangono?
 S: ... ho 20 Euro di debito.

Venti Euro di soldi negativi. Allora, com'è con l'entropia? (*Non lo sanno.*)
Che potremmo fare per sapere?

S: Dovremmo pompar fuori tutta l'entropia.

P: Purtroppo avremmo bisogno di una pompa di calore molto efficiente e molto costosa. Ma altra gente ci ha già provato prima di noi. Gli scienziati e i tecnici tentano da quasi 150 anni di stabilire nuovi record con le pompe di calore. E così facendo hanno osservato una cosa molto strana. Anche con le migliori pompe di calore non si riesce a scendere al di sotto di una certa temperatura, per quanto a lungo si pompi. Questa temperatura è di meno duecentosettantatre gradi. Adesso, mi sapete spiegare da cosa può dipendere?

S: Non c'è più dentro entropia, e se non ce n'è più non se ne può neanche togliere dell'altra.

P: Quindi abbiamo risposto a entrambe le domande. Sapremmo quanta entropia c'è dentro, se l'avessimo misurata. E soprattutto: sappiamo che non esiste l'entropia negativa.

Si vede che anche la temperatura ha un valore minimo, appunto -273 °C. Ora è ragionevole scegliere quello come zero della temperatura. Questa scala di temperatura si chiama scala di temperatura assoluta. E quando si dà una temperatura in questa scala, l'unità di misura si chiama Kelvin.

Lezione V

P: Immaginate che sia freddo e che vogliamo riscaldare il locale.

S: Dentro entropia.

P: Giusto, dentro entropia. Come facciamo?

S: Aumentiamo il riscaldamento.

P: E da dove viene l'entropia?

S: Dal calorifero.

P: E come ci arriva al calorifero?

S: Con l'acqua.

P: Sì. E come ci è arrivata all'acqua?

S: Giù in cantina c'è una caldaia.

P: Giusto. E da dove viene l'entropia?

S: Beh, dentro la caldaia c'è una fiamma.

P: E l'entropia viene da lì? Ma come è arrivata alla fiamma?

S: Viene fatta lì.

P: Molto bene. Viene prodotta nella combustione, in una reazione chimica.

Avremmo potuto riscaldare il locale anche in altro modo?

S: Con un calorifero elettrico.

P: Da dove viene l'entropia in questo caso?

S: Dal radiatore.

P: Sì, ma dentro cosa c'è?

S: Dei fili che si riscaldano, una resistenza elettrica.

P: (*si sfrega le mani, prima lentamente poi vigorosamente*): C'è ancora un altro modo di produrre entropia.

S: Con l'attrito...

P: Adesso diventa più interessante.

Immaginate: vogliamo raffreddare qualcosa, non riscaldarlo. Per esempio: abbiamo una tazza di tè che è troppo calda. Cosa facciamo?

S: Aspettiamo.

P: Sì... e cosa succede all'entropia?

S: Esce fuori.

P: Fuori? Dove?

S: Nel locale.

P: Ma allora il locale dovrebbe riscaldarsi.

S: E sì.

P: Ah sì? Ma non lo notiamo.

S: Beh, è così grande che il calore... ehm... l'entropia si distribuisce.

P: Va bene. Ma non potremmo sbarazzarci dell'entropia del tè in un altro modo?

S: Mettiamolo in frigo.

P: Ahà. E poi cosa succede all'entropia?

S: Beh, esce da dietro.

P: Giusto. ... quindi finora mi avete solo citato dei metodi, dove l'entropia del tè va a finire da qualche altra parte. Prima era nel tè, dopo è nel locale. Ma prima, con il riscaldamento, era tutta un'altra cosa. L'entropia che era portata nel locale non veniva tolta da un'altra parte, veniva prodotta. Prima non c'era, poi c'era. Non si potrebbe fare la stessa cosa per raffreddare? Facendo sparire l'entropia del tè, non portarla da un'altra parte, farla sparire, definitivamente.

S: No, non si può.

P: E perché no?

S: Perché no. Tutti sanno che non è possibile!

P: Va bene. Hai ragione. È esattamente così.

Quindi: *L'entropia può essere prodotta, ma non annichilata.*

P: Probabilmente non vi siete resi conto di quanto incredibile sia quest'affermazione.

S: Perché incredibile?

P: Gli scienziati hanno tentato per più di 100 anni di dimostrare che non è vera. Hanno tentato di tutto per aggirare la natura. Ma senza successo.

S: Aaahhh... ma allora... allora vuol dire che la Terra dovrebbe riscaldarsi sempre di più... l'effetto serra...

P: Ahà, adesso sembra diventare interessante. Comunque con l'effetto serra non ha niente a che fare.

S: Come mai no?

P: È vero che sulla Terra viene prodotta sempre più entropia, con tutti i processi immaginabili, soprattutto con processi di combustione. Ma a dire il vero è anche peggio: ci arriva in continuazione entropia dal Sole, con la luce. D'altro canto per la Terra questo non è un problema: la Terra cede in permanenza entropia con la radiazione infrarossa che emette. Con questa radiazione tutta l'entropia se ne va: quella ricevuta dal Sole e quella prodotta. È risolto il problema?

S: No, no. Allora lo spazio dovrebbe diventare sempre più caldo.

P: Vedete? Adesso siamo arrivati agli argomenti veramente interessanti. Della questione dell'entropia dell'universo si occupano oggi gli astrofisici e i cosmologi. Ma il problema non è ancora risolto. Questa affermazione ha però un'altra conseguenza singolare: ci dice in che direzione scorre il tempo. Immaginate: abbiamo ripreso qualcosa e ora vi mostro il filmato, senza sonoro. Però non vi dico se ve lo mostro nella direzione giusta o al contrario. Sareste in grado di capirlo, voglio dire solo considerando il filmato?

S: Dipende.

P: Esattamente, dipende! Ma da cosa dipende?

S: Beh, a volte si riesce a volte no.

P: Quando si riesce e quando no?

(Segue una discussione dei diversi esempi: una palla che sale, gira e torna giù, una torre di cubetti di legno che crolla, una candela che diventa sempre più corta. Sempre domandiamo: come sarebbe al contrario?)

La domanda è: cosa hanno di speciale quei processi che possono svolgersi sia in avanti che al contrario? Tra l'altro si chiamano processi reversibili. E cos'ha di speciale quelli che al contrario non funzionano, i processi irreversibili?

(Troviamo che ha a che fare con l'entropia...)

I processi nei quali viene prodotta entropia sono quelli irreversibili. Se si svolgessero al contrario si dovrebbe annichilare entropia e questo è vietato.

Riferimenti bibliografici

[1] H.U. Fuchs, *A surrealistic tale of electricity*, Am. J. Phys. 54, 907-909 (1986).

DIFFERENZE E CAMBIAMENTO E IL CORSO DI FISICA DI KARLSRUHE

HANS U. FUCHS
Università di Zurich at Winterthur Switzerland

Strutture del pensiero immaginario in fisica

Hans U. Fuchs
Department of Physics
Zurich University of Applied Sciences at Winterthur
8401 Winterthur, Switzerland

Relazione ad invito per il Convegno
Innovazione nella Didattica della Fisica di base e la fisica di Karlsruhe:
risultati e prospettive.
Università "Federico II" di Napoli, Settembre 28-30, 2006

Indice

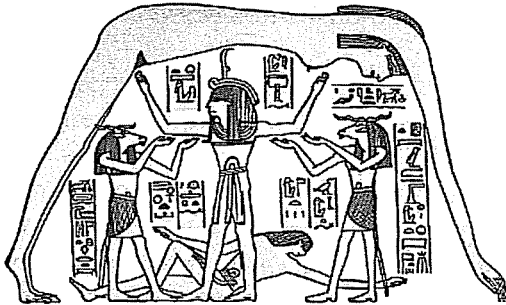
- Parte 1** **Introduzione: polarità binarie e dinamica**
- Parte 2** **Energia e Cambiamento: Un esempio di un progetto curricolare britannico**
- Parte 3** **La forma (gestalt) dei processi fisici**
- Parte 4** **Grandezze del tipo Sostanza e d Energia nel Corso di fisica di Karlsruhe**
- Parte 5** **Differenze di potenziale, energia, e processi**

Parte 1

INTRODUZIONE: POLARITÀ BINARIE E DINAMICA

La cosmologia Egiziana e Babilonese è basata su opposizioni polari. La nozione di opposizione polare è un elemento centrale del pensiero mitico. Le opposizioni polari sono l'origine della dinamica del mondo...

CREARE E MANTENERE LE DIFFERENZE



<http://www.civilization.ca/civil/egypt/images/reli28b.jpg>

Nella mitologia Egizia il mondo viene creato dal caos non differenziato attraverso un processo di differenziazione. Shu (l'aria) separa Nut (il cielo) da Geb (la Terra). Bisogna tenere su il Cielo, altrimenti cade sulla Terra.

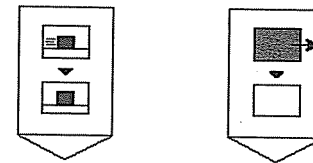
Ciò suona molto moderno. Il Sole deve fornire energia utile per mantenere le differenze di potenziale sul nostro pianeta. Queste differenze sono la causa dei processi vitali.

Parte 2

ENERGIA E CAMBIAMENTO: UN ESEMPIO DI UN PROGETTO CURRICOLARE BRITANNICO

Richard Booan e Jon Ogborn hanno creato un curriculum che enfatizza i processi di cambiamento. Essi sottolineano che le differenze sono il motore del cambiamento, che le differenze si attenuano, e che le differenze possono creare altre differenze. Essi cominciano con le differenze di livello, di pressione, di temperatura. E poi di colpo cambiano la loro storia...

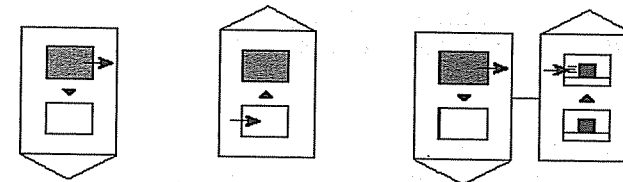
DIFFERENZE E CAMBIAMENTO



a sinistra: un corpo rallenta a causa della differenza di velocità tra il corpo ed il terreno.

a destra: un corpo si raffredda fino alla temperatura dell'ambiente circostante.

CAMBIAMENTI SPONTANEI E NON-SPONTANEI

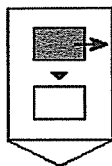


a sinistra: un corpo si raffredda spontaneamente.

in mezzo: un corpo diventa più caldo dell'ambiente circostante. Questo non può accadere spontaneamente.

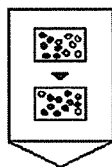
a destra: un cambiamento non spontaneo è accoppiato ad uno spontaneo.

DIFFUSIONE DI MATERIA ED ENERGIA...



Boohan and Ogden cambiano la storia e passano alle differenze di concentrazione di materia ed energia:

- La Materia si diffonde a causa di differenze di concentrazione;
- L'Energia si diffonde a causa di differenze di concentrazione di energia.



Incongruenze con questo tipo di approccio

- L'Energia pura è la controparte della materia.
- L'Energia ha due aspetti le cui differenze non vengono mai spiegate: si diffonde, ed è misura e causa di ciò che accade.
- L'approccio di BO si basa sulla meccanica statistica; prima però usano esempi tratti dalla fisica macroscopica.

Parte 3

LA FORMA (GESTALT) DEI PROCESSI FISICI

La percezione umana porta all'astrazione di una forma (gestalt) strutturata di esperienze molto diverse come l'amore, il dolore, il calore oppure il movimento. Le caratteristiche di questa forma (gestalt) sono la quantità, l'intensità, ed (una terza che chiameremo) forza...

Un rovesciamento immagine sfondo di questa concettualizzazione può produrre il concetto di "movimento di piccole particelle" che spiega il meccanismo di funzionamento della natura.

LA FORMA (GESTALT) DEI CONCETTI ASTRATTI

Concetti come amore o malvagità o pensiero sono derivati dall'esperienza come una forma (gestalt) strutturata preconcettuale con le caratteristiche di

sostanza (quantità) / intensità (qualità) / forza o potenza

Espressioni linguistiche per evil (malvagità):

- She had no idea how strong evil could be.
- Evil burned intensely.
- Evil grew amongst us.
- Evil gained control of this group of people.
- Slowly, evil left his soul.
- Evil made him do things he would not have done otherwise.

Conseguenze della concettualizzazione

Due persone malvagie significa raddoppiare la malvagità. Più malvagità significa maggiore intensità. Più malvagità significa che essa è più potente. Con maggiore intensità la malvagità aumenta il suo potere.

Prove evidenti per la Forma (Gestalt) dei processi Fisici 1

Si chiede alle persone se sono d'accordo o meno su certe espressioni

- La temperatura è alta
- Oggi il calore è alto
- C'è molto calore in questa stanza
- C'è molta temperatura in questa stanza
- Il calore aziona il motore
- La temperatura aziona il motore

Tabella 1: Accordo con le classi di espressione^a

	come sostanza	come livello	come causa
calore	0.67 (1)	0.14 (0)	0.77 (1)
temperatura	0.09 (0)	0.83 (1)	0.09 (0)

a. Agreement (1) or disagreement (0) with expressions using heat and temperature. Expected results in parentheses. Results of a questionnaire given to journalism students in Summer of 2004.

Prove evidenti per la Forma (Gestalt) dei processi Fisici 2

Il concetto di calore nell'Accademia del Cimento

Il concetto di calore dei membri della Accademia del Cimento: Saggi di naturali esperienze... (1667)

M. Wisner and S. Carey (1983): When Heat and Temperature were one.

"Il concetto di calore degli "Sperimentatori" aveva tre aspetti: **sostanza** (particelle), **qualità** (ardore), e **forza**."

Una forma (gestalt) debolmente differenziata

Sembra che gli Sperimentatori non distinguessero veramente tra questi aspetti della forma (gestalt) del calore.

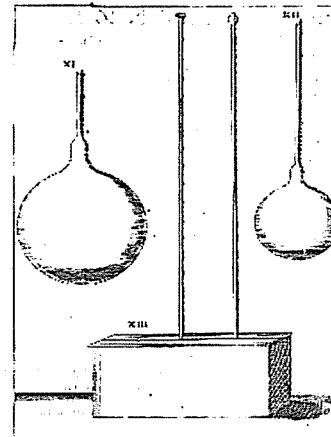


Il concetto di calore nella Accademia del Cimento

Il concetto di calore dei membri della Accademia del Cimento: Saggi di naturali esperienze... (1667)

La descrizione fenomeni termici degli Sperimentatori dimostra chiaramente l'aspetto corrispondente alla causalità diretta: i corpi caldi o freddi sono le sorgenti del caldo o del freddo. Caldo e freddo vengono emessi dalle sorgenti ed hanno effetto su altri corpi. Gli Sperimentatori erano interessati nella "forza" o "potenza" del caldo e del freddo.

See M. Wisner and S. Carey (1983)



LA FORMA (GESTALT) DEI PROCESSI FISICI

La percezione umana di fenomeni come i fluidi, l'elettricità, il calore, il movimento

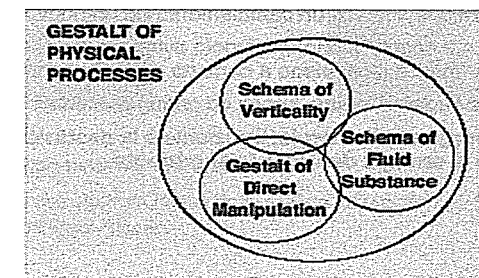
Il concetto di "calore", per esempio, viene astratto attraverso la percezione dalla somma complessiva delle esperienze termiche come una forma (gestalt): una entità che è più della somma delle sue parti. Mentre non differenziamo la forma (gestalt) di un fenomeno collettivo (come l'elettricità o il calore) in modo conscio, però notiamo alcuni aspetti. Gli aspetti più importanti di cui parlano gli umani a proposito di questa forma (gestalt) sono

Tabella 2: La forma (gestalt) dei fenomeni fisici collettivi

ASPETTI DELLA GESTALT	STRUTTURA METAFORICA
Intensità (qualità)	Polarità Binaria (come chiaro-scuro, caldo-freddo, alto-basso, veloce-lento, forte-debole). I concetti sono strutturati metaforicamente nello schema immagine della verticalità (intensità come livello).
Quantità (sostanza)	Concetti del tipo Sostanza sono strutturati metaforicamente nello schema immagine di sostanze fluide.
Forza o potenza	Causazione prototipica della gestalt della manipolazione diretta.

FORMA (GESTALT) COME TUTTO STRUTTURATO E PRECONCETTUALE

- La forma (gestalt) è strutturata, ha aspetti o elementi.
- La forma (gestalt) è preconettuale. I concetti sono generati dalla applicazione e dalla proiezione metaforica di schemi immagine agli aspetti della forma (gestalt). Forma e struttura sono presentate in questo modo alla nostra esperienza e comprensione (M. Johnson, 1987, p.75).
- Non si possono togliere aspetti senza distruggere la forma (gestalt).



GLI SCHEMI IMMAGINE SONO FORME (GESTALTS)

(M. Johnson, 1987; W. Croft and D. A. Cruse, 2004; V. Evans and M. Green, 2006)

POLARITÀ BINARIE	chiaro-scuro, caldo-freddo, alto-basso, veloce-lento, forte-debole, maschio-femmina, buono cattivo, giusto ingiusto ...
SPAZIO	Polarità binarie: su-giù-down, davanti-dietro, sinistra-destra, vicino-lontano, centro-periferia. Altri: contatto, traiettoria
PROCESSO	processo, stato, ciclo
CONTENITORE	contenimento, dentro-fuori, superficie, pieno-vuoto, contenuto
FORZA / CAUSAZIONE	bilancio, contrappeso, costrizione, freno, avvio, blocco, deviazione, attrazione
UNITÀ / MOLTEPLICITÀ	fondersi, raccogliere, suddividere, iterare, parte-tutto, misurare una quantità, collegare
IDENTITÀ	confrontare, sovrapporre
ESISTENZA	rimozione, spazio limitato, oggetto, sostanza, sostanza fluida

CAUSAZIONE PROTOTIPICA: LA FORMA (GESTALT) DELLA MANIPOLAZIONE DIRETTA

La forma (gestalt) della manipolazione diretta

Lakoff (1987, p. 54), Lakoff and Johnson (1980, p. 70)

Aspetti della forma (gestalt)

1. C'è un agente che fa qualcosa.
2. C'è un paziente che subisce un cambiamento ad un nuovo stato.
3. Le proprietà 1 e 2 costituiscono un singolo evento: esse si sovrappongono nello spazio e nel tempo; l'agente viene a contatto con il paziente.
4. Parte di ciò che l'agente fa (movimenti od ordini) precede il cambiamento nel paziente.
5. L'agente è la sorgente di energia; il paziente è la destinazione dell'energia; c'è un trasferimento di energia dall'agente al paziente.
6. ...

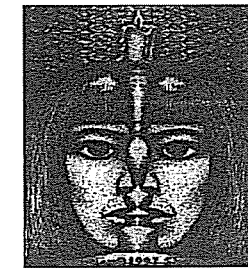
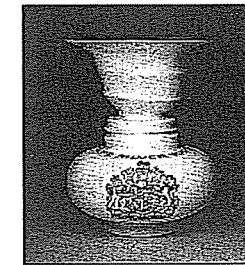
LA FORMA (GESTALT) DEI PROCESSI FISICI È SOLO DEBOLMENTE DIFFERENZIATA

- Questa semplice descrizione non deve indurci a pensare che la fisica sia semplice. Gli aspetti della forma (gestalt) qui sottolineati in genere non sono differenziati a livello conscio. A livello preconcio essi sono così fortemente intrecciati che una differenziazione cosciente richiede qualche sforzo.
- Quantità ed intensità (livello) sono metaforicamente legate (PIÙ È SU) (MORE IS UP)
- La forza (potenza) della forma (gestalt) è intimamente collegata all'intensità. Non differenziamo facilmente tra intensità, forza, vigore...

Ciononostante, c'è qualche speranza...

- Se ci rendiamo conto dell'esistenza di questa struttura del pensiero umano, ci può venire in mente di usarlo fin dall'inizio in didattica. Possiamo utilizzare al meglio la capacità di pensiero mitico che è molto sviluppata nei bambini piccoli (K. Egan, 1988, 1997).

IL ROVESCIAMENTO FIGURA-SFONDO NELLE METAFORE DUALI PUÒ ESSERE ALL'ORIGINE DELLA METAFORA MECCANICA STATISTICA PER I PROCESSI FISICI



Il Rovesciamento Figura-Sfondo nelle metafore duali

Molti concetti hanno almeno una struttura metaforica spaziale ed una del tipo Sostanza che sono collegate da un Rovesciamento Figura-Sfondo.

Strutture Metaforiche Duali 1

Concettualizzazione metaforica della mente

(G. Lakoff and M. Johnson: *Philosophy in the Flesh*, Chapter 12)

Metafore	Espressioni Metaforiche Linguistiche
PENSARE È MANIPOLARE OGGETTI THE MIND IS A BODY THINKING IS OBJECT MANIPULATION IDEAS ARE MANIPULABLE OBJECTS COMMUNICATING IS SENDING UNDERSTANDING IS GRASPING	Combine these ideas... Students are crumming their heads full of ideas This is going right over my head He carefully crafted this idea Teachers put ideas into students heads Did you grasp this? MIND/PERSON = GROUND, IDEAS = FIGURE
PENSARE È MOVIMENTO THE MIND IS A BODY THINKING IS MOVING IDEAS ARE LOCATIONS REASON IS A FORCE	My mind wandered for a moment How did you reach that conclusion? We have arrived at a crucial point in our argument Where are you in the discussion? His argument forced me to conclude that... IDEAS = GROUND, MIND/PERSON = FIGURE

Strutture Metaforiche Duali 2

Metafore Spaziali e del tipo Sostanza per il calore ed il movimento

	Metafore Spaziali	Metafore del tipo Sostanza
Calore	THE STONE IS WARM The temperature is higher today The body quickly reached this temperature The thermal state is metaphorically structured as a location of the body on a vertical scale CALORE = SFONDO, CORPO = FIGURA	THE STONE CONTAINS HEAT Heat has flowed out of the room The room contains a lot of heat The thermal state is metaphorically structured as the possession of heat that flows into or out of the object HEAT = FIGURA, BODY = SFONDO
Movimento	THE STONE IS MOVING The stone is fast The speed is a lot higher Motion is metaphorically structured as a location of the body on a vertical scale MOTO = SFONDO, CORPO = FIGURA	THE STONE POSSESSES MOMENTUM The stone has a lot more momentum It has lost momentum Motion is metaphorically structured as the possession of momentum that flows into or out of the object MOTO = FIGURA, CORPO = SFONDO

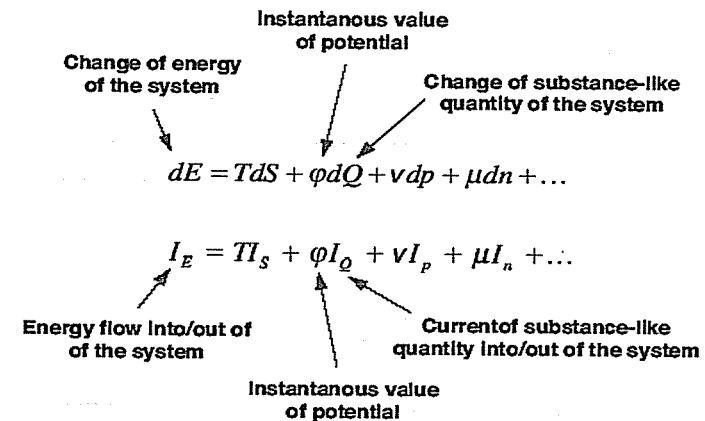
Parte 4

QUANTITÀ DEL TIPO SOSTANZA ED ENERGIA NEL CORSO DI FISICA DI KARLSRUHE

Uno degli aspetti importanti del KPK – se non il più importante – è la relazione tra le Quantità del tipo Sostanza e l’Energia. Con il concetto dei Portatori dell’Energia la si può rappresentare graficamente. Questa relazione è la stessa in ogni campo della fisica (fluidi, calore, elettricità, movimento...). Questo è un buon esempio dell’uso di analogie forti in fisica.

THE GIBBS FUNDAMENTAL FORM

F. Herrmann: KPK, Lehrband, 1995

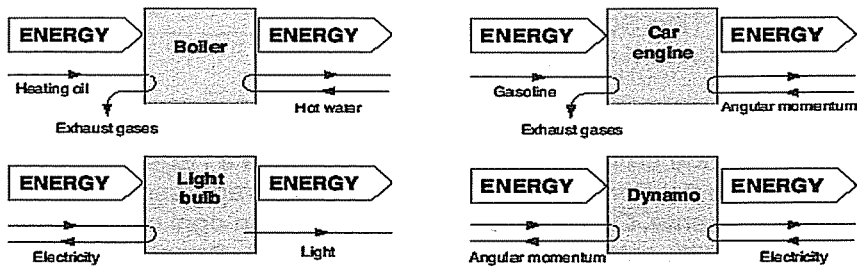


Ogni fenomeno è caratterizzato da un potenziale e da una quantità del tipo sostanza. Questo ci permette di trattare in modo analogo tutte le aree della fisica...

ENERGY CARRIERS, ENERGY, AND ENERGY FLOW DIAGRAMS 1

F. Herrmann: KPK, Vol. 1, 1995

Energy carriers and energy flows

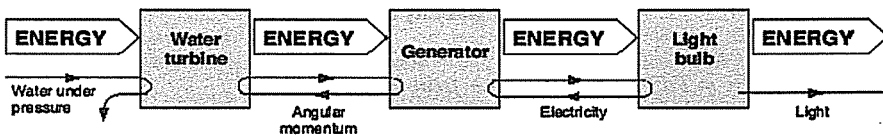


*L'energia si trasferisce dentro e fuori dei sistemi insieme ai portatori dell'Energia.
L'energia NON è simile alla materia. Ha un ruolo completamente diverso nei processi fisici.*

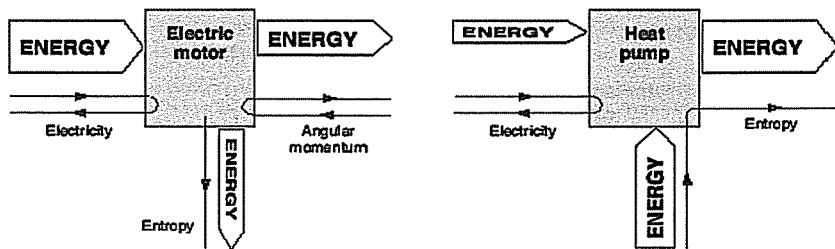
ENERGY CARRIERS, ENERGY, AND ENERGY FLOW DIAGRAMS 2

F. Herrmann: KPK, Vol. 1

A chain of systems and processes...



Motori...

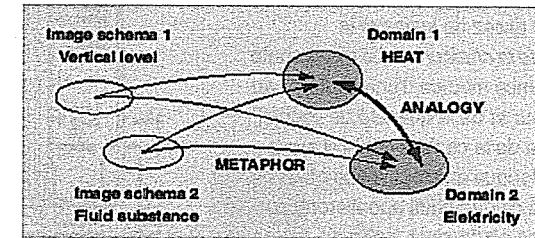


Metafore e Ragionamento Analogico

Origine e Significato delle Analogie

Quando aree diverse dell'esperienza vengono strutturate metaforicamente dallo stesso campo di origine (così come dallo stesso schema immaginato), questi campi diventano paragonabili (cominciano a sembrare simili).

Questo paragone può essere applicato alla costruzione delle analogie. Una analogia è una corrispondenza biunivoca (più o meno simmetrica).



Parte 5

DIFFERENZE DI POTENZIALE, ENERGIA E PROCESSI

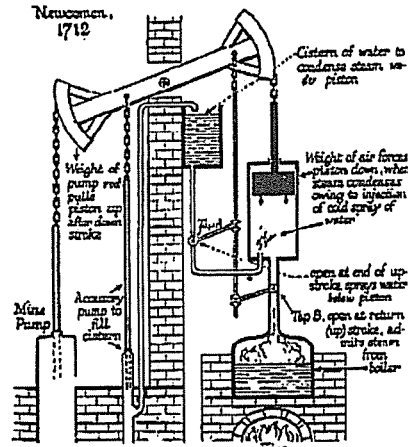
Se fin dall'inizio sottolineiamo l'importanza delle differenze come forza motrice del cambiamento, all'approccio del KPK si aggiunge un importante elemento figurativo. Otteniamo una rappresentazione fedele della forma (gestalt) dei processi fisici che rientra perfettamente nello schema del KPK...

LA RAPPRESENTAZIONE DELLA POTENZA DEL CALORE DI SADI CARNOT



Sadi Carnot (1796-1832)
Réflexions sur la puissance motrice du feu

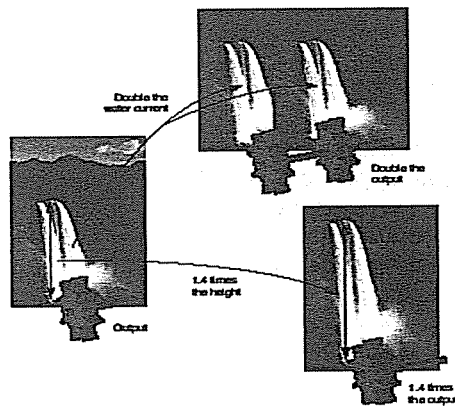
D'après les notions établies jusqu'à présent, on peut comparer avec assez de justesse la *puissance motrice de la chaleur* à celle d'une chute d'eau [...]. La puissance motrice d'une chute d'eau dépend de sa hauteur et de la quantité du liquide; la puissance motrice de la chaleur dépend aussi de la quantité de calorique employé, et de ce qu'on pourrait nommer, de ce que nous appellerons en effet *la hauteur de sa chute*, c'est-à-dire de *la différence de température* des corps entre lesquels se fait l'échange du calorique.



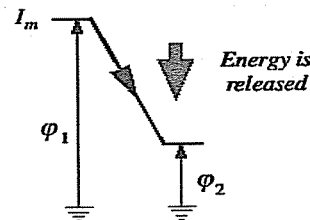
DIAGRAMMATIC VIEW OF NEWCOMEN'S ATMOSPHERIC OR FIRE ENGINE (1712)

CONSEGUENZE DELLA STRUTTURA METAFORICA DEI CONCETTI FISICI

Un esempio di conseguenza che può essere messo in forma quantitativa

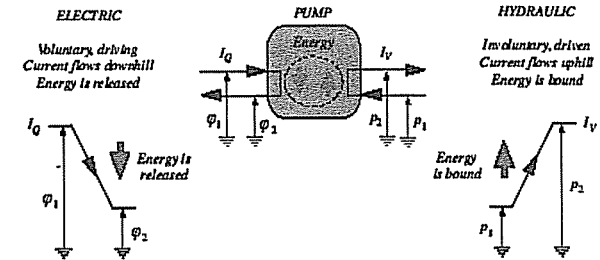


Potenza =
 Differenza di Livello · Corrente della sostanza

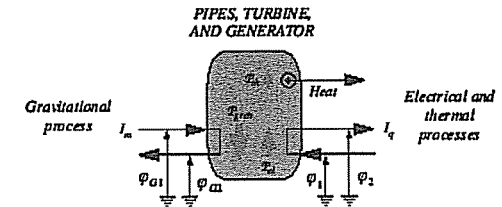


LA RAPPRESENTAZIONE DELLA CASCATA D'ACQUA NEI DIAGRAMMI DI PROCESSO

- Accoppiamento Ideale

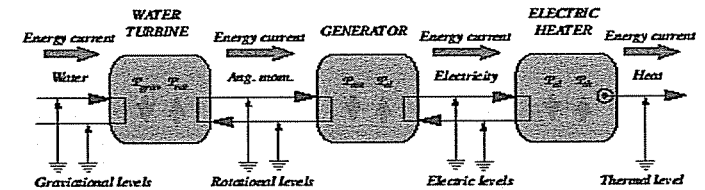


- Accoppiamento Reale

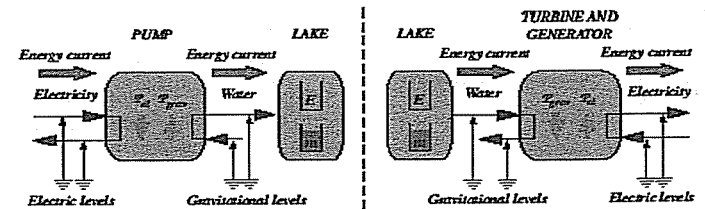


FLUSSO DI ENERGIA E IMMAGAZZINAMENTO NEI DIAGRAMMI DI PROCESSO

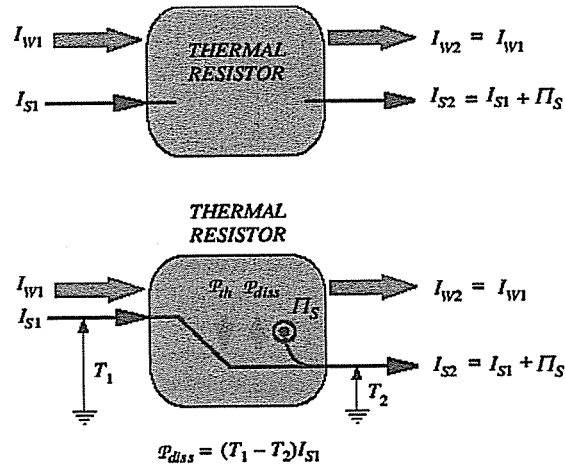
- Trasporto d Energia



- Immagazzinamento di Energia



LA NECESSITÀ DEL CONCETTO DI POTENZA



Nessuna differenza tra le correnti di energia potrebbe servire come misura del ritmo a cui viene dissipata l'energia.

L'immagine della cascata spiega facilmente il significato dell'energia dissipata (e dell'entropia prodotta) nella conduzione del calore.

$$\frac{dj_x}{dx} = 0, \quad j_x = Tj_s$$

$$\frac{d(Tj_s)}{dx} - T \frac{dj_s}{dx} - j_s \frac{dT}{dx} = 0$$

UN SISTEMA CON REAZIONI CHIMICHE

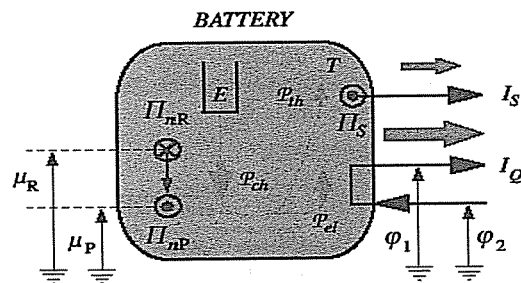


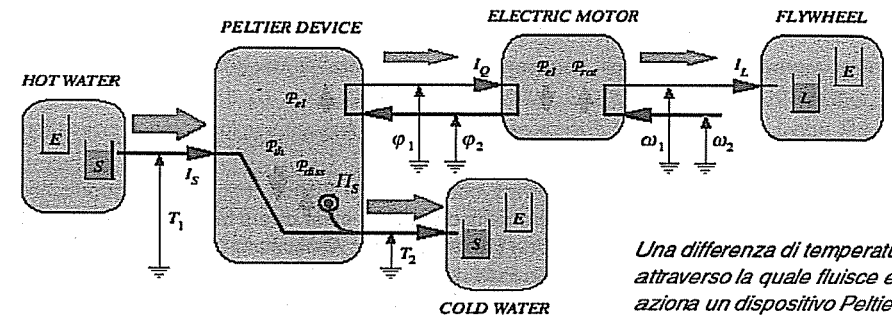
Diagramma di Processo di una Batteria, inclusa la produzione di entropia.

Non c'è alcun trasferimento di energia dal o nel sistema con sostanze chimiche.

L'energia liberata nelle reazioni proviene dall'energia contenuta.

La Potenza dei processi chimici è suddivisa tra i processi elettrici e quelli termici.

UNA DIFFERENZA DI TEMPERATURA AZIONA UN VOLANO



Una differenza di temperatura, attraverso la quale fluisce entropia, aziona un dispositivo Peltier, cioè stabilisce una differenza elettrica.

La differenza elettrica aziona un motore elettrico, il quale stabilisce un differenza di velocità angolari....

RIASSUNTO

- La mente umana "vede" una forma (gestalt) strutturata nei processi fisici. Questa struttura è ben descritta da tre aspetti: **quantità, intensità, forza**.
- Con cura e pazienza la forma (gestalt) può essere sempre più differenziata durante la crescita intellettuale dei discenti.
- Nella fisica macroscopica ci sono concetti che possono venire collegati a questi aspetti:

QUANTITÀ	Quantità del tipo Sostanza
INTENSITÀ	Differenza di Potenziale
FORZA	Potenza di un processo

- E' possibile esprimere la struttura della forma (gestalt) dei processi con l'aiuto dei Diagrammi di Processo. Questo ci dà la possibilità di progettare un interessante corso di fisica qualitativo adatto alle moderne esigenze.
- Il KPK e la fisica del continuo ci possono insegnare a costruire una teoria fisica formalizzata che è vicina allo schema immagine preconettuale qui descritto.

LITERATURE

- Accademia del Cimento (Magalotti, Lorenzo, 1667): *Saggi di naturali esperienze fatte nell'Accademia del Cimento sotto la protezione del serenissimo principe Leopoldo di Toscana e descritte dal segretario di essa Accademia*. Electronic Edition: Istituto e Museo di Storia della Scienza, Firenze, <http://www.imss.fi.it/biblio/ebibldig.html>
- Borer, Frommenwiler, Fuchs, Knoll, Kopacsy, Maurer, Schuetz, Studer (2005): *Physik – ein systemdynamischer Zugang*, 2. Auflage, h.e.p. verlag, Bern.
- Boohan R. and J. Ogborn (1996): *Energy and Change*. The Association for Science Education, London, UK.
- Carnot S. (1824): *Réflexions sur la puissance motrice du feu*. Édition critique avec Introduction et Commentaire, augmentée de documents d'archives et de divers manuscrits de Carnot, Paris : Librairie philosophique J. Vrin (1978). English: *Reflections on the Motive Power of Fire*. E. Mendoza (ed.), Peter Smith Publ., Gloucester, MA (1977). Deutsch: *Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers*, in Ostwald, Wilhelm, Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch (2003).
- Croft W. and D. A. Cruse (2004): *Cognitive Linguistics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Egan K. (1997): *The Educated Mind. How Cognitive Tools Shape Our Understanding*. The University of Chicago Press, Chicago.
- Egan K. (1988) *Primary Understanding*. Rutledge, NY.
- Evans V. and M. Green (2006): *Cognitive Linguistics. An Introduction*. Edinburgh University Press, Edinburgh.
- Falk G. and W. Ruppel (1979): *Energie und Entropie*. Springer-Verlag, Berlin.
- Fuchs H. U. (1996): *The Dynamics of Heat*. Springer-Verlag, New York.
- Herrmann F. (2003): *Der Karlsruher Physikkurs. Band 1, Sekundarstufe I*. Aulis Verlag Deubner. ISBN 3-761-42517-1.
- Johnson M. (1987): *The Body in the Mind. The Bodily Basis of Meaning, Imagination, and Reason*. University of Chicago Press, Chicago.
- Lakoff G. and Johnson M. (1980): *Metaphors We Live By*. University of Chicago Press, Chicago (with a new Afterword, 2003).
- Lakoff G. and Johnson M. (1999): *Philosophy in the Flesh: The Embodied Mind and Its Challenge to Western Thought*. Basic Books, New York.
- Wiser M. and S. Carey (1983): *When Heat and Temperature were one*, in D. Gentner and A. L. Stevens eds.: *Mental Models*, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 1983 (pp. 267-297)

I PARADIGMI DELLA DIDATTICA DELLA FISICA
IL CASO DELLA TERMODINAMICA

ANTONINO DRAGO

Gruppo di Storia della Fisica

Dip. Sci. Fisiche - Univ. "Federico II" Napoli

1. I paradigmi della storia della didattica della fisica

Non solo, come dice Kuhn¹, la storia della fisica passa attraverso dei paradigmi (tolemaico, newtoniano, ecc.), ma anche la didattica della fisica passa attraverso diversi paradigmi. Una rapida riflessione individua quattro paradigmi didattici, contrassegnati dai "dogmi" seguenti:

- 1° (<1958): *le verità fisiche*, ricavate dagli esperimenti, *sono assolute*, cioè indipendenti dalla società, dagli uomini e dalle facoltà umane; quindi l'insegnante di fisica trasmette all'allievo delle verità che sono indipendenti dai due e che sovrastano le relazioni interpersonali e la vita sociale;
- 2° (1958-): nella didattica della fisica è valido solo *il linguaggio degli esperimenti e della matematica*; quindi essa si deve interessare solamente a questi due elementi costitutivi, ma dando un'enfasi speciale al fare e allo studiare gli esperimenti, che solo in fisica hanno una grande importanza per stabilire le verità;
- 3° (1958-1980): *vengono percepiti problemi nella didattica della fisica, ma si ritiene che siano tutti superabili con la (nuova) pedagogia*; contro la vecchia didattica della fisica, che ignorava l'allievo, la nuova facilita l'apprendimento, basandolo su attrazioni e soprattutto suggerendo le opportune motivazioni al lavorare in fisica;
- 4° (1980-): al fine di essere massimamente efficace, la didattica della scienza fisica deve insegnare secondo una pedagogia che anch'essa deve essere scientifica: perciò si introduce la didattica assistita dal computer e soprattutto si introducono le *scienze cognitive*, che ci indicano come la mente umana riesce a comprendere e ad apprendere.

Ma dopo cinquanta anni di innovazioni, la didattica della fisica non ha ancora risolto i suoi problemi. I quali hanno al centro la domanda cruciale che viene posta implicitamente dall'insoddisfazione per il secondo dogma: *oltre la fisica oggettiva, quella degli esperimenti e della matematica, che cosa c'è da insegnare della fisica?* Perché occorre notare che ancora la didattica della fisica non conosce bene l'oggetto del suo insegnamento, per il semplice fatto che oggi non c'è una teo-

¹ T.S. Kuhn : *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, Einaudi, Torino, 1969.

ria dei fondamenti della fisica; perciò la didattica della fisica, conoscendo solo la ricerca fisica e i suoi risultati, si riduce spesso ad una praticoneria o ad un indottrinamento.

2. Gli insegnanti di fisica passano ai concetti fisici

Dal tempo del secondo paradigma in poi, gli insegnanti di fisica hanno cominciato ad essere coscienti delle difficoltà dell'insegnamento e di non aver ricevuto dall'Università gli strumenti per affrontarli. Allora essi hanno trattato la propria materia così come fanno gli altri insegnanti, specie quelli umanisti; si sono avventurati a riferirsi ai "concetti" (della fisica). I quali possono corrispondere solo a singole grandezze fisiche (ad es. massa), ed allora appartengono alla *fisica oggettiva*; ma possono anche avere una portata molto più ampia (ad es. spazio, tempo, forza, stabilità, determinismo, meccanicismo, ecc.) ed allora appartengono alla *fisica intesa soggettivamente*.

Ma la didattica di questa fisica ha una grande difficoltà: oggi nessuno sa controllare il tipo di linguaggio della fisica soggettiva; perché esso appartiene alla filosofia della conoscenza, la quale da due secoli è in una grande crisi. Di fatto, ogni concetto può avere una moltitudine di significati, non solo nell'uso corrente, ma anche nella storia della fisica. Come esempio, si prenda il concetto di "spazio"; esso ha avuto significati fisici (sia teorici che sperimentali) molto diversi, così come fa vedere la tabella seguente².

CONCETTO DI SPAZIO	SUA VALUTAZIONE
I. Concetto di ente assoluto, totalmente indipendente da ogni grandezza fisica	Grandezza metafisica
II. Concetto a priori	Il contenitore degli enti fisici
III. Primo concetto della teoria / sistema di riferimento	Grandezza monopolizzatrice dei fondamenti della teoria fisica
IV. Concetto matematico totalmente astratto (spazio di Hilbert)	Concetto che assorbe in sé il rapporto della teoria fisica con la matematica

Tab 1 - Concezioni dello spazio nelle teorie fisiche

La esplorazione della didattica della scuola di Karlsruhe (KPK) si colloca proprio sul piano dei concetti della fisica, facendo vedere che i concetti possono cambiare non solo nelle teorie fisiche storicamente successive, ma anche in una medesima teoria.

Non pretendo di compiere una precisa ricostruzione storica, ma a me sembra che la crescita della KPK possa essere illustrata alla seguente maniera. Già da

² Per la illustrazione di questa e delle tabelle seguenti (salvo le n. 4-6), vedasi A. Drago: *Lezioni di Storia e Fondamenti della Fisica classica e moderna*, E.DI.SU., Napoli, 2002 (seconda edizione 2004)

un secolo in termodinamica esisteva una polemica (innescata da Ostwald): se il concetto di entropia fosse stato già inteso da S. Carnot come calore a temperatura costante; per cui anche lui, che credeva nell'errata ipotesi del calorico, poté esprimere il concetto moderno di entropia. In più si è potuto sostenere che in effetti il concetto dismesso di calorico, che era una grandezza che si conservava, è un'ottima approssimazione del concetto di entropia, se non proprio una anticipazione.³ La difficoltà nell'identificarli sta nel fatto che al tempo di S. Carnot il calorico rappresentava il calore, che modernamente invece non si conserva.

Il capostipite della scuola KPK, Falk, ha iniziato da questo punto (concepire grandezze fisiche come flussi) sin dagli anni '60.⁴ Poi anche il concetto dell'energia è stato visto sotto tutt'altra luce di quella classica: come un fluido trasportato da diversi *carriers*, invece che come una grandezza proteiforme, che assumerebbe mille "forme" (meccanica, elettrica, magnetica, chimica, ecc.). Da queste variazioni nei significati dei concetti è nato un collegamento tra tutte le teorie fisiche, che tutte si basano sulla conservazione dell'energia; anzi, dalla chimica-fisica si ottiene una formula generale per la variazione dell'energia: una somma di prodotti di coppie di grandezze coniugate, delle quali una è sempre intensiva e l'altra estensiva.⁵ Cosicché tutta la fisica classica, che sembra separata in compartimenti stagni (meccanica, elettromagnetismo, termodinamica, ecc.), salvo qualche ponte sospeso nell'aria, secondo il nuovo punto di vista appare unificata. Da qui è stato facile investire tutta la fisica teorica con una nuova concezione, che per di più offriva vantaggi nei collegamenti concettuali con la fisica moderna.

3. La rivisitazione concettuale della fisica teorica da parte del KPK

Di fronte a questa diversità di significati, sorge la domanda: quali sono i veri concetti che corrispondono alle varie grandezze fisiche? Quali sono da scalzare? Qui un fisico e un didatta tradizionale può vedere un conflitto che porta ad escludere la tesi dell'avversario.

Ma, come si diceva in precedenza, i concetti appartengono alla filosofia della conoscenza, dove quasi mai esistono *esperientia crucis*. Anzi, occorre ricordare che più di un secolo fa *Hertz compì una operazione analoga*: poiché a lui (come

³ H. Callendar, "Presidential address", *Proc. Roy. Soc. London*, 23 (1911) 153-189.

⁴ G. Falk: *Theoretische Physik auf der Grundlage einer Allgemeiner Mechanik*, Springer-Verlag, New York, 1968; G. Falk e W. Ruppel: *Energie und Entropie*, Springer-Verlag, Berlin, 1979. In effetti già il chimico-fisico I. N. Broensted: *Principles and Problems in Energetics*, Interscience P., New York, 1955, aveva fondato la termodinamica sulla entropia, misurata direttamente mediante un entropimetro (calorimetro a temperatura costante, ad es. a ghiaccio fondente)

⁵ J.W. Gibbs: "On the equilibrium of heterogeneous substances", *The scientific Papers*, Dover, New York, 1961, 100-105.

a D'Alembert, L. Carnot ed altri) *il concetto di forza* in meccanica sembrava un concetto antropomorfo e soprattutto del tutto eguale al prodotto *ma*, lo volle eliminare. Forte della pratica della meccanica dei moti vincolati, egli pensò di sostituire l'azione di una forza con quella di un vincolo; quindi là dove c'era l'azione di una forza, si trattava di immaginare degli opportuni vincoli (fantasma); per cui la sua meccanica è nota come quella delle "masse fantasma". La sua genialità è stata quella di saper fornire un apparato matematico (sia pure difficilissimo) per trovare il moto di un punto soggetto a questi vincoli fantasma.⁶ Ciò insegna che la fisica teorica è duttile: può trasformare i concetti che utilizza fino a stravolgerne completamente il significato intuitivo.

Perciò al livello dei concetti occorre uscire dal manicheismo del decidere tutto in vero/falso. Quindi anche la KPK può ben iniziare una concezione soggettiva dei concetti in alternativa a quella tradizionale; concezione che nell'assegnare significati alle grandezze fisiche è filosofica; e si noti che lo è altrettanto di quella tradizionale!

Inoltre la KPK fa scoprire che *un medesimo concetto fisico può corrispondere a differenti grandezze fisiche sperimentali*. Ad es., la favola storica di Fuchs⁷ fa concepire l'entropia come calorico o come carica elettrica, senza danno per le matematiche, che pure nei due casi sono così diverse. Queste innovazioni costituiscono certamente scoperte notevoli che danno una didattica più adeguata, perché sanno utilizzare la intuitività degli allievi.

Ma più in generale ho mostrato che *i concetti fisici dipendono poco dalla base sperimentale*. Ad es. quelli della termodinamica (di S. Carnot) sono, come ci si aspetta, molto diversi da quelli della meccanica di Newton, perché, si dice, i campi sperimentali sono molto differenti; eppure sono quasi gli stessi dei concetti della meccanica di L. Carnot. (Vedi tab. 3)

Qui si vede che due formulazioni diverse di una stessa teoria (la meccanica) possono avere concetti molto diversi (ad es. vedasi movimento, inerzia). Ricordando in più che, come fa vedere la tab. 1, un medesimo concetto fisico può avere più significati ed espressioni soggettive, allora è chiaro che la didattica della fisica ha un ampio gioco sul piano dei concetti, che essa può esplorare con grande vantaggio, anche oltre la proposta della KPK.

4. Oltre la esclusione della epistemologia dalla didattica della fisica

Consideriamo l'ultimo paradigma didattico. Notiamo che però il cognitivismo non può immaginare che, rispetto all'insieme dei dati percepiti, i concetti mentali siano duplici, secondo la variabilità che avviene nel fenomeno visivo

⁶ H. Hertz: *Prinzipien der Mechanik in neuen Zusammenhänge Dargestellt*, Leipzig, 1895; tr. it.: Univ. Pavia, 1996.

⁷ H.U. Fuchs: "A surrealistic tale of electricity", *Am. J. Phys.*, 54 (10) 1986, 907-909.

Tab 3 - I concetti caratteristici della meccanica di Newton, di quella di L. Carnot e della termodinamica di S. Carnot.

	NEWTON	L. CARNOT	S. CARNOT
SPAZIO	Infinito e assoluto	Delimitato e relazionale	Spazio degli stati termodinamici
TEMPO	Assoluto	Variazione finita	Variazione finita
CORPI	Come insieme di punti materiali senza estensione	Corpi estesi, macchine	Corpi estesi, macchine
MOVIMENTO	Proprietà del corpo	Comunicazione del moto	Comunicazione del moto
MACCHINA	Applicazione particolare della teoria	Soggetto universale della teoria	Soggetto universale della teoria
CAPACITA' DELLE MACCHINE	Possibilità di una potenza infinita	Contro la chimera della potenza infinita: le macchine come generatrici di una serie di opzioni razionali	Contro la chimera della potenza infinita: le macchine come generatrici di una serie di opzioni razionali
FENOMENO BASE	Moto continuo	Urto	Trasformazioni di calore in lavoro
CONCETTO BASE	Accelerazione	Quantità di moto scambiata	Stato di un sistema
ESPRESSIONE DELL'INTERAZIONE	Forza, come concetto idealizzato e sintetizzante tutta l'influenza dell'ambiente esterno	Lavoro	Lavoro
INERZIA	Come moto perpetuo	Impossibilità di creare il moto perpetuo	Impossibilità di creare il moto perpetuo
PRINCIPI	I tre principi della dinamica classica	Impossibilità del moto perpetuo	Impossibilità del moto perpetuo
PROBLEMA FISICO-MATEMATICO	$f = ma$	Leggi di conservazione nell'urto	Massimizzazione del rendimento di una macchina termica
TECNICA MATEMATICA	Infinitesimi Equazioni differenziali	Moti geometrici Invarianze (simmetrie) Algebra elementare	Algebra elementare (Ciclo come strumento di ragionamento)
SOLUZIONI	Tutti i moti possibili, per una data forza, da meno a più infinito	Quantità conservate	Ciclo di Carnot
SCELTA SULLA MATEMATICA	IA	IP	IP
SCELTA SULLA ORGANIZZAZIONE	OA	OP	OP

Legenda: IA = matematica con l'Infinito in Atto; IP = matematica con l'Infinito Potenziale solamente; OA = Organizzazione basata su Assiomi; OP = Organizzazione rivolta a risolvere un Problema fondamentale.

della Gestalt. Tanto meno lo può davanti ad una variabilità ancor più ampia, come quella indicata nel paragrafo precedente. Ciò mostra che il *cognitivismo è strutturalmente incapace*, già al livello appena superiore della percezione, di

seguire passo a passo il processo della costruzione dei concetti da parte della nostra mente. Allora possiamo concludere che il tener conto della variazione dei concetti per una medesima grandezza fisica fa uscire la didattica della fisica dal quarto paradigma, cioè da quell'indirizzo cognitivista che in passato ha prodotto molte innovazioni, ma che oggi si dimostra sempre più frenante. D'altronde, doveva essere così; una apertura della didattica della fisica alla filosofia della scienza (attraverso una esplorazione dei concetti) doveva rimettere in discussione la scelta filosofica (uno pseudosperimentalismo), compiuta a priori da questo paradigma didattico sulla filosofia della mente.

Infatti il KPK tende a sottolineare l'aspetto filosofico o metodologico delle sue novità. Esso sottolinea il primo aspetto (filosofico) quando va a concepire in maniera coerente un *concetto nuovo*, ad es. quello di quantità di moto come fluido. Sottolinea il secondo aspetto (metodologico) quando, facendo vedere le grandezze fondamentali come "fluidi", collega trasversalmente le teorie classiche, che usualmente invece appaiono rigidamente separate da barriere concettuali; o anche quando dà collegamenti particolari della fisica classica con la meccanica quantistica e con la relatività ristretta.

Queste innovazioni filosofiche o metodologiche finalmente hanno superato la barriera che tutti i paradigmi della didattica della fisica hanno rispettato scrupolosamente, per di più tacendola agli studenti: la barriera elevata contro la filosofia della scienza, o, meglio, contro i fondamenti della scienza. Dal 1958, da quando si decise che l'insegnamento di tutte le scienze doveva essere svecchiato, ci si è attenuti scrupolosamente ad evitare questa dimensione essenziale della fisica; l'interpretazione più benevola di questo fatto è che non la si considerava appartenente alla fisica.

In definitiva, *possiamo considerare l'esperienza del KPK come la nascita spontanea di una didattica della fisica, che, almeno attraverso i concetti, pone in questione qualcosa di fondamentale della fisica e quindi inizia una didattica di tipo epistemologico.*

Ma io credo che si può fare ancora di più del KPK. Si noti che il KPK forza la didattica a considerare non solo più significati di uno stesso concetto (questo è l'aspetto più appariscente), ma anche più formulazioni didattiche di una stessa teoria. Infatti il suo ripensamento dei concetti della fisica riesce anche a scoprire o a valorizzare *una intera formulazione differente* da quella usuale. Ciò è innovativo, perché di solito si ignora, o si vuole ignorare (soprattutto nella didattica), che ci sono più formulazioni di una stessa teoria fisica; cosa che nel passato solo il libro di Mach⁸ poneva in rilievo (benché non lo valorizzasse). Ma questo avviene solo in alcuni casi; ad es. nel caso della meccanica di Schmid,⁹

⁸ E. Mach: *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico* (1888), Boringhieri, Torino, 1964.

⁹ G.B. Schmid: "An up-to-date approach to physics", *Am. J. Phys.*, 52 (9) 1984, 794-799.

che non fa altro che riscoprire l'importanza della meccanica basata sulla quantità di moto.

L'approccio di Schmid appare più nuovo di quanto lo sia effettivamente perché è poco noto che la storia della meccanica ha almeno tre distinte linee di sviluppo e la linea di sviluppo della meccanica dell'urto è poco nota.

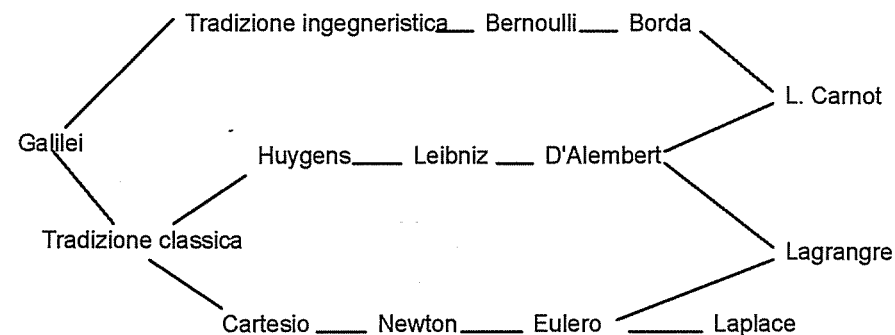


Fig. 1 - Le diverse linee di sviluppo della teoria meccanica.

Essa è ancora più radicale di Schmid, perché coinvolge anche il tipo di matematica, che diventa discreta (e solo al limite, continua): questa meccanica di Leibniz e di D'Alembert¹⁰ pone alla base della teoria il fenomeno dell'urto e ricava tutti gli altri fenomeni come causati da al più una serie di urti.

Tenendo presente la varietà delle diverse formulazioni (che ad es. sono circa dieci, sia in meccanica classica¹¹ che in meccanica quantistica¹²) si possono vedere aspetti concettuali e teorici che sono invisibili restando dentro la solita formulazione. Già in precedenza abbiamo notato la forte variabilità delle formulazioni di una teoria fisica a livello concettuale; in più, notando le somiglianze e le differenze essenziali tra le varie formulazioni, si possono studiare i fondamenti della fisica teorica.

Infatti consideriamo due formulazioni diverse di una stessa teoria, ad es. la meccanica; allora notiamo una radicale diversità nella organizzazione della teoria; o la tradizionale organizzazione in cui tutte le leggi discendono da pochi principi posti per primi (OA; come ad es. nella meccanica newtoniana, oltre che nella geometria euclidea); o quella che cerca un nuovo metodo per risolvere un

¹⁰ A. Drago: *La riforma della dinamica secondo G.W. Leibniz*, Hevelius, Benevento, 2003.

¹¹ D.F. Styer et alii: "Appendix" in "Nine formulations of quantum mechanics", *Am. J. Phys.*, 70 (3) 2003, 288-297, 296-297; A. Drago: "A new appraisal of old formulations of mechanics", *Am. J. Phys.*, 72 (3) (2004), 407-9.

¹² D.F. Styer: "Nine...", op. cit.

problema fondamentale (OP; ad es. la meccanica basata sul principio dei lavori virtuali, che vuole risolvere il problema del moto del sistema soggetto a vincoli: è la lagrangiana o l'hamiltoniana; guardando altre teorie fisiche: la termodinamica di S. Carnot, la quale ha il problema della massima efficienza nelle trasformazioni termiche; e la chimica classica, che cerca un nuovo metodo per trovare quali e quanti siano gli elementi costitutivi della materia).

Inoltre dobbiamo aggiungere la ben nota variabilità della loro matematica (si ricordino ad es. i casi della formulazione newtoniana e delle formulazioni variazionali); diversità matematica che finora è stata frettolosamente spiegata (anche dal grande epistemologo E. Mach!) con la sola maggiore o minore facilità nel risolvere i problemi fisici. Quando questa differenza di matematica è massima?

Consideriamo la termodinamica, che fu la prima teoria costruita al di fuori del paradigma newtoniano. La sua matematica usa solo le funzioni elementari, e quindi solo l'infinito potenziale (IP; come l'infinito del contare gli interi, allora l'infinito è sempre avvicinabile, ma non raggiungibile; ovvero, non c'è mai l'ultimo numero; questa è la matematica costruttiva¹³), mentre quella della meccanica di Newton usa liberamente gli infinitesimi, e quindi l'infinito in atto (IA; come quando i punti all'infinito sono attribuiti ad una retta come se fossero come tutti gli altri punti; o quando, per definire i reali, si dice di pensare tutti i numeri con infinite cifre).

Questa analisi comparativa allora suggerisce come *fondamenti di ogni formulazione, e quindi della fisica, due opzioni*.¹⁴ Esse sono:

- 1) l'opzione sul tipo di matematica;
- 2) l'opzione sul tipo di organizzazione.

Ogni coppia di scelte sulle due opzioni fonda un particolare modello di teoria scientifica (MTS). D'altra parte, ogni opzione dà due scelte opposte; quindi si può sostenere che due formulazioni di una stessa teoria, le quali hanno le scelte opposte sono *incommensurabili*. Come conseguenza e come evidenza della incommensurabilità di due paradigmi fisici differenti Feyerabend e Kuhn hanno suggerito che *nel passare da una formulazione ad un'altra di diverso MTS, i concetti variano radicalmente di significato*.¹⁵

Questo fenomeno concettuale può allora spiegare l'origine delle scoperte del KPK: le più importanti variazioni radicali di significato dei concetti fisici avvengono nel passare da una formulazione ad un'altra con diverso MTS.

¹³ E. Bishop: *Foundations of Constructive Mathematics*, Mc Graw-Hill. New York, 1967. Una introduzione elementare è in A. Drago e P. De Martino: "Introduzione alla matematica costruttiva", *Rend. Accad. Sci. Fis. Mat. Napoli (4)* 69 (2002), 37-49.

¹⁴ A. Drago: *Le due opzioni*, La Meridiana, Molfetta BA, 1991.

¹⁵ P.K. Feyerabend: *Contro il Metodo*, Lampugnani, 1972; T.S. Kuhn: op. cit.

5. La formula fondamentale della didattica della fisica.

Questa concezione dei fondamenti delle teorie fisiche ha avuto due importanti verifiche:

- 1) è stato possibile ricostruire la storia della fisica dal tempo di Galilei alla nascita della meccanica quantistica¹⁶; col risultato di un quadro storico molto più articolato e più profondo di quello della usuale storia unilineare;
- 2) la *didattica della fisica* (e anche della chimica), nello sforzo di insegnare tutta la fisica, e quindi anche i suoi fondamenti, ha scelto *quattro teorie*, che sono proprio quelle più rappresentative delle quattro coppie di scelte sulle due opzioni.¹⁷

Infatti nel caso della didattica nelle scuole superiori, gli insegnanti hanno organizzato tutto l'insegnamento attorno alle seguenti quattro teorie, le quali sono rappresentative proprio dei quattro MTS:

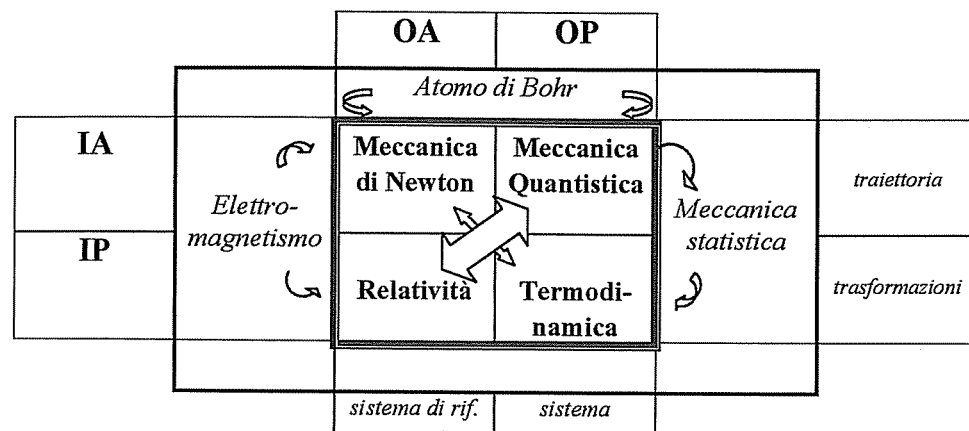
	OA	OP	
IA	Meccanica di Newton	Elettricità e Magnetismo	traiettoria, linea di forza
IP	Ottica geometrica	Termodinamica	distanze, processi
	spaz. assoluto, sistema di rif.	campo, sistema	

Tab 4 - Le quattro teorie fisiche della didattica scolastica della fisica

Nel caso della didattica universitaria della fisica, i fisici l'hanno organizzata sulle altre quattro teorie, che anche esse sono rappresentative proprio dei quattro MTS:

¹⁶ A. Drago: "Lo sviluppo storico della meccanica quantistica visto attraverso i concetti fondamentali della fisica", *Giornale di Fisica*, 43 (2002) 143-167; "Which kind of mathematics for quantum mechanics? The relevance of H. Weyl's program of research", in A. Garola, A. Rossi (eds.): *Foundations of Quantum Mechanics. Historical Analysis and Open Questions*, World Scientific, Singapore, 2000, 167-193.

¹⁷ A. Drago: "Lo schema paradigmatico della didattica della Fisica: la ricerca di un'unità tra quattro teorie", *Giornale di Fisica*, 45 n. 3 (2004) 173-191. C. Bauer e A. Drago: "Didattica della chimica e fondamenti della scienza", *Atti XI Conv. Naz. Storia e Fondamenti della Chimica, Acc. Naz. Sci. XL*, 123, vol. 29 (2005), 353-364.



Tab 5 - Le quattro teorie dell'insegnamento universitario della fisica

Anche la didattica universitaria della chimica ripete questo schema di quattro teorie, di fatto rappresentative dei quattro MTS.

	Infinito in atto	Infinito potenziale	
Organizzazione assiomatica	CHIMICA QUANTISTICA	CHIMICA FISICA	Stato, Entropia
Organizzazione su un problema	CINETICA CHIMICA	CHIMICA CLASSICA	Reazione chimica
	Tempo continuo, Elettrone	Tempo prima/dopo, Equilibrio	

Tab 6 - La didattica universitaria della chimica

Quindi è un merito dei fisici (e dei chimici) didattici di *avere individuato, attraverso un enorme lavoro inconscio, quattro teorie effettivamente rappresentative dei fondamenti della fisica*. In precedenza gli studiosi della storia della didattica della fisica (e della chimica) avevano ignorato questo aspetto; in realtà esso ora appare l'aspetto più profondo e più gratificante della didattica della fisica.

Ma questo merito è sminuito dall'aver aggiunto *una preconcezione filosofica di tipo henologico*:¹⁸ *tutta la fisica dovrebbe tendere all'unità di una sola teoria*. Questa unità non si è mai realizzata (salvo il primo secolo dalla nascita della meccanica di Newton, quando essa era riuscita ad includere ogni altra teoria fisica allora esistente; ma questo periodo si è chiuso con la nascita delle nuove teo-

¹⁸ G. Reale: *Storia della filosofia greca e romana*, vol. 9, Bompiani, Milano, 2004, pp. 46-69.

rie della meccanica, poi con termodinamica e l'elettromagnetismo), né si prevede che l'unità si realizzerà in tempi ragionevoli. Questa pretesa, benché non realizzata, ha comunque assegnato una posizione falsamente superiore all'unica teoria che potesse aspirare a quel ruolo, la meccanica newtoniana; e recentemente ha impedito che la didattica, che aveva già trovato quattro teorie maggiormente rappresentative, capisse la origine delle divisioni nelle due opzioni e nei quattro MTS, come pure le incommensurabilità (nelle tabelle 4, 5 e 6, quelle principali sono segnate con frecce di opposizione).

6. L'esperienza del-KPK alla luce delle due opzioni fondamentali

Teniamo conto che, alla luce delle due opzioni nella fisica classica, nella storia della fisica e quindi nella nostra tradizione culturale c'è una contrapposizione soprattutto di due MTS, quello newtoniano e quello carnotiano, in particolare alla teoria termodinamica. La tavola seguente ne dà le principali caratteristiche.

Alcuni secoli	Un secolo	Una generazione
Scienza effettiva (così come i geni scientifici la determinano mediante le due opzioni)	Scienza soggettiva (così come gli scienziati la pensano mediante concetti surrogatori)	Scienza oggettiva (così come la si insegna, mediante tecniche e concetti oggettivi)
MTS NEWTONIANO (OA + IA)	In sintesi: 'Dissoluzione del Cosmo finito e geometrizzazione dello spazio'	Logica classica Metodo analitico Analisi infinitesimale (es.: equazione differenziale del 2° ordine)
MTS CARNOTIANO (OP + IP)	In sintesi: 'Evanescenza della forza-causa e discretizzazione della materia'	Logica non classica Metodo sintetico Simmetrie (o ciclo, es. quello di S. Carnot in termodinamica)

Legenda: MTS = Modello di Teoria Scientifica; OA = Organizzazione Aristotelica; OP = Organizzazione Problematica; IA = Infinito Attuale; IP = Infinito Potenziale.

Tab 7 - I due modelli principali di una teoria scientifica

Alla luce di questo quadro semplificato di due soli MTS, rivisitiamo la esperienza e il programma del KPK. Notiamo una prima caratterizzazione del KPK, suggerita da un suo esponente. Il KPK pone alla base di tutta la fisica i

"concetti di energia, quantità di moto, momento angolare, carica elettrica e numero di particelle. [Questi concetti] sono più simili alle quantità estensive della termodinamica che ai concetti fondamentali newtoniani, quale il punto massa individuale e le quantità che descrivono la sua traiettoria."¹⁹

¹⁹ G.B. Schmid: "An up-to-date...", op. cit., p. 794, I.

Quindi il KPK è “basato sulla stessa classe di quantità che appartengono alle quantità primarie della meccanica quantistica come alle quantità estensive della termodinamica.”²⁰

Cioè il KPK privilegia le grandezze estensive su quelle intensive, in particolare la energia e l'entropia, le quali sono tipiche della termodinamica (si ricordi che la meccanica ha incluso la conservazione dell'energia solo dopo la nascita della termodinamica, nel 1850). Questo fatto ci indirizza ad indagare più approfonditamente questa scelta di base a favore della termodinamica.

Da un punto di vista matematico le grandezze estensive corrispondono alle funzioni additive (le funzioni di Eulero di grado 1); le quali sono le funzioni massimamente elementari, chiaramente incluse dalla matematica che usa solo l'IP, cioè la matematica costruttiva.

Inoltre il KPK “cosifica” alcune grandezze fisiche; cioè di fronte ad una classe di fenomeni nuovi si pone il problema filosoficamente elementare, ma basilare: “Che cosa è?”; cioè qual è quella “cosa” che, dal punto di vista concettuale, interpreta coerentemente tutti i fenomeni studiati? In definitiva il KPK riconosce un problema teorico basilare alla teoria fisica. Per cui, la organizzazione della sua concezione teorica è OP.

Dal punto di vista didattico, questa sua scelta basilare risponde concretamente alla annosa domanda: “Insegnare per principi o insegnare per problemi?” (In effetti questa domanda non è precisa, perché più che a tanti problemi, la didattica dovrebbe riferirsi ad un problema universale, come è appunto quello di “cosificare” o no le grandezze fisiche). Con il KPK la didattica della fisica per la prima volta privilegia la OP; e quindi tende a proporre formulazioni OP delle teorie fisiche.

In totale, il KPK rappresenta una maniera soggettiva (poiché essa si esprime soprattutto con i concetti fisici) di scegliere IP e OP. Queste due scelte fondamentali sono le stesse della termodinamica (di S. Carnot, MTS carnottiano), contro la meccanica newtoniana, la quale, per i motivi detti prima, ha le scelte opposte (IA e OA). Con ciò viene spiegata la meraviglia che prova un lettore del progetto KPK: dopo tanti anni di didattica (anche universitaria) di tipo henologico, che, volendo unificare comunque, prende la meccanica newtoniana come fulcro e come riferimento principale, egli scopre una concezione essenzialmente nuova della fisica, perché legata ad un MTS che è incommensurabile con quello della teoria newtoniana, e del quale, fino ad allora, aveva avuto solo delle percezioni vaghe attraverso la didattica usuale della termodinamica e dell'elettromagnetismo fenomenologico.

²⁰ Idem: p. 794, II.

7. Suggestimenti per una rifondazione del programma del KPK

Viceversa, una volta riconosciuto che il KPK è legato al MTS carnottiano, allora nasce il problema di riformulare ogni scoperta del KPK coerentemente secondo questo MTS. Facciamolo prima dal punto di vista soggettivo dei concetti.

A. Koyré ha dato un contributo fondamentale alla caratterizzazione della nascita della scienza moderna, sintetizzandone le caratteristiche fondamentali con due espressioni:²¹

“Geometrizzazione dello spazio e dissoluzione del Cosmo finito”. (1)

Ho dimostrato che queste espressioni in realtà traducono in concetti, anche storici, rispettivamente le due scelte newtoniane IA e OA e (i rifiuti del)le scelte alternative IP e OP, viste come arretrate e ormai superate dalla novità della scienza moderna. Quindi le espressioni di Koyré in realtà rappresentano i fondamenti del MTS newtoniano.

Consideriamo ora le teorie del MTS alternativo; ad es., la meccanica di L. Carnot, la chimica classica, la termodinamica di S. Carnot. Mediante una traduzione, del tutto analoga a quella di Koyré, delle scelte alternative del MTS carnottiano si possono trovare due analoghe espressioni:

“Discretizzazione della materia ed evanescenza della forza-causa” (2)

Esse interpretano molto bene la storia e i fondamenti della chimica classica, e abbastanza bene la meccanica di L. Carnot, la termodinamica di S. Carnot e l'elettromagnetismo di Faraday.²²

Il KPK, che abbiamo visto riferirsi di fatto al MTS carnottiano, dovrebbe riferirsi alle (2). Ma, esaminando la sua proposta si nota che essa suggerisce di tradurre le scelte alternative IP e OP in un modo un po' diverso. Vale sempre la seconda parte delle (2), perché di sicuro il KPK bandisce la forza-causa, anche nella sua nuova formulazione della meccanica; ma cambia la prima parte delle (2), perché ora la matematica è legata alle funzioni estensive. Allora, la caratterizzazione soggettiva del KPK può essere data dalle due espressioni:

“Estensivizzazione delle cose fisiche ed evanescenza della forza-causa”. (3)

Nella prima parte delle (3): la prima parola indica il tipo di rapporto matematica-fisica che si va a stabilire; mentre le ultime due parole indicano l'inquadramento della realtà da parte della fisica teorica.

Paragonando le (3) con le (2) si ha:

²¹ A. Koyré: *Dal mondo chiuso all'Universo infinito*, Feltrinelli, Milano, 1970.

²² A. Drago: “Interpretazione delle frasi caratteristiche di Koyré e loro estensione alla storia della fisica dell'ottocento”, in C. Vinti (ed.): *Alexander Koyré. L'avventura intellettuale*, ESI, Napoli, 1994, 657-691; “The several categories suggested for the “new historiography of science”: An interpretative analysis from a foundational viewpoint”, *Epistemologia*, 24 (2001) 48-82.

1) nelle (3) la matematica (la “estensivizzazione”) è più ridotta che nelle (2) (la “discretizzazione” indica il principio dell’IP); inoltre la concezione della realtà, indicata con “cose”, è più generica;

2) nella storia della fisica, le (3) ci riportano al tempo in cui si ipotizzavano i fluidi per spiegare le dinamiche, cioè all’idrodinamica, al flogisto e al calorico.

Quindi le (3) hanno una portata minore delle (2). Anche nella storia della fisica, mentre le (2) ricostruiscono anche la storia della meccanica quantistica e della relatività,²³ le (3) recuperano il quadro concettuale della termodinamica, pur di chiamare entropia il calorico, e la storia dell’elettricità,²⁴ ma poi la restrizione alle funzioni solo estensive non permette di concepire più che qualche grandezza o qualche formula della meccanica quantistica e della relatività ristretta ($E=mc^2$). Quindi il KPK avrebbe vantaggio a concepire il suo programma secondo le (2).

Nel quadro della evoluzione storica della fisica, il KPK può essere considerata come il recupero del ramo alternativo al MTS newtoniano, quello della meccanica basata sull’urto di Leibniz e di D’Alembert. Ma in realtà il KPK non ha voluto rompere con la tradizionale matematica newtoniana e si è presentata come una formulazione della meccanica basata sulla matematica solo del continuo. Se questa considerazione è valida, la KPK avrebbe da guadagnare ad associarsi alla meccanica di Leibniz-L. Carnot, in modo da riconoscersi nella polarità opposta a quella della meccanica newtoniana e così chiarire la propria concezione su una precisa alternativa concettuale, teorica e filosofica. In particolare, la sua proposta di chiamare con *Huy* una unità di misura dovrebbe cambiare nome in *Lei*, perché Leibniz per primo ha scritto bene le leggi dell’urto elastico, aggiungendo anche la relatività del moto.

Nel quadro della storia più specifica delle teorie fisiche complete, la polarità opposta a quella di Newton è rappresentata dalla meccanica di L. Carnot;²⁵ la quale usa appunto la quantità di moto come grandezza fisica fondamentale, proprio come fa il KPK. Questa meccanica sarebbe allora la teoria di riferimento.

Questo accostamento sarebbe molto utile per il programma KPK; esso potrebbe utilizzare lo sviluppo teorico della meccanica della linea di Leibniz, per riconoscere la necessità di aggiungere tre avanzamenti principali:

²³ A. Drago: “Alle origini della meccanica quantistica: le sue opzioni fondamentali”, in G. Cattaneo, A. Rossi (eds.): *I fondamenti della meccanica quantistica. Analisi storica e problemi aperti*, Editel, Cosenza, 1991, 59-79.

²⁴ G. Falk: “Entropy, a resurrection of calorific. A look at the history of thermodynamics”, *Eur. J. Phys.*, 6 (1985) 108115; H.U. Fuchs: op. cit.

²⁵ L. Carnot: *Essai sur les machines en général*, Defay, Dijon, 1783, *Principes fondamentaux de l’équilibre et du mouvement*, Crapelet, Paris, 1803 (tr. It. *Saggio sulle macchine*, CUEN, Napoli, 1994).

1) il calcolo vettoriale (anticipato da Euler e da L. Carnot)

2) il principio metodologico, quindi tipico di una OP, dei lavori virtuali; che L. Carnot esprime con i moti geometrici e con le simmetrie, ottenute algebricamente.

3) il facile collegamento che questa teoria ha con la relatività.²⁶

Comunque, passiamo a considerare il KPK più in generale, quando va a riformulare una teoria. Il KPK, per seguire rigorosamente l’OP, dovrebbe;

1) specializzare il problema generico “Che cosa è?” in un problema specifico per la teoria considerata;

2) ragionare a partire da principi metodologici, espressi con frasi doppiamente negate, che portano ad argomentazioni per assurdo.²⁷ Il KPK si è avvicinato a questi primi due punti quando Schmid ha chiarito il suo problema fondamentale: una “cosa fisica non necessariamente è conservata. Ma il converso del negato [doppia negazione!] è sempre vera: ogni grandezza conservata localmente è una cosa fisica.”²⁸ Si noti che la seconda frase, anche perché è chiaramente meno generale della prima, andrebbe posta come caso particolare della prima; la quale, secondo una ricostruzione in OP, sarebbe da porre come principio metodologico con una frase doppiamente negata: “Non è vero che una cosa fisica non sia conservata”. Questa frase poi dovrebbe essere specificata per ciascuna teoria fisica.

3) Alla fine di una teoria OP, il KPK dovrebbe qualificare il rapporto fisica-matematica, eventualmente più ampio di quello delle funzioni estensive, ma senza superare l’IP della matematica costruttiva.

²⁶ Come dalla meccanica di L. Carnot si possa giungere facilmente alla relatività ristretta è mostrato dal mio scritto: “Minkowsky, Poincaré, Lobacevskij: la via geometrica alla relatività ristretta”, in P. Tucci (ed.): *Atti XVIII Congr. Naz. Storia Fis. E Astr.*, Dip. Fis. Generale e Appl., Univ. Milano, Milano, 1998, 151-170; e da F. Scarpa: “Lazare Carnot e la Relatività ristretta”, *Il Giornale di Fisica*, 43 (2002) 205-212. Il KPK attuale sceglie un approccio che è una semplificazione didattica di quello di Davidon citato nel primo dei due articoli.

²⁷ A. Drago e A. Perno: “La teoria geometrica delle parallele impostata coerentemente su un problema (I)”, *Per. Matem.*, ser. VIII, 4, ott.-dic. 2004, 41-52.

²⁸ G.B. Schmid: “An up-to-date...”, op. cit., p. 795, I.

TEACHING MECHANICS IN THE KPK
INSEGNARE MECCANICA SECONDO IL KPK

HOLGER HAUPTMANN
Europa-Ginnasium, Wörth am Rhein

a. Starting with momentum
a. La quantità di moto sin dall'inizio

Momentum is the main character of mechanics.

Mechanics is the science of momentum and momentum-currents.

La quantità di moto è la protagonista della meccanica.

La meccanica è la scienza della quantità di moto e delle correnti di quantità di moto

b. Force and momentum-current
b. La forza come corrente della quantità di moto

Newton: a force changes the movement of a body
una forza cambia il movimento di un corpo

Planck 1908: force = momentum-current
(the momentum of a body changes because of a momentum current in or out of the body)

La quantità di moto di un corpo cambia a causa di una corrente di quantità di moto dentro o fuori dal corpo

c. Introduction of momentum
c. Introduzione della quantità di moto

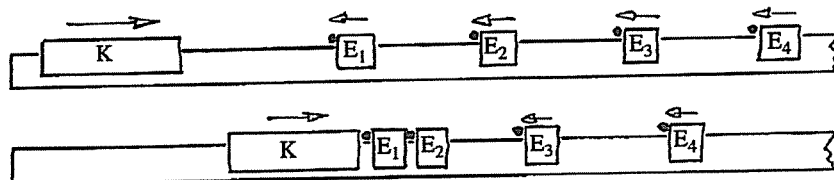
p is not defined via $m \cdot v$
 p non è definito attraverso $m \cdot v$

$$p = m \cdot v \leftrightarrow Q = C \cdot U \quad \begin{array}{l} \text{(analog equations)} \\ \text{(equazioni analoghe)} \end{array}$$

electromagnetic field: $p \neq m \cdot v$
 campo elettromagnetico: $\rho_p = \frac{\vec{E} \times \vec{H}}{c^2}$

d. Measurement of momentum
d. La misurazione della quantità di moto

possible without the use of $p = m \cdot v$
 possibile senza usare $p = m \cdot v$



Each E_i carries *one unit* of momentum
 Ciascuna E_i trasporta *una unità* di quantità di moto

Momentum and momentum-flows
Quantità di moto e correnti di
quantità di moto

1. Physical quantities
1. Grandezze fisiche

2. Momentum and velocity
2. Quantità di moto e velocità

A body in motion contains momentum. If it is moving quickly or is heavy, it has a lot of momentum. When it is not in motion, it contains no momentum.

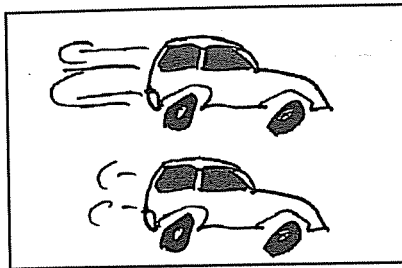
Un corpo in movimento contiene quantità di moto. Se si muove rapidamente ed è massiccio, contiene molta quantità di moto. Se non si muove, non contiene quantità di moto.

unit of momentum: Huygens (Hy)

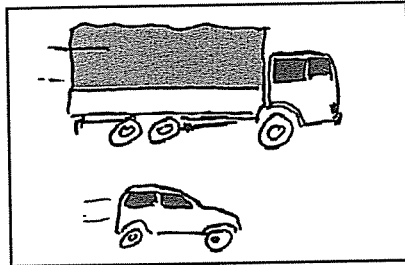
A body with a mass of 1 kg and a speed of 1 m/s contains 1 Hy.

unità di misura: Huygens (Hy)

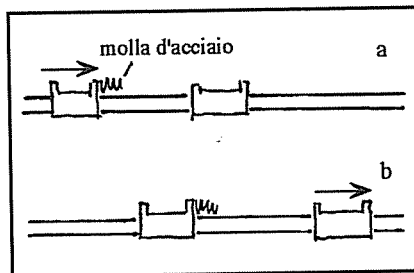
Un corpo con la massa di 1 kg e la velocità di 1 m/s contiene 1 Hy.



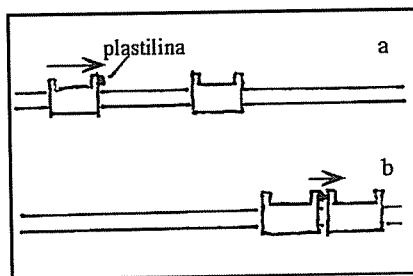
The greater the velocity of a body, the more momentum it contains.
 Più la velocità di un corpo è elevata, più quantità di moto contiene.



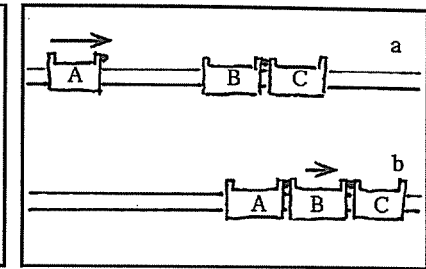
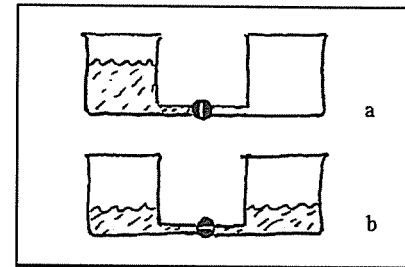
The greater the mass of a body, the more momentum it contains.
 Più la massa di un corpo è grande, più quantità di moto contiene.



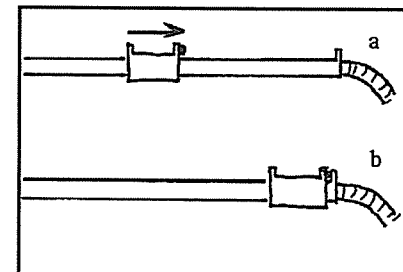
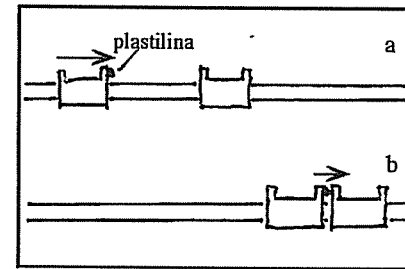
Momentum can go from one body to another.
 La quantità di moto può passare da un corpo ad un altro.



Momentum can be distributed over several bodies.
 La quantità di moto si può distribuire su più corpi.

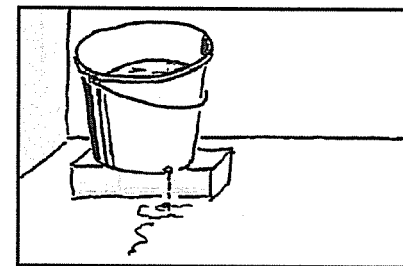


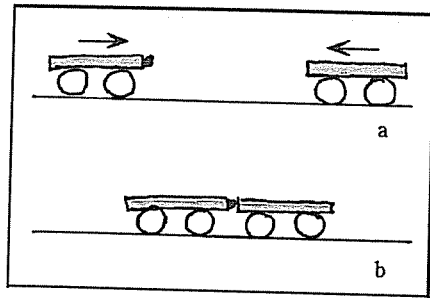
Momentum can be distributed over several bodies.
 La quantità di moto si può distribuire su più corpi.



If a vehicle has bad bearings so that it comes to a stop by itself, its momentum is flowing into the Earth.

Se un veicolo si muove con attrito in modo da fermarsi spontaneamente, la sua quantità di moto defluisce a terra.





Momentum can take positive and negative values.
La quantità di moto può assumere valori positivi e negativi.

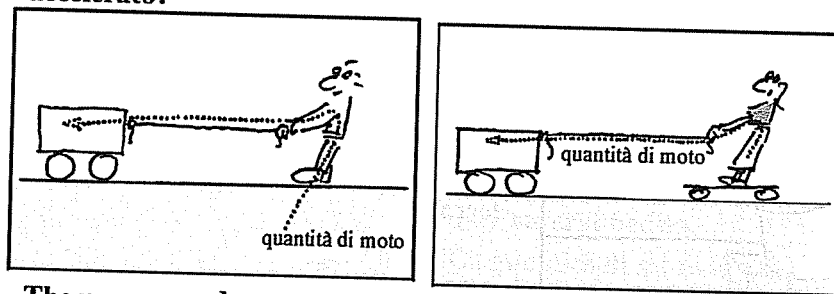
The momentum of a body is positive when the body moves to the right and negative when it moves to the left.

La quantità di moto di un corpo è positiva se il corpo si muove verso destra, negativa se si muove verso sinistra.

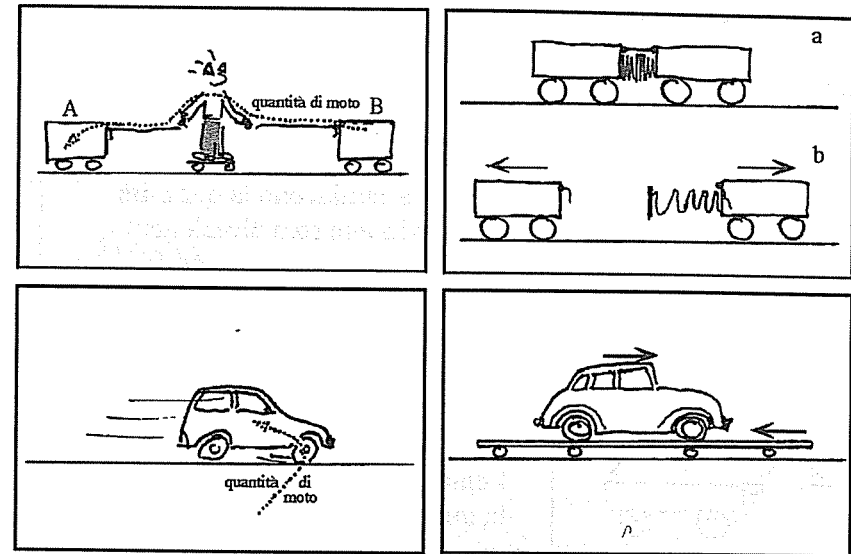
3. Momentum pumps

3. Pompe di quantità di moto

Where does the vehicle get its momentum from when it speeds up?
Da dove riceve la sua quantità di moto un veicolo che viene accelerato?

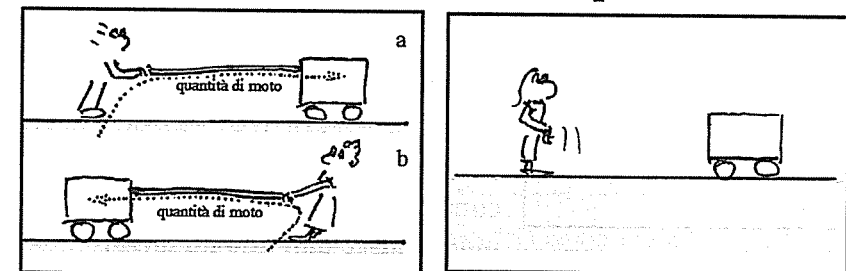


The person sends momentum through the rope from right to left.
La persona trasmette quantità di moto da destra a sinistra attraverso la corda.



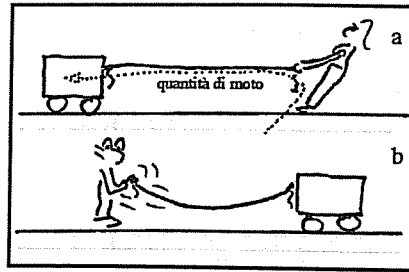
4. Momentum conductors and insulators

4. Conduttori e non conduttori di quantità di moto



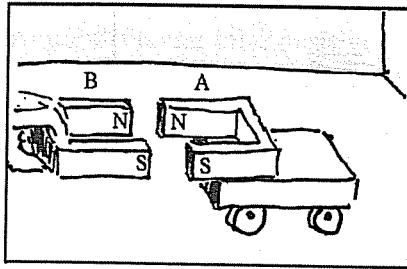
Solid materials conduct momentum.
I materiali rigidi conducono la quantità di moto.

Air does not conduct momentum.
L'aria non conduce la quantità di moto.



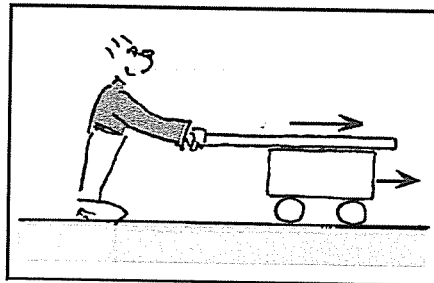
Ropes conduct momentum in only one direction.

Le corde conducono la quantità di moto in una sola direzione.



Magnetic fields conduct momentum.

I campi magnetici conducono la quantità di moto.



If two objects rub against each other, momentum flows from one to the other: The stronger the friction, the stronger the flow.

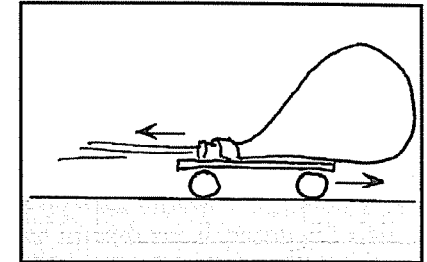
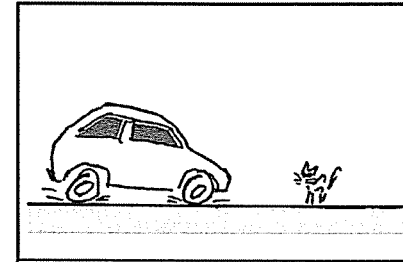
Sfregando due oggetti l'uno contro l'altro, della quantità di moto fluisce dall'uno all'altro: più l'attrito è grande, più ne fluisce.

Wheels help to insulate momentum.

Le ruote fungono da isolatori di quantità di moto.

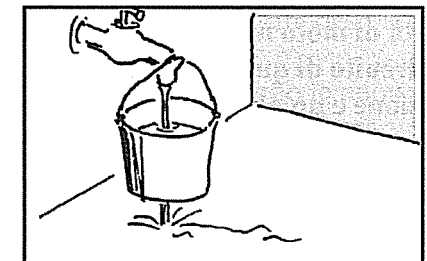
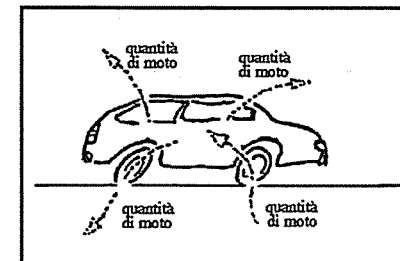
5. Drives and brakes

5. Propulsori e freni



6. Steady state

6. Equilibrio dinamico

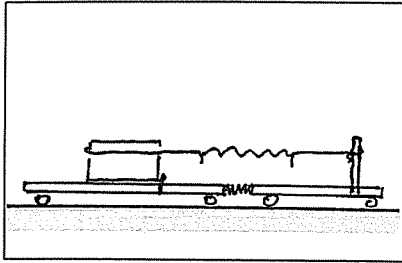


Steady state: The outflow is adjusted to equal the inflow.

Equilibrio dinamico: la corrente di deflusso si stabilizza ad un valore equivalente a quello della corrente di afflusso.

9. Momentum current circuits

9. Circuiti di quantità di moto



Momentum can flow in a closed circuit. Momentum therefore never increases or decreases. A part of every momentum circuit is under compressive stress and the other part is under tensile stress.

La quantità di moto può fluire in un circuito chiuso. In quel caso la quantità di moto non aumenta né diminuisce in nessun punto. In ogni circuito di quantità di moto, c'è una parte sottoposta a compressione e un'altra sottoposta a trazione.

MASSA, INERZIA ED ENERGIA: RIFLESSIONI INTORNO A DUE APPROCCI DIDATTICI ALLA DINAMICA RELATIVISTICA

MICHELE D'ANNA
Alta Scuola Pedagogica Locarno (Svizzera)

In questo intervento intendo proporre alcuni elementi per un confronto tra l'approccio tradizionale, che segue essenzialmente quello "storico" e l'approccio adottato dal *Karlsruher Physikkurs* per introdurre il passaggio dalla meccanica newtoniana a quella relativistica. In sintesi, dal punto di vista didattico, si potrebbe riassumere la questione nella seguente domanda: la relazione $E = m c^2$ è maggiormente utile come punto di arrivo o come punto di partenza?

1. L'approccio tradizionale

L'approccio tradizionale alla teoria della relatività ristretta, seguendo lo sviluppo storico, è caratterizzato da due momenti complementari:

- l'estensione del principio di relatività ai fenomeni elettromagnetici;
- l'introduzione del postulato dell'invarianza della velocità della luce.

Attraverso lo sviluppo degli aspetti cinematici emergono le nuove trasformazioni delle coordinate (trasformazioni di Lorentz) e la struttura dello spaziotempo quadridimensionale con le sue particolarità (dilatazione dei tempi, contrazione delle lunghezze, relatività della simultaneità, ecc.). Gli aspetti dinamici sono poi affrontati cercando di generalizzare o di ridefinire le grandezze "classiche" come forza, massa, quantità di moto, energia cinetica. Sia per gli aspetti cinematici che per quelli dinamici, la struttura dell'approccio porta alla "scoperta" di invarianti e ad una rilettura delle leggi di conservazione classiche. L'esplicitazione della relazione " $E = m c^2$ " può allora avere luogo, non senza una particolare cura sia nella sua "lettura" che nella sua "scrittura" [1].

Quantità di moto	$p = \gamma \cdot m \cdot v$
Energia totale	$E = \gamma \cdot m \cdot c^2$
Relazione tra massa, energia e quantità di moto	$E^2 - c^2 \cdot p^2 = m^2 \cdot c^4$
Relazione tra massa ed energia a riposo	$E_0 = m \cdot c^2$

Tab 1 - Per una particella di massa m , il formalismo tipico può essere sintetizzato con le relazioni riportate nella tabella. Da notare che in questo contesto il simbolo "m" è riservato per designare l'invariante relativistico.

Per la descrizione “dinamica” del moto occorre ancora esplicitare il collegamento tra la “forza” agente e l’effetto che essa produce sulla quantità di moto della particella; solitamente si pone:

$$F = \frac{d(\gamma \cdot m \cdot v)}{dt} = \frac{dp}{dt}$$

Con una tale “definizione”, tra energia trasferita per unità di tempo, variazione della quantità di moto e velocità istantanea vale ancora (formalmente) la medesima relazione conosciuta in meccanica classica:

$$\frac{dE}{dt} = v \cdot \frac{dp}{dt}$$

2. Alcune considerazioni

Come indicato da *Okun* [1] e da molti altri autori, nel corso del tempo sono apparse, sono state utilizzate e si sono radicate diverse varianti per esprimere le nuove leggi del moto e in particolare per esprimere le nuove relazioni tra massa ed energia, impiegando termini e simboli come massa, massa a riposo (m_0), massa relativistica ($m(v)$) a seconda del contesto e/o del desiderio di accentuare questo o quell’aspetto. C’è chi ritiene che tutte le scelte siano autorizzate, purché vengano mantenute con coerenza; altri invece compiono una scelta più drastica. Ma la stessa evoluzione del principio di equivalenza nella mente di *Einstein*, progressiva, lenta, variegata e ricca di implicazioni, mostra forse la necessità di una riflessione supplementare: se infatti alcuni aspetti (come la relazione tra energia e inerzia meccanica) sono stati messi in luce già a partire dal 1905, quindi grosso modo nell’ambito di quella che oggi chiamiamo la relatività ristretta, altri travalicano il contesto iniziale e hanno trovato una loro piena collocazione solo dopo una decina d’anni nella teoria della relatività generale. In merito ecco alcune parole scritte da *Einstein* già nel 1907 [2]:

Questo risultato è di un’importanza teorica straordinaria, poiché secondo di esso la massa inerziale e l’energia di un sistema fisico compaiono come oggetti della stessa natura¹.

¹ Ecco le parole originali di *Einstein*: *Dieses Resultat ist von aussergewöhnlicher theoretischer Wichtigkeit, weil in demselben die träge Masse und die Energie eines physikalischen Systems als gleichartige Dinge auftreten.*

Qualche anno più tardi lo stesso *Einstein* così commenterà la sua intuizione [3]:

La fisica classica aveva introdotto due sostanze: materia ed energia, la prima dotata di peso, la seconda imponderabile. In fisica classica si avevano perciò due leggi di conservazione, l’una per la materia, l’altra per l’energia. Abbiamo già avuto occasione di chiederci se la fisica moderna condivide le stesse idee in merito alle due sostanze ed alle due leggi di conservazione. La risposta fu ed è decisamente: no! Secondo la teoria della relatività non c’è differenza essenziale fra massa ed energia. L’energia possiede massa e la massa possiede energia. In luogo di due leggi di conservazione ne abbiamo una sola: la legge di conservazione della massa-energia.

La questione è poi complicata dal fatto che generalmente si vuole anche mostrare come le relazioni relativistiche permettano di ritrovare quelle classiche nel limite delle basse velocità: la scelta allora, in modo apparentemente ragionevole, cadrà su quel tipo di notazione che favorisce un tale riconoscimento (formale) il più diretto possibile.

Ma forse proprio qui sta l’aspetto cruciale: non è detto che dal punto di vista cognitivo questo criterio di economicità sia giustificato! Infatti, come ha ben evidenziato *J. M. Lévy-Leblond* [4], [5]:

*$E = M c^2$, come qualunque altra formula, non ha alcun senso presa isolatamente; essa appartiene ad un insieme di relazioni strutturali tra i diversi concetti fisici, e assume il suo pieno significato solo nell’ambito della teoria a cui appartiene - nella fattispecie la teoria della relatività einsteiniana. La difficoltà nel caso specifico è la seguente: le grandezze che chiama in causa la formula (E , M , c) sono grandezze dai nomi antichi e comuni - l’energia, la massa e la velocità. Ora, precisamente, tutta la rivoluzione iniziata da *Einstein* mostra che questi concetti devono essere presi in un senso diverso da quello iniziale (Vedi Fig. 1).*

Da una parte esiste ormai uno zero assoluto di energia. L’energia interna di un corpo (indipendentemente dall’energia cinetica che può acquistare se lo si mette in moto), il suo contenuto energetico totale, è fissata in modo assoluto; è una quantità proporzionale alla massa del corpo. La massa è ora una misura non solo della quantità di materia in senso classico, ma anche del contenuto energetico intrinseco di quella materia. È il primo significato della formula $E = M c^2$. (...) D’altra parte, l’inerzia non è più identica alla massa. La resistenza alla modificazione dello stato di movimento di un corpo non è più costante, ma dipende dalla sua velocità. Tutta la teoria einsteiniana è legata

in modo indissolubile all'idea che esiste una velocità limite, la c della famosa formula. Se è impossibile accelerare un corpo fino alla velocità limite c - e ancor più impossibile superarla - è perché esso oppone una resistenza sempre maggiore alla trasformazione del suo stato di moto. (...) Così, nella teoria einsteiniana l'inerzia non si identifica più con la massa, ma con l'energia. Ed è il secondo significato della formula $E=Mc^2$.

(J.M. Lévy-Leblond, *La pietra di paragone - la scienza alla prova*, p. 261-271)

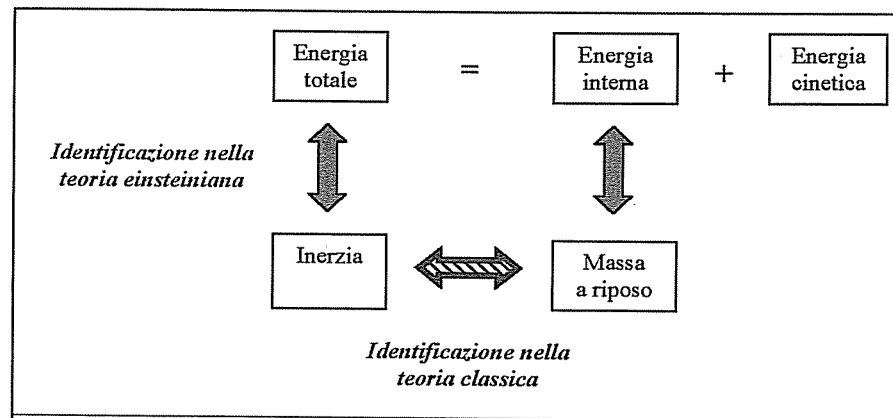


Fig. 1 - La sottolineatura di J-M. Lévy-Leblond: nell'interpretazione della grandezza fisica "massa", vi è una insanabile frattura concettuale quando si passa dalla meccanica newtoniana alla meccanica einsteiniana [4], [5].

3. L'approccio del *Karlsruher Physikkurs*

La proposta del *Karlsruher Physikkurs* (KPK) pone da subito al centro l'identificazione dei concetti di massa e di energia; la struttura concettuale di questo approccio può infatti essere così riassunta:

- estensione del principio di relatività a tutti fenomeni fisici;
- postulato di identità tra massa ed energia.

Questa scelta si inserisce in modo "naturale" nell'impostazione generale del KPK [6], [7]. In particolare il concetto di *massa* continua ad essere visto come la capacità di un corpo ad immagazzinare quantità di moto, quindi come *inerzia* del corpo. In altre parole, il *nuovo* postulato può essere espresso dicendo che l'inerzia di un corpo e la sua energia (totale) sono due aspetti della medesima grandezza fisica:

- la *massa* possiede tutte le proprietà dell'energia;
- l'*energia* possiede tutte le proprietà della massa.

Queste relazioni possono essere facilmente illustrate con esempi concreti, mentre le ragioni che rendono queste affermazioni "sorprensenti" nel nostro mondo quotidiano possono essere discusse anche a livello quantitativo senza difficoltà alcuna [6], [7], [8].

Le relazioni fondanti nell'approccio proposto dal KPK risultano pertanto essere le seguenti:

relazione tra i trasferimenti di energia e i trasferimenti di quantità di moto	$\frac{dE}{dt} = v \cdot \frac{dp}{dt}$ (1)
relazione tra quantità di moto, inerzia e velocità di un corpo	$p = m \cdot v$ (2)
identificazione tra massa e energia	$E = k \cdot m$ (3)

Tab. 2 - Gli strumenti della proposta del KPK: si noti in particolare che il simbolo "m" è qui impiegato per designare la massa inerziale del corpo (o semplicemente la sua inerzia). Inoltre la relazione (3) ha qui il ruolo di postulato. Inizialmente k è una costante il cui significato ed il cui valore deve essere chiarito nel seguito del percorso didattico.

Per valutare questo tipo di approccio dal punto di vista didattico, è utile esaminare attraverso quale percorso e quali ragionamenti vengono chiarite le domande che nascono in relazione al *postulato di identità tra massa ed energia* (in particolare in relazione al valore e al significato della costante k) e in un secondo tempo come avviene l'aggancio con gli aspetti tradizionalmente affrontati attraverso lo studio della cinematica relativistica. Il primo passo può essere articolato sulle tre seguenti domande:

- qual è il valore della costante k che interviene come fattore di proporzionalità tra inerzia ed energia?
- qual è il significato fisico della costante k ?
- quali sono le conseguenze dell'assunzione di un tale postulato per l'insieme della meccanica?

Per dare una risposta a queste domande è utile trovare una relazione che leghi direttamente k con energia e quantità di moto. Per far questo combiniamo le tre relazioni della tabella 2:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{p}{m} \cdot \frac{dp}{dt} = \frac{p \cdot k}{E} \cdot \frac{dp}{dt}$$

ossia

$$E \cdot dE = k \cdot p \cdot dp,$$

ottenendo così una relazione che può essere interpretata come una relazione che esprime, per un intervallo di tempo *infinitesimo*, il *bilancio* tra le variazioni di energia e di quantità di moto. Allora, per il processo che accelera un oggetto dalla quiete alla velocità *v*, il *bilancio globale* è ottenuto "sommando" tutti i contributi:

$$\int_{E_0}^E E' \cdot dE' = \int_{p(0)=0}^p k \cdot p' \cdot dp'$$

da cui si ottiene facilmente la ben nota relazione

$$E^2 - E_0^2 = k \cdot p^2.$$

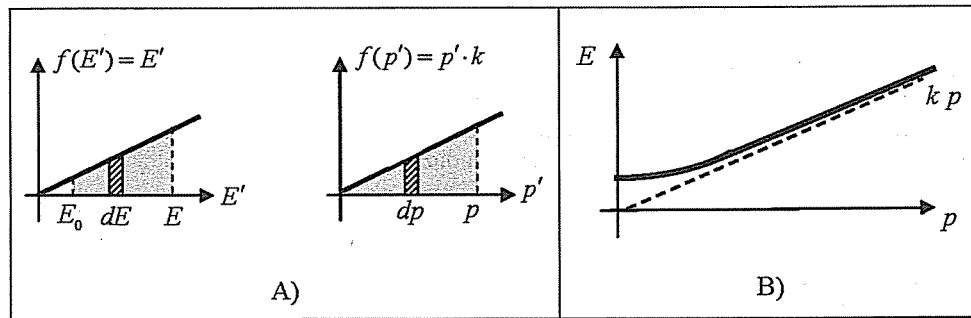


Fig. 2 - A) L'integrazione può essere effettuata anche per via puramente grafica. B) Al crescere della quantità di moto immagazzinata nel corpo, cresce anche la sua energia; si osserva inoltre che E(p) tende asintoticamente alla retta k p.

Siamo ora in grado di ricavare la relazione tra la velocità del corpo e la sua energia (o alternativamente la sua quantità di moto):

$$E^2 - E_0^2 = k \cdot p^2 = k \cdot m^2 \cdot v^2 = k \cdot \frac{E^2}{k^2} \cdot v^2 = \frac{E^2}{k} \cdot v^2$$

ossia

$$v^2 = k \cdot \frac{E^2 - E_0^2}{E^2} = k \cdot \left(1 - \frac{E_0^2}{E^2}\right)$$

$$v = \sqrt{k} \cdot \sqrt{1 - \frac{E_0^2}{E^2}}$$

Quest'ultima relazione ci dice come si comporta la velocità del corpo all'aumentare della sua energia: pur continuando a fornire energia (e quantità di moto) la velocità del "corpo" NON aumenta oltre ad un certo valore, ma si avvicina asintoticamente al *valore limite*

$$\sqrt{k} = c.$$

Il valore limite, denotato come di consueto con il simbolo *c*, ha carattere universale:

- esso ha il medesimo valore in tutti i sistemi di riferimento;
- ha il medesimo valore per tutte la "particelle".

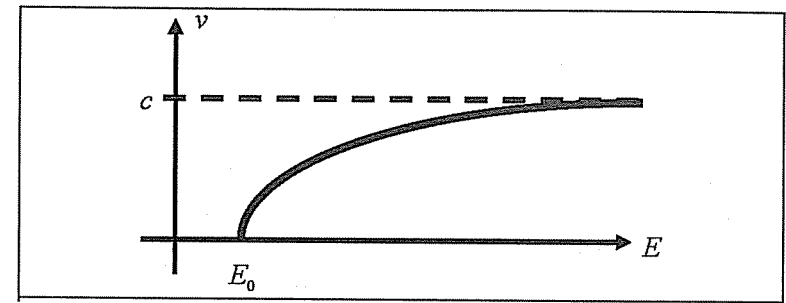


Fig. 3 - La velocità del corpo all'aumentare della sua energia cresce asintoticamente fino ad un valore limite.

Come suggerito da *J-M Levy-Leblond*, dal punto di vista didattico sarebbe forse utile indicare *c* come la *costante di Einstein*. Con questo risultato, sicuramente sorprendente, possiamo così riassumere le relazioni fra le varie grandezze:

massa ed energia: E_0 rappresenta l'energia a riposo, o meglio l'energia interna; essa è legata alla massa a riposo m_0	$E = m \cdot c^2$ $E_0 = m_0 \cdot c^2$
l'inerzia $m = E/c^2$ lega tra loro quantità di moto e velocità	$p = m \cdot v = \frac{E}{c^2} \cdot v$
energia (totale), energia interna e quantità di moto sono tra loro collegate	$E^2 = E_0^2 + c^2 \cdot p^2$

Tab. 3 - Le relazioni tra le varie grandezze. Si osservi che l'invariante relativistico è indicato con il simbolo "m0", mentre "m" denota l'inerzia del corpo.

È inoltre interessante osservare che in questo approccio l'esistenza di una *velocità limite* c non è postulata, ma emerge come risultato all'interno della teoria. Se adottiamo per la luce il modello a fotoni, allora risulta facile collegare questa velocità limite con la velocità della luce. Infatti, secondo il modello corpuscolare di *Einstein*, le particelle di luce, ossia i fotoni (γ), possiedono un'energia proporzionale alla loro frequenza:

$$E_\gamma = h \cdot \nu.$$

Sperimentalmente, inoltre, misure indipendenti dell'energia e della quantità di moto per i fotoni mostrano che:

$$E_\gamma^2 - c^2 \cdot p_\gamma^2 = 0,$$

da cui possiamo dedurre che

$$m_{0\gamma} = 0.$$

Comunemente ci si riferisce a quest'ultimo risultato dicendo che i fotoni **NON** possiedono massa a riposo. Ciò significa che *NON esiste nessun sistema di riferimento in cui queste particelle sono in quiete*; al contrario, esse viaggiano necessariamente alla *velocità limite* c in qualsiasi sistema di riferimento:

$$v_\gamma = c \cdot \sqrt{1 - \frac{E_{0\gamma}^2}{E_\gamma^2}} = c$$

La *misura* della velocità della luce fornisce quindi il valore della *costante di Einstein* c .

A questo punto sono a disposizione gli strumenti per approfondire, a seconda delle scelte didattiche, questo o quell'argomento. Ad esempio potrebbe essere del tutto immediato l'aggancio con gli aspetti cinematici tradizionali, in particolare la legge di composizione delle velocità, e la struttura dello spazio-tempo quadridimensionale con le sue particolarità (le trasformazioni di Lorentz, dilatazione dei tempi, contrazione delle lunghezze, relatività della simultaneità, ecc.).

4. Alcuni spunti per una discussione

Vorrei concludere questo mio intervento con alcune indicazioni che vogliono essere soprattutto degli spunti per una discussione. Innanzitutto una considerazione già espressa da C. Agnes nel suo intervento al Congresso AIF del 1998 [8]: l'approccio proposto dal *KPK* consente un avvicinamento alla meccanica relativistica attraverso tematiche di attualità. Oggi infatti disponiamo di abbondante materiale sperimentale per illustrare compiutamente in che senso in determinate "reazioni" è possibile ottenere dell'energia utilizzabile a spese della massa

a riposo totale del sistema. Un secondo elemento di natura didattica è sottolineato nel lavoro di M. Pohlig e H.M. Strauch [9]: l'approccio proposto consente un'introduzione attraverso la modellizzazione dinamica, ossia attraverso attività che permettono di cogliere in modo diretto continuità e rotture rispetto al paradigma classico.

Inoltre voglio sottolineare come l'approccio proposto dal *KPK*, ponendo da subito al centro l'identificazione dei concetti di massa e di energia,

- evita di dilungarsi sugli aspetti prettamente cinematici (che risultano spesso estremamente formali);
- consente di ricavare in modo coerente l'esistenza di una velocità limite assoluta e universale;
- riprende, precisa e differenzia i rapporti tra massa ed inerzia nel passaggio dalla teoria newtoniana a quella einsteiniana;
- porta in modo naturale alla descrizione del comportamento "meccanico" delle particelle di luce;
- stimola una riflessione generale sul significato di legge di conservazione;
- pur con il ridotto formalismo qui presentato, consente di discutere interessanti situazioni sperimentali in diversi campi della fisica.

Riferimenti bibliografici

- [1] L.B. Okun, *The concept of mass*, Physics Today, June 1989, p. 31-36;
- [2] A. Einstein, *Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen*, in *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 1907; (fonte: A.I. Miller, *Einsteins first steps toward general relativity*, Physics in perspective, 1, 1999, p. 85);
- [3] A. Einstein, L. Infeld *L'evoluzione della fisica*, 1938 (trad. it. 1984, Bollati-Boringhieri);
- [4] J.M. Lévy-Leblond, *La relativité aujourd'hui*, La Recherche, 96, Janvier 1979;
- [5] J.M. Lévy-Leblond, *La pierre de touche - La Science à l'épreuve*, Gallimard, 1996. Trad. it. *La pietra di paragone - La scienza alla prova*, ed. CUEN, 1998;
- [6] K. Haas, F. Herrmann et al., *Der Karlsruher Physikkurs (Teil 3 - Kap. 27 Masse und Energie)*, Universitäts Karlsruhe, 1995;
- [7] F. Herrmann, *Mechanik, Skripten zur Experimentalphysik*, Abteilung für Didaktik der Physik, Universität Karlsruhe, 1997;
- [8] C. Agnes, *Quanto si può semplificare l'insegnamento della relatività?*, Atti Congresso AIF 1998;
- [9] M. Pohlig, H.M. Strauch, *A new way of Teaching the Special Theory of Relativity* (www.pohlig.de/Physik/Relativity.pdf).

L'INSEGNAMENTO DELLA FISICA QUANTISTICA: PROBLEMI DI RICERCA DIDATTICA E CURRICOLARE

CARLO TARSITANI

Dipartimento di Fisica, Università di Roma "La Sapienza"

1. Le premesse da condividere

Potrebbe sembrare ovvio sostenere, nel XXI secolo, che nell'insegnamento della fisica a scuola dovrebbe essere trattate anche le principali scoperte della fisica del XX secolo. Tuttavia, l'ostilità nei riguardi di una simile prospettiva è diffusa a livello di docenti scolastici e universitari ed è giustificata con diverse argomentazioni, su cui torneremo in seguito. Esprimiamo per ora una nostra opinione generale al riguardo. Riteniamo che alla base delle varie argomentazioni contro l'insegnamento della fisica moderna e quindi contro l'esigenza di recuperare un ritardo di quasi un secolo vi sia una visione diffusa dello status culturale e del valore formativo della fisica che impedisce al suo insegnamento di assumere la rilevanza che gli spetta. È per esempio ancora largamente condivisa la convinzione che l'insegnamento scolastico della fisica debba avere un valore pedagogico esclusivamente introduttivo e propedeutico e che la "vera" fisica si apprenda solo all'università. Nello stesso tempo è ugualmente diffusa la convinzione che l'unica fonte d'interesse nei confronti dei contenuti di questa disciplina sia costituita dalle sue applicazioni tecniche, che ormai caratterizzano ampiamente il mondo che ci circonda. In sostanza, l'insegnamento della fisica ha ancora un carattere "ancillare" – il che è confermato dalla stessa organizzazione del curriculum e dal numero di ore ad essa dedicate, anche in un liceo scientifico.¹ Del resto, nella nostra scuola, l'intera formazione scientifica ha un ruolo secondario rispetto alla formazione umanistica: ciò riflette la convinzione che solo quest'ultima può essere portatrice dei principali valori culturali, rappresentando l'unico contributo che la scuola può dare all'educazione della "persona". Come si ripete ormai da tanti anni, nella nostra scuola il rapporto tra cultura scientifica e cultura umanistica è decisamente sbilanciato a favore della seconda: se pure ha senso parlare della trasmissione di una vera e propria cultura scientifica.²

Assegnare un profondo valore educativo anche all'insegnamento scientifico non è quindi affatto scontato. Non stiamo infatti parlando soltanto delle cono-

¹ Basta pensare al fatto che, molto spesso, chi insegna non è laureato in fisica e non ha una particolare predilezione per questa disciplina, date le gravi carenze dell'insegnamento universitario che ha dovuto subire.

² Questo dato di fatto è confermato in modo decisivo dallo scarsissimo peso dato all'insegnamento delle cosiddette "scienze umane" nella nostra scuola.

scienze di base sulla natura del mondo materiale che ci circonda, dall'infinitamente piccolo all'infinitamente grande. Stiamo anche parlando di quella "visione scientifica del mondo" che dovrebbe *contrapporsi* alle tendenze irrazionalistiche, agli atteggiamenti dogmatici, acritici e pregiudiziali, assumendosi una piena *responsabilità culturale*. Per quanto ci riguarda, riteniamo che questa situazione non derivi da uno strutturale immobilismo del complesso sistema scolastico, o da presunte difficoltà di ordine tecnico e organizzativo. Si tratta, a nostro parere, di una scelta voluta e programmata, secondo le linee di un'ideologia che nel nostro paese è dura a morire.

Per questi motivi siamo ancora costretti a stabilire alcune premesse generali che, se non accolte, renderebbero del tutto inutile qualsiasi sforzo d'effettivo rinnovamento. Le riassumiamo schematicamente:

1. Ogni cittadino ha il diritto di conoscere e comprendere gli aspetti essenziali della ricerca fisica e della visione del mondo materiale che essa ci presenta.
2. Lo scopo dell'insegnamento della fisica non può essere ridotto alla comunicazione di conoscenze "utili" ma deve assumere un significato educativo ben più ampio diventando parte integrante della formazione di un'autentica *cultura scientifica* e della condivisione dei valori intellettuali che la ricerca scientifica propone.
3. Una buona cultura fisica comporta una conoscenza adeguata delle principali acquisizioni della fisica del XX secolo, non solo perché su queste acquisizioni si basa l'attuale modo di pensare e di ricercare dei fisici, ma anche perché esse hanno influito enormemente sullo sviluppo del clima intellettuale del secolo scorso.
4. Una buona cultura fisica deve fornire anche gli strumenti per una comprensione delle linee essenziali di ciò che fanno i fisici oggi (e del perché lo fanno).
5. Le teorie della fisica moderna formano un nuovo modo di vedere il "mondo" e non solo un'insieme di regole di calcolo per riprodurre i dati sperimentali o di conoscenze il cui fine principale è quello di sviluppare nuove tecnologie.
6. L'esigenza di aggiornamento culturale dell'insegnamento della fisica comporta una revisione critica e didattica dell'intero percorso formativo per tutti i livelli scolari.

Siamo dunque convinti che una trattazione adeguata della fisica moderna nell'insegnamento scolastico comporta un complesso cambiamento nel modo stesso di insegnare la disciplina. Si tratta di avviare un processo che porti a un vero e proprio *salto di qualità* nell'insegnamento della fisica e che sarebbe illusorio pensare possa essere portato a termine in tempi brevi. In un simile processo sono infatti coinvolte non solo tutte le componenti della realtà scolastica, dalla comunità degli insegnanti di matematica e/o fisica e di altre discipline ai dirigenti scolastici, dalle autorità scolastiche locali ai responsabili ministeriali, ma anche le comunità stesse dei fisici, dei matematici e dei chimici, e, più in generale gli ambienti intellettuali e accademici "influenti".

Per quanto riguarda la comunità dei ricercatori in didattica della fisica e della matematica, essa non può che anticipare i tempi, affrontando con tenacia e sistematicità i complessi problemi legati al suddetto salto di qualità, nell'interazione della ricerca sul curricolo, la ricerca cognitiva, la ricerca sui metodi e sui contenuti didattici specifici, la ricerca sulla formazione iniziale e in servizio degli insegnanti.

Parliamo di "salto di qualità" anche perché, nonostante tutto, la fisica moderna è già presente nei curricoli scolastici e si riflette in un adeguamento, quasi sempre didatticamente discutibile, dei libri di testo. Un simile intervento "dall'alto" non ha però prodotto alcun sostanziale cambiamento. Permane una diffidenza diffusa da parte degli insegnanti (la maggior parte dei quali non conosce a sufficienza le teorie del XX secolo), fatta eccezione per sporadiche iniziative individuali (quasi sempre motivate dall'interazione con la ricerca didattica universitaria). Per di più la stessa comunità dei fisici, abituata a vedere l'insegnamento scolastico come una sottospecie dell'insegnamento universitario, mantiene un atteggiamento indifferente, se non addirittura ostile, verso la fisica moderna, non essendo abituata a intravedere situazioni didattiche molto diverse da quelle praticate all'università (di per sé non proprio soddisfacenti). In particolare, la comunità dei fisici è, fino ad oggi, poco interessata alle competenze specifiche richieste dalla formazione di un insegnante scolastico di fisica. All'università non s'insegna certo per i futuri insegnanti. Per quanto riguarda la diffusione della cultura fisica, permane un atteggiamento essenzialmente divulgativo, con le sue tipiche caratteristiche di forzato semplicismo e di sostanziale fallimento comunicativo.³

Il risultato è che, interloquendo con docenti scolastici e universitari, si sentono spesso ripetere i soliti "luoghi comuni", che presuppongono un mancato riconoscimento dell'urgenza, delicatezza e complessità del problema: "la fisica moderna è troppo difficile per un ragazzo (per i ragazzi di oggi poi...)", "la matematica della fisica moderna è sostanzialmente inaccessibile", "la fisica moderna è troppo astratta e lontana dal senso comune", "già è tanto se i ragazzi capiscono qualcosa della fisica classica", e via discorrendo. Manca la percezione di una grave responsabilità *culturale*: si ragiona come se la conoscenza della fisica sia un lussuoso accessorio che solo pochi possono permettersi.

Potremmo dilungarci sull'analisi dello *status quo* e sulle sue componenti ideologiche, sociologiche e strutturali. Ma non è questo il compito di questo intervento. Ci rivolgeremo quindi agli aspetti salienti di una ricerca didattica che abbia superato questi ostacoli e condivida le premesse appena illustrate.

³ La "crisi" delle lauree scientifiche nel nostro paese sta gradualmente cambiando questa situazione, ma le risposte appaiono tuttora mediamente inadeguate, salvo qualche rara eccezione.

2. La ricerca didattica sull'insegnamento della fisica quantistica

Queste brevi note sono riferite soprattutto all'insegnamento della fisica quantistica (d'ora in poi FQ), intendendo con questo nome il complesso di schemi interpretativi sviluppati dai fisici a partire dal 1925. La risposta alle obiezioni di cui sopra e la soluzione dei difficili problemi da risolvere è evidentemente di pertinenza primaria della ricerca in didattica della fisica. La complessità del problema va affrontata con competenze scientifiche e metodologiche specifiche, indagini mirate e documentate, oltre che con un'elevata dose di coraggio e anticonformismo intellettuale.

Occorre però evitare le false partenze. Elenchiamo schematicamente quelli che possono essere difetti di impostazione che porterebbero a soluzioni insoddisfacenti. Bisognerebbe evitare di:

- concepire l'insegnamento di FQ come semplice appendice integrativa di un curriculum ancora centrato sulla fisica classica (FC);
- ridurre gli schemi esplicativi di FQ ad alcune leggi empiriche, sorrette da "strane" ipotesi e giustificate unicamente dal loro accordo con i dati sperimentali;
- cercare scorciatoie ipersemplicanti, surrogati ambigui, ovvero insistere con proposte didattiche frammentarie e disorganiche;
- introdurre gravi misconcezioni giustificandole con le presunte necessità didattiche e/o difficoltà cognitive;
- aggirare i problemi concettuali, evitare di discutere le loro implicazioni epistemologiche e il loro rilievo culturale.

Sono attualmente in circolazione diverse proposte di approccio ai concetti e al formalismo della fisica quantistica. Alcune di esse cercano hanno un approccio "minimalistico" e propongono alcune ipotesi e leggi quantistiche, legate a particolari fenomeni, senza inserirle in un quadro organico. Altre si limitano ad un approccio essenzialmente divulgativo, talvolta con una certa fantasia immaginifica, che disegna una sorta di caricatura dei contenuti delle nuove teorie. Sono proposte che tendono in molti casi ad insistere sulla "stranezza" delle nuove concezioni, che vanno accettate solo perché "funzionano" e non si trova niente di meglio; persistono ancora atteggiamenti rinunciatari che comunicano esplicitamente la sostanziale incomprendibilità dei modelli di comportamento degli enti e dei processi elementari elaborati nell'ambito delle teorie quantistiche. In altri termini, c'è una certa riluttanza ad affrontare la complessa problematica di ricerca didattica che comporterebbe la costruzione di un percorso di ampio respiro che fornisca una conoscenza adeguata del nuovo schema teorico, puntando alla sua rilevanza concettuale e al suo valore culturale.

L'aspetto più grave di alcune versioni didattiche semplicistiche è che esse non si preoccupano delle "misconcezioni", talora gravi, che esse finiscono per comunicare. Non tutti si rendono conto del fatto che presentare un surrogato immaginifico

di FQ solo perché esso appare più didatticamente accessibile equivale a restare nell'ambito di un nozionismo acritico, facendo un brutto servizio alla cultura scientifica in generale. Non solo ma, dal momento che tali surrogati finiscono per usare spesso modelli semi-classici, si perde interamente l'originalità delle nuove concezioni e l'opportunità di mostrarne le conseguenze epistemologiche più rilevanti.

Vediamo invece quali possono essere le caratteristiche di un approccio che consideri la fisica quantistica un punto d'arrivo per l'intera formazione fisica e che quindi s'impegno in uno sforzo comunicativo corretto, efficace e, nei limiti del possibile, esauriente. Per necessità di sintesi, anche in questo caso elencheremo alcuni punti cruciali. Sarebbe auspicabile:

- introdurre gli schemi esplicativi di FQ in una forma che sia la più organica e completa possibile, chiarendone i principi di fondo e collegando le regole basilari del loro linguaggio formale con il loro significato concettuale;
- insistere sull'enorme aumento delle capacità esplicative che è consentito dalle nuove scoperte (riferendosi anche all'esperienza ordinaria), e sul delicato cambiamento nella visione degli enti e dei processi fisici fondamentali, nonché dei concetti stessi di osservazione, fenomeno, rappresentazione, modello, ecc.,
- stabilire nuove connessioni "longitudinali" (ristrutturando il percorso formativo sin dall'inizio) e "trasversali" (chiarendo i legami delle acquisizioni di FQ con quelle di altre discipline scientifiche e con i mutamenti complessivi di un clima culturale).

La decisione di insegnare FQ introduce dunque una problematica didattica inedita: quella derivante dalla necessità di affrontare il problema del *cambiamento* delle categorie, dei concetti, dei criteri di rappresentazione formale, della visione degli oggetti e dei processi, che sono stati oggetto dell'insegnamento precedente (e quindi ancora oggetto di gran parte della ricerca didattica in corso). Il punto cruciale, da questo punto di vista, è che, una volta data per naturale e intuitiva la visione classica del mondo fisico, è difficile poi argomentare che essa è insufficiente e superata. Ne deriva che la comprensione degli aspetti essenziali della visione quantistica non può prescindere da una riflessione critica sulla specificità della visione classica, sia dal punto concettuale sia dal punto di vista del linguaggio formale. Senza tale riflessione è difficile mostrare adeguatamente come e perché FQ risolve problemi conoscitivi fondamentali che FC non può nemmeno affrontare, date le caratteristiche strutturali dei suoi schemi esplicativi.

Per affrontare il problema didattico da questo punto di vista, la ricerca didattica non può limitarsi a questioni di natura puramente metodologica. Diventa importante il rapporto con la ricerca sulla storia e i fondamenti della fisica in modo da proporre un percorso concettualmente coerente e capace di dare il senso di un *progresso conoscitivo*. In questo senso proprio il passaggio all'insegnamento di FQ offre un'occasione insostituibile per cominciare a comunicare

la tensione essenziale tra tradizione e innovazione, il ruolo centrale dello spirito critico e dell'audacia intellettuale, tutti aspetti che caratterizzano in maniera essenziale l'atteggiamento scientifico in senso proprio.

Insistiamo quindi sul fatto che, se si vuole inserire l'insegnamento della fisica quantistica in un percorso organico e coerente, l'approccio non può che essere *evolutivo*.⁴ Il presupposto di tale approccio è il seguente: condizione necessaria per comprendere nuovi criteri di rappresentazione e spiegazione è comprendere i problemi conoscitivi per risolvere i quali essi sono stati proposti. Una "transizione istantanea" alla FQ è didatticamente improponibile, se si vuole evitare di ricadere nel nozionismo dogmatico. Per questo, lo ribadiamo, l'introduzione a FQ non può non basarsi su un processo di riflessione critica sugli schemi formali, sui modelli, sui concetti della fisica classica; né può evitare di mettere in evidenza le loro carenze strutturali di fronte all'estensione e all'approfondimento dell'evidenza sperimentale.

Ci conforta, da questo punto di vista, lo stesso Niels Bohr di cui riportiamo un breve brano (1922):

Ho cercato di mettere in evidenza la misura in cui [la nuova teoria quantistica] è in conflitto con l'insieme di concezioni mirabilmente coerente che è stato giustamente chiamato "la teoria classica dell'elettrodinamica". D'altra parte, ho cercato di comunicare [...] l'impressione che proprio mettendo in evidenza questo conflitto si può scoprire, con l'andar del tempo, una certa coerenza nelle nuove idee.

Torniamo dunque al "salto di qualità" che la stessa ricerca didattica deve effettuare per affrontare in maniera efficace i nuovi problemi che le stanno di fronte. Occorre, come si è detto, trovare lo spazio per una riflessione critica sulla visione del mondo della fisica classica. Ciò vuol dire che i tradizionali problemi didattici connessi con l'insegnamento della fisica classica vanno affrontati con spirito innovativo. Gli studenti devono essere messi in grado non solo di comprendere i nuclei concettuali portanti delle teorie classiche, ma anche di percepire i limiti strutturali. Solo a queste condizioni essi potranno percepire la connessione profonda tra le gravi difficoltà sperimentali incontrate dalla fisica classica a partire dalla seconda metà del XIX sec. e problemi più generali, legati ai fondamenti concettuali delle teorie allora accreditate.

Da questo punto di vista, abbiamo recentemente fatto uno sforzo per individuare un possibile taglio da dare alla trattazione di simili questioni.⁵ Abbiamo

⁴ L'approccio evolutivo non deve però essere confuso con un approccio "storico".

⁵ I dettagli di questo approccio critico alla fisica classica sono stati presentati e sperimentati nei materiali preparati per i moduli d'insegnamento del Master universitario di II livello "Innovazione Didattica in Fisica e Orientamento", organizzato dall'Università di Udine negli aa. aa. 2005/06 e 2006/07 (Tarsitani, 2006).

rivolto l'attenzione ad alcune categorie fondamentali della rappresentazione fisica del mondo, mostrando come, in fisica classica esse avevano uno status ancora contraddittorio e davano luogo a una serie di problemi irrisolti. Le antinomie individuate sono le seguenti:

- continuo/discreto
- macroscopico/microscopico
- causale/casuale
- stabile/instabile

Partendo da queste antinomie, diventa possibile:

- individuare i problemi conoscitivi che la fisica classica non può strutturalmente risolvere,
- individuare contesti sperimentali emblematici, in cui tali problemi emergono con chiarezza,
- introdurre gradualmente i cambiamenti concettuali e le ipotesi alternative o come risposta a esigenze di coerenza logico-epistemologica o come soluzioni fenomenologiche a problemi specifici (per es., le prime ipotesi di quantizzazione).

Come si era detto, la decisione di insegnare FQ influisce quindi in maniera determinante sull'intero insegnamento della fisica. FQ non può essere semplicemente "aggiunta" a ciò che si è fatto prima, in maniera tradizionale. Si apre a questo punto il problema di arrivare a comunicare gli aspetti essenziali delle nuove concezioni. Per farlo, occorre superare il carattere fenomenologico delle prime ipotesi quantistiche, introdotte inizialmente solo come espressione delle difficoltà concettuali della fisica classica, e inserirle in uno schema esplicativo formalmente e concettualmente coerente. Occorre poi discutere passo dopo passo i problemi formali, concettuali ed interpretativi che emergono dai nuovi modelli esplicativi.

Diamo solo un quadro schematico di quelli che consideriamo i contenuti irrinunciabili di un insegnamento della fisica quantistica che voglia essere culturalmente significativo, e che si traducono in altrettanti problemi per la ricerca didattica:

- non esiste un modello classico univoco degli "oggetti" quantistici (non sono né onde, né particelle, né sostanze fluide materiali, né "nuvole" di probabilità);
- con la fisica quantistica cambia la nozione stessa di oggetto (sistema) quantistico, di ciò che può essere considerato il suo "stato fisico" e le proprietà che possono essergli attribuite;
- lo stesso processo di misurazione (e quindi dei concetti di "evento" e di "fenomeno") cambia significato;
- questo nuovo modo di vedere trova espressione in principi inediti (complementarità e indeterminazione) che devono essere resi oggetto di attenta riflessione critica (onde evitare semplificazioni fuorvianti).

3. Le nostre ricerche

Il nostro gruppo di ricerca ha da tempo avviato una ricerca su questi problemi ed è stato delineato un percorso reso oggetto di sperimentazione presso la Scuola di Specializzazione per Insegnanti della Secondaria del Lazio. Il percorso è inizialmente rivolto a laureati in matematica, che quindi hanno una conoscenza molto carente dei contenuti di FM. È stato così possibile sperimentare un approccio "vicino" a quello proponibile a scuola (Giannelli & Tarsitani, 2003, 2004, 2005).

Si potrebbe dire che i matematici non dovrebbero avere eccessive difficoltà per quanto riguarda i problemi simbolici e formali. Non è così. La ricerca di un formalismo semplice non conduce necessariamente a un formalismo "consueto". Per evitare le equazioni differenziali, è infatti necessario l'uso di un linguaggio algebrico-vettoriale la cui espressione più compatta è per altro fornita dal simbolismo di Dirac. Si può quindi comprendere come anche un laureato in matematica incontri una certa difficoltà ad abituarsi all'espressione simbolica non usuale di regole di calcolo che dovrebbero essergli familiari. Uno studente scolastico può invece approfittare della propria "ingenuità" e può essere più disponibile nei confronti di nozioni e operazioni matematiche oggettivamente semplici. L'unica difficoltà è costituita dalla necessità, a nostro parere imprescindibile, di usare i *numeri complessi*. Per queste ragioni l'insegnamento di FM comporta la creazione di un'interferenza costruttiva con l'insegnamento della matematica. E questo è un problema centrale per la ricerca didattica in entrambe le discipline.

Dicevamo della scelta di muoverci esclusivamente nell'ambito dell'algebra vettoriale e delle trasformazioni lineari. Il punto di partenza è infatti costituito da pieno riconoscimento che la meccanica quantistica elementare è una *teoria lineare*, quindi relativamente semplice sul piano strettamente formale. La conseguenza principale di questa caratteristica è che per gli stati che un sistema quantistico può assumere vale il *principio di sovrapposizione*, con tutte le conseguenze che ciò comporta. È allora possibile costruire un percorso che porti gradualmente in questa direzione, a partire da sistemi classici che godono delle stesse proprietà. Ci riferiamo ovviamente ai sistemi "armonici", formati cioè da oscillatori semplici accoppiati in cui si possono "eccitare" stati di oscillazione stazionaria e in cui, se la loro estensione spaziale lo permette, possono propagarsi movimenti ondulatori. Ne deriva che, se si vuole procedere con un certo vantaggio nella direzione del formalismo quantistico, il curriculum di fisica deve insistere più di quanto abbia fatto fino ad ora sui fenomeni oscillatori e ondulatori. Nello stesso tempo deve introdurre forme di simbolizzazione semplici e adeguate degli stati dei sistemi di cui si sta parlando, per approdare alla loro rappresentazione in termini vettoriali. Dopodiché sarà più facile introdurre le carat-

teristiche specifiche della rappresentazione quantistica, mettendo in evidenza la rottura con la rappresentazione classica, anche nel caso dei sistemi rigorosamente lineari.

In altri termini, sappiamo che lo studio dei sistemi oscillanti porta a comprendere che essi assumono "stati" complessivi di movimento, chiamati "modi normali", che sono ricavabili come stati "propri" (autostati) caratterizzati da frequenze "proprie". La ricerca di questi modi normali può essere ricondotta alla soluzione di un "problema agli autovalori" di una matrice $n \times n$, dove n è il numero di gradi di libertà del sistema considerato. Considerazioni analoghe possono essere estese alle forme di propagazione ondulatoria introducendo (sempre in forma algebrica) gli elementi essenziali dello sviluppo in serie di Fourier, che è una delle operazioni matematiche fondamentali per l'intera fisica. Si può così parlare di "pacchetti d'onde", di analisi spettrale, e via discorrendo, aprendo la strada alla trattazione di fenomenologie spesso trascurate, come quelle riguardanti la riproduzione dei suoni e l'ottica fisica. Avendo trattato queste aree tematiche, diventa per altro più semplice affrontare i principali fattori di "crisi" della fisica classica e far comprendere le ragioni della "crisi" delle teorie classiche di fronte all'evidenza sperimentale.

Il percorso continua poi con questo approccio, che definiremmo "matematico-sperimentale", passando attraverso classi di esperimenti che consentono di introdurre con gradualità le forme tipiche della rappresentazione quantistica di enti e processi. Ci riferiamo ad esperimenti che possono anche essere osservati e/o riprodotti in laboratorio e che presentano un "crescendo" di comportamenti tipicamente quantistici, dando senso alle regole formali via via introdotte. Gli esperimenti in questione riguardano:

- i fenomeni relativi alla luce polarizzata,
- i fenomeni di quantizzazione a due stati, come l'esperimento di Stern e Gerlach per "particelle di spin semintero,
- i fenomeni di interferenza e diffrazione riferiti al comportamento di "particelle" materiali (per es. elettroni).

È importante sottolineare che la discussione di questi esperimenti deve essere *assolutamente rigorosa* dal punto di vista formale e deve consentire un approccio alla discussione sui principi e sui concetti fondanti della visione quantistica del mondo fisico. Per esempio, il passaggio dai fenomeni di polarizzazione, riferiti alla radiazione, ai fenomeni riguardanti il comportamento di elettroni, può essere molto utile per mettere in rilievo le differenze sostanziali nel comportamento di questi enti fisici (differenze legate anche al concetto di *spin*, la cui centralità non può essere trascurata). Diventa inoltre possibile chiarire il significato di principi fondanti, quali il principio di complementarità e il principio d'indeterminazione (Logiurato & Tarsitani, 2006a, 2006b, 2007). Un'attenzione par-

icolare va poi dedicata alla nuova concezione della *misura*, cui è profondamente legata la visione probabilistica degli “eventi” che la misura stessa produce.⁶

La chiarificazione dei principali nodi concettuali della FQ deve infine essere rafforzata dallo studio delle sue principali *applicazioni* sia per quanto riguarda le proprietà tipicamente quantistiche della materia e dei materiali (in particolare le proprietà fisico-chimiche, elettriche e termiche), sia per quanto riguarda gli aspetti più rilevanti dell’ottica fisica. Senza queste applicazioni le nozioni astratte apprese dallo studente sarebbero infatti prive di un riscontro oggettivo, ossia di una dimostrazione della loro efficacia esplicativa ed applicativa.

4. Conclusioni

L’elaborazione del percorso che abbiamo sommariamente illustrato si va traducendo nella produzione di materiali didattici che saranno presto disponibili per la sperimentazione (Tarsitani, 2007) sia nei corsi di formazione iniziale degli insegnanti, sia nelle varie esperienze di tirocinio ad essi collegate, sia nel Master sulla fisica moderna organizzato, nell’ambito del progetto “Lauree scientifiche”, dall’Università di Udine. È però inevitabile che la scelta di imboccare un percorso del genere non può essere fatta a cuor leggero, in un contesto scolastico che è ancora sostanzialmente contrario a forme di innovazione radicale e in un contesto sociologico in cui gli apparati decisionali continuano a sottovalutare l’importanza delle acquisizioni della ricerca didattica. Riteniamo tuttavia che le necessità stesse della ricerca scientifica e della crescita complessiva del paese stiano aprendo un nuovo scenario, in cui si vanno manifestando nuovi interessi e nuove disponibilità. Il sistema sotto osservazione è ancora una volta soprattutto quello universitario, che vive un’esigenza di rinnovamento senza precedenti. La didattica universitaria, condotta nei modi tradizionali, non pare più adeguata agli scopi che si prefigge. E non bisogna dimenticare che molto di quello che si fa a scuola ha il suo retroterra nella formazione universitaria. Uno sforzo congiunto per risolvere il problema della formazione iniziale degli insegnanti, con soluzioni che producano competenze adeguate al ruolo specifico, è quanto mai necessario e di questo devono essere consapevoli tutte le componenti del mondo accademico.

⁶ È certamente discutibile l’interpretazione del vettore di stato di un sistema quantistico in termini di “onde di probabilità” che si propagherebbero anche in assenza di apparati rivelatori.

Riferimenti bibliografici

- Bohr N. (1922) *Theory of spectra and atomic constitution*, Cambridge University Press.
- A. Giannelli & C. Tarsitani (2003), “Un progetto di introduzione alla meccanica quantistica per i laureati in matematica”, *La Fisica nella Scuola*, XXXVI, n. 3, pp. 103-114.
- A. Giannelli & C. Tarsitani (2004), “Teaching Quantum Mechanics to future school teachers”, in *Quality Development in Teacher Education and Training. Selected contributions of the Second International GIREP Seminar 2003*, Forum, Udine, pp. 441-445.
- A. Giannelli, C. Tarsitani (2005) “A proposal for introducing elementary quantum mechanics at school”, *Proceedings dell’ICPE 2004 Congress “What Physics should we teach?”*, Durban, South Africa, ICPE, pp. 141-146.
- F. Logiurato, C. Tarsitani (2006a), “Mach-Zehnder interferometer and Quantitative Complementarity”, in C. Garola e A. Rossi (eds.) *The Integration between History and Foundations of Physics*, Plenum Press, Singapore.
- F. Logiurato, C. Tarsitani (2006b), “The measure of momentum in quantum mechanics”, in C. Garola e A. Rossi (eds.) *The Integration between History and Foundations of Physics*, Plenum Press, Singapore.
- F. Logiurato, C. Tarsitani (2007), “Teaching Uncertainty and Complementarity Principles”, inviato per la pubblicazione a *Science & Education*.
- C. Tarsitani (2006), “La crisi della fisica classica e la nascita della fisica moderna”, Materiale didattico per il Modulo A del Master *Innovazione Didattica per l’Insegnamento della Fisica e l’Orientamento*, in rete.
- C. Tarsitani (2007), *Dalla fisica classica alla fisica quantistica. Materiali per la sperimentazione didattica*. In corso di stampa per gli Editori Riuniti University Press.

APPENDICE

In questa Appendice riportiamo

- 1) Alcune osservazioni di Beniamino Ginatempo (comitato Organizzatore)
- 2) Alcune delle domande sulla Fisica di Karlsruhe, poste dai partecipanti al Convegno e le relative risposte di Herrmann ed Agnes
- 3) Le prime pagine del capitolo 3 del Volume I della Fisica di Karlsruhe: "Quantità di moto" a chiarimento dell'intervento di Haptmann di cui abbiamo disponibile solo la presentazione fatta in aula. Il resto lo si può trovare al sito:
http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/kpk/italienisch/kpk_volume1.pdf
- 4) Le prime pagine del capitolo capitoli 16 del Volume II della Fisica di Karlsruhe : " Eletticità e correnti elettriche" a chiarimento dell'intervento di Pholig di cui abbiamo disponibile solo la presentazione fatta in aula Il resto lo si può trovare al sito:
http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/kpk/italienisch/kpk_volume2.pdf

ALCUNE OSSERVAZIONI

BENIAMINO GINATEMPO
Comitato Organizzatore

Una premessa. Viviamo nella società della conoscenza. Da più parti, da tutti i media ed i commentatori, da tutte le parti politiche, sia da Confindustria che dai sindacati si sente dire che la quantità e la qualità della conoscenza – in particolare nel campo delle scienze e dell'ingegneria – sono oggi i fattori decisivi della crescita e della competitività di un paese nel mercato globale. Noi, docenti di Fisica, lo sapevamo da un pezzo, tuttavia rilevavamo e rileviamo ancora oggi la palese contraddizione fra chi sostiene a parole quanto sopra ed i tagli alle risorse investite in scuola, università e ricerca scientifica, nonché il degrado progressivo del sistema dell'educazione e dell'istruzione in Italia.

Ma se tutti concordiamo sul ruolo decisivo della conoscenza, perché il contribuente tollera tutto ciò e non pretende una decisiva inversione di tendenza negli investimenti nel sistema dell'istruzione? Temo che la risposta implichi una autocritica anche da parte dei docenti: non sarà forse che la scuola e l'università attuali – e quindi noi docenti – non adempiono al meglio alla loro missione sociale?

Se fosse così, si capirebbe perché il contribuente abbia perso fiducia nel sistema dell'istruzione e valuti non prioritario finanziarlo. Un indizio che ciò sia corretto sta nel fatto che, nonostante il grave calo nelle *vocazioni scientifiche* (numero di iscrizioni universitarie in discipline scientifiche) e l'elevata *mortalità* (abbandoni dopo i primi anni di corso), il numero assoluto dei laureati decresce molto meno del numero di iscrizioni o addirittura in certi casi è costante. Secondo me ciò significa, per esempio, che i pochi e brillanti studenti che si laureano in Fisica sono una sorta di zoccolo duro: sono bravi, fortemente motivati ed appassionati e – ahinoi! – probabilmente si sarebbero laureati lo stesso, anche senza frequentare le nostre interessanti e brillanti lezioni. Anzi, magari non andavano fuori corso.

A fronte delle precedenti considerazioni è bene che noi docenti di Fisica riflettiamo sul nostro lavoro, sulla sua utilità, sulla sua efficacia con il pragmatismo, la laicità e la onestà intellettuale che ci contraddistinguono.

Comincio da lontano. Una buona definizione dell'energia – posto che sia possibile definirla compiutamente ed esaurientemente – non può essere slegata dall'entropia e mi sembra questa: “la capacità di un sistema fisico di portare **ordine** in un altro mediante **lavoro**”. Una conseguenza: il lavoro è ciò che serve per strutturare l'informazione nel caos, ed il caos è lo stato più probabile di un

sistema fisico lasciato a sé stesso. Il lavoro di un musicista consiste nell'ordinare suoni. Quello di un pittore nell'ordinare forme, segni e colori. Quello di un poeta nell'ordinare parole. Quello di un architetto nell'ordinare spazi. Quello di un giornalista nell'ordinare i fatti del giorno. Quello di un ministro nel porre ordine ai flussi di risorse, per costruire infrastrutture materiali ed immateriali tali da migliorare la vita dei cittadini. E qual è il lavoro dell'insegnante?

Anche noi proviamo a costruire ordine nelle teste dei nostri studenti. Ma ordine è un concetto che deve essere analizzato e lo faccio con un esempio efficace. Ci sono molte maniere di ordinare. Io posso mettere in ordine un mazzo di carte (solitario) dividendolo per semi ed in sequenza crescente dall'asso al re. Ovvero mettendo l'asso dopo il re. Ovvero in ordine decrescente. Poi posso alternare i semi rossi ai neri o separarli. Oppure ancora posso ordinare il mazzo mettendo in ordine di seme prima tutti gli assi, poi i due, ecc. O anche separando le carte dispari dalle pari. Sono tante le sequenze strutturate che posso immaginare, tante ma finite. Le configurazioni del mazzo, i possibili stati, invece sono molti di più. Per l'esattezza sono $52! = 8.07 \times 10^{67}$. Scegliere l'ordinamento che ci piace di più è arbitrario ma è utile: per esempio, una volta stabilito l'ordinamento da A a K, picche, cuori, quadri e fiori, questa regola ci consente di trovare immediatamente il 3 di cuori, perché sappiamo che si trova al sedicesimo posto.

Una metafora informatica: cosa fa l'insegnante? Aiuta lo studente a ordinare tutto quel marasma di informazioni presenti nella sua enorme memoria di massa nel suo disco rigido, nonché a costruire il software, cioè quel motore di ricerca che gli consenta di distinguere le informazioni, sfrondarle dai pregiudizi e di reperirle velocemente quando gli servono per risolvere problemi.

Ma ci sono molti possibili ordinamenti, ovvero schemi di presentazione, per la Fisica e KPK è uno di questi. L'insegnamento tradizionale italiano è un altro. Insegnare la meccanica a partire dal principio dei lavori virtuali, o l'elettromagnetismo a partire dalle equazioni di Maxwell sono altri ancora. Ma perché ordinare le carte in senso crescente dovrebbe essere meglio che ordinarle in senso decrescente? Che senso ha chiedersi *a priori* quale schema metodologico sia il migliore?

Da questo punto di vista io sono assolutamente d'accordo con Matilde Vicentini quando dice che solamente la prassi quotidiana può suggerire una scelta. Solo i lampi di comprensione negli occhi degli studenti, solo quel sorriso che denota la sottile gioia di aver capito sono prove di efficacia del metodo. Non la nostra personale soddisfazione, per aver loro esposto, ad esempio, il Secondo Principio in maniera organica e compiuta, in maniera ordinata. Noi, dunque, abbiamo il dovere di conoscere KPK e magari tutti gli altri schemi, perché dobbiamo offrirli tutti agli studenti. Sì, perché il motore di ricerca è il loro,

perché loro devono trovare le informazioni nel proprio disco rigido, loro devono decidere le proprie personali sequenze di ordinamento e gli eventuali hyperlinks. Sono loro che dovranno risolvere in futuro problemi di Fisica, quindi sono loro che dovranno dimostrare **non solo di avere informazioni** nella loro memoria di massa, ma **soprattutto di saperle usare**.

Purtroppo sia la scuola che l'università si limitano spesso ad un lavoro ben più terra-terra: si limitano a mettere lo studente in grado di raccontare quanto hanno letto in un libro di testo. Spesso lo studente è premiato con il massimo dei voti se agli esami ci racconta un argomento usando il medesimo schema espositivo che noi abbiamo usato a lezione, addirittura se usa le nostre stesse parole. Così facendo non si produce cultura, perché al massimo i nostri studenti imparano quello che sappiamo noi. Bisogna ammettere che questo sistema educativo è troppo assurdamente rigido: ancora si denomina Fisica Moderna la fisica quantistica come se *l'altra* fosse Antica, come se non ci fosse già da un secolo. Tutto ciò che non si sa rinnovare è destinato ad isolarsi e, quindi, col tempo a deperire, atrofizzarsi, estinguersi. Bisogna anche trovare un linguaggio nuovo per comunicare con i ragazzi.

Le chiavi per interrompere questa spirale perversa – non quella cognitiva di Michele D'Anna – sono l'apertura e l'innovazione, naturalmente. Bisogna assorbire dall'esterno energia per riordinare il sistema dell'insegnamento della Fisica a scuola ed all'università. KPK ci offre una possibilità che va esplorata e sperimentata. È una occasione, dunque, che non deve andare sprecata. Per poi provare una strada nuova, se è il caso, ed un'altra ancora. L'errore, unico ma esiziale, è il rifiuto di rinnovarsi.

Facendo il contrario il cerchio si chiude. Noi miglioriamo il nostro lavoro e quindi abbiamo studenti più colti e più capaci. Questo fa sì che il contribuente si accorga quanto il nostro lavoro sia essenziale per uno sviluppo sostenibile ed investe risorse in un sistema educativo vitale e non immobile.

Grazie a KPK, grazie a tutti i partecipanti.

P.S.

C'è un detto contadino toscano che recita: "*Chi sa, sa. Chi non sa a su' danno*". Si trova nell'aula magna della Scuola Normale di Pisa.

ALCUNE DELLE DOMANDE SULLA FISICA DI KARLSRUHE,
POSTE DAI PARTECIPANTI AL CONVEGNO

Domande dei partecipanti al Convegno e Risposte (date da F. Herrmann e C. Agnes)

D: Come sono legate l'entropia e l'energia interna dei corpi?

R: Dipende da ciò che si intende per energia interna. L'energia interna è la grandezza complicata, l'entropia quella facile. Dell'entropia si conosce il valore assoluto (si trova nelle tabelle). Riguardo all'energia interna ci sono idee diverse su come si tratta esattamente. Ad esempio: l'energia di una molla tesa, è parte dell'energia interna? In certe condizioni si può indicare la relazione tra gli scambi delle due grandezze: $dU = T dS$.

D: Che ruolo ha l'energia nel KPK?

R: Importantissimo, un ruolo unificatore dei diversi campi della fisica.

D: Alla base dell'approccio del KPK alla relatività, come faccio ad identificare E ed m?

R: Questo è il postulato iniziale che sostituisce il tradizionale postulato sull'invarianza della velocità della luce.

D: Come faccio a mostrare che la relatività non si colloca nella meccanica newtoniana?

R: Dal postulato energia identica alla massa deriva la relazione tra energia e quantità di moto relativistica, che comprende come caso particolare la meccanica newtoniana.

D: Qual'è il ruolo dei sistemi di riferimento?

R: Il solito nella cinematica relativistica. Ma riteniamo che la cinematica relativistica non sia importante come la dinamica, ed inoltre è più difficile dal punto di vista matematico.

D: Quale ruolo riveste nel KPK il calore specifico? principale o secondario?

R: secondario rispetto alla conducibilità termica, che mostra una molto maggiore variabilità tra le sostanze.

D: Quando potremo (prevedibilmente) disporre del necessario complemento relativistico al testo? Esso andrà a collocarsi a monte o a valle degli attuali tre volumi? Intendo dire: rivedremo tutta la fisica in chiave moderna, o proseguiremo secondo il tradizionale schema che vede la relatività come un'appendice colorita alle pregresse conoscenze?

R: A livello di scuola media inferiore non è previsto altro che il cap 27 del terzo volume (il quale tra parentesi contiene tutta la fisica moderna che riteniamo possibile svolgere a tale livello scolare). Ma riteniamo che l'impostazione della meccanica con la quantità di moto e l'energia dall'inizio siano una buona impostazione per sviluppi relativistici più completi e soddisfacenti.

D: In che modo è definita operativamente l'entropia?

R: La definizione operativa riguarda l'eguaglianza, l'unità ed i multipli. Come unità di entropia possiamo prendere l'entropia contenuta in $0,898 \text{ cm}^3$ di ghiaccio, oppure attraverso l'unità di energia e la temperatura del punto triplo dell'acqua. Per le grandezze del tipo sostanza la definizione di eguaglianza e dei multipli è triviale.

D: Come si guarda alle trasformazioni reversibili ed irreversibili nel KPK?

R: Semplicemente sono reversibili quelle trasformazioni nelle quali non c'è produzione di entropia, irreversibili tutte le altre.

D: Ha senso parlare di entropia di un corpo, oppure ha senso solo parlare di differenze di entropia?

R: I valori assoluti dell'entropia contenuta nelle sostanze si trovano sulle tabelle.

Domande fatte da G. Avitabile Università di Napoli Federico II

D: Che cosa significa flusso di entropia? Come si definisce il flusso di una grandezza la cui diminuzione in un sottosistema è più piccola del suo aumento in un altro?

R: Il flusso di entropia è il termine di corrente in una equazione di bilancio che ha anche il termine di produzione.

D: Perché il passaggio da un sistema a temperatura T_1 e uno a T_2 ad un sistema a temperatura intermedia T_3 si descrive meglio con un flusso di entropia (dimensioni E/T) che con un flusso di calore (dimensioni E)?

R: Se il problema è il calcolo di T_3 è più semplice usare l'energia, se invece si vuole calcolare l'entropia prodotta ...

D: Non viene menzionato esplicitamente il principio di conservazione della quantità di moto, principio cardine della fisica micro e macroscopica (esempio del decadimento).

R: Nel KPK questa proprietà intuitiva, come nel caso della carica elettrica, viene prima utilizzata e poi formalizzata in un secondo tempo.

D: A differenza dell'energia (scalare) la quantità di moto ha carattere vettoriale ed è un potente strumento che consente di risolvere i problemi d'urto.

R: Vero. Riteniamo che trattare il caso unidimensionale non limiti in alcun modo la ricchezza dell'approccio vettoriale, che comunque viene in un secondo tempo generalizzato a più dimensioni.

Osservazioni e domande fatte da G. Rinaudo Università di Torino

Premetto che considero estremamente utili e affascinanti molti aspetti dell'impostazione di Karlsruhe, in particolare il porre subito l'accento sul fatto che per descrivere certi fenomeni occorre tener conto dei flussi di due grandezze (energia e quantità di moto, energia ed entropia, energia e carica elettrica, etc.) e che i due flussi sono legati da una grandezza intensiva. Ciò che mi lascia perplessa nel pro-

getto sono alcune rigidità che considero eccessive e poco "economiche", nel senso che creano più difficoltà e confusione di quelle che risolvono. Faccio alcuni esempi ai quali lo schema si applica male.

D: Nelle reazioni nucleari ad esempio ci può interessare il flusso di energia o il tipo di nuclei e di particelle che si creano; inoltre è difficile identificare la "grandezza intensiva" che le regola. Considerazione analoghe valgono per le reazioni chimiche, nelle quali il "potenziale chimico" è legato alle diverse molecole che intervengono.

R: Anche per le reazioni nucleari la grandezza intensiva è il potenziale chimico, ma abbiamo deciso di utilizzare il valore assoluto calcolato come energia di riposo per mole perché possa essere utilizzato anche dagli insegnanti che non vogliono fare la parte di fisica chimica. Effettivamente i due valori sono identici nei limiti di pressioni e temperature "normali" per le 6 reazioni nucleari (10 K). Nel caso delle reazioni chimiche i valori del potenziale chimico si trovano nelle tabelle.

D: Nell'assorbimento ed emissione di radiazione elettromagnetica generalmente interessa il termine energetico. Lo scambio di quantità di moto e momento angolare è normalmente poco rilevante per la descrizione del fenomeno e diventa antieconomico introdurlo.

R: È vero che l'aspetto energetico è più importante. Infatti nel KPK non si parla quasi di p ed L dei fotoni, ma è importante sottolineare che essi sono particelle come le altre e quindi hanno quantità di moto e momento angolare.

D: Altro aspetto di rigidità è pretendere che sempre, in tutti i fenomeni termici, il termine "calore" nel linguaggio spontaneo stia per "entropia". Molti degli esempi fatti si spiegano altrettanto bene sostituendo a "calore" la parola "energia". A mio avviso, in prima battuta, la "correzione" da fare rispetto al linguaggio spontaneo è sostituire a "calore" il termine "variazione di energia" (primo principio). Chiarito ciò, si va poi alle ricerche di quell'altra grandezza che è necessaria per descrivere completamente i flussi che avvengono nel fenomeno, e quindi si introduce l'entropia e si enuncia il secondo principio.

R: Sfortunatamente, dal nostro punto di vista, lo sviluppo storico è stato esattamente questo, con la conseguenza di penalizzare gravemente l'aspetto intuitivo dell'entropia.

D: Le "grandezze fisiche" sono solo grandezze di stato oppure è utile di definire anche altre grandezze che hanno significato fisico in sé e non solo come utili relazioni matematiche? Esempi dati sono il lavoro, $L = F \cdot s$, e la "quantità di calore" $Q = cm \Delta T$. A mio avviso sono grandezze utilissime ed economiche (senza di esse non si saprebbe come misurare i flussi di energia e non si capirebbe neppure che cosa produce il flusso di energia), basta che non le si tratti come "grandezze di stato", caratteristiche di un corpo, perché non possono esserlo, per la loro stessa definizione.

R: Come rispose a questa domanda G. Job, dicendo che anche lasciare le grucce dopo una lunga ingessatura sembra impossibile, ma dopo averlo fatto arriva una sensazione di grande libertà riconquistata. Naturalmente, quando si deve calcolare non c'è nulla da cambiare. Il danno è dare nomi e simboli riservati ad oggetti matematici che non corrispondono a concetti utili.

Domande rispetto alla meccanica:

D: Perché, nella discussione delle correnti di quantità di moto non introducete subito esplicitamente il vettore quantità di moto ma ricorrete all'uso artificioso di correnti "positive" o "negative" che hanno, a mio avviso questi inconvenienti:

- creano continua confusione e necessità di continue precisazioni (ad. es. rispetto alla "freccia" che compaiono nei disegni);
- rendono un corpo privilegiato rispetto agli altri (in alcuni casi il "privilegio" è giustificato, ad. es. se l'altro corpo è la terra, ma in altri è arbitrario);
- il discorso vettoriale andrà comunque fatto nel passaggio al caso generale tridimensionale.

R: La decisione di incominciare l'insegnamento della meccanica con una sola componente del vettore „quantità di moto“ è basata unicamente su argomenti di metodo pratico. Si tratta di insegnare a studenti di 13 a 14 anni, con poca motivazione per le scienze. Non dimentichiamo che la fisica è la materia più odiata di tutte le materie scolastiche. Quindi, dobbiamo ridurre al minimo il formalismo matematico. Nelle classi di matematica si discutono i vettori due anni più tardi. La ragione più importante per cui la meccanica risulta così malvista non sono le difficoltà concettuali, ma le complicazioni matematiche, dovute al carattere vettoriale delle principali grandezze, ossia velocità, forza e quantità di moto. Di più, la maggioranza dei principi della meccanica si manifestano anche in una meccanica unidimensionale. E aggiungiamo che è buona pratica didattica introdurre o spiegare un fenomeno nella sua espressione più semplice. (Così come spieghiamo l'addizione con i numeri naturali e non con i numeri irrazionali o complessi.) A questo proposito, nella versione per la secondaria II (17 anni di età), la meccanica del KPK incomincia con la quantità di moto vettoriale.

D: Da dove viene la regola per cui "la quantità di moto fluisce spontaneamente da un corpo a velocità maggiore a un corpo a velocità minore"?

R: Questa regola è della stessa natura di alcune altre, come ad. es. „la carica elettrica fluisce spontaneamente da un corpo a potenziale maggiore a uno a potenziale minore“, o, „l'entropia fluisce da un corpo a temperatura maggiore a uno a temperatura minore“, etc. Queste relazioni si discutono nella termodinamica dei processi irreversibili. Hanno in comune il fatto che in questi processi si produce entropia, e per questa ragione sono irreversibili.

Così si spiega la scelta della parola „spontaneamente“. Se c'è un processo tra gli stati A e B, esso evolve nella direzione nella quale l'entropia aumenta e mai in quella opposta.

Commento alla discussione finale di sabato 30:

Le "forme di energia" sono importanti, perché rendono chiaro in modo sintetico, non solo il tipo di "portatore" di energia ma anche il tipo di accoppiamento che è richiesto al dispositivo della sorgente che la produce e al rivelatore che la riceve. Ad esempio quanto diciamo "energia luminosa", intendiamo sinteticamente una energia portata da un'onda e. m. che può essere "rivelata" ad esempio dalle cellule della retina dei nostri occhi e trasformata in un'altra forma di energia (elettrica) che può essere trasportata dal nervo ottico, ecc.

R: Ci sono parecchie obiezioni all'uso del concetto di forma di energia. Una prima è che molte volte non si distingue tra le forme di trasporto o trasferimento, e le forme di immagazzinamento. Si tratta di due metodi di categorizzazione distinti. Inoltre quelli che utilizzano queste categorie in generale non si rendono conto che:

- Una categorizzazione in forme di immagazzinamento è possibile solo approssimativamente, perché suppone che il sistema in considerazione si lascia decomporre in sottosistemi che non interagiscono. In pratica l'interazione può essere debole, ma mai rigorosamente nulla.
- Le categorie delle forme di trasporto non è una classificazione nel senso della matematica, ossia un trasporto può appartenere a due „forme“ contemporaneamente. Queste difficoltà si manifestano con una semplice osservazione: Domandare i valori numerici dell'energia in una certa forma. È facile calcolare o trovare il valore dell'energia cinetica di un corpo non-relativistico. Ma che valore ha l'energia chimica in una cellula elettrochimica? L'energia che viene dal sole, cosa è: energia solare, energia luminosa, energia elettromagnetica o calore? Si può fare girare un mulinello a luce (oggetto formato da 4 placche girevoli, da una parte speculari e dall'altra nere, contenuto sotto vuoto in un'ampolla di vetro): Quindi, forse l'energia del sole è meccanica? Ma in questo caso cosa è: cinetica, o lavoro? O l'energia di una molecola: Di che forma è: meccanica, termica, chimica, oscillatoria, cinetica, elettrica? Fortunatamente, possiamo insegnare fisica senza rispondere a queste domande. Ma questo mostra anche che la categorizzazione in forme non ha nessuna importanza scientifica. Rispetto all'esempio della domanda: Se vogliamo dire che siamo interessati all'energia della luce, allora diciamo: „energia della luce“, come parliamo della massa di un libro o della lunghezza di una tavola (e non introduciamo una „lunghezza tavolesca“)

QUANTITÀ DI MOTO DAL VOL. 1 DEL TESTO

F. HERRMANN
Der Karlsruher Physikkurs

Der Karlsruher Physikkurs



Volume 1

Energia
Quantità di moto
Entropia

Edizione italiana: settembre 2006
Redazione: Karen Haas, Prof. Friedrich Herrmann, Dr. Matthias Laukenmann,
Dr. Lorenzo Mingirulli, Dr. Petra Morawietz, Dr. Peter Schmälzle
Traduzione: Paolo Pianezzi
Disegni : F. Herrmann
www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de
www.scuoladecs.ti.ch

3. Quantità di moto e correnti di quantità di moto

Affrontiamo ora un'area vastissima della fisica: la meccanica. Per cominciare diamo una definizione provvisoria: la meccanica si occupa del moto degli oggetti. Andando avanti, ci renderemo conto sempre più che questa definizione è troppo riduttiva; per il momento è comunque sufficiente.

La meccanica è la parte più vecchia della fisica. Le leggi più importanti della meccanica sono conosciute da più di 200 anni. Per lungo tempo l'obiettivo dichiarato della fisica fu di riuscire a spiegare tutti gli aspetti della natura in modo meccanico, riconducendoli alla meccanica. Non solamente quei processi palesemente connessi al moto, ma anche processi termici, ottici, elettrici e chimici. Ne sarebbe conseguito che tutto il mondo non sarebbe altro che un enorme, complicatissimo "meccanismo".

Dall'inizio del XX° secolo sappiamo che questo punto di vista non è più sostenibile. Altre parti della fisica sono equiparate alla meccanica, per esempio l'elettrologia e la termologia. Inoltre, di solito in un processo oltre alla meccanica hanno un ruolo anche elettricità, calore e altri fenomeni fisici. Quindi, occupandoci della meccanica consideriamo sempre solo un aspetto dei processi: l'aspetto meccanico. Quando esaminiamo un oggetto ci interesserà sapere se e come si muove. Non ci interesserà la sua temperatura, sapere se è elettricamente carico o di quale colore sia; e ovviamente non ci occuperemo per niente di problemi che nulla hanno a che vedere con la fisica, come il suo prezzo o il fatto che sia bello o brutto.

Prima di cominciare con la meccanica, nel prossimo paragrafo, dobbiamo ancora imparare qualcosa sullo strumento più importante del fisico: la grandezza fisica.

Tabella 3.1. Nomi e abbreviazioni di alcune grandezze fisiche

Nome della grandezza	Simbolo
massa	m
velocità	v
tempo	t
volume	V
energia	E o L
pressione	P

3.1 Grandezze fisiche

È tipico della fisica descrivere la natura in modo quantitativo. Con "quantitativo" vogliamo dire che si esprime in numeri. Così un fisico non è soddisfatto se sa che un oggetto ha una temperatura elevata, una piccola massa o una bassa velocità. Tenta soprattutto di procurarsi i valori di temperatura, massa e velocità. Il suo scopo quindi potrebbe essere di calcolare o misurare che una temperatura è di 1530 °C, una massa di 5,3 milligrammi o una velocità di 882 metri al secondo.

Temperatura, massa e velocità sono dette *grandezze fisiche*. Ci sono molte altre grandezze fisiche. Molte di loro ti saranno già note, altre le conoscerai durante questo corso di fisica.

Le grandezze fisiche sono tra gli strumenti più importanti a disposizione del fisico.

Vogliamo qui richiamare alla memoria alcune regole fondamentali nella pratica con le grandezze fisiche; regole che conosci da tempo, magari senza esserne consapevole e magari senza averle sempre rispettate.

Ogni grandezza fisica viene abbreviata con una lettera. Queste abbreviazioni sono internazionali. In tabella 3.1 trovi alcuni esempi.

Nota che c'è differenza tra simboli in maiuscolo e in minuscolo. Spesso una lettera minuscola rappresenta una grandezza fisica diversa dalla rispettiva lettera maiuscola. Ad esempio v è la velocità mentre V è il volume. A volte per una grandezza sono ammessi più simboli. L'energia non si abbrevia solo con E , ma spesso anche con L .

Come già saprai, ogni grandezza fisica ha un'unità di misura. Il tempo si misura in secondi, l'energia in joule e la pressione in bar. La tabella 3.2 mostra alcuni esempi di unità di misura.

Tabella 3.2. Nomi e unità di misura di alcune grandezze fisiche

Nome della grandezza	Unità di misura
massa	chilogrammo
velocità	metri al secondo
tempo	secondo
volume	metro cubo
energia	joule
pressione	bar

Tabella 3.3. Nomi e unità di misura di alcune grandezze fisiche e abbreviazioni per entrambi

Nome della grandezza (simbolo)	Unità di misura (simbolo)
massa (m)	chilogrammo (kg)
velocità (v)	metri al secondo (m/s)
tempo (t)	secondo (s)
volume (V)	metro cubo (m ³)
energia (E)	joule (J)
pressione (p)	bar (bar)

L'unità rappresenta un quantitativo ben preciso della grandezza. Il valore di una grandezza è quindi sempre dato come multiplo o frazione della sua unità. Quando diciamo "l'energia contenuta nell'oggetto è di 1000 J" intendiamo che l'oggetto contiene 1000 volte l'unità di energia definita come "1 joule".

Esattamente come il nome di una grandezza, anche il nome della sua unità di misura viene abbreviato. Così "metro" è abbreviato con "m", "joule" con "J" e "secondo" con "s". Perché non nascano confusioni tra i simboli delle grandezze fisiche e quelli delle unità di misura, i simboli delle grandezze sono in corsivo. Quindi m è la grandezza fisica massa mentre m è l'unità di misura metro. Anche le unità di misura sono fissate a livello internazionale. In tabella 3.3 è riassunto quanto detto finora per alcune grandezze. La tabella contiene 1. i nomi di alcune grandezze 2. le abbreviazioni di questi nomi 3. le unità di misura corrispondenti 4. le abbreviazioni delle unità di misura.

Grazie alle abbreviazioni dei nomi e delle unità di misura, determinate affermazioni possono essere scritte in modo molto compatto. Invece di "la velocità è di cento metri al secondo" scriviamo semplicemente

$$v = 100 \text{ m/s.}$$

Oppure, invece di "l'energia è quarantamila joule" scriviamo

$$E = 40\,000 \text{ J.}$$

Importante: 1. Non confondere i nomi delle grandezze e delle unità di misura! 2. Non confondere i simboli delle grandezze e delle unità di misura!

Tabella 3.4. Prefissi con i quali si indicano multipli e frazioni delle unità di misura

Prefisso	Abbreviazione	Significato
chilo	k	migliaia
mega	M	milioni
giga	G	miliardi
tera	T	bilioni
milli	m	millesimi
micro	μ	milionesimi
nano	n	miliardesimi
pico	p	bilionesimi

Spesso si ha a che fare con valori molto grandi o molto piccoli di una grandezza fisica. In questo caso, come unità si possono usare dei multipli o delle frazioni dell'unità normale. Questi multipli e queste frazioni sono caratterizzate dal prefisso anteposto al nome dell'unità. Il significato dei prefissi è elencato in tabella 3.4. Ogni prefisso ha a sua volta un'abbreviazione. Anche le abbreviazioni sono in tabella 3.4. Ad esempio:

$$40\,000 \text{ Joule} = 40 \text{ kJ} = 0,04 \text{ MJ,}$$

oppure

$$0,000\,002 \text{ m} = 0,002 \text{ mm} = 2 \mu\text{m.}$$

Esercizi

1. Cita quattro grandezze (diverse da quelle in tabella 3.1), le loro unità di misura così come i simboli per le grandezze e le unità di misura.

2. Serviti dei prefissi elencati in tabella 3.4 per abbreviare:

$$E = 12\,000\,000 \text{ J}$$

$$v = 1\,500 \text{ m/s}$$

$$p = 110\,000 \text{ Pa.}$$

3. Esprimi la velocità $v = 72 \text{ km/h}$ nell'unità di misura m/s.

4. Cita delle unità di misura qualsiasi che oggi non sono più usate.

3.2 Quantità di moto e velocità

Secondo la nostra attuale definizione, la meccanica si occupa del moto di oggetti o, come si usa dire, di corpi.

Per poter cominciare una descrizione fisica del moto, dobbiamo munirci degli strumenti adatti. Ricorda che i nostri strumenti più importanti sono le grandezze fisiche. Poco alla volta conosceremo molte grandezze. Per ora possiamo accontentarci di due sole grandezze, due grandezze con le quali possiamo caratterizzare lo stato di moto di un corpo. Una ti è familiare da tempo: la velocità, abbreviata v . Per la velocità c'è tutta una serie di unità di misura: chilometri all'ora (chilometri orari), nodi, millimetri al giorno, ecc. L'unità usata in fisica, come già visto nel paragrafo precedente, è il metro al secondo, abbreviato m/s.

La seconda grandezza di cui abbiamo bisogno, ti è sicuramente sconosciuta come grandezza fisica, cioè come qualcosa a cui si possa assegnare un valore numerico. A parte questa proprietà però la conosci già bene. E ti familiarizzerai così in fretta con lei da essere in grado di precisarne i valori. Si tratta ancora di una grandezza con la quale descrivere il moto, con la quale per esempio distinguere un veicolo fermo da uno in movimento. Rispetto alla velocità ha però una particolarità: rappresenta qualcosa che è *contenuto* nel corpo quando si muove e

che non è vi contenuto quando è fermo. Ognuno conosce dei concetti che descrivono esattamente questa proprietà. Ognuno di noi dice ad esempio che un pesante vagone in movimento ha "slancio" o "impeto". Lo stesso vagone, quando è fermo, non ha né slancio né impeto. Le proprietà di ciò che viene comunemente chiamato slancio o impeto, coincidono molto bene con le proprietà della grandezza fisica che stiamo cercando. In effetti potremmo chiamarla così, la grandezza fisica, per esempio "slancio". Un termine settoriale si è però affermato. Questa grandezza è detta "quantità di moto". Il suo simbolo è p . (Attenzione: è lo stesso simbolo usato per la pressione.)

Un corpo in movimento contiene quantità di moto. Se si muove rapidamente ed è massiccio, contiene molta quantità di moto. Se non si muove, non contiene quantità di moto.

Come determinare quantitativamente la quantità di moto (slancio) contenuta in un corpo, verrà discusso più avanti. Vogliamo però conoscere subito l'unità di misura della quantità di moto. Il suo nome è *huygens*, abbreviato Hy, in onore del fisico Christian Huygens (1629-1695) che ha contribuito massicciamente alla scoperta della grandezza quantità di moto.

Studieremo ora a fondo le proprietà principali della grandezza p . Basta tener presente che sostanzialmente la quantità di moto è ciò che comunemente viene detto slancio.

Due auto identiche percorrono una strada, una velocemente, l'altra più adagio, fig. 3.1. In quale dei due veicoli c'è più quantità di moto? (Quale auto ha più slancio?) In quella che si muove più in fretta, che ha la velocità più alta.

Più la velocità di un corpo è elevata, più quantità di moto contiene.

Un autocarro e un'utilitaria si muovono affiancati alla stessa velocità, per esempio 60 km/h. Il peso dell'autocarro sia 8000 kg, quello dell'utilitaria 1200 kg, fig. 3.2. Quale dei due veicoli ha più quantità di moto questa volta? Naturalmente l'autocarro. La grandezza che si misura in kg e che viene comu-

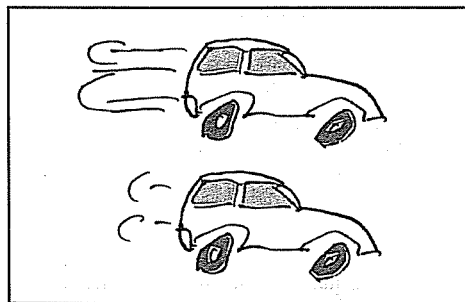


Fig. 3.1. Le due auto sono fatte allo stesso modo. Quella più veloce ha più quantità di moto.

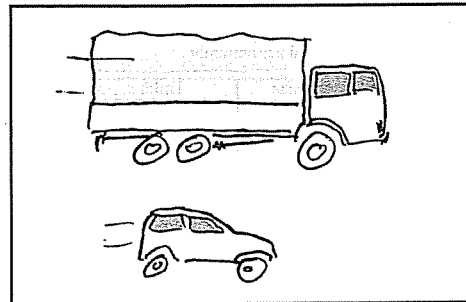


Fig. 3.2. I due veicoli viaggiano alla stessa velocità. Quello pesante ha più quantità di moto di quello leggero.

nemente chiamata "peso", nella scienza si chiama *massa*. Così possiamo dire:

Più la massa di un corpo è grande, più quantità di moto contiene.

Siamo già in grado dare la definizione dell'unità di misura della quantità di moto, l'*huygens*:

Un corpo con la massa di 1 kg e la velocità di 1 m/s contiene 1 Hy.

Faremo molti esperimenti nei quali l'attrito darebbe fastidio. Utilizziamo quindi dei veicoli con poco attrito. Un modo efficace per ridurre notevolmente l'attrito, consiste nel sostituire le ruote con un cuscinetto d'aria. La fig. 3.3 mostra una rotaia a cuscinetto d'aria come quelle che usiamo volentieri per questi esperimenti. La rotaia ha delle file di fori dai quali esce l'aria. Le slitte non toccano la rotaia, galleggiano su un cuscinetto d'aria.

Si consideri un veicolo praticamente privo di attrito che si muove su una rotaia orizzontale. Potrebbe trattarsi di un vagone ferroviario (senza locomotiva) su un binario orizzontale, ma anche di una slitta su un cuscinetto d'aria. Osserviamo il veicolo in tre momenti diversi, fig. 3.4. All'inizio, fig. 3.4a, il vagone si muove con una certa velocità; di conseguenza nel vagone c'è una certa quantità di moto. In un secondo momento, fig. 3.4b, la velocità è ancora la stessa e alla terza osservazione, fig. 3.4c, pure. La quantità di moto che il vagone aveva all'inizio ce-

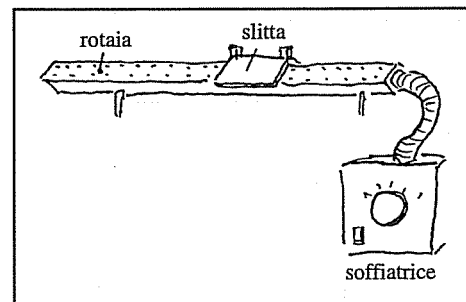


Fig. 3.3. Rotaia a cuscinetto d'aria. La slitta si muove quasi senza attrito.

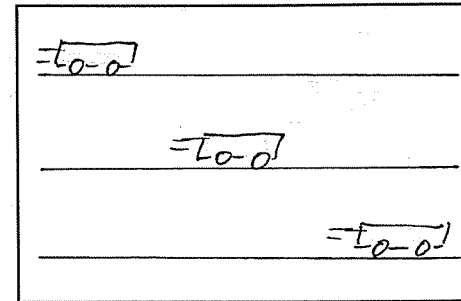


Fig. 3.4. Il vagone si muove quasi senza attrito. Non perde quasi quantità di moto.

l'ha ancora più tardi: la quantità di moto è semplicemente rimasta nel vagone - come una qualsiasi altra carica che stesse portando e di cui nulla fosse andato perso.

Se invece il veicolo fosse mal lubrificato, la sua carica di quantità di moto diminuirebbe nel tempo. Cosa succede in questo caso alla quantità di moto, dove va a finire, verrà esaminato più avanti. Per ora sperimenteremo solamente con veicoli che si muovono senza o con un trascurabile attrito.

La fig. 3.5a mostra due slitte identiche; quella a sinistra, slitta A, si muove verso destra, quella a destra, slitta B, è ferma. Poco tempo dopo, fig. 3.5b, A urta B e osserviamo che dopo l'urto A è ferma e B si muove verso destra. Vogliamo chiarire questo processo, spiegando cos'è successo alla quantità di moto. All'inizio, cioè prima dell'urto, A aveva una certa quantità di moto, diciamo 12 Hy, B non ne aveva. Durante l'urto tutta la quantità di moto di A passa su B. Tutti i 12 Hy sono stati scaricati da A su B così che dopo l'urto, la slitta A non ha più quantità di moto.

La quantità di moto può passare da un corpo a un altro.

Nell'esperimento in fig. 3.5, tra le due slitte c'è un respingente a molla. Ripetiamo ora l'esperimento, ma questa volta con un respingente totalmente anelastico: sostituiamo la molla con un po' di plastilina, fig.

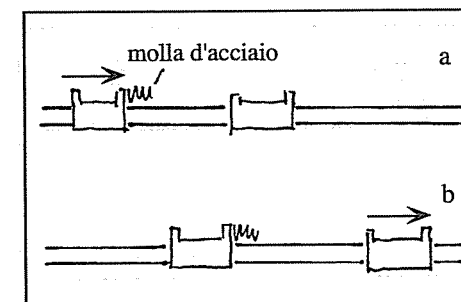


Fig. 3.5. Prima dell'urto (a) la slitta a sinistra si muove e quella a destra è ferma. Dopo (b) si muove quella a destra ed è ferma quella a sinistra.

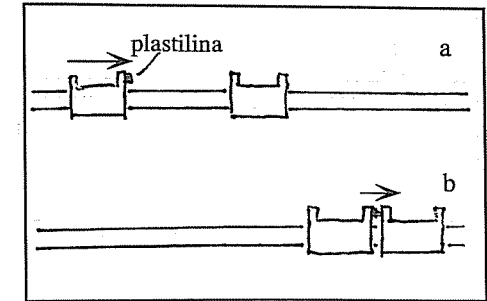


Fig. 3.6. Prima dell'urto (a) la slitta a sinistra si muove e quella a destra è ferma. Dopo (b) si muovono entrambe, ma a velocità ridotta.

3.6. Questa volta l'esperimento procede diversamente. Come prima, all'inizio la slitta A si muove e la slitta B è ferma. Dopo l'urto però, le due slitte si muovono verso destra alla stessa velocità. Velocità comunque minore di quella della slitta A prima dell'urto. Come si spiega? Questa volta non tutta la quantità di moto è passata da una slitta all'altra. I 12 Hy si sono piuttosto suddivisi metà-metà su A e B, così che alla fine ogni slitta ha 6 Hy.

La quantità di moto si può distribuire su più corpi.

Quello che è successo alla quantità di moto in fig. 3.6, è paragonabile a ciò che succede all'acqua in fig. 3.7. In fig. 3.7a tutta l'acqua è nel recipiente a sinistra. Dopo aver aperto il rubinetto, esattamente metà dell'acqua fluisce nel recipiente a destra. L'acqua si distribuisce quindi tra i due recipienti, così come durante l'urto in fig. 3.6, la quantità di moto si distribuisce sulle due slitte.

Facciamo ora urtare la slitta A (con il respingente anelastico) non contro una, ma contro due slitte B e C agganciate tra loro, fig. 3.8. Adesso la quantità di moto che A aveva all'inizio, si distribuisce equamente su tutti e tre le slitte A, B e C. Ogni slitta ha ora solo 1/3 della quantità di moto iniziale di A. Se la quantità di moto iniziale di A era 12 Hy, dopo l'urto ogni slitta ha 4 Hy.

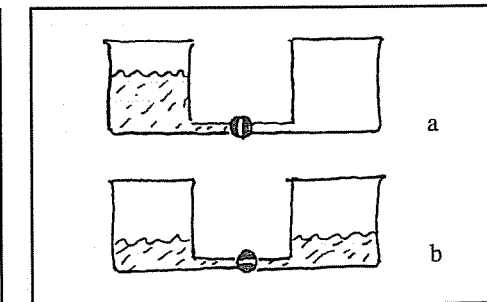


Fig. 3.7. L'acqua si distribuisce nei due recipienti così come la quantità di moto in fig. 3.6 si distribuisce sulle due slitte.

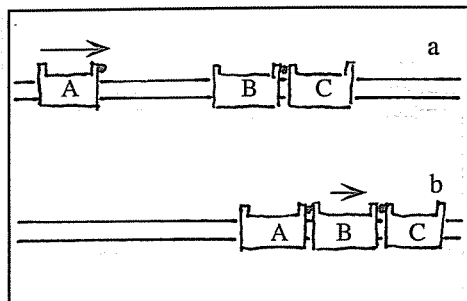


Fig. 3.8. Nell'urto la quantità di moto di A si distribuisce su tutti e tre le slitte A, B e C.

Se facciamo urtare A contro 3, 4 o 5 slitte ferme, la sua quantità di moto si distribuirà su 4, 5 o 6 slitte. Più lungo è il "treno" contro il quale urta A, meno quantità di moto riceverà ogni singola slitta e più lentamente si muoverà il treno dopo l'urto.

Infine, invece che contro un treno di slitte, facciamo urtare A contro il respingente all'estremità della rotaia a cuscino d'aria, fig. 3.9. Naturalmente la slitta A si ferma immediatamente. Dove è finita questa volta la quantità di moto? Chi fa da controparte ad A nell'urto? La controparte è la rotaia. La quantità di moto si distribuisce quindi su A e sulla rotaia. La rotaia però è fissata a un tavolo. La quantità di moto si distribuisce quindi su slitta, rotaia e tavolo. Inoltre il tavolo è appoggiato per terra. La quantità di moto si distribuisce quindi anche a terra. In altre parole: la quantità di moto si scarica a terra. In questo modo viene per così dire "diluata" così tanto che non la si nota più.

Un'altra versione dell'ultimo esperimento è la seguente: lanciamo una slitta e, prima che raggiunga l'estremità della rotaia, spegniamo la soffiante. Il cuscino d'aria scompare, la slitta si adagia sulla rotaia e si ferma. Finché c'era il cuscino d'aria, il moto della slitta era senza attrito. Togliendo il cuscino d'aria facciamo intervenire l'attrito. Possiamo quindi concludere:

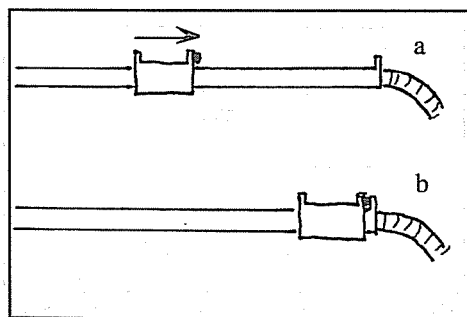


Fig. 3.9. Nell'urto, la quantità di moto della slitta defluisce a terra.

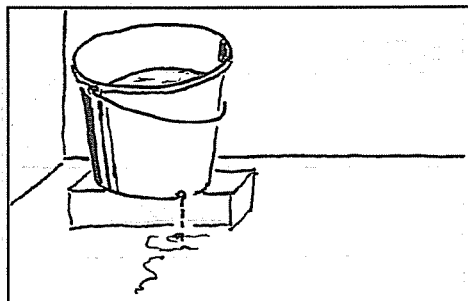


Fig. 3.10. Secchio bucato. L'acqua si disperde nell'ambiente circostante, fino a che non la si nota più.

Se un veicolo si muove con attrito in modo da fermarsi spontaneamente, la sua quantità di moto defluisce a terra.

Anche in questo caso è utile un paragone tra quantità di moto e acqua. Un veicolo mal lubrificato, che scarica a terra la sua quantità di moto, corrisponde a un secchio bucato, fig. 3.10. L'acqua si spande sempre più nell'ambiente circostante, fino a che non la si nota più.

Una cattiva lubrificazione, cioè l'attrito, è quindi come una falla per la quantità di moto. Un veicolo ben lubrificato è come un secchio senza buchi.

Facciamo ora un nuovo esperimento con due vagoni (o due slitte su una rotaia a cuscino d'aria) con un respingente anelastico. I vagoni siano spinti in modo tale da muoversi l'uno verso l'altro alla stessa velocità. Si urtano e restano fermi, fig. 3.11. Ci chiediamo nuovamente: dov'è finita la quantità di moto? Questa volta non può essere fluita a terra, perché i due vagoni sono sempre senza attrito. Per di più: due oggetti che si urtassero in questo modo nello spazio, resterebbero fermi allo stesso modo, e nello spazio non c'è la Terra che può assorbire la quantità di moto. La risposta alla nostra domanda deve essere questa: le quantità di moto dei due vagoni si sono in un qualche modo annullate, compensate. Ma come è possibile?

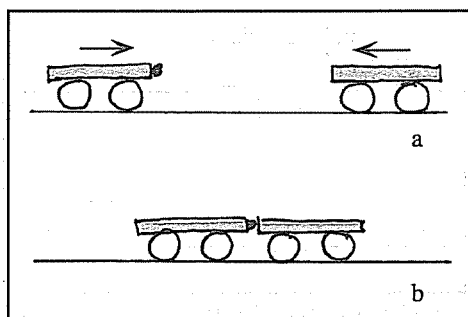


Fig. 3.11. Due carrelli si muovono alla stessa velocità l'uno verso l'altro. Nell'urto si fermano entrambi.

ELETTRICITÀ E CORRENTI ELETTRICHE DAL VOL. 2 DEL TESTO

F. HERRMANN
Der Karlsruher Physikkurs

Der Karlsruher Physikkurs



Volume 2

Dati
Elettricità
Luce

Edizione italiana: settembre 2006

Redazione: Karen Haas, Prof. Friedrich Herrmann, Dr. Matthias Laukenmann,
Dr. Lorenzo Mingirulli, Dr. Petra Morawietz, Dr. Peter Schmälzle

Traduzione: Paolo Pianezzi

Disegni: F. Herrmann

www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de

www.scuoladecs.ti.ch

16. Elettricità e correnti elettriche

Così come la meccanica si occupa di quantità di moto e della sua trasmissione e la termologia di calore e dei trasferimenti di calore, l'elettrologia si occupa di elettricità e delle correnti di elettricità.

Cosa intendiamo per elettricità? A questa domanda diamo per ora una risposta approssimativa e provvisoria. Cos'è l'elettricità lo capirai meglio man mano che ti addenterai nei prossimi capitoli. Per ora possiamo rispondere più o meno così: elettricità è ciò che "scorre" nei fili di un cavo di un apparecchio elettrico - se l'apparecchio è acceso. Ci possiamo immaginare l'elettricità come un qualcosa che si trova da qualche parte e che da un punto può raggiungerne un altro - così come possiamo fare per quantità di moto e entropia.

Solitamente di un corpo si può dire se ha quantità di moto o no: lo vediamo dal fatto che si muova o meno. Di un corpo possiamo anche "vedere" se ha entropia: lo deduciamo dalla sua temperatura. Invece non abbiamo nessun organo di senso predisposto a percepire il contenuto di elettricità di un oggetto. Percepimmo l'elettricità quando prendiamo la scossa, ma ovviamente vogliamo evitarlo perché è pericoloso.

Sai che l'elettricità ha un ruolo importante nella tecnica. Nei prossimi capitoli scoprirai il funzionamento di alcune apparecchiature tecniche.

Si possono suddividere le applicazioni tecniche dell'elettricità in due grandi categorie.

Una classe di applicazioni ha a che fare con la possibilità data dall'elettricità di trasmettere e immagazzinare energia. Infatti l'elettricità è un portatore di energia molto pratico. Di conseguenza, molti apparecchi elettrici servono a trasferire l'energia dall'elettricità a un altro portatore o da un altro portatore all'elettricità. Alcuni esempi sono il motore elettrico, il generatore e tutti gli apparecchi di riscaldamento elettrici.

Nella seconda classe di applicazioni l'elettricità viene utilizzata per la trasmissione, l'immagazzinamento e l'elaborazione di *dati*: di musica, di testi scritti e parlati, di immagini, numeri e altri segni. Questo campo della tecnica è detto elettronica.

A prima vista sembrerebbe che in natura l'elettricità non rivesta una grande importanza. L'unica manifestazione elettrica che tutti conoscono è il lampo. Ma l'apparenza inganna. In realtà la struttura del mondo

microscopico, del mondo degli atomi e delle molecole, è in gran parte determinata dall'elettricità. Gli atomi devono all'elettricità la loro struttura interna ed è l'elettricità che rende possibili i legami tra atomi. Di queste cose si occupa la fisica atomica.

16.1 Il circuito elettrico

La fig. 16.1 mostra una lampadina collegata a un interruttore e a una batteria. Una pila tascabile è fatta allo stesso modo. Dalla batteria, con il portatore elettricità, l'energia arriva alla lampadina. Lì viene trasferita al portatore luce. L'energia viene dalla batteria, arriva alla lampadina e esce dalla lampadina con la luce. Così facendo la batteria lentamente si svuota, cioè il contenuto di energia diminuisce.

Il portatore dell'energia, l'elettricità, prende un'altra strada: l'elettricità scorre "in circolo". Esce dalla batteria da uno dei collegamenti, il polo positivo, scorre in un filo fino alla lampadina, poi attraverso il filamento e continua nel secondo filo, attraverso l'interruttore, fino al polo negativo della batteria e, attraverso la batteria, torna al polo positivo. Visto che l'elettricità si muove lungo un percorso chiuso e che non si accumula da nessuna parte, un dispositivo del genere viene detto *circuito elettrico*. La corrente di elettricità è detta più semplicemente *corrente elettrica*.

L'elettricità non può scorrere in tutti i materiali. Sostanze nelle quali scorre bene sono dette *conduttori* elettrici. Sostanze nelle quali non può scorrere sono dette *isolanti* elettrici. I metalli fanno parte dei

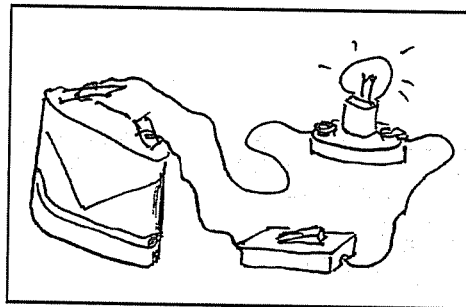


Fig. 16.1. Circuito di una pila tascabile

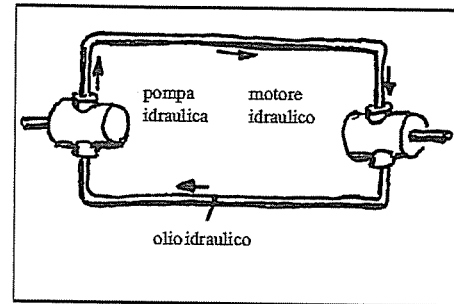


Fig. 16.2. Il circuito idraulico ha molte similitudini con un circuito elettrico

conduttori. Negli isolanti troviamo aria, vetro e la maggior parte delle materie plastiche.

L'elettricità è una grandezza fisica. Il simbolo per questa grandezza è Q . Viene misurata in coulomb, abbreviato in C.

Un circuito elettrico è molto simile a un circuito idraulico, come quello usato in una scavatrice, fig. 16.2. Anche in questo caso il portatore di energia, l'olio idraulico, scorre in un circuito chiuso. I diagrammi di flusso, figg. 16.3 e 16.4, evidenziano le similitudini.

Così come in un circuito idraulico è la pompa a far sì che il liquido scorra, nel nostro circuito elettrico è la batteria la causa del fluire dell'elettricità. Quindi possiamo immaginare la batteria come una specie di *pompa di elettricità*.

Ci sono altre sorgenti che cedono energia con il portatore elettricità, cioè altre pompe di elettricità. Una è la dinamo di bicicletta. Un apparecchio fondamentalmente identico si trova in ogni automobile con il nome di alternatore. Dinamo molto grandi, come quelle che si trovano nelle centrali elettriche, si chiamano generatori. Le cellule solari sono un altro esempio di pompa di elettricità. Mentre la dinamo riceve la sua energia con il portatore quantità di moto angolare, la cellula solare riceve la sua con la luce.

Batteria, dinamo e cellula solare sono pompe di elettricità.

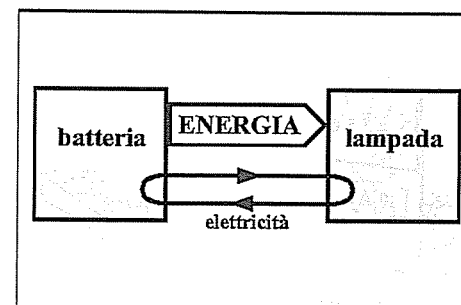


Fig. 16.3. Diagramma di flusso corrispondente al circuito elettrico in fig. 16.1.

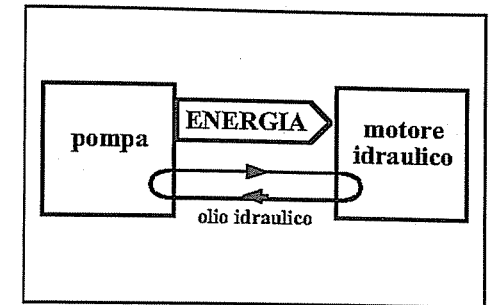


Fig. 16.4. Diagramma di flusso corrispondente al circuito idraulico in fig. 16.2

Il circuito di fig. 16.1 è inizialmente interrotto. Chiudiamo l'interruttore, scorre elettricità nella lampadina. Da dove viene questa elettricità? Dalla batteria, potremmo pensare, come l'energia. Invece non è così. Così come una pompa idraulica può cedere in uscita solo tanta acqua quanta ne ha ricevuta in entrata, una pompa di elettricità può cedere in uscita, cioè al polo positivo, solo tanta elettricità quanta ne ha ricevuta al polo negativo. Ma allora da dove viene l'elettricità?

È contenuta sin dall'inizio nei componenti del circuito: nella batteria, nella lampadina e nei fili. Ma questa elettricità non è stata messa lì dal fabbricante, c'è già di natura. Ogni pezzo di filo, ogni pezzo di metallo, contiene elettricità che comincia a scorrere appena il pezzo di filo o di metallo viene inserito in un circuito.

Quindi, se costruiamo un circuito non ci dobbiamo preoccupare di riempirlo di elettricità. È come se costruiamo dei circuiti idraulici con delle pompe, dei tubi e dei motori già riempiti di olio idraulico. Questi circuiti possono funzionare immediatamente, non devono prima essere riempiti d'olio.

In seguito ci occuperemo molto di circuiti elettrici, anche di quelli complicati. Quindi vale la pena introdurre dei simboli per la loro rappresentazione. La fig. 16.5 mostra i simboli per una batteria, un interruttore aperto, una lampadina e un motore elettrico. Un filo, cioè una conduttura per l'elettricità, è rappresentato semplicemente con una linea dritta. Il

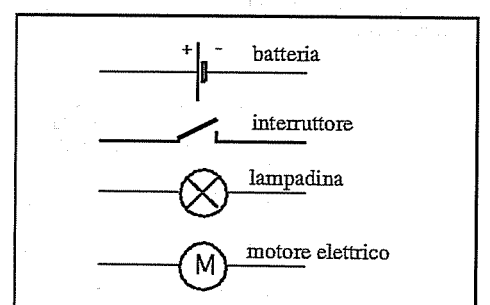


Fig. 16.5. Simboli di alcuni componenti elettrici: batteria, interruttore aperto, lampadina e motore elettrico.

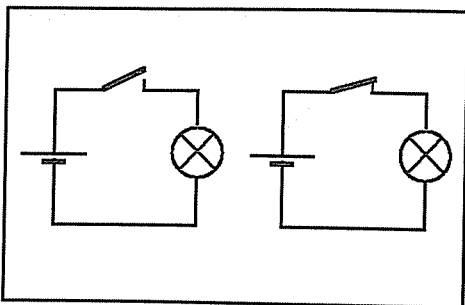


Fig. 16.6. Rappresentazione simbolica del circuito elettrico in fig. 16.1 con l'interruttore in due posizioni diverse.

circuito di fig. 16.1 è rappresentato con i simboli in fig. 16.6, con l'interruttore una volta aperto e una volta chiuso.

La rappresentazione dei collegamenti tra cavi, interruttori, batterie, lampadine, ecc., viene spesso detta *schema elettrico*.

16.2 L'intensità della corrente elettrica

Consideriamo un punto P di un circuito elettrico, fig. 16.7. In un secondo, da questo punto può scorrere molta o poca elettricità, a seconda della batteria e della lampadina utilizzate. Diciamo che l'*intensità della corrente elettrica* può essere grande o piccola. Analogamente alle altre intensità di corrente (p.es. l'intensità della corrente di energia, l'intensità della corrente d'acqua), definiamo:

$$\text{intensità della corrente elettrica} = \frac{\text{quantità di elettricità}}{\text{intervallo di tempo}}$$

L'intensità della corrente elettrica si abbrevia con la lettera *I*. Quindi

$$I = \frac{Q}{t}$$

Come unità di misura dell'intensità della corrente elettrica otteniamo

Tabella 16.1

Nome della grandezza	quantità di elettricità	intensità della corrente elettrica
Abbreviazione	<i>Q</i>	<i>I</i>
Nome dell'unità di misura	coulomb	ampere
Abbreviazione	C	A

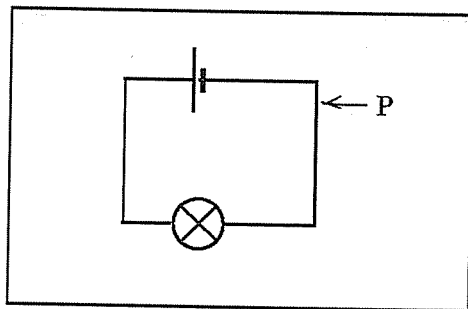


Fig. 16.7. Nel punto P del circuito scorre una determinata quantità di elettricità al secondo.

coulomb/secondo = C/s.

Di solito per questa unità composta si usa un nome più semplice: ampere, abbreviato A. Quindi

ampere = Coulomb/secondo oppure $A = C/s$.

In tabella 16.1 trovate riassunte le nuove grandezze con le loro unità di misura e le rispettive abbreviazioni.

Per farci un'idea di quali siano le correnti forti e quali quelle deboli, facciamo una misurazione. L'apparecchio che misura l'intensità della corrente elettrica si chiama *amperometro*. Un amperometro ha due collegamenti, fig. 16.8. Per misurare l'intensità della corrente nel filo in fig. 16.9a, stacciamo i cavi, fig. 16.9b. Ora abbiamo due estremità, che allacciamo ai due collegamenti dell'amperometro, fig. 16.9c. Adesso l'elettricità deve scorrere attraverso l'amperometro.

Per misurare l'intensità della corrente elettrica in un filo, separiamo il filo e allacciamo le due nuove estremità ai collegamenti dell'amperometro.

La fig. 16.10 mostra un circuito in cui è inserito un amperometro (simbolo per l'amperometro: un cerchio con la lettera A). L'amperometro segna 0,5 A, un valore tipico per una piccola lampadina. Se spostiamo l'amperometro in un altro punto del circuito, fig. 16.11, l'amperometro segna ovvia-

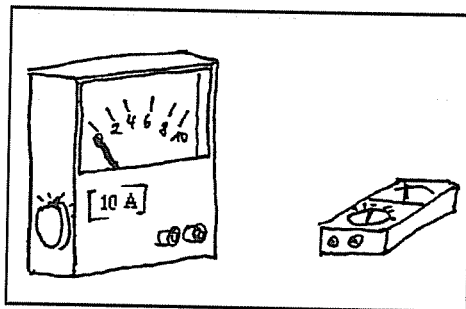


Fig. 16.8. Due amperometri.

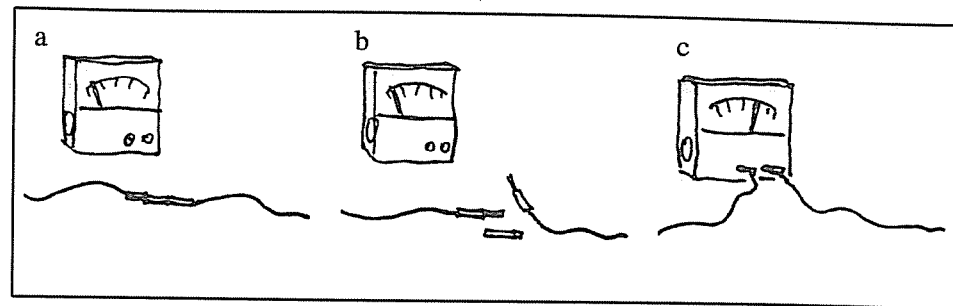


Fig. 16.9. Come misurare l'intensità della corrente elettrica in un filo.

mente lo stesso valore. In ogni punto del circuito deve scorrere la stessa quantità di elettricità ogni secondo, o più precisamente: attraverso ogni sezione del filo.

Possiamo anche inserire diversi amperometri nel circuito senza che l'intensità della corrente cambi, fig. 16.12. Ogni amperometro segna 0,5 A. È come se misurassimo con tre cronometri contemporaneamente il tempo impiegato da qualcuno a correre i cento metri.

In tabella 16.2 sono elencati alcuni valori tipici di intensità di corrente.

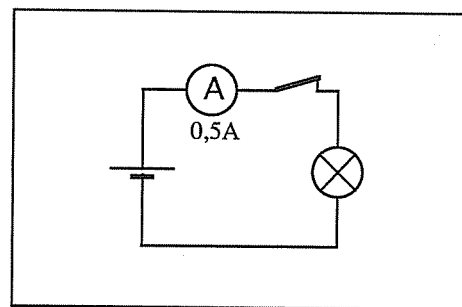


Fig. 16.10. Il circuito di fig. 16.1 con inserito un amperometro.

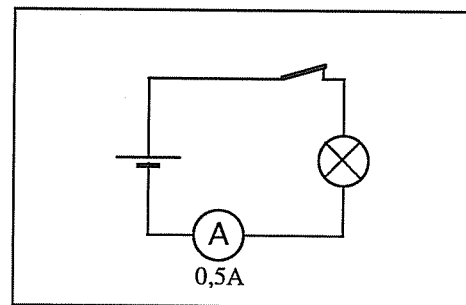


Fig. 16.11. Independentemente dal punto dove viene inserito nel circuito, l'amperometro segna sempre lo stesso valore.

16.3 La regola dei nodi

Un punto dove si incontrano diverse correnti si chiama *nodo*, non conta di che corrente si tratta: corrente di energia, corrente d'acqua o corrente elettrica.

La fig. 16.13 mostra un dispositivo costituito da elementi elettrici, che non rappresenta più un circuito elettrico nella sua forma più semplice. Uno schema del genere viene detto *circuito elettrico ramificato*.

Lo schema elettrico di fig. 16.13 contiene due nodi: il nodo P e il nodo Q. L'elettricità proviene dal polo positivo della batteria. Nel nodo P la corrente elettrica si ramifica. Una parte dell'elettricità scorre attraverso la lampadina di sinistra, il resto attraverso quella di destra. Nel nodo Q le due correnti si riuniscono nuovamente. Da Q in avanti tutta l'elettricità

Tabella 16.2

Intensità della corrente	
attraverso una lampadina da 75 W	0,34 A
nei conduttori di una calcoltrice tascabile	0,01 mA
nel motore di una locomotiva elettrica	500 A
in un lampo	alcune migliaia di A
nel motorino di un giocattolo	1 A

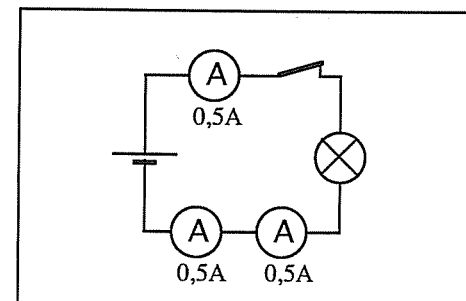


Fig. 16.12. Diversi amperometri inseriti "uno dopo l'altro" segnano lo stesso valore di uno solo.

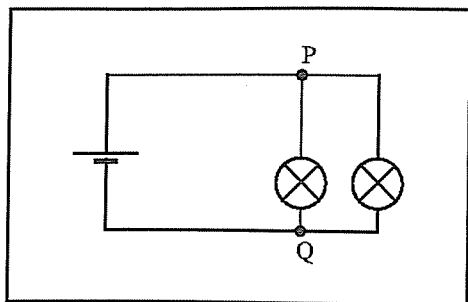


Fig. 16.13. Il circuito ramificato include i nodi P e Q.

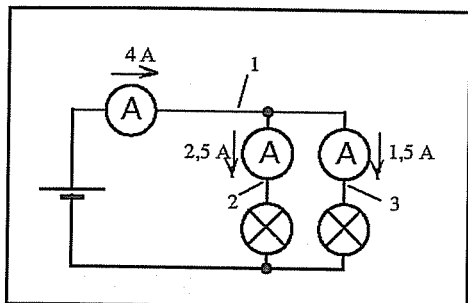


Fig. 16.14. Nel circuito di fig. 16.13 sono stati inseriti due amperometri.

scorre al polo negativo della batteria e, attraverso la batteria, torna al polo positivo.

La fig. 16.14 mostra lo stesso dispositivo di fig. 16.13, ma con tre amperometri inseriti nel circuito. L'amperometro che misura l'intensità I_1 della corrente nel conduttore 1, quindi prima della ramificazione, indica 4 ampere. Verso il nodo P scorrono 4 coulomb ogni secondo. L'amperometro nel conduttore 2 indica 2,5 A. Quindi attraverso questo conduttore defluiscono dal nodo P 2,5 C al secondo. Quanto indica il terzo amperometro? Affinché il bilancio sia corretto, da P dovrebbero defluire 1,5 C al secondo. Di conseguenza l'intensità della corrente nel conduttore 3 è 1,5 A.

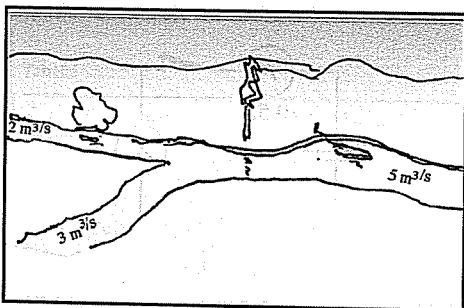


Fig. 16.15. La regola dei nodi vale anche per la confluenza di due fiumi.

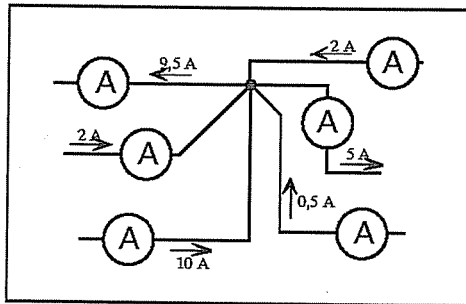


Fig. 16.16. Dettaglio di un circuito complesso con sei conduttori che confluiscono in un nodo.

La situazione è identica a quella della confluenza di due fiumi, fig. 16.15. Anche in questo caso dal "nodo" deve defluire la stessa quantità che affluisce al "nodo".

La fig. 16.16 mostra una sezione di uno schema elettrico particolarmente complicato. In un nodo si incontrano 6 correnti. Verifica che il bilancio sia esatto.

Abbiamo applicato la nostra ben nota regola dei nodi:

Le intensità delle correnti che fluiscono in un nodo sono complessivamente uguali alle intensità delle correnti che escono dal nodo.

Esercizi

1. Qual è l'intensità della corrente che scorre dal punto P in fig. 16.17a? In che direzione scorre?
2. Qual è l'intensità della corrente che scorre dal punto P in fig. 16.17b? In che direzione scorre?
3. Cosa possiamo dire delle intensità delle correnti nei punti P e Q in fig. 16.18a?
4. (a) Inserisci due interruttori nel circuito in fig. 16.18b in modo che le lampadine si possano accendere e spegnere separatamente. (b) Inserisci un solo interruttore in modo che le lampadine si possano accendere e spegnere assieme.

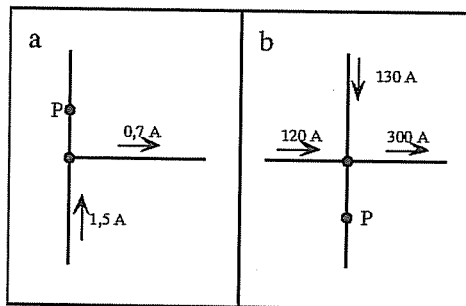


Fig. 16.17. Per gli esercizi 1 e 2

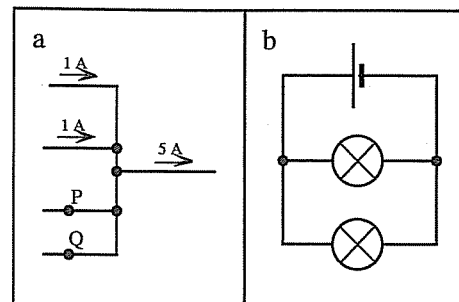


Fig. 16.18. Per gli esercizi 3 e 4

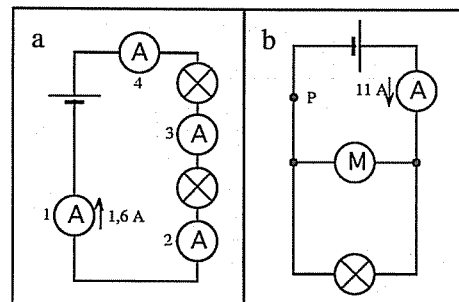


Fig. 16.19. Per gli esercizi 5 e 6

5. Che valore indicano gli amperometri 2, 3 e 4 in fig. 16.19a?
6. Qual è l'intensità della corrente nel punto P in fig. 16.19b? Inserisci nel circuito un amperometro che misuri l'intensità della corrente attraverso il motore e uno che misuri l'intensità della corrente attraverso la lampadina.

16.4 Il potenziale elettrico

Una pompa idraulica fa in modo che l'acqua all'uscita abbia una pressione maggiore che all'entrata, fig. 16.20. Genera una differenza di potenziale. Questa differenza di potenziale può essere la spinta per una corrente d'acqua.

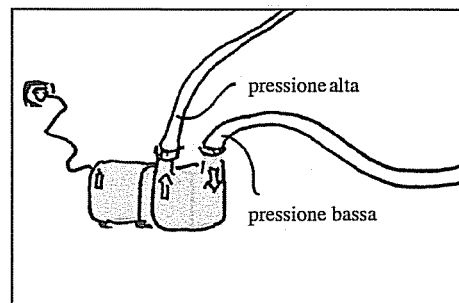


Fig. 16.20. All'uscita della pompa idraulica la pressione è maggiore che all'entrata.

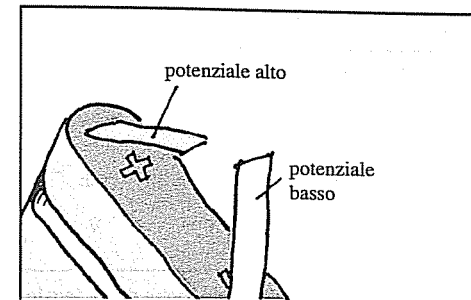


Fig. 16.21. Il potenziale elettrico è maggiore al polo positivo della batteria (uscita) che non al polo negativo (entrata).

Anche una batteria, cioè una pompa di elettricità, genera una spinta. E anche in questo caso c'è una grandezza che a un polo, il polo positivo, ha un valore maggiore che all'altro, il polo negativo, fig. 16.21. Questa grandezza si chiama *potenziale elettrico*. Il potenziale elettrico in un circuito elettrico corrisponde alla pressione in un circuito idraulico.

Una batteria genera una *differenza* di potenziale e questa differenza di potenziale rappresenta la spinta per una corrente elettrica.

Una pompa di elettricità (batteria, dinamo) genera una differenza di potenziale. La differenza di potenziale è la spinta per una corrente elettrica.

Al polo positivo il potenziale è più elevato che al polo negativo.

La fig. 16.22 mostra alcune pompe di elettricità: tre diversi tipi di batteria. Su tutte queste sorgenti di energia è indicata la differenza di potenziale.

L'unità di misura del potenziale è il volt, abbreviato V. Una comune batteria cilindrica genera una differenza di potenziale di 1,5 V, una batteria piatta 4,5 V e una batteria d'auto 12 V.

Invece di differenza di potenziale si dice spesso *tensione elettrica*, o semplicemente *tensione*. Quindi, tra i collegamenti di una batteria piatta c'è una tensione di 4,5 V.

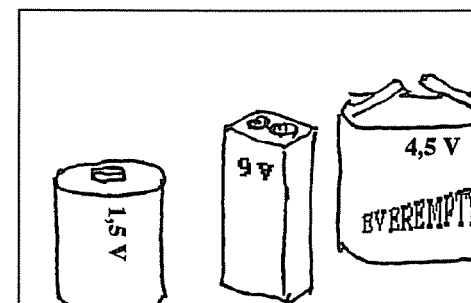


Fig. 16.22. Tre "pompe di elettricità" con i relativi valori di tensione.

Tabella 16.3

Nome della grandezza	potenziale elettrico	tensione elettrica
Abbreviazione	φ	U
Nome dell'unità di misura	volt	volt
Abbreviazione	V	V

Una differenza di potenziale viene detta tensione.

Come simbolo per il potenziale usiamo la lettera greca φ (leggi: fi), come simbolo per la tensione U . Quindi per la nostra batteria piatta

$$\varphi_+ - \varphi_- = 4,5 \text{ V,}$$

oppure

$$U = 4,5 \text{ V.}$$

In tabella 16.3 sono riassunti i nomi, le unità di misura e le abbreviazioni di queste grandezze.

Per scoprire il valore di una differenza di potenziale non dobbiamo necessariamente fidarci dell'indicazione riportata sulla batteria, visto che le tensioni sono facili da misurare. Per farlo abbiamo bisogno di un voltmetro. Un voltmetro ha due collegamenti

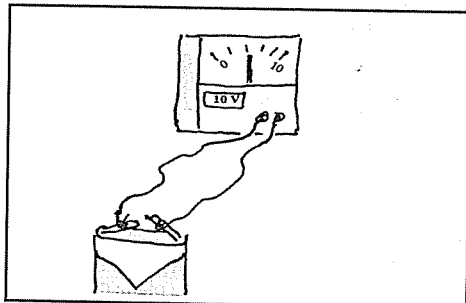


Fig. 16.23. Per misurare la tensione elettrica tra due punti li si allaccia ai collegamenti di un voltmetro.

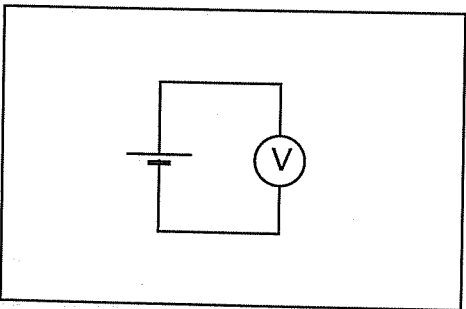


Fig. 16.24. Lo stesso dispositivo di fig. 16.23 rappresentato in simboli.

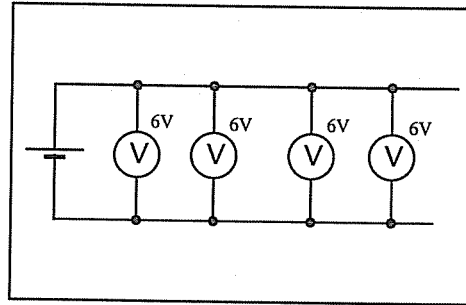


Fig. 16.25. Parecchi voltmetri "collegati in serie" segnano la stessa tensione di uno solo.

(come un amperometro). Per misurare la tensione tra due punti di un circuito colleghiamo entrambi i punti con il voltmetro, fig. 16.23 e 16.24.

I punti collegati tra loro da un cavo si trovano allo stesso potenziale. Di conseguenza i quattro voltmetri in fig. 16.25 indicano la stessa tensione.

I voltmetri sono costruiti in modo da essere attraversati da una corrente elettrica molto piccola. Un amperometro inserito in una derivazione verso un voltmetro, indicherà quindi, se non è molto sensibile, 0 A, fig. 16.26.

Quando una batteria è vuota (cioè quando tutta l'energia è uscita), naturalmente non riesce più a generare una differenza di potenziale. Perciò con un voltmetro possiamo verificare se una batteria è ancora utilizzabile.

Un alimentatore è una sorgente elettrica di energia che deve essere inserito nella presa. Un alimentatore riceve quindi energia con il portatore elettricità e la cede nuovamente con l'elettricità. C'è comunque una differenza tra entrata e uscita: la tensione elettrica all'uscita dell'alimentatore non è la stessa che all'entrata. Spesso la tensione all'uscita di un alimentatore è regolabile. Inoltre, tra i poli di una presa c'è una cosiddetta tensione alternata (una tensione il cui valore cambia molto rapidamente con il passare del tempo), mentre all'uscita della maggior parte degli alimentatori c'è una tensione continua, cioè una tensione costante nel tempo.

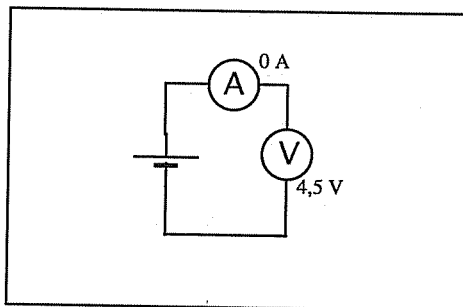


Fig. 16.26. Attraverso il voltmetro non scorre (quasi) corrente elettrica. L'amperometro indica 0 A.

Finito di stampare nel mese di giugno 2009
presso la litografia Graficarte
Via Castelbelvedere, 221 - Marano (NA)