

SEZIONE 5 CUPPARI ET AL., STRADE DIVERSE PER L'APPROCCIO ALL'ENERGIA NELLA SCUOLA SECONDARIA SUPERIORE DELLA NUOVA RIFORMA

STRADE DIVERSE PER L'APPROCCIO ALL'ENERGIA NELLA SCUOLA SECONDARIA SUPERIORE DELLA NUOVA RIFORMA

**Cuppari A.⁽¹⁾, Boltri M.⁽²⁾, Cantamessa G.⁽²⁾, Falabino S.⁽¹⁾, Marino T.⁽³⁾,
Marocchi D.⁽⁴⁾, Rinaudo G.⁽⁴⁾, Tamagno P.⁽⁵⁾, Vandoni L.⁽⁶⁾**

⁽¹⁾Liceo Scientifico Gobetti di Torino

⁽²⁾Liceo Scientifico Bobbio di Carignano

⁽³⁾Liceo Scientifico Curie di Collegno

⁽⁴⁾Dipartimento di Fisica dell'Università di Torino

⁽⁵⁾Liceo Scientifico Curie di Pinerolo

⁽⁶⁾Liceo Porporato di Pinerolo

Premessa

L'avvio della riforma della Scuola Secondaria di II grado ha comportato, per quel che riguarda l'insegnamento della fisica, modifiche importanti e in media positive al curriculum. Ciò che manca tuttavia nelle indicazioni nazionali, nell'affrontare i diversi temi di fisica ai vari livelli, è una chiara sottolineatura del ruolo essenziale del concetto di energia. Questa carenza si riflette poi nell'impostazione di molti libri di testo, nei quali il tema dell'energia viene spesso affrontato in modo confuso e marginale rispetto ad altri temi, con il risultato che non emergono le proprietà fondamentali dell'energia, che sono unificanti rispetto ai diversi fenomeni (meccanici, termici, elettromagnetici, ottici, ecc.).

Questo articolo presenta alcuni percorsi sviluppati e in parte sperimentati per introdurre l'energia fin dall'inizio della descrizione dei diversi fenomeni, mostrando come bastano piccole modifiche ai percorsi tradizionali per riportare l'energia al ruolo che le compete come descrittore essenziale, che allo stesso tempo unifica aspetti tradizionalmente visti come separati e disconnessi. Dopo un breve inquadramento in cui si esamina criticamente il ruolo che l'energia dovrebbe ricoprire, vengono discusse le modalità generali che sono alla base delle singole proposte e vengono presentati in dettaglio quattro percorsi riguardanti fenomeni meccanici, termici, elettromagnetici e luminosi. Per ciascun percorso, dopo un esame delle indicazioni nazionali, vengono discussi alcuni aspetti cruciali, necessari per una introduzione precoce del concetto di energia, quali le possibili attività di laboratorio, i materiali e le difficoltà che tipicamente si incontrano, nella speranza che, oltre al confronto tra i diversi modi di affrontare il tema dell'energia, si riesca ad allargare la discussione ai colleghi di altre scuole secondarie e coinvolgere docenti e ricercatori di altre discipline la cui didattica sul tema dell'energia è collegata direttamente o indirettamente a quella della fisica.

L'energia come concetto unificante

Siamo abituati a caratterizzare i diversi fenomeni fisici (meccanici, elettrici, termici, ecc.) attraverso i tipi di *interazione* che, durante il “fenomeno”, avvengono all'interno del corpo o del sistema, oppure fra corpi o sistemi diversi. Ad esempio, tradizionalmente, l'interazione è descritta

- nei fenomeni “meccanici” ricorrendo alle forze che agiscono sui corpi (leggi della dinamica e interazione gravitazionale),
- nei fenomeni “termici” ricorrendo alle differenze di temperatura fra i corpi o fra parti diverse dello stesso corpo (equilibrio termico e legge della calorimetria),
- nei fenomeni “elettrici” attraverso la forza di attrazione o repulsione elettrostatica e le leggi che governano la corrente elettrica nei circuiti,
- nei fenomeni “luminosi” partendo dalle leggi di propagazione della luce ed esaminando poi come la luce interagisce con la materia (ottica geometrica e ondulatoria), ecc.

In tutti questi fenomeni si arriva prima o poi a scoprire che la descrizione non è completa se non si introduce l'*energia*, che è una grandezza fondamentale per la descrizione del singolo tipo di fenomeno, ma addirittura essenziale per la descrizione di tutti quei fenomeni (che sono praticamente la totalità dei fenomeni reali) in cui l'interazione non è puramente meccanica, termica, elettrica, ecc., ma ha aspetti comuni alle diverse tipologie.

L'energia è pertanto una *grandezza unificante* dei diversi tipi di interazione, anche se si arriva a definirla e calcolarla ricorrendo a dei “descrittori” tipici delle singole interazioni (forza, temperatura, corrente elettrica, ecc.). Purtroppo è proprio il fatto di usare descrittori tipici delle singole interazioni che fa sì che, alla fine, tali descrittori appaiano più fondamentali dell'energia e, soprattutto, non vengano evidenziate in modo sufficiente le proprietà unificanti dell'energia, comuni a tutti i fenomeni. Esse sono:

- l'energia è una *variabile “di stato”*, dipende cioè dallo stato del corpo o del sistema in un certo istante, e non dalla sua storia precedente (ad esempio l'energia cinetica dipende dalla massa e dal quadrato della velocità, quella potenziale gravitazionale dipende dalla massa e dalla posizione, l'energia interna termica dipende da massa, temperatura e calore specifico, ecc.),
- l'energia ha forme diverse e si può *trasformare* da una forma all'altra grazie a diversi tipi di interazione (ad esempio da “potenziale gravitazionale” a “cinetica” per l'azione della forza peso),
- l'energia si può *trasferire* da un corpo all'altro grazie a diversi tipi di interazione (ad esempio si trasferisce energia cinetica in una interazione meccanica come un urto),
- nei trasferimenti e trasformazioni globalmente *si conserva*,
- tuttavia non tutte le interazioni portano a risultati egualmente “utili”, perché c'è sempre un *degrado* dell'energia (tipicamente l'energia si trasforma in energia termica di bassa temperatura, difficilmente riutilizzabile per il secondo principio della termodinamica).

Ne segue chiaramente che l'energia è un *descrittore essenziale delle interazioni* in cui avvengono trasferimenti, trasformazioni, immagazzinamenti, ecc. Da notare che, a livello globale, intuitivo e qualitativo, queste proprietà sono ben presenti anche a un ragazzino piccolo e in genere a chiunque colga il significato di energia in base all'uso che se ne fa nel linguaggio

quotidiano: il problema è di arrivare alla *definizione operativa* dell'energia nei diversi fenomeni, alla sua *misura e calcolo quantitativo*. Nella didattica tradizionale, invece, l'approccio è spesso invertito: ci si preoccupa con dettaglio eccessivo di tutti i passaggi che permettono di giungere alla definizione e misura rigorosa dell'energia, con il risultato che, alla fine, si perde completamente di vista il quadro globale e si fa quindi fatica a riconoscere, in quella grandezza che si è così faticosamente riusciti a definire e misurare, le proprietà dell'energia che nella vita quotidiana sono percepite chiaramente e che sono, in definitiva, le più importanti. C'è, ad esempio, un libro di testo, anche pregevole sotto altri aspetti, in cui occorre arrivare a pagina 156 del volume sulla meccanica per incontrare per la prima volta la parola "energia"!

Ciò è in parte conseguenza del fatto che nelle *indicazioni nazionali* la strada verso l'energia non è indicata in modo esplicito e chiaro, anche se le indicazioni non escludono che si possano seguire strade indirette. Infatti, anche se negli obiettivi di apprendimento dei singoli temi spesso non è indicato esplicitamente come e con quale peso parlare di energia, nella premessa generale al primo biennio si raccomanda di abituare "lo studente a semplificare e modellizzare situazioni reali, a risolvere problemi e ad avere consapevolezza critica del proprio operato": si lasciano quindi aperte strade per giungere, già nel primo biennio, a una modellizzazione dei fenomeni che includa come parte essenziale l'aspetto energetico, perché non si vede come modellizzare un qualunque fenomeno "reale" senza capirne l'aspetto energetico!

Nel seguito, vedremo in dettaglio, per i singoli tipi di fenomeno e nel rispetto dello spirito se non della lettera delle indicazioni, come costruire un percorso che dia all'energia, fin dal biennio, il ruolo che le spetta nella descrizione e interpretazione dei fenomeni. Per motivi di spazio, descriveremo solo le linee del percorso, mentre per gli esempi dettagliati rimandiamo alla pagina della piattaforma DIFIMA dedicata alla Fisica nella Scuola Secondaria (DIFIMA Fisica, 2013)

La strada "meccanica" all'energia

Discutiamo con maggiore ampiezza i fenomeni meccanici perché sono quelli tradizionalmente trattati in modo più ampio e che pongono in qualche modo la base dell'approccio alla disciplina, anche per il loro stretto utilizzo della formalizzazione matematica.

Per la meccanica, l'indicazione nel primo biennio è: ".....i moti saranno affrontati innanzitutto dal punto di vista cinematico giungendo alla dinamica con una prima esposizione delle leggi di Newton, con particolare attenzione alla seconda legge. Dall'analisi dei fenomeni meccanici lo studente comincerà a familiarizzare con i concetti di lavoro ed energia, per arrivare a una prima trattazione della legge di conservazione dell'energia meccanica totale." Non è quindi indicato esplicitamente come si giunge al concetto di energia, anche se la traccia sembra essere quella tradizionale: inizio con la cinematica, una trattazione semplificata della seconda legge della dinamica, concetto di lavoro e infine concetto di energia. Essendo posto alla fine del percorso, il concetto di energia finisce col diventare la "ciliegina sulla torta", che viene messa se rimane tempo e se gli studenti riescono ad approdarvi dopo aver superato gli scogli della trattazione, sia pure semplificata, della seconda legge della dinamica, mentre dovrebbe essere l'obiettivo che ci si pone fin dall'inizio dello studio dei fenomeni meccanici: se non miriamo al concetto di energia, a che cosa serve studiare la dinamica? Solo a descrivere la traiettoria di un proiettile o dei pianeti come ai tempi di Newton?

Anche nelle raccomandazioni per il secondo biennio l'energia non ha un ruolo centrale, compare una frase generica riguardante “.....l'approfondimento del principio di conservazione dell'energia meccanica, applicato anche al moto dei fluidi e l'affronto degli altri principi di conservazione...che permetteranno allo studente di rileggere i fenomeni meccanici mediante grandezze diverse e di estenderne lo studio ai sistemi di corpi.” Sarebbe invece importante cominciare a trattare l'energia non come una delle tante grandezze utili, ma come la *grandezza fondamentale* per la descrizione dei fenomeni, anche in vista dell'estensione ai temi di fisica moderna proposti nel quinto anno.

Nelle indicazioni per il quinto anno si dice infatti “...l'aver affrontato l'equivalenza massa-energia gli permetterà di sviluppare un'interpretazione energetica dei fenomeni nucleari...la discussione delle teorie e dei risultati sperimentali che evidenziano la presenza di livelli energetici diversi nell'atomo.. ”. L'aspetto energetico è essenziale per la comprensione dei fenomeni relativistici e quantistici e non si può aspettare al quinto anno per iniziare a parlarne! Tutta l'attenzione all'aspetto energetico dei fenomeni meccanici che suggeriamo fin dal primo biennio può quindi essere vista anche come propedeutica all'introduzione al quinto anno dei fenomeni relativistici e quantistici.

Le difficoltà legate all'approccio tradizionale all'energia meccanica

Come già discusso sopra, il problema nasce principalmente dal fatto che l'approccio tradizionale alla dinamica, che si trova nella maggioranza dei libri di testo, segue un'impostazione newtoniana, nel senso che tutta l'attenzione è posta su forza, massa e accelerazione, ignorando l'energia.

Come ad esempio dichiara esplicitamente il Romeni all'inizio del primo capitolo [Romeni, 2012], lo scopo della dinamica viene limitato essenzialmente alle applicazioni della seconda legge: “il problema fondamentale della dinamica può essere così schematizzato: nota la massa di un corpo e le forze che agiscono su di esso, determinare l'accelerazione del corpo e le caratteristiche del suo moto...”, come se l'aspetto energetico non fosse essenziale per la completezza della descrizione del moto! Ciò significa che ci si ferma all'orizzonte della fisica del Seicento (i “principia” di Newton sono del 1687) quando effettivamente ciò che interessava era principalmente descrivere l'orbita dei pianeti o la traiettoria dei proiettili! Poiché non è indispensabile per risolvere il problema del calcolo delle traiettorie (anche se è utile, come riconosce lo stesso Romeni), il concetto di energia è quindi assente nella dinamica newtoniana.

Storicamente, si comincia a parlare di energia nel problema degli urti fra corpi rigidi, nei quali si riconosce che, oltre alla quantità di moto, si conserva anche un'altra grandezza, che è appunto l'energia, tuttavia l'energia rimane a livello di interesse “accademico” non essendo una grandezza rilevante per le applicazioni. Lo diventa, come è ben noto, con lo sviluppo delle “macchine” a partire dal Settecento, quando si capisce che è rilevante conoscere il “lavoro” fatto dalla macchina, cioè la variazione di energia “meccanica”, e valutarne la potenza¹. Storicamente quindi il concetto di lavoro è nato prima di quello di energia e questo spiega perché anche oggi il concetto di energia meccanica è spesso subordinato a quello di lavoro,

¹ In realtà il concetto di lavoro è antichissimo: lo si ritrova già nel “Libro dei morti” dell'antico Egitto, in cui si parla di remunerare il lavoro di un operaio che trasporta i massi per costruire la piramide sulla base del prodotto del numero di massi trasportati per la lunghezza del percorso (ringraziamo per l'interessante segnalazione il prof. Paolo Mascheretti dell'Università di Pavia).

come appare evidente dall'analisi della maggioranza dei libri di testo. Seguendo l'approccio storico, cioè introducendo l'energia attraverso il lavoro, si finisce quasi sempre di tralasciare la riflessione sulle proprietà caratteristiche dell'energia che sono essenziali perché permettono di riconoscere l'energia come *concetto unificante* dato di tutti i tipi di interazione (termica, elettrica, ecc.).

In primis c'è il fatto che l'energia è una *variabile di stato*, che dipende cioè dallo stato del sistema e non dal modo con cui questo stato è stato raggiunto, mentre il lavoro NON è una variabile di stato, perché, essendo l'integrale del prodotto di forza per spostamento, dipende sia dallo stato iniziale che da quello finale: ad esempio l'energia cinetica di un corpo di massa m che viaggia a velocità v è $\frac{1}{2}mv^2$, indipendentemente dal fatto che abbia raggiunto questa velocità perché ha frenato a partire da una velocità più alta utilizzando una forza che ha fatto un lavoro negativo o, viceversa, perché ha accelerato a partire da una velocità inferiore, mentre il lavoro fatto nei due casi può essere molto diverso! Così pure l'energia potenziale è funzione della posizione, (ad esempio nel campo della gravità vale mgh , dove g è l'accelerazione di gravità e h è l'altezza rispetto a un livello zero di riferimento) indipendentemente da come il corpo è arrivato al livello h : potrebbe esserci arrivato anche grazie al lavoro di forze non conservative!

Il fatto che l'energia sia una variabile di stato è essenziale per discutere tre proprietà unificanti dell'energia: *che si può trasformare*, *che può essere trasferita* e che, nei passaggi e nelle trasformazioni, globalmente *si conserva*. Nessuna di queste proprietà sarebbe valida se, nei passaggi e nelle trasformazioni di energia si dovesse conoscere "come" il corpo è giunto ad avere tale energia!

Oltre a non mettere in evidenza la differenza concettuale fra energia e lavoro (l'energia è una variabile di stato mentre il lavoro non lo è e serve solo a calcolare le variazioni di energia) spesso nel libro di testo non si dà neppure la motivazione per definire il "lavoro", cioè il fatto che, se le forze sono conservative, il lavoro non dipende da come esso viene ottenuto (se con un piccolo spostamento e una grande forza o viceversa, vedi "macchine semplici"). Se poi le forze non sono conservative, il lavoro dipende dallo spostamento, il che dovrebbe aprire la strada alla discussione che ci sono in gioco altri tipi di interazione in cui l'energia è ancora una grandezza fondamentale come descrittore, mentre il lavoro non lo è.

Infine, la crisi del concetto di energia meccanica introdotta attraverso il lavoro è evidentissima quando diventa difficile parlare di lavoro, perché viene a cadere il concetto di forza come concetto primario, come avviene nella relatività e nella meccanica quantistica: questo è un altro motivo per porre cura, fin dall'inizio, a non legare troppo strettamente l'energia ai concetti di forza e lavoro in modo da non doverne ripensare completamente il significato quando si giunge alla "fisica moderna".

Che cosa fare per introdurre correttamente l'energia per la via meccanica

In base alle considerazioni precedenti, gli aspetti da curare, pur senza discostarsi del tutto dall'approccio tradizionale qual è in generale quello del libro di testo, sono quindi:

- nella presentazione di qualunque problema meccanico, parlare di energia fin dall'inizio, facendo riferimento alla conoscenza intuitiva e "globale" che l'allievo ha del ruolo dell'energia nel fenomeno, e quindi non limitarsi alle leggi della dinamica newtoniana, come se queste tre leggi fossero sufficienti per descrivere completamente il moto, ma

richiamare l'attenzione sul fatto che ci sono altri aspetti che vanno tenuti in conto per descrivere il fenomeno;

- non subordinare l'energia al lavoro ma fare l'inverso, mettendo in evidenza la differenza fra i concetti di lavoro e di energia; in particolare insistere sulle proprietà che sono tipiche dell'energia mentre non lo sono del lavoro: l'energia meccanica è una variabile di stato, ha forme diverse (può essere potenziale o cinetica), si trasforma da una forma all'altra, viene trasferita da un corpo all'altro negli urti, mentre il lavoro non ha nessuna di queste proprietà;
- motivare l'introduzione del lavoro mettendo chiaramente in evidenza che il calcolo del lavoro permette di calcolare la variazione di energia fra lo stato iniziale e quello finale, note le forze applicate, e che, per le forze conservative, il lavoro dipende solo dallo stato iniziale e finale e non dalle modalità di spostamento intermedio,

Questi tre punti indicano anche il percorso da seguire per un approccio corretto: essenzialmente è necessario modificare la sequenza tradizionale "cinematica (velocità e accelerazione) → dinamica (forza e quantità di moto) → lavoro → energia meccanica" in favore di una sequenza:

energia (qualitativa) → forza → lavoro → energia (quantitativa)

Discutiamo in dettaglio un esempio per mostrare che ciò sia possibile senza sconvolgere interamente l'approccio tradizionale, iniziando dal moto più semplice, quello "rettilineo".

Un esempio: l'energia nel moto rettilineo

Nella maggior parte dei libri di testo si parte, giustamente, dal moto rettilineo perché è il più semplice e permette di riconoscere i descrittori essenziali del moto senza la complicazione della descrizione vettoriale. La descrizione viene fatta in quattro passi successivi, spesso molto separati temporalmente fra di loro perché messi in capitoli successivi: questa è la prima deformazione da superare, cioè il fatto che, prima di passare al passaggio concettuale successivo, si discutono tutti i tipi di moto (moto in due o tre dimensioni con la "composizione dei moti", moto circolare, oscillatorio, ecc.), perdendo così di vista il filo logico che dovrebbe portare subito, per ogni moto, all'identificazione del lavoro e dell'energia.

- *primo passo, la "cinematica"*: i descrittori sono distanza percorsa, tempo impiegato, velocità e accelerazione. Vengono date le relazioni analitiche tra queste variabili e la loro rappresentazione grafica, discussi i concetti di velocità "media" e velocità "istantanea", quest'ultimo essenziale per passare al concetto di accelerazione. La rappresentazione grafica della relazione fra distanza percorsa e tempo impiegato porta a pensare allo spazio come *funzione* continua del tempo e quindi anche alla velocità e accelerazione come funzioni del tempo. Compatibilmente con lo sviluppo del programma di matematica, si introduce anche il passaggio al limite e l'interpretazione di velocità e accelerazione come "derivate". Nei libri di testo dei Licei Scientifici e della Scienze Applicate questa parte è svolta nel primo biennio (vedasi ad esempio Walker 2010);
- *secondo passo, la "dinamica newtoniana"*: dopo la lunga parentesi cinematica (perché, prima di passare alla dinamica, si discutono gli aspetti cinematici di tutti i tipi di moto come accennato sopra) si arriva finalmente a chiedersi che cosa c'è alla base del moto e si introducono i "principi della dinamica". In genere il concetto di forza viene prima introdotto operativamente attraverso la "statica" (vedasi ad esempio Walker 2010), per poi essere ridefinito attraverso il secondo principio della dinamica che conduce anche alla

definizione dell'unità di misura SI, il newton. Da notare che, anche per la dinamica, prima di passare al passo successivo, si discutono gli aspetti "dinamici", nel senso di applicazioni del secondo principio, di tutti i tipi di moto (moto in due o tre dimensioni con la "composizione dei moti", moto circolare, oscillatorio, ecc.). Nei libri di testo dei Licei Scientifici e della Scienze Applicate questa parte è svolta in parte nel primo biennio (vedasi ad esempio Walker 2010) e poi ripresa e approfondita nel secondo biennio (vedasi ad esempio Caforio 2012, Walker 2012);

- *terzo passo, "lavoro" ed "energia"*. Il concetto di lavoro viene introdotto attraverso una definizione che viene giustificata come "completamento" della trattazione delle forze, rispetto alle quali il lavoro presenta il vantaggio di essere una grandezza scalare anziché vettoriale (Romeni 2012). In altri casi la giustificazione è "operativa": il lavoro permette di descrivere attività, come spingere il carrello al supermercato, che dipendono anche dallo "spostamento" oltre che dalla forza (Walker 2010). Definito il lavoro, si definisce l'equivalenza del lavoro con la variazione di energia cinetica dal teorema delle forze vive: è a questo punto che compare finalmente la parola "energia";
- *quarto passo, conservazione e "dissipazione" dell'energia meccanica*: il lavoro delle forze conservative porta anche alla definizione dell'energia potenziale e alla conservazione dell'energia. Le forze non conservative, come la forza di attrito, conducono invece a una dissipazione dell'energia meccanica per la quale si rimanda al capitolo della termodinamica. In alcuni testi (Romeni 2012) si accenna anche ad altre trasformazioni dell'energia meccanica che portano ad una variazione non dissipativa di energia meccanica, come ad esempio quella in energia elettrica attraverso una dinamo o quella inversa di un motore elettrico.

Che cosa cambiare:

- individuare, fin dall'inizio, l'energia come una grandezza fondamentale per descrivere il moto, accanto a velocità, accelerazione e forza, facendo riferimento all'idea intuitiva che ne ha l'allievo (ad esempio è diverso correre per 100 metri o per 2 km!);
- evitare di dedicare un tempo eccessivo alla separazione dei concetti di "velocità media" e "velocità istantanea": può essere utile in matematica per introdurre il concetto di passaggio al limite e il calcolo differenziale, ma in fisica può offuscare il significato fisico di *velocità istantanea*, che è la grandezza dinamicamente rilevante perché legata all'energia cinetica e che oggi si misura direttamente con strumenti di uso comune come i tachimetri; inoltre l'allievo ha fin da piccolo una percezione "corporea" diretta della velocità istantanea molto più chiara di quella di velocità media, che va invece costruita matematicamente attraverso le misure di spazio percorso e tempo impiegato;
- introdurre la definizione e la misura della forza attraverso il secondo principio della dinamica, e subito dopo il "lavoro" per giungere alla misura della variazione di energia,
- una volta fatto il passaggio attraverso il lavoro, fermarsi a discutere che la grandezza, la cui variazione è stata così misurata, ha tutte le caratteristiche che ci aspettiamo intuitivamente per l'energia.

L'intero percorso va portato a termine per il moto rettilineo prima di passare ad altri moti, in modo che se ne capisca l'organicità: si parte dall'idea intuitiva di energia e dalla percezione fisica di velocità istantanea, si passa attraverso la misura quantitativa di velocità e accelerazione, si calcolano forza e lavoro per giungere all'energia "quantitativa".

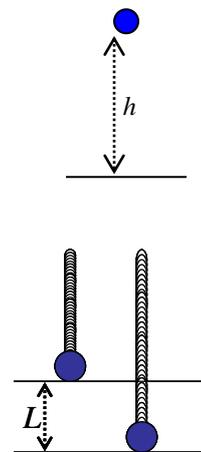
Il percorso va ripetuto nella sua completezza per ciascuno degli altri tipi di moto.

Un concetto difficile: l'energia potenziale

Il problema più delicato nel discutere l'energia meccanica è come trattare l'energia "potenziale" o, in generale, l'energia "di posizione": a differenza dell'energia cinetica, non è infatti evidente che l'energia potenziale possa essere considerata una grandezza caratteristica del corpo "A", perché dipende dalla posizione rispetto a un altro corpo "B" e dalla forza che si esercita fra i due corpi durante lo spostamento nella nuova posizione e quindi non può essere considerata caratteristica esclusiva del corpo A, ma dei due corpi insieme.

Il caso più frequente è quello dell'energia potenziale gravitazionale: una palla di massa m che cade a terra partendo da ferma da un'altezza h rispetto al suolo acquista un'energia cinetica $E_{kin}=1/2 m v^2$. Nella descrizione del moto, la si pone pari all'energia potenziale $E_{pot}= mgh$ che la palla aveva quando si trovava all'altezza h , per cui si dice che, nella caduta, l'energia potenziale "si trasforma" in energia cinetica e che l'energia meccanica totale, $E_{tot}= E_{kin} + E_{pot}$, si conserva. La stessa descrizione viene fatta del moto di un pendolo o della caduta su un piano inclinato. In questi casi il "corpo B" è la Terra, ma la sua massa è talmente grande rispetto a quella della pallina che si può considerarla ferma durante la caduta e considerare solo l'energia della palla, come se fosse isolata².

Diverso è il caso dell'energia potenziale "elastica". Ad esempio, se un corpo appeso a una molla di costante elastica k scende facendo allungare la molla di un tratto L , occorre esaminare l'intero sistema "massa-molla", considerando le energie potenziali gravitazionali della palla e della molla e l'energia potenziale elastica $E_{elastica}=1/2kL^2$ come energie potenziali del "sistema massa-molla".



La strada "termica" all'energia

Anche per l'energia termica i problemi sono simili a quelli della meccanica. La raccomandazione delle indicazioni nazionali per il primo biennio è: "...Lo studio dei fenomeni termici definirà, da un punto di vista macroscopico, le grandezze temperatura e quantità di calore scambiato introducendo il concetto di equilibrio termico e trattando i passaggi di stato."

Nel secondo biennio "...Si completerà lo studio dei fenomeni termici con le leggi dei gas, familiarizzando con la semplificazione concettuale del gas perfetto e con la relativa teoria

² In una trattazione rigorosa della "forza a distanza", come è appunto quella gravitazionale, occorrerebbe descrivere la forza in termini di "campo gravitazionale". Nello spazio intorno alla Terra c'è infatti un campo gravitazionale, con un potenziale gravitazionale dato dalla legge della gravitazione di Newton che è funzione della posizione. Quando la palla scende dall'altezza h fino al suolo, *scambia energia* con il campo e la trasforma in energia cinetica. Una descrizione di questo tipo è chiaramente molto più astratta di quella che abbiamo proposto interpretando l'energia potenziale come energia che è "immagazzinata" nella palla, senza fornire una chiave interpretativa più chiara, per cui, a nostro avviso, non vale la pena utilizzarla. Diverso è invece il caso del moto in un campo elettromagnetico, perché in quel caso, come discuteremo più avanti, l'energia "immagazzinata" nel campo diventa un concetto rilevante in vista dell'estensione all'onda elettromagnetica.

cinetica (...). Lo studio dei principi della termodinamica permetterà allo studente di generalizzare la legge di conservazione dell'energia e di comprendere i limiti intrinseci alle trasformazioni tra forme di energia, anche nelle loro implicazioni tecnologiche, in termini quantitativi e matematicamente formalizzati."

Prendendo alla lettera le indicazioni, si dovrebbe aspettare a parlare di energia nel secondo biennio associandola ai principi della termodinamica, mentre anche una massaia sa benissimo che ciò che passa dalla fiamma calda all'acqua della pentola è "energia": se ne accorge infatti quando deve pagare la bolletta del gas, che è una "bolletta di energia"!

Le difficoltà legate all'approccio tradizionale

I libri di testo, salvo rare eccezioni, si attengono fedelmente alla lettera delle indicazioni nazionali, non però allo spirito, come già discusso per la meccanica. Tipicamente, nel primo biennio, si inizia con la "termologia", si presentano termometri e misura della temperatura, si parla di "calore" senza chiarire esplicitamente la sua relazione con l'*energia termica*, mentre di energia si parla solo nel secondo biennio, introducendo i principi della termodinamica. Conseguenze legate al fatto di non chiarire fin dal primo biennio il significato del termine scientifico "calore" sono:

- nasce un pasticcio quando si discute la "conduzione del calore", perché spesso viene incluso l'*irraggiamento*, in cui ciò che si propaga non è affatto "calore" (cioè energia termica scambiata fra corpi di temperatura diversa) ma "radiazione termica o infrarossa" (cioè energia elettromagnetica);
- altra confusione riguarda i passaggi di stato, legata anche al termine "calore latente" che fa pensare al calore come a qualcosa che "sta dentro" al corpo, mentre sarebbe più chiaro parlare subito di energia che può "stare dentro" al corpo in forme diverse, come energia termica oppure come *energia dello stato di aggregazione fisica*;
- sempre nel biennio è probabile che si parli di "calore" e della sua misura nel corso di Scienze, discutendo i passaggi di stato e le reazioni chimiche, anche se le indicazioni nazionali non sono chiarissime al riguardo: come per la fisica, anche per le Scienze il discorso energetico sembra rinviato al secondo biennio, ma è esperienza comune che il calore viene spesso discusso prima nel corso di Scienze che nel corso di fisica, con la conseguenza che rimane, nello studente, questa prima "impronta chimica" (inclusa l'unità di misura!);
- introducendo il concetto di "calore" prima che quello di "energia termica" avviene una distorsione simile a quella sopra discussa che avviene introducendo il concetto di "lavoro" prima di quello di "energia meccanica": il calore finisce con l'apparire più fondamentale dell'energia, mentre non lo è, dato che il calore è solo il termine breve con cui si indica la quantità di energia termica che viene trasferita in presenza di una differenza di temperatura!

Che cosa fare per introdurre correttamente l'energia per la via termica

In base alle considerazioni precedenti, riassumiamo brevemente gli aspetti da curare volendo introdurre precocemente il concetto di energia nella presentazione di qualunque problema termico, pur senza discostarsi del tutto dall'approccio tradizionale qual è in generale quello del libro di testo:

- *parlare di energia fin dall'inizio*, facendo riferimento alla conoscenza intuitiva e "globale" che l'allievo ha del ruolo dell'energia nel fenomeno in base alle sue proprietà: ad esempio,

scaldando sulla fiamma calda di un fornello l'acqua contenuta in un pentolino, l'energia *passa* dalla fiamma calda all'acqua meno calda (l'energia prima era contenuta nella fiamma e dopo il passaggio è contenuta nell'acqua e nel pentolino che sono diventati più caldi);

- *individuare e misurare la temperatura come descrittore caratteristico dei fenomeni termici*: la temperatura è diversa dall'energia, ma allo stesso tempo è legata all'energia perché la variazione di temperatura è un indicatore del passaggio di energia: misurando di quanto cambia la temperatura possiamo infatti monitorare quanta energia è passata. La temperatura è una proprietà caratteristica del corpo (variabile di stato), dipende cioè dallo stato del corpo in un dato istante e non dalla storia precedente, ma è "atipica", rispetto ad altre grandezze che caratterizzano i corpi come il volume o la massa, perché varia in relazione alla temperatura dei corpi vicini (*equilibrio termico*), può variare in presenza di interazioni (fenomeni di attrito, reazioni chimiche, assorbimento di radiazione) e, infine, ha modalità di misura e di determinazione dell'unità di misura diverse da quelle delle altre grandezze (scala di temperatura e "punti fissi");
- *discutere il significato di equilibrio termico*: è un *principio* (il cosiddetto "principio zero" della termodinamica), basato sull'evidenza sperimentale attraverso un ragionamento di "bootstrap", in base al quale, per definire il funzionamento del termometro, si postula il principio che, quando corpi a temperatura diversa sono messi in contatto (come, appunto, il termometro e il corpo di cui si vuole misurare la temperatura), avvengano degli scambi di "energia termica" che continuano finché si raggiunge un equilibrio termico e tuttavia si usa il termometro per definire il raggiungimento dell'equilibrio termico;
- *discutere la percezione del flusso di energia* che avviene nei fenomeni di conduzione termica, nei quali si intuisce che qualcosa fluisce, *attraverso il contatto*, dal corpo a temperatura più alta (la fiamma) al corpo a temperatura più bassa (l'acqua e il pentolino) e che questa "cosa" non è materiale ma ha le proprietà dell'energia: infatti si *trasferisce* da un corpo all'altro, è *immagazzinata* nel corpo inizialmente più caldo e poi rimane immagazzinata nell'altro corpo, si *conserva*, perché l'energia che "esce" da un corpo "entra" nell'altro corpo (questo è in realtà un atto di fede nel caso in esame, come nella maggior parte dei casi!);
- *discutere il significato del termine "energia termica"*, che viene dato a questa forma di energia che fluisce attraverso il contatto da un corpo più caldo a un corpo meno caldo per ricordare che la sua variazione viene segnalata da una variazione di temperatura.

Qualche considerazione finale sul termine "calore". Anche se è un termine molto usato nel linguaggio quotidiano per indicare brevemente il flusso di energia termica, riteniamo che convenga evitare di usarlo, per chiarezza, nella discussione dei fenomeni termici, per non introdurre un termine diverso da quello di energia e perché sovente è ambiguo. Infatti si induce l'idea che il calore sia una "forma di energia", sia pure del tutto particolare, mentre il calore

- **non** è una "forma di energia" particolare, ma è solo un modo di chiamare brevemente l'energia che è entrata o uscita dal corpo;
- **non** è una caratteristica del corpo (proprietà essenziale dell'energia) ma è la caratteristica di un *processo*, misura cioè quanta energia entra o esce dal corpo in un processo di scambio di energia,
- **non** sta nel corpo (è errato dire "questa cosa contiene molto calore"): di qui deriva la principale fonte di confusione su calore ed energia, perché si tende erroneamente a pensare

che, essendo energia che entra o esce, la quantità di calore sia già nel corpo per poterne uscire o che rimanga nel corpo dopo che è entrata!

Questi tre punti indicano anche il percorso da seguire per un approccio corretto: modificare la sequenza tradizionale “temperatura → calore → energia termica” in favore di una sequenza:

energia (qualitativa) → temperatura → “calore” → energia (quantitativa)

Mettendo insieme quanto già discusso a proposito di lavoro, il primo principio della termodinamica, nella sua forma elementare, diventa semplicemente una descrizione dei diversi modi di cambiare l'energia “interna” U del corpo (o del “sistema”): si può cambiarla scambiando energia meccanica, $E_{scamb,mecc}$, mediante un lavoro L , oppure scambiando energia termica, $E_{scamb,term}$, mediante una quantità di calore Q :

$$\Delta U = E_{scamb,term} + E_{scamb,mecc} (= Q - L) \quad (1)$$

Scrivendo in questo modo il primo principio della termodinamica, facendo cioè riferimento alle energie scambiate e non al calore o al lavoro, diventa molto più ovvio che si tratta di un bilancio energetico: facendo la somma algebrica delle energie che entrano e che escono dal corpo, nelle due forme di energia meccanica e termica, si ottiene l'energia “interna”, cioè quella che rimane immagazzinata dentro il corpo!

L'espressione (1) è facilmente generalizzabile al caso in cui l'energia del corpo cambia grazie a un'interazione elettromagnetica, come avviene nell'*irraggiamento*, in cui viene scambiata un'energia elettromagnetica $E_{scamb,em}$: basta aggiungere un terzo termine a quelli termici e meccanici, senza dover invocare un fumoso “calore radiante”:

$$\Delta U = E_{scamb,term} + E_{scamb,mecc} + E_{scamb,em}$$

Un'altra riscrittura interessante del primo principio è quella che riguarda le reazioni chimiche, in particolare quelle che avvengono a pressione costante in un sistema gassoso: sono le reazioni che si studiano più frequentemente in laboratorio e che lo studente del secondo biennio sta probabilmente trattando nel corso parallelo di Scienze. In una trasformazione isobara, in genere ha scarso interesse lo scambio di energia meccanica (che è pari a $-p\Delta V$, dove p è la pressione e V il volume) che è comunque difficile da misurare, mentre si misura facilmente lo scambio di energia termica che i chimici chiamano “calore sviluppato o assorbito nella reazione” (che, per una mole di gas, è pari al prodotto $c_p\Delta T$, dove c_p è il calore specifico molare a pressione costante e T la temperatura): conviene perciò definire una grandezza che è l'*entalpia*, la cui variazione è pari alla somma della variazione di energia interna e dell'energia meccanica scambiata:

$$\Delta H = \Delta U + E_{scamb,mecc} = E_{scamb,term} \quad (\text{“}Q\text{” per i chimici!})$$

Anche l'entalpia è una variabile di stato e ha altre proprietà che sono utilissime per calcolare in generale le variazioni di energia in trasformazioni chimiche e fisiche, su cui varrebbe la pena aprire un discorso con i colleghi di Scienze per stabilire un linguaggio comune e trasparente che lo studente riconosca passando da una disciplina all'altra.

La strada “elettromagnetica” all'energia

Anche per l'elettromagnetismo la situazione è simile a quelle discusse prima per i fenomeni meccanici e termici, anzi nelle indicazioni nazionali per il primo biennio non si fa alcun accenno ai fenomeni elettromagnetici e quindi neppure alla relativa forma di energia. Come discusso nel seguito, pare invece possibile e quanto mai opportuno iniziare a discuterne già nel

primo biennio, sia pure ad un livello non approfondito teoricamente, per sottolineare fin dall'inizio il significato unificante del concetto di energia.

Secondo biennio. Anche qui le indicazioni nazionali seguono l'impostazione tradizionale, in base alla quale la conservazione dell'energia riguarda sostanzialmente solo i fenomeni meccanici e termodinamici, mentre "...*Lo studio dei fenomeni elettrici e magnetici permetterà allo studente di esaminare criticamente il concetto di interazione a distanza, già incontrato con la legge di gravitazione universale, e di arrivare al suo superamento mediante l'introduzione di interazioni mediate dal campo elettrico, del quale si darà anche una descrizione in termini di energia e potenziale, e dal campo magnetico.*" Dire che si darà anche una descrizione del campo elettrico in termini di energia e potenziale equivale a dire che, in fondo, il concetto di energia per la descrizione del campo elettrico non è così importante. Da notare che, invece, non si parla di energia in relazione al campo magnetico e neppure di energia "elettrica", cioè di quella forma di energia associata principalmente al funzionamento dei dispositivi elettrici che è forse la forma di energia meglio nota nella vita quotidiana!

Quinto anno: "...*Lo studente completerà lo studio dell'elettromagnetismo con l'induzione magnetica e le sue applicazioni, per giungere, privilegiando gli aspetti concettuali, alla sintesi costituita dalle equazioni di Maxwell. Lo studente affronterà anche lo studio delle onde elettromagnetiche, della loro produzione e propagazione, dei loro effetti e delle loro applicazioni nelle varie bande di frequenza.*"

Anche qui non si fa alcun cenno esplicito al concetto di energia. Passando poi alla fisica moderna si dice: "...*L'affermarsi del modello del quanto di luce potrà essere introdotto attraverso lo studio della radiazione termica e dell'ipotesi di Planck (affrontati anche solo in modo qualitativo), e sarà sviluppato da un lato con lo studio dell'effetto fotoelettrico e della sua interpretazione da parte di Einstein, e dall'altro lato con la discussione delle teorie e dei risultati sperimentali che evidenziano la presenza di livelli energetici discreti nell'atomo. L'evidenza sperimentale della natura ondulatoria della materia, postulata da De Broglie, ed il principio di indeterminazione potrebbero concludere il percorso in modo significativo*". L'energia appare quindi avere un ruolo rilevante solo nei "livelli energetici discreti", mentre appare fumoso il ruolo nello "studio della radiazione termica", dato che non è chiaro come si possa discutere di energia della radiazione termica e quindi del "quanto di luce", non avendo discusso di energia dell'onda elettromagnetica in generale.

Che cosa fare per introdurre l'energia nei fenomeni elettromagnetici

Per quanto detto prima si ritiene opportuno e possibile iniziare la trattazione dell'elettromagnetismo, e del ruolo dell'energia in tale ambito, già nel primo biennio, in particolare nella classe seconda, subito dopo una prima presentazione della conservazione dell'energia, ovviamente in modo non troppo approfondito dal punto di vista teorico, illustrando alcuni fenomeni elettrici e magnetici ben noti allo studente e dando spazio il più possibile alla sperimentazione. Molti studenti infatti hanno già affrontato questi temi nella scuola secondaria di primo grado, nell'ambito non soltanto di Scienze matematiche, chimiche, fisiche e naturali, ma anche di Educazione tecnica (corrente elettrica e circuiti elettrici elementari, trasformazioni tra le varie forme di energia, produzione dell'energia elettrica): bastano quindi poche ore di lezione per poter riprendere alcuni aspetti essenziali, in particolare dei circuiti elettrici, che mettano in luce le trasformazioni di altre forme di energia in energia elettrica o viceversa. Nel secondo biennio e nel quinto anno, nel riprendere e completare lo studio dell'elettromagnetismo, oltre alla sistematizzazione teorica, vanno curati tutti quegli aspetti che sono legati all'energia, avendo in mente sia le applicazioni tecnologiche sia

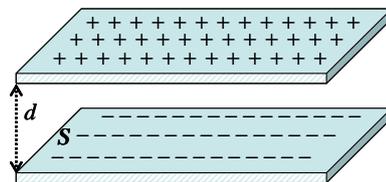
l'apertura verso le onde elettromagnetiche e la fisica dei quanti (il "quanto di luce" è un quanto di energia del campo elettromagnetico!). Discutiamo alcuni esempi.

Nel primo biennio:

- studiando i *fenomeni elettrostatici* elementari e osservandoli in laboratorio si può notare come l'elettrizzazione di un isolante per strofinio richieda un lavoro e quindi un dispendio di energia meccanica, così come nell'elettrizzazione di un conduttore mediante il generatore di Van de Graaff si abbia una trasformazione di energia meccanica in energia elettrica nel movimento della cinghia del generatore; inoltre corpi elettrizzati (isolanti o conduttori) possono esercitare forze su altri corpi carichi, spostandoli e quindi trasformando energia elettrica in energia meccanica. Anche osservando i fenomeni magnetici elementari si può notare come una calamita può attrarre un'altra calamita o un pezzo di materiale ferromagnetico sviluppando energia meccanica;
- si possono discutere, anche solo a livello qualitativo, gli aspetti energetici di semplici circuiti elettrici, mettendo in evidenza che in un circuito elettrico c'è un flusso di energia elettrica insieme alla corrente elettrica, costruendo un primo semplice modello del trasporto di energia legato a quello di "carica elettrica".

Secondo biennio e quinto anno

- *L'energia trasportata dalla corrente elettrica*: è appunto quella che, nella vita quotidiana, chiamiamo brevemente "energia elettrica" e la cui potenza è espressa dalla legge di Joule, $W = I V$. Spesso, nei libri di testo, questa legge è messa in secondo piano rispetto alla più popolare legge di Ohm, mentre è fondamentale per descrivere le trasformazioni di energia che avvengono in un circuito elettrico: fra queste vanno discusse ampiamente le trasformazioni in energia meccanica e non solo quelle in energia termica, anche se sono più facili da misurare.
- *La carica e scarica di un condensatore* permette di affrontare in modo non eccessivamente astratto il concetto di energia "immagazzinata" nel campo elettrico. Utilizzando in particolare un condensatore a facce piane e parallele, come quello della figura, si vede abbastanza chiaramente che il campo elettrico si forma man mano che si caricano le due armature e che ha un volume ben definito, essendo confinato dentro il volume hS compreso fra le due armature.
- *L'energia elettrostatica E_{el-st}* è l'energia spesa per caricare il condensatore e quindi anche quella che è immagazzinata nel campo, come ricordato sopra: è proporzionale al quadrato del campo elettrico \vec{E} e al volume (hS), $E_{el-st} = 1/2 \epsilon \vec{E}^2 \cdot (hS)$, dove ϵ è la costante dielettrica. A differenza di quanto proposto per l'energia potenziale gravitazionale, conviene pensare all'energia elettrostatica come *energia del campo elettrico* e non come "energia potenziale delle cariche elettriche", come si fa per un corpo nel campo gravitazionale, perché il concetto di energia del campo può essere poi esteso facilmente al campo magnetico per il quale non ci sono "cariche magnetiche" ma solo "dipoli magnetici", e soprattutto perché è indispensabile quando si trattano le onde elettromagnetiche, dato che l'onda e.m. trasporta appunto l'energia dei campi elettrici e magnetici che la formano.
- *L'energia immagazzinata in un campo magnetico stazionario*: classici esperimenti di Oersted, Faraday e Ampère e motore elettrico in corrente continua.



- L'energia elettromagnetica: esperimenti di Faraday sull'induzione elettromagnetica.
- *L'onda elettromagnetica e le sue proprietà*: dispositivi per produrla e rivelarla alle diverse lunghezze d'onda (es. il telefono cellulare); energia e potenza.
- Per finire, il "*quanto di energia elettromagnetica*", che apre tutto il capitolo della fisica quantistica: non lo affrontiamo in questo articolo perché ci porterebbe troppo lontano, ma è uno degli obiettivi che dà senso all'intero curriculum di fisica.

La strada "luminosa" all'energia

Anche per l'ottica la situazione è simile. Secondo le indicazioni nazionali, nel primo biennio si dovrebbero esaminare i fenomeni luminosi solo dal punto di vista "geometrico": "*...Attraverso lo studio dell'ottica geometrica, lo studente sarà in grado di interpretare i fenomeni della riflessione e della rifrazione della luce e il funzionamento dei principali strumenti ottici.*" Non si parla quindi esplicitamente di energia, però, come già notato a proposito dei fenomeni meccanici e termici, una descrizione, anche molto elementare, della propagazione della luce non può ignorare del tutto gli aspetti energetici, in particolare il fatto che la luce

- proviene da una "sorgente" che è sostanzialmente una sorgente di energia,
- produce degli effetti che sono legati all'energia trasportata,
- si trasforma in altre forme di energia, come energia termica, chimica, elettrica.

L'aspetto energetico è quindi essenziale per "modellizzare" i fenomeni luminosi *reali*, come richiesto nella premessa al primo biennio.

Nelle indicazioni nazionali per il secondo biennio l'energia non è citata con riferimento esplicito ai fenomeni luminosi, ma solo indirettamente con riferimento alle "forme di energia" nei fenomeni termici (vecchia abitudine di classificare l'irraggiamento tra i fenomeni termici anziché fra quelli elettromagnetici o luminosi!). Compare invece, nei contenuti suggeriti nelle indicazioni nazionali, la "*natura ondulatoria*" e vengono citati al riguardo i "*fenomeni relativi...alla sovrapposizione, interferenza e diffrazione*", senza però far riferimento esplicito alla misura della lunghezza d'onda (o della frequenza), che è invece importante per la comprensione del "quanto di luce" proposta nel quinto anno.

Quinto anno: "*L'affermarsi del modello del quanto di luce potrà essere introdotto attraverso lo studio della radiazione termica e dell'ipotesi di Planck (affrontati anche solo in modo qualitativo), e sarà sviluppato da un lato con lo studio dell'effetto fotoelettrico e della sua interpretazione da parte di Einstein*". Anche qui non si fa menzione diretta dell'aspetto energetico, che pure è essenziale per la comprensione del "quanto di luce"!

Non si può comunque aspettare al quinto anno per iniziare a parlare del ruolo dell'energia nella comprensione dei fenomeni luminosi: tutta l'attenzione all'aspetto energetico che suggeriamo fin dal primo biennio può quindi essere vista anche come propedeutica all'introduzione al quinto anno del quanto di luce e degli effetti quantistici.

Che cosa fare per introdurre l'energia nei fenomeni luminosi

Il fatto di privilegiare nel biennio gli aspetti strettamente geometrici dell'ottica è probabilmente dettato dal voler rafforzare l'interdisciplinarietà con la matematica. Tuttavia, come già ricordato, attenendosi in modo stretto alla lettera delle indicazioni, si perdono di vista gli

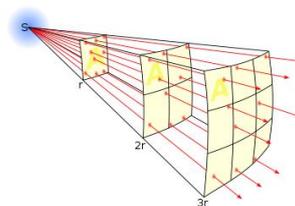
aspetti più tipicamente fisici dei fenomeni luminosi che sono quelli legati all'energia e sono anche quelli che l'allievo percepisce chiaramente in base alla sua esperienza della vita quotidiana. Per ovviare almeno in parte a questo inconveniente, riassumiamo gli aspetti fondamentali che conviene sottolineare e che sono accessibili fin dalla scuola media:

- il "raggio luminoso" parte da una sorgente che fornisce l'energia necessaria trasformando in energia luminosa altre forme di energia (ad esempio energia termica),
- il raggio viaggia nello spazio fino ad arrivare a un "utilizzatore", cioè al dispositivo in grado di trasformare l'energia luminosa in un'altra forma di energia, come energia termica, chimica (fotosintesi), o elettrica (cella fotovoltaica),
- quando incontra un "ostacolo", il raggio ha comportamenti diversi: può essere diffuso, riflesso, rifratto, e può anche trasmettersi al di là dell'ostacolo, portando con sé l'energia,
- la luce può avere diversi "colori", che possono dipendere dall'oggetto che la diffonde o dalla sorgente che la produce, ed è possibile "separarli" con un semplice prisma di vetro,
- ci sono colori che non "vediamo", come avviene per i raggi infrarossi, ma che vengono visti da opportuni dispositivi,
- l'energia portata dalla luce si comporta in modo molto diverso dall'energia meccanica o termica: viaggia anche nello spazio "vuoto", ciò che viaggia non è fatto di "materia", può essere assorbita, ci permette di "vedere", ecc.
- l'energia luminosa ha però le stesse proprietà generali delle altre forme di energia: si trasmette, si trasforma in altre forme di energia, passando e trasformandosi fa cose utili.

Questi aspetti si possono trattare senza difficoltà, a livello qualitativo e in alcuni casi anche quantitativo, già nel primo biennio. In particolare è utile esaminare semplici fenomeni in cui avviene una trasformazione dell'energia luminosa in altre forme di energia: fra tutti, il più semplice e familiare è scaldare un oggetto con la radiazione, che va letto come trasformazione di energia luminosa in energia termica e che può essere indagato anche quantitativamente misurando l'aumento di temperatura di un oggetto di massa e calore specifico noti esposto al sole o illuminato da una lampadina a incandescenza.

Da un semplice esperimento come questo emergono alcuni concetti non banali riguardanti l'energia luminosa, che sono fondamentali per l'interpretazione di ciò che si misura:

- si misura una "potenza", cioè l'energia trasportata nell'unità di tempo, proprio perché l'energia luminosa è "energia che viaggia" e si intercetta rivelandola durante un certo intervallo di tempo,
- si misura una "illuminazione", cioè una energia depositata nell'unità di tempo sull'unità di superficie, proprio perché l'energia non è concentrata in un punto, ma riempie uno spazio e si attenua con la distanza dalla sorgente con la "legge dell'inverso del quadrato".



Sono misure semplici, ma che aiutano a creare le prime modellizzazioni dei fenomeni ondulatori.

Per gli aspetti ondulatori veri e propri è meglio aspettare il secondo biennio, come suggerito dalle indicazioni nazionali. Fra tutti, è importante identificare e misurare le grandezze caratteristiche dell'onda, in particolare la lunghezza d'onda che permette di assegnare un

valore quantitativo al “colore”, cioè a quella proprietà particolare che siamo abituati a percepire qualitativamente fin da piccoli e che è legata strettamente all’energia portata dal “quanto di luce”, come si vedrà nel quinto anno. La strada passa per lo studio dei fenomeni di interferenza e diffrazione, citati nelle indicazioni nazionali, che vanno quindi approfonditi non solo per esplorare la “natura ondulatoria” della luce, ma soprattutto per capire come misurarne le proprietà caratteristiche.

Altri esperimenti che si possono affrontare nel secondo biennio e nell’ultimo anno per avvicinarsi agli aspetti quantistici presenti nella materia sono quelli relativi agli “spettri” luminosi, procedendo per passi gradualmente, che possono iniziare a livello qualitativo già nel primo biennio, come sopra ricordato, e sono:

- separare la luce nei suoi colori, prima con un semplice prisma, come già suggerito per il primo biennio, e poi con un reticolo di diffrazione, che permette di associare al colore una grandezza quantitativa, la “lunghezza d’onda”;
- esaminare, con un semplice *spettroscopio*, uno spettro luminoso: è un esperimento da farsi in collaborazione con il corso di Scienze, per riprendere dal corso di Scienze il significato delle linee spettrali “discrete” che sono legate alle sostanze con cui la luce interagisce,
- indagare, anche solo qualitativamente, la dipendenza del picco di colore e della sua intensità dalla *temperatura* della sorgente, che è l’aspetto rilevante per legare l’energia luminosa E alla lunghezza d’onda e quindi alla frequenza f , che è l’essenza della relazione di Planck, $E=hf$, in modo da rendere un po’ meno oscura la discussione sullo “spettro di corpo nero” con la quale molti testi iniziano la presentazione della fisica quantistica.

Una linea complementare, ma pure utilissima per aprire la strada alla fisica della materia suggerita fra gli approfondimenti del quinto anno, è quella dei fenomeni “optoelettronici”, che oggi hanno applicazioni importantissime in molti campi, dalle celle fotovoltaiche alle trasmissioni via etere. Tutto è basato sulla risposta elettrica all’eccitazione luminosa dei “semiconduttori”, cioè di quei materiali nei quali, a differenza di quanto avviene nei metalli, la densità di “elettroni quasi liberi” (o in generale di “portatori quasi liberi di carica elettrica”) può essere cambiata facilmente con scambi di energia termica o di energia elettromagnetica. Come suggeriamo nelle schede presentate in “DIFIMA Fisica 2013”, una sequenza possibile è

- iniziare con l’esame della variazione della resistenza elettrica di un semplice “fotoresistore” a semiconduttore, per indagare il meccanismo che è alla base della variazione della densità dei “portatori quasi liberi” in un semiconduttore in presenza di radiazione luminosa: il dispositivo non trasforma direttamente energia luminosa in energia elettrica, ma permette di *controllare* il passaggio di corrente elettrica utilizzando l’energia luminosa;
- passare all’esame di un “dispositivo attivo”, come il fotodiodo o la cella fotovoltaica, che è in grado di operare autonomamente la trasformazione di energia luminosa in energia elettrica;
- utilizzare dei LED (Light Emitting Diodes) per ottenere la trasformazione inversa, da energia elettrica a luminosa; scegliendo opportunamente un LED quasi monocromatico, si può anche ricavare e giustificare l’ordine di grandezza della costante h di Planck, correlando la lunghezza d’onda del LED con il valore del potenziale elettrico a cui avviene il brusco aumento di conduttività elettrica;

- speculare infine sull'analogia fra ciò che avviene in un fotodiodo e il meccanismo della fotosintesi, in cui, passando attraverso la trasformazione di energia luminosa in energia elettrica, si giunge al risultato finale di trasformare energia luminosa in energia chimica.

Conclusioni

La proposta qui presentata per l'introduzione precoce e approfondita dell'energia come concetto unificante dei diversi fenomeni fisici non vuole essere esaustiva di tutto ciò che si può fare e presenta sicuramente ancora dei passaggi che vanno rivisti perché non rigorosi o poco chiari. Siamo tuttavia convinti che oggi sia necessario un cambiamento di rotta in questa direzione, più deciso e meglio integrato con il resto del curriculum di quanto sia stato tentato finora in alcuni libri di testo. Vanno ancora aggiunti alcuni "capitoli" importanti, in primis quelli legati alla "fisica moderna" e in particolare quello sull'*energia nucleare*, la sua peculiarità e le sue trasformazioni. Ci stiamo lavorando, anzi rivolgiamo un invito alla collaborazione costruttiva attraverso la piattaforma DIFIMA a quanti sono convinti che oggi questo cambiamento di prospettiva è necessario.

Bibliografia

- Caforio, A., Ferilli, A. (2012). *FISICA! Le regole del gioco*. Ed. Le Monnier Scuola
- DIFIMA Fisica (2013). <http://difima.i-learn.unito.it/course/view.php?id=15>
- Romeni, C. (2012). "Fisica e realtà.blu", Ed Zanichelli
- Walker, J.S. (2010). "Corso di fisica. Primo biennio", Ed. linx - Pearson
- Walker, J.S. (2012). "Dalla meccanica alla fisica moderna, volume 1", Ed. linx - Pearson