

## **Piano Nazionale Lauree Scientifiche – Fisica: un percorso di laboratorio sulle tematiche energetiche**

A. Agliolo Gallitto e E. Fiordilino

*Dipartimento di Fisica, Università di Palermo - via Archirafi 36, I-90123 Palermo, Italia*

**Riassunto.** Il terremoto avvenuto in Giappone l'11 Marzo del 2011 ha riaperto il dibattito sull'energia quale elemento centrale di sviluppo della società moderna. L'esperienza didattica su tematiche energetiche, maturata a Palermo nell'ambito del Piano Nazionale Lauree Scientifiche - Fisica (PLS-Fisica), si inserisce in questo contesto. Noi proponiamo un percorso formativo di laboratorio riguardante tematiche energetiche, al fine di stimolare i docenti di fisica a portare in aula e in laboratorio questi argomenti e contribuire così ad aumentare la consapevolezza che gli studenti hanno riguardo alle fonti energetiche rinnovabili, ma anche riguardo alle fonti basate sui combustibili fossili e nucleari. Le esperienze proposte sono state scelte sia per la loro valenza concettuale sia per la loro realizzazione semplice, volti a studiare quantitativamente i processi di trasformazione dell'energia.

**Abstract.** The catastrophic earthquake and subsequent tsunamis occurred in Japan in March 11, 2011 gave rise again to a world-wide debate on the energy sources as a central issue for the development of the human society. The experience on the energy topics, gained at the University of Palermo in the framework of the Piano Nazionale Lauree Scientifiche - Fisica (PLS-Fisica) (National Plan for Scientific Degrees - Physics), can be naturally integrated in this larger context. We propose a laboratory pedagogical path to stimulate physics teachers to introduce the energy concept by discussing the issue of renewable, fossil and nuclear energy sources. The activity can raise the awareness of students on this very important issue. We propose easy, but conceptually well-based, laboratory experiences with the purpose to study the energy transformation processes from a quantitative point of view.

### **1. Introduzione: fra scienza ed ecologia, fra storia e cronaca**

Quest'articolo descrive il percorso didattico intrapreso nel corso di cinque anni di attività svolta nell'ambito del Progetto Lauree Scientifiche - Fisica (PLS-Fisica), oggi Piano Nazionale Lauree Scientifiche <sup>(1)</sup>, nell'Ateneo di Palermo.

Il lavoro è stato portato avanti con lezioni, seminari e soprattutto con attività di laboratorio. Per evitare frammentazione e aleatorietà, gli argomenti trattati sono stati inquadrati nella tematica dell'energia con le sue sfaccettature concettuali. La scelta

<sup>(1)</sup> Per informazioni sul Piano Nazionale Lauree Scientifiche, consultare il sito web: <http://www.progettolareescientifiche.eu>.

è stata motivata dal fatto che l'energia permea di sé quasi tutti i campi dell'attività umana e dunque non solo scientifici come sembra ovvio ma anche economici, storici, ecc. Il problema energetico ha valenza prioritaria nel dibattito culturale mondiale legandosi in modo indissolubile ai problemi dell'ecologia e dell'ambiente. Il premio Nobel per la pace assegnato ad Al Gore nel 2007 per il suo impegno ecologico ha contribuito ad aumentare la sensibilità dell'opinione pubblica verso tali questioni. Il terremoto avvenuto in Giappone l'11 Marzo del 2011, seguito da uno tsunami che ha gravemente danneggiato la centrale nucleare di Fukushima, a 250 km da Tokyo, causando morte e distruzione, ha intensificato il dibattito sull'energia, quale elemento centrale di sviluppo della società moderna, in particolare sulla produzione di energia elettrica che rappresenta circa il 30% di tutto il fabbisogno energetico.

La storia umana è essenzialmente la storia delle fonti energetiche, del loro sfruttamento e, soprattutto, del loro approvvigionamento e accaparramento. La disponibilità di fonti energetiche rappresenta uno dei fattori fondamentali di sviluppo della società, tanto che è possibile immaginare una storiografia universale che consideri come motore delle vicende la ricerca, l'approvvigionamento e l'utilizzazione delle varie fonti energetiche. E, invero, la diplomazia o la guerra, che della diplomazia è lo strumento peggiore ("la guerra non è che la continuazione della politica con altri mezzi" [1]), sono spesso motivate dall'acquisizione di fonti energetiche primarie (schiavi, carbone, petrolio, uranio).

La situazione energetica mondiale viene monitorata annualmente dall'Agenzia Internazionale per l'Energia (IEA), pubblicando i dati raccolti in un rapporto [2]. Recentemente, la Società Italiana di Fisica (SIF) ha pubblicato un'analisi e una proiezione della situazione energetica in Italia nel periodo dal 1990 al 2020, sia per quanto riguarda il fabbisogno energetico sia per la produzione di energia elettrica [3].

Non è lo scopo di questo lavoro la trattazione esaustiva della tematica energetica ma, anche se in modo succinto e parziale, si possono comunque elencare alcuni punti storici essenziali. Il lettore interessato potrà trovare trattazioni del desiderato livello di approfondimento in articoli e testi facilmente reperibili (si veda per esempio rif. [4]).

- La fonte di energia più a lungo usata è stata quella dei muscoli di animali e uomini. Essa è trasportabile, rinnovabile, flessibile, non inquinante, poco efficiente e costosa. Il procacciamento di forza lavoro a poco prezzo è stata, e lo è tuttora, la principale causa di conflittualità umana.
- Lo sfruttamento dell'energia eolica è praticato fin dalla preistoria. La navigazione a vela dapprima e i mulini a vento [5] molto dopo sono esempi degni di nota. L'energia eolica è onnipresente, non inquinante, sfruttabile in loco, volubile ma gratuita e inesauribile. Ha assunto importanza economica solo recentemente e oggi si possono vedere qua e là gigantesche pale, dal grande impatto estetico sull'ambiente, che trasformano l'energia del vento in energia elettrica. In Spagna, nel mese di Marzo 2011, l'energia elettrica generata dal vento ha superato la produzione

di energia elettrica da tecnologie tradizionali <sup>(2)</sup>. La legge di Faraday-Newmann-Lenz, su cui si basa la trasformazione dell'energia eolica in energia elettrica, è nota sin dai primi decenni del XIX secolo; la sua implementazione pratica di base non presenta alcuna difficoltà tanto che l'alternatore era una volta presente in tutte le biciclette. Questa facilità e scalabilità permette dislocazione e dimensionamento praticamente su scala di valori continua. Inoltre, essa è alla portata quasi di ogni livello di sviluppo oggi presente nel mondo e potrebbe aiutare in modo significativo paesi emergenti o comunità isolate, per le quali l'installazione di mini aerogeneratori per la produzione di energia elettrica risulta essere più conveniente dell'estensione della rete di distribuzione nazionale [6]. Uno studio sullo stato dell'arte dell'energia eolica in Italia è stato di recente pubblicato dall'ENEA [7].

- Lo sfruttamento dell'energia potenziale gravitazionale di masse d'acqua fu quantitativamente insignificante nel passato antico, anche se i mulini ad acqua hanno avuto un ruolo importante per la molitura di cereali per l'alimentazione. Oggi, le centrali idroelettriche sono in rapida espansione ma richiedono la creazione di bacini artificiali con grande impatto ambientale sia positivo sia negativo. Dopo la seconda guerra mondiale, l'Italia produceva una grande percentuale dell'energia elettrica da grandi dighe, tanto che l'acqua raccolta dalle dighe veniva chiamata il "petrolio bianco". Il suo rendimento è alto ma richiede buona tecnologia e un oculato controllo del territorio. Le centrali idroelettriche hanno un rendimento intorno all'85%. Attualmente, rappresenta approssimativamente un quarto dell'energia elettrica totale prodotta nel mondo. La richiesta di energia elettrica da parte della società non è costante durante l'arco della giornata e dell'anno; per evitare discontinuità nella erogazione di potenza elettrica, la sovrapproduzione di energia elettrica, anche da altre fonti energetiche, viene utilizzata per pompare acqua dal basso verso le dighe, che vengono quindi usate come stabilizzatori e riserve energetiche.
- L'uso di energia termica da combustione per ottenere lavoro meccanico è stato assolutamente trascurabile fino agli inizi del XIX secolo. Negli ultimi due secoli è la forma di energia più usata. L'energia termica è facilmente ottenibile dal combustibile fossile e scalabile in modo continuo: dai piccoli motori a scoppio per aeromodellismo alle grandi portaerei, tutto si può far muovere bruciando qualcosa; è difficilissimo da essa ottenere lavoro, poco rinnovabile, sempre di basso rendimento, di altissimo impatto ambientale. Grandi centrali termoelettriche oggi producono energia elettrica da quella di combustione. Le centrali termoelettriche convenzionali hanno un rendimento di circa 30–40%, quelle moderne arrivano al 60% circa. Il reperimento di combustibile è da un paio di secoli la causa primaria di guerra, lutto e distruzione. La cronaca è sotto gli occhi di tutti.
- La vita sulla terra esiste grazie all'energia trasportata dalla radiazione elettromagnetica (em) proveniente dal Sole. Non si può, a rigore, parlare di utilizzo del

<sup>(2)</sup> Per ulteriori informazioni, consultare il sito web della compagnia Red Eléctrica de España: <http://www.ree.es>.

calore del Sole per riscaldamento dato che per definizione il calore riscalda. Lo sfruttamento dell'energia solare è oggi molto decantato ma poco praticato. L'energia solare è inesauribile, non inquinante, non necessita di trasporto (per impianti domestici), necessita di tecnologia avanzata per la conservazione più che per la sua trasformazione in energia elettrica. Recentemente sono state messe in opera nuove centrali solari basate sulla tecnologia cosiddetta *solare termodinamica a concentrazione*, come la centrale *Archimede* di Priolo (Siracusa). L'energia solare trasportata dalla luce (onde elettromagnetiche o fotoni) viene riflessa da specchi e concentrata verso un tubo che contiene sale fuso, che a sua volta viene sfruttata per produrre vapore acqueo per azionare turbine e quindi produrre energia elettrica. Sulla base dei risultati ottenuti con la tecnologia solare termodinamica, è stato promosso da vari scienziati, tra cui Carlo Rubbia, il Progetto DESERTEC per sfruttare l'energia solare nel deserto del Sahara <sup>(3)</sup>. Da un punto di vista strettamente logico, tutte le fonti di energie sopra descritte sono di origine esclusivamente solare.

– L'energia nucleare per uso civile si è resa disponibile subito dopo la II guerra mondiale. Essa si divide nei seguenti due tipi, dipendentemente dal processo nucleare coinvolto.

1) L'energia di fissione nucleare, che deriva dalla scissione di nuclei atomici pesanti. In questo processo, il nucleo di un elemento, ad esempio uranio 235 o plutonio 239, decade formando nuclei di atomi a numero atomico inferiore, fornendo una grande quantità di energia economicamente utilizzabile e producendo anche una notevole quantità di particelle radioattive. Il processo di fissione può avvenire spontaneamente, oppure essere indotto con bombardamento di neutroni come avviene nelle attuali centrali nucleari [8]. La produzione di energia elettrica con centrali nucleari è quindi costosa, pericolosa e altamente inquinante. L'uranio, benché relativamente abbondante, viene prodotto solo in alcuni paesi e dà o dipendenza politica o impulso al colonialismo. Il problema sommo delle centrali nucleari a fissione è che alcune scorie del combustibile primario sono sostanze radioattive a lungo tempo di dimezzamento e che le centrali finiscono con il diventare esse stesse radioattive. A scopo soltanto indicativo, in tabella I riportiamo il tempo di dimezzamento di alcuni elementi usati come combustibile primario o costituenti le scorie. Per risolvere la questione delle scorie nucleari, i governi prevedono di decontaminare le aree inquinate, di raccogliere il materiale radioattivo più pericoloso, disperso in svariati siti e di trasportarlo in grandi depositi sotterranei per la sistemazione definitiva. Negli Stati Uniti, fu deciso nel Febbraio 2002, di concentrare le scorie radioattive in due siti. Uno nel New Mexico, destinato ad accogliere i rifiuti transuranici (contaminati essenzialmente da plutonio) a basso e medio livello di radioattività. L'altro, nella Yucca Mountain del Nevada, destinato

<sup>(3)</sup> Ulteriori informazioni sul progetto DESERTEC si possono trovare alla pagina web: [www.desertecitaly.altervista.org](http://www.desertecitaly.altervista.org)

ad accogliere i rifiuti di livello radioattivo più elevato. Ad oggi tuttavia non esiste al mondo un esempio di centrale chiusa e smantellata, i cui materiali radioattivi siano stati effettivamente conferiti in un deposito definitivo. Il motivo sta nei costi assai elevati, tanto che molti scienziati sostengono ormai che è più conveniente “abbandonare” e isolare i reattori nucleari sul territorio alla fine della loro vita utile, invece che smantellarli e trasferire i residui del processo nucleare chissà dove [9]. In definitiva si può dire che l’uso dell’energia nucleare di fissione sembra che crei tanti problemi quanti ne risolve.

- 2) L’energia di fusione, che si ottiene dalla fusione di due nuclei leggeri a formarne uno più pesante. Il suo sfruttamento a scopi civili non è stato ancora raggiunto e la sua realizzabilità pratica (economicamente vantaggiosa), in realtà, è ancora tutta da dimostrare; sono stati ipotizzati diversi metodi per il suo conseguimento e alcuni di questi fanno uso di combustibile reperibile in acqua di mare, cosa che praticamente azzererebbe il fabbisogno di energia mondiale. Alcuni progetti prevedono la presenza di trizio (idrogeno con due neutroni e un protone) che è radioattivo, gassoso e pericolosissimo; tuttavia, decade in breve tempo e presenta meno problemi dell’immagazzinamento delle scorie delle centrali a fissione e, probabilmente, meno problemi di una grande centrale a carbone; queste caratteristiche hanno fatto definire le possibili centrali a fusione come poco inquinanti. Tuttavia, molti scienziati sostengono che la tecnologia delle fonti alternative finirà col rendere obsoleto il programma della fusione nucleare prima ancora che la sua realizzazione pratica venga conseguita [10].

TABELLA I. – Tempo di dimezzamento di alcuni elementi usati come combustibile primario o costituenti le scorie. A scopo di riferimento, conviene ricordare che l’uomo di Cro Magnon raggiunse l’Europa  $4 \times 10^4$  anni fa e che l’uomo di Neanderthal si estinse  $3 \times 10^4$  anni fa.

Elemento	Uranio 238	Uranio 235	Plutonio 239	Trizio	Neutrone
Tempo dimez.	$4,5 \times 10^9$ anni	$7,0 \times 10^8$ anni	$2,4 \times 10^4$ anni	12 anni	15 min

Il terremoto dell’11 Marzo 2011 ci deve fare riflettere sull’opportunità di continuare a installare centrali nucleari, soprattutto in Giappone, poiché eventi tellurici seguiti da tsunami sono molto frequenti, come risulta da fonti storiche facilmente reperibili in Internet. Infatti, in un periodo di tempo  $\Delta t = 1313$  anni sono stati registrati  $N = 195$  tsunami, in media uno ogni 6,73 anni, corrispondente a un valore medio di occorrenza  $f = N/\Delta t = 0,149$  tsunami/anno. Nella tabella II è mostrata la distribuzione di probabilità che in Giappone avvengano  $m$  tsunami in un anno, calcolata applicando la distribuzione di Poisson; i dettagli del calcolo sono riportati in Appendice A. Se questa probabilità è molto bassa o se deve indurre a prudenza non è cosa che possa essere qui discussa. La riflessione viene lasciata al lettore, così pure rimandiamo ad altri momenti la riflessione sull’impatto sociale delle fonti energetiche.

In questo articolo vogliamo riportare l’esperienza didattica, maturata a Palermo nell’ambito del PLS-Fisica, riguardante gli argomenti trattati nei laboratori di meccanica e termodinamica [11–13] sulle tematiche dell’energia, del suo significato non solo

TABELLA II. – Valori calcolati della probabilità  $P_{0,149}(m)$  che in Giappone avvengano  $m$  tsunami in un anno.

$m$	0	1	2	3
$P_{0,149}(m)$	0,86	0,14	$9,5 \times 10^{-3}$	$6,4 \times 10^{-4}$
%	86	14	0,95	0,064

prettamente fisico ma anche pratico e tecnico. Ricordiamo che l'obiettivo principale del PLS è quello di migliorare la conoscenza e la percezione delle discipline scientifiche nella scuola secondaria di secondo grado con attività di laboratorio stimolanti e coinvolgenti. Nel presente articolo, proponiamo alcune semplici esperienze fisiche di carattere didattico, per studiare in modo quantitativo i processi di trasformazione dell'energia riguardanti, in particolar modo, le cosiddette "energie alternative".

## 2. Esperienze proposte

### 2.1. Premessa

Il *teorema lavoro-energia*, anche noto come *teorema delle forze vive*, mostra che una forza agente su un corpo puntiforme inizialmente fermo, la cui energia cinetica  $K$  è nulla, ne aumenta l'energia cinetica; esso mostra anche l'implicazione inversa, cioè che si può sottrarre energia cinetica a un corpo in movimento, rallentandolo e ottenendo lavoro meccanico  $L$ :

$$(1) \quad L = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2 = \Delta K,$$

dove  $v_i$  e  $v_f$  indicano rispettivamente la velocità iniziale e finale del corpo in moto. È da notare che il teorema lavoro-energia deriva direttamente dall'applicazione della II legge di Newton e quindi non può essere considerato un principio di conservazione; esso ci permette di calcolare la variazione dell'energia cinetica di un sistema conoscendo il lavoro fatto da una forza esterna sul sistema stesso.

Il lavoro fatto da una forza conservativa è uguale alla variazione di energia potenziale  $\Delta U$  cambiata di segno:  $L = -\Delta U$ . Pertanto, se nell'equazione (1) il lavoro è quello svolto da una forza conservativa, si avrà la seguente relazione

$$(2) \quad \Delta U + \Delta K = 0 \quad \Rightarrow \quad U_i + K_i = U_f + K_f,$$

che descrive il teorema di conservazione dell'energia meccanica in presenza di sole forze conservative. Se nel sistema agiscono più forze conservative, per esempio la forza di gravità e la forza elastica di una molla, nell'eq. (2) bisogna introdurre anche i termini di energia potenziale corrispondenti.

Dal punto di vista puramente meccanico, si avrà che in un sistema isolato su cui agiscono solo forze conservative, l'energia meccanica del sistema, data dalla somma

dell'energia cinetica e dell'energia potenziale, è costante. L'energia di un sistema cambia se su di esso agiscono forze esterne al sistema che compiono lavoro, positivo o negativo, cioè se vi è un altro sistema con cui esso interagisce. Possiamo quindi affermare che quando due sistemi interagiscono si scambiano energia, la loro energia varia in maniera tale per cui la diminuzione dell'energia dell'uno la si ritrova esattamente come aumento dell'energia dell'altro, cosicché l'energia totale dei due sistemi, che costituiscono quindi un sistema complessivo isolato, rimane invariata nel tempo. Il lavoro meccanico è pertanto uno dei modi attraverso il quale possono avvenire scambi di energia tra due sistemi interagenti [14].

È utile distinguere l'energia totale di un sistema in due contributi:  $E_{tot} = E_{mac} + E_{mic}$ , dove per energia macroscopica,  $E_{mac}$ , intendiamo le forme di energia di tipo meccanico; per energia microscopica,  $E_{mic}$ , intendiamo l'energia interna del sistema, legata ai moti e alle posizioni degli atomi e molecole. Più in generale, le variazioni di energia macroscopica di un corpo potranno essere di origine cinetica, potenziale (gravitazionale ed elastica), sonora, elettromagnetica, ecc; le variazioni di energia microscopica potranno essere di origine termica, chimica, ecc. Pertanto, il principio di conservazione dell'energia (o I principio della termodinamica) che generalizza il teorema di conservazione dell'energia meccanica può essere enunciato introducendo il concetto di energia interna [15,16]

$$(3) \quad \Delta E_{int} = Q + L,$$

dove  $\Delta E_{int}$  indica la somma algebrica di tutte le variazioni di energia interne al sistema;  $Q$  è la quantità di energia termica (calore) trasferita al sistema e  $L$  è la quantità di lavoro fatto sul sistema dalle forze esterne che agiscono sul confine del sistema preso in considerazione (per completezza, occorre ricordare che l'energia può essere scambiata anche in altri modi).

L'energia interna,  $E_{int}$ , renderà conto di tutte le forme di energia diverse da quelle di tipo meccanico riferite al centro di massa del corpo; un modello di energia interna è proposto in Appendice B. È da notare inoltre che l'eq. (3) non può essere dedotta dalle leggi di Newton, ma è formulata sulla base dei fatti sperimentali che si osservano in natura.

Sulla base del I principio della termodinamica, la descrizione del moto di corpi che avvengono in presenza di forze di attrito può trovare una naturale spiegazione. Possiamo quindi enunciare il principio di conservazione dell'energia nel seguente modo. L'energia totale  $E$  di un sistema può variare solo se viene trasferita energia da di fuori o al di fuori del sistema facendo lavoro meccanico positivo o negativo oppure scambiando energia termica:

$$(4) \quad \Delta E_{mec} + \Delta E_{term} + \Delta E_{int} = Q + L,$$

dove il primo termine si riferisce alla variazione dell'energia meccanica (cinetica e potenziale), il secondo alla variazione dell'energia termica e il terzo alle variazioni di altre forme di energia interna.

Di conseguenza, in un sistema isolato non possono avvenire trasferimenti di energia e quindi l'energia totale del sistema si conserva.

In tutti i processi che avvengono in natura, una parte dell'energia, per colpa degli attriti, viene trasformata in energia di tipo termico e quest'ultima non è mai completamente riconvertibile in energia meccanica o in altre forme equivalenti: avviene, in altri termini, una *degradazione* dell'energia. I processi di trasformazione di energia termica in energia meccanica sono regolati dal II principio della termodinamica. Il moto di un corpo in presenza di forze di attrito è descritto in Appendice C.

Infine, facciamo notare che nel linguaggio comune si parla di *consumi energetici*. Tale modo di dire è del tutto improprio, in quanto, interpretato alla lettera, significherebbe *distruzione di energia*, equivalente a una non conservazione dell'energia.

## 2.2. Energia meccanica e ruolo dell'attrito

L'esperimento proposto permette di discutere il principio di conservazione dell'energia, introducendo l'energia interna del sistema e discutere quindi il ruolo dell'attrito nel determinare il rendimento di un processo di trasformazione dell'energia. L'esperimento permette, inoltre, di misurare il coefficiente di attrito dinamico  $\mu_d$  definito come il rapporto tra la forza di attrito  $f_a$  che si esercita tra due superfici, in moto relativo l'una rispetto all'altra, e la forza normale  $N$ :  $\mu_d = f_a/N$ .

Si lancia, per mezzo di una molla compressa di una quantità  $x$ , una massa  $m$  lungo un piano orizzontale e si misura la lunghezza  $\ell$  del tratto percorso prima del suo arresto. In fig. 1 mostriamo l'apparato sperimentale da noi realizzato per misurare con precisione la compressione della molla e quindi da essa determinare l'energia elastica del sistema massa-molla.



Fig. 1. – Dispositivo a molla per il lancio di oggetti. Il dispositivo realizzato permette di misurare la compressione della molla di costante elastica  $k = 400$  N/m; la massa del blocco è  $m = 78$  g.

Applicando il principio di conservazione dell'energia al sistema massa-molla, possiamo ricavare dalla compressione della molla l'energia potenziale elastica e quindi l'energia cinetica del blocco nel punto in cui si distacca dalla molla

$$(5) \quad U_i = K_f \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}mv^2.$$

Dalle equazioni della dinamica, cioè dal teorema lavoro-energia, si deduce che la quan-

tità  $f_a \ell$  è uguale alla variazione di energia cinetica del corpo che a sua volta è uguale alla variazione dell'energia potenziale del sistema massa-molla <sup>(4)</sup>

$$(6) \quad \frac{1}{2} k x^2 = \mu_d N \ell = \mu_d m g \ell \quad \Rightarrow \quad \mu_d = \frac{k x^2}{2 m g \ell}.$$

Mettendo in grafico i valori della distanza  $\ell$  in funzione del quadrato della deformazione della molla  $x^2$ , si ottiene l'andamento lineare mostrato in fig. 2 e descritto dalla legge  $\ell = B z$ , con  $z = x^2$ . La retta così ottenuta ha pendenza  $B = k/(2mg\mu_d)$ , da cui si determina il coefficiente di attrito dinamico

$$(7) \quad \mu_d = \frac{k}{2 m g B}.$$

L'andamento lineare ottenuto dai dati di fig. 2 dimostra che l'energia potenziale elastica del sistema massa-molla dipende dal quadrato della deformazione della molla.

Per misurare il coefficiente di attrito dinamico si possono eseguire vari esperimenti. Per esempio, si può misurare il tempo impiegato da un blocco di massa nota che scivola lungo un piano inclinato anch'esso di lunghezza nota. Assumendo che il moto sia rettilineo uniformemente accelerato, si può determinare la forza di attrito dinamico che agisce sul blocco e quindi si può calcolare il coefficiente di attrito. Valori ottenuti con esperimenti diversi possono essere confrontati e messi in relazione alla accuratezza dei diversi metodi di misura.

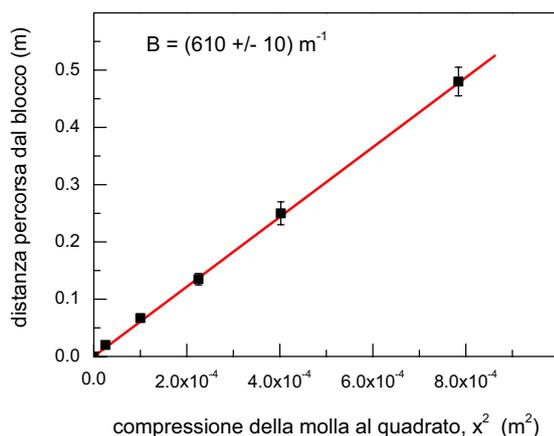


Fig. 2. – Andamento della distanza  $\ell$  in funzione di  $x^2$ . La pendenza della retta è  $B = 610 \text{ m}^{-1}$ , da cui si determina il coefficiente di attrito dinamico  $\mu_d \approx 0,43$ .

<sup>(4)</sup> Questo processo è descritto in dettaglio in Appendice C.

### 2.3. Energia eolica

Con energia eolica si intende l'energia che può essere sottratta all'energia cinetica del vento e trasformata in energia meccanica o elettrica; il principio fisico è descritto in dettaglio in rif. [13]. In laboratorio abbiamo simulato il processo di trasformazione dell'energia cinetica del vento in energia elettrica. A tale scopo, abbiamo realizzato un apparato costituito da un asciugacapelli, un rotore e un piccolo generatore elettrico (alternatore). La forza elettromotrice  $V$  così generata veniva usata quindi per alimentare un diodo LED. Per uno studio più quantitativo, è stata misurata la tensione ai capi di una resistenza  $R = 100 \Omega$  con un sistema di acquisizione automatica, visualizzata e analizzata al computer.

In fig. 3 è mostrato l'apparato sperimentale, mentre in fig. 4 è mostrato lo schema circuitale per la misura della tensione generata dall'alternatore.

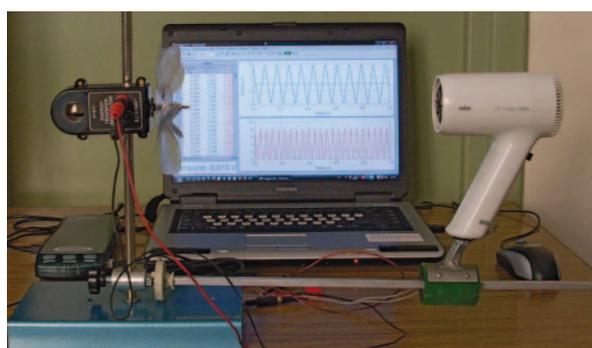


Fig. 3. – Apparato sperimentale per lo studio dell'energia eolica; l'apparato consiste di un asciugacapelli, una ventola e un alternatore.



Fig. 4. – Schema elettrico per la misura della potenza elettrica generata dall'alternatore; la resistenza ha un valore di  $100 \Omega$ .

Quest'esperienza permette di misurare la tensione  $V$  e la sua frequenza dall'osservazione del grafico di  $V$  in funzione del tempo. Dai valori di  $V$  e di  $R$ , si calcola la potenza  $P$  fornita dall'alternatore con la relazione

$$(8) \quad P = \frac{V^2}{R},$$

dove  $R = 100 \Omega$  è la resistenza a cui è applicata la tensione.

La potenza media fornita dall'alternatore è circa  $24 \text{ mW}$ , come si vede dal grafico di fig. 5. La potenza che varia come il quadrato della tensione ha, naturalmente, una frequenza doppia di quella della tensione. Potrebbe essere interessante far commentare l'osservazione ai giovani studenti. Inoltre, l'esperimento proposto mette in evidenza

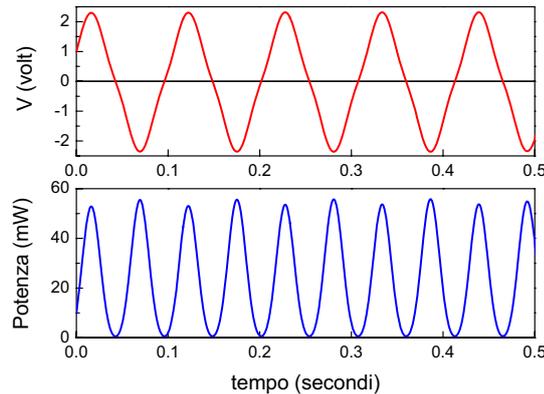


Fig. 5. – Grafico della tensione misurata ai capi della resistenza (pannello superiore) e della potenza generata (pannello inferiore) in funzione del tempo.

le potenzialità dell'energia eolica e mostra come essa può essere convertita in energia elettrica.

#### 2.4. Trasformazione di energia solare (elettromagnetica) in energia termica

Un pannello solare sfrutta la proprietà di una superficie nera (e opaca) di assorbire l'energia trasportata dalla radiazione elettromagnetica (fotoni) proveniente dal sole, che incide su di essa [17]. La velocità con cui cambia la temperatura del corpo su cui incide la luce dipende dalla sua capacità termica, dall'intensità della luce incidente, dall'area effettiva del corpo esposta perpendicolarmente alla luce e dalla velocità con cui l'energia termica viene trasferita all'ambiente esterno.

Il sole attraverso processi termonucleari genera energia termica e radiazione elettromagnetica (em) con lunghezze d'onda che vanno dall'ultravioletto ( $\lambda \leq 380$  nm) all'infrarosso ( $\lambda \geq 700$  nm); la lunghezza d'onda della luce visibile è compresa tra 380 nm e 700 nm. A causa dell'assorbimento atmosferico, la radiazione solare che raggiunge la superficie della terra ha una lunghezza d'onda compresa tra 300 e 2500 nm. Fortunatamente, la maggior parte della dannosa radiazione nell'ultravioletto è assorbita dallo strato di ozono nella stratosfera [18].

Per l'esperimento, abbiamo realizzato una scatola di legno con pareti termicamente isolate da pannelli di polistirolo [13,19]. Sul fondo della scatola è stata posizionata una lamina di alluminio dipinta con vernice nera. La scatola è stata usata senza copertura oppure coperta con una lastra di plexiglass. Per misurare la temperatura all'interno della scatola, è stato usato come sensore di temperatura una resistenza al platino PT100, che fornisce un valore di resistenza elettrica  $R = 100 \Omega$  alla temperatura  $T = 0^\circ\text{C}$ , posizionato proprio sotto la lamina di alluminio. Per simulare in laboratorio l'illuminazione solare della scatola, abbiamo usato una lampada a incandescenza. Questa scelta è giustificata dal fatto che entrambi il sole e le lampade a incandescenza sono ben descritte da uno spettro di corpo nero, sebbene a differenti temperature. Il sole può essere considerato come un corpo nero che emette radiazione

em a temperatura  $T_S = 5500$  K; una lampada a incandescenza riempita con gas inerte può essere considerata come un corpo nero che emette radiazione em alla temperatura  $T_L = 2500$  K [19]. L'apparato sperimentale è mostrato in fig. 6. In fig. 7 sono riportati i valori della temperatura in funzione del tempo per la scatola senza copertura (scatola aperta) e con la copertura con una lastra di plexiglass (scatola chiusa).

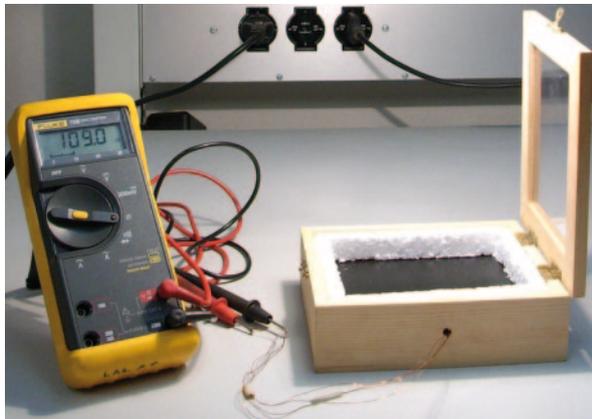


Fig. 6. – Apparato sperimentale costituito da una scatola di legno con pareti termicamente isolate da pannelli di polistirolo e corredata da un sensore di temperatura PT100 e un multimetro digitale. La scatola è illuminata con una lampada a incandescenza di 60 W di potenza.

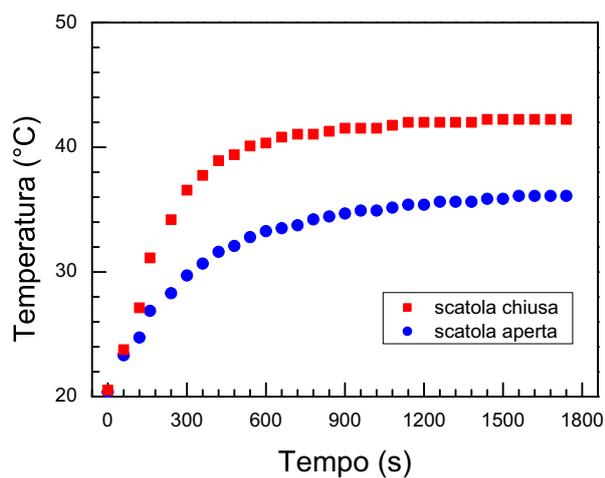


Fig. 7. – Andamento della temperatura all'interno della scatola illuminata da una lampada a incandescenza di 60 W.

Le misure effettuate con la scatola chiusa e aperta mostrano che l'aumento della temperatura è più accentuato nel caso di scatola chiusa a causa delle ridotte correnti convettive di aria calda, che trasferiscono calore nell'ambiente. La radiazione em

attraversa la lastra di plexiglass della scatola ed è assorbita dalla lastra di alluminio. In questo processo, l'energia em proveniente dal sole riscalda la scatola. La lastra di plexiglass permette alla radiazione em di riscaldare l'aria dentro la scatola, ma inibisce il trasferimento convettivo di calore verso l'esterno. Il colore nero della lastra di alluminio massimizza l'assorbimento di energia em proveniente dalla lampada. Una trattazione quantitativa dell'esperienza può essere trovata in rif. [19].

## 2.5. Trasformazione di energia solare in energia elettrica

La generazione di energia elettrica con le celle fotovoltaiche ha luogo grazie alle proprietà microscopiche di alcuni materiali, i cui atomi possono liberare elettroni quando interagiscono con la radiazione solare. La conversione di energia em (radiazione solare) in energia elettrica da parte della cella fotovoltaica si basa sul fenomeno fisico dell'interazione della radiazione em (fotoni) con gli elettroni di valenza nei materiali semiconduttori.



Fig. 8. – Apparato sperimentale costituito da una cella fotovoltaica illuminata con una lampada a incandescenza di 60 W di potenza. La tensione è misurata direttamente con un multimetro digitale.

Questo fenomeno è noto come effetto fotovoltaico. Il processo di conversione di energia em in energia elettrica avviene essenzialmente perché la luce incidente crea nel materiale, di cui è costituita la cella fotovoltaica, dei portatori di carica liberi (elettroni e lacune). Le cariche positive (lacune) sono spinte verso un lato della cella

e le cariche negative (elettroni) verso l'altro. Se le due facce (inferiore e superiore della cella) sono collegate mediante un filo conduttore, le cariche libere lo attraversano e si osserverà una corrente elettrica. Fino a quando la cella resta esposta alla luce, la corrente elettrica fluisce sotto forma di corrente continua.

L'apparato sperimentale realizzato è costituito da una cella fotovoltaica illuminata con una lampada a incandescenza di 60 W di potenza, come mostrato in fig. 8. La tensione generata dal pannello può essere misurata direttamente con un multimetro digitale [13].

Questo apparato si presta inoltre a studiare come varia la tensione generata in funzione dell'intensità luminosa, definita come l'energia per unità di tempo che attraversa una superficie unitaria ortogonale alla direzione di propagazione della luce stessa. È previsto che l'intensità luminosa vari come  $1/D^2$ , dove  $D$  è la distanza dalla sorgente luminosa. Quindi, all'aumentare della distanza della lampada dal pannello la differenza di potenziale elettrico generata dal pannello si riduce, approssimativamente, come l'inverso del quadrato della distanza.

L'esperimento proposto permette di discutere il processo di conversione di energia elettromagnetica in energia elettrica, grazie alle proprietà fisiche dei materiali semiconduttori.

### 3. Discussione e conclusione

Gli studenti delle scuole secondarie tendono spesso a studiare la fisica come un materia astratta piena di formule, fine a sé stessa, e senza legame con il mondo con cui entrano quotidianamente in contatto e di cui hanno esperienza. Seguendo alcuni spunti rintracciabili in Jean-Jacques Rousseau [20], riteniamo importante che agli studenti vengano presentati argomenti ed esperimenti che possano essere messi in relazione con la vita quotidiana o con avvenimenti che più colpiscono la loro immaginazione. Il problema della produzione di energia elettrica e delle fonti energetiche è un argomento sempre verde che interessa spontaneamente gli studenti o che può facilmente essere reso affascinante prendendo spunto dalla storia, dalla tecnica, dalla scienza, dal caro benzina o altro. Riteniamo tuttavia che argomenti sull'energia debbano essere trattati in modo scientifico, senza rimanere incastrati dalla trappola della ideologizzazione, mostrando ai giovani che la scelta delle fonti energetiche deve dipendere da motivazioni ponderate e numericamente fondate. Per presentare l'argomento agli studenti, abbiamo seguito il percorso didattico presentato nell'articolo. Abbiamo anche dato loro il compito di stilare relazioni sui risultati sperimentali ottenuti in laboratorio, compito che gli studenti spesso hanno svolto con un impegno maggiore di quello che veniva loro richiesto.

Le esperienze proposte permettono, dal punto di vista didattico, di introdurre il concetto di sistema, il principio di conservazione dell'energia in termini di energia interna del sistema e le sue trasformazioni da una forma all'altra. Si dà inoltre la possibilità di introdurre il lavoro meccanico e il calore come modi di scambiare energia tra due sistemi interagenti.

I corsi del PLS-Fisica sono stati seguiti da circa 250 studenti e circa 50 insegnanti delle scuole secondarie, che hanno fatto misure con esperimenti didattici riguardanti l'energia meccanica, termica e solare. Essi oggi possono parlare in modo più consapevole di quello che sta succedendo nel mondo per quanto riguarda le problematiche connesse con l'energia.

In conclusione, proponiamo un percorso formativo di laboratorio riguardante tematiche energetiche, al fine di i) stimolare i docenti di fisica a portare in aula e in laboratorio questi argomenti e contribuire così ad aumentare la consapevolezza che gli studenti hanno riguardo alle fonti energetiche rinnovabili, ma anche riguardo alle fonti basate sui combustibili fossili e nucleari; ii) migliorare l'apprendimento della disciplina da parte degli studenti, grazie all'attività sperimentale di laboratorio. Sono state proposte una serie di esperienze, di semplice realizzazione ma di notevole valenza concettuale, volti a studiare quantitativamente i processi di trasformazione dell'energia.

## Appendice

**A.** *Calcolo della distribuzione di probabilità degli tsunami che possono accadere in Giappone in un anno* – La probabilità che un numero  $m$  di tsunami avvengano nello stesso anno in Giappone può essere facilmente calcolata assumendo che la distribuzione degli tsunami sia di tipo poissoniano, in quanto la distribuzione di Poisson si applica a tutti quei fenomeni che avvengono in modo casuale e continuo, ma con bassa probabilità [21, 22]. È facile dimostrare che la probabilità (normalizzata a 1) che in un anno siano avvenuti  $m$  tsunami è data da

$$(A.1) \quad P_f(m) = \frac{f^m}{m!} e^{-f},$$

dove  $f$  indica il numero di tsunami/anno.

In Giappone, il valor medio di occorrenza di tsunami in un anno è  $f = 0,149$  tsunami/anno. Naturalmente, non tutti gli tsunami registrati sono stati altamente distruttivi; inoltre, l'incertezza delle fonti storiche può indurre a confusione nella classificazione di un evento in tsunami. Quindi, la probabilità che non siano avvenuti tsunami in un anno è

$$(A.2) \quad P_{0,149}(0) = e^{-f} = 0,86$$

e che due tsunami avvengano nello stesso anno è

$$(A.3) \quad P_{0,149}(2) = \frac{f^2}{2!} e^{-f} = 9,5 \cdot 10^{-3} \cong 1\%.$$

Nella tabella III è mostrata la distribuzione di probabilità che in Giappone avvengano  $m$  tsunami in un anno, per i primi 4 valori di  $m$ .

TABELLA III. – Valori calcolati della probabilità  $P_f(m)$  che avvengano  $m$  tsunami in un anno con  $f = 0,149$  tsunami/anno.

$m$	0	1	2	3
$P_{0,149}(m)$	0,86	0,14	$9,5 \times 10^{-3}$	$6,4 \times 10^{-4}$
%	86	14	0,95	0,064

Molto probabilmente i concetti e la matematica necessari allo scopo vanno oltre le conoscenze dello studente medio di scuola secondaria, tuttavia riteniamo che l'insegnante debba far capire agli allievi che lo studio di fattibilità di un qualsiasi progetto richiede l'analisi di molteplici fattori e la sinergia di esperti in vari campi: scienze storiche, statistiche, geologiche, informatiche, ecc. Si potrebbe anche suggerire l'applicazione della tecnica qui descritta al problema ciclico della costruzione di un ponte sullo stretto di Messina. Il calcolo presentato, dunque, deve essere considerato solo dal punto di vista dell'uso a scopi didattici che si può fare della scienza e del formalismo matematico in vari settori umani.

**B.** *Un modello di energia interna* – Al fine di concretezza didattica ed espositiva, forse potrebbe essere utile dare una visione microscopica, parziale ma valida in moltissimi casi, del concetto di energia interna di un corpo, generalmente considerato dallo studente come corpo rigido. Occorre ricordare che intrinsecamente la materia ha natura corpuscolare essendo formata da atomi in incessante moto relativo; pertanto, il concetto di corpo va essenzialmente sostituito col concetto di sistema. Sia dato dunque un sistema formato da  $N$  particelle di massa  $m_i$  con  $i = 1, 2, \dots, N$ . Le particelle, per semplicità, possono essere considerate idealizzazioni degli atomi puntiformi (anche se ciò non è del tutto corretto), senza struttura ed energia interna. Risulta facile dimostrare che l'energia cinetica totale del sistema è data da

$$(B.4) \quad K = \frac{1}{2} M v_{cm}^2 + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m_i v_i^2 = K_{cm} + K_{int},$$

dove  $M = \sum_{i=1}^N m_i$  è la massa totale del sistema,  $v_{cm}$  è la velocità del centro di massa (CM) del sistema e  $v_i$  la velocità della massa  $i$ -esima misurata in un sistema di riferimento solidale col CM.

Il teorema viene spesso enunciato in modo leggero dicendo che l'energia cinetica di un sistema è data dalla somma dell'energia cinetica del CM e dell'energia cinetica delle particelle rispetto al CM. Un teorema simile può essere dimostrato per l'energia potenziale. Va compreso che il contributo all'energia potenziale di ogni singola particella è la somma dell'energia di interazione con il mondo esterno al sistema e l'energia di interazione fra le varie particelle. L'energia potenziale totale sarà dunque data da

$$(B.5) \quad U = \sum_{\ell=1}^N U_{\ell}^{(e)} + \frac{1}{2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N U_{i,j} = U^{(e)} + U_{int},$$

dove la prima sommatoria dà l'energia totale di interazione con il mondo esterno e la seconda sommatoria dà l'energia potenziale interna.

È ovvio, a questo punto, definire come energia interna la quantità

$$(B.6) \quad E_{int} = K_{int} + U_{int} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m_i v_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N U_{i,j}.$$

Occorre che l'insegnante insista sul fatto che il corpo rigido è un modello che discende dall'assunzione che le singole masse del sistema abbiano posizione reciproca fissa e che è utile in molti problemi, ma non può rendere conto in modo naturale del concetto di energia interna [23]. Esso è in realtà incapace, fra l'altro, di descrivere in maniera coerente il moto di scivolamento di una massa su una superficie scabra, cioè con attrito, senza l'introduzione del concetto di pseudolavoro, di cui si parlerà in Appendice C.

**C. Lavoro ed energia in presenza di forze di attrito** – Supponiamo di spingere un corpo (non puntiforme) sopra un piano orizzontale scabro con una forza esterna  $\vec{F}$  orizzontale, facendolo muovere a velocità costante di una distanza  $\vec{x}_{cm}$ , che indica lo spostamento del CM del corpo. Poiché la velocità è costante, possiamo affermare che il piano esercita sul corpo una forza di attrito orizzontale  $\vec{F}_{p \rightarrow c} = -\vec{F}$ . Da un bilancio energetico del corpo, a prima vista, risulta che il lavoro fatto dalla forza esterna  $\vec{F}$  è  $L = \vec{F} \cdot \vec{x}_{cm}$  e quello della forza  $\vec{F}_{p \rightarrow c}$  è  $L_{p \rightarrow c} = \vec{F}_{p \rightarrow c} \cdot \vec{x}_{cm} = -L$ . Dunque, il lavoro totale  $L_{tot} = L + L_{p \rightarrow c}$  sul corpo risulta essere uguale a zero, in accordo con il fatto che l'energia cinetica del corpo non cambia. Analizzando le forze che si esercitano sul piano, si osserva che per la terza legge della dinamica il corpo esercita sul piano una forza  $\vec{F}_{c \rightarrow p} = -\vec{F}_{p \rightarrow c} = \vec{F}$ . Dato che il piano rimane immobile, il lavoro  $L_{c \rightarrow p}$  fatto su di esso sarà uguale a zero. Da quest'analisi, tuttavia, non si giustifica l'osservazione sperimentale che a causa dell'attrito entrambi il corpo e il piano si riscaldano e non si giustifica quindi da dove proviene l'energia corrispondente a questo aumento di temperatura [16].

Per calcolare correttamente il lavoro della forza di attrito, occorre considerare il lavoro fatto dalle forze di contatto che agiscono su ogni piccola asperità delle superfici in contatto del corpo e del piano deformandole microscopicamente [24, 25]. Questo lavoro non può essere calcolato esattamente, tuttavia si può vedere che la somma di tutti i lavori microscopici (o mesoscopici) dà, come effetto macroscopico, un lavoro  $L'_{p \rightarrow c}$  della forza d'attrito sul corpo che è uguale a quello che ci sarebbe con uno spostamento  $x$  minore di quello del CM del corpo ( $x < x_{cm}$ ). Si avrà dunque  $L'_{p \rightarrow c} = \vec{F}_{p \rightarrow c} \cdot \vec{x} < 0$  con  $|L'_{p \rightarrow c}| < |\vec{F}_{p \rightarrow c} \cdot \vec{x}_{cm}| = L$ . Anche il piano orizzontale subirà piccole deformazioni locali delle sue asperità in contatto, tirate dal corpo, il che darà un lavoro totale  $L'_{c \rightarrow p}$  positivo fatto dal corpo sul piano. D'altro canto, non si può assumere che lo spostamento del punto di applicazione della forza di attrito  $F_{p \rightarrow c}$  che agisce sul corpo sia uguale allo spostamento  $x_{cm}$  del CM del corpo e quello della forza di

attrito  $F_{c \rightarrow p}$  che agisce sul piano sia uguale a zero. Si tratta di forze di contatto, per cui il loro punto di applicazione deve essere lo stesso, dunque anche lo spostamento sarà lo stesso. Di conseguenza, si dovrà avere  $L'_{c \rightarrow p} = -L'_{p \rightarrow c}$ . Il piano aumenta la sua energia interna di una quantità  $L'_{c \rightarrow p} > 0$  e il corpo aumenta la sua energia interna di  $L + L'_{p \rightarrow c} = L - |L'_{p \rightarrow c}| > 0$ , giustificando in questo modo il riscaldamento di entrambi. La variazione totale di energia interna del sistema “corpo + piano” sarà

$$(C.7) \quad \Delta E_{int} = L + L'_{p \rightarrow c} + L'_{c \rightarrow p} = L,$$

poiché  $L'_{c \rightarrow p} = -L'_{p \rightarrow c}$ . La descrizione di tutto il processo è coerente: il riscaldamento del corpo e del piano e il fatto che la variazione totale dell'energia interna, che esprime questo aumento di temperatura, è uguale al lavoro della forza esterna che spinge il corpo [25].

Nell'esperimento descritto nella sezione 2.2, un corpo di massa  $m$  viene lanciato con una certa velocità  $v_0$  sopra un piano orizzontale scabro. Dalla misura della distanza percorsa e conoscendo  $v_0$  si determina la forza di attrito dinamico. Dal punto di vista energetico, possiamo dire che

$$(C.8) \quad \Delta E_{mec} + \Delta E_{int} = 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta E_{int} = \frac{1}{2}mv_0^2 > 0,$$

da cui risulta che l'energia interna del sistema “corpo + piano” aumenta, dando luogo a un riscaldamento. Se consideriamo come sistema solo il corpo, per le ragioni spiegate sopra si avrà

$$(C.9) \quad \Delta E_{mec,c} + \Delta E_{int,c} = L'_{p \rightarrow c} \quad \Rightarrow \quad \Delta E_{int,c} = \frac{1}{2}mv_0^2 - |L'_{p \rightarrow c}| > 0,$$

giustificando in questo modo il riscaldamento del corpo. Se consideriamo come sistema solo il piano e poichè  $L'_{c \rightarrow p} = -L'_{p \rightarrow c}$ , si ha

$$(C.10) \quad \Delta E_{int,p} = L'_{c \rightarrow p} > 0,$$

giustificando in questo modo anche il riscaldamento del piano.

Il problema della conservazione dell'energia in presenza di forze di attrito dal punto di vista meccanico è legato a quello del calcolo del lavoro nel caso di sistemi estesi (non puntiformi) deformabili, dove si crea spesso una confusione fra il lavoro compiuto da una forza, in quanto prodotto scalare della forza per lo spostamento del suo punto di applicazione, e il prodotto scalare fra la forza e lo spostamento del CM del corpo, che non sempre coincide con quello del punto di applicazione della forza. La quantità  $L_a = \vec{f}_a \cdot \vec{x}_{cm}$ , avente le dimensioni di un lavoro, è chiamata *pseudolavoro* che non è un vero lavoro dal punto di vista termodinamico, cioè non è la quantità che fa cambiare l'energia interna del sistema ma è solamente una relazione dinamica tra le forze che agiscono sul corpo e il moto del corpo stesso. Ciò è dovuto al fatto che lo spostamento del CM del corpo non è quello del punto di applicazione della forza di attrito [25].

Dal punto di vista microscopico, la forza di attrito è la media di forze elettriche che si esercitano fra i corpi che scivolano. Queste forze elettriche fanno lavoro sia sul corpo che scivola sia sulle varie asperità della superficie sui cui esso scivola, i cui atomi aumentano la propria energia cinetica (e si riscaldano).

### Bibliografia

- [1] VON CLAUSEWITZ K., *Della guerra* (Biblioteca Universale Rizzoli) 2009.
- [2] *World Energy Outlook 2010*, Rapporto annuale dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA, Parigi) 2010; sito web: [www.iea.org](http://www.iea.org).
- [3] *Energia in Italia: problemi e prospettive (1990 - 2020)*, Uno studio a cura della Società Italiana di Fisica (SIF, Bologna) 2008; sito web: [www.sif.it](http://www.sif.it).
- [4] CARNAZZI S., *Le energie rinnovabili* (Xenia, Milano) 2007.
- [5] RUSSO L., *La rivoluzione dimenticata. Il pensiero scientifico greco e la scienza moderna*, 3a edizione (Feltrinelli, Milano) 2003.
- [6] RAU M., "Moja island: learning about renewable energy sources", *Science in School*, **19** (2011) 50.
- [7] *Energia, Ambiente e Innovazione*, Bimestrale dell'ENEA, Anno 55, Marzo-Aprile 2009; sito web: [www.enea.it](http://www.enea.it).
- [8] GAINES M.J., *L'energia nucleare* (Arnoldo Mondadori Editore, Milano) 1970.
- [9] MONGUZZI C., ZABOT S., *Illusione nucleare. I rischi e i falsi miti* (Melampo, Milano) 2008.
- [10] Si veda per esempio l'ultimo rapporto della World Nuclear Association; sito web: [www.world-nuclear.org](http://www.world-nuclear.org).
- [11] AGLIOLO GALLITTO A., FIORDILINO E., "Progetto Lauree Scientifiche - Fisica dell'Ateneo di Palermo", *Università e Scuola*, **XII**, no 1 (2007) 39.
- [12] AGLIOLO GALLITTO A., "Quattro Anni di Attività del Progetto Lauree Scientifiche-Fisica nell'Ateneo di Palermo", *Università e Scuola*, **XIV**, no 2 (2009) 28.
- [13] FIORDILINO E., AGLIOLO GALLITTO A., *Il laboratorio di fisica nel Progetto Lauree Scientifiche* (Aracne, Roma) 2010.
- [14] HALLIDAY D., RESNICK R., WALKER J., *Fondamenti di fisica. Meccanica e termologia*, 6a edizione (CEA, Milano) 2006.
- [15] ARONS A. B., "Development of energy concepts in introductory physics courses", *Am. J. Phys.*, **67** (1999) 1063.
- [16] ARONS A. B., *Guida all'insegnamento della fisica* (Zanichelli, Bologna) 1992.
- [17] DUFFIE J.A., BECKMAN W.A., *Solar energy thermal processes* (John Wiley & Sons, New York) 1974.
- [18] HARRISON T., SHALLCOSS D., "A hole in the sky", *Science in School*, **17** (2010) 46.
- [19] AGLIOLO GALLITTO A. E FIORDILINO E., "A didactic experiment and model of a flat-plate solar collector", *Phys. Educ.*, **17** (2011) 312.
- [20] ROUSSEAU J.J., *Emilio o dell'educazione* (Armando Editore, Roma) 1994 (ristampa).
- [21] REIF F., *Fundamentals of statistical and thermal physics* (McGraw-Hill, Singapore) 1985.
- [22] BOAS M.L., *Mathematical methods in the physical sciences*, 2a edizione (John Wiley & Sons, New York) 1983.
- [23] FOCARDI S., MASSA I., UGUZZONI A., *Fisica generale. Meccanica e termodinamica* (CEA, Milano) 1999, Cap. 7.
- [24] SHERWOOD B.A., BERNARD W.H., "Work and heat transfer in the presence of sliding friction", *Am. J. Phys.*, **52** (1984) 1001.
- [25] BESSON U., "Work and energy in the presence of friction: the need for a mesoscopic analysis", *Eur. J. Phys.*, **22** (2001) 613.