

ORCHESTRATEUR

Fisica - Comprendere i modelli, risolvere problemi e discutere i risultati

Una guida approfondita, disponibile offline

Leggere, capire, ritrovare un capitolo

LAFAYETTE DIGITAL PRODUCTS

Sommario

Le voci del sommario sono cliccabili. I segnalibri del PDF consentono di accedere a capitoli e sezioni. Il collegamento in fondo a ogni pagina riporta qui.

Capitolo 1 - Misurare, modellizzare e discutere l'incertezza 7

Capitolo 2 - Cinematica: descrivere il moto senza confonderne le grandezze 16

Capitolo 3 - Dinamica: collegare il bilancio delle forze all'accelerazione 25

Capitolo 4 - Energia e lavoro: scegliere un confine e seguire i trasferimenti 35

Capitolo 5 - Gravitazione e orbite: comprendere una caduta continua 44

Capitolo 6 - Fluidi: pressione, portata e limiti dei modelli di flusso 53

Capitolo 7 - Elettricità: carica, energia ed evoluzione di un circuito RC 63

Capitolo 8 - Termodinamica: distinguere uno stato dai trasferimenti che lo cambiano 74

Capitolo 9 - Onde: propagazione, frequenza, intensità ed effetto Doppler 85

Capitolo 10 - Ottica: diffrazione, interferenza, immagini e cannocchiali 94

Capitolo 11 - Fotoni, livelli energetici e conversione della luce 105

Capitolo 12 - Costruire, verificare e presentare una soluzione di fisica 118

Appendici - Problemi trasversali e risposte ragionate 129

Fisica - Comprendere i modelli, risolvere problemi e discutere i risultati

Una guida ampia per uno studio attivo

Questa guida è pensata per approfondire la fisica al livello dell'insegnamento di specialità dell'ultimo anno del liceo generale francese, chiamato Terminale, riprendendo gli strumenti precedenti necessari. Non comprende tutta la chimica del programma di fisica e chimica e non è un elenco ufficiale di domande d'esame. I riferimenti istituzionali forniscono un quadro; le spiegazioni, le situazioni immaginarie, le dimostrazioni e gli esercizi sono testi originali LFDP. Codex, l'assistente di intelligenza artificiale di OpenAI, ha contribuito alla redazione e alla traduzione italiana. Il manoscritto francese è stato riletto e corretto in modo indipendente. Le poche estensioni oltre le aspettative centrali sono indicate come tali nel testo.

L'obiettivo è passare da una situazione a un modello, dal modello alle relazioni e dalle relazioni a una conclusione difendibile. Un valore numerico corretto senza ipotesi chiare può rispondere alla domanda sbagliata. Una spiegazione priva di calcoli può restare troppo vaga quando i dati consentono una stima. I capitoli collegano quindi idee, argomenti, esempi e verifiche, affinché le formule non siano né ricette isolate né un ostacolo alla comprensione.

Gli esempi di corpi, sorgenti e dispositivi sono didattici. Non descrivono le prestazioni garantite di un prodotto, non prescrivono costruzioni e non sostituiscono una procedura sperimentale supervisionata. I valori arrotondati di g, i materiali immaginari e le semplificazioni sono segnalati. Per un esperimento reale restano essenziali le istruzioni dell'istituto, la supervisione e le caratteristiche del dispositivo.

Organizzazione e percorsi di lettura

Il primo capitolo stabilisce grandezze, unità e misura. I capitoli dal secondo al quinto sviluppano moto, interazioni, energia e gravitazione. Il sesto tratta i fluidi; il settimo i circuiti elettrici e il comportamento RC; l'ottavo la termodinamica. Dal nono all'undicesimo si collegano onde, ottica e fotoni. Il capitolo finale riunisce i metodi per risolvere e discutere i problemi. Le appendici propongono altri problemi, con soluzioni spiegate e distinzioni che attraversano più temi.

Per una prima lettura, segui questo ordine, perché i ragionamenti su moto ed energia ricompaiono in seguito. Per un ripasso mirato, parti da una domanda a cui non sai rispondere, poi torna alla definizione o al modello da cui dipende la risposta. Ogni capitolo è organizzato in brevi sezioni per ritrovare rapidamente le spiegazioni su un telefono o in una versione stampata. Questa struttura documentale non garantisce il funzionamento di uno specifico lettore software.

Una sessione di studio può avere tre fasi: leggere una sezione senza cercare di memorizzare tutto; chiudere il testo e spiegare l'idea in poche frasi; risolvere un esercizio dichiarando le ipotesi prima di confrontare il lavoro con la soluzione. Se la tua risposta è diversa, individua prima il punto in cui il ragionamento diverge. Cambiare soltanto il risultato finale non trasforma un errore in apprendimento.

Convenzioni e uso delle soluzioni svolte

Le equazioni usano simboli definiti nel loro contesto. Il segno di una forza, di una velocità o di uno scambio di energia dipende dalla convenzione dichiarata. Una lettera può rappresentare grandezze diverse in due capitoli; ha la precedenza la definizione locale. Le potenze di dieci e i prefissi vanno convertiti prima della sostituzione numerica. Il punto centrale in un'unità, come J·s, indica una moltiplicazione; un esponente negativo indica un reciproco.

Una soluzione svolta è un esempio di percorso, non l'unica esposizione accettabile. Altre strade possono essere equivalenti se usano ipotesi coerenti e rispondono alla stessa domanda. Tuttavia, due valori simili non bastano a dimostrare l'equivalenza di due modelli. I controlli di dimensioni, segni, ordini di grandezza e condizioni iniziali devono accompagnare il calcolo.

Questo documento resta didattico e disponibile senza connessione. Non fornisce allerte, diagnosi o validazioni di un dispositivo reale. La lunghezza del manoscritto, il registro delle fonti e i conteggi delle parole garantiscono tracciabilità; non costituiscono una certificazione didattica o tecnica.

Capitolo 1 - Misurare, modellizzare e discutere l'incertezza

Obiettivi: distinguere una grandezza da un'unità, scegliere un sistema e un modello, leggere una misura e spiegarne un limite. I capitoli successivi sviluppano i meccanismi introdotti da queste prime situazioni.

Riferimento storico - 1960: dare un nome a un sistema comune di misura

Nel 1960, l'undicesima Conferenza generale dei pesi e delle misure diede al sistema fondato sulle unità di base allora adottate il nome di Sistema internazionale di unità e l'abbreviazione SI. Questo riferimento istituzionale mostra che un'unità non è una preferenza individuale: appartiene a un'organizzazione condivisa della misura. Il ragionamento dimensionale di questo capitolo usa tale coerenza; non dipende dal paese in cui viene scritto un risultato. L'adozione di un linguaggio comune non elimina però né l'incertezza di una particolare misura né i limiti del modello impiegato.

Riferimento del fatto storico, consultato per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026: BIPM, risoluzione 12 dell'11ª CGPM, 1960, https://www.bipm.org/fr/committees/cg/cgpm/11-1960/resolution-12. Analisi didattica LFDP, senza citazione letterale né riproduzione di immagini.

1. Partire da una domanda che si possa esaminare

«Questo oggetto si muove velocemente» esprime un'impressione; «la sua posizione aumenta di due metri in un secondo in questo sistema di riferimento» descrive un risultato verificabile. La fisica comincia quindi non scegliendo una formula, ma precisando il sistema studiato, la grandezza cercata e le condizioni di osservazione. Studiare un carrello richiede di decidere se includere il carico, definire un'origine delle posizioni e dichiarare come si misura il tempo.

Un esperimento e un modello rispondono a esigenze diverse. Un esperimento fornisce osservazioni effettuate in circostanze particolari; un modello organizza relazioni che le spiegano o prevedono altri risultati. Un modello di punto materiale può essere utile per lo spostamento di un carrello senza descrivere la rotazione delle ruote. Questa semplificazione non è un errore se viene dichiarata ed è adatta alla domanda. Diventa ingannevole quando le si chiede di descrivere ciò che ha deliberatamente escluso.

Per preparare una soluzione, scrivi quattro righe: sistema, sistema di riferimento, ipotesi, incognita. Spesso evitano più errori di un lungo elenco di formule. Se l'incognita è un'energia, ottenere soltanto una velocità non risponde ancora alla domanda.

2. Una grandezza non è né il suo valore numerico né la sua unità

Una lunghezza di 1.20 m e una di 120 cm sono identiche. Il valore numerico cambia al cambiare dell'unità, mentre la grandezza resta la stessa. Il Sistema internazionale collega le misure; qui metro, secondo e chilogrammo fungono da unità di riferimento. Distingui la massa, espressa in chilogrammi, dal peso, una forza espressa in newton.

Le dimensioni offrono un controllo indipendente dal calcolo numerico. In una relazione della forma distanza = velocità × durata, il prodotto (m/s) × s dà effettivamente metri. Un'espressione che somma una lunghezza a un tempo non ha significato in questo quadro. Un'espressione può comunque avere le dimensioni corrette ed essere fisicamente falsa: l'analisi dimensionale elimina errori, ma non dimostra una legge.

Converti 72 km/h: 72 × 1000 / 3600 = 20 m/s. Dimenticare questa conversione prima di calcolare l'energia cinetica amplifica l'errore, perché la velocità verrà elevata al quadrato. Conserva le unità nei passaggi intermedi: mostrano dove un ragionamento ha cambiato natura.

3. Misura, dispersione e incertezza

L'indicazione di 1.20 m non significa che la lunghezza sia conosciuta esattamente. Possono contare la risoluzione dello strumento, la scelta dei punti iniziale e finale, la taratura e la lettura. Ripetere una misura fornisce informazioni sulla sua dispersione; non rivela automaticamente un errore sistematico comune a tutte le misure. Uno strumento con uno scostamento può produrre risultati molto vicini fra loro, ma tutti spostati rispetto al valore corretto.

Supponiamo che due risultati siano 1.20 m e 1.21 m. Senza informazioni sulle loro incertezze, non possiamo concludere che gli oggetti abbiano lunghezze diverse. Se l'esercizio fornisce margini di confronto di 0.02 m, i loro intervalli di valori plausibili si sovrappongono. Questa osservazione richiede prudenza; non dimostra neppure l'uguaglianza esatta delle grandezze. Un margine illustrativo non va trasformato in un intervallo di confidenza statistico senza un metodo che giustifichi tale interpretazione.

La precisione delle cifre riportate deve seguire quella dei dati. Scrivere un'accelerazione con dieci cifre decimali perché la calcolatrice le mostra non produce dieci cifre decimali di informazione. Mantieni abbastanza cifre durante il calcolo, poi arrotonda la risposta finale spiegando la precisione conservata.

4. Descrivere il moto prima di cercarne la causa

La posizione dipende dal sistema di riferimento. Una persona seduta in treno è ferma rispetto al sedile e in movimento rispetto al marciapiede della stazione. Scegliere un riferimento solidale alla Terra per un esercizio vicino al suolo è spesso comodo; considerarlo inerziale resta un'approssimazione, da discutere in funzione della scala e della precisione richiesta.

Nel moto rettilineo, la velocità media è lo spostamento diviso per la durata: $v_{moy} = \Delta x / \Delta t$. Lo spostamento ha un verso; non è la distanza totale percorsa. Un percorso di andata e ritorno può dare spostamento nullo pur avendo una distanza non nulla. La velocità istantanea è la derivata della posizione: $v(t) = x'(t)$. L'accelerazione descrive la variazione della velocità: $a(t) = v'(t)$.

Considera $x(t) = 0.40\,t^2 + 0.20\,t$, con x in metri e t in secondi. I coefficienti hanno le unità necessarie. Otteniamo $v(t) = 0.80\,t + 0.20$, poi $a(t) = 0.80$ m/s². A $t = 2$ s, $x = 2.00$ m e $v = 1.80$ m/s. Un'accelerazione costante non significa una velocità costante; significa che la velocità varia a un ritmo regolare.

5. Un bilancio delle forze appartiene a un sistema

Per un sistema a massa costante in un riferimento inerziale, la seconda legge di Newton ha forma vettoriale: somma delle forze esterne = $m \times a$. Lungo un asse scelto, proietta questa relazione usando segni coerenti. Somma le forze che agiscono sul sistema, non quelle che esso esercita sull'ambiente circostante.

Un carrello di massa 2.0 kg subisce una forza di trazione orizzontale di 3.0 N e un attrito opposto di 1.0 N. La risultante orizzontale è 2.0 N, quindi l'accelerazione è 1.0 m/s² nel verso della trazione. Se trazione e attrito fossero uguali, l'accelerazione sarebbe nulla. Il carrello potrebbe comunque continuare a muoversi a velocità costante. «Avanza, quindi la risultante è positiva» è una conclusione errata.

Le forze reciproche di un'interazione agiscono su due sistemi differenti. Non si annullano nel bilancio delle forze di ciascun sistema preso da solo. Allo stesso modo, peso e reazione normale del suolo possono equilibrarsi in una situazione particolare senza essere una coppia di azione e reazione: i partner delle loro interazioni non sono gli stessi.

6. Cambiare approccio usando l'energia

La dinamica collega forze e accelerazione; un approccio energetico può evitare di descrivere ogni istante del moto. Per un oggetto di massa m che si muove con velocità di modulo v, l'energia cinetica è E_c = (1/2) m v². In un campo gravitazionale assunto uniforme, un'energia potenziale si può scrivere E_p = m g h, con un'origine delle quote scelta.

La conservazione dell'energia meccanica richiede ipotesi appropriate. Con l'attrito, l'energia meccanica può diminuire mentre l'energia totale, inclusi gli scambi, continua a essere contabilizzata. La trasformazione in energia interna non è la scomparsa dell'energia. Specifica il confine del sistema e i trasferimenti che lo attraversano.

Un oggetto di 2.0 kg la cui velocità passa da 5.0 a 10.0 m/s vede la propria energia cinetica aumentare da 25 a 100 J. Raddoppiare la velocità quadruplica questa energia nel modello. Ciò non consente

di prevedere una distanza reale di frenata senza conoscere le forze, l'aderenza e le condizioni del moto.

7. La potenza non è una riserva di energia

La potenza media è l'energia trasferita nell'unità di tempo: P_moy = E / Δt. Un watt è un joule al secondo. Una lampada che funziona a potenza costante di 5 W per due ore riceve 10 Wh, cioè 36 000 J. L'energia espressa in Wh e la potenza espressa in W non sono quindi intercambiabili.

Una batteria dichiarata da 20 Wh potrebbe alimentare questa lampada per quattro ore in un modello ideale senza perdite. Un calcolo reale deve considerare rendimento, temperatura, limiti di funzionamento ed energia effettivamente utilizzabile. Il valore ideale dà un ordine di grandezza, non un'autonomia promessa. Non occorre costruire alcun insieme di batterie per comprendere questo ragionamento.

8. Discutere due modelli senza inventare un disaccordo scientifico

Possiamo confrontare un modello senza attrito con uno che lo comprende. Il primo semplifica il calcolo e a volte descrive adeguatamente una fase breve; il secondo può riprodurre meglio un'evoluzione più lunga. Non si tratta di decidere quale sia sempre «vero», ma quale risponda alla domanda con un'approssimazione accettabile.

Una differenza fra misura e previsione richiede più controlli: calcolo, unità, procedura, incertezza e ipotesi. Non dimostra immediatamente che la legge studiata sia falsa. Al contrario, salvare un modello aggiungendo senza fine ipotesi non verificabili gli toglie valore esplicativo. Una spiegazione utile dichiara le condizioni nelle quali potrebbe fallire.

9. Esercizi svolti

Esercizio A - Segni. Un oggetto si muove nel verso positivo di x a 4 m/s. La sua velocità diventa 1 m/s dopo 3 s. Calcola l'accelerazione media. Soluzione: $(1 - 4)/3 = -1$ m/s². Il segno descrive il verso della variazione di velocità; non significa che l'oggetto si stia già muovendo nel verso negativo di x. La sua velocità finale resta positiva.

Esercizio B - Energia. Un oggetto di 0.50 kg si muove a 6.0 m/s. Qual è la sua energia cinetica? Soluzione: $E_c = 0.5 \times 0.50 \times 6.0^2 = 9.0$ J. I due fattori 0.5 e 0.50 sono rispettivamente il coefficiente della formula e la massa: confonderli è un errore frequente.

Esercizio C - Modello. Una lampada di 4 W funziona per tre ore. Una batteria è dichiarata da 15 Wh, di cui si assume utilizzabile l'80 %. Soluzione: energia richiesta = 12 Wh; energia utilizzabile = $0.80 \times 15 = 12$ Wh. Il modello dà esattamente la quantità necessaria, senza margine. Non giustifica quindi un'autonomia garantita in condizioni reali.

10. Ripasso attivo

Senza guardare il testo, definisci grandezza, unità, sistema di riferimento e risultante. Poi spiega perché una velocità non nulla possa accompagnarsi a un'accelerazione nulla e perché l'energia meccanica possa diminuire senza che l'energia totale scompaia. Ripeti un calcolo mantenendo le unità e individua un'ipotesi che ne limiti la portata.

Per una risposta orale, presenta un'idea, un calcolo o un esempio, poi un limite. Nello scritto, concludi nei termini della domanda iniziale. Un risultato numerico isolato non mostra né ciò che è stato studiato né perché il calcolo sia appropriato.

11. Scegliere un modello a partire da un grafico

Una tabella di misure non arriva con la propria equazione. Per decidere se una relazione sia proporzionale, esamina prima che cosa rappresenta l'origine. Se un allungamento x è misurato rispetto alla lunghezza di una molla non caricata, una legge $F = kx$ passa per l'origine nel modello elastico lineare. Se lo strumento ha uno scostamento costante, i dati possono invece seguire $F = kx + b$. Il termine b non è automaticamente una nuova proprietà della molla: può descrivere un errore di zero o una forza già presente. La distinzione va esaminata attraverso la procedura, non scelta soltanto perché una retta appare convincente.

Considera i seguenti punti immaginari: x vale 0.010; 0.020; 0.030 m e F vale rispettivamente 0.23; 0.43; 0.63 N. Fra punti successivi la forza varia di 0.20 N per una variazione di allungamento di 0.010 m. La pendenza è quindi 20 N/m. La relazione lineare che passa per questi punti è $F = 20x + 0.03$. Interpretare la pendenza come costante elastica richiede un allungamento ben definito e un opportuno regime lineare. Interpretare l'intercetta come errore strumentale richiede un'altra verifica. Il calcolo distingue due parametri; da solo non decide le loro cause.

Per verificare una relazione $F = kv^2$, tracciare F in funzione di v^2 può rendere la struttura più visibile che tracciare F in funzione di v. Trasformare gli assi pone una domanda ai dati. Non elimina la necessità di controllare le unità e l'intervallo in cui l'ipotesi vale. Estrapolare una legge adattata su un piccolo intervallo può produrre una previsione numericamente precisissima ma fisicamente molto fragile.

12. Una stima differenziale dell'incertezza

Supponiamo di calcolare una velocità come v = d/t da misure indipendenti di distanza e durata. Una stima usuale dell'incertezza standard combinata, quando le incertezze relative sono piccole e il modello linearizzato è appropriato, dà u(v)/v = sqrt[(u(d)/d)² + (u(t)/t)²]. Questa relazione combina incertezze standard; non somma margini massimi garantiti. Una correlazione fra le misure cambierebbe il calcolo. Occorre quindi conoscere la natura dei numeri usati prima di inserirli in questa espressione.

Con d = 2.00 m, u(d) = 0.01 m, t = 1.00 s e u(t) = 0.02 s, la velocità calcolata è 2.00 m/s. I contributi relativi sono 0.005 e 0.020. La loro combinazione in quadratura è circa 0.0206, perciò l'incertezza standard della velocità è circa 0.041 m/s. In questo esempio, migliorare soltanto la misura della distanza cambierà poco l'incertezza complessiva: domina la durata. Questa conclusione orienta un miglioramento sperimentale concreto anziché una moltiplicazione di cifre decimali.

Un approccio più elementare può usare limiti dati: se d è compresa in [1.99; 2.01] m e t in [0.98; 1.02] s, allora d/t è compresa in [1.99/1.02; 2.01/0.98], circa [1.951; 2.051] m/s. Questo secondo calcolo risponde a una domanda diversa e usa ipotesi differenti. Presentare i due approcci come identici farebbe perdere l'informazione che contengono. La competenza ricercata consiste nello scegliere e nominare il metodo, poi valutare quale misura meriti di essere migliorata.

Capitolo 2 - Cinematica: descrivere il moto senza confonderne le grandezze

Riferimento storico - 1638: combinare due moti

I Discorsi di Galileo, pubblicati a Leida nel 1638, trattano fra l'altro il moto parabolico dei proiettili. Il Museo Galileo collega questo risultato alla combinazione di un moto orizzontale e di un moto di caduta uniformemente accelerato. Questo riferimento storico chiarisce la separazione delle equazioni lungo due assi in questo capitolo. La forma disegnata di una parabola non dimostra che qualsiasi oggetto reale seguirà esattamente quella traiettoria: vanno sempre discusse la resistenza dell'aria e le condizioni iniziali. La storia di un'idea aiuta a capire perché una dimostrazione debba dichiarare le proprie ipotesi.

Riferimento del fatto storico, consultato per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026: Museo Galileo, scheda di catalogo dell'apparecchio che dimostra una traiettoria parabolica, https://catalogue.museogalileo.it/object/ApparatusToDemonstrateParabolicTrajectoryProjectiles.html. Analisi didattica LFDP, senza citazione letterale né riproduzione di immagini.

1. Il problema e le scelte necessarie

La cinematica descrive dove si trova un sistema e come cambia la sua posizione. Non cerca ancora la forza responsabile. Questa separazione è feconda: osservare una traiettoria permette di formulare una domanda di dinamica, ma una traiettoria da sola non rivela tutte le interazioni. Una palla che descrive una parabola in un video non dimostra, soltanto con la propria forma, che l'attrito sia trascurabile. Collega questa ipotesi alle condizioni e alla precisione dei dati.

Prima di calcolare, indica il sistema, il sistema di riferimento, il sistema di coordinate spaziali e l'origine dei tempi. Il sistema può

essere un oggetto di cui si studia il centro di massa, un'approssimazione utile quando la rotazione non è l'oggetto della domanda. Il sistema di riferimento è il quadro fisico rispetto al quale viene descritto il moto. Il sistema di coordinate fornisce assi, un'origine e coordinate. L'origine dei tempi definisce che cosa significhi t = 0: l'inizio di una registrazione, un lancio o il passaggio davanti a un segno. Queste scelte non sono dettagli di presentazione; fissano il significato delle grandezze.

Un treno che si muove regolarmente illustra la dipendenza dal riferimento. Un passeggero seduto ha una posizione costante nel sistema di coordinate della carrozza. In quello del marciapiede della stazione la sua posizione cambia. Due descrizioni differenti possono essere corrette perché rispondono a domande differenti. Qui si userà generalmente un riferimento solidale alla Terra; la sua approssimazione come riferimento inerziale sarà discussa nel capitolo sulle forze. Per iniziare, tutte le coordinate sono espresse in un sistema ortonormale fisso e il tempo in secondi.

2. Posizione, traiettoria e spostamento

In due dimensioni, il vettore posizione è OM(t) = x(t) e_x + y(t) e_y. I vettori e_x ed e_y rappresentano le direzioni degli assi. La traiettoria è l'insieme delle posizioni occupate; le leggi orarie precisano inoltre quando vengono occupate. Due oggetti possono seguire la stessa curva con ritmi diversi. Guardare soltanto una fotografia di questa curva non permette quindi di stabilire la velocità.

Lo spostamento fra due istanti è la differenza fra i vettori posizione. Dipende dagli estremi del percorso, mentre la distanza percorsa dipende dall'intero cammino. Una persona cammina per 60 m verso est, poi per 40 m verso ovest. La distanza totale è 100 m; lo spostamento è 20 m verso est. Se il percorso dura 50 s, la velocità vettoriale media è 0.40 m/s verso est, mentre la velocità

scalare media, cioè la distanza divisa per la durata, è 2.0 m/s. Specifica quale significato usi per evitare ambiguità.

Il moto rettilineo avviene lungo una retta, ma può comprendere un'inversione del verso. Una coordinata x(t) che aumenta e poi diminuisce rappresenta questa inversione senza richiedere che l'asse si muova. Il moto circolare è definito da una traiettoria circolare; può essere uniforme o non uniforme. Qui «uniforme» descrive la costanza della velocità scalare, ossia del modulo della velocità vettoriale. La terminologia combina quindi una proprietà geometrica della traiettoria con una proprietà temporale, che vanno esaminate separatamente.

3. La velocità come variazione della posizione

La velocità media fra t e t + Δt è ΔOM/Δt. La velocità istantanea è il limite di questo rapporto quando Δt tende a zero, se la posizione è derivabile. Scriviamo v = dOM/dt, quindi $v_x = dx/dt$ e $v_y = dy/dt$. Il suo modulo è $\sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ nel nostro sistema di coordinate. Le unità sono metri al secondo. Il vettore velocità è tangente alla traiettoria e punta nel verso del moto quando il suo modulo non è nullo.

Questa definizione collega la rappresentazione grafica al calcolo. Su un grafico di x in funzione di t, la pendenza di una secante dà una velocità media. La pendenza della tangente dà v_x in un particolare istante. Una pendenza negativa significa che la coordinata diminuisce; non significa che il modulo della velocità sia negativo. In un grafico velocità-tempo, un'area con segno dà uno spostamento, non una posizione assoluta in assenza di una condizione iniziale.

Considera $x(t) = 3 + 2t - 0.50t^2$, con unità appropriate. Allora $v_x(t) = 2 - t$. A t = 1 s, l'oggetto si muove nel verso positivo; a t = 2 s, la sua velocità è nulla; a t = 3 s, si muove nel verso negativo.

La sua coordinata a t = 2 s è 5 m. La velocità nulla in quell'istante non cancella né la sua posizione né l'evoluzione successiva. Qui caratterizza un'inversione, stabilita dal cambiamento di segno di v_x attorno a quell'istante.

4. L'accelerazione descrive una variazione vettoriale

L'accelerazione è $a = dv/dt$. Le sue componenti sono le derivate delle componenti della velocità e le sue unità sono m/s^2. Può cambiare il modulo della velocità, la sua direzione o entrambi. Nell'esempio precedente, $a_x = -1\ m/s^2$. Prima dell'inversione, velocità e accelerazione hanno versi opposti: il modulo della velocità diminuisce. Dopo l'inversione hanno lo stesso verso: il modulo aumenta. La stessa accelerazione negativa corrisponde quindi a due diverse variazioni della velocità scalare.

Nel moto rettilineo è utile confrontare i segni di v_x e a_x. Un prodotto positivo indica un aumento del modulo della velocità, salvo nel punto in cui la velocità è nulla; un prodotto negativo indica una diminuzione. Non trasferire questa regola senza modifiche a un moto nel piano confrontando arbitrariamente una sola componente. Bisogna invece considerare la proiezione dell'accelerazione nella direzione della velocità.

Un'accelerazione nulla in un intervallo implica un vettore velocità costante in quell'intervallo. Un'accelerazione nulla in un solo istante non basta. Analogamente, una velocità scalare costante non implica accelerazione nulla. Il moto circolare uniforme offre un controesempio decisivo: il vettore velocità ruota e la sua derivata punta verso il centro. L'intuizione quotidiana secondo cui «accelerare» significa «andare più veloce» deve quindi essere arricchita per diventare un concetto fisico.

5. Costruire le leggi orarie con accelerazione costante

Lungo un asse, se $a_x = a$ è costante e $v_x(0) = v_0$, l'integrazione dà $v_x(t) = v_0 + at$. Una seconda integrazione, con $x(0) = x_0$, dà $x(t) = x_0 + v_0t + at^2/2$. Le costanti di integrazione esprimono le condizioni iniziali. Dimenticarle significa risolvere un problema diverso. L'espressione vale soltanto durante la fase in cui si assume costante l'accelerazione.

Possiamo ritrovare lo spostamento dal grafico della velocità: l'area di un rettangolo v_0t più l'area con segno di un triangolo $at^2/2$. Questo secondo approccio non è una formula concorrente; chiarisce perché il tempo compaia al quadrato. Per confrontare due traiettorie, conserva le stesse origini o dichiara le loro differenze. Due espressioni che contengono costanti diverse non sono necessariamente incompatibili.

Un corpo parte da $x_0 = 10$ m con $v_0 = 4$ m/s e $a = 2$ m/s². Dopo 3 s, la sua velocità è 10 m/s e la sua posizione è 31 m. Lo spostamento è 21 m. La velocità media durante questa fase è $(4 + 10)/2 = 7$ m/s, perché la velocità varia linearmente; moltiplicando per 3 s si ottiene lo stesso spostamento. Usare la velocità finale per l'intera durata darebbe 30 m e sovrastimerebbe lo spostamento.

6. Un proiettile in un campo uniforme: un modello esplicito

Consideriamo un proiettile lanciato dall'origine con velocità iniziale di modulo v_0, a un angolo α sopra l'orizzontale. Nel modello privo di resistenza dell'aria, l'accelerazione è $(0, -g)$, con g costante. Le condizioni iniziali danno $x(t) = v_0 \cos(\alpha)t$ e $y(t) = v_0 \sin(\alpha)t - gt^2/2$. I moti orizzontale e verticale condividono la stessa variabile temporale; studiarli separatamente non li rende fisicamente indipendenti.

Se $\cos(\alpha)$ non è nullo, si elimina t per ottenere $y = x \tan(\alpha) - gx^2/[2v_0^2 \cos^2(\alpha)]$. La traiettoria è una parabola in questo modello.

Nel punto più alto, $v_y = 0$, ma la velocità orizzontale resta generalmente non nulla. Il tempo necessario per raggiungerlo è $v_0 \sin(\alpha)/g$. Per un ritorno alla stessa quota, il tempo di volo positivo è il doppio di questo valore e la gittata è $v_0^2 \sin(2\alpha)/g$. Quest'ultima espressione non si applica direttamente se le quote di partenza e di arrivo sono differenti.

Con $v_0 = 10$ m/s, $\alpha = 30°$ e $g = 10$ m/s² scelto per l'esercizio, otteniamo $v_y(0) = 5$ m/s, un punto più alto a 0.50 s e un'altezza massima di 1.25 m. Il ritorno al livello iniziale avviene a 1.0 s; la gittata è circa 8.66 m. Questi numeri descrivono una situazione ideale immaginaria, non istruzioni per un lancio reale. Vento, forma dell'oggetto e resistenza dell'aria possono modificare sensibilmente una traiettoria.

7. Moto circolare: separare direzione e modulo della velocità

Una posizione circolare può essere parametrizzata da $x = R\cos(\omega t)$ e $y = R\sin(\omega t)$, con R e ω costanti. Derivando si ottengono $v_x = -R\omega \sin(\omega t)$, $v_y = R\omega \cos(\omega t)$, poi un modulo $R|\omega|$. Una seconda derivazione dà $a_x = -R\omega^2 \cos(\omega t)$, $a_y = -R\omega^2 \sin(\omega t)$. L'accelerazione è quindi opposta al vettore posizione: punta verso il centro e il suo modulo è $R\omega^2 = v^2/R$.

Il periodo è $T = 2\pi/|\omega|$. Su una circonferenza di raggio 2 m percorsa in 4 s, il modulo della velocità è $2\pi R/T = \pi$ m/s e quello dell'accelerazione è $\pi^2/2$, circa 4.93 m/s². Il vettore velocità non è mai costante durante il giro, benché lo sia il suo modulo. Questa accelerazione ha una definizione cinematica; il prossimo capitolo cercherà la risultante delle forze capace di produrla.

Quando il modulo della velocità cambia, alla componente normale si aggiunge una componente tangenziale. Nel sistema di coordinate locale della traiettoria, $a_t = dv/dt$ per la velocità scalare v e $a_n = v^2/R$ per una traiettoria circolare. Il sistema di

coordinate locale ruota con il moto: i suoi vettori di base non vanno derivati come se fossero fissi. Questa precisazione evita di confondere una rappresentazione comoda dell'accelerazione con il calcolo corretto della sua derivata.

8. Stimare la velocità da una registrazione

Posizioni misurate a intervalli regolari Δt possono fornire una stima centrale v(t_i) ≈ [x_(i+1) − x_(i−1)]/(2Δt). Questa espressione usa punti vicini; non dà direttamente valori agli estremi della registrazione. Ridurre Δt può descrivere meglio variazioni rapide, ma il rumore sulla posizione diventa più importante rispetto alla differenza calcolata. Un campionamento più fine non migliora quindi automaticamente ogni stima.

Per x in tre istanti successivi uguale a 0.12; 0.20; 0.31 m, con Δt = 0.10 s, la velocità centrale stimata è (0.31 − 0.12)/0.20 = 0.95 m/s. Le velocità medie sui due intervalli sono 0.80 e 1.10 m/s. La loro evoluzione suggerisce un'accelerazione positiva in questo riferimento. Con sole tre posizioni incerte, non dimostra che l'accelerazione resti costante lungo tutta la traiettoria.

L'accelerazione stimata con una differenza seconda è [x_(i+1) − 2x_i + x_(i−1)]/Δt². Qui vale 3.0 m/s². Il denominatore al quadrato rende la stima sensibile agli errori sulla posizione. Prima di interpretare un'oscillazione brusca dell'accelerazione, esamina risoluzione, taratura e tracciamento dei punti. Una curva calcolata non è un'osservazione diretta indipendente dai dati che l'hanno prodotta.

9. Esercizi svolti ed errori da riconoscere

A - Andata e ritorno. Un corpo percorre 30 m verso est in 10 s, poi torna per 10 m verso ovest in 5 s. Calcola distanza, spostamento e le due medie del moto. Soluzione: distanza 40 m, spostamento 20 m verso est, durata 15 s. La velocità vettoriale media è 20/15 = 1.33 m/s verso est; distanza/durata vale 2.67 m/s. La semplice media di 3 e 2 m/s non è appropriata: le fasi hanno durate differenti.

B - Arresto ideale. Un corpo ha $v_0 = 6$ m/s e $a_x = -2$ m/s² fino al primo arresto. Soluzione: $v_x = 6 - 2t$ si annulla a 3 s. Lo spostamento è $6\times3 - 3^2 = 9$ m. Estendere questa espressione oltre 3 s prevederebbe un moto inverso; questa estensione è valida soltanto se la stessa accelerazione continua effettivamente ad agire. Per una semplice frenata che termina a riposo, cambia la fase e il modello.

C - Punto più alto. L'accelerazione è nulla alla sommità di una traiettoria parabolica ideale? Soluzione: no, resta $(0, -g)$. Si annulla soltanto la componente verticale della velocità. La confusione nasce dal sostituire la velocità alla sua derivata.

D - Lettura di un grafico. Una curva x(t) è una retta di pendenza −3 m/s. Soluzione: il moto è uniforme e rettilineo in questo riferimento, con $v_x = -3$ m/s e $a_x = 0$. Una diversa curva $v_x(t)$ con pendenza −3 m/s² descriverebbe un'accelerazione costante, una situazione differente. Le etichette degli assi determinano il significato della pendenza.

10. Ripasso e portata

Per ripassare, ricostruisci le leggi orarie dall'accelerazione e dalle condizioni iniziali, poi controllale derivando. Disegna separatamente posizione, velocità e accelerazione per un'inversione. Spiega il moto circolare senza dire «la velocità non cambia»: precisa che il suo modulo resta costante mentre la sua direzione varia. Ogni descrizione deve specificare il riferimento, le unità e la fase studiata.

Questo capitolo sviluppa ragionamenti ed esercizi originali LFDP. Il suo quadro è il programma ufficiale pubblicato di fisica e chimica, componente di fisica: https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm ; allegato consultato per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026: https://cache.media.education.gouv.fr/file/SPE8_MENJ_25_7_2019/92/9/spe249_annexe_1158929.pdf. Non vengono riprodotti testi del programma, quesiti d'esame o figure di terzi. Le situazioni numeriche sono immaginarie e non devono servire come istruzioni di sicurezza stradale o per esperimenti pericolosi.

Capitolo 3 - Dinamica: collegare il bilancio delle forze all'accelerazione

Riferimento storico - 1687: organizzare la meccanica attraverso principi

I Principia di Newton furono pubblicati nel 1687 sotto gli auspici della Royal Society, che conserva il manoscritto associato alla prima edizione. Per il lettore, questa tappa colloca le leggi studiate all'interno di una costruzione matematica della meccanica, anziché in un semplice elenco di ricette numeriche. L'approccio di questo capitolo resta fondato sulla giustificazione: scegliere il sistema, individuare le interazioni, proiettare e poi risolvere. L'importanza storica di un'opera non elimina la necessità di dichiarare i limiti del quadro newtoniano quando una situazione richiede un modello diverso.

Riferimento del fatto storico, consultato per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026: Royal Society, presentazione del manoscritto dei Principia, https://royalsociety.org/blog/2014/07/principia/. Analisi didattica LFDP, senza citazione letterale né riproduzione di immagini.

1. Definire ciò che riceve le forze

Una forza descrive un'interazione esercitata su un sistema da un altro sistema. Prima di elencare le forze, scegli il confine studiato. Per un libro appoggiato su un tavolo, il sistema può essere il solo libro: la Terra e il tavolo esercitano allora forze esterne. Se libro e tavolo sono studiati insieme, la loro interazione reciproca diventa interna. Un elenco di forze non può quindi essere corretto indipendentemente dal sistema scelto. Questa è la prima decisione in un esercizio di dinamica.

Rappresenta ogni forza con un vettore, caratterizzato da direzione, verso e modulo in newton. Per il moto di traslazione del centro di

massa è decisiva la risultante esterna. I problemi di rotazione richiedono punti di applicazione e momenti; questa guida non sostituisce un corso completo di meccanica del corpo rigido. Disegnare frecce verso un punto che rappresenta il centro di massa è una convenzione del diagramma, non l'affermazione che tutte le interazioni avvengano fisicamente lì.

Elenca i partner delle interazioni prima di cercare formule: Terra, sostegno, cavo, aria, un altro oggetto carico. Il moto non è un partner. Non esiste quindi una forza «del moto in avanti» da aggiungere perché un oggetto si muove. Il vettore velocità descrive lo stato di moto; le forze descrivono interazioni capaci di modificarne la quantità di moto.

2. Inerzia e riferimenti inerziali

In un riferimento inerziale, un sistema isolato o sottoposto a una risultante esterna nulla conserva un vettore velocità costante. Può essere a riposo oppure in moto rettilineo uniforme. L'inerzia non è quindi una particolare tendenza a fermarsi. Gli arresti osservati nella vita quotidiana derivano spesso dalle interazioni con il suolo o con l'aria. La loro onnipresenza spiega l'intuizione errata secondo cui una forza sarebbe indispensabile per mantenere qualsiasi velocità.

Un riferimento in traslazione rettilinea uniforme rispetto a un riferimento inerziale è a sua volta inerziale nella meccanica classica. Un sistema di coordinate legato a un veicolo che accelera non lo è, nelle stesse condizioni. Descrivere una palla libera come accelerata rispetto a quel veicolo non significa che le sia stata applicata una nuova interazione fisica. Per usare la seconda legge nella sua forma semplice, scegli un riferimento appropriato; altrimenti occorre introdurre termini inerziali nell'ambito di una teoria esplicitamente dichiarata.

Un riferimento solidale alla Terra è un'approssimazione usuale per le durate e le distanze modeste di un esercizio scolastico. La rotazione terrestre limita questa approssimazione, soprattutto per alcuni moti molto estesi o precisi. Un'ipotesi può essere eccellente per un carrello seguito per due secondi e insufficiente per la circolazione atmosferica. L'adeguatezza di un riferimento dipende dal problema, non da un'etichetta assoluta di «vero» o «falso».

3. La seconda legge e le proiezioni

La quantità di moto è p = mv. La forma generale usuale per un sistema materiale in un riferimento inerziale collega la risultante esterna a dp/dt. Per un sistema chiuso a massa costante, questa diventa somma F_ext = ma. I problemi a massa variabile, come un sistema aperto che espelle materia, richiedono un bilancio appropriato; usare semplicemente ma con una massa che cambia, senza esaminare gli scambi, non basta.

In un sistema di coordinate ortonormale fisso, la relazione vettoriale dà un'equazione per ogni asse: somma F_x = ma_x, somma F_y = ma_y. I segni derivano dalla proiezione, non dal nome della forza. Il peso di un oggetto lungo un asse verticale rivolto verso l'alto vale −mg; lungo un asse rivolto verso il basso vale +mg. L'attrito si oppone allo scorrimento relativo in un modello semplice, ma il suo segno dipende dal verso dello scorrimento e dall'asse scelto.

Il metodo comprende sei passaggi: dichiarare sistema e riferimento; individuare le interazioni; scegliere gli assi; proiettare le forze; risolvere per l'accelerazione o per l'incognita richiesta; interpretare. Se il moto è vincolato a un sostegno, questo fornisce un'equazione aggiuntiva. Non si può sempre assumere N = mg prima delle proiezioni: una trazione obliqua, un piano inclinato o un'accelerazione verticale cambierebbero la reazione normale.

4. Peso, massa e contatto

La massa caratterizza l'inerzia nella relazione ma, fra altre proprietà; il peso è la forza gravitazionale esercitata dalla Terra nel modello vicino alla superficie P = mg. Una data massa mantiene il suo valore cambiando luogo nelle situazioni ordinarie di questa guida, mentre il peso dipende dal campo gravitazionale. Il chilogrammo è un'unità di massa; il newton è un'unità di forza. Dire che un peso è «2 kg» mescola due grandezze, anche se il linguaggio quotidiano usa questa espressione.

La forza di contatto di un sostegno si può scomporre in una componente normale e una tangenziale. Su un sostegno orizzontale senza accelerazione verticale, un oggetto sottoposto soltanto a peso e contatto soddisfa N = mg. Ciò non significa che peso e reazione formino una coppia di azione e reazione: il peso è esercitato dalla Terra sull'oggetto, la reazione dal sostegno sull'oggetto. Le forze reciproche corrispondenti sono esercitate dall'oggetto sulla Terra e sul sostegno.

Un ascensore offre un esempio immaginario. Per una persona di massa 60 kg, con g = 10 m/s² per il calcolo, un'accelerazione verso l'alto di 1 m/s² dà N − mg = ma, quindi N = 660 N. Con un'accelerazione verso il basso dello stesso modulo, N = 540 N. La massa non è cambiata; è cambiata la forza di contatto. Una bilancia basata su questa forza può quindi mostrare un valore diverso quando viene usata fuori dalle condizioni assunte per la sua conversione.

5. Attrito: una relazione che dipende dal regime

L'attrito statico può impedire lo scorrimento e si adatta, in un modello semplice, fino a un modulo massimo $\mu_s N$. Finché l'oggetto non scivola, imporre automaticamente $f = \mu_s N$ è errato. Se una forza di trazione orizzontale di 2 N è equilibrata da un possibile attrito statico di quel modulo, la risultante orizzontale è nulla. Il massimo è un limite, non un valore sempre raggiunto.

Quando avviene lo scorrimento, un modello semplificato di attrito fra solidi usa $f = \mu_k N$, diretto contro la velocità relativa al sostegno. I coefficienti dipendono dalle superfici e dalle condizioni; non sono costanti universali garantite. La resistenza dell'aria segue altri modelli, come una dipendenza dalla velocità o dal suo quadrato in certi intervalli. Confondere questi regimi farebbe identificare il meccanismo sbagliato, anche se le unità del calcolo restassero coerenti.

Il verso non è sempre «all'indietro» nel riferimento terrestre. Una cassa trasportata senza scivolare da un nastro che accelera può ricevere una forza d'attrito nel verso della propria accelerazione. La domanda corretta è quale scorrimento relativo venga impedito o contrastato. Questo esempio mostra perché si debbano definire entrambe le superfici e il loro moto relativo prima di disegnare la freccia.

6. Un piano inclinato: usare la geometria delle coordinate

Consideriamo un oggetto di massa m su un piano inclinato di un angolo α. Scegliamo un asse parallelo al piano, rivolto verso il basso, e un asse normale rivolto verso l'esterno. Il peso ha una componente mg sin(α) lungo la discesa e −mg cos(α) lungo la normale. Se l'oggetto resta a contatto con il piano e non ha accelerazione normale, la reazione normale è N = mg cos(α). In questo sistema di coordinate la geometria è più semplice che con assi orizzontale e verticale.

Senza attrito, l'accelerazione lungo la discesa è g sin(α), indipendente dalla massa in questo modello. Con attrito radente opposto alla discesa, è g[sin(α) − μ_k cos(α)]. Un valore negativo significherebbe che la velocità di discesa diminuisce durante questa fase; non dimostrerebbe che il sistema inizi spontaneamente a muoversi verso l'alto dopo essersi fermato. A riposo vanno esaminati il regime statico e le sue condizioni.

In un esercizio immaginario con m = 2 kg, α = 30°, μ_k = 0.20 e g = 10 m/s², N vale circa 17.32 N. L'attrito vale circa 3.46 N e la componente del peso lungo la discesa è 10 N. La risultante è quindi circa 6.54 N, dando a ≈ 3.27 m/s² verso il basso. Controllare l'ordine di grandezza è utile: qui l'attrito riduce l'accelerazione rispetto ai 5 m/s² del modello senza attrito. Questo esempio non fornisce alcun coefficiente di una superficie reale.

7. Tensione e sistema complessivo

Una fune ideale, di massa trascurabile e inestensibile, trasmette la tensione sotto ipotesi appropriate. In una configurazione senza una carrucola di massa rilevante o attrito, il modulo della tensione può spesso essere considerato identico lungo un tratto di fune. Questa semplificazione appartiene al modello; non si applica automaticamente a una fune di massa rilevante o elastica, né a una che passi su un meccanismo che dissipa energia.

Due carrelli immaginari, di masse 1 kg e 2 kg, sono collegati e trainati orizzontalmente da una forza di 6 N, senza attrito. Considerandoli entrambi come sistema, la tensione fra loro è interna: l'accelerazione è $6/(1 + 2) = 2$ m/s². Se la forza tira il carrello di 1 kg, il secondo riceve orizzontalmente soltanto la tensione; $T = 2\times2= 4$ N. Per il primo, $6 - T = 1\times2$ ritrova lo stesso risultato.

Questo doppio studio illustra una strategia: il sistema complessivo semplifica il calcolo di un'accelerazione comune, poi un sottosistema rivela un'interazione interna. Sommare tutte le forze di entrambi i diagrammi senza distinguere i sistemi conterebbe due volte la tensione. Scegliere un confine appropriato è quindi un metodo di soluzione, non una formalità che precede il «vero calcolo».

8. Una risultante perpendicolare alla velocità

Per il moto circolare uniforme, la cinematica dà un'accelerazione verso il centro di modulo v^2/R. La dinamica richiede allora una risultante radiale di modulo mv^2/R. L'espressione «forza centripeta» indica il ruolo di questa risultante; non aggiunge un'interazione alle forze già presenti. A seconda della situazione, tensione, gravitazione o una combinazione di forze di contatto possono svolgere questo ruolo.

Un oggetto di 0.20 kg segue una circonferenza orizzontale ideale di raggio 0.50 m a 2.0 m/s. La risultante verso il centro deve essere $0.20 \times 2.0^2/0.50 = 1.6$ N. Se la tensione è l'unica forza orizzontale, la sua componente orizzontale ha questo modulo. Va comunque affrontato l'equilibrio verticale. La domanda deve precisare la configurazione; il solo calcolo radiale non stabilisce che la tensione totale valga 1.6 N in ogni configurazione.

Una forza perpendicolare alla velocità può cambiarne la direzione senza cambiarne istantaneamente il modulo. Questo prepara il collegamento con la potenza di una forza, definita in seguito dal prodotto scalare $F \cdot v$. Le descrizioni attraverso le forze e attraverso l'energia non si contraddicono: esaminano aspetti diversi della stessa evoluzione. Una forza che non compie lavoro non è necessariamente priva di effetto dinamico.

9. Campo elettrico e segno della carica

In un campo elettrico uniforme E, una particella di carica q riceve la forza elettrica $F = qE$. Per una carica positiva questa forza ha il verso del campo; per una carica negativa ha verso opposto. Assumendo una sola forza rilevante e massa costante, l'accelerazione è $a = qE/m$. Una particella già in moto non viaggia necessariamente nel verso di quell'accelerazione: le condizioni iniziali restano essenziali.

Per una particella immaginaria di massa 2.0×10^−6 kg e carica 3.0×10^−9 C, un campo di 4.0×10^3 N/C dà una forza di 1.2×10^−5 N e un'accelerazione di 6.0 m/s². Con la carica opposta cambia soltanto il verso di questa accelerazione. In un sistema di coordinate in cui il campo è diretto lungo x positivo, a_x assume quindi il segno di q. Le unità N/C moltiplicate per C danno effettivamente N.

Questo esempio teorico non descrive né un esperimento elettrico né un dispositivo domestico. Mostra come un campo traduca un'interazione distribuita nello spazio in una forza su un oggetto di prova. Per una particella reale molto leggera, peso, collisioni o effetti relativistici vanno esaminati a seconda delle condizioni; non sono eliminati semplicemente scrivendo F = qE.

10. Esercizi svolti

A - Forza obliqua. Un blocco di 2 kg riceve una forza di trazione di 5 N a 30° sopra l'orizzontale. Resta su un sostegno orizzontale senza attrito, con g = 10 m/s². Soluzione: verticalmente, N + 5 sin(30°) − 20 = 0, quindi N = 17.5 N. Orizzontalmente, a_x = 5 cos(30°)/2 ≈ 2.17 m/s². Imporre N = 20 N ignorerebbe la componente verticale della trazione.

B - Risultante nulla. Un carrello si muove a 3 m/s con due forze orizzontali opposte di 4 N. Soluzione: la loro somma è nulla; nel modello inerziale a massa costante, la velocità resta costante. Il riposo non è l'unica soluzione. Se una forza scompare, la fase cambia e l'accelerazione diventa non nulla.

C - Interazione reciproca. Due oggetti si respingono. Uno ha massa maggiore. I moduli delle forze reciproche sono differenti? Soluzione: sono uguali e opposti nella meccanica studiata. Le accelerazioni possono differire perché F/m dipende dalla massa. Forze uguali non impongono effetti uguali su due sistemi diversi.

D - Contatto impossibile. Un calcolo dà N < 0 per un sostegno che può soltanto spingere. Soluzione: il modello di contatto permanente è diventato incompatibile con la situazione. Una reazione normale negativa non è un valore fisico da conservare prendendone il valore assoluto. Esamina una fase di perdita del contatto con un nuovo bilancio e nuove condizioni.

11. Ripasso e riferimenti

Ricostruisci un bilancio delle forze senza guardare il diagramma svolto, poi controlla che ogni forza abbia un partner d'interazione. Spiega perché lo stato di moto non sia una forza, perché l'attrito statico non sia sempre al proprio limite e perché una risultante centripeta non sia un'interazione aggiuntiva. Per ogni proiezione, giustifica il segno prima di sostituire i simboli con i valori.

Quadro della progressione: programma ufficiale pubblicato dell'ultimo anno del liceo francese, componente di fisica, https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm. Riferimenti sulle leggi di Newton: NASA Glenn, https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/newtons-laws-of-motion/. Ragionamenti, esempi ed esercizi precedenti sono originali LFDP; non vengono riprodotti passaggi, figure o quesiti d'esame di terzi. Le ipotesi dichiarate appartengono a situazioni didattiche e non certificano alcuna configurazione reale.

Capitolo 4 - Energia e lavoro: scegliere un confine e seguire i trasferimenti

Riferimento storico - 1849: collegare lavoro meccanico e trasferimento termico

Gli archivi della Royal Society conservano un manoscritto di James Prescott Joule datato 4 giugno 1849, riguardante l'equivalente meccanico del calore; fu ricevuto il 6 giugno e presentato il 21 giugno. Questo documento offre un riferimento concreto nello studio dei rapporti fra lavoro e trasferimento termico. Non significa che l'intero primo principio fosse già contenuto in una sola formula scolastica. In questa guida, il suo ruolo didattico è ricordare che una diminuzione dell'energia meccanica deve portarci a esaminare trasferimenti e altre forme di energia, anziché concludere che l'energia sia scomparsa.

Riferimento del fatto storico, consultato per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026: Royal Society, archivi PT/37/3, https://makingscience.royalsociety.org/items/pt_37_3/paper-on-the-mechanical-equivalent-of-heat-by-james-p-prescott-joule. Analisi didattica LFDP, senza citazione letterale né riproduzione di immagini.

1. Perché un approccio energetico?

La dinamica permette di trovare l'accelerazione, poi una traiettoria se sono note le condizioni iniziali. Alcune domande richiedono soltanto la velocità dopo uno spostamento o un trasferimento di energia. Un approccio energetico può allora evitare di calcolare ogni istante del moto. Non sostituisce le forze in ogni situazione: l'energia cinetica dipende dal modulo della velocità e da sola non ne stabilisce la direzione.

Consideriamo una palla che scende lungo una pista ideale. Un'equazione differenziale lungo la pista potrebbe descriverne il moto dettagliato. Se cerchiamo soltanto il modulo della velocità a

una data quota, un bilancio energetico può essere molto più diretto. Tuttavia, conoscere quel modulo non ci dice se la palla resta a contatto in una curva. Quest'ultima domanda richiede una proiezione della seconda legge di Newton. Scegliere un metodo significa quindi esaminare quali informazioni conservi e quali non fornisca.

La prima precauzione consiste nel definire il sistema. Un oggetto da solo, un oggetto insieme alla Terra e un oggetto insieme al proprio sostegno non hanno lo stesso elenco di trasferimenti esterni. La diminuzione dell'energia meccanica di un oggetto non significa una perdita dell'energia totale di tutto ciò che lo circonda. La parola «perdita» indica spesso che l'energia diventa meno utile per lo scopo previsto, per esempio trasformandosi in energia interna, anziché scomparire fisicamente.

2. Lavoro di una forza costante

Per una forza costante F applicata in un punto che si sposta da A a B, il lavoro è W_AB(F) = F·AB = F AB cos(θ), dove θ è l'angolo fra forza e spostamento. Il lavoro è una grandezza con segno, espressa in joule. È positivo se la forza ha una componente nel verso dello spostamento, negativo se quella componente vi si oppone e nullo se è perpendicolare.

Una forza di trazione costante di 10 N forma un angolo di 30° con uno spostamento orizzontale di 3 m. Il suo lavoro è 10×3 cos(30°), circa 26.0 J. Lo stesso modulo di forza in direzione verticale non compirebbe lavoro per questo spostamento orizzontale. Sommare soltanto i moduli delle forze non basterebbe quindi: il loro orientamento è essenziale. Il prodotto scalare esprime precisamente questa dipendenza.

Per una forza variabile, si sommano quantità infinitesime di lavoro F·dr lungo il percorso; in una dimensione, si ottiene un integrale di

F(x) dx. Un'area con segno sotto un grafico di F in funzione di x può rappresentare questo lavoro. Una regione sotto l'asse contribuisce negativamente. Non sostituire l'integrale con «forza finale per distanza» se nessuna ipotesi consente questa scorciatoia.

3. Il teorema dell'energia cinetica

L'energia cinetica di un punto materiale a massa costante è E_c = mv²/2, dove v indica il modulo della velocità. Per questo modello in un riferimento inerziale, la variazione dell'energia cinetica fra A e B è uguale alla somma dei lavori delle forze esterne. Scrivere ΔE_c = somma W non presuppone una risultante costante. Tuttavia, le forze devono appartenere al sistema studiato e il loro lavoro va valutato sullo spostamento pertinente.

Comprendiamo l'origine della relazione facendo il prodotto scalare di ma = somma F con la velocità v. Poiché d(v·v)/dt = 2a·v, otteniamo d(mv²/2)/dt = somma F·v. L'integrazione nel tempo collega la variazione di energia al lavoro. Questa dimostrazione usa massa costante e un modello di punto materiale. Un solido che ruota ha anche energia cinetica di rotazione; ridurlo senza giustificazione all'energia cinetica del suo centro di massa sarebbe incompleto.

Un carrello di 2 kg cambia il modulo della velocità da 1 a 3 m/s. La variazione della sua energia cinetica è (2/2)(9 − 1) = 8 J. Se una trazione fornisce 12 J e un'altra forza fornisce −4 J, la somma è effettivamente 8 J. Il teorema non dice che abbia compiuto lavoro soltanto la trazione. Può anche determinare il lavoro di una forza sconosciuta quando sono noti gli altri trasferimenti e le velocità.

4. Forze conservative ed energia potenziale

Una forza conservativa consente di definire un'energia potenziale la cui variazione è l'opposto del suo lavoro: $W_{AB} = -[E_p(B) - E_p(A)]$. Il suo lavoro dipende soltanto dagli estremi nel dominio considerato. L'energia potenziale è definita a meno di una costante additiva. Scegli un'origine comoda; le variazioni e i risultati fisici non dipendono da essa.

In un campo gravitazionale uniforme con un asse verticale z rivolto verso l'alto, $E_p = mgz$ + costante. Salire di un'altezza h aumenta questa energia di mgh e il lavoro del peso è $-mgh$. La discesa dà il segno opposto. La formula comprende l'interazione con la Terra; non va intesa come una riserva misteriosa legata a una quota assoluta senza riferimento.

Per una molla ideale di costante elastica k e allungamento x misurato dallo stato non caricato, la forza di richiamo è $F_x = -kx$. Una primitiva appropriata dà $E_p = kx^2/2$. Questa è positiva sia per l'allungamento sia per la compressione, con zero nello stato non caricato. La forza è diretta verso quello stato in entrambi i casi. Questa forma presuppone un intervallo elastico lineare: non prevede il comportamento di una molla molto deformata o danneggiata.

5. Conservazione e bilancio dell'energia meccanica

L'energia meccanica è $E_m = E_c + E_p$ per le interazioni conservative incluse. Se soltanto queste forze compiono lavoro, E_m resta costante nel modello. Se forze non conservative compiono lavoro, la variazione dell'energia meccanica corrisponde al loro lavoro, quando il sistema e le sue interazioni sono stati definiti correttamente. L'attrito su un sostegno fermo può quindi ridurre E_m.

Una palla immaginaria di massa 0.50 kg parte da ferma a 3.0 m sopra il livello di arrivo. Con g = 10 m/s² e senza rotazione né attrito, l'energia iniziale è 15 J. All'arrivo è interamente cinetica: v = sqrt(2gh) = sqrt(60), circa 7.75 m/s. La massa si semplifica perché moltiplica entrambe le energie. Questa semplificazione non significa che tutti gli oggetti reali scendano nello stesso modo attraverso l'aria.

Supponiamo ora che l'attrito compia un lavoro di −3.2 J durante la discesa. L'energia cinetica finale è 11.8 J, quindi v = sqrt(2×11.8/0.50) ≈ 6.87 m/s. L'energia meccanica finale è inferiore; l'energia totale non è scomparsa. Per descrivere dove sia stata trasferita, amplia il sistema includendo il sostegno e gli scambi termici. Se la palla rotola, una parte della sua energia cinetica è di rotazione: si tratterebbe ancora di un altro modello.

6. Distanza ideale di arresto e limiti del suo uso

Un modello teorico di frenata con una forza resistente costante di modulo f su un sostegno fisso dà W = −fd. Se il modulo della velocità iniziale è v_0 e quello finale è nullo, il teorema dell'energia cinetica porta a d = mv_0²/(2f). Se f = μmg in un modello di scorrimento, la distanza diventa v_0²/(2μg). La massa si semplifica soltanto perché la forza scelta è proporzionale a essa.

Nel modello, questa espressione mostra una dipendenza quadratica dalla velocità iniziale. Raddoppiare v_0 quadruplica d se μ e g restano identici. Non fornisce alcuna distanza reale garantita: non sono descritti tempo di reazione, condizioni del sostegno, pendenza, controllo della frenata, variazioni della forza e interazione con l'aria. Un risultato scolastico non deve diventare un consiglio operativo di guida.

La distanza percorsa durante una precedente fase a velocità costante è v_0Δt. Si può aggiungere a una distanza di frenata se le

fasi sono nettamente separate e il modello lo giustifica. Questa somma illustra una buona abitudine: individuare i confini temporali prima di combinare bilanci. Usare una sola formula con grandezze appartenenti a fasi diverse produce spesso una risposta priva di significato.

7. Una molla e gli scambi fra due forme di energia

Un oggetto di massa 0.25 kg è collegato a una molla ideale di costante elastica 100 N/m. In un modello orizzontale senza attrito né altro lavoro, un allungamento iniziale di 0.20 m a riposo corrisponde a un'energia potenziale di 2.0 J. Nel passaggio per l'equilibrio, l'energia potenziale scelta è nulla; l'energia cinetica è 2.0 J, dando v = sqrt(2×2.0/0.25) = 4.0 m/s.

L'approccio energetico dà questo modulo della velocità senza calcolare l'istante del passaggio. Il verso dipende dalla fase del moto. Uno studio dinamico darebbe un'equazione di oscillatore e consentirebbe di calcolare il periodo. I metodi si completano: uno descrive un vincolo complessivo, l'altro l'evoluzione nel tempo. È utile sapere che cosa manchi prima di ritenere l'esercizio interamente risolto.

In un grafico dell'energia potenziale, un minimo corrisponde a un equilibrio stabile per questo sistema ideale unidimensionale: un piccolo spostamento produce una forza di richiamo. Un massimo corrisponde a un equilibrio instabile. Dire che la forza è nulla in un punto non ne stabilisce quindi la stabilità. La forma dell'energia attorno a quel punto fornisce l'informazione necessaria. L'attrito può poi smorzare il moto senza cambiare questa distinzione locale nel modello conservativo.

8. Potenza, rendimento e catena di conversione

La potenza istantanea di una forza applicata in un punto con velocità v è P = F·v. La sua media su una durata è il lavoro diviso per quella durata. Un watt è un joule al secondo. Una potenza elevata può fornire rapidamente una data energia; non è l'energia totale. Una riserva espressa in Wh e una potenza espressa in W non vanno quindi sommate o confrontate come grandezze identiche.

Un meccanismo immaginario fornisce un lavoro utile di 600 J in 15 s. La sua potenza utile media è 40 W. Con un rendimento energetico di 0.85 per questa fase, l'energia ricevuta è 600/0.85 ≈ 706 J. Il rendimento è l'energia utile divisa per l'energia ricevuta, per un confine e uno scopo definiti. Non significa che l'energia restante sia stata annientata: corrisponde a trasferimenti che non servono allo scopo scelto.

Per due conversioni successive con rendimenti di 0.80 e 0.90, il rendimento complessivo è 0.72 se le definizioni e le fasi sono compatibili. Non è la media, 0.85. Lo si può comprendere usando 100 J ricevuti: il primo stadio ne dà 80 utili al secondo, che ne fornisce 72. Le perdite relative si applicano a quantità diverse. Recuperare una parte dei trasferimenti può migliorare una catena, ma non aggira la conservazione dell'energia.

9. Scegliere fra forze ed energia

Usa le forze se la domanda riguarda l'accelerazione, il verso, una reazione del sostegno o una tensione. Usa l'energia se il lavoro si calcola facilmente e la domanda riguarda il modulo di una velocità, un'altezza o un trasferimento. Spesso occorrono entrambe. Su una traiettoria circolare, l'energia può determinare la velocità a una quota; la proiezione radiale determina poi la forza di contatto necessaria.

Una difficoltà particolare compare quando il lavoro di una forza di contatto dipende dal moto del sostegno. L'attrito non compie sempre lavoro negativo su ogni oggetto in ogni riferimento. Un nastro trasportatore che porta una cassa può fornirle energia. La dissipazione complessiva va studiata considerando entrambi i sistemi e il loro moto relativo. Questa precisazione evita che una proprietà frequente dell'attrito su suolo fisso diventi una regola assoluta applicata impropriamente.

Anche il calcolo energetico richiede un riferimento coerente: l'energia cinetica dipende dalla velocità nel riferimento scelto. Un oggetto non ha la stessa energia cinetica per un osservatore che lo accompagna e per uno sul suolo. I bilanci restano coerenti se tutte le grandezze sono definite nello stesso quadro. Mescolare velocità di riferimenti diversi in una sola equazione non produce una relazione di conservazione utilizzabile.

10. Esercizi svolti

A - Lavoro nullo. Una forza di 8 N resta perpendicolare a uno spostamento di 5 m. Soluzione: il lavoro è nullo perché $\cos(90°) = 0$. Questa forza può comunque cambiare la direzione della velocità. Un lavoro nullo non stabilisce quindi un'accelerazione nulla.

B - Altezza. Un punto materiale di 0.20 kg ha un'energia cinetica di 4.0 J prima di una salita ideale senza attrito. Con $g = 10\ m/s^2$, di quanto può aumentare la quota se tutta questa energia diventa potenziale? Soluzione: $mgh = 4.0$ dà $h = 2.0$ m. Si assume che nessun'altra forma di energia o vincolo modifichi il bilancio. Lo zero delle quote scelto non cambia questa differenza.

C - Forza variabile. Lungo un asse, una forza è $F_x(x) = 6x$, con x in metri e il coefficiente in N/m. Calcola il lavoro da $x = 0$ a $x = 2$ m. Soluzione: integrando $6x$ si ottiene $3x^2$; il lavoro è 12 J. Usare la

forza finale di 12 N per 2 m darebbe 24 J, perché la forza non aveva il proprio valore finale lungo tutto il percorso.

D - Rendimento. Una catena riceve 500 J, ne trasmette 400 a un secondo stadio e fornisce infine 300 J di energia utile. Soluzione: i rendimenti sono 400/500 = 0.80 e 300/400 = 0.75; il loro prodotto, 0.60, è uguale a 300/500. I due trasferimenti non utili sono ciascuno di 100 J in questo esempio, ma i loro rendimenti relativi differiscono.

E - Conclusione impossibile. Due oggetti hanno la stessa energia cinetica. Hanno la stessa velocità? Soluzione: non necessariamente, perché E_c dipende anche dalla massa. Per un'energia di 10 J, una massa di 1 kg ha velocità di modulo sqrt(20); una massa di 4 kg ha velocità di modulo sqrt(5), la metà. L'uguaglianza di una grandezza non isola un parametro senza conoscere gli altri.

11. Ripasso e fonti

Per ripassare, scrivi un bilancio simbolico prima di qualsiasi sostituzione numerica. Giustifica i segni dei lavori, indica le interazioni corrispondenti a ogni energia potenziale e dichiara le condizioni di conservazione. Poi spiega che cosa un risultato energetico non possa determinare. L'obiettivo è scegliere un metodo appropriato anziché cercare a ogni costo una formula in cui inserire tutti i dati.

Quadro e riferimenti sulle unità: Ministero francese dell'Istruzione nazionale, programma pubblicato dell'ultimo anno del liceo, https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm ; BIPM, Brochure sul SI, https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/, consultati per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026. Discussioni, dimostrazioni ed esercizi sono originali LFDP. Le situazioni immaginarie di questo capitolo non prescrivono montaggi elettrici, esperimenti di frenata o manipolazioni rischiose delle molle.

Capitolo 5 - Gravitazione e orbite: comprendere una caduta continua

1. Un'interazione a distanza e un modello

La gravitazione newtoniana descrive l'attrazione fra due masse. Per due oggetti trattati come punti, di masse M e m separati dalla distanza r, il modulo della forza è GMm/r^2. La costante G è universale in questo modello; non va confusa con g, che descrive un campo gravitazionale locale. Entrambi gli oggetti ricevono forze reciproche di uguale modulo e verso opposto.

Trattare gli oggetti come punti richiede una giustificazione. All'esterno di un corpo perfettamente sferico con una distribuzione di massa a simmetria sferica, il campo gravitazionale è quello di una massa concentrata al centro. Un corpo reale può discostarsi da questa forma e distribuzione. I calcoli orbitali scolastici adottano spesso l'approssimazione; la navigazione spaziale di precisione può trovarla insufficiente. Un risultato non acquista precisione fisica soltanto perché il calcolo usa molte cifre.

Scegliamo un versore e_r diretto dal centro attrattore verso il satellite. La forza sul satellite è $F = -GMm\, e_r/r^2$. Il segno meno esprime l'attrazione. In un riferimento centrato sull'oggetto massiccio, considerato approssimativamente fisso e inerziale, l'accelerazione del satellite è $a = -GM\, e_r/r^2$. La massa m si semplifica in questa relazione; resta presente nell'energia o nella forza. Le condizioni del riferimento e l'assenza di altre interazioni sono ipotesi da dichiarare.

2. Dal campo gravitazionale al peso vicino al suolo

Il campo gravitazionale creato dalla massa M alla distanza r ha modulo GM/r². Vicino a una superficie sferica di raggio R, possiamo scrivere g ≈ GM/R² se trascuriamo la rotazione e le particolarità locali. Alla quota h, la distanza dal centro è R + h, non h. Dimenticare il raggio del corpo attrattore farebbe divergere artificialmente la forza quando la quota tende a zero.

Il rapporto fra il campo alla quota h e quello sulla superficie è [R/(R + h)]². Per h = R, questo rapporto è 1/4. A una quota piccola rispetto a R, il campo varia poco e assumere una gravità uniforme può essere appropriato. Questa approssimazione ha un dominio di validità; non va estesa a distanze paragonabili al raggio senza esame.

In un esercizio con R = 6.0×10^6 m e h = 3.0×10^5 m, il rapporto è (6.0/6.3)² ≈ 0.907. Il campo è quindi circa il 9.3 % più debole del campo di superficie del modello. Questo risultato descrive i dati immaginari proposti, non una misura di un luogo reale. Mostra soprattutto perché una quota piccola su scala umana possa produrre una variazione non trascurabile in un calcolo orbitale.

3. Orbita circolare: conciliare velocità tangenziale e accelerazione radiale

Per un moto circolare uniforme di raggio r, la cinematica richiede un'accelerazione di modulo v²/r verso il centro. Se la gravitazione è l'unica forza inclusa, uguagliamo v²/r e GM/r². Otteniamo v = sqrt(GM/r). La velocità è tangenziale, mentre forza e accelerazione sono radiali. Non si oppongono alla velocità e non rallentano l'oggetto in questo modello; ne cambiano la direzione.

Un'orbita può essere intesa come una caduta che continua attorno al corpo attrattore. L'oggetto non si trova fuori dall'azione della gravità. Un'opportuna velocità orizzontale e la curvatura del campo

producono una traiettoria che non incontra la superficie nel modello. Questa spiegazione è un'immagine concettuale; stabilire un'orbita reale comporta molti più vincoli di traiettoria, propulsione e ambiente.

Il periodo è T = 2πr/v, quindi T = 2π sqrt[r³/(GM)]. Porre μ = GM permette di calcolare senza separare i due parametri. Per un esercizio immaginario con μ = 4.00×10^14 m³/s² e r = 8.00×10^6 m, il modulo della velocità è circa 7.07×10^3 m/s. Il periodo è circa 7.11×10^3 s, cioè circa 118 min. Il controllo dimensionale di sqrt(μ/r) dà effettivamente m/s.

4. Confrontare due orbite senza ripetere ogni calcolo

Attorno allo stesso centro attrattore, v è proporzionale a r^−1/2 e T a r^3/2 per orbite circolari ideali. Se il raggio è moltiplicato per quattro, il modulo della velocità viene diviso per due e il periodo moltiplicato per otto. Ragionare attraverso rapporti riduce il rischio di errore e rivela la struttura delle leggi. Un'orbita grande può essere percorsa più lentamente richiedendo molto più tempo per una rivoluzione.

Il raggio orbitale e la quota non sono intercambiabili. Se due quote hanno rapporto quattro, i loro raggi R + h generalmente non lo hanno. Il ragionamento precedente deve quindi riguardare le distanze dal centro. Scrivere il simbolo r e ricordarne la definizione prima del calcolo evita questa confusione frequente.

È anche possibile ricavare μ da un periodo e un raggio misurati: μ = 4π²r³/T². Questa relazione stima un parametro gravitazionale sotto le ipotesi del modello. Non dà direttamente la massa se G non è noto e le altre condizioni vengono omesse. Conta anche la precisione: un piccolo errore relativo su r è amplificato dalla terza potenza.

5. Le leggi di Keplero e la loro portata

Le leggi di Keplero descrivono orbite planetarie idealizzate: un'ellisse con il centro attrattore in un fuoco, aree uguali spazzate in tempi uguali e una relazione fra il quadrato del periodo e il cubo del semiasse maggiore. Le prime due furono pubblicate nel 1609 e la terza nel 1619. Questo riferimento storico, confermato dalla presentazione ufficiale della NASA, mostra la distinzione fra descrivere una regolarità a partire da osservazioni e spiegarne in seguito la struttura attraverso un modello d'interazione.

Per un'orbita ellittica, la distanza dal centro varia. Il modulo della velocità è maggiore vicino al punto più prossimo e minore vicino a quello più lontano. La legge delle aree impedisce quindi di trattare tutte le orbite ellittiche come moto uniforme. Un'ellisse ha due fuochi; il centro attrattore occupa uno di essi nel modello, non il centro geometrico dell'ellisse.

La terza legge è $T^2/a^3 = 4\pi^2/[G(M + m)]$ per un problema newtoniano ideale a due corpi, con a semiasse maggiore della loro orbita relativa. Se m è trascurabile rispetto a M, si usa spesso GM al denominatore. Per un'orbita circolare, a diventa r. La relazione $T^2 = a^3$ vale soltanto con unità e sistema appropriati; non è un'uguaglianza universale fra secondi quadrati e metri cubi.

6. Un'energia potenziale adatta alle grandi distanze

Nel modello newtoniano centrale si sceglie spesso nulla l'energia potenziale a distanza infinita: $E_p(r) = -GMm/r$. È negativa a distanza finita. Questo valore negativo non è un difetto: l'origine dell'energia potenziale è convenzionale. Si ritrova la forza radiale mediante $F_r = -dE_p/dr = -GMm/r^2$.

La scelta $E_p = mgz$ vicino al suolo è un'approssimazione locale delle variazioni di questa energia. Non usare mgh con g costante per una variazione di distanza arbitrariamente grande. Vicino a una

superficie, la variazione può essere linearizzata; lontano da essa, la dipendenza in 1/r diventa importante.

Per un'orbita circolare, $v^2 = GM/r$ dà $E_c = GMm/(2r)$. L'energia meccanica totale è quindi $E_m = -GMm/(2r)$. È negativa per questa orbita legata. Questa relazione non permette di dedurre un raggio circolare da qualsiasi energia senza esaminare la forma della traiettoria e la velocità. Per un'orbita ellittica legata, il semiasse maggiore compare in una formula analoga, ma la distanza istantanea varia.

7. Velocità di fuga: una soglia energetica ideale

In un modello senza atmosfera e con un centro attrattore isolato, il modulo minimo della velocità che permette di raggiungere l'infinito con velocità finale tendente a zero si calcola mediante $E_m = 0$. Partendo dalla distanza r, $mv^2/2 - GMm/r = 0$, quindi $v_{lib} = \sqrt{2GM/r}$. È $\sqrt{2}$ volte il modulo della velocità circolare alla stessa distanza.

Questa espressione non descrive la velocità di un razzo durante tutta una missione né una procedura di lancio. La propulsione può agire gradualmente; l'atmosfera e gli altri corpi cambiano i vincoli. La relazione fornisce una soglia per un oggetto che riceve un impulso iniziale e viene poi lasciato senza propulsione in un modello preciso. Sostituirla con una «velocità obbligatoria per ogni razzo» significherebbe interpretarla male.

Con i dati immaginari $\mu = 4.00\times10^{14}\ m^3/s^2$ e $r = 8.00\times10^{6}$ m, la velocità ideale di fuga ha modulo 1.00×10^{4} m/s, mentre quella circolare ha modulo circa 7.07×10^{3} m/s. La differenza deriva dalla destinazione energetica: restare legati su una circonferenza oppure raggiungere una distanza arbitrariamente grande. I calcoli rispondono a domande distinte.

8. Assenza di peso e moto comune

In una cabina in caduta libera, oggetti e persone hanno accelerazioni gravitazionali simili. La forza di contatto che sosteneva una persona sul suolo può diventare molto piccola. Questa situazione viene spesso chiamata assenza di peso; non dimostra che il campo gravitazionale sia scomparso. Contatto e gravitazione vanno studiati separatamente, come nell'esempio dell'ascensore nel capitolo di dinamica.

In un riferimento orbitale ideale si può costruire una descrizione in cui alcune forze inerziali equilibrano la gravitazione. Ciò non rende queste forze interazioni aggiuntive nel riferimento inerziale originario. Usare contemporaneamente termini delle due descrizioni senza specificare il riferimento causa un doppio conteggio. Al livello trattato qui, descrivere l'accelerazione gravitazionale centripeta resta l'approccio più diretto.

Il campo non è perfettamente uniforme su un sistema esteso. Differenze di accelerazione gravitazionale fra punti contribuiscono agli effetti di marea. Una cabina sufficientemente piccola può trascurarli per un esercizio semplice; un problema più preciso deve considerarli. L'approssimazione del moto comune non afferma quindi che ogni punto di ogni oggetto abbia esattamente la stessa accelerazione nello spazio.

9. Un'orbita sincrona e condizioni aggiuntive

Un'orbita il cui periodo è uguale a quello di rotazione di un corpo celeste è sincronizzata con tale rotazione in senso temporale. Restare sopra lo stesso punto dell'equatore nel modello semplice richiede inoltre un'orbita circolare nel piano equatoriale e nello stesso verso della rotazione. L'uguaglianza dei periodi da sola non garantisce una posizione apparente fissa.

La relazione $r^3 = \mu T^2/(4\pi^2)$ calcola un raggio sincrono ideale quando μ e T sono dati. Non fornisce direttamente la quota: va poi sottratto il raggio del corpo. L'esercizio deve distinguere un periodo di rotazione da un giorno civile definito arbitrariamente se si richiede grande precisione. Scegliere 24 ore senza esaminare i dati forniti può introdurre una discrepanza concettuale.

Anche in un simile modello, un segnale impiega un tempo non nullo per attraversare la distanza. La propagazione e il moto orbitale sono domande differenti. Un satellite che appare fisso non è fermo in un riferimento centrato sul corpo celeste; compie una rivoluzione. «Fisso» deve sempre essere riferito all'osservatore o al riferimento considerato.

10. Il modello newtoniano e modelli più precisi

La gravitazione newtoniana è molto utile per numerosi calcoli di meccanica celeste. Non è una descrizione sufficiente di ogni fenomeno gravitazionale. Esigenze di precisione o campi particolari richiedono altri modelli, in particolare quelli relativistici. Riconoscere questo limite non rende inutili gli esercizi newtoniani: un modello può essere appropriato in un dominio senza essere universale.

La contrapposizione utile non è quindi un semplicistico «vecchia teoria falsa contro nuova teoria vera». Esamina previsioni, condizioni e precisione. Un problema scolastico formulato a due corpi trascura deliberatamente altre attrazioni; il software di una missione può includere molteplici perturbazioni. La scelta dipende dallo scopo e dalla tolleranza agli scarti.

In una relazione, distingui parametri dati, parametri misurati e risultati calcolati. Se un periodo è stato usato per adattare μ, ritrovare successivamente quello stesso periodo con quel μ non è una verifica indipendente. Occorre un'altra osservazione o una

previsione non utilizzata nell'adattamento. Questo collega la meccanica orbitale al metodo generale di validazione del capitolo iniziale.

11. Esercizi svolti

A - Quota. Un corpo celeste ha raggio R; un satellite è alla quota 2R. Confronta il suo campo con quello sulla superficie. Soluzione: la sua distanza dal centro è 3R, quindi il rapporto è 1/9. Usare 2R darebbe 1/4 e confonderebbe la quota con il raggio orbitale.

B - Periodo. Due satelliti immaginari descrivono circonferenze attorno allo stesso corpo celeste, con $r_2 = 9r_1$. Soluzione: $v_2/v_1 = 1/3$ e $T_2/T_1 = 27$. I rapporti derivano dalle potenze $-1/2$ e $3/2$. Si assumono trascurabili le masse dei satelliti rispetto alla massa del centro attrattore.

C - Massa del satellite. Raddoppiare m mantenendo r e M cambia la velocità circolare? Soluzione: non nell'approssimazione in cui M è fisso e dominante, perché m si semplifica nell'equazione dell'accelerazione. La forza e le energie vengono invece raddoppiate. Confondere velocità e forza nasconderebbe questa distinzione.

D - Unità. Controlla la dimensione di μ. Soluzione: poiché $a = \mu/r^2$, μ ha dimensione $\text{lunghezza}^3/\text{tempo}^2$. In $T^2 = 4\pi^2 r^3/\mu$, il rapporto ha quindi dimensione tempo^2. Dati espressi in km^3/s^2 devono essere convertiti prima di un calcolo che usa metri.

E - Interpretazione. Un oggetto ha $E_m > 0$ nel modello centrale isolato. Possiamo affermare che segua una circonferenza? Soluzione: no; un'orbita circolare legata ha $E_m < 0$ quando l'origine dell'energia è all'infinito. Un'energia positiva è compatibile con una traiettoria non legata, sotto le altre condizioni del modello. Per precisare quella traiettoria servono ancora la direzione della velocità e il momento angolare.

12. Ripasso e fonti

Ricava la velocità circolare e il periodo dalla legge di Newton e dall'accelerazione centripeta. Spiega perché la gravitazione resti presente nell'assenza di peso, perché la quota debba essere aggiunta al raggio del corpo e perché un periodo sincrono non basti a far apparire fisso un satellite. Concludi ogni calcolo con una frase che colleghi il risultato alle ipotesi.

Riferimento ufficiale per le leggi di Keplero e le date 1609 e 1619: NASA Science, https://science.nasa.gov/solar-system/orbits-and-keplers-laws/, consultato per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026. Questa discussione matematica, i confronti e gli esercizi sono originali LFDP; non vengono riprodotti racconti storici, immagini o passaggi della pagina. Il programma pubblicato dell'ultimo anno del liceo francese, componente di fisica, fornisce il quadro scolastico: https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm. I parametri numerici esplicitamente immaginari non sono misure della Terra né un'indicazione di traiettoria operativa.

Capitolo 6 - Fluidi: pressione, portata e limiti dei modelli di flusso

Riferimento storico - 1648: confrontare la pressione a quote differenti

Il Récit de la grande expérience de l'équilibre des liqueurs di Pascal, pubblicato nel 1648, racconta l'esperimento effettuato secondo le sue istruzioni da Florin Périer sul puy de Dôme. La BnF sottolinea che l'altezza della colonna di mercurio diminuiva con la quota. Questo risultato è un esempio storico di un confronto capace di distinguere spiegazioni: il peso dell'aria diventa una causa da esaminare, anziché invocare l'avversione della natura per il vuoto. I calcoli di questo capitolo restano distinti da quell'esperimento. Non richiedono né di maneggiare mercurio né di riprodurre un antico apparecchio.

Riferimento del fatto storico, consultato per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026: BnF, presentazione dell'edizione originale del Récit, https://www.bnf.fr/fr/etienne-klein-resident-musee. Analisi didattica LFDP, senza citazione letterale né riproduzione di immagini.

1. Descrivere un mezzo senza seguire ogni molecola

Un fluido può scorrere e deformarsi sotto una sollecitazione. Liquidi e gas differiscono in aspetti importanti, soprattutto nella comprimibilità. Una descrizione macroscopica usa grandezze locali come pressione, densità, temperatura e velocità. Questo approccio tratta il mezzo come continuo alla scala pertinente; non afferma che la materia sia davvero priva di struttura microscopica.

La densità ρ è la massa divisa per il volume, in kg/m³. Può variare con temperatura, pressione o composizione. Qui assumere un fluido incomprimibile significa che le variazioni di densità sono trascurabili nel problema. Non afferma che nessun liquido reale

possa essere compresso. Per un gas, questa approssimazione può a volte essere adatta a certi flussi lenti, ma va esaminata anziché applicata per abitudine.

Un flusso stazionario ha grandezze che non variano nel tempo in ciascun punto fisso. Ciò non significa che le particelle del fluido siano ferme. Una particella può attraversare regioni con velocità diverse in un flusso stazionario. Separare l'evoluzione osservata in un punto da quella seguita lungo una particella prepara una lettura corretta dell'equazione di Bernoulli e delle linee di corrente.

2. Pressione e forza: precisare superficie e direzione

La pressione corrisponde alla forza normale per unità di area nel modello idrostatico. La sua unità SI è il pascal: 1 Pa = 1 N/m². Su una piccola superficie piana a pressione uniforme, il modulo della forza di pressione è pA. Per una superficie estesa dove la pressione varia, si sommano i contributi locali; la pressione misurata in un punto non rappresenta automaticamente l'intera superficie.

La forza di pressione è normale alla superficie. Le forze sulle facce opposte di un oggetto possono equilibrarsi in gran parte. Una pressione assoluta elevata non dà quindi necessariamente una risultante grande: questa dipende spesso da una differenza di pressione. Per una piastra che separa due mezzi a pressioni uniformi p_1 e p_2, la risultante normale ha modulo |p_1 − p_2|A, nel verso imposto dalla pressione maggiore.

Con una differenza di pressione di 5 000 Pa e un'area di 10 cm², cioè 0.0010 m², la forza risultante è 5.0 N. Usare direttamente 10 introdurrebbe un fattore errato di diecimila. Le conversioni di area meritano particolare attenzione: 1 cm² è 10^−4 m², perché il fattore relativo alla lunghezza viene elevato al quadrato. Un ettopascal è 100 Pa e un bar è 100 000 Pa; queste unità non vanno confuse.

3. Statica di un liquido a densità costante

Consideriamo un liquido fermo a densità costante in un campo gravitazionale uniforme. Con un asse verticale z rivolto verso l'alto, la pressione soddisfa dp/dz = −ρg. Lo si può ottenere equilibrando una piccola colonna: la differenza fra le forze di pressione equilibra il peso. Fra due livelli, p_2 − p_1 = −ρg(z_2 − z_1). La pressione aumenta quindi verso il basso.

Alla profondità h sotto una superficie alla pressione p_0, la pressione è p = p_0 + ρgh. Il termine ρgh è una differenza di pressione rispetto alla superficie, non necessariamente una pressione assoluta. Per ρ = 1 000 kg/m³, g = 10 m/s² e h = 0.50 m in un esercizio, questa differenza è 5 000 Pa. Se p_0 = 100 000 Pa, la pressione assoluta è 105 000 Pa.

In un liquido comunicante, omogeneo e a riposo, due punti alla stessa quota hanno la stessa pressione sotto queste ipotesi. La forma del recipiente non entra direttamente nella differenza idrostatica. Una colonna stretta e un serbatoio largo possono quindi produrre la stessa pressione alla stessa profondità. Ciò non significa che contengano la stessa massa o che le forze su tutte le loro pareti siano identiche.

Il risultato non si applica senza modifiche a una densità che varia fortemente con la quota, a un fluido accelerato o a un flusso. Nell'atmosfera, per esempio, ρ non è generalmente costante su una grande differenza di quota. Una legge semplice può essere appropriata su una piccola altezza e diventare insufficiente quando la scala cambia.

4. Principio di Archimede e volume spostato

La pressione è maggiore sotto un oggetto immerso che sopra di esso. La somma delle forze di pressione dà una risultante verso l'alto uguale al peso del fluido spostato nel modello idrostatico. Il suo modulo è ρ_f gV_immergé per un fluido omogeneo, con ρ_f densità del fluido. Il volume pertinente è quello immerso, non necessariamente il volume totale dell'oggetto.

Per un blocco prismatico completamente immerso, la formula si può comprendere senza seguire una superficie curva. Le forze laterali si equilibrano. Se l'altezza è h e l'area orizzontale A, la differenza di pressione fra fondo e sommità è ρ_f gh. La risultante è quindi ρ_f ghA = ρ_f gV. Questa dimostrazione spiega perché la forma dettagliata non sia il fattore principale nella relazione generale.

Un oggetto immaginario di massa 0.60 kg e volume totale 0.0010 m³ è completamente immerso in un liquido di densità 1 000 kg/m³, con g = 10 m/s². Il suo peso è 6.0 N e la spinta di Archimede è 10 N. Se nessun'altra forza lo trattiene, la risultante verticale iniziale è diretta verso l'alto. Per galleggiare in equilibrio deve spostare 0.60 kg di liquido, cioè 0.00060 m³: il 60 % del suo volume è immerso. Ciò non significa necessariamente il 60 % della sua altezza se la sezione varia.

La capacità di un oggetto di galleggiare dipende dal confronto fra la sua densità media e quella del fluido e dal volume disponibile per spostare il fluido, non soltanto dal materiale di una parete. Un oggetto cavo può quindi galleggiare anche se il suo materiale è più denso del liquido. Questo ragionamento non certifica alcuna capacità reale di carico: stabilità, tenuta, moto del fluido e resistenza meccanica sono altre questioni.

5. Portata volumetrica e conservazione della massa

La portata volumetrica Q è il volume che attraversa una sezione nell'unità di tempo, in m^3/s. Se è appropriata una velocità uniforme normale all'area A, $Q = Av$. Se la velocità varia sulla sezione, si può usare un'opportuna velocità media o un integrale. La formula semplice non significa quindi che ogni particella viaggi alla stessa velocità in una condotta reale.

Per un flusso stazionario senza accumulo né perdite, la massa entrante nell'unità di tempo è uguale a quella uscente. La portata massica è ρQ in una sezione uniforme. Se la densità è costante, $Q_1 = Q_2$ e $A_1v_1 = A_2v_2$. Per un fluido comprimibile, conserva $ρ_1A_1v_1 = ρ_2A_2v_2$; eliminare le densità senza giustificazione cambia il bilancio.

Una portata immaginaria di $0.0020\ m^3/s$ attraversa un'area di $0.0040\ m^2$: il modulo medio della velocità è 0.50 m/s. In una sezione quattro volte più piccola, $0.0010\ m^2$, è 2.0 m/s se portata e densità si conservano. La portata è 2.0 litri al secondo, poiché 1 litro è $10^{-3}\ m^3$. Qui il restringimento aumenta la velocità media, non la quantità di liquido che passa ogni secondo.

In una diramazione, la portata entrante è uguale alla somma delle portate uscenti se vale lo stesso modello incomprimibile e stazionario. Una pressione uguale nei rami non garantisce portate identiche: lunghezze, diametri e perdite di pressione possono differire. La conservazione fissa un vincolo complessivo; non fornisce tutte le relazioni necessarie per determinare la distribuzione.

6. Bernoulli: una conservazione condizionata

Per un flusso stazionario incomprimibile senza dissipazione viscosa significativa, una forma dell'equazione di Bernoulli è p + ρgz + ρv²/2 = costante lungo una linea di corrente, senza lavoro aggiunto o sottratto fra i punti considerati. Tutti e tre i termini hanno dimensione di pressione. Questa relazione non è una regola universale secondo cui qualsiasi velocità elevata implichi ovunque una pressione bassa.

A quote uguali, dà p_2 − p_1 = (ρ/2)(v_1² − v_2²). Per le velocità di 0.50 e 2.0 m/s dell'esempio precedente, con ρ = 1 000 kg/m³, la differenza è 500(0.25 − 4) = −1 875 Pa. La pressione statica nel secondo punto è più bassa in questo modello. La relazione ha un dominio dichiarato: da sola non determina le perdite in una lunga condotta reale.

Il termine ρv²/2 viene talvolta chiamato pressione dinamica. Non va confuso con la pressione statica misurata da qualsiasi dispositivo arbitrario. Lo strumento, il suo orientamento e il modo in cui disturba il flusso determinano ciò che misura. L'espressione matematica e l'osservazione sperimentale vanno collegate mediante una procedura, come per gli altri modelli della guida.

Le ipotesi sono confermate dalla presentazione ufficiale dell'equazione di Bernoulli di NASA Glenn, consultata per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026: https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/bernoullis-equation/. La discussione e i numeri qui presenti sono originali; non vengono riprodotte figure o dimostrazioni di quella pagina.

7. Un serbatoio e la velocità ideale di uscita

Consideriamo un serbatoio la cui superficie libera è molto grande rispetto a una piccola apertura di uscita. In un modello ideale, la velocità della superficie è trascurabile, le pressioni alla superficie e all'uscita sono identiche e il flusso viene trattato come approssimativamente stazionario. Bernoulli dà v_sortie = sqrt(2gh), dove h è la differenza di livello fra superficie e uscita. Questa relazione è spesso chiamata legge di Torricelli.

Con h = 1.25 m e g = 10 m/s² per il calcolo, il modulo ideale della velocità è 5.0 m/s. Se la superficie libera scende, h cambia e cambia anche la velocità ideale. Questo valore non può quindi essere conservato durante tutto lo svuotamento senza discutere la variazione del livello. La portata dipende anche dalla sezione effettiva e dagli scarti rispetto al modello ideale, in particolare dalla contrazione del flusso e dalle perdite.

La somiglianza con la velocità acquisita in caduta libera attraverso la stessa altezza rivela una struttura energetica comune. Non implica che l'intero flusso sia identico al moto di un punto materiale. Pressione, geometria, continuità e contatto con le pareti introducono condizioni specifiche del fluido. Un'analogia è utile quando precisiamo ciò che confronta e ciò che lascia fuori.

8. Viscosità e perdite di pressione

La viscosità esprime la resistenza associata alle deformazioni e alle differenze di velocità fra strati di fluido. Può dissipare energia meccanica. In una condotta reale, mantenere una portata può richiedere una differenza di pressione anche fra due sezioni alla stessa quota e con la stessa velocità media. Il flusso ideale di Bernoulli senza perdite non basta a descrivere questa situazione.

Un termine di perdita di pressione può essere introdotto in un bilancio energetico purché se ne specifichino la definizione e

l'unità. Una caduta di pressione dovuta alla dissipazione non è una scomparsa della massa o dell'energia totale; una parte dell'energia meccanica diventa energia interna. Le pompe possono aggiungere energia e altri dispositivi sottrarla. I confini del sistema tornano a essere essenziali.

Come approfondimento di cultura scientifica, consideriamo un flusso stazionario, laminare e completamente sviluppato di un fluido newtoniano incomprimibile, a viscosità costante, in un tubo cilindrico rettilineo orizzontale a raggio costante, senza scorrimento del fluido rispetto alle pareti fisse. La sua portata volumetrica può essere descritta da Q = πr^4Δp/(8ηL), con η la viscosità dinamica, L la lunghezza del tratto studiato, r il suo raggio interno e Δp la pressione a monte meno quella a valle; Q è considerata positiva in questo verso. Questa legge è presentata come modello particolare, non come relazione applicabile a ogni condotta. Mostra una forte dipendenza dal raggio e una differenza rispetto a una conservazione ideale senza viscosità. Turbolenza, ingressi, curve o variazioni delle proprietà richiedono altre descrizioni.

9. Trasmettere una forza non crea energia

In un dispositivo idraulico ideale e fermo, una variazione di pressione può essere trasmessa attraverso un liquido e produrre forze diverse su pistoni di aree differenti. Se la stessa differenza di pressione agisce su A_1 e A_2, allora F_2/F_1 = A_2/A_1. Un'area grande può quindi ricevere una forza maggiore. Ciò non moltiplica gratuitamente il lavoro.

La conservazione del volume spostato impone A_1d_1 = A_2d_2 nel modello incomprimibile senza perdite. Una forza maggiore corrisponde a uno spostamento minore e F_1d_1 = F_2d_2 nel caso ideale. Per un rapporto di aree di 10, una forza di 10 N sul pistone piccolo corrisponde a 100 N su quello grande; uno spostamento di

5 cm per il piccolo corrisponde a 0.5 cm per il grande. Entrambi i lavori sono 0.50 J.

Attrito e deformazione riducono il lavoro utile reale. Questi calcoli sono esercizi di conservazione, non istruzioni di fabbricazione o sollevamento. Non vengono studiate pressione massima, resistenza dei materiali, stabilità e protezioni. Una formula di fisica non basta a validare un apparecchio.

10. Esercizi svolti

A - Pressione relativa. Un liquido di densità 800 kg/m³ ha una superficie a 100 000 Pa. Con g = 10 m/s², calcola la pressione alla profondità di 2 m. Soluzione: la differenza idrostatica è 16 000 Pa; la pressione assoluta è 116 000 Pa. Rispondere 16 000 Pa senza precisare che si tratta di pressione relativa sarebbe ambiguo.

B - Sezione. Una portata di 3 litri al secondo attraversa un'area di 6 cm². Soluzione: Q = 0.003 m³/s e A = 0.0006 m², quindi v_moy = 5 m/s. Se l'area raddoppia a portata conservata, la velocità si dimezza. Questo risultato usa una densità costante e non descrive alcun dispositivo reale garantito.

C - Galleggiamento. Un oggetto omogeneo di densità 600 kg/m³ galleggia in un liquido di densità 1 000 kg/m³. Soluzione: nell'equilibrio ideale, ρ_obj gV_total = ρ_liquide gV_immergé. La frazione di volume immerso è 0.60. La stessa frazione di altezza richiede una forma con una sezione opportunamente costante.

D - Bernoulli. In un flusso orizzontale ideale, la velocità è la stessa nei punti 1 e 2, ma la misura mostra una pressione che diminuisce. Soluzione: questa osservazione richiede di esaminare le ipotesi: dissipazione, energia aggiunta o sottratta, stazionarietà e misure. Non forzare il risultato reale nella relazione ideale eliminando un dato. Il modello può essere insufficiente o la procedura difettosa.

11. Ripasso e portata

Per ripassare, collega ogni formula al suo bilancio: forze per la statica, volume o massa per la portata, energia per Bernoulli. Controlla sempre se la pressione sia assoluta o relativa, la velocità locale o media e il volume totale o immerso. Queste distinzioni contano spesso più della difficoltà di calcolo.

Quadro scolastico: programma pubblicato dell'ultimo anno del liceo francese, componente di fisica, https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm. Altro riferimento ufficiale: NASA Glenn su Bernoulli, collegato sopra. Testi ed esercizi originali LFDP, senza citazione letterale o riproduzione di figure. I casi ideali non autorizzano manipolazioni pericolose di pressione, immersioni, impianti domestici o dispositivi per l'assistenza sanitaria.

Capitolo 7 - Elettricità: carica, energia ed evoluzione di un circuito RC

Riferimento storico - 1800: una corrispondenza sui fenomeni elettrici

La Royal Society conserva una lettera di Alessandro Volta a Joseph Banks datata 20 marzo 1800, riguardante l'elettricità associata al contatto fra sostanze conduttrici di tipo diverso. Questa fonte archivistica colloca i fenomeni elettrici in una ricerca fondata su dispositivi e scambi scientifici. Identificare senza esame questo oggetto storico con il generatore ideale degli esercizi sarebbe ingannevole. Il capitolo separa precisamente il fenomeno reale dalle relazioni scelte per modellizzarlo: tensione, corrente, resistenza e accumulo capacitivo rispondono a domande diverse.

Riferimento del fatto storico, consultato per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026: Royal Society, archivi L&P/11/137, https://makingscience.royalsociety.org/items/l-and-p_11_137/letter-account-of-electricity-excited-by-contact-and-conducting-substances-of-different-kinds-from-alessandro-volta-to-joseph-banks. Analisi didattica LFDP, senza citazione letterale né riproduzione di immagini.

1. Carica elettrica e corrente

La carica elettrica è una grandezza con segno espressa in coulomb. Un sistema può avere carica positiva, carica negativa o carica netta nulla. La corrente corrisponde al trasferimento di carica nell'unità di tempo. Per una quantità di carica Δq che attraversa una sezione durante Δt, la corrente media è $\Delta q/\Delta t$; la corrente istantanea è la derivata della carica trasferita lungo un orientamento scelto. Un ampere è un coulomb al secondo.

La corrente convenzionale ha il verso del movimento delle cariche positive. In un metallo, gli elettroni mobili si muovono in verso opposto alla corrente convenzionale. In altri mezzi possono

contribuire più tipi di portatori. Il segno della corrente in un'equazione dipende quindi da un orientamento e non va identificato soltanto con il verso di movimento di un particolare elettrone.

Una corrente costante di 2.0 mA per 3.0 s corrisponde a una carica trasferita di 6.0 mC. Se la corrente varia, integra i(t) sulla durata oppure calcola un'area con segno sotto il suo grafico. Un valore finale della corrente non descrive necessariamente l'intera fase. Questa distinzione ricorda quella fra velocità finale e spostamento nel moto accelerato.

2. Tensione e differenza di potenziale

Una tensione U_AB è una differenza di potenziale V_A − V_B, espressa in volt. Un volt è un joule per coulomb. La tensione non è una quantità di carica accumulata e la corrente non è tensione in movimento. Le grandezze descrivono aspetti diversi: potenziale fra due punti e flusso di carica in un ramo.

Invertire i punti cambia il segno: U_BA = −U_AB. In un circuito ideale a elementi concentrati in cui gli effetti di induzione omessi sono trascurabili, le differenze di potenziale si sommano lungo un percorso. La loro somma con segno attorno a una maglia chiusa è nulla. Questa legge delle maglie non significa sommare soltanto i valori positivi dichiarati per i componenti; gli orientamenti contano.

La conservazione della carica dà la legge dei nodi nel modello senza accumulo significativo di carica nel nodo: somma delle correnti entranti = somma delle correnti uscenti. Se una corrente entrante è 5 mA e due correnti uscenti sono 2 e 3 mA, il bilancio è coerente. Un componente che accumula carica, come un condensatore, resta compatibile con questa conservazione: l'accumulo va incluso nel sistema e nei suoi terminali.

3. Resistenza e convenzione della potenza

Per un conduttore ohmico ideale in un dato intervallo di funzionamento, u = Ri, con R in ohm. Adotta la convenzione degli utilizzatori: la corrente entra nel terminale il cui potenziale è preso positivo per u. La potenza elettrica ricevuta è allora p = ui. Per una resistenza R > 0, $p = Ri^2 = u^2/R$ è positiva e corrisponde a un trasferimento in energia interna nel modello.

Una resistenza di 1.0 kΩ sottoposta a 5.0 V è attraversata da una corrente di 5.0 mA e riceve una potenza di 25 mW. Se questi valori restano costanti per 20 s, l'energia ricevuta è 0.50 J. Converti i prefissi prima di applicare le leggi. Confondere kΩ con Ω moltiplicherebbe la corrente per mille; confondere mW con W moltiplicherebbe l'energia per mille.

La relazione ohmica non è universale per ogni componente. Un diodo, una lampada la cui temperatura cambia molto o un generatore reale possono richiedere altri modelli. Una resistenza dichiarata in un esercizio è un parametro del modello, non una garanzia del comportamento a ogni tensione. Nessun calcolo di questa sezione valida un impianto, un alimentatore o un montaggio reale.

4. Collegamenti semplici e confini del modello

Per resistori in serie attraversati dalla stessa corrente, le tensioni si sommano e R_eq = R_1 + R_2. Per resistori in parallelo sottoposti alla stessa tensione, le correnti si sommano e 1/R_eq = 1/R_1 + 1/R_2. Queste uguaglianze derivano dalle leggi delle maglie e dei nodi; non applicarle a due elementi soltanto perché appaiono vicini in uno schema.

Due resistori identici di 2 kΩ danno 4 kΩ in serie e 1 kΩ in parallelo. La resistenza equivalente di rami positivi in parallelo è inferiore alla più piccola resistenza individuale. Questo offre un controllo

dell'ordine di grandezza. In serie è invece maggiore di ciascuna. Una risposta invertita segnala spesso una confusione sulla topologia.

Un generatore reale può essere descritto in un intervallo limitato mediante forza elettromotrice E e resistenza interna r: la tensione fornita a un carico diventa U = E − ri se la corrente esce dal generatore. Questa caduta di tensione ricorda che i componenti ideali hanno limiti. Il modello non va usato per stimare un cortocircuito o una situazione pericolosa senza dati; sono assenti protezioni, regimi transitori e caratteristiche reali.

5. Un condensatore ideale e la capacità

Un condensatore ideale ha due armature che portano cariche opposte nel modello semplice. Se q indica la carica sull'armatura A e u = V_A − V_B, scriviamo q = Cu con C costante, in farad. Un farad è un coulomb per volt. Il segno di q è legato a quello di u; una capacità positiva non significa che la carica sia sempre positiva.

Con la convenzione degli utilizzatori e la corrente entrante nell'armatura A, i = dq/dt = Cdu/dt. Il condensatore può quindi ricevere corrente quando la tensione varia, anche se nessuna carica attraversa il dielettrico ideale fra le armature. Dire che «blocca la corrente» senza precisare il regime è ingannevole: a tensione costante in regime stazionario, la corrente ideale è nulla; durante un transitorio può essere non nulla.

Una capacità di 100 µF sottoposta a 5.0 V corrisponde a una carica di 500 µC, cioè 0.00050 C, sull'armatura positiva. Se la tensione sale linearmente da 0 a 5 V in 0.50 s, la corrente di questo modello è C×10 V/s = 1.0 mA. Una forma diversa della salita produrrebbe un'altra corrente. La capacità collega carica e tensione; da sola non determina la durata di un'evoluzione.

6. Energia accumulata e collegamenti di condensatori

Quando una carica infinitesima dq viene trasferita nel condensatore, l'energia ricevuta è u dq. Con u = q/C, l'integrazione da zero a q dà E_capa = $q^2/(2C)$ = $Cu^2/2$. Il fattore 1/2 nasce perché la tensione aumenta durante il trasferimento; moltiplicare semplicemente la tensione finale per tutta la carica raddoppierebbe l'energia accumulata.

Per C = 100 µF e u = 5.0 V, l'energia è 0.00125 J, cioè 1.25 mJ. Questa energia è distinta dalla carica di 500 µC. Due condensatori di capacità differenti possono avere la stessa tensione ed energie diverse. Un confronto deve quindi precisare quale grandezza sia comune.

In parallelo, le tensioni sono identiche e le cariche si sommano: C_eq = C_1 + C_2. In serie, per il modello di due condensatori inizialmente neutri con un nodo intermedio isolato, i moduli delle cariche sono identici e 1/C_eq = 1/C_1 + 1/C_2. Per 2 µF e 3 µF, le capacità equivalenti sono 5 µF in parallelo e 1.2 µF in serie.

Con un totale di 10 V in serie, la carica è 12 µC. Le tensioni sono quindi 6 V sul condensatore di 2 µF e 4 V su quello di 3 µF. La loro somma ritrova 10 V. La ripartizione uguale della tensione non è automatica; qui richiede capacità uguali. Anche le condizioni iniziali e le cariche preesistenti possono modificare un problema più generale.

7. Caricare un circuito RC: stabilire l'equazione

Un generatore ideale a tensione costante E alimenta un resistore R e un condensatore C in serie. Scegliamo i come corrente di carica entrante nell'armatura positiva del condensatore. La legge delle maglie dà E = Ri + u_c e i = Cdu_c/dt. Otteniamo RCdu_c/dt + u_c = E. Questa equazione descrive il transitorio sotto le ipotesi ideali dichiarate.

Ponendo $\tau = RC$, la soluzione con $u_c(0) = u_0$ è $u_c(t) = E + (u_0 - E)e^{(-t/\tau)}$. Controllala derivando e sostituendo. A $t = 0$, l'espressione dà u_0; a lungo termine tende a E. Una condizione iniziale nulla dà $u_c = E[1 - e^{(-t/\tau)}]$ e $i = (E/R)e^{(-t/\tau)}$.

La corrente vale inizialmente E/R in questo modello, poi diminuisce. La tensione del condensatore varia con continuità quando la corrente è finita, a differenza della tensione ideale imposta dal generatore al cambio di fase. La commutazione non permette quindi di riportare arbitrariamente u_c a zero. Se resta una carica precedente, diventa la nuova condizione iniziale.

8. Costante di tempo e precisione della soglia

Il prodotto RC ha dimensione di tempo: $\Omega \times F = s$. Con $R = 10\ k\Omega$ e $C = 100\ \mu F$, $\tau = 1.0\ s$. Per $E = 5.0\ V$ e $u_0 = 0$, dopo una costante di tempo la tensione è $5(1 - e^{-1}) \approx 3.16\ V$, circa il 63.2 % del valore finale. A tre costanti di tempo raggiunge circa il 95.0 % e a cinque circa il 99.3 %.

Il valore finale non viene mai raggiunto esattamente in un tempo finito in questa soluzione ideale. «Carica completata» significa quindi che è stato scelto un criterio di precisione. Per raggiungere almeno il 99 % di E, si risolve $1 - e^{(-t/\tau)} \geq 0.99$, ottenendo $t \geq -\tau \ln(0.01) \approx 4.605\tau$. Questa soglia è più precisa dell'affermazione assoluta «dopo cinque τ è esattamente finita».

Un grafico può anche stimare τ. All'origine, la tangente alla curva di carica di un condensatore inizialmente neutro ha pendenza E/τ e incontra il livello E a $t = \tau$. Questa costruzione presuppone una scala correttamente calibrata e un modello appropriato. Una stima grafica ha incertezza; non equivale a un parametro esatto soltanto perché è stata tracciata una retta.

9. Scarica e cambiamento di convenzione

Un condensatore inizialmente a U_0 viene poi collegato a un resistore senza generatore ideale. La sua tensione soddisfa $RCdu_c/dt + u_c = 0$, quindi $u_c(t) = U_0e^{-t/\tau}$. Se i_d è definita come corrente uscente dall'armatura positiva attraverso il resistore, $i_d = u_c/R = -Cdu_c/dt$. Il segno meno deriva dalla diminuzione della carica su questa armatura.

Se si mantenesse la corrente definita come entrante nell'armatura, sarebbe negativa durante questa scarica per $U_0 > 0$. Entrambe le descrizioni sono coerenti; cambiare convenzione senza dirlo crea soltanto una contraddizione apparente. Lo schema o la frase che definisce la corrente devono quindi accompagnare l'equazione.

L'energia del condensatore varia come $e^{-2t/\tau}$, perché è proporzionale a u_c^2. Non diminuisce secondo lo stesso esponenziale della tensione. A $t = \tau$, la tensione è circa il 36.8 % del valore iniziale, ma l'energia circa il 13.5 %. Questa differenza è un buon esercizio di interpretazione delle grandezze: una legge temporale non si trasferisce senza modifiche a tutte le grandezze collegate.

10. Un bilancio energetico della carica

Per una carica ideale da zero a E attraverso R, il generatore trasferisce una carica totale CE. L'energia che fornisce è quindi CE^2, perché la sua tensione resta E. Il condensatore accumula $CE^2/2$; l'altra metà viene dissipata nel resistore in questo modello. Il risultato può sorprendere, perché aumentare o diminuire R cambia durata e corrente, ma non questa ripartizione complessiva nel modello ideale.

Non estendere questo risultato a $R = 0$ senza esame. Il modello prevede allora un transitorio di durata nulla e una corrente illimitata, segnalando ipotesi fisiche insufficienti. Diventano

rilevanti resistenze reali, induttanze, limiti del generatore ed effetti di radiazione. Un limite matematico può rivelare il dominio di un modello anziché descrivere un dispositivo possibile.

Il confronto con una batteria ricorda ancora la distinzione fra energia e capacità. La capacità di una batteria espressa in Ah è una quantità di carica; una stima in Wh usa anche la tensione. Per esempio, 2 Ah alla tensione nominale di 3.7 V corrispondono a 7.4 Wh in una stima nominale. Poiché la tensione cambia durante l'uso, questa moltiplicazione non garantisce né l'energia effettivamente disponibile né l'autonomia di un dispositivo.

11. Esercizi svolti

A - Unità. R = 2.0 kΩ e C = 250 µF. Soluzione: τ = 2 000×250×10^−6 = 0.50 s. Moltiplicare i valori 2 e 250 senza i prefissi non dà un tempo in secondi.

B - Condizione iniziale. Un circuito di carica ha E = 6 V, τ = 2 s e u_c(0) = 2 V. Soluzione: u_c(t) = 6 − 4e^(−t/2). A t = 0, la tensione è 2; a lungo termine, 6. Usare 6[1 − e^(−t/2)] dimenticherebbe la carica iniziale.

C - Soglia di scarica. Quando u_c diventa al massimo un decimo di U_0? Soluzione: e^(−t/τ) ≤ 0.10, quindi t ≥ τ ln(10) ≈ 2.303τ. Questo calcolo è un criterio relativo teorico, non un'istruzione di verifica della sicurezza elettrica.

D - Energia relativa. Quando la tensione è stata divisa per tre, che cosa accade all'energia? Soluzione: viene divisa per nove, perché E_capa = Cu²/2 per C costante. Una divisione per tre corrisponderebbe a una relazione lineare, che non è la relazione energetica.

E - Modello stazionario. Un condensatore ideale è sottoposto da tempo a una tensione costante. Soluzione: du_c/dt = 0, quindi la

corrente ideale è nulla. La carica e l'energia possono restare non nulle. L'assenza di corrente non significa l'assenza di ogni grandezza elettrica accumulata.

Approfondimento - Geometria della capacità e principio di un sensore

Per due armature piane parallele separate da un isolante omogeneo, il modello senza effetti di bordo dà $C = \varepsilon S/d$. L'area S è quella delle superfici affacciate, d la loro distanza ed ε la permittività del mezzo, espressa in F/m. Nel vuoto, $\varepsilon = \varepsilon_0$; per un dielettrico lineare ideale, si scrive $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$. Questa relazione presuppone in particolare che le dimensioni laterali siano grandi rispetto a d. Non descrive esattamente un componente di forma arbitraria o un mezzo con proprietà molto variabili.

Con materiale e distanza fissi, raddoppiare S raddoppia C. Con materiale e area fissi, raddoppiare d dimezza C. Una deformazione che cambia d può quindi essere rilevata attraverso una variazione della capacità: è il principio di un modello di sensore capacitivo. La capacità non è direttamente pressione, posizione o umidità; occorrono una relazione di conversione e una taratura adatte al dispositivo. I calcoli su carta non provano la precisione di un sensore reale.

Esercizio originale. In un modello immaginario che assimila l'aria al vuoto, $S = 20\ \text{cm}^2$, $d = 1.0\ \text{mm}$ ed $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m. Calcola C, poi la sua variazione se d aumenta del 10 %, con gli altri parametri costanti. Infine, determina l'effetto sulla costante di tempo se questo condensatore è associato a $R = 10\ \text{M}\Omega$ nel circuito RC ideale studiato.

Soluzione. La conversione dà $S = 20 \times 10^{-4}\ \text{m}^2 = 2.0 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$ e $d = 1.0 \times 10^{-3}$ m. Quindi $C = 8.85 \times 10^{-12} \times 2.0 = 1.77 \times 10^{-11}$ F, cioè 17.7 pF. Aumentare d del 10 % dà $C' = C/1.10$, circa 16.1 pF:

la diminuzione relativa è 9.09 %, non esattamente il 10 %. Calcola il rapporto reciproco prima di arrotondare. La costante di tempo iniziale è RC = 1.77×10^{-4} s, cioè 177 µs; anche questa viene divisa per 1.10 quando la capacità cambia.

Soltanto per una piccola variazione, $\Delta C/C \approx -\Delta d/d$ a area e permittività costanti. Questa approssimazione al primo ordine è utile per interpretare la sensibilità, ma non è l'uguaglianza esatta usata nell'esercizio. Se ε cambia insieme a d, una sola misura di C può corrispondere a più cause. Distinguere una variazione rilevata da una causa individuata evita di attribuire troppo rapidamente una proprietà unica a un segnale.

Riferimenti per la relazione e il principio, consultati per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026: Università di Lille, teoria dei condensatori piani, https://tpmpathome.univ-lille.fr/capacites_condensateurs/version_papier/_papier.pdf ; quesito ufficiale Éduscol che presenta un modello di sensore capacitivo, https://eduscol.education.gouv.fr/sites/default/files/document/22-pycj1nc1pdf-97374.pdf. Questo esercizio e i suoi numeri sono originali; non vengono proposte manipolazioni ad alta tensione o riproduzioni di un quesito d'esame.

12. Ripasso e riferimenti

Ricostruisci un'equazione differenziale RC dalla legge delle maglie e da i = Cdu/dt. Controllane la soluzione sostituendo, poi spiega le condizioni iniziali, il limite e una soglia scelta. Ripassa unità e convenzioni dei segni prima di memorizzare le espressioni. Lo stesso ragionamento serve in seguito per altri sistemi a evoluzione esponenziale.

Quadro scolastico: programma pubblicato dell'ultimo anno del liceo francese, componente di fisica, https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm e allegato https://cache.media.education.gouv.fr/file/SPE8_MENJ_25_7_2019/92/9/spe249_annexe_1158929.pdf. Unità: BIPM, https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/, consultato per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026. Il capitolo, i bilanci e gli esercizi sono originali LFDP. Questi esempi non insegnano montaggi alimentati dalla rete, manipolazioni di

batterie o procedure di sicurezza elettrica; la teoria non valida un impianto.

Capitolo 8 - Termodinamica: distinguere uno stato dai trasferimenti che lo cambiano

Riferimento storico - 1859: confrontare l'assorbimento della radiazione da parte dei gas

Alla Royal Institution, John Tyndall cominciò nel 1859 a montare un apparecchio per studiare l'assorbimento e la trasmissione della radiazione termica da parte di diversi gas. L'istituzione conserva un tubo di questa attrezzatura e collega la ricerca al ruolo del vapore acqueo nell'effetto serra naturale. Questo riferimento non attribuisce tutte le tappe della scienza del clima a un solo scienziato. Illustra un approccio pertinente al capitolo: distinguere le proprietà radiative dei mezzi prima di completare un bilancio energetico. Non si deve assumere che un gas sia ugualmente trasparente a ogni lunghezza d'onda.

Riferimento del fatto storico, consultato per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026: Royal Institution, presentazione dell'apparecchio di Tyndall, https://www.rigb.org/explore-science/explore/collection/john-tyndalls-radiant-heat-apparatus. Analisi didattica LFDP, senza citazione letterale né riproduzione di immagini.

1. Scegliere il sistema e gli scambi

La termodinamica descrive sistemi contenenti un numero enorme di particelle attraverso grandezze macroscopiche. Temperatura, pressione, volume e quantità di sostanza descrivono uno stato senza seguire ogni particella. Questa descrizione non sostituisce la struttura microscopica; fornisce un altro livello di modellizzazione adatto ai bilanci e alle trasformazioni.

Un sistema chiuso non scambia materia con l'ambiente, ma può scambiare energia. Un sistema aperto scambia materia; i flussi

corrispondenti richiedono un bilancio più completo. Un sistema isolato non scambia né materia né energia nel modello. Un sistema adiabatico non scambia energia per trasferimento termico, ma può ricevere o fornire lavoro. Questi termini non sono sinonimi: una compressione adiabatica può cambiare la temperatura.

Prima di qualsiasi equazione, disegna il confine e indica ciò che può attraversarlo. Un liquido da solo riscaldato da un resistore riceve un trasferimento da quel resistore. Un sistema complessivo liquido-resistore può ricevere energia come lavoro elettrico. Il risultato globale deve restare coerente, ma i termini del bilancio dipendono dal confine scelto. Una formula di conservazione senza un sistema definito resta ambigua.

2. Temperatura ed energia interna

La temperatura termodinamica è espressa in kelvin. Il suo rapporto con i gradi Celsius è $T(K) = \theta(°C) + 273.15$. Una differenza di temperatura ha lo stesso valore numerico in kelvin e in gradi Celsius, ma un rapporto fra temperature termodinamiche richiede kelvin. Dire che 40 °C siano «due volte più caldi» di 20 °C non ha quindi significato come rapporto termodinamico.

L'energia interna U descrive contributi microscopici, in particolare moto e interazioni dei costituenti. Differisce dall'energia cinetica del moto complessivo e dall'energia potenziale associata alla posizione complessiva. Un oggetto fermo può avere una notevole energia interna. Una velocità macroscopica non misura tutta l'agitazione molecolare.

La temperatura non è una quantità di energia. Due sistemi alla stessa temperatura possono avere masse, capacità termiche ed energie interne diverse. Neppure il trasferimento termico è una sostanza accumulata chiamata «calore»: è un modo di trasferire energia. Nello scritto, afferma che un sistema riceve energia per

trasferimento termico e che la sua energia interna cambia, anziché dire che «contiene un trasferimento».

3. Il gas perfetto: un'equazione di stato condizionata

Il modello del gas perfetto collega pressione assoluta p, volume V, quantità di sostanza n e temperatura T mediante pV = nRT. Per gli esercizi, la costante R può essere presa pari a 8.314 J/(mol·K). Il volume deve essere in m³ se la pressione è in pascal. La pressione relativa all'atmosfera e la temperatura Celsius non si possono inserire direttamente in questa relazione.

Per n = 0.10 mol, T = 300 K e V = 0.0020 m³, la pressione calcolata è 0.10×8.314×300/0.0020 ≈ 1.25×10^5 Pa. La coerenza delle unità deriva da Pa·m³ = J. Se V raddoppia con n e T costanti, la pressione si dimezza. Se T raddoppia con n e V costanti, la pressione raddoppia, ma si tratta di un raddoppio in kelvin.

Il modello trascura in particolare alcuni effetti d'interazione e il volume proprio delle particelle. Diventa meno adatto quando questi effetti sono importanti, per esempio vicino alla condensazione. Non assumere che un gas reale obbedisca esattamente a questa legge a ogni pressione e temperatura. Altro riferimento ufficiale: NASA Glenn, equazione di stato, https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/equation-of-state/, consultato per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026.

4. Il primo principio e la convenzione dei segni

Per un sistema chiuso, un bilancio generale si può scrivere ΔU + ΔE_c + ΔE_p = W + Q, dove W e Q sono energie ricevute rispettivamente come lavoro e trasferimento termico. Se le variazioni meccaniche complessive sono trascurabili, si scrive ΔU = W + Q. L'energia ricevuta è positiva in questa convenzione; quella fornita all'ambiente è negativa. Esistono altre convenzioni, ma vanno dichiarate e mantenute.

Lavoro e trasferimento termico dipendono dal percorso della trasformazione, mentre la variazione dell'energia interna dipende dagli stati iniziale e finale. Due trasformazioni fra gli stessi stati possono comportare lavori e trasferimenti termici diversi la cui somma dà lo stesso ΔU. Questa distinzione fra una grandezza di stato e un trasferimento è al cuore del bilancio; non è una sottigliezza di vocabolario.

Per un'espansione contro una pressione esterna costante, il lavoro ricevuto dal sistema è W = −p_ext(V_f − V_i), nel modello meccanico dichiarato. Se il volume passa da 2.0 a 4.0 litri sotto 100 000 Pa, W = −200 J. Se il sistema riceve contemporaneamente Q = 500 J, la variazione della sua energia interna è +300 J. Un lavoro negativo significa che il sistema fornisce energia meccanica all'ambiente durante l'espansione.

5. Capacità termica e variazione di temperatura

Per un sistema incomprimibile di massa m il cui calore specifico c si assume costante nell'intervallo studiato, una variazione di energia interna senza cambiamento di fase si può scrivere ΔU = mcΔT. La capacità termica totale C = mc è espressa in J/K; c in J/(kg·K). Il simbolo C qui differisce dalla capacità elettrica del capitolo precedente, pur essendo la stessa lettera. L'unità identifica immediatamente la grandezza usata.

Se l'unico scambio pertinente è il trasferimento termico, Q = mcΔT. Se viene ricevuto anche lavoro elettrico o meccanico, includilo. Un oggetto immaginario di massa 0.20 kg, con c = 1 000 J/(kg·K), riceve 4 000 J senza perdite o cambiamenti di fase. La sua temperatura aumenta di 4 000/(0.20×1 000) = 20 K, un aumento di 20 °C. Una massa doppia richiederebbe il doppio dell'energia per lo stesso aumento in questo modello.

Il calore specifico può variare con la temperatura. La formula a c costante è allora un'approssimazione; un calcolo più preciso può integrare una capacità dipendente da T. Contano anche il recipiente, le perdite e gli scambi con l'aria. Una stima ideale non è un tempo di riscaldamento garantito per un'apparecchiatura reale.

6. Mescolamento e cambiamento di fase

Due masse della stessa sostanza senza cambiamento di fase, con lo stesso calore specifico costante, possono essere studiate attraverso un bilancio isolato. Se si trascurano recipiente e perdite, m_1c(T_f − T_1) + m_2c(T_f − T_2) = 0. La temperatura finale è quindi una media ponderata per le masse. Si trova fra le temperature iniziali per masse positive.

In un esercizio, 0.20 kg a 60 °C e 0.30 kg a 20 °C danno T_f = (0.20×60 + 0.30×20)/0.50 = 36 °C. La semplice media di 40 °C sarebbe errata perché le masse differiscono. Per questo calcolo di differenze e di una media ponderata si può usare Celsius, perché viene conservato lo scostamento comune di 273.15; ciò non giustifica l'uso di Celsius nei rapporti di temperatura o in pV = nRT.

Durante un cambiamento di fase a una data pressione, si può ricevere energia senza variazione di temperatura mentre le fasi coesistono. Una relazione Q = mL usa un calore latente specifico L. Per una sostanza immaginaria con L = 2.0×10^5 J/kg, trasformare 0.10 kg richiede 20 000 J nel modello. La formula mcΔT non descrive questa fase, perché l'energia interna cambia in un modo diverso da una semplice variazione di temperatura.

7. Tre modi di trasferimento termico

La conduzione trasferisce energia attraverso un mezzo senza richiedere necessariamente un moto macroscopico complessivo di materia. La convezione associa gli scambi al moto di un fluido. La radiazione trasferisce energia mediante onde elettromagnetiche e può avvenire nel vuoto. In situazioni reali coesistono più modi; separarli in un modello permette di esaminarne i contributi.

Per una parete piana omogenea di area A, spessore e e conducibilità termica λ, un modello stazionario unidimensionale dà il modulo della potenza termica P = λA|ΔT|/e. Si definisce la resistenza termica R_th = e/(λA), in K/W. Quindi P = |ΔT|/R_th. In questo caso, senza un altro meccanismo imposto, l'energia passa spontaneamente dal lato più caldo a quello più freddo.

Con e = 0.10 m, λ = 0.050 W/(m·K), A = 2.0 m², R_th = 1.0 K/W. Per una differenza di 20 K, la potenza è 20 W. Raddoppiare lo spessore dimezza questa potenza nel modello. Contatti, ponti termici, variazioni di temperatura e scambi superficiali possono modificare una parete reale. Una formula semplice non può stabilire la prestazione completa di un edificio.

8. Radiazione e temperature assolute

Un modello di corpo grigio può dare la potenza irradiata P = εσAT^4, dove ε è l'emissività fra zero e uno in questo modello, σ la costante di Stefan-Boltzmann e T la temperatura assoluta. Per lo scambio con un ambiente ideale a T_env, una potenza netta semplificata è εσA(T^4 − T_env^4), con opportune ipotesi geometriche e radiative. La quarta potenza richiede kelvin, mai gradi Celsius.

Con ε = 0.80, A = 0.10 m², T = 400 K, T_env = 300 K e σ ≈ 5.67×10^−8 W/(m²·K^4), la potenza netta illustrativa è circa 79.4 W. Questo calcolo non significa che ogni superficie reale a questa

temperatura abbia la stessa emissività o gli stessi scambi. Il mezzo, le altre superfici e lo spettro possono richiedere una descrizione più dettagliata.

I valori delle costanti fisiche si possono controllare con NIST: https://physics.nist.gov/cuu/Constants/Table/allascii.txt, tabella consultata per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026. I valori arrotondati precedenti servono agli esercizi. Il modello radiativo ricorda perché un piccolo aumento relativo della temperatura possa cambiare sensibilmente la potenza, senza prevedere da solo la temperatura in un sistema completo.

9. Raffreddamento a contatto con un serbatoio termico

Un modello fenomenologico di Newton può scrivere la potenza ricevuta come P = −hA(T − T_ext), con hA assunto costante e un ambiente alla temperatura costante T_ext. Per un sistema di capacità termica totale C, C dT/dt = −hA(T − T_ext). La soluzione è T(t) = T_ext + (T_0 − T_ext)e^(−t/τ), con τ = C/(hA). Diminuisce esponenzialmente la differenza di temperatura, non la temperatura assoluta stessa.

Per un oggetto immaginario inizialmente a 80 °C in un ambiente a 20 °C, con τ = 10 min, la temperatura dopo una costante di tempo è 20 + 60/e ≈ 42.1 °C. Per raggiungere al massimo 30 °C, occorre 60e^(−t/τ) ≤ 10, quindi t ≥ τ ln(6) ≈ 17.9 min. Questi numeri descrivono una curva ideale, non istruzioni per maneggiare o toccare un oggetto caldo.

L'equazione assomiglia a quella di un circuito RC. Il confronto riguarda la struttura matematica: una differenza rispetto a uno stato finale diminuisce con un tempo caratteristico. Non rende identici i meccanismi. Il raffreddamento può comprendere radiazione, evaporazione o variazioni di h e il serbatoio termico può non restare costante. Un adattamento esponenziale va discusso alla luce delle osservazioni e delle ipotesi.

10. Conservazione e verso delle trasformazioni

Il primo principio impone un bilancio energetico, ma da solo non determina quali trasformazioni avvengano spontaneamente. Due oggetti isolati non scambiano spontaneamente energia termica in modo che quello caldo diventi ancora più caldo e quello freddo ancora più freddo nel caso usuale studiato. Il verso dell'evoluzione richiede informazioni aggiuntive, sviluppate attraverso il secondo principio e l'entropia. Questo approfondimento viene menzionato per evitare di chiedere al primo principio una conclusione che non fornisce.

Una pompa di calore può trasferire energia da un mezzo più freddo a uno più caldo ricevendo lavoro. Se fornisce 600 J al lato caldo e riceve 200 J di lavoro, può estrarre 400 J dal lato freddo in un bilancio ideale. Il rapporto 600/200 = 3 non è un rendimento di creazione di energia: confronta il calore utile fornito con il lavoro pagato, mentre l'altro ingresso proviene dal mezzo freddo.

Il coefficiente di prestazione può quindi superare uno senza contraddire la conservazione. Va distinto dal rendimento definito come energia utile divisa per tutta l'energia ricevuta. Le condizioni di temperatura e le caratteristiche reali impongono ulteriori limiti. Questo esempio immaginario non stabilisce la prestazione di alcun apparecchio.

11. Un bilancio radiativo semplificato e i suoi limiti

Per una sfera che riceve un flusso solare S, l'area che intercetta la radiazione è πR^2, mentre l'area totale è $4\pi R^2$. Con albedo a, la potenza ideale assorbita è $(1 - a)S\pi R^2$. Se irradia come un corpo nero uniforme, l'equilibrio dà $4\pi R^2\sigma T^4 = (1 - a)S\pi R^2$, quindi $T = [(1 - a)S/(4\sigma)]^{(1/4)}$.

Con parametri illustrativi S = 1 360 W/m² e a = 0.30, si ottengono circa 255 K. Il raggio si semplifica. Questa temperatura corrisponde

al modello radiativo semplificato; non è automaticamente la temperatura media reale della superficie. Non vengono descritte atmosfera, assorbimento ed emissione dipendenti dalla lunghezza d'onda, circolazione, alternanza giorno-notte e distribuzione della temperatura. Una media di T^4 non è esattamente la quarta potenza di una media di T.

Questo calcolo aiuta a comprendere la struttura di un bilancio e il ruolo dell'albedo. Non è una previsione climatica. Un modello più ricco deve precisare gli scambi e gli strati inclusi. Un valore semplificato può essere informativo se si dichiara ciò che misura; diventa ingannevole se viene presentato come una misura diretta dell'intero sistema Terra-atmosfera.

Approfondimento - Effetto serra e confine del bilancio radiativo

La superficie riscaldata della Terra emette prevalentemente radiazione infrarossa. Alcuni gas atmosferici, in particolare il vapore acqueo e il diossido di carbonio, assorbono ed emettono in bande di questo intervallo. Una parte della radiazione emessa dall'atmosfera viaggia verso il suolo. Questo trasferimento contribuisce a una temperatura superficiale più alta che in un modello in cui la radiazione uscisse direttamente verso lo spazio. L'atmosfera non è quindi una parete che impedisce a tutta l'energia di uscire: partecipa agli scambi radiativi e ad altri trasferimenti.

Il bilancio alla sommità dell'atmosfera confronta l'energia solare assorbita dall'intero sistema Terra-atmosfera con la sua emissione verso lo spazio. Il bilancio della superficie comprende anche la radiazione atmosferica ricevuta e gli scambi per convezione ed evaporazione. Mescolare questi confini conta un trasferimento interno come nuova energia dall'esterno. Assorbimento seguito da emissione non crea energia. Queste distinzioni spiegano perché i

255 K del modello precedente non siano automaticamente la temperatura media della superficie.

Un approfondimento su carta: assumiamo una superficie nera e uno strato atmosferico ideale trasparente alla radiazione solare, ma completamente assorbente per l'infrarosso superficiale. Trascuriamo convezione ed evaporazione; indichiamo con F il flusso solare medio effettivamente assorbito dalla superficie. Lo strato emette σT_a^4 verso l'alto e altrettanto verso il basso. Il suo bilancio richiede σT_s^4 = 2σT_a^4. Il bilancio della superficie dà F + σT_a^4 = σT_s^4. Deduciamo σT_a^4 = F e σT_s^4 = 2F. Il flusso uscente verso lo spazio resta F, uguale al flusso entrante; il trasferimento aggiuntivo verso il basso è interno al sistema.

Esercizio originale. Per F = 240 W/m² e σ = 5.67 × 10⁻⁸ W·m⁻²·K⁻⁴, calcola le due temperature del modello. Che cosa accade al bilancio se il flusso uscente verso lo spazio viene erroneamente sostituito con σT_s^4? Soluzione: T_a = (F/σ)^(1/4) ≈ 255 K e T_s = (2F/σ)^(1/4) ≈ 303 K. Il loro rapporto è 2^(1/4), circa 1.189. Usare σT_s^4 come flusso uscente darebbe 480 W/m² e ignorerebbe lo strato che assorbe quella radiazione prima di emettere verso lo spazio. La differenza apparente non dimostra una violazione della conservazione, ma un confine definito male.

Questo modello a un solo strato è deliberatamente molto semplificato: l'atmosfera reale assorbe in modo diverso alle diverse lunghezze d'onda, ha un profilo di temperatura e scambia energia anche attraverso il moto e i cambiamenti di fase. I valori calcolati non sono né misure del clima attuale né proiezioni. L'approccio dimostra un meccanismo e la conservazione; da solo non quantifica l'effetto di una concentrazione reale di gas o di uno scenario futuro.

Riferimenti qualitativi e sui confini, consultati per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026: NASA Science, bilancio della radiazione, https://science.nasa.gov/ems/13_radiationbudget/ ; bilancio energetico

Terra-atmosfera, https://science.nasa.gov/earth/earth-observatory/climate-and-earths-energy-budget/. Il modello grigio a un solo strato, la sua dimostrazione e l'esercizio precedente sono sviluppi didattici originali LFDP; non vengono riprodotte figure NASA o serie climatiche.

12. Esercizi svolti e ripasso

A - Segno del lavoro. Un gas viene compresso da 3 a 2 litri sotto una pressione esterna costante di 100 000 Pa. Soluzione: W = −p_extΔV = +100 J. Se Q = −40 J, ΔU = +60 J. La compressione fornisce lavoro al sistema nonostante il trasferimento termico verso l'esterno.

B - Temperatura. La temperatura passa da 20 a 40 °C. Soluzione: passa da 293.15 a 313.15 K; il rapporto è circa 1.068, non 2. La differenza è 20 K e 20 °C. Differenza e rapporto sono operazioni distinte.

C - Raffreddamento. Nel modello esponenziale, quanto tempo occorre per dimezzare la differenza rispetto all'ambiente? Soluzione: e^(−t/τ) = 1/2 dà t = τ ln(2), circa 0.693τ. Questo tempo riguarda la differenza T − T_ext, non il dimezzamento di un'intera temperatura Celsius.

D - Cambiamento di fase. Si riceve un trasferimento termico senza cambiare temperatura. Soluzione: ciò non richiede Q = 0. Un cambiamento di fase può assorbire energia mentre la temperatura resta costante sotto le condizioni dichiarate. Il modello mcΔT è allora insufficiente.

Per ripassare, dichiara sistema, scambi, convenzione dei segni e dominio del modello. Distingui energia interna, temperatura e trasferimento. Ricostruisci un bilancio e poi un'equazione temporale, controllando unità e limite. Quadro ufficiale pubblicato dell'ultimo anno del liceo francese: https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm, allegato https://cache.media.education.gouv.fr/file/SPE8_MENJ_25_7_2019/92/9/spe249_annexe_1158929.pdf. Testi, calcoli ed esercizi originali LFDP, senza riproduzione di testi, figure o procedure pericolose.

Capitolo 9 - Onde: propagazione, frequenza, intensità ed effetto Doppler

Riferimento storico - 1842: la frequenza dipende anche dal moto relativo

L'Università di Vienna data al 1842 la prima descrizione di Christian Doppler del fenomeno che oggi porta il suo nome. Questo riferimento storico collega il vocabolario del capitolo a una domanda fisica: perché una sorgente periodica e il segnale ricevuto non sono necessariamente descritti dalla stessa frequenza? La data di una proposta non valida tutti i suoi usi successivi. Un calcolo attuale richiede sempre di precisare il mezzo, il verso del movimento e la convenzione dei segni; per la luce, una formula acustica non diventa applicabile semplicemente cambiando il nome dell'onda.

Riferimento del fatto storico, consultato per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026: Università di Vienna, storia della fisica, prima parte, https://physik.univie.ac.at/en/about-us/history/part-1/. Analisi didattica LFDP, senza citazione letterale né riproduzione di immagini.

1. Una perturbazione che si propaga

Un'onda descrive la propagazione di una perturbazione e può trasportare energia. Un'onda meccanica richiede un mezzo materiale. Lo spostamento locale degli elementi del mezzo non va confuso con la velocità di propagazione della perturbazione. In un modello semplice di corda, un punto può oscillare verticalmente mentre la deformazione si propaga orizzontalmente. Non percorre tutta la corda insieme all'onda.

Un'onda è trasversale quando la perturbazione è perpendicolare alla direzione di propagazione e longitudinale quando queste direzioni sono parallele. Il suono in un gas viene descritto

attraverso variazioni di pressione e spostamenti longitudinali locali. Le onde elettromagnetiche non richiedono un mezzo materiale per propagarsi nel vuoto. Queste categorie identificano meccanismi; non dicono che ogni onda si comporti nello stesso modo.

Il modello elementare non presuppone un trasporto complessivo di materia identico a quello dell'energia. Fenomeni più complessi possono comportare uno spostamento netto o un flusso; «nessuna onda trasporta mai materia» sarebbe troppo assoluto. A questo livello distinguiamo semplicemente spostamento locale, trasporto della perturbazione e possibile movimento complessivo del mezzo.

2. Ritardo e velocità di propagazione

Se una perturbazione si propaga senza cambiare forma a velocità costante c, due punti separati dalla distanza d lungo la propagazione osservano lo stesso segnale con ritardo $\tau = d/c$. La velocità di propagazione ha unità m/s; il ritardo è una durata positiva. Un segnale misurato nel secondo punto può essere descritto da $s_2(t) = s_1(t - \tau)$ se le convenzioni temporali e il verso di propagazione sono coerenti.

Per $d = 1.70$ m e $c = 340$ m/s in un esercizio di acustica, il ritardo è 0.0050 s, cioè 5.0 ms. Questo è un percorso di sola andata. Per un'eco ricevuta nel punto di emissione dopo una riflessione su un ostacolo alla distanza d, il percorso ideale è 2d e il ritardo 2d/c. Confondere queste geometrie dimezza o raddoppia la distanza calcolata.

La velocità di propagazione dipende dal mezzo e dalle sue condizioni; in generale non è la velocità della sorgente. Una persona che cammina parlando non spinge tutte le onde sonore alla propria velocità. Il moto della sorgente cambia gli intervalli fra i fronti d'onda ricevuti, producendo l'effetto Doppler, ma la

propagazione attraverso il mezzo continua a essere descritta dalla velocità appropriata dell'onda.

3. Periodo, frequenza e lunghezza d'onda

Per un'onda periodica, il periodo T è il tempo che separa stati identici successivi in un punto. La frequenza f = 1/T indica i cicli al secondo ed è espressa in hertz. La lunghezza d'onda λ è la distanza fra due punti con lo stesso stato di fase in un dato istante, per una propagazione periodica semplice. In questo modello abbiamo λ = cT = c/f.

Un segnale di frequenza 1 000 Hz che si propaga a 340 m/s ha lunghezza d'onda 0.340 m e periodo 1.00 ms. Una frequenza doppia nello stesso mezzo non dispersivo dà una lunghezza d'onda dimezzata. Il periodo è una durata; la lunghezza d'onda è una distanza. I grafici in funzione del tempo e della posizione vanno quindi letti usando assi differenti.

In un'interfaccia ferma fra due mezzi, la frequenza imposta dalla sorgente resta generalmente invariata nel modello di trasmissione studiato, ma la velocità di propagazione e la lunghezza d'onda possono cambiare. Una velocità maggiore nel secondo mezzo dà una lunghezza d'onda maggiore per quella frequenza. Riflessione e trasmissione possono coesistere; una sola lunghezza d'onda non descrive l'intero campo quando sono presenti più onde.

4. Scrivere un'onda sinusoidale e interpretare la fase

Un'onda progressiva che si propaga lungo x positivo si può scrivere s(x,t) = A cos(ωt − kx + φ), con ω = 2πf e k = 2π/λ. L'ampiezza A ha l'unità della grandezza perturbata; la fase è adimensionale. Il rapporto ω/k dà la velocità di fase in questo modello. Cambiare il segno davanti a kx inverte il verso di propagazione mantenendo le convenzioni.

In una posizione fissa si osserva un'oscillazione temporale. In un istante fisso si osserva un profilo spaziale. Due punti separati da λ hanno la stessa fase; due separati da λ/2 hanno fasi opposte per una sinusoide. Ciò non significa che gli elementi materiali siano separati da una lunghezza costante del loro stesso movimento; descrive l'organizzazione del segnale.

Se si mantiene costante la fase e il tempo aumenta di Δt, la posizione aumenta di (ω/k)Δt. Si ritrovano così verso e velocità senza memorizzare un segno isolato. Questo controllo è utile quando una convenzione diversa scrive cos(kx − ωt). Poiché il coseno è pari, le forme possono essere equivalenti con una fase appropriata; esamina tutta l'espressione.

5. Intensità e distribuzione della potenza

L'intensità media di un'onda può essere definita come potenza trasportata per unità di area, in W/m². Per una sorgente puntiforme isotropa ideale in un mezzo senza assorbimento, la potenza P si distribuisce su una sfera di area 4πr². L'intensità alla distanza r è quindi P/(4πr²). Diminuisce quando aumenta l'area di distribuzione, senza che la potenza totale venga dissipata in questo modello.

Se la distanza raddoppia, l'intensità viene divisa per quattro. Partendo da un'intensità immaginaria di 10^−6 W/m² a 2 m, otteniamo 2.5×10^−7 W/m² a 4 m sotto le stesse condizioni. Non applicare questa legge geometrica senza esame vicino a una sorgente estesa, in un locale riverberante o in un mezzo assorbente. Anche la direttività può concentrare la potenza in particolari direzioni.

L'assorbimento è un altro meccanismo: una parte dell'energia dell'onda viene trasferita al mezzo. Una legge di attenuazione può allora includere un fattore aggiuntivo dipendente da distanza e frequenza. Distingui l'allargamento geometrico dalla dissipazione.

Entrambi diminuiscono l'intensità misurata, ma descrivono trasferimenti diversi.

6. Livello logaritmico e somma di sorgenti

Il livello di intensità sonora è definito da L = 10log_10(I/I_0), in decibel, con riferimento convenzionale I_0 = 10^−12 W/m² negli esercizi usuali. Il rapporto è adimensionale. Per I = 10^−6 W/m², il rapporto è 10^6 e L = 60 dB. Il livello non si somma come l'intensità e il suo valore da solo non basta a descrivere un'esposizione reale o una protezione.

Raddoppiare l'intensità aggiunge 10log_10(2) ≈ 3.01 dB. Moltiplicarla per dieci aggiunge 10 dB. Nel modello sferico senza assorbimento, raddoppiare la distanza sottrae 10log_10(4) ≈ 6.02 dB. Queste differenze sono indipendenti dal livello iniziale finché si conservano le ipotesi e lo stesso riferimento.

Per sorgenti indipendenti le cui intensità si possono sommare, quattro sorgenti identiche danno quattro volte l'intensità e circa 6.02 dB in più di una sola. Sommare i loro quattro livelli sarebbe errato. Per onde coerenti, ampiezze e fasi entrano nell'interferenza; la semplice somma delle intensità non è più la descrizione generale. Il prossimo capitolo chiarisce questa condizione.

Il rapporto fra ampiezza e intensità dipende dalla grandezza e dal mezzo. Per un'onda lineare nello stesso mezzo, l'intensità può essere proporzionale al quadrato dell'ampiezza di pressione o di spostamento. Raddoppiare questa ampiezza quadruplica allora l'intensità anziché raddoppiarla. I livelli non sono un'istruzione universale di sicurezza uditiva; restano necessari durata, spettro e condizioni di esposizione.

7. Effetto Doppler con una sorgente in movimento

L'effetto Doppler è una differenza fra frequenza emessa e ricevuta associata al moto relativo nella geometria studiata. Per una sorgente sonora che si avvicina a un osservatore fermo nel mezzo, i fronti d'onda successivi sono più vicini fra loro. In un modello rettilineo subsonico, f_received = f_emitted c/(c − v_s), con v_s positiva verso l'osservatore e minore di c.

Si può ricostruire la formula. Durante un periodo emesso T_emitted, il primo fronte avanza di cT_emitted mentre la sorgente avanza di v_sT_emitted. La distanza fra due fronti davanti a essa è (c − v_s)T_emitted. L'osservatore fermo riceve questi fronti alla velocità c; la frequenza è c divisa per questa lunghezza d'onda. La formula deriva da geometria e periodo, non da una variazione arbitraria della frequenza propria della sorgente.

Con f_emitted = 440 Hz, c = 340 m/s e v_s = 20 m/s, la frequenza ricevuta in avvicinamento è 467.5 Hz. In allontanamento, la lunghezza d'onda aumenta e la formula diventa 440×340/(340 + 20), circa 415.6 Hz. Gli scarti non sono esattamente simmetrici attorno a 440, perché la velocità della sorgente compare al denominatore.

8. Un osservatore in movimento e le onde elettromagnetiche

Per una sorgente ferma e un osservatore che si avvicina alla velocità v_o attraverso il mezzo, l'osservatore incontra i fronti alla velocità c + v_o. La frequenza ricevuta è f_emitted(c + v_o)/c nella geometria rettilinea semplice. I moti della sorgente e dell'osservatore non producono quindi formule identiche per il suono, perché il mezzo fornisce il quadro di propagazione.

Se sorgente e osservatore si avvicinano sotto la convenzione dichiarata, si combinano i fattori: f_received = f_emitted(c + v_o)/(c − v_s). Una velocità non allineata alla linea di vista richiede

le componenti pertinenti e una geometria precisa. Inserire una velocità intera in una formula radiale senza esame può sovrastimare uno scarto.

Per la luce nel vuoto, le relazioni complete richiedono una descrizione relativistica, diversa dal modello acustico con un mezzo. A velocità radiale piccola rispetto a c, un'approssimazione dà uno scarto relativo di lunghezza d'onda $\Delta\lambda/\lambda \approx v_r/c$ per l'allontanamento, con v_r positiva in allontanamento. Conserva il segno e il dominio dell'approssimazione. Questa relazione non copre le alte velocità né ogni fenomeno di spostamento spettrale.

9. Sovrapposizione e onde stazionarie

In un modello lineare, due perturbazioni si possono sovrapporre sommando i loro valori. Due onde di uguale frequenza e ampiezza che viaggiano in versi opposti possono produrre un'onda stazionaria. Alcuni punti restano nodi, con ampiezza nulla, mentre altri sono ventri di ampiezza massima. Un'onda stazionaria non è una singola onda progressiva che avanza nel suo insieme in un verso.

Per una corda ideale di lunghezza L fissata alle due estremità, le condizioni impongono nodi agli estremi. Le lunghezze d'onda ammesse sono $\lambda_n = 2L/n$ e le frequenze $f_n = nc/(2L)$, per interi $n \geq 1$. Queste relazioni dipendono dalle condizioni al contorno; un sistema con un'estremità libera ha altri modi. La parola «armonico» non elimina quindi la necessità di definire il sistema.

Con L = 0.50 m e c = 100 m/s in un esercizio, la fondamentale è 100 Hz e il terzo modo 300 Hz. In quel modo, tre mezze lunghezze d'onda occupano la corda. Distingui numero del modo, numero di nodi e numero di ventri. Gli estremi sono nodi; il terzo modo ha due nodi interni e tre ventri.

10. Segnali composti, battimenti e digitalizzazione

Un segnale puro è sinusoidale nel modello. Un segnale composto può contenere più frequenze. La somma A cos(2π×400t) + 0.5A cos(2π×800t) è periodica, ma non è una singola sinusoide. Lo spettro descrive le componenti e le loro ampiezze. La forma del segnale e il periodo fondamentale da soli non forniscono ogni dettaglio dello spettro.

Due sinusoidi con frequenze vicine, per esempio 440 e 442 Hz, possono produrre battimenti. L'identità della somma dei coseni rivela un'oscillazione rapida modulata da un inviluppo. La frequenza dei battimenti d'ampiezza osservati è la differenza assoluta, qui 2 Hz. Ciò non significa che sia stata aggiunta una nuova sorgente materiale che oscilla a 2 Hz; nasce dalla sovrapposizione e dall'evoluzione della fase relativa.

Per digitalizzare un segnale limitato alla frequenza massima f_max, una frequenza di campionamento maggiore di 2f_max è una condizione fondamentale per la ricostruzione ideale, con opportune ipotesi di banda limitata e trattamento. Se una componente supera questo intervallo, l'aliasing può farla apparire a un'altra frequenza. Per esempio, coseni a 700 e 300 Hz producono valori identici negli istanti multipli di 1/1 000 s. I soli dati campionati non possono allora distinguerli senza informazioni aggiuntive.

11. Esercizi svolti

A - Eco. Un'eco viene ricevuta dopo 0.20 s in un modello con c = 340 m/s. Soluzione: il percorso di andata e ritorno è 68 m; l'ostacolo si trova a 34 m. L'eco non corrisponde a un percorso di sola andata di 68 m fino all'ostacolo.

B - Lunghezza d'onda. Un'onda ha T = 0.020 s e c = 3.0 m/s. Soluzione: f = 50 Hz e λ = 0.060 m. La frequenza dipende dal

periodo; la lunghezza d'onda usa anche la velocità di propagazione. Moltiplicare c per f non darebbe una lunghezza.

C - Livello. L'intensità viene moltiplicata per 1 000. Soluzione: il livello aumenta di 10log_10(1 000) = 30 dB. Il livello iniziale non viene moltiplicato per 1 000. Una scala logaritmica trasforma un rapporto in una differenza.

D - Doppler. Una sorgente sonora si allontana da un ricevitore fermo. Soluzione: nel modello subsonico presentato, la frequenza ricevuta è inferiore. Ricostruisci il segno da fronti più distanziati invece di memorizzarlo senza geometria.

E - Modi. Una corda ideale ha una fondamentale di 80 Hz. Soluzione: i suoi modi armonici sono a 80, 160, 240 Hz, ecc., sotto le stesse condizioni al contorno. Una condizione diversa agli estremi richiede un'altra relazione; questo risultato non è universale per ogni strumento.

12. Ripasso e portata

Distingui il moto del mezzo dalla propagazione, leggi un periodo su un segnale temporale e una lunghezza d'onda su un profilo spaziale. Ricostruisci l'effetto Doppler acustico usando le distanze fra i fronti. Per intensità e livello, torna sempre alle definizioni prima di sommare. Controlla anche linearità, stazionarietà e condizioni geometriche.

Quadro ufficiale pubblicato dell'ultimo anno del liceo francese, componente onde e segnali: https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm e allegato https://cache.media.education.gouv.fr/file/SPE8_MENJ_25_7_2019/92/9/spe249_annexe_1158929.pdf, consultati per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026. Spiegazioni ed esercizi originali LFDP, senza riproduzione di registrazioni, immagini o quesiti di terzi. I valori acustici sono parametri di esercizio, non una misura locale, una valutazione dell'esposizione o un'istruzione di protezione.

Capitolo 10 - Ottica: diffrazione, interferenza, immagini e cannocchiali

Riferimento storico - 1801: discutere una teoria della luce

Gli archivi della Royal Society conservano il testo della conferenza di Thomas Young sulla teoria della luce e dei colori, presentata il 12 novembre 1801; l'articolo corrispondente fu pubblicato nel 1802. Distinguere presentazione e pubblicazione evita di trasformare due date vicine in una contraddizione. Questa tappa accompagna le descrizioni ondulatorie: spiegare una figura luminosa richiede di confrontare fasi e ampiezze, non soltanto di tracciare raggi. Le formule e gli esercizi di questo capitolo sono sviluppi didattici attuali; non riproducono l'apparecchio storico né traducono il suo manoscritto.

Riferimento del fatto storico, consultato per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026: Royal Society, archivi L&P/11/172, https://makingscience.royalsociety.org/items/l-and-p_11_172/paper-on-the-theory-of-light-and-colours-bakerian-lecture-by-thomas-young. Analisi didattica LFDP, senza citazione letterale né riproduzione di immagini.

1. Più modelli per più domande

La luce si può descrivere mediante raggi per studiare immagini quando le dimensioni del dispositivo sono grandi rispetto alla lunghezza d'onda e le ipotesi geometriche sono appropriate. Una descrizione ondulatoria diventa necessaria per diffrazione e interferenza. Una descrizione mediante fotoni chiarisce alcuni scambi energetici con la materia. Questi modelli non sono tre opinioni fra cui scegliere secondo una preferenza; ciascuno risponde a domande e ha un dominio di validità.

Un raggio rappresenta la direzione di propagazione nell'ottica geometrica, non un filo materiale di luce. Disegnare alcuni raggi

costruisce un'immagine, ma non descrive da solo l'intensità distribuita attorno a essa. Un'apertura finita può produrre una figura di diffrazione anche quando uno schema geometrico ideale fa convergere i raggi in un punto. La precisione richiesta determina il modello necessario.

Questo capitolo riguarda dispositivi idealizzati e calcoli su carta. Lunghezze d'onda, dimensioni e distanze focali sono dati di esercizio. Le formule non certificano alcuna qualità ottica reale. Per comprendere i risultati non occorrono osservazione del Sole, esposizione a laser o montaggi ottici rischiosi.

2. Diffrazione attraverso un'apertura

La diffrazione è una modifica della propagazione quando un'onda incontra un'apertura o un ostacolo. Diventa particolarmente visibile quando la dimensione pertinente è paragonabile alla lunghezza d'onda. Un'onda non continua quindi sempre come un fascio geometrico rigorosamente delimitato dai bordi. Nel modello ondulatorio studiato, il fenomeno non presuppone una deviazione casuale di fotoni indipendenti a ogni bordo.

Per una fenditura di larghezza b illuminata da un'onda monocromatica, il primo minimo di diffrazione in un modello di campo lontano soddisfa sin(θ) = λ/b. Per piccoli angoli in radianti, θ ≈ λ/b. L'angolo θ è il semiangolo fra l'asse centrale e questo primo minimo. La larghezza angolare del massimo centrale è circa 2λ/b. Confondere semiangolo e larghezza totale introduce un fattore due.

Su uno schermo alla distanza D, sotto le condizioni di piccoli angoli, la larghezza centrale è $\ell \approx 2\lambda D/b$. Con λ = 500 nm, b = 80 µm e D = 1.0 m, otteniamo $\ell \approx 0.0125$ m, cioè 12.5 mm. La conversione dà 500×10^−9 m e 80×10^−6 m. Una fenditura larga la metà dà un massimo centrale largo il doppio in questo modello; anche una

lunghezza d'onda maggiore produce una maggiore apertura della figura.

3. Interpretare una misura di diffrazione

Se la formula e le condizioni sono appropriate, stima una larghezza sconosciuta mediante $b \approx 2\lambda D/\ell$. Misura la larghezza centrale fra i primi minimi, anziché selezionare arbitrariamente due regioni luminose visibili. Luce monocromatica, geometria e distanze influenzano l'adeguatezza del modello. Una luce contenente più lunghezze d'onda sovrappone più figure e può complicare la misura.

Per $\lambda = 600$ nm, $D = 2.0$ m e $\ell = 24$ mm, la larghezza stimata è 100 µm. Raddoppiare una misura di ℓ con gli altri parametri invariati dimezzerebbe b. Questa dipendenza offre un controllo qualitativo prima del calcolo. Una larghezza negativa è impossibile e un risultato lontano dalle dimensioni del dispositivo richiede di controllare unità, definizione di ℓ e ipotesi.

Le incertezze su D, λ e ℓ influenzano b. Se la larghezza misurata è imprecisa, aggiungere cifre decimali alla distanza non rende automaticamente preciso b. Presenta una stima con precisione compatibile con i dati. Il modello stesso può essere il fattore limitante principale se gli angoli non sono più piccoli o non è stato raggiunto il regime di campo lontano.

4. Sovrapposizione e differenza di fase

Due onde sinusoidali sovrapposte di uguale frequenza danno un risultato dipendente dalla loro differenza di fase. Per una differenza di cammino δ e sorgenti inizialmente in fase nello stesso mezzo, $\Delta\varphi = 2\pi\delta/\lambda$, a meno di una convenzione del segno. Se le fasi iniziali differiscono, si aggiunge quella differenza; la sola distanza non descrive più l'interferenza.

L'interferenza costruttiva significa che le perturbazioni si rafforzano. Per due ampiezze uguali e $\Delta\varphi = 2m\pi$, l'ampiezza risultante raddoppia. L'interferenza distruttiva completa corrisponde a $\Delta\varphi = (2m + 1)\pi$ e può annullare la perturbazione locale se le ampiezze sono uguali. Le condizioni sui cammini sono allora $\delta = m\lambda$ e $\delta = (m + 1/2)\lambda$ per sorgenti inizialmente in fase.

Per ampiezze diverse, l'opposizione di fase non produce necessariamente un annullamento completo. Anche la coerenza, intesa qui come differenza di fase sufficientemente stabile durante l'osservazione, è necessaria per una figura stabile. Due sorgenti indipendenti possono cambiare troppo rapidamente la fase relativa; il termine medio d'interferenza può allora scomparire. Sommare intensità e sommare ampiezze non sono operazioni intercambiabili.

5. Intensità e conservazione dell'energia

Per la luce, la seguente relazione scalare presuppone contributi con la stessa polarizzazione oltre alle condizioni di coerenza; polarizzazioni ortogonali non producono questo termine d'interferenza. Nel modello lineare appropriato, due onde di intensità I_1 e I_2 danno localmente $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos(\Delta\varphi)$. Se ciascuna ha intensità I_0, il risultato diventa $4I_0\cos^2(\Delta\varphi/2)$. Il massimo locale è $4I_0$ e il minimo è zero. Due onde incoerenti di uguale intensità darebbero in media $2I_0$ nelle usuali condizioni di somma.

Il massimo locale più elevato non crea energia e il minimo non ne distrugge. La figura ridistribuisce l'energia nello spazio sotto le condizioni della configurazione. Una regione scura e una luminosa non vanno studiate come due sistemi indipendenti a ciascuno dei quali viene assegnata tutta l'energia iniziale. La conservazione si controlla attraverso un bilancio appropriato dell'intero sistema e dei suoi flussi.

Questa relazione mostra anche perché sommare due livelli in decibel sarebbe errato per l'interferenza. Lavora con ampiezze o intensità e fasi del modello, poi applica la definizione di livello se viene richiesta quella rappresentazione. L'uguaglianza delle frequenze non basta: restano importanti la stabilità della fase relativa e la geometria.

6. Interferenza da due aperture

In una configurazione ideale di due aperture coerenti separate da a, con uno schermo lontano a D e coordinata x vicina all'asse, la differenza di cammino è approssimativamente $\delta \approx ax/D$. Per sorgenti inizialmente in fase, i massimi sono quindi separati dall'interfrangia $i \approx \lambda D/a$. Le approssimazioni richiedono in particolare una distanza grande rispetto ad a e angoli sufficientemente piccoli.

Con $\lambda = 600$ nm, $D = 2.0$ m e $a = 0.20$ mm, l'interfrangia è 0.0060 m, cioè 6.0 mm. Aumentare a riduce l'interfrangia; allontanare lo schermo la aumenta. Questa dipendenza differisce dalla larghezza di diffrazione di un'apertura di larghezza b. Le dimensioni a e b hanno ruoli diversi e non vanno scambiate nelle formule.

Una figura reale a doppia fenditura ha spesso frange d'interferenza modulate da un inviluppo di diffrazione. Le frange esprimono la differenza di cammino fra le aperture; l'inviluppo dipende da ciascuna apertura finita. Descrivere le une senza l'altro può essere utile su una regione, ma non riproduce l'intera distribuzione dell'intensità.

Se si misura i per stimare λ, usa $\lambda \approx ia/D$. Fare una media su più interfrange può ridurre un errore di localizzazione: misurare dieci interfrange e dividere per dieci è spesso più stabile che misurarne una. Ciò non elimina un errore di taratura o un'ipotesi geometrica

inadeguata. Migliorare la ripetibilità e correggere un errore sistematico sono scopi diversi.

7. Limiti di risoluzione: formare un'immagine non distingue ogni dettaglio

Un'apertura finita allarga l'immagine di un punto in una macchia anziché in un punto matematico perfetto. Due oggetti molto vicini in angolo possono produrre macchie sovrapposte. Un diametro maggiore dell'apertura può migliorare la risoluzione limitata dalla diffrazione a una data lunghezza d'onda, ma aberrazioni, sensore e atmosfera possono imporre altri limiti.

Come approfondimento esplicativo, un criterio usuale per un'apertura circolare dà un angolo caratteristico di circa 1.22λ/D_aperture nel modello ideale di diffrazione. Questo numero dipende dal criterio scelto e dalla geometria dell'apertura; non promette alcuna qualità reale di un telescopio. Il simbolo D_aperture non indica la distanza dello schermo nella sezione precedente.

Ingrandire un'immagine non crea dettagli che non sono stati risolti. Un'immagine molto ingrandita può restare sfocata. Distingui ingrandimento, risoluzione e luminosità. Questo protegge da un'interpretazione semplicistica di un numero d'ingrandimento pubblicizzato commercialmente, senza richiedere una prova dello strumento per comprendere il modello.

8. Una lente sottile e la convenzione dei segni

Per una lente sottile convergente, scegli un asse nel verso di propagazione della luce e il centro ottico O. La distanza focale immagine f' = OF' è positiva. L'equazione della lente con segni è 1/OA' − 1/OA = 1/f'. Per un oggetto reale a sinistra, OA è negativo; un'immagine reale a destra ha OA' positivo. I segni appartengono alle posizioni orientate, non semplicemente alla parola «distanza».

L'ingrandimento trasversale è γ = A'B'/AB = OA'/OA. Un segno negativo indica un'immagine capovolta; il suo valore assoluto confronta le dimensioni. Un'immagine reale può formarsi su uno schermo nel modello perché i raggi convergono effettivamente. Un'immagine virtuale corrisponde all'intersezione dei prolungamenti dei raggi; lo stesso fascio non la proietta su uno schermo posto in quella posizione.

Con f' = 0.10 m e OA = −0.30 m, la relazione dà 1/OA' = 10 − 3.333... = 6.666..., quindi OA' = 0.15 m. L'ingrandimento è −0.50. L'immagine è reale, capovolta e grande la metà. Sostituire OA con una distanza positiva di 0.30 m cambierebbe l'equazione e darebbe una risposta incompatibile con la convenzione.

9. Casi limite e costruzione geometrica

Per un oggetto all'infinito in una data direzione, i raggi incidenti sono approssimativamente paralleli e l'immagine si forma nel piano focale immagine. Un raggio parallelo all'asse passa per il fuoco immagine dopo una lente convergente ideale; un raggio che attraversa il centro ottico non viene deviato nell'approssimazione della lente sottile. Queste regole consentono la costruzione, purché uno schema non in scala non venga trattato come una misura esatta.

Se l'oggetto si trova nel fuoco oggetto, i raggi emergenti sono paralleli e l'immagine è all'infinito nel modello. Se l'oggetto reale è

fra il fuoco e la lente, l'immagine diventa virtuale e diritta. Con f' = 0.10 m e OA = −0.050 m, troviamo OA' = −0.10 m e γ = +2. L'immagine è dal lato dell'oggetto ed è ingrandita.

La relazione della lente sottile si usa in condizioni paraassiali: raggi sufficientemente vicini all'asse e angoli modesti, con un modello di lente adeguato. Angoli grandi o un'apertura ampia possono rivelare aberrazioni. La diffrazione continua a limitare l'immagine anche se il modello geometrico viene risolto correttamente. Un calcolo dell'equazione della lente risponde a una domanda su posizione e dimensione ideali, non su ogni aspetto della qualità di uno strumento.

10. Un cannocchiale afocale e l'ingrandimento angolare

Un cannocchiale astronomico ideale si può modellizzare con due lenti convergenti, un obiettivo e un oculare. Per un oggetto all'infinito, l'obiettivo forma un'immagine intermedia nel proprio piano focale immagine. In un cannocchiale afocale, questo piano coincide con il piano focale oggetto dell'oculare. I raggi emergono allora paralleli; la separazione delle lenti è f'_objective + f'_eyepiece nel modello semplice.

L'ingrandimento angolare con segno è G = θ'/θ = −f'_objective/f'_eyepiece per piccoli angoli e con la convenzione adottata. Il segno negativo corrisponde a un'immagine capovolta. Con distanza focale dell'obiettivo di 200 mm e dell'oculare di 25 mm, la separazione ideale è 225 mm e G = −8. L'ingrandimento assoluto è otto; confronta angoli, non direttamente l'altezza dell'immagine con quella di un oggetto a distanza finita.

Un diametro maggiore dell'obiettivo può raccogliere più luce e migliorare un limite di risoluzione per diffrazione, ma da solo non cambia questo rapporto di distanze focali. Un oculare cambia l'ingrandimento; non ripara automaticamente informazioni

perdute. Per spiegare oralmente un cannocchiale, distingui percorso dei raggi, immagine intermedia, condizione afocale e ingrandimento.

11. Rifrazione, frequenza e lunghezza d'onda

L'indice di rifrazione di un mezzo può essere definito come n = c_0/v_phase per un'onda luminosa monocromatica, con c_0 velocità di propagazione nel vuoto. In un'interfaccia ferma, la frequenza resta invariata nel modello di trasmissione, mentre la lunghezza d'onda diventa λ_medium = λ_vacuum/n. Un colore legato alla frequenza non diventa quindi semplicemente un altro colore perché la lunghezza d'onda è cambiata dentro il mezzo.

La legge della rifrazione è n_1sin(θ_1) = n_2sin(θ_2), con angoli misurati rispetto alla normale all'interfaccia. Misurare dalla superficie senza conversione è un errore geometrico. Se n_2 > n_1, il raggio rifratto si avvicina alla normale nella geometria usuale. Direzione e ampiezza della riflessione richiedono comunque le proprie relazioni.

La riflessione totale interna è possibile quando un'onda passa da un indice maggiore a uno minore e l'incidenza supera un angolo critico che soddisfa sin(θ_limit) = n_2/n_1. Questa condizione non vale nel verso opposto. Illustra l'importanza dell'ordine dei mezzi. L'indice di rifrazione può dipendere dalla lunghezza d'onda; la dispersione spiega alcune differenze di direzione fra le componenti di una luce policromatica.

12. Esercizi svolti

A - Larghezza centrale. λ = 400 nm, b = 0.10 mm e D = 2.0 m. Soluzione: $\ell \approx 2\lambda D/b = 0.016$ m, cioè 16 mm. Il semiangolo è circa 0.004 rad. Dare una larghezza di 8 mm ometterebbe il fattore due.

B - Interfrangia. Una configurazione ideale ha i = 3.0 mm, a = 0.50 mm e D = 2.5 m. Soluzione: λ ≈ ia/D = 6.0×10^−7 m, cioè 600 nm. Entrambe le grandezze in millimetri vengono convertite in metri prima della moltiplicazione. La lunghezza d'onda calcolata dipende dalle ipotesi di piccoli angoli e coerenza.

C - Fase. Due onde inizialmente in fase hanno una differenza di cammino di 3λ/2. Soluzione: Δφ = 3π, equivalente a π modulo 2π: l'interferenza è distruttiva. È completamente nulla soltanto se le ampiezze sono uguali nel modello.

D - Immagine. f' = 0.20 m e OA = −0.40 m. Soluzione: 1/OA' = 5 − 2.5 = 2.5, quindi OA' = 0.40 m e γ = −1. L'immagine è reale, capovolta e della stessa dimensione. Uguale dimensione non implica identico orientamento.

E - Cannocchiale. Un cannocchiale afocale ha distanze focali di 300 e 30 mm. Soluzione: la separazione ideale è 330 mm e l'ingrandimento con segno −10. Il capovolgimento deriva dal modello con due lenti convergenti; un altro sistema di raddrizzamento cambierebbe la descrizione.

F - Indice di rifrazione. Un'onda di frequenza data ha lunghezza d'onda nel vuoto 600 nm ed entra in un mezzo di indice 1.5. Soluzione: la sua lunghezza d'onda in quel mezzo è 400 nm; la frequenza resta la stessa nell'interfaccia ferma. La velocità di fase viene divisa per 1.5.

13. Ripasso e riferimenti

Per ripassare, scegli prima il fenomeno: diffrazione da un'apertura, interferenza fra contributi, formazione di un'immagine da una lente o ingrandimento di un cannocchiale. Poi scrivi dimensioni e convenzioni specifiche. Non confondere la larghezza delle fenditure con la loro separazione, un angolo con una lunghezza sullo schermo o l'ingrandimento trasversale con quello angolare. Una rappresentazione annotata può essere più istruttiva di una formula isolata.

Quadro ufficiale pubblicato dell'ultimo anno del liceo francese: https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm e allegato https://cache.media.education.gouv.fr/file/SPE8_MENJ_25_7_2019/92/9/spe249_annexe_1158929.pdf, consultati per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026. La sezione sulla risoluzione di un'apertura circolare è un approfondimento identificato; la guida non riproduce tutte le configurazioni d'esame. Spiegazioni ed esercizi originali LFDP, senza fotografie di manuali, figure o citazioni di terzi. I calcoli non costituiscono una procedura di montaggio o di sicurezza ottica.

Capitolo 11 - Fotoni, livelli energetici e conversione della luce

Riferimento storico - 1905 e 1921: una legge per l'effetto fotoelettrico

La presentazione della Fondazione Nobel collega il lavoro di Einstein del 1905 alla spiegazione dell'effetto fotoelettrico mediante quanti di luce. Il premio per la fisica assegnato per il 1921, consegnato l'anno successivo, menziona in particolare la legge di questo effetto. Non va quindi descritto come un premio per la relatività generale. Questo riferimento aiuta soprattutto a comprendere un cambiamento di domanda: aumentare l'intensità non sostituisce necessariamente l'energia individuale richiesta per estrarre un elettrone nel modello a singolo fotone. Il calcolo deve confrontare energie, non confondere la potenza del fascio con la frequenza.

Riferimento del fatto storico, consultato per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026: NobelPrize.org, presentazione della luce e degli archivi Nobel, https://www.nobelprize.org/prizes/physics/the-dual-nature-of-light-as-reflected-in-the-nobel-archives/. Analisi didattica LFDP, senza citazione letterale né riproduzione di immagini.

1. Perché sono necessarie più descrizioni della luce

Il capitolo precedente descriveva un'onda luminosa mediante lunghezza d'onda, fase e interferenza. Questa rappresentazione spiega la disposizione delle frange e i limiti di risoluzione. Non basta però a rendere conto di ogni modo in cui luce e materia scambiano energia. Quando un rivelatore riceve luce, l'energia può essere trasferita attraverso eventi discreti. Un fotone è il quanto associato a questa interazione elettromagnetica. Non sostituire una teoria utile con uno slogan contrario: i fenomeni studiati determinano le grandezze e il modello pertinenti.

Un fotone non è una piccola pallina classica di cui si possa seguire la traiettoria senza conseguenze in ogni dispositivo d'interferenza. Neppure un'onda luminosa è una sostanza materiale che scorre come l'acqua. Le immagini possono aiutare una prima spiegazione; cessano di essere utili quando si attribuiscono loro proprietà estranee al modello. Una buona risposta distingue ciò che viene misurato, ciò che viene calcolato e ciò che appartiene a una rappresentazione didattica.

Questa guida usa l'energia del fotone per studiare transizioni fra livelli energetici, l'effetto fotoelettrico e alcuni bilanci di conversione. Non intraprende una costruzione completa della meccanica quantistica. Gli esempi numerici di livelli atomici e materiali sono immaginari salvo indicazione contraria. Consentono di ragionare senza far passare uno schema semplificato per le caratteristiche di un componente reale.

2. Energia, frequenza e lunghezza d'onda nel vuoto

Per una radiazione di frequenza ν, l'energia del fotone è:

$E = h\,\nu = h\,c_0 / \lambda_0$.

La costante di Planck h è esattamente 6.626 070 15 × 10^{-34} J·s e la velocità della luce nel vuoto c_0 è esattamente 299 792 458 m·s^{-1} nel Sistema internazionale. La notazione λ_0 identifica la lunghezza d'onda nel vuoto. Frequenza e lunghezza d'onda sono collegate da $c_0 = \lambda_0 \nu$. La formula non introduce tre parametri indipendenti: fornire uno dei due parametri spettrali consente di calcolare l'altro, poi l'energia.

La dimensione di h ν è J·s moltiplicato per s^{-1}, quindi un'energia. Per una lunghezza d'onda di 600 nm, la conversione preliminare dà $\lambda_0 = 600 \times 10^{-9}$ m. Otteniamo circa 3.31 × 10^{-19} J per fotone. Questo numero piccolissimo descrive un evento individuale; non significa che una sorgente che produce molti fotoni trasporti energia trascurabile.

Il passaggio in un mezzo trasparente cambia la velocità di propagazione e la lunghezza d'onda della luce, ma conserva la frequenza attraverso un'interfaccia ferma. Se l'indice di rifrazione è n, la lunghezza d'onda nel mezzo è $\lambda = \lambda_0/n$. Sostituire λ_0 con questa lunghezza d'onda accorciata in h c_0/λ sarebbe errato: attribuirebbe al fotone un'energia moltiplicata per n senza un meccanismo corrispondente. Il calcolo più sicuro usa h ν, oppure h c_0/λ_0 quando è esplicitamente fornita la lunghezza d'onda nel vuoto.

Un fotone ha massa a riposo nulla ed energia non nulla. Ciò non permette di applicare l'espressione classica m $v^2/2$ con massa nulla per concludere che l'energia sia nulla. Quell'espressione appartiene a un regime fisico diverso. Un ragionamento coerente dipende anche dai domini di validità delle relazioni.

3. L'elettronvolt: un'unità di energia, non una tensione

L'elettronvolt è adatto alle energie dei fenomeni microscopici. Un elettronvolt è esattamente 1.602 176 634 × 10⁻¹⁹ J. Il simbolo eV non va confuso con il volt, unità di differenza di potenziale. Il loro collegamento deriva dall'energia associata allo spostamento di una carica elementare attraverso una differenza di potenziale di un volt. Energia e tensione conservano tuttavia dimensioni diverse.

Per convertire joule in elettronvolt, dividi per il valore in joule di un elettronvolt. Il fotone di 600 nm ha così un'energia di circa 2.07 eV. Viceversa, per convertire un'energia di 3.0 eV in joule, moltiplica per 1.602 × 10⁻¹⁹: il risultato è vicino a 4.81 × 10⁻¹⁹ J. Scrivere il fattore di conversione completo evita di scegliere a caso il verso dell'operazione.

Una scorciatoia pratica, purché si conservino le sue unità, è:

E in eV ≈ 1 240 / lunghezza d'onda nel vuoto in nm.

Il numero 1 240 è un valore arrotondato di h c₀ espresso in eV·nm. Non è una nuova costante indipendente. Per 400 nm, l'energia è circa 3.10 eV; per 800 nm, circa 1.55 eV. Raddoppiare la lunghezza d'onda dimezza l'energia del fotone. Questo confronto offre un controllo immediato di ogni calcolo spettrale.

4. Potenza del fascio e numero di fotoni

La potenza misura l'energia trasferita nell'unità di tempo. In un modello di fascio monocromatico, se ogni fotone porta energia E e il flusso medio di fotoni è Ṅ, allora P = Ṅ E. Possiamo quindi scrivere Ṅ = P/(h ν). Ciò non dice che i fotoni arrivino a intervalli regolari; dà un flusso medio compatibile con la potenza considerata.

Consideriamo una sorgente immaginaria di potenza ottica 2.0 mW a 500 nm nel vuoto. L'energia individuale è vicina a 3.97 × 10⁻¹⁹ J.

Il flusso medio è quindi circa 5.03×10^{15} fotoni al secondo. Un millisecondo rappresenta in media circa 5.03×10^{12} fotoni. Questo illustra il contrasto fra energia microscopica e flusso macroscopico senza chiedere di immaginare ogni evento.

Se una sorgente ha più lunghezze d'onda, dividere la potenza totale per l'energia di un fotone scelto arbitrariamente non è esatto. Distribuisci la potenza secondo lo spettro, calcola i contributi e sommali. A volte si può usare un'approssimazione monocromatica, ma va identificata e controllata rispetto alla precisione richiesta.

Aumentare la potenza a frequenza fissa aumenta il flusso di fotoni in questo modello; non cambia l'energia di ciascun fotone. Aumentare la frequenza aumenta l'energia individuale, ma la potenza totale dipende anche dal numero di fotoni. Colore e potenza non sono quindi modi equivalenti per dire «quantità di luce».

5. Leggere un diagramma dei livelli energetici

Un diagramma rappresenta gli stati energetici consentiti di un sistema. La posizione verticale indica l'energia, spesso in elettronvolt. Le distanze disegnate sono quantitative soltanto se lo è la scala. Per studiare una transizione, calcola la differenza fra energia finale e iniziale anziché cercare subito una formula spettrale.

Consideriamo livelli immaginari di -5 eV e -2 eV. Passare dal primo al secondo aumenta l'energia del sistema di 3 eV. In un modello di assorbimento a singolo fotone, il fotone deve fornire questa differenza. La lunghezza d'onda corrispondente nel vuoto è circa 413 nm. La transizione inversa può produrre un fotone della stessa energia se la transizione considerata è radiativa.

Energie negative dei livelli non rendono negativa l'energia del fotone. Indicano la scelta del riferimento energetico, per esempio l'energia di uno stato non legato in un modello. L'energia trasferita dipende dalla differenza e questa differenza è positiva per il fotone emesso. Spostare tutte le energie dei livelli della stessa costante conserva le transizioni.

La corrispondenza energetica da sola non garantisce una transizione osservabile. Regole di selezione, popolazioni degli stati, interazioni e condizioni di misura contano nei sistemi reali. Un esercizio semplice usa transizioni dichiarate possibili. Interpretare uno spettro reale richiede riferimenti specifici per la specie e il dispositivo studiati.

Uno spettro a righe può identificare transizioni; non è sempre un'etichetta unica indipendente da ogni condizione. Risoluzione dello spettrometro, miscele, allargamento delle righe e livelli effettivamente popolati ne cambiano l'interpretazione. Il metodo scientifico richiede più indizi convergenti, non una sola somiglianza visiva isolata.

6. Il modello energetico dell'effetto fotoelettrico

L'effetto fotoelettrico è l'emissione di elettroni causata dall'interazione di una radiazione con un materiale sotto condizioni appropriate. Nel modello elementare in cui un elettrone riceve l'energia di un fotone, una parte serve a superare la barriera caratterizzata dal lavoro di estrazione Φ. L'energia cinetica massima degli elettroni emessi è allora:

$K_{max} = h\nu - \Phi$, quando $h\nu$ è almeno uguale a Φ.

«Massima» è necessario: non tutti gli elettroni emergono con energia identica. I loro stati e le perdite prima dell'emissione possono differire. L'equazione descrive il limite energetico del

modello, non una legge che assegna la stessa velocità a ogni elettrone rivelato.

Per un materiale immaginario con lavoro di estrazione 2.2 eV e luce di 400 nm, l'energia del fotone è vicina a 3.10 eV. La differenza dà $K_{max} \approx 0.90$ eV, circa 1.44×10^{-19} J. Un'approssimazione non relativistica darebbe $v_{max} = \sqrt{(2 K_{max}/m_e)}$, circa 5.6×10^{5} m·s^{-1}. Questa velocità resta piccola rispetto a c_0, rendendo coerente l'approssimazione in questo esempio.

La frequenza di soglia è $\nu_{threshold} = \Phi/h$. Possiamo anche definire la lunghezza d'onda di soglia nel vuoto $\lambda_{threshold} = h c_0/\Phi$. Per $\Phi = 2.2$ eV, è vicina a 564 nm. Nel regime a singolo fotone, una lunghezza d'onda minore fornisce energia sufficiente; una maggiore no.

A 700 nm, l'energia individuale è soltanto circa 1.77 eV: inferiore al lavoro di estrazione immaginario. Aumentare semplicemente il numero di fotoni non sostituisce l'energia mancante di ciascun fotone in questo modello. Evita di farne un'affermazione universale su tutti i regimi sperimentali: meccanismi multifotonici possono verificarsi a intensità particolari, ma sono fuori dal modello studiato qui.

7. Un esperimento che distingue frequenza e intensità

Per verificare una relazione, varia un parametro controllando gli altri. A frequenza fissa sopra la soglia, aumentare il flusso di fotoni può aumentare gli elettroni emessi nell'unità di tempo, in un regime senza saturazione del materiale o della raccolta. Non cambia direttamente K_{max} nell'equazione elementare. A intensità appropriata, cambiare la frequenza modifica invece il massimo energetico previsto.

Una tensione che si oppone al movimento degli elettroni può stimarne l'energia massima. Il modulo positivo della tensione di arresto, indicato con U_a, soddisfa K_max = e U_a. L'elettrone porta la carica −e; i segni dei potenziali in un diagramma dipendono dal loro orientamento. Usare U_a positivo evita di trasformare una convenzione circuitale in energia cinetica negativa.

Con K_max ≈ 0.90 eV, ci si aspetta un modulo della tensione di arresto di circa 0.90 V nel modello ideale. Questa corrispondenza numerica usa la definizione dell'elettronvolt. Non giustifica il trascurare effetti sperimentali: potenziali di contatto, luce parassita, corrente residua e precisione della lettura vanno considerati in un'analisi reale.

Tracciare K_max in joule in funzione di ν in hertz dà la pendenza teorica h e l'intercetta −Φ. Se l'energia è in eV, la pendenza è espressa in eV·s, non J·s. Riconoscere l'unità della pendenza è essenziale nell'uso di un grafico o nel confronto di due misure.

8. Conversione fotovoltaica e bilanci corretti

Una cella fotovoltaica trasforma una parte dell'energia luminosa ricevuta in energia elettrica utilizzabile. Il suo funzionamento completo richiede un modello del materiale e del trasporto di carica più elaborato del semplice effetto fotoelettrico. Per un bilancio macroscopico si possono tuttavia confrontare potenza incidente e potenza elettrica fornita, purché siano precisate area e condizioni.

Un'area immaginaria di 0.020 m² riceve un'irradianza di 500 W·m⁻². Se è l'irradianza ricevuta dalla superficie sotto le condizioni geometriche dichiarate, la potenza incidente è 10 W. Se la potenza elettrica utile è 1.8 W, il rendimento rispetto all'energia incidente è

18 %. Gli altri 8.2 W si distribuiscono fra riflessione, eventuale trasmissione, riscaldamento e altre perdite a seconda del sistema.

Supponiamo che l'80 % della potenza incidente sia effettivamente assorbito. La potenza assorbita è allora 8 W. La frazione convertita in elettricità rispetto a questa potenza assorbita è 22.5 %. Le percentuali non si contraddicono: i loro denominatori differiscono. Un rendimento presentato senza un confine del sistema o un riferimento energetico può ingannare anche quando l'aritmetica è esatta.

L'illuminamento in lux non si può convertire in potenza in watt mediante una sola costante semplice valida per ogni sorgente. Il lux tiene conto della risposta visiva umana secondo lo spettro. Il watt misura l'energia al secondo. Per confrontare sorgenti occorre sapere se si valuta la percezione visiva, la potenza radiante o il rendimento di conversione.

9. Domande svolte e individuazione degli errori

Esercizio A. Una radiazione ha lunghezza d'onda nel vuoto 620 nm. Calcola l'energia del fotone in joule e in elettronvolt. La soluzione è circa 3.20×10^{-19} J, cioè 2.00 eV. Un valore di 2.00 J confonderebbe il risultato numerico in eV con quello in joule; un valore di 3.20×10^{-28} J indicherebbe probabilmente una conversione dei nanometri dimenticata.

Esercizio B. Un modello di sistema ha livelli −4.0 eV, −2.5 eV e −1.0 eV. Quali energie potrebbero corrispondere alle differenze fra essi? Le differenze positive sono 1.5 eV e 3.0 eV. Due transizioni distinte possono quindi condividere la stessa differenza di 1.5 eV. Questo elenco da solo non stabilisce che ogni transizione sia consentita o osservabile.

Esercizio C. Un materiale immaginario ha $\Phi = 2.5$ eV. Un fotone di 500 nm basta nel modello a singolo fotone? La sua energia è vicina

a 2.48 eV: resta leggermente inferiore alla soglia. Arrotondare troppo presto a 2.5 eV cancellerebbe la distinzione richiesta. La lunghezza d'onda limite è circa 496 nm. L'esercizio ricorda che un'approssimazione adatta a una presentazione generale può diventare insufficiente vicino a una soglia.

Esercizio D. Una sorgente monocromatica fornisce 3.0 mJ a 600 nm. Stima il numero totale di fotoni associato a questa energia. Dividi 3.0×10^{-3} J per 3.31×10^{-19} J, ottenendo circa 9.1×10^{15} fotoni. Il risultato è un numero adimensionale, non una frequenza. Un flusso richiederebbe la durata di emissione.

Esercizio E. A potenza ottica identica, sorgenti a 800 nm e 400 nm producono lo stesso flusso di fotoni? Il fotone di 400 nm porta il doppio dell'energia. Il suo flusso corrispondente è quindi la metà a potenza uguale nell'approssimazione monocromatica. Una risposta basata soltanto sul colore visibile sarebbe insufficiente.

Approfondimento - Decadimento radioattivo, attività ed emivita

La radioattività è la trasformazione spontanea di nuclei instabili, accompagnata dall'emissione di radiazione. L'istante di decadimento di un particolare nucleo non si può prevedere mediante un conto alla rovescia deterministico. Una popolazione grande consente tuttavia un modello statistico di decadimento. Per un radionuclide nel quadro semplice studiato, l'emivita è la durata dopo la quale il numero medio di nuclei progenitori rimasti è dimezzato. Non significa che ogni nucleo scompaia dopo due emivite.

Consideriamo una popolazione iniziale $N0$, senza ingresso di nuovi nuclei progenitori, e una costante di decadimento $\lambda > 0$. Il modello medio soddisfa $dN/dt = -\lambda N$. La soluzione è $N(t) = N0 \exp(-\lambda t)$, per $t \geq 0$. Qui N conta soltanto i nuclei progenitori non ancora

decaduti, non tutti i nuclei del recipiente. I nuclei prodotti possono essere a loro volta radioattivi: l'attività totale di una catena richiede allora altre equazioni. La relazione semplice non è una descrizione universale di tutte le miscele.

L'attività A(t) del radionuclide progenitore è il numero medio di decadimenti nell'unità di tempo: A(t) = λN(t). È espressa in becquerel, con 1 Bq = 1 s^{-1}. Per esprimere A in Bq, λ deve quindi essere in s^{-1}. L'attività non è una dose ricevuta da una persona: tipi di radiazione, esposizione e geometria richiedono ulteriori informazioni. Nessun calcolo di questo approfondimento determina istruzioni di manipolazione, una soglia di sicurezza o una decisione clinica.

La relazione N(t_1/2) = N0/2 dà exp(−λt_1/2) = 1/2. Prendendo i logaritmi, t_1/2 = ln(2)/λ. Possiamo allora scrivere N(t) = N0 × 2^(−t/t_1/2). Dopo due emivite resta N0/4; dopo tre, N0/8. Ogni intervallo rimuove metà di ciò che rimane, non una metà costante di N0. La pendenza della curva diventa quindi meno ripida in valore assoluto, a differenza di un decadimento lineare.

Esercizio originale immaginario. Una popolazione progenitrice è modellizzata da N0 = 2.0 × 10^{12} e da un'emivita di 8.0 h. Calcola λ in unità SI, N dopo 24 h e l'attività iniziale e poi finale del radionuclide progenitore. Soluzione: 8.0 h = 28 800 s, quindi λ ≈ 2.41 × 10^{-5} s^{-1}. Dopo tre emivite, N = 2.5 × 10^{11}. L'attività iniziale è circa 4.81 × 10^{7} Bq; quella dopo 24 h è circa 6.02 × 10^{6} Bq, un ottavo. Questi numeri descrivono soltanto il modello dato; non sono associati a un oggetto da preparare o conservare.

Esercizio di ragionamento. Determina quando la popolazione media scende sotto l'1 % di N0. La condizione 2^(−t/t_1/2) < 0.01 dà t > [ln(100)/ln(2)]t_1/2, circa 6.64 emivite. Per i dati precedenti, la soglia viene superata dopo circa 53.2 h. A sette emivite, la frazione è 1/128, circa 0.781 %. Una frazione piccola non significa

scomparsa completa e non è una soglia di sicurezza. Il modello continuo dà una media: per pochi nuclei rimasti, le fluttuazioni individuali assumono un'importanza che questa curva regolare non rappresenta.

Riferimenti scientifici, consultati per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026: CEA, definizione e decadimento radioattivo, https://www.cea.fr/comprendre/pages/radioactivite/radioactivite.aspx?numero=1&type=chapitre ; documento didattico ospitato da ASNR, sezione 1.2.7, relazioni di decadimento e attività, https://recherche-expertise.asnr.fr/sites/default/files/documents/professionnels_sante/documentation/syllabus_chapitre_1.pdf. Dimostrazioni e due esercizi sono originali LFDP. Non vengono riprodotte procedure sperimentali, valori di dose o informazioni di trattamento.

10. Una sintesi da spiegare senza recitare formule

L'energia del fotone dipende dalla frequenza, mentre la potenza del fascio dipende anche dal numero di fotoni. Un diagramma di livelli energetici consente di calcolare differenze di energia; la possibilità di una transizione non dipende soltanto da quella differenza. L'effetto fotoelettrico elementare richiede di confrontare l'energia individuale con il lavoro di estrazione. Un bilancio fotovoltaico confronta potenze definite allo stesso confine e nelle stesse condizioni.

Per presentare una soluzione, comincia indicando l'energia cercata e la sua unità. Poi precisa il modello: fotone monocromatico, transizione dichiarata, estrazione a singolo fotone o conversione macroscopica. Converti la lunghezza d'onda, conserva le cifre necessarie vicino a una soglia, poi controlla il verso del risultato. Se la lunghezza d'onda diminuisce, l'energia individuale aumenta. Se la potenza aumenta a frequenza fissa, il flusso di fotoni può aumentare. Questi controlli concettuali evitano molti errori di calcolo.

Riferimenti del quadro e costanti

Programma francese di specialità di fisica e chimica dell'ultimo anno, componente energia dei fotoni ed effetto fotoelettrico; discussione ed esercizi precedenti sono una redazione originale, non una riproduzione del programma: https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm

NIST, tabella delle costanti fisiche CODATA 2022, consultata per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026 per h, c_0, e e m_e: https://physics.nist.gov/cuu/Constants/Table/allascii.txt

Capitolo 12 - Costruire, verificare e presentare una soluzione di fisica

Riferimento storico - 2018-2019: definire non significa misurare senza errore

La risoluzione adottata dalla CGPM nel 2018 ha fissato i valori numerici di sette costanti che definiscono il SI riveduto, entrato in vigore il 20 maggio 2019. Il BIPM indica in particolare la costante di Planck, la carica elementare e la costante di Boltzmann. Questo riferimento istituzionale distingue un valore esatto per definizione dalla sua realizzazione sperimentale. Una bilancia, un sensore o un metodo rimane soggetto a incertezza. Nell'esaminare un risultato, occorre quindi chiedersi se l'incertezza riguarda la costante definita, la misura effettuata oppure le approssimazioni del modello: questi tre livelli non si sostituiscono l'uno all'altro.

Riferimento per il fatto storico, consultato per il manoscritto francese l'11 ottobre 2026: BIPM, risoluzione 1 della 26ª CGPM, https://www.bipm.org/en/committees/cg/cgpm/26-2018/resolution-1. Analisi didattica LFDP, senza citazioni testuali né immagini riprodotte.

1. Una domanda di fisica non è una raccolta di dati

Il testo di un problema può contenere una descrizione, un grafico, misure, valori di riferimento e dettagli di contesto. Questi elementi non hanno tutti lo stesso valore. Il primo compito consiste nel riformulare la domanda come una grandezza da trovare o un'affermazione da discutere. «Il risultato è compatibile con il modello?» richiede più del calcolo di un numero. «Quale dispositivo è più efficiente?» richiede di precisare il criterio di efficienza e le condizioni del confronto.

Il lavoro comincia quindi prima della scelta di una formula. Si identificano il sistema, l'intervallo studiato, gli scambi ammessi dal

modello e le grandezze effettivamente disponibili. Una massa e un'altezza possono suggerire un bilancio energetico, ma la presenza dichiarata di attrito impedisce di concludere subito che l'energia meccanica si conserva. Un resistore e un condensatore suggeriscono un'evoluzione RC, ma per determinarne la soluzione occorre conoscere lo stato iniziale e i collegamenti.

Un metodo efficace consiste nello scrivere due frasi: «Cerco…» e «Rappresento con un modello…». La prima evita di risolvere una domanda vicina ma diversa; la seconda rende visibili le ipotesi. In una risposta queste frasi possono essere brevi. La loro funzione non è fornire un preambolo decorativo, bensì stabilire l'impegno assunto dalla soluzione.

I modelli ideali studiati in questa guida non autorizzano a costruire autonomamente dispositivi pericolosi. Un calcolo di forza, tensione, temperatura o energia non costituisce una procedura di sicurezza né una certificazione tecnica. In particolare, le esperienze elettriche, le sorgenti luminose intense e i sistemi in pressione richiedono una supervisione adeguata. Gli esercizi utilizzano situazioni teoriche ben definite.

2. Scegliere una legge giustificandone il campo di validità

Due approcci possono risolvere lo stesso problema con quantità di lavoro diverse. Per trovare la velocità dopo una caduta senza resistenza, il teorema del lavoro e dell'energia cinetica è spesso più rapido dell'integrazione della dinamica nel tempo. Per trovare il tempo di arrivo, la sola energia non basta: occorre una relazione temporale. Per studiare la forza normale durante un moto circolare, proiettare la seconda legge di Newton è più diretto di un semplice bilancio energetico.

La scelta non si riduce dunque a «questa formula compare in questo capitolo». Occorre chiedersi quali incognite la legge colleghi

e quali introduca. Una relazione contenente una forza di contatto sconosciuta può complicare un calcolo di velocità quando, nel modello, il lavoro di quella forza è nullo. Viceversa, eliminare troppo presto la forza di contatto mediante un bilancio energetico impedirebbe di rispondere a una domanda su quella forza.

Si distingue inoltre una legge fondamentale da una relazione costitutiva. La conservazione dell'energia non dipende dall'esistenza di una molla perfettamente lineare. La relazione $F = -k\,x$, invece, presuppone un regime di deformazione e un modello preciso. Allo stesso modo, il bilancio di carica rimane pertinente quando un componente a due terminali non obbedisce alla legge di Ohm; in tal caso occorre sostituire opportunamente la sua relazione corrente-tensione.

Per un'esposizione orale, confrontare due percorsi possibili è spesso istruttivo. Si spiega perché uno fornisca direttamente la grandezza cercata, poi si usa l'altro come controllo indipendente, quando possibile. Una verifica mediante un metodo diverso ha più valore della ripetizione dello stesso calcolo con i numeri disposti in un altro modo.

3. Un caso completo: lancio orizzontale trascurando la resistenza dell'aria

Un oggetto immaginario lascia orizzontalmente una piattaforma, a 5.0 m da un terreno piano, con velocità di 4.0 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. Per semplicità si prende $g = 10\ \mathrm{m\cdot s^{-2}}$ e si trascura l'aria. Il sistema di coordinate ha un asse orizzontale orientato nel verso del moto e un asse verticale rivolto verso l'alto; l'origine è il punto di partenza. La velocità verticale iniziale è nulla.

Le equazioni diventano $x(t) = 4\,t$ e $y(t) = -5\,t^2$. Il terreno corrisponde a $y = -5$ m. Il tempo di arrivo positivo è quindi 1.0 s, e la distanza orizzontale è 4.0 m. La velocità all'arrivo ha componenti

4.0 e −10 m·s⁻¹. Il suo modulo è √116, circa 10.8 m·s⁻¹, non la somma 14 m·s⁻¹. Un vettore e il suo modulo non si calcolano nello stesso modo.

Il bilancio energetico fornisce un controllo: v² = v₀² + 2 g h = 16 + 100 = 116 m²·s⁻². Permette di ritrovare la velocità senza determinare direttamente il tempo di arrivo. L'accordo tra i due approcci conferma i calcoli all'interno del modello, ma non dimostra che la resistenza dell'aria sia trascurabile per ogni oggetto reale. Un foglio di carta e una palla possono comportarsi diversamente pur cadendo dalla stessa altezza.

Il risultato orizzontale varia linearmente con la velocità iniziale e con √h quando g rimane costante: x_arrival = v₀ √(2 h/g). Raddoppiare l'altezza moltiplica la gittata per √2, non per due. Questa dipendenza informa più di un singolo valore. Permette anche di rilevare una formula errata, per esempio una gittata proporzionale a h quando il tempo di caduta dovrebbe dipendere da √h.

4. Un modello concorrente: caduta con resistenza lineare

Per illustrare un altro regime, si sceglie ora un asse verticale rivolto verso il basso e una forza resistente −b v, con b positivo. Si tratta di un modello di resistenza lineare, che non descrive universalmente la resistenza dell'aria. In alcuni regimi sarebbe più appropriata una dipendenza quadratica o più complessa. Il calcolo va presentato come confronto tra modelli, non come correzione valida in ogni situazione.

La dinamica dà m v' = m g − b v. Ponendo τ = m/b e v_lim = m g/b, con v(0) = 0, si ottiene v(t) = v_lim (1 − e^(−t/τ)). La velocità aumenta, ma tende a un valore limite. L'accelerazione è g e^(−t/τ), positiva e decrescente. All'inizio, quando t è piccolo

rispetto a τ, l'approssimazione dell'esponenziale dà v ≈ g t, come nella caduta senza resistenza.

La posizione misurata a partire dall'inizio è z(t) = v_lim [t − τ (1 − e^(−t/τ))]. La sua derivata restituisce v(t), e z(0) = 0. Per tempi brevi, lo sviluppo al primo ordine della velocità seguito dall'integrazione dà z ≈ g t²/2. Verificare le condizioni iniziali e il regime limite è essenziale quando un'espressione esponenziale contiene diversi segni.

Si prendono τ = 2.0 s e g = 10 m·s⁻². La velocità limite del caso immaginario è 20 m·s⁻¹. A t = 2.0 s la velocità è circa 12.6 m·s⁻¹, contro 20 m·s⁻¹ in assenza di resistenza. La distanza percorsa è circa 14.7 m, contro 20 m nel modello senza resistenza. La resistenza modifica quindi sia la velocità sia la relazione tra tempo e distanza.

Una sola misura può non bastare per scegliere tra i modelli. Si cercano più valori nel tempo, si confrontano gli scarti con la precisione sperimentale e si esamina la struttura dei residui. Una curva che si appiattisce suggerisce una resistenza, ma potrebbe anche derivare dalla saturazione dello strumento. L'interpretazione fisica deve accompagnarsi all'esame del dispositivo di misura.

5. Passare da un grafico a un parametro

Un grafico rappresenta dati con una scala, un'unità e talvolta una trasformazione. La pendenza di y in funzione di x ha l'unità di y divisa per quella di x. Rappresentare una velocità in m·s⁻¹ in funzione del tempo in secondi dà una pendenza di accelerazione in m·s⁻². Se l'asse orizzontale è in millisecondi, la pendenza letta direttamente va convertita prima del confronto con un valore in unità SI.

Per una scarica RC ideale, u(t) = u₀ e^(−t/τ). Quando le tensioni rimangono positive nei dati utilizzati, si scrive ln[u(t)/u₀] = −t/τ. Il

rapporto all'interno del logaritmo è adimensionale. Il grafico di questo logaritmo in funzione del tempo è una retta di pendenza $-1/\tau$. Usare ln u senza precisare una tensione di riferimento nasconde questo requisito dimensionale, anche se alcune pratiche numeriche lasciano implicito il riferimento.

Si suppone u(0) = 6.0 V e u(2.0 s) = 3.0 V. Il modello dà $\tau = 2/\ln 2$, circa 2.89 s. Prevede quindi u(4.0 s) = 1.5 V. Questo terzo valore costituisce una previsione verificabile, purché non sia già stato utilizzato per determinare τ. Se la misura dà 1.9 V con una piccola incertezza, non basta arrotondare con maggiore larghezza per salvare il modello: occorre esaminare le ipotesi o i dati.

L'adattamento può lasciare libera l'intercetta per tenere conto di uno scarto nel tempo di attivazione. Non si forza la retta a passare per l'origine solo perché una formula ideale lo suggerisce, senza verificare che l'origine dei tempi e la tensione di riferimento corrispondano effettivamente alla procedura. Un'ipotesi imposta durante l'elaborazione può creare una conferma apparente.

6. Incertezze, dispersione e compatibilità

Un valore misurato non è una conoscenza esatta di una grandezza. Misure ripetute possono descrivere la dispersione; anche risoluzione dello strumento, taratura, condizioni e metodo contribuiscono all'incertezza. Una serie molto concentrata non esclude un errore sistematico comune. Dieci letture con un righello la cui origine è spostata possono essere riproducibili e tuttavia sistematicamente troppo grandi.

Si possono confrontare due risultati x_1 e x_2 con incertezze tipo u_1 e u_2. Se i contributi sono indipendenti, l'incertezza tipo della loro differenza è $\sqrt{(u_1^2 + u_2^2)}$. Il rapporto $|x_1 - x_2|/\sqrt{(u_1^2 + u_2^2)}$ quantifica allora lo scarto rispetto a questa scala. Aiuta a discutere la compatibilità nelle ipotesi scelte. Non sostituisce l'analisi degli

errori sistematici né una regola decisionale dichiarata in precedenza.

Si prendono 2.00 s con $u_1 = 0.03$ s e 2.08 s con $u_2 = 0.04$ s. La differenza è 0.08 s e la sua incertezza tipo è 0.05 s; il rapporto è 1.6. Possiamo affermare che lo scarto è 1.6 volte questa incertezza combinata. Questo solo numero non permette di stabilire una probabilità esatta che il modello sia vero. La conclusione dipende in particolare dal significato delle incertezze e dal quadro statistico adottato.

La correlazione modifica il calcolo. Se entrambi i risultati utilizzano lo stesso strumento e la stessa taratura, una parte del loro errore può essere comune. Questo contributo può annullarsi in una differenza o sommarsi in una somma. La composizione in quadratura per contributi indipendenti non è quindi una formula da applicare automaticamente a ogni situazione. In un esercizio si seguono le ipotesi date; in uno studio reale ci si chiede da dove provengano le incertezze.

7. Verificare le dimensioni e il comportamento limite

Un'equazione può sommare soltanto grandezze della stessa dimensione. In $m\,g\,h + m\,v^2/2$, entrambi i termini sono energie. In una proposta $m\,g + m\,v^2/2$ si sommerebbe una forza a un'energia: l'errore è rilevabile senza valori numerici. Il controllo dimensionale non dimostra una formula, perché espressioni diverse possono avere la stessa dimensione; elimina comunque molte possibilità errate.

Gli argomenti di un'esponenziale, di un logaritmo o di una funzione trigonometrica devono essere adimensionali nei modelli usuali. In $e^{(-t/\tau)}$, il rapporto tra due tempi soddisfa questa condizione. In $\cos(2\pi\,f\,t)$, anche il prodotto tra frequenza e tempo è

adimensionale. Scrivere e^(−t) è completo solo se è stata esplicitata una scala temporale o una convenzione sulle unità.

I limiti forniscono un secondo filtro. Se la resistenza al flusso aumenta, la portata non dovrebbe aumentare in un modello a differenza di pressione fissata. Se il tempo di carica RC tende a zero, la tensione deve ritornare al suo valore iniziale. Se la distanza di osservazione aumenta per una sorgente isotropa ideale, l'intensità ricevuta deve diminuire. Questi semplici argomenti si fondano su condizioni mantenute costanti; altrimenti il confronto perde significato.

La verifica deve anche esaminare i valori estremi che rendono il modello inapplicabile. In una relazione che presuppone piccoli angoli, scegliere un angolo vicino a π/2 non è una verifica fisica pertinente dell'approssimazione. Si controlla prima che il limite esplorato appartenga ancora al campo dichiarato. Il fallimento al di fuori di esso informa sulla portata del modello, non necessariamente sulla sua accuratezza all'interno di quel campo.

8. Studiare documenti mantenendo visibili le prove

Una sintesi documentale deve distinguere ciò che una fonte afferma da ciò che ne deduciamo. Una tabella di rendimenti misurati in condizioni particolari non garantisce lo stesso rendimento in ogni clima. Un valore nominale non è un minimo garantito. Un estratto storico può spiegare l'evoluzione di un concetto senza fornire i dati necessari per un calcolo attuale.

Per confrontare due documenti si esaminano date, sistemi, unità, confini del bilancio e incertezze. Numeri diversi possono essere compatibili se non misurano esattamente la stessa grandezza. Viceversa, numeri uguali possono non avere alcun rapporto se riguardano condizioni diverse. La prima domanda è quindi «che cosa si misura?», prima di «quale valore è maggiore?».

Un'argomentazione solida contiene un'affermazione, una prova e un limite. Per esempio: «Nel modello isotropo senza assorbimento, raddoppiare la distanza divide l'intensità per quattro, perché si distribuisce su un'area proporzionale al quadrato della distanza. Questa previsione non descrive automaticamente un ambiente riflettente». Un limite preciso rafforza l'argomentazione; non la annulla.

Per un'esposizione orale si preparano una figura semplice, un'equazione centrale e un esempio numerico che si sappia riprodurre. Si prepara anche una domanda critica: perché trascurare quell'interazione, scegliere quel riferimento o mantenere quella scala? Una risposta spiegata mostra una comprensione più profonda di un lungo calcolo recitato senza riuscire a giustificarlo.

9. Esercizi di sintesi svolti

Esercizio A. Una massa immaginaria di 0.40 kg scende senza attrito per un'altezza di 1.8 m, poi comprime una molla orizzontale di costante elastica 160 $N \cdot m^{-1}$. Con $g = 10\ m \cdot s^{-2}$, l'energia disponibile è 7.2 J. Alla massima compressione la velocità è nulla e $k\,x^2/2 = 7.2$, da cui $x = 0.30$ m. Si presuppone che l'altezza non cambi più durante la compressione e che tutta l'energia considerata diventi energia elastica.

Se prima della compressione vengono dissipati 1.8 J, l'energia elastica massima è soltanto 5.4 J. Si trova $x = \sqrt{(10.8/160)}$, circa 0.260 m. La compressione non diminuisce nella stessa proporzione dell'energia, perché compare al quadrato. Questo spiega perché un controllo proporzionale troppo intuitivo potrebbe essere errato.

Esercizio B. Un sensore riceve due sorgenti sonore indipendenti, ciascuna di intensità $4.0 \times 10^{-6}\ W \cdot m^{-2}$. Con $I_0 = 10^{-12}\ W \cdot m^{-2}$, ciascun livello è circa 66.0 dB. L'intensità totale è $8.0 \times 10^{-6}\ W \cdot m^{-2}$

e il livello è circa 69.0 dB. Sommare i livelli per ottenere 132 dB sarebbe falso. In questa ipotesi si sommano le intensità; i livelli logaritmici si calcolano dopo.

Esercizio C. Un fascio di 450 nm trasporta una potenza di 1.0 mW. Un dispositivo converte soltanto il 20 % dei fotoni ricevuti in un segnale utile, in un modello nel quale ciascun fotone dà un evento. L'energia individuale è circa 4.41×10^{-19} J, il tasso incidente 2.27×10^{15} s^{-1} e il tasso utile 4.53×10^{14} s^{-1}. L'efficienza di conteggio non è automaticamente il rendimento energetico del dispositivo: occorrerebbe conoscere l'energia del segnale prodotto e le perdite associate.

Esercizio D. Due modelli prevedono una tensione iniziale di 8 V: il primo u = 8 e^(−t/2), il secondo u = 8 − 2 t. A t = 0.5 s danno circa 6.23 V e 7.0 V. A t = 4 s il secondo dà zero e diventa poi negativo, in contraddizione con un modello di scarica passiva la cui tensione rimane positiva. Un'approssimazione lineare può essere locale; prolungarla indefinitamente produce una previsione falsa.

10. Un metodo di ripasso che ricostruisce il ragionamento

Dopo un esercizio, si classificano gli errori in base alla loro origine: comprensione della domanda, sistema e ipotesi, scelta della legge, proiezione o segno, algebra, conversione, calcolo, interpretazione. Questa classificazione aiuta a scegliere un'azione precisa. Ripetere dieci applicazioni numeriche non corregge una confusione tra accelerazione e velocità; occorre allora studiare grafici e definizioni.

Si ripassa alternando esercizi simili e situazioni nuove. I primi consolidano una tecnica; le seconde verificano che si riconosca quando applicarla. Spiegare un controesempio è particolarmente utile: perché l'energia meccanica non si conserva in questo sistema, perché questa legge di flusso è inappropriata, perché un

logaritmo non può prendere questa grandezza senza un riferimento?

Una soluzione finale deve essere comprensibile senza dover indovinare una convenzione nascosta. Definisce i simboli, dichiara le ipotesi, collega le relazioni e conclude nell'unità richiesta. Non promette più di quanto i dati consentano. Questo requisito unifica la guida: il calcolo è uno strumento potente quando è accompagnato dalla comprensione del sistema, del modello e delle prove.

Riferimenti del quadro didattico

Programma francese della specialità fisica e chimica per l'ultimo anno di liceo, quadro delle competenze sperimentali, di modellizzazione e di comunicazione; casi ed esercizi originali LFDP: https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm

Brochure del Sistema internazionale di unità, BIPM, per le dimensioni e le convenzioni sulle unità: https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/

Appendici - Problemi trasversali e risposte ragionate

A. Misurare g con un modello di pendolo: un approfondimento metodologico

In un approfondimento basato sul modello del pendolo semplice per piccole oscillazioni, il periodo è $T = 2\pi\sqrt{(L/g)}$. Si suppone che il filo abbia massa trascurabile, si tratta la massa in moto come puntiforme, si trascura l'attrito e l'ampiezza è sufficientemente piccola. Questo modello non è una definizione universale di ogni pendolo. Un oggetto esteso o un'ampiezza grande possono richiedere un'espressione diversa.

Una misura immaginaria dà $L = 0.640$ m e $T = 1.60$ s. Isolando la grandezza cercata si ottiene $g = 4\pi^2L/T^2$, ossia circa 9.87 $m \cdot s^{-2}$. L'analisi dimensionale dà m/s^2, come previsto. Raddoppiare T mantenendo L fisso dividerebbe per quattro il valore di g calcolato; questo esprime come la stima dipenda dalla misura, non un modo di modificare la gravità cambiando la misura.

Per una prima approssimazione dell'incertezza con contributi indipendenti, si prendono $u(L) = 0.005$ m e $u(T) = 0.02$ s. L'incertezza relativa combinata è $\sqrt{[(u(L)/L)^2 + (2u(T)/T)^2]}$, circa 0.0262. Si ottiene $u(g) \approx 0.26$ $m \cdot s^{-2}$. Il fattore due che moltiplica l'incertezza relativa di T deriva dalla potenza T^{-2}. Dimenticarlo significherebbe sottostimare questo contributo.

Confrontare il risultato con un valore di riferimento di 9.81 $m \cdot s^{-2}$ non richiede di dichiararli uguali. La differenza è circa 0.06 $m \cdot s^{-2}$, piccola rispetto all'incertezza tipo dichiarata nell'esempio. Questa compatibilità non dimostra l'assenza di errori sistematici. I controlli riguarderebbero la definizione di L, il cronometraggio di più periodi,

l'ampiezza e le condizioni di oscillazione. Migliorare significa agire su una causa identificata, invece di aggiungere cifre decimali.

B. Determinare la densità mediante una pesata apparente

Un solido immaginario di massa 0.240 kg è completamente immerso in un liquido di densità 1 000 kg·m^{-3}. Un dispositivo misura una forza verticale di trazione di 1.60 N quando il solido è fermo e non tocca il recipiente. Con g = 10 m·s^{-2}, il suo peso è 2.40 N. L'equilibrio richiede che la forza di trazione più la spinta idrostatica uguaglino il peso: la spinta è quindi 0.80 N.

La relazione di Archimede dà il volume immerso V = 0.80/(1 000 × 10) = 8.0 × 10^{-5} m^3, ossia 80 cm^3. Poiché il solido è completamente immerso, nel modello questo valore è il suo volume. La sua densità è 0.240/(8.0 × 10^{-5}) = 3 000 kg·m^{-3}. Il risultato è maggiore della densità del liquido, coerentemente con la necessità di una forza di trazione per mantenerlo in posizione.

Se l'oggetto fosse parzialmente immerso, lo stesso calcolo darebbe soltanto il volume della sua parte immersa. Se una bolla aderisse all'oggetto, se il filo esercitasse una forza aggiuntiva o se il solido toccasse il fondo, il bilancio delle forze cambierebbe. La formula utilizzata non sarebbe sbagliata; le grandezze che vi entrano non corrisponderebbero più al modello dichiarato.

Questo esercizio distingue tre operazioni: una legge di equilibrio dà una forza, una relazione sulla spinta idrostatica dà un volume e una definizione dà una densità. Mescolare questi passaggi può nascondere un'ipotesi. Scriverli separatamente permette di verificarli uno per uno e di spiegare oralmente il risultato.

C. Una specifica elettrica non basta per determinare un'energia

Un dispositivo immaginario fornisce una tensione costante di 4.0 V con una corrente di 0.50 A per tre minuti. La potenza elettrica è 2.0 W e l'energia trasferita è 360 J, poiché tre minuti corrispondono a 180 secondi. La carica trasferita è 90 C. La relazione energia = tensione × carica dà nuovamente 360 J in queste condizioni di tensione costante.

Si suppone ora che la tensione rimanga costante, ma che la corrente diminuisca secondo i(t) = 0.50 e^(−t/60), con t in secondi. L'energia negli stessi 180 secondi è l'integrale di 4 i(t), ossia 120(1 − e⁻³) J, circa 114 J. Moltiplicare la potenza iniziale per la durata darebbe 360 J e sovrastimerebbe fortemente il trasferimento. La potenza iniziale non è la potenza media.

La potenza media in questa durata è circa 0.633 W. Questa media non implica che il dispositivo abbia effettivamente fornito quella potenza in ogni istante. Produce lo stesso bilancio energetico complessivo nell'intervallo studiato. L'integrale descrive l'accumulazione; la funzione descrive l'evoluzione locale.

Prima di utilizzare specifiche commerciali di batterie o caricabatterie, si distinguerebbero potenza, energia, tensione nominale, capacità di carica e condizioni di funzionamento. L'esercizio non stabilisce alcuna autonomia di un dispositivo reale. Insegna a chiedere le informazioni necessarie invece di trasformare un valore isolato in una promessa d'uso.

D. Un problema inverso può ammettere più spiegazioni

L'intensità sonora diminuisce quando il ricevitore si allontana. Questa osservazione può essere compatibile con la distribuzione geometrica su superfici sempre più grandi, con l'assorbimento del mezzo, con l'orientamento della sorgente oppure con una combinazione di questi effetti. Conoscere due valori non basta sempre per identificare separatamente i contributi.

Nel modello isotropo senza assorbimento, $I(r) = P/(4\pi r^2)$. Se l'intensità a due metri è 2.0×10^{-6} W·m^{-2}, la previsione a quattro metri è 5.0×10^{-7} W·m^{-2}. Una misura di questo valore è compatibile con il modello, ma anche un modello più complicato potrebbe riprodurlo con determinati parametri. La compatibilità non rende unica la spiegazione.

Per distinguere i modelli si utilizzano più distanze di osservazione, si mantengono invariate le altre condizioni, si esaminano le direzioni e si valutano le incertezze. Si cerca una previsione diversa tra le ipotesi. Una nuova osservazione utile non è soltanto una ripetizione nello stesso luogo: può essere scelta per distinguere i meccanismi proposti.

Questo ragionamento si applica anche a una curva di raffreddamento, a una traiettoria o a uno spettro. Un adattamento riuscito mostra che il modello riproduce determinati dati con determinati parametri. Una verifica più esigente controlla dati non utilizzati per scegliere quei parametri. La distinzione evita di chiamare validazione un semplice adattamento alle osservazioni già impiegate.

E. Confrontare due stime di energia luminosa

Un fascio monocromatico immaginario di 500 nm fornisce 0.50 mJ. Un metodo utilizza la potenza media nota nella durata considerata; un secondo conta un numero stimato di fotoni. L'energia del fotone è circa 3.97×10^{-19} J. Il numero associato a 0.50 mJ è quindi circa 1.26×10^{15}.

Se il conteggio corretto per le perdite dà 1.20×10^{15} fotoni, la sua stima di energia è circa 0.477 mJ. I valori non sono identici. Prima di concludere che si contraddicano, si esaminerebbero le incertezze del conteggio e della misura di potenza, il carattere monocromatico della sorgente e la definizione della durata. Il solo calcolo non ne stabilisce la compatibilità se le incertezze non vengono fornite.

Una correzione di rilevazione deve essere legata a un'efficienza nota nelle condizioni considerate. Dividere arbitrariamente il numero misurato per una percentuale scelta per ottenere l'energia desiderata sarebbe un ragionamento circolare. Occorre saper spiegare come sia stata determinata l'efficienza e se dipenda dalla lunghezza d'onda o dal flusso.

L'esercizio collega un'energia macroscopica a una descrizione microscopica. Non confonde numero di fotoni, potenza ed energia individuale. La stessa energia totale può distribuirsi tra un maggior numero di fotoni meno energetici oppure tra un minor numero di fotoni più energetici; lo spettro determina questa distribuzione.

F. Leggere una critica e migliorare una risposta

Risposta iniziale: «La velocità è costante perché la risultante è nulla». Questa frase è corretta se si riferisce al vettore velocità in un sistema di riferimento inerziale e se le condizioni del modello sono soddisfatte. Se il contesto non precisa il riferimento, la giustificazione è incompleta. Se si riferisce soltanto al modulo della velocità, può essere usata impropriamente per un moto circolare, nel quale la risultante non è nulla nonostante il modulo costante.

Risposta migliorata: «Nel riferimento inerziale scelto, la risultante delle forze è nulla; la seconda legge di Newton dà quindi un'accelerazione nulla e un vettore velocità costante». È leggermente più lunga, ma ogni precisazione ha una funzione. Aggiungere dopo tutte le formule del capitolo non produrrebbe necessariamente una risposta migliore.

Risposta iniziale: «Il rendimento è 80%, quindi il 20% dell'energia scompare». La seconda parte è scorretta. L'energia non utile secondo il criterio scelto può essere trasferita in altre forme o ad altri sistemi. Una formulazione corretta precisa l'energia in ingresso, l'energia utile e il confine del bilancio. L'errore non è aritmetico: deriva dall'interpretazione della conservazione.

Risposta iniziale: «I risultati sono vicini, quindi il modello è vero». La vicinanza va confrontata con un'incertezza e un criterio decisionale. Anche una buona compatibilità non trasforma un modello in una descrizione esaustiva. Una conclusione difendibile potrebbe essere: «I dati forniti non mostrano scarti significativi secondo il criterio e le incertezze dichiarati». Questa precisazione è un requisito delle prove, non una mancanza di fiducia.

G. Preparare un'esposizione orale con una domanda che apra la discussione

Si sceglie un problema abbastanza delimitato da poterlo spiegare senza nasconderne le ipotesi. Una domanda come «Perché compare una velocità limite in un modello di caduta con attrito?» permette di presentare un sistema, una forza, un'equazione differenziale, una soluzione e un confronto con il caso senza attrito. Apre anche una discussione sulla scelta di un attrito lineare o quadratico.

Si prepara un disegno nel quale siano identificabili le forze e gli assi, seguito da un'equazione centrale in cui ogni termine abbia un significato. Un'illustrazione numerica deve essere descritta come immaginaria se lo è. Un grafico deve avere assi e unità. L'esposizione non deve suggerire che una simulazione del modello sia una misura sperimentale.

Si prevedono tre domande: quale fenomeno è stato trascurato, quale osservazione potrebbe contraddire il modello e quale conclusione rimane valida se cambia un parametro? Queste domande aiutano a distinguere la struttura del ragionamento dal suo esempio numerico. Permettono di dimostrare una comprensione trasferibile, anziché una recitazione.

H. Valutare la propria comprensione senza attribuirsi un voto automatico

Per un capitolo, si prova a definire un concetto, giustificare una relazione, rifare un calcolo e proporre un caso nel quale la relazione non si applichi più. Se uno di questi compiti non riesce, si identifica ciò che manca: vocabolario, rappresentazione, manipolazione oppure comprensione delle ipotesi. Questa analisi determina un'attività di ripasso mirata.

Una sensazione di familiarità durante la lettura non è una prova di padronanza. Rileggere una risposta svolta può sembrare facile perché i passaggi sono già stati scelti. Risolvere un nuovo problema, spiegare un segno o criticare una risposta scorretta fornisce prove più esigenti. Lo sforzo richiesto non va confuso con la lunghezza della risposta scritta.

La guida offre strumenti di studio e risposte svolte, ma leggerla non garantisce alcun voto d'esame. Per valutare i propri progressi, si spiega un metodo senza copiarlo, si verifica un risultato per un altro percorso e si identificano i limiti del modello. Una spiegazione chiara, un calcolo esatto e ipotesi pertinenti si completano senza sostituirsi l'uno all'altro.