Ultimo aggiornamento: November 1, 2026

🗺️ Percorso di quattro anni · Anno 2, Autunno · 🧱 Calcolatore integrato

Informazioni sul corso

Questo corso gratuito ha 10 unità e 6 laboratori. Sono i totali reali, non un programma più lungo accorciato.

Un controllo è un numero o un risultato di codice in una pagina del corso che uno script ricalcola prima della pubblicazione. Il numero stampato e quello ricalcolato devono coincidere.

> Questo è lo schema di un corso gratuito di autoapprendimento scritto da Saving Planets. Non è un corso universitario, non dà crediti accademici e nessuna scuola è coinvolta.
>
> Il programma segue il secondo semestre di fisica universitaria con il calcolo (elettricità e magnetismo, con un primo sguardo all'ottica). Si ispira ai temi e alla profondità di MIT OpenCourseWare 8.02, Ph1b e Ph1c di Caltech, Georgia Tech PHYS 2212 e del libro gratuito OpenStax University Physics Volume 2, a cui rimandiamo ovunque. Nessuno di questi autori o istituti approva questa pagina.
>
> Cosa aggiungiamo: ogni unità è collegata a un lavoro reale sull'energia pulita o sull'osservazione della Terra con una fonte pubblica citata (generatori, pannelli solari, auto elettriche, rete elettrica, campo magnetico terrestre, meteo spaziale, sensori satellitari), ogni numero della pagina viene ricalcolato da uno script di verifica prima della pubblicazione e ogni laboratorio ha una versione PhET gratuita e una versione casalinga sicura a bassa tensione.
>
> Seguilo in ordine. Ogni unità ha obiettivi, idee chiave, equazioni, esempi passo per passo, esercizi con soluzioni complete, errori comuni, flashcard e un quiz. I tuoi progressi sono salvati solo in questo browser.

Come questo corso aiuta a salvare il pianeta

Quasi tutta l'elettricità pulita è elettromagnetismo all'opera. Le turbine eoliche e idroelettriche fanno girare generatori basati sulla legge di Faraday, i pannelli solari spingono le cariche con campi elettrici interni, le auto elettriche trasformano la corrente in moto con forze magnetiche e la rete usa trasformatori e alta tensione per trasportare energia con poche perdite.

Le onde elettromagnetiche sono anche il modo in cui osserviamo il pianeta: satelliti come Landsat 9 e GOES-19 leggono luce visibile, infrarossa e a microonde per mappare colture, foreste, acque e tempeste. E il campo magnetico terrestre ci protegge, mentre il meteo spaziale proveniente dal

Sole può indurre correnti nelle linee elettriche. Ogni unità termina con una breve sezione con fonti. I valori che non provengono da una fonte sono indicati come valori di esempio.

Per gli insegnanti

Puoi insegnare questo corso, oppure lasciare che uno studente lo faccia da solo. È gratis. Saving Planets non dà un voto né crediti scolastici.

- Questa pagina è l'intero corso: 10 unità e 6 laboratori (PHYS 210 + PHYS 210L).
- Prevedi 15 settimane, circa 6–9 ore a settimana, comprese le settimane di laboratorio.
- Segui il calendario di 15 settimane. Leggi l'unità, fai la pratica su carta, poi apri la risposta. Nella settimana di laboratorio, fai il laboratorio o la versione a casa.
- Un controllo è un numero o un risultato di codice nella pagina che uno script ricalcola prima della pubblicazione. Il numero che vedi e quello ricalcolato devono coincidere.
- Usa Stampa questa pagina, oppure scarica la guida di studio PDF. Il formulario è verso la fine.
- Chiedi: in che modo questa unità aiuta le persone e il pianeta? Ogni unità ha un riquadro verde con un fatto e la sua fonte.
- Copia il modello di guida per insegnanti e scrivi il nome della classe, il tempo che hai e le domande che farai. Apri il modello di guida per insegnanti

Prima di iniziare

Prerequisiti

- Fisica I: forze, energia, quantità di moto, moto circolare e oscillazioni.
- Analisi I e II: derivate, integrali, crescita e decadimento esponenziali.
- Vettori: componenti, prodotto scalare e vettoriale (spiegati brevemente quando servono).
- Analisi III aiuta con le leggi di Gauss e di Ampère in forma integrale, ma non è richiesta.

Come studiare

- Disegna prima il campo o il circuito. La maggior parte degli errori di E&M sono errori di segno o di verso.
- Risolvi prima con i simboli, poi inserisci i numeri in unità SI e controlla le unità del risultato.
- Usa la simmetria: prima di applicare la legge di Gauss o di Ampère, chiediti in che direzione deve puntare il campo e da cosa può dipendere.
- Svolgi ogni esercizio su carta prima di aprire la risposta.
- Prevedi, poi verifica nella simulazione PhET. Una previsione sbagliata che correggi si ricorda meglio di un'ipotesi azzeccata.
- Rifai i quiz qualche giorno dopo. La pratica distribuita batte una lunga sessione unica.

Che cosa ti serve

- Un computer o un tablet per le simulazioni PhET gratuite (funzionano nel browser).
- Un multimetro digitale e alcune pile AA con portapile (solo bassa tensione).
- Un piccolo assortimento di resistori (da 100 Ω a 10 kΩ), un condensatore elettrolitico da 100 µF o più con tensione nominale superiore a quella delle pile, cavetti o una breadboard.
- Uno smartphone con un'app magnetometro (quasi tutti i telefoni hanno il sensore), una piccola bussola e qualche calamita da frigorifero.
- Una scatola trasparente di vetro o plastica piena d'acqua, un puntatore laser di classe 2 o inferiore o un fascio stretto di torcia, un goniometro.
- Un foglio di calcolo per grafici e fit.

Programma suggerito di 15 settimane

Circa 6-9 ore a settimana: lettura, esercizi e, nelle settimane di laboratorio, il laboratorio.

Settimana	Unità	Argomenti	Lettura
1	Carica, legge di Coulomb e campi elettrici	Carica, legge di Coulomb, sovrapposizione	OpenStax UP2 5.1–5.3
2	Carica, legge di Coulomb e campi elettrici	Campi elettrici, cariche continue, linee di campo; Laboratorio A	UP2 5.4–5.6
3	Legge di Gauss	Flusso e legge di Gauss; conduttori	UP2 6.1–6.4
4	Potenziale elettrico e capacità	Energia potenziale, potenziale, equipotenziali	UP2 7.1–7.5
5	Potenziale elettrico e capacità	Capacità, energia, dielettrici; Laboratorio B	UP2 8.1–8.4
6	Corrente, resistenza e circuiti in corrente continua	Corrente, resistenza, potenza	UP2 9.1–9.5
7	Corrente, resistenza e circuiti in corrente continua	Circuiti in continua, leggi di Kirchhoff, circuiti RC; Laboratorio C	UP2 10.1–10.5
8	Campi e forze magnetiche	Forza magnetica, orbite di particelle, motori; esercitazione per l'esame intermedio	UP2 11.1–11.5
9	Sorgenti di campi magnetici: Biot–Savart e Ampère	Biot–Savart, legge di Ampère, solenoidi; Laboratorio D	UP2 12.1–12.7
10	Induzione elettromagnetica: Faraday e Lenz	Leggi di Faraday e di Lenz, generatori; Laboratorio E	UP2 13.1–13.7

Settimana	Unità	Argomenti	Lettura
11	Induttanza, circuiti RL e LC	Induttanza, circuiti RL e LC	UP2 14.1–14.6
12	Circuiti in corrente alternata, trasformatori e rete elettrica	Circuiti in alternata, risonanza, potenza, trasformatori	UP2 15.1–15.6
13	Equazioni di Maxwell, onde elettromagnetiche e ottica	Equazioni di Maxwell, onde EM, energia e spettro	UP2 16.1–16.5
14	Equazioni di Maxwell, onde elettromagnetiche e ottica	Ottica: riflessione, rifrazione, polarizzazione, lenti; Laboratorio F	UP3 1.1–1.7, 2.4
15	Ripasso	Ripasso ed esercitazione finale	Tutte le unità

I tuoi progressi

Spunta unità e laboratori man mano che li finisci, e fai i quiz. Progressi e punteggi sono salvati solo in questo browser e non ci vengono mai inviati.

Unità

Carica, legge di Coulomb e campi elettrici

Carica elettrica, conduttori e isolanti, legge di Coulomb, campo elettrico di cariche puntiformi e distribuzioni continue, linee di campo e cariche in moto nei campi.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Usare la legge di Coulomb con vettori e sovrapposizione.
- Trovare il campo elettrico di cariche puntiformi e di semplici distribuzioni di carica.
- Disegnare le linee di campo e interpretarle.
- Trovare la forza e l'accelerazione di una carica in un campo.

Concetti chiave

- La carica ha due segni, si conserva ed è quantizzata in unità di e = 1.602 × 10^{-19} C.
- Legge di Coulomb: F = k|q_1q_2|/r^2, lungo la retta che unisce le cariche; cariche dello stesso segno si respingono.
- Il campo elettrico E = F/q è la forza per unità di carica. Una carica puntiforme genera E = kq/r^2, diretto in verso uscente dalla carica positiva.
- I campi si sommano come vettori (sovrapposizione). Per una carica continua si somma dE = k dq/r^2 con un integrale.
- Una carica in un campo subisce F = qE, quindi un elettrone accelera in verso opposto a E.

Equazioni chiave

$$F = k\frac{|q_1 q_2|}{r^2}, \quad k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$$

F=k(|q_1q_2|)/(r^2), k=14π_0

Legge di Coulomb

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad E = \frac{k|q|}{r^2}$$

E=(F)/(q), E=(k|q|)/(r^2)

Campo elettrico di una carica puntiforme

$$\vec{E} = \int \frac{k\,dq}{r^2}\hat{r}$$

E=(k dq)/(r^2) r

Carica continua

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

F=q E

Forza su una carica

Esempi svolti passo passo

Esempio 1.1 Cariche di +3.0 μC e −5.0 μC distano 0.20 m. Trova la forza tra loro.

1. $F = k|q_1 q_2|/r^2 = 8.988 \times 10^9 \times (3.0 \times 10^{-6})(5.0 \times 10^{-6})/0.20^2$.
2. Segni opposti si attraggono.

Risposta: 3.37 N, attrattiva.

Esempio 1.2 Trova il campo a 0.30 m da una carica puntiforme di 2.0 nC.

1. $E = kq/r^2 = 8.988 \times 10^9 \times 2.0 \times 10^{-9}/0.09$.

Risposta: ≈ 200 N/C, diretto in verso uscente dalla carica.

Esempio 1.3 Cariche di +4.0 nC e −4.0 nC distano 0.10 m. Trova il campo nel punto medio.

1. Ogni carica dista 0.05 m e dà $E = kq/r^2 = 14380$ N/C.
2. Entrambi i campi puntano verso la carica negativa, quindi si sommano.

Risposta: 28760 N/C (2.88×10^4 N/C) verso la carica negativa.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Trova la forza elettrica tra protone ed elettrone nell'idrogeno ($r = 5.29 \times 10^{-11}$ m).

   $F = ke^2/r^2 \approx 8.24 \times 10^{-8}$ N.

2. Quante volte la repulsione elettrica tra due protoni è più forte della loro attrazione gravitazionale?

   $ke^2/(Gm_p^2) \approx 1.23 \times 10^{36}$, indipendente dalla distanza.

3. Un elettrone si trova in un campo di 200 N/C. Trova la forza e l'accelerazione.

   $F = eE = 3.20 \times 10^{-17}$ N; $a = F/m_e \approx 3.52 \times 10^{13}$ m/s², opposta a E.

4. Dove si annulla il campo tra +q e +4q poste a distanza d?

   $kq/x^2 = 4kq/(d - x)^2$ dà $x = d/3$ da +q.

Errori concettuali comuni

Mito: Una carica più grande subisce una forza maggiore da una più piccola.

In realtà: Terza legge di Newton: le forze sono uguali e opposte.

Mito: Le linee di campo sono i percorsi seguiti dalle cariche.

In realtà: Mostrano la direzione della forza; una carica in moto può uscire da una linea curva.

Mito: Il campo è nullo ovunque non ci sia carica.

In realtà: Lo spazio vuoto può contenere un campo intenso; lì è nulla solo la densità di carica.

Flashcard

Carica elementare

$e = 1.602 \times 10^{-19}$ C.

Legge di Coulomb

$F = k|q_1q_2|/r^2$.

Campo elettrico

$E = F/q$.

Campo di una carica puntiforme

$E = kq/r^2$.

Sovrapposizione

I campi di più cariche si sommano come vettori.

Linee di campo

Partono da una carica +, finiscono su una carica −; più fitte significa più intenso.

Quiz di autoverifica

1. Raddoppiare la distanza tra due cariche cambia la forza di...

×2

×½

×¼

×4

×¼. Inverso del quadrato.

2. Il campo di una carica puntiforme positiva punta…

verso di essa

lontano da essa

in cerchi

da nessuna parte

lontano da essa. Direzione della forza su una carica di prova positiva.

3. Un elettrone in un campo diretto verso est accelera verso…

est

ovest

nord

per niente

ovest. $F = qE$ con $q < 0$.

4. L’unità SI del campo elettrico è…

N/C

C/N

J

T

N/C. Forza per carica (anche V/m).

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Una cella solare funziona perché la luce libera cariche che un campo elettrico interno poi separa. Il Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti spiega che la luce assorbita in una cella FV crea cariche elettriche che si muovono in risposta a un campo elettrico interno, così scorre elettricità. Ogni pannello solare è un foglio di campi elettrici progettati con cura.

Su Saving Planets: Fisica I

Fonti: U.S. DOE: How does solar work? (https://www.energy.gov/eere/solar/how-does-solar-work) · OpenStax UP2, 5.3 Coulomb's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/5-3-coulombs-law)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP2, 5.3 Coulomb's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/5-3-coulombs-law): Sezione di un manuale gratuito.
- OpenStax UP2, 5.4 Electric field (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/5-4-electric-field): Campi e sovrapposizione.
- OpenStax UP2, 5.5 Fields of charge distributions (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/5-5-calculating-electric-fields-of-charge-distributions): Integrali per E.
- PhET: Coulomb's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/coulombs-law): Interattivo.

Guarda la lezione

Electric Fields (https://oyc.yale.edu/physics/phys-201/lecture-2) (in inglese)

Ramamurti Shankar, PHYS 201 Fundamentals of Physics II, Open Yale Courses. Licenza: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Condizioni d'uso (https://oyc.yale.edu/terms). Link fornito solo per lo studio gratuito; Saving Planets non è affiliato a questa università né approvato da essa.

☐ **Ho finito questa unità**

Legge di Gauss

Flusso elettrico, legge di Gauss e uso della simmetria per trovare i campi di sfere, fili e piani; conduttori in equilibrio elettrostatico.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare il flusso elettrico attraverso una superficie.
- Enunciare la legge di Gauss e scegliere una superficie gaussiana adatta alla simmetria.
- Trovare i campi di cariche sferiche, cilindriche e piane.
- Spiegare perché il campo dentro un conduttore è nullo e la carica sta sulla superficie.

Concetti chiave

- Il flusso Φ = ∮E·dA conta le linee di campo che attraversano una superficie.
- Legge di Gauss: il flusso netto uscente da qualsiasi superficie chiusa è uguale alla carica racchiusa divisa per ε_0.
- La legge di Gauss è sempre vera ma è utile solo quando la simmetria rende E costante sulla superficie: sfere, fili lunghi, piani estesi.
- All'esterno di una sfera uniformemente carica, il campo è lo stesso di una carica puntiforme posta al centro.
- In un conduttore in equilibrio E = 0 all'interno, la carica in eccesso sta sulla superficie ed E appena fuori è perpendicolare alla superficie.

Equazioni chiave

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{enc}}}{\varepsilon_0}$$

```
_E= E· d A=_enc_0
```

Legge di Gauss

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\varepsilon_0 r}$$

```
E=()/(2π_0 r)
```

Filo carico lungo

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$

```
E=(σ)/(2_0)
```

Piano carico esteso

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

Appena fuori da un conduttore

Esempi svolti passo passo

Esempio 2.1 Una superficie chiusa racchiude una carica di 1.0 nC. Trova il flusso netto.

1. $\Phi = Q/\varepsilon_0 = 1.0 \times 10^{-9}/8.854 \times 10^{-12}$; la forma non conta.

Risposta: ≈ 113 N·m²/C.

Esempio 2.2 Un filo lungo porta 2.0 nC per metro. Trova E a 0.10 m.

1. Usa un cilindro: $E(2\pi rL) = \lambda L/\varepsilon_0$, quindi $E = \lambda/(2\pi\varepsilon_0 r) = 2k\lambda/r$.
2. $E = 2 \times 8.988 \times 10^{9} \times 2.0 \times 10^{-9}/0.10$.

Risposta: ≈ 360 N/C, diretto radialmente verso l’esterno.

Esempio 2.3 Un piano esteso ha $\sigma = 5.0$ μC/m². Trova E vicino a esso.

1. Una scatola cilindrica che attraversa il piano: $2EA = \sigma A/\varepsilon_0$.

Risposta: $E = \sigma/(2\varepsilon_0) \approx 2.82 \times 10^{5}$ N/C, uguale a ogni distanza vicino al piano.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Una carica di 1.0 μC si trova su una sfera metallica di 0.10 m. Trova E a 0.50 m dal centro e a 0.05 m.

   Fuori: $kQ/r^2 = 3.60 \times 10^{4}$ N/C. Dentro il conduttore: 0.

2. Perché un’auto ti protegge dai fulmini?

   La carica resta sulla superficie metallica esterna, quindi il campo interno è piccolo (una gabbia di Faraday).

3. Un cubo racchiude un dipolo. Qual è il flusso netto?

Zero: la carica racchiusa è nulla.

4. Come diminuisce con la distanza il campo E di un filo carico?

   Come 1/r, più lentamente dell'1/r^2 di una carica puntiforme.

Errori concettuali comuni

Mito: Flusso nullo significa campo nullo ovunque sulla superficie.
In realtà: Solo il totale è nullo; il campo può entrare da un lato e uscire da un altro.

Mito: La legge di Gauss funziona solo per cariche simmetriche.
In realtà: Vale sempre; è la simmetria a renderla facile da usare.

Mito: Le cariche esterne alla superficie cambiano il flusso.
In realtà: Cambiano E sulla superficie ma aggiungono flusso netto nullo.

Flashcard

Flusso elettrico

$\Phi = \oint E \cdot dA$.

Legge di Gauss

$\Phi = Q_enc/\varepsilon_0$.

Filo carico

$E = \lambda/(2\pi\varepsilon_0 r)$.

Piano carico

$E = \sigma/(2\varepsilon_0)$.

Conduttore

E = 0 all'interno; carica in superficie.

Gabbia di Faraday

Un conduttore chiuso scherma il suo interno.

Quiz di autoverifica

1. Il flusso netto attraverso una superficie chiusa dipende da...

la sua forma

la carica racchiusa

la sua area

le cariche esterne

la carica racchiusa. Q_{enc}/ε_0.

2. Dentro un conduttore in equilibrio, E è...

massimo

zero

kQ/r^2

σ/ε_0

zero. Le cariche libere si ridistribuiscono finché E = 0.

3. Vicino a un piano carico esteso, E varia con la distanza come...

$1/r^2$

$1/r$

costante

r

costante. $\sigma/(2\varepsilon_0)$.

4. La migliore superficie gaussiana per un filo lungo è...

una sfera

un cubo

un cilindro coassiale

un disco piatto

un cilindro coassiale. Si adatta alla simmetria.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La legge di Gauss ha un gemello magnetico: il flusso magnetico netto attraverso qualsiasi superficie chiusa è nullo, perché non esistono monopoli magnetici. Il campo terrestre ne è un buon esempio. I National Centers for Environmental Information della NOAA affermano che oltre il 90% del campo misurato in superficie è generato nel nucleo esterno della Terra. Ogni linea di campo che lascia il pianeta vi ritorna.

Su Saving Planets: Meteo spaziale

Fonti: NOAA NCEI: Geomagnetism frequently asked questions (https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/faqgeom.shtml) · OpenStax UP2, 6.3 Applying Gauss's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/6-3-applying-gausss-law)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP2, 6.2 Explaining Gauss's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/6-2-explaining-gausss-law): Il flusso e la legge.
- OpenStax UP2, 6.3 Applying Gauss's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/6-3-applying-gausss-law): Sfere, fili, piani.
- OpenStax UP2, 6.4 Conductors in equilibrium (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/6-4-conductors-in-electrostatic-equilibrium): Conduttori.
- MIT OpenCourseWare 8.02 Physics II: Electricity and Magnetism (https://ocw.mit.edu/courses/8-02-physics-ii-electricity-and-magnetism-spring-2019/): Lezioni ed esercizi.

Guarda la lezione

Gauss's Law I (https://oyc.yale.edu/physics/phys-201/lecture-3) (in inglese)

Ramamurti Shankar, PHYS 201 Fundamentals of Physics II, Open Yale Courses. Licenza: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Condizioni d'uso (https://oyc.yale.edu/terms). Link fornito solo per lo studio gratuito; Saving Planets non è affiliato a questa università né approvato da essa.

☐ **Ho finito questa unità**

Potenziale elettrico e capacità

Energia potenziale e potenziale, equipotenziali, ricavare E da V, condensatori in serie e in parallelo, energia immagazzinata e dielettrici.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare potenziale ed energia potenziale di cariche puntiformi.
- Collegare E e V: E = −dV/dx.
- Trovare la capacità e combinare condensatori.
- Calcolare l'energia immagazzinata e l'effetto di un dielettrico.

Concetti chiave

- Il potenziale V è l'energia potenziale per carica (volt = joule per coulomb). Contano solo le differenze.
- Una carica puntiforme dà V = kq/r; i potenziali si sommano come numeri, non come vettori.
- Il campo punta verso potenziali decrescenti: E = −dV/dx. Le equipotenziali sono perpendicolari alle linee di campo.
- Un condensatore immagazzina carica Q = CV. Un condensatore a facce piane parallele ha C = $\varepsilon_0 A/d$.
- Energia immagazzinata U = ½CV². Un dielettrico di costante κ moltiplica C per κ.
- I condensatori in parallelo si sommano; in serie si sommano i reciproci.

Equazioni chiave

$$V = \frac{kq}{r}, \quad \Delta U = q\,\Delta V$$

V=kq/r, Δ U=q Δ V

Potenziale di una carica puntiforme

$$E_x = -\frac{dV}{dx}$$

E_x=-dV/dx

Campo dal potenziale

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\kappa \varepsilon_0 A}{d}$$

C=Q/V=(_0A)/(d)

Condensatore piano

$$U = \tfrac{1}{2} C V^2$$

U=12CV^2

Energia immagazzinata

$$C_{\parallel} = C_1 + C_2, \quad \frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

C_=C_1+C_2, 1C_s=1C_1+1C_2

Combinazioni

Esempi svolti passo passo

Esempio 3.1 Trova il potenziale a 0.30 m da una carica di 2.0 nC.

1. V = kq/r = 8.988 × 10⁹ × 2.0 × 10⁻⁹/0.30.

Risposta: ≈ 59.9 V.

Esempio 3.2 Un elettrone parte da fermo e attraversa una differenza di potenziale di 100 V. Trova la sua velocità.

1. eΔV = ½mv².
2. v = √(2 × 1.602 × 10⁻¹⁹ × 100/9.109 × 10⁻³¹).

Risposta: ≈ 5.93 × 10⁶ m/s.

Esempio 3.3 Armature di 0.010 m² distanti 1.0 mm sono collegate a 12 V. Trova C, Q e U.

1. C = ε_0A/d = 8.854 × 10⁻¹² × 0.010/0.001 = 88.5 pF.
2. Q = CV = 1.06 nC.
3. U = ½CV² = 6.37 nJ.

Risposta: 88.5 pF, 1.06 nC, 6.37 nJ.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Combina 2 μF e 3 μF in serie e in parallelo.

   Serie 1.2 μF; parallelo 5 μF.

2. Riempi il condensatore da 88.5 pF con un dielettrico di $\kappa = 3.4$.

   $C = 301$ pF.

3. Un grande supercondensatore da 3000 F è caricato a 2.7 V (valori di esempio). Quanta energia contiene?

   $U = \frac{1}{2}CV^2 \approx 10.9$ kJ, una minima frazione di una batteria di un'auto elettrica, ma erogata in pochi secondi.

4. $V = 4x^2$ volt. Trova E in $x = 2$ m.

   $E = -dV/dx = -16$ V/m (diretto verso $-x$).

Errori concettuali comuni

Mito: Potenziale ed energia potenziale sono la stessa cosa.
In realtà: $U = qV$; V è per unità di carica.

Mito: È solo l'alta tensione a rendere pericolosa una scossa.
In realtà: Conta la corrente nel corpo; la tensione la spinge attraverso la resistenza del corpo.

Mito: Dove $V = 0$, $E = 0$.
In realtà: A metà strada tra $+q$ e $-q$, $V = 0$ ma E è grande.

Flashcard

Potenziale elettrico

$V = U/q$, in volt.

Potenziale di una carica puntiforme

$V = kq/r$.

Campo dal potenziale

$E = -dV/dx$.

Capacità

$C = Q/V$; farad.

Armature parallele

$C = \kappa\varepsilon_0 A/d$.

Energia del condensatore

$U = \frac{1}{2}CV^2$.

Elettronvolt

1 eV = 1.602×10^{-19} J.

Quiz di autoverifica

1. 1 volt equivale a…

1 J/C

1 C/J

1 N/C

1 W/A²

1 J/C. Energia per carica.

2. Dimezzare la distanza tra le armature rende C…

la metà

il doppio

quattro volte più grande

invariata

il doppio. $C = \varepsilon_0 A/d$.

3. Raddoppiare la tensione su un condensatore moltiplica l’energia immagazzinata per…

2

4

½

1

4. $U \propto V^2$.

4. Le linee equipotenziali incontrano le linee di campo a...

0°

45°

90°

qualsiasi angolo

90°. Nessun lavoro lungo un'equipotenziale.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Le auto elettriche immagazzinano energia in batterie, non in condensatori, perché un condensatore contiene molta meno energia per chilogrammo. Il supercondensatore dell'esercizio contiene circa 10.9 kJ, circa 3.04 wattora. I condensatori sono utili dove la potenza deve entrare o uscire in pochi secondi, come per livellare l'uscita dell'elettronica di potenza in auto elettriche, inverter solari e turbine eoliche.

Su Saving Planets: Fisica I

Fonti: FuelEconomy.gov (DOE/EPA): All-electric vehicles (https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml) · OpenStax UP2, 8.3 Energy stored in a capacitor (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/8-3-energy-stored-in-a-capacitor)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP2, 7.2 Electric potential and potential difference (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/7-2-electric-potential-and-potential-difference): Potenziale.
- OpenStax UP2, 7.3 Calculations of electric potential (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/7-3-calculations-of-electric-potential): Potenziale di distribuzioni di carica.
- OpenStax UP2, 8.1 Capacitors and capacitance (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/8-1-capacitors-and-capacitance): Condensatori.
- OpenStax UP2, 8.4 Capacitor with a dielectric (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/8-4-capacitor-with-a-dielectric): Dielettrici.
- PhET: Capacitor Lab: Basics (https://phet.colorado.edu/en/simulations/capacitor-lab-basics): Interattivo.

Guarda la lezione

The Electric Potential and Conservation of Energy (https://oyc.yale.edu/physics/phys-201/lecture-5) (in inglese)

Ramamurti Shankar, PHYS 201 Fundamentals of Physics II, Open Yale Courses. Licenza: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Condizioni d'uso (https://oyc.yale.edu/terms). Link fornito solo per lo studio gratuito; Saving Planets non è affiliato a questa università né approvato da essa.

- [ ] **Ho finito questa unità**

Corrente, resistenza e circuiti in corrente continua

Corrente e velocità di deriva, resistività e legge di Ohm, potenza, f.e.m. e resistenza interna, resistori in serie e in parallelo, leggi di Kirchhoff e circuiti RC.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Collegare la corrente alla velocità di deriva e la resistenza alla resistività.
- Usare la legge di Ohm e P = IV.
- Ridurre reti serie-parallelo e applicare le leggi di Kirchhoff.
- Analizzare carica e scarica dei circuiti RC.

Concetti chiave

- Corrente I = dQ/dt; in un filo I = nqv_dA, e la velocità di deriva è minuscola anche se i segnali viaggiano quasi alla velocità della luce.
- Resistenza R = ρL/A. La legge di Ohm V = IR vale per i materiali ohmici.
- Potenza P = IV = I²R = V²/R.
- I resistori in serie si sommano; in parallelo si sommano i reciproci.
- Kirchhoff: le correnti entranti in un nodo hanno somma nulla; le variazioni di tensione lungo qualsiasi maglia hanno somma nulla.
- Un circuito RC si carica come V = V_0(1 − e^(−t/RC)); la costante di tempo è τ = RC.

Equazioni chiave

$$I = \frac{dQ}{dt} = nqv_d A$$

`I=dQ/dt=nqv_dA`

Corrente e velocità di deriva

$$R = \rho \frac{L}{A}, \quad V = IR$$

`R=ρL/A, V=IR`

Resistenza e legge di Ohm

$$P = IV = I^2 R$$

`P=IV=I^2R`

Potenza elettrica

$$\sum I = 0, \quad \sum \Delta V = 0$$

`I=0, Δ V=0`

Leggi di Kirchhoff

$$V_C = V_0\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

`V_C=V_0(1-e^-t/RC)`

Condensatore in carica

Esempi svolti passo passo

Esempio 4.1 Trova la resistenza di 100 m di filo di rame di 1.0 mm di diametro ($\rho = 1.68 \times 10^{-8}\ \Omega\cdot m$).

1. $A = \pi(0.5 \times 10^{-3})^2 = 7.85 \times 10^{-7}\ m^2$.
2. $R = \rho L/A = 1.68 \times 10^{-8} \times 100/7.85 \times 10^{-7}$.

Risposta: ≈ 2.14 Ω.

Esempio 4.2 Due batterie (12 V e 6 V) e tre resistori: la maglia 1 ha 12 V, $R_1 = 2\ \Omega$ e il resistore comune $R_3 = 6\ \Omega$; la maglia 2 ha 6 V, $R_2 = 3\ \Omega$ e R_3. Trova le correnti.

1. Nodo: $I_3 = I_1 + I_2$.
2. Maglia 1: $12 = 2I_1 + 6I_3$. Maglia 2: $6 = 3I_2 + 6I_3$.
3. Risolvendo: $I_1 = 2$ A, $I_2 = -0.667$ A, $I_3 = 1.33$ A.

Risposta: $I_1 = 2$ A; $I_2 = -0.667$ A (il segno meno indica che la batteria da 12 V spinge corrente all'indietro in quella da 6 V, caricandola); $I_3 = 1.33$ A.

Esempio 4.3 Un condensatore da 100 μF si carica da una batteria da 9 V attraverso 10 kΩ. Trova τ e la tensione dopo 1 s e 3 s.

1. $\tau = RC = 10^4 \times 10^{-4} = 1.0$ s.
2. V(1) = 9(1 − e^(−1)); V(3) = 9(1 − e^(−3)).

Risposta: 1.0 s; 5.69 V; 8.55 V.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Una lampadina da 60 W funziona a 120 V. Trova corrente e resistenza.

   I = 0.5 A; R = 240 Ω.

2. Trova l'equivalente di 6 Ω e 3 Ω in parallelo, poi la corrente da 12 V attraverso quella coppia in serie con 4 Ω.

   2 Ω; I = 12/6 = 2 A.

3. Trova la velocità di deriva per 1 A nel filo di rame da 1.0 mm ($n = 8.5 \times 10^{28}$ m^{-3}).

   $v_d = I/(neA) \approx 9.4 \times 10^{-5}$ m/s, circa un terzo di metro all'ora.

4. Un pannello solare ha 60 celle in serie, ciascuna da 0.6 V (valori di esempio). Qual è la tensione del pannello? Come raddoppieresti invece la corrente?

   36 V; metti due pannelli in parallelo.

Errori concettuali comuni

Mito: La corrente si consuma in un resistore.

In realtà: La carica si conserva; si converte l'energia, non la corrente.

Mito: Gli elettroni sfrecciano nei fili quasi alla velocità della luce.

In realtà: Il segnale sì; gli elettroni derivano a frazioni di millimetro al secondo.

Mito: Una batteria fornisce corrente costante.

In realtà: Fornisce una f.e.m. circa costante; la corrente dipende dal circuito.

Flashcard

Corrente

$I = dQ/dt$; ampere.

Legge di Ohm

$V = IR$.

Resistività

$R = \rho L/A$.

Potenza

$P = IV = I^2R = V^2/R$.

Legge dei nodi

$\Sigma I = 0$.

Legge delle maglie

$\Sigma \Delta V = 0$.

Costante di tempo RC

$\tau = RC$.

Quiz di autoverifica

1. Raddoppiare la lunghezza di un filo ne raddoppia...

la resistività

la resistenza

la corrente

la sezione

la resistenza. $R = \rho L/A$.

2. Due resistori uguali R in parallelo danno...

2R

R

R/2

R^2

R/2. 1/R + 1/R.

3. Dopo una costante di tempo un condensatore in carica è al...

37%

50%

63%

100%

63%. 1 − e^(−1).

4. La legge delle maglie di Kirchhoff deriva dalla conservazione di...

carica

energia

quantità di moto

massa

energia. Il potenziale è energia per carica.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Un pannello solare è un circuito in corrente continua. Le celle sono collegate in serie per aumentare la tensione e i pannelli in parallelo per aumentare la corrente, esattamente come negli esercizi. Una cella spinge le cariche in un solo verso, quindi l'uscita di un pannello è corrente continua; deve essere convertita in corrente alternata prima di immettersi in rete (unità 9). Il Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti spiega come funzionano le celle stesse.

Su Saving Planets: Osservazione della Terra

Fonti: U.S. DOE: How does solar work? (https://www.energy.gov/eere/solar/how-does-solar-work) · OpenStax UP2, 10.3 Kirchhoff's rules (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-3-kirchhoffs-rules)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP2, 9.1 Electrical current (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/9-1-electrical-current): Corrente.
- OpenStax UP2, 9.3 Resistivity and resistance (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/9-3-resistivity-and-resistance): Resistenza.
- OpenStax UP2, 10.2 Resistors in series and parallel (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-2-resistors-in-series-and-parallel): Combinazioni.
- OpenStax UP2, 10.5 RC circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/10-5-rc-circuits): Circuiti RC.
- PhET: Ohm's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/ohms-law): Interattivo.

☐ **Ho finito questa unità**

Campi e forze magnetiche

La forza magnetica su cariche in moto e correnti, il moto circolare delle particelle cariche, il momento torcente su una spira percorsa da corrente e come funzionano i motori elettrici.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Usare F = qv × B con la regola della mano destra.
- Trovare raggio e frequenza dell'orbita circolare di una particella carica.
- Trovare la forza su un filo percorso da corrente e il momento torcente su una spira.
- Spiegare come un motore in continua trasforma la corrente in rotazione.

Concetti chiave

- Un campo magnetico agisce sulle cariche in moto: F = qv × B, perpendicolare sia a v sia a B. Non compie lavoro, quindi cambia la direzione, non il modulo della velocità.
- Una carica che attraversa un campo uniforme percorre un cerchio di raggio r = mv/(|q|B) con frequenza di ciclotrone f = |q|B/(2πm), indipendente dalla velocità.
- Un filo percorso da corrente I in un campo B subisce F = IL × B.
- Una spira percorsa da corrente ha momento magnetico μ = NIA e subisce un momento τ = μB sin θ. È quel momento che fa girare un motore elettrico.
- Campi E e B incrociati lasciano passare solo particelle con v = E/B (un selettore di velocità).

Equazioni chiave

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

`F=q v× B`

Forza magnetica su una carica

$$r = \frac{mv}{|q|B}, \quad f = \frac{|q|B}{2\pi m}$$

`r=(mv)/(|q|B), f=(|q|B)/(2π m)`

Moto circolare in un campo

$$\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B}$$

`F=I L× B`

Forza su una corrente

$$\tau = NIAB\sin\theta$$

τ=NIABθ

Momento su una spira

Esempi svolti passo passo

Esempio 5.1 Un protone del vento solare si muove a 400 km/s perpendicolarmente a un campo di 50 μT (valori di esempio). Trova il raggio del suo cerchio.

1. r = mv/(eB) = 1.673 × 10⁻²⁷ × 4 × 10⁵/(1.602 × 10⁻¹⁹ × 5 × 10⁻⁵).

Risposta: ≈ 83.5 m. Le particelle cariche si avvolgono strettamente lungo le linee di campo invece di attraversarle.

Esempio 5.2 Un filo di 0.20 m percorso da 200 A è perpendicolare a un campo di 0.50 T. Trova la forza.

1. F = ILB = 200 × 0.20 × 0.50.

Risposta: 20 N.

Esempio 5.3 La bobina di un motore ha 100 spire di area 0.01 m² percorse da 2 A in un campo di 0.5 T. Trova il momento massimo.

1. τ = NIAB = 100 × 2 × 0.01 × 0.5.

Risposta: 1.0 N·m, quando il piano della bobina è parallelo al campo.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Trova la frequenza di ciclotrone di un protone in un campo di 1 T.

   f = eB/(2πm$_p$) ≈ 15.2 MHz.

2. Un elettrone si muove a 1 × 10⁵ m/s attraverso un campo di 50 μT. Trova r.

   r = m$_e$v/(eB) ≈ 1.14 cm.

3. Quale velocità passa senza deviazione con $E = 10^4$ V/m e $B = 0.1$ T?

   $v = E/B = 10^5$ m/s.

4. Un campo magnetico statico può accelerare una carica?

   No: $F \perp v$, quindi non compie lavoro.

Errori concettuali comuni

Mito: La forza magnetica è diretta lungo il campo.
In realtà: È perpendicolare a B e a v.

Mito: Una carica ferma subisce una forza magnetica.
In realtà: Solo le cariche in moto la subiscono.

Mito: Velocità maggiore significa frequenza di ciclotrone più alta.
In realtà: Il raggio cresce con la velocità, la frequenza no.

Flashcard

Forza di Lorentz

$F = q(E + v \times B)$.

Regola della mano destra

Dita lungo v, piegale verso B, il pollice dà F per q positiva.

Raggio di ciclotrone

$r = mv/(qB)$.

Forza su un filo

$F = ILB \sin \theta$.

Momento magnetico

$\mu = NIA$.

Momento del motore

$\tau = NIAB \sin \theta$.

Quiz di autoverifica

1. La forza magnetica su una carica che si muove parallela a B è...

massimo

zero

qvB

qE

zero. sin 0 = 0.

2. L’unità SI del campo magnetico è il…

gauss

tesla

weber

henry

tesla. 1 T = 1 N/(A·m); 1 G = 10^{-4} T.

3. Raddoppiare la velocità di una particella carica in un B uniforme cambia il raggio di…

×½

×1

×2

×4

×2. r = mv/(qB).

4. Il momento su una bobina di motore è massimo quando il suo piano è…

perpendicolare a B

parallelo a B

a 30°

qualsiasi angolo

parallelo a B. μ è allora perpendicolare a B.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Le auto elettriche funzionano grazie al momento magnetico: la corrente nelle bobine del motore si trova in un campo magnetico e $\tau = NIAB \sin\theta$ fa girare le ruote. Secondo FuelEconomy.gov, i veicoli elettrici convertono oltre il 77% dell'energia elettrica della rete in potenza alle ruote, mentre le auto a benzina convertono solo dal 12% al 30% circa dell'energia del carburante.

Il campo terrestre, tra circa 25 e 65 μT in superficie secondo la NOAA, curva le particelle cariche del vento solare in spirali strette, come nel primo esempio svolto. Le particelle così intrappolate vengono guidate lungo le linee di campo verso i poli, dove accendono le aurore.

Su Saving Planets: Meteo spaziale

Fonti: FuelEconomy.gov (DOE/EPA): All-electric vehicles (https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml) · NOAA NCEI: Geomagnetism frequently asked questions (https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/faqgeom.shtml)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP2, 11.3 Motion of a charged particle in a magnetic field (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/11-3-motion-of-a-charged-particle-in-a-magnetic-field): Moto circolare.
- OpenStax UP2, 11.4 Magnetic force on a current-carrying conductor (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/11-4-magnetic-force-on-a-current-carrying-conductor): Forza sui fili.
- OpenStax UP2, 11.5 Force and torque on a current loop (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/11-5-force-and-torque-on-a-current-loop): Motori.
- PhET: Magnets and Electromagnets (https://phet.colorado.edu/en/simulations/magnets-and-electromagnets): Interattivo.

☐ **Ho finito questa unità**

Sorgenti di campi magnetici: Biot–Savart e Ampère

Come le correnti generano campi magnetici: la legge di Biot–Savart, i campi di fili, spire e solenoidi, le forze tra correnti parallele e la legge di Ampère.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Usare la legge di Biot–Savart per un filo e una spira.
- Applicare la legge di Ampère a fili e solenoidi.
- Trovare la forza tra correnti parallele.
- Confrontare i campi artificiali con il campo terrestre.

Concetti chiave

- Biot–Savart: ogni elemento di corrente I dl genera dB = (μ₀/4π) I dl × r̂/r². Le linee di campo circondano la corrente (regola della mano destra: pollice lungo I, le dita si avvolgono con B).
- Un filo rettilineo lungo: B = μ₀I/(2πr). Al centro di una spira di raggio R: B = μ₀I/(2R).
- Legge di Ampère: ∮B·dl = μ₀I_enc. Come la legge di Gauss, è più semplice con la simmetria.
- Dentro un solenoide lungo B = μ₀nI, uniforme, dove n è il numero di spire per metro.
- Correnti parallele si attraggono; correnti opposte si respingono, con forza per unità di lunghezza $\mu_0 I_1 I_2/(2\pi d)$.

Equazioni chiave

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\,d\vec{l}\times\hat{r}}{r^2}$$

`d B=(μ_0)/(4π)(I d l× r)/(r^2)`

Legge di Biot–Savart

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

`B=(μ_0I)/(2π r)`

Filo rettilineo lungo

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{\text{enc}}$$

`B· d l=μ_0I_enc`

Legge di Ampère

$$B = \mu_0 n I$$

B=μ_0nI

Solenoide lungo

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$$

FL=(μ_0I_1I_2)/(2π d)

Fili paralleli

Esempi svolti passo passo

Esempio 6.1 Una linea di trasmissione porta 1000 A (valore di esempio). Trova B a 20 m e confrontalo con il campo terrestre.

1. B = $\mu_0 I/(2\pi r) = 4\pi \times 10^{-7} \times 1{,}000/(2\pi \times 20)$.

Risposta: 10 μT, meno del campo superficiale terrestre di 25–65 μT.

Esempio 6.2 Un solenoide ha 1000 spire per metro e porta 2 A. Trova B all'interno.

1. B = $\mu_0 n I = 4\pi \times 10^{-7} \times 1{,}000 \times 2$.

Risposta: ≈ 2.51 mT, circa 50 volte il campo terrestre.

Esempio 6.3 Due fili paralleli distanti 1 cm portano ciascuno 10 A nello stesso verso. Trova la forza per metro.

1. F/L = $\mu_0 I_1 I_2/(2\pi d) = 4\pi \times 10^{-7} \times 100/(2\pi \times 0.01)$.

Risposta: 2.0 mN/m, attrattiva.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Trova B al centro di una spira di raggio 5 cm percorsa da 5 A.

   B = $\mu_0 I/(2R) \approx 62.8$ μT.

2. Un filo porta 2 A. Trova B a 1, 2 e 4 cm.

   40, 20 e 10 μT: si dimezza a ogni raddoppio della distanza.

3. Usa la legge di Ampère per trovare B dentro un filo spesso di raggio a per r < a (corrente uniforme).

   $B(2\pi r) = \mu_0 I\, r^2/a^2$, quindi $B = \mu_0 I r/(2\pi a^2)$, che cresce linearmente dal centro.

4. Quanto vale B fuori da un toroide ideale?

   Zero: il percorso non racchiude corrente netta.

Errori concettuali comuni

Mito: Le linee del campo magnetico iniziano e finiscono sui poli.
In realtà: Formano anelli chiusi; non esistono monopoli.

Mito: La legge di Ampère dà B per qualsiasi corrente.
In realtà: Vale sempre, ma dà B direttamente solo con la simmetria.

Mito: Il campo di un filo punta lungo il filo.
In realtà: Gira attorno al filo.

Flashcard

Biot–Savart

$dB = (\mu_0/4\pi)\, I\, dl \times \hat{r}/r^2$.

Campo di un filo

$B = \mu_0 I/(2\pi r)$.

Centro di una spira

$B = \mu_0 I/(2R)$.

Legge di Ampère

$\oint B \cdot dl = \mu_0 I_{enc}$.

Solenoide

$B = \mu_0 n I$.

Correnti parallele

Stesso verso: si attraggono.

Quiz di autoverifica

1. Il B di un filo lungo diminuisce con la distanza come...

$1/r^2$

1/r

costante

r

1/r. $\mu_0 I/(2\pi r)$.

2. Dentro un solenoide lungo, B dipende da...

raggio

spire per metro e corrente

solo lunghezza

distanza dall'asse

spire per metro e corrente. $B = \mu_0 nI$.

3. Due fili con correnti in versi opposti...

si attraggono

si respingono

non subiscono forze

si torcono

si respingono. Correnti opposte si respingono.

4. μ_0 vale circa...

8.85×10^{-12}

1.26×10^{-6}

9×10^{9}

3×10^{8}

1.26×10^{-6}. $4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Il campo stesso della Terra è generato da correnti: la NOAA spiega che oltre il 90% nasce nel nucleo esterno grazie a quella che chiama la dinamo interna della Terra: materiale conduttore in movimento che trasporta corrente. La legge di Biot–Savart è il ponte tra quelle correnti e il campo letto da una bussola. Il World Magnetic Model della NOAA descrive questo campo principale.

Su Saving Planets: Meteo spaziale

Fonti: NOAA NCEI: Geomagnetism frequently asked questions (https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/faqgeom.shtml) · OpenStax UP2, 12.1 The Biot–Savart law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/12-1-the-biot-savart-law)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP2, 12.1 The Biot–Savart law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/12-1-the-biot-savart-law): Biot–Savart.
- OpenStax UP2, 12.5 Ampère's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/12-5-amperes-law): Legge di Ampère.
- PhET: Magnet and Compass (https://phet.colorado.edu/en/simulations/magnet-and-compass): Interattivo.
- MIT OpenCourseWare 8.02 Physics II: Electricity and Magnetism (https://ocw.mit.edu/courses/8-02-physics-ii-electricity-and-magnetism-spring-2019/): Lezioni ed esercizi.

☐ **Ho finito questa unità**

Induzione elettromagnetica: Faraday e Lenz

Flusso magnetico, legge di Faraday, legge di Lenz, f.e.m. di movimento, campi elettrici indotti, correnti parassite e i generatori dell’energia eolica e idroelettrica.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare il flusso magnetico e la f.e.m. dovuta a un flusso variabile.
- Usare la legge di Lenz per trovare il verso della corrente indotta.
- Trovare la f.e.m. di movimento di una sbarra in moto.
- Calcolare l’uscita di un alternatore e la potenza di una centrale idroelettrica.

Concetti chiave

- Flusso magnetico Φ_B = ∫B·dA, in weber.
- Legge di Faraday: un flusso variabile attraverso una bobina di N spire induce una f.e.m. ε = −N dΦ_B/dt.
- Legge di Lenz (il segno meno): la corrente indotta si oppone alla variazione di flusso che l’ha generata, il che equivale alla conservazione dell’energia.
- Una sbarra di lunghezza L che si muove a v attraverso B ha f.e.m. di movimento ε = BLv.
- Una bobina che ruota con velocità angolare ω in B dà ε = NBAω sin ωt: corrente alternata. Farla girare richiede lavoro meccanico, ed è così che i generatori convertono moto in energia elettrica.

Equazioni chiave

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

_B= B· d A

Flusso magnetico

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi_B}{dt}$$

=-N(d_B)/(dt)

Legge di Faraday

$$\varepsilon = BLv$$

=BLv

F.e.m. di movimento

$$\varepsilon(t) = NBA\omega \sin \omega t$$

(t)=NBAωω t

Alternatore

$$P = \eta \rho g Q h$$

P=ρ gQh

Energia idroelettrica

Esempi svolti passo passo

Esempio 7.1 La bobina di un generatore ha 100 spire di area 0.04 m² e ruota a 60 giri/s in un campo di 0.5 T. Trova la f.e.m. di picco.

1. ω = 2π × 60 = 377 rad/s.
2. ε_max = NBAω = 100 × 0.5 × 0.04 × 377.

Risposta: ≈ 754 V.

Esempio 7.2 Una bobina di 200 spire di area 0.01 m² vede B salire da 0 a 0.3 T in 0.5 s. Trova la f.e.m. media.

1. ΔΦ = BA = 0.003 Wb per spira.
2. ε = NΔΦ/Δt = 200 × 0.003/0.5.

Risposta: 1.2 V.

Esempio 7.3 Una centrale idroelettrica fa passare 100 m³/s con un salto di 50 m al 90% di rendimento (valori di esempio). Trova la potenza.

1. P = ηρgQh = 0.9 × 1,000 × 9.81 × 100 × 50.

Risposta: ≈ 44.1 MW.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Una sbarra di 0.2 m si muove a 3 m/s attraverso un campo di 0.5 T. Trova la f.e.m.

   BLv = 0.3 V.

2. Il polo nord di un magnete si avvicina a una spira. In che verso circola la corrente indotta, vista dal magnete?

   Antiorario, creando una faccia nord che respinge il magnete in avvicinamento.

3. Perché è più difficile far girare un generatore quando si accendono le lampade?

   La corrente nella bobina subisce un momento magnetico che si oppone al moto (Lenz); è da lì che viene l'energia elettrica.

4. Raddoppiare la velocità di rotazione di un generatore cambia la f.e.m. di picco di...?

   ×2: $\varepsilon_{max} = NBA\omega$.

Errori concettuali comuni

Mito: Un campo intenso ma costante induce corrente.
In realtà: Solo un flusso variabile induce f.e.m.

Mito: La legge di Lenz si oppone al campo.
In realtà: Si oppone alla variazione di flusso.

Mito: I generatori creano energia.
In realtà: Convertono lavoro meccanico in energia elettrica.

Flashcard

Flusso magnetico

$\Phi = BA\cos\theta$; weber.

Legge di Faraday

$\varepsilon = -N\, d\Phi/dt$.

Legge di Lenz

La corrente indotta si oppone alla variazione.

F.e.m. di movimento

$\varepsilon = BLv$.

Generatore

$\varepsilon = NBA\omega \sin \omega t$.

Correnti parassite

Anelli indotti nel metallo massiccio; usati per frenare.

Quiz di autoverifica

1. La legge di Faraday collega la f.e.m. a...

flusso

rapidità di variazione del flusso

la corrente

la resistenza

rapidità di variazione del flusso. $\varepsilon = -N\, d\Phi/dt$.

2. Il segno meno nella legge di Faraday è...

Legge di Ohm

Legge di Lenz

Legge di Gauss

solo una convenzione

Legge di Lenz. Si oppone alla variazione.

3. Una bobina che ruota in un campo costante produce...

DC

AC

nessuna f.e.m.

carica statica

AC. $\varepsilon \propto \sin \omega t$.

4. L'unità SI del flusso magnetico è il...

tesla

weber

henry

farad

weber. 1 Wb = 1 T·m².

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Eolico e idroelettrico sono la legge di Faraday. Il Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti spiega che il vento fa girare le pale di una turbina attorno a un rotore, che aziona un generatore che produce elettricità, e che le centrali idroelettriche usano turbine e generatori per convertire l'energia cinetica dell'acqua che scorre in elettricità per la rete.

Su Saving Planets: Fisica I

Fonti: DOE degli Stati Uniti: come funzionano le turbine eoliche? (in inglese) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work) · U.S. DOE: How hydropower works (https://www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP2, 13.1 Faraday's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/13-1-faradays-law): Faraday.
- OpenStax UP2, 13.2 Lenz's law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/13-2-lenzs-law): Lenz.
- OpenStax UP2, 13.3 Motional EMF (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/13-3-motional-emf): Conduttori in moto.
- OpenStax UP2, 13.6 Electric generators and back EMF (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/13-6-electric-generators-and-back-emf): Generatori.
- PhET: Faraday's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-law): Interattivo.

Guarda la lezione

Lenz's and Faraday's Laws (https://oyc.yale.edu/physics/phys-201/lecture-11) (in inglese)

Ramamurti Shankar, PHYS 201 Fundamentals of Physics II, Open Yale Courses. Licenza: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Condizioni d'uso (https://oyc.yale.edu/terms). Link fornito solo per lo studio gratuito; Saving Planets non è affiliato a questa università né approvato da essa.

☐ **Ho finito questa unità**

Induttanza, circuiti RL e LC

Mutua induttanza e autoinduttanza, energia immagazzinata nei campi magnetici, circuiti RL e loro costante di tempo, e oscillazioni LC.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Trovare l'autoinduttanza di un solenoide e la f.e.m. di un induttore.
- Analizzare crescita e decadimento della corrente nei circuiti RL.
- Calcolare l'energia in un induttore e la densità di energia magnetica.
- Trovare la frequenza di un oscillatore LC.

Concetti chiave

- Una corrente variabile in una bobina induce f.e.m. in un'altra: $\varepsilon_2 = -M\, dI_1/dt$ (mutua induttanza).
- Una bobina si oppone alle variazioni della propria corrente: $\varepsilon = -L\, dI/dt$. Un solenoide lungo ha $L = \mu_0 N^2 A/l$.
- In un circuito RL la corrente cresce come $I = (\varepsilon/R)(1 - e^{\wedge}(-t/\tau))$ con $\tau = L/R$.
- Un induttore immagazzina $U = \tfrac{1}{2}LI^2$; ogni campo magnetico immagazzina densità di energia $u = B^2/(2\mu_0)$.
- Un circuito LC scambia energia tra condensatore e induttore a $\omega = 1/\sqrt{(LC)}$, il gemello elettrico di una massa su una molla.

Equazioni chiave

$$\varepsilon = -L\frac{dI}{dt}, \quad L = \frac{\mu_0 N^2 A}{l}$$

=-LdI/dt, L=(μ_0N^2A)/(l)

Autoinduttanza

$$I = \frac{\varepsilon}{R}\left(1 - e^{-t/\tau}\right),\ \tau = \frac{L}{R}$$

I=()/(R)(1-e^-t/τ),\ τ= LR

Circuito RL

$$U = \tfrac{1}{2}LI^2, \quad u_B = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

U=12LI^2, u_B=(B^2)/(2μ_0)

Energia magnetica

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Oscillazione LC

Esempi svolti passo passo

Esempio 8.1 Un solenoide ha 500 spire, sezione 1.0×10^{-3} m² e lunghezza 0.25 m. Trova L, poi τ con un resistore da 10 Ω.

1. $L = \mu_0 N^2 A/l = 4\pi \times 10^{-7} \times 250{,}000 \times 10^{-3}/0.25 = 1.26$ mH.
2. $\tau = L/R = 0.126$ ms.

Risposta: 1.26 mH; 0.126 ms.

Esempio 8.2 Quanta energia immagazzina quell'induttore a 2 A?

1. $U = \tfrac{1}{2} L I^2 = \tfrac{1}{2} \times 1.257 \times 10^{-3} \times 4$.

Risposta: ≈ 2.51 mJ.

Esempio 8.3 Trova la frequenza di oscillazione di un induttore da 10 mH con un condensatore da 1 μF.

1. $f = 1/(2\pi\sqrt{(LC)}) = 1/(2\pi\sqrt{(10^{-8})})$.

Risposta: ≈ 1.59 kHz.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Due bobine hanno M = 0.01 H. La corrente in una varia a 100 A/s. Trova la f.e.m. nell'altra.

   1 V.

2. Quale frazione della corrente finale raggiunge un circuito RL dopo 1τ e 3τ?

   63% e 95%.

3. Trova la densità di energia magnetica del campo terrestre di 50 μT.

   $B^2/(2\mu_0) \approx 9.9 \times 10^{-4}$ J/m³.

4. Perché spegnere un carico induttivo può produrre una scintilla?

   Fermare I rapidamente rende enorme L dI/dt.

Errori concettuali comuni

Mito: Un induttore si oppone alla corrente.
In realtà: Si oppone alle variazioni di corrente; in continua stazionaria è solo un filo.

Mito: Gli induttori immagazzinano energia nella carica.
In realtà: Nel campo magnetico.

Mito: Le oscillazioni LC durano per sempre.
In realtà: La resistenza reale le smorza (un circuito RLC, unità 9).

Flashcard

Autoinduttanza

$\varepsilon = -L\, dI/dt$.

Mutua induttanza

$\varepsilon_2 = -M\, dI_1/dt$.

Induttanza di un solenoide

$L = \mu_0 N^2 A/l$.

Costante di tempo RL

$\tau = L/R$.

Energia dell'induttore

$U = \frac{1}{2} L I^2$.

Frequenza LC

$\omega = 1/\sqrt{(LC)}$.

Quiz di autoverifica

1. L'unità SI dell'induttanza è l'...

farad

henry

tesla

ohm

henry. 1 H = 1 V·s/A.

2. Raddoppiare le spire di un solenoide moltiplica L per...

2

4

½

1

4. $L \propto N^2$.

3. La costante di tempo RL è...

RL

L/R

R/L

√(LC)

L/R. $\tau = L/R$.

4. Un circuito LC è l'analogo elettrico di...

l'attrito

una massa su una molla

un corpo in caduta

una leva

una massa su una molla. L'energia va avanti e indietro.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Il meteo spaziale è induzione su scala planetaria. Lo Space Weather Prediction Center della NOAA spiega che le tempeste geomagnetiche creano dannose correnti geomagneticamente indotte nella rete elettrica e nei gasdotti, oltre a splendide aurore. Le tempeste sono provocate da espulsioni di massa coronale che, secondo la NOAA, lasciano il Sole a velocità da meno di 250 km/s a quasi 3000 km/s; le più veloci dirette verso la Terra arrivano in appena 15-18 ore.

Su Saving Planets: Meteo spaziale · Solar Orbiter

Fonti: NOAA Space Weather Prediction Center: Geomagnetic storms (https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/geomagnetic-storms) · NOAA Space Weather Prediction Center: Coronal mass ejections (https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/coronal-mass-ejections)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP2, 14.1 Mutual inductance (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-1-mutual-inductance): Mutua induttanza.
- OpenStax UP2, 14.2 Self-inductance and inductors (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-2-self-inductance-and-inductors): Induttori.
- OpenStax UP2, 14.4 RL circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-4-rl-circuits): Circuiti RL.
- OpenStax UP2, 14.5 Oscillations in an LC circuit (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/14-5-oscillations-in-an-lc-circuit): Circuiti LC.

☐ **Ho finito questa unità**

Circuiti in corrente alternata, trasformatori e rete elettrica

Corrente alternata, valori efficaci, reattanza e impedenza, fasori, risonanza RLC, fattore di potenza, trasformatori e perché la rete trasmette ad alta tensione.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Convertire tra valori di picco ed efficaci.
- Trovare reattanza, impedenza, fase e corrente in un circuito RLC in serie.
- Calcolare la potenza media e il fattore di potenza.
- Usare i rapporti di trasformazione e spiegare la trasmissione ad alta tensione.

Concetti chiave

- La corrente alternata domestica è sinusoidale; gli strumenti leggono valori efficaci, con $V_{rms} = V_0/\sqrt{2}$.
- Gli induttori hanno reattanza $X_L = \omega L$ e i condensatori $X_C = 1/(\omega C)$. In un circuito RLC in serie $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$.
- La corrente è in anticipo o in ritardo sulla tensione di φ con $\tan\varphi = (X_L - X_C)/R$. La potenza media è $P = I_{rms} V_{rms} \cos\varphi$; $\cos\varphi$ è il fattore di potenza.
- In risonanza $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, $X_L = X_C$ e la corrente è massima.
- Un trasformatore ideale conserva la potenza: $V_2/V_1 = N_2/N_1$ e $I_2/I_1 = N_1/N_2$. Funziona solo in alternata, per mutua induzione.
- La perdita in linea è I^2R. Trasmettere la stessa potenza a una tensione 10 volte maggiore riduce la corrente di 10 volte e le perdite di 100 volte.

Equazioni chiave

$$V_{\text{rms}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}}$$

```
V_rms=(V_0)/(2)
```

Valore efficace

$$X_L = \omega L, \quad X_C = \frac{1}{\omega C}$$

```
X_L=ω L, X_C=1ω C
```

Reattanza

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2},\ \tan\varphi = \frac{X_L - X_C}{R}$$

`Z=^2+(X_L-X_C)^2,\ =(X_L-X_C)/(R)`

Impedenza e fase

$$P = I_{\text{rms}} V_{\text{rms}} \cos\varphi$$

`P=I_rmsV_rms`

Potenza media

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

`(V_2)/(V_1)=(N_2)/(N_1)`

Trasformatore

$$P_{\text{loss}} = I^2 R = \left(\frac{P}{V}\right)^2 R$$

`P_loss=I^2R=(P/V)^2R`

Perdita in linea

Esempi svolti passo passo

Esempio 9.1 Un circuito in serie ha R = 20 Ω, L = 0.1 H e C = 100 μF a 120 V efficaci e 60 Hz. Trova impedenza, corrente, fase e potenza.

1. $X_L = 2\pi \times 60 \times 0.1 = 37.7\ \Omega$; $X_C = 1/(2\pi \times 60 \times 10^{-4}) = 26.5\ \Omega$.
2. $Z = \sqrt{(20^2 + 11.2^2)} = 22.9\ \Omega$; $I = 120/22.9 = 5.24$ A.
3. $\tan\varphi = 11.2/20$, $\varphi = 29.2°$; $P = I^2R = 549$ W.

Risposta: 22.9 Ω, 5.24 A, la corrente è in ritardo di 29.2° (fattore di potenza 0.873), 549 W.

Esempio 9.2 Trasmetti 100 MW su una linea con resistenza di 10 Ω a 345 kV e a 34.5 kV. Confronta le perdite.

1. 345 kV: I = 290 A, perdita = I^2R = 0.84 MW (0.84%).
2. 34.5 kV: I = 2899 A, perdita = 84 MW.

Risposta: 0.84 MW contro 84 MW. Una tensione dieci volte maggiore dà un centesimo delle perdite, ed è per questo che le linee lunghe funzionano a centinaia di kilovolt.

Esempio 9.3 Un trasformatore su palo abbassa 7200 V a 240 V (valori di esempio). Trova il rapporto spire e la corrente al primario quando il secondario fornisce 30 A.

1. $N_1/N_2 = 7{,}200/240 = 30$.
2. $I_1 = I_2/30$.

Risposta: 30:1; 1.0 A.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Trova la tensione di picco di 120 V efficaci.

   169.7 V.

2. Trova la frequenza di risonanza del circuito RLC precedente.

   $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{(LC)}) \approx 50.3$ Hz.

3. Perché un trasformatore non può elevare la tensione continua?

   Una corrente costante crea un flusso costante, che non induce f.e.m.

4. Cosa succede a X_C quando la frequenza aumenta?

   Diminuisce: i condensatori lasciano passare le alte frequenze.

Errori concettuali comuni

Mito: Il valore efficace è la tensione media.
In realtà: La media di un'onda sinusoidale è zero; il valore efficace è la radice della media del quadrato.

Mito: Un trasformatore crea potenza.
In realtà: Scambia tensione con corrente; potenza in uscita ≤ potenza in ingresso.

Mito: Le impedenze si sommano come resistenze.
In realtà: Si sommano come vettori (fasori), non come semplici numeri.

Flashcard

RMS

$V_{rms} = V_0/\sqrt{2}$.

Reattanza induttiva

$X_L = \omega L$.

Reattanza capacitiva

$X_C = 1/(\omega C)$.

Impedenza

$Z = \sqrt{(R^2 + (X_L - X_C)^2)}$.

Fattore di potenza

$\cos \varphi = R/Z$.

Trasformatore

$V_2/V_1 = N_2/N_1$.

Perdita in linea

$I^2R = (P/V)^2R$.

Quiz di autoverifica

1. In risonanza in un circuito RLC in serie...

$X_L = X_C$

$Z = 0$

$I = 0$

$R = 0$

$X_L = X_C$. Le reattanze si annullano, $Z = R$.

2. Aumentare di 10 volte la tensione di trasmissione cambia la perdita in linea di...

×10

×1/10

×1/100

×100

×1/100. Perdita $\propto I^2 \propto 1/V^2$.

3. Un trasformatore elevatore ha…

$N_2 > N_1$

$N_2 < N_1$

$N_2 = N_1$

nessun secondario

$N_2 > N_1$. $V_2/V_1 = N_2/N_1$.

4. Un fattore di potenza pari a 1 significa…

corrente e tensione in fase

nessuna corrente

induttore puro

condensatore puro

corrente e tensione in fase. cos 0 = 1.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La Energy Information Administration degli Stati Uniti stima che le perdite di trasmissione e distribuzione siano state in media circa il 5% dell'elettricità inviata attraverso la rete statunitense dal 2018 al 2022. L'EIA descrive la rete come migliaia di miglia di linee ad alta tensione e milioni di miglia di linee a bassa tensione. Alta tensione per la distanza, poi trasformatori che la abbassano a livelli sicuri vicino agli utenti: è l'esempio svolto sopra su scala nazionale. Ogni punto percentuale risparmiato significa meno combustibile bruciato o più energia pulita consegnata.

Su Saving Planets: Fisica I

Fonti: U.S. EIA: How much electricity is lost in transmission and distribution? (https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=105&t=3) · U.S. EIA: Delivery to consumers (the power grid) (https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/delivery-to-consumers.php)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP2, 15.2 Simple AC circuits (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-2-simple-ac-circuits): Basi dell'alternata.
- OpenStax UP2, 15.3 RLC series circuits with AC (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-3-rlc-series-circuits-with-ac): Impedenza.
- OpenStax UP2, 15.4 Power in an AC circuit (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-4-power-in-an-ac-circuit): Fattore di potenza.
- OpenStax UP2, 15.6 Transformers (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/15-6-transformers): Trasformatori.
- PhET: Circuit Construction Kit: AC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-ac): Interattivo.

☐ **Ho finito questa unità**

Equazioni di Maxwell, onde elettromagnetiche e ottica

La corrente di spostamento e le quattro equazioni di Maxwell, la luce come onda elettromagnetica, energia e quantità di moto della luce, lo spettro e un'introduzione all'ottica: riflessione, rifrazione, riflessione totale interna, polarizzazione e lenti sottili.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Enunciare le equazioni di Maxwell e il ruolo della corrente di spostamento.
- Ricavare $c = 1/\sqrt{(\mu_0\varepsilon_0)}$ e collegare f, λ ed energia del fotone.
- Calcolare intensità, ampiezze dei campi e pressione di radiazione.
- Usare la legge di Snell, l'angolo critico, la legge di Malus e l'equazione delle lenti sottili.

Concetti chiave

- Maxwell aggiunse la corrente di spostamento $\varepsilon_0\, d\Phi_E/dt$ alla legge di Ampère. Con essa, le quattro equazioni (Gauss per E e B, Faraday, Ampère–Maxwell) prevedono onde.
- Le onde viaggiano a $c = 1/\sqrt{(\mu_0\varepsilon_0)} = 3.00 \times 10^8$ m/s, con E ⊥ B ⊥ direzione di propagazione ed E = cB. La luce è una di queste onde.
- Le onde trasportano energia, intensità $I = \tfrac{1}{2}c\varepsilon_0 E_0^2$, e quantità di moto, pressione I/c su un assorbitore.
- Lo spettro va dalle onde radio alle microonde, all'infrarosso, al visibile, all'ultravioletto e ai raggi X fino ai gamma; $c = f\lambda$ e l'energia del fotone è $E = hf$.
- A un'interfaccia, la luce si riflette ad angoli uguali e si rifrange secondo la legge di Snell $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$. Uscendo da un mezzo più denso, oltre l'angolo critico tutta la luce viene riflessa.
- Un polarizzatore trasmette $I = I_0\cos^2\theta$ (Malus). Una lente sottile obbedisce a 1/f = 1/d_o + 1/d_i.

Equazioni chiave

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\varepsilon_0},\ \oint \vec{B}\cdot d\vec{A} = 0$$

E· d A=(Q)/(_0),\ B· d A=0

Leggi di Gauss

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt},\ \oint \vec{B}\cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0\varepsilon_0\frac{d\Phi_E}{dt}$$

E· d l=-(d_B)/(dt),\ B· d l=μ_0I+μ_0_0(d_E)/(dt)

Faraday e Ampère–Maxwell

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = f\lambda, \quad E = cB$$

`c=1μ_0_0=f, E=cB`

Onde elettromagnetiche

$$I = \tfrac{1}{2} c \varepsilon_0 E_0^2, \quad p = \frac{I}{c}$$

`I=12c_0E_0^2, p= Ic`

Intensità e pressione di radiazione

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

`n_1θ_1=n_2θ_2`

Legge di Snell

$$I = I_0 \cos^2\theta, \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i}$$

`I=I_0^2θ, 1f=1d_o+1d_i`

Malus e lente sottile

Esempi svolti passo passo

Esempio 10.1 Calcola c da μ_0 ed ε_0.

1. $c = 1/\sqrt{(4\pi \times 10^{-7} \times 8.854 \times 10^{-12})}$.

Risposta: 2.998×10^8 m/s, la velocità misurata della luce, il che rivelò a Maxwell che la luce è elettromagnetica.

Esempio 10.2 La banda del vicino infrarosso di Landsat 9 copre 0.85–0.88 µm e la banda rossa 0.64–0.67 µm (NASA). Trova la frequenza al centro di ogni banda (0.865 e 0.655 µm) e l'energia del fotone nel rosso.

1. $f = c/\lambda$: 3.47×10^{14} Hz e 4.58×10^{14} Hz.
2. $E = hc/\lambda = 3.03 \times 10^{-19}$ J = 1.89 eV.

Risposta: NIR 3.47×10^{14} Hz; rosso 4.58×10^{14} Hz; 1.89 eV.

Esempio 10.3 Luce solare intensa di 1000 W/m² (valore di esempio) colpisce un pannello. Trova E_0, B_0 e la pressione su una superficie assorbente.

1. $E_0 = \sqrt{(2I/(c\varepsilon_0))} = 868$ V/m.
2. $B_0 = E_0/c = 2.90$ μT.
3. $p = I/c = 3.34$ μPa.

Risposta: 868 V/m, 2.90 μT, 3.34 μPa.

Esempio 10.4 La luce entra in acqua (n = 1.33) a 30° dalla normale. Trova l'angolo di rifrazione e l'angolo critico per la luce che esce dall'acqua.

1. $\sin \theta_2 = \sin 30°/1.33$, $\theta_2 = 22.1°$.
2. sin θ_c = 1/1.33, θ_c = 48.8°.

Risposta: 22.1°; 48.8°.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Trova la lunghezza d'onda del Wi-Fi a 2.4 GHz.

   12.5 cm.

2. Quanto impiega circa la luce del Sole a percorrere 1.5×10^{11} m?

   ≈ 8.3 minuti.

3. Trova l'angolo critico del vetro (n = 1.5) verso l'aria.

   41.8°.

4. Luce non polarizzata attraversa due polarizzatori a 60°. Quale frazione della luce uscente dal primo attraversa il secondo?

   $\cos^2 60° = 0.25$.

5. Un oggetto si trova a 30 cm da una lente di distanza focale 10 cm. Dov'è l'immagine?

   1/d_i = 1/10 − 1/30, d_i = 15 cm, reale e capovolta.

6. La banda termica 10 di Landsat 9 è vicina a 11 μm. Trova l'energia del fotone.

   ≈ 0.113 eV, molto meno dei fotoni visibili: i sensori termici leggono il calore, non il colore.

Errori concettuali comuni

Mito: La luce ha bisogno di un mezzo.

In realtà: Le onde EM viaggiano nel vuoto.

Mito: Radio e luce sono cose diverse.

In realtà: Stesse onde, lunghezze d'onda diverse.

Mito: La luce si allontana dalla normale entrando in acqua.

In realtà: Si avvicina alla normale: rallenta.

Flashcard

Equazioni di Maxwell

Gauss (E, B), Faraday, Ampère–Maxwell.

Corrente di spostamento

$\varepsilon_0\, d\Phi_E/dt$.

Velocità della luce

$c = 1/\sqrt{(\mu_0\varepsilon_0)}$.

Relazione d'onda

$c = f\lambda$.

Energia del fotone

$E = hf$.

Legge di Snell

$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$.

Angolo critico

$\sin\theta_c = n_2/n_1$.

Legge di Malus

$I = I_0 \cos^2\theta$.

Lente sottile

$1/f = 1/d_o + 1/d_i$.

Quiz di autoverifica

1. Il termine di corrente di spostamento fu aggiunto da...

Faraday

Ampère

Maxwell

Gauss

Maxwell. Legge di Ampère–Maxwell.

2. In un’onda EM, E e B sono…

parallelli

perpendicolari tra loro e al moto

lungo il moto

non correlati

perpendicolari tra loro e al moto. Onde trasversali.

3. Frequenza più alta significa…

λ più lunga, meno energia per fotone

λ più corta, più energia per fotone

onde più lente

nessun cambiamento

λ più corta, più energia per fotone. $c = f\lambda$; $E = hf$.

4. La riflessione totale interna avviene quando la luce passa…

dall’aria all’acqua

dall’acqua all’aria oltre θ_c

in qualsiasi mezzo

dal vuoto al vetro

dall’acqua all’aria oltre θ_c. Dal più denso al meno denso.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

I satelliti osservano il pianeta misurando onde elettromagnetiche. La NASA elenca le bande di Landsat 9, dalla banda costiera/aerosol a 0.43 µm, attraverso visibile, vicino infrarosso e infrarosso a onde corte, fino all’infrarosso termico a 10.60–12.51 µm. Secondo la NASA queste osservazioni supportano allerte sulla deforestazione tropicale, monitoraggio della qualità dell’acqua e rapporti sullo stato delle colture, e il sensore termico misura la temperatura della superficie terrestre per aiutare a gestire l’acqua nelle regioni soggette a siccità. Ogni banda è una porzione dello spettro scelta perché suolo, acqua e piante la riflettono o la emettono in modo diverso.

Il tour della NASA nello spettro elettromagnetico mostra come ogni banda, dalle onde radio ai raggi gamma, serve a studiare la Terra e lo spazio.

Su Saving Planets: Landsat 9 · GOES-19 · Osservazione della Terra

Fonti: NASA Landsat Science: Landsat 9 instruments and spectral bands (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-instruments/) · NASA Science: Tour of the electromagnetic spectrum (https://science.nasa.gov/ems/)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP2, 16.1 Maxwell’s equations and electromagnetic waves (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/16-1-maxwells-equations-and-electromagnetic-waves): Maxwell.
- OpenStax UP2, 16.3 Energy carried by EM waves (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/16-3-energy-carried-by-electromagnetic-waves): Intensità.
- OpenStax UP2, 16.5 The electromagnetic spectrum (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/16-5-the-electromagnetic-spectrum): Spettro.
- OpenStax UP3, 1.3 Refraction (https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/1-3-refraction): Legge di Snell.
- OpenStax UP3, 1.7 Polarization (https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/1-7-polarization): Polarizzazione.
- OpenStax UP3, 2.4 Thin lenses (https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/2-4-thin-lenses): Lenti.
- PhET: Bending Light (https://phet.colorado.edu/en/simulations/bending-light): Interattivo.

Guarda la lezione

Maxwell's Equations and Electromagnetic Waves I (https://oyc.yale.edu/physics/phys-201/lecture-14) (in inglese)

Ramamurti Shankar, PHYS 201 Fundamentals of Physics II, Open Yale Courses. Licenza: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Condizioni d’uso (https://oyc.yale.edu/terms). Link fornito solo per lo studio

gratuito; Saving Planets non è affiliato a questa università né approvato da essa.

☐ **Ho finito questa unità**

Esercizi

Questi esercizi stanno dentro ogni unità. Falli su carta, poi apri la risposta.

1. Carica, legge di Coulomb e campi elettrici
   4 esercizi
2. Legge di Gauss
   4 esercizi
3. Potenziale elettrico e capacità
   4 esercizi
4. Corrente, resistenza e circuiti in corrente continua
   4 esercizi
5. Campi e forze magnetiche
   4 esercizi
6. Sorgenti di campi magnetici: Biot–Savart e Ampère
   4 esercizi
7. Induzione elettromagnetica: Faraday e Lenz
   4 esercizi
8. Induttanza, circuiti RL e LC
   4 esercizi
9. Circuiti in corrente alternata, trasformatori e rete elettrica
   4 esercizi
10. Equazioni di Maxwell, onde elettromagnetiche e ottica
    6 esercizi

Il laboratorio (PHYS 210L)

Il laboratorio è la parte pratica del corso, che vale 1 credito in un tipico piano universitario. Qui è gratuito e solo per esercitarsi.

Ogni laboratorio può essere svolto interamente in una simulazione PhET gratuita, e la maggior parte ha anche una versione casalinga che usa solo pile da 9 V o meno. Non usare mai la corrente di rete, non aprire mai un dispositivo che si collega alla presa e non cortocircuitare mai una pila.

Riferimento per la sicurezza: OSHA: Electrical safety (https://www.osha.gov/electrical)

Laboratorio A: mappare campi elettrici ed equipotenziali

SETTIMANA 2

Obiettivo: Misura come il campo di una carica puntiforme diminuisce con la distanza, conferma la legge dell'inverso del quadrato con un fit log-log e mappa le equipotenziali attorno a un dipolo.

$$E = \frac{kq}{r^2} \;\Rightarrow\; \log E = \log(kq) - 2\log r$$

E=(kq)/(r^2)\ \ E=(kq)-2 r

Una retta di pendenza −2 in un grafico log-log

Procedimento

1. Apri PhET Charges and Fields. Posiziona una sola carica di +1 nC e attiva valori e griglia.
2. Usa il sensore di campo E a 0.5, 1.0, 1.5 e 2.0 m e registra E.
3. Traccia log E in funzione di log r e adatta una retta; confronta la pendenza con −2 e l'intercetta con log(kq).
4. Aggiungi una carica di −1 nC a 1 m, usa il voltmetro per tracciare le equipotenziali a 0 V e ±10 V e disegna le linee di campo perpendicolari a esse.

Tabella dei dati

r (m)	E (V/m)
0.5	35.95
1.0	8.99
1.5	3.99
2.0	2.25

Valori calcolati da $E = kq/r^2$ per q = 1 nC; le letture della simulazione dovrebbero coincidere a meno degli arrotondamenti.

Calcolo di esempio

1. Da 0.5 m a 2.0 m (×4 in r), E scende da 35.95 a 2.25 V/m (×1/16), quindi la pendenza log-log è −2.
2. L'equipotenziale a 0 V del dipolo è l'asse del segmento tra le due cariche, eppure lì il campo non è nullo.

> **Sicurezza**
>
> - Nessuna, oltre al normale uso del computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Strofina un palloncino sui capelli e guardalo sollevare pezzetti di carta a distanze diverse: uno sguardo qualitativo a un campo che cala rapidamente con la distanza.

PhET: Charges and Fields (https://phet.colorado.edu/en/simulations/charges-and-fields) · PhET: Coulomb's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/coulombs-law)

Legame con il pianeta: Con mappe di campo come queste gli ingegneri progettano i campi elettrici dentro le celle solari e le apparecchiature ad alta tensione. U.S. DOE: How does solar work? (https://www.energy.gov/eere/solar/how-does-solar-work)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio B: capacità e distanza tra le armature

SETTIMANA 5

Obiettivo: Misura come la capacità di un condensatore piano dipende dalla distanza tra le armature e ricava ε_0 dai dati.

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d}$$

```
C=(_0A)/(d)
```

Traccia C in funzione di 1/d; la pendenza è $\varepsilon_0 A$

Procedimento

1. Apri PhET Capacitor Lab: Basics. Imposta l'area delle armature a 400 mm² e collega la batteria a 1.5 V.
2. Leggi C con distanze di 2, 4, 6, 8 e 10 mm.
3. Traccia C in funzione di 1/d e adatta una retta passante per l'origine; dividi la pendenza per A per ottenere ε_0.
4. Con d = 5 mm, registra l'energia immagazzinata e confrontala con ½CV².

Tabella dei dati

d (mm)	C (pF)
2	1.77
4	0.885
6	0.590
8	0.443
10	0.354

Valori calcolati da $C = \varepsilon_0 A/d$; la simulazione li arrotonda.

Calcolo di esempio

1. C × d è costante: 1.77 pF × 2 mm = 0.354 pF × 10 mm, quindi C ∝ 1/d.
2. Pendenza $\varepsilon_0 A = 3.54 \times 10^{-15}$ F·m, quindi $\varepsilon_0 = 3.54 \times 10^{-15}/(4 \times 10^{-4}) = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m.
3. A 5 mm, C = 0.708 pF e U = ½CV² = 0.797 pJ a 1.5 V.

> **Sicurezza**
>
> - Nessuna, oltre al normale uso del computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Facoltativo: con un multimetro che misura la capacità, misura due fogli di alluminio separati da uno, due e tre fogli di carta. C dovrebbe diminuire man mano che la pila cresce.

PhET: Capacitor Lab: Basics (https://phet.colorado.edu/en/simulations/capacitor-lab-basics)

Legame con il pianeta: I condensatori livellano la potenza in auto elettriche, inverter solari e rete; la stessa $C = \kappa\varepsilon_0 A/d$ ne determina le dimensioni. FuelEconomy.gov (DOE/EPA): All-electric vehicles (https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml)

☐ **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio C: legge di Ohm, leggi di Kirchhoff e costante di tempo RC

SETTIMANA 7

Obiettivo: Conferma la legge di Ohm, verifica le leggi di Kirchhoff in un circuito a due maglie e misura la costante di tempo di un condensatore in carica.

$$V_C = V_0\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

`V_C=V_0(1-e^-t/RC)`

Curva di carica; ln(1 − V_C/V_0) = −t/RC è una retta

Procedimento

1. Legge di Ohm: collega un resistore da 1 kΩ a 1.5, 3.0, 4.5, 6.0 e 9.0 V (pile AA in serie o la batteria PhET) e registra la corrente; traccia I in funzione di V.
2. Kirchhoff: in PhET Circuit Construction Kit: DC, costruisci il circuito dell'unità 4 (12 V, 6 V, 2 Ω, 3 Ω, 6 Ω) e misura le tre correnti; verifica le somme al nodo e nelle maglie.
3. RC: carica un condensatore da 100 µF da 9 V attraverso 10 kΩ, leggendo V_C ogni secondo; traccia ln(1 − V_C/9) in funzione di t e ricava RC dalla pendenza.

Tabella dei dati

t (s)	V_C (V), 10 kΩ e 100 µF da 9 V
0	0.00
1	5.69
2	7.78
3	8.55
5	8.94

Valori calcolati per componenti ideali; i condensatori reali spesso differiscono del ±20% dal valore di targa, quindi il tuo τ può variare.

Calcolo di esempio

1. Legge di Ohm: la pendenza di I in funzione di V è 1 mA/V, quindi R = 1.00 kΩ; a 9 V il resistore dissipa solo 81 mW.
2. Kirchhoff: 2 A − 0.667 A = 1.33 A al nodo, e 12 − 2(2) − 6(1.33) = 0 lungo la maglia 1.
3. RC: la retta di ln(1 − V_C/9) ha pendenza −1.0 s^{-1}, quindi τ = 1.0 s = (10 kΩ)(100 µF).

> **Sicurezza**

- Usa solo pile da 9 V o meno; mai la corrente di rete.
- Non collegare mai un filo direttamente ai capi di una pila: si scalda in fretta e può bruciare.
- I condensatori elettrolitici hanno un terminale +; collegalo verso il lato + della pila e usane uno con tensione nominale superiore a 9 V.

Alternativa a casa o virtuale

- Tutto funziona con un multimetro, pile AA, una pila da 9 V, resistori e un condensatore su una breadboard; cronometra le letture RC filmando il multimetro con il telefono.

PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc) · PhET: Ohm's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/ohms-law) · PhET: Resistance in a Wire (https://phet.colorado.edu/en/simulations/resistance-in-a-wire)

Legame con il pianeta: Gli impianti solari sono cablati con le stesse regole: le stringhe in serie aumentano la tensione e quelle in parallelo la corrente. U.S. DOE: How does solar work? (https://www.energy.gov/eere/solar/how-does-solar-work)

☐ **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio D: misurare campi magnetici, compreso quello terrestre

SETTIMANA 9

Obiettivo: Misura il campo magnetico terrestre con il magnetometro di un telefono, mappa il campo di un filo in simulazione e confronta entrambi con la teoria.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

B=(μ_0I)/(2π r)

Campo di un filo lungo

Procedimento

1. Apri un'app magnetometro lontano da metalli ed elettronica. Registra l'intensità totale del campo in cinque punti e fai la media.
2. Confronta con l'intervallo indicato dalla NOAA, circa 25000–65000 nT sulla superficie terrestre.
3. In PhET Magnets and Electromagnets, osserva come cambia il campo con la corrente e il numero di spire; poi calcola B per un filo lungo con I = 2 A a r = 1, 2 e 4 cm e traccia B in funzione di 1/r.
4. Avvicina una calamita da frigorifero al telefono e annota la distanza a cui il suo campo eguaglia quello terrestre.

Tabella dei dati

r (cm)	B per un filo da 2 A (μT)
1	40
2	20
4	10

Valori del filo calcolati da $\mu_0 I/(2\pi r)$. Le letture del campo terrestre dipendono dalla posizione; il calcolatore della NOAA fornisce il totale atteso per il tuo luogo.

Calcolo di esempio

1. B ∝ 1/r: raddoppiare la distanza dimezza il campo, quindi il grafico di B in funzione di 1/r è una retta per l'origine con pendenza $\mu_0 I/(2\pi)$ = 0.4 μT·m.
2. Un filo da 2 A eguaglia il campo terrestre di 50 μT a r = $\mu_0 I/(2\pi \times 50\ \mu T)$ = 0.8 cm.

> **Sicurezza**
>
> - Tieni i magneti potenti lontano dagli slot per schede dei telefoni, dai pacemaker e dalle carte di credito.

- Non far passare corrente elevata in un filo nudo a casa; la parte del filo di questo laboratorio si fa in simulazione.

Alternativa a casa o virtuale

- I passaggi con magnetometro e calamita da frigorifero sono la versione casalinga.

PhET: Magnets and Electromagnets (https://phet.colorado.edu/en/simulations/magnets-and-electromagnets) · PhET: Magnet and Compass (https://phet.colorado.edu/en/simulations/magnet-and-compass) · NOAA magnetic field calculators (https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml)

Legame con il pianeta: Conoscere il campo normale è la base per individuare le tempeste geomagnetiche, che secondo la NOAA possono indurre correnti dannose nelle reti elettriche. NOAA NCEI: Geomagnetism frequently asked questions (https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/faqgeom.shtml) · NOAA Space Weather Prediction Center: Geomagnetic storms (https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/geomagnetic-storms)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio E: induzione e un modello di generatore

SETTIMANA 10

Obiettivo: Mostra che la f.e.m. indotta dipende dalla rapidità di variazione del flusso e che la f.e.m. di picco di un generatore cresce in proporzione alla velocità di rotazione.

$$\varepsilon_{\max} = NBA\omega$$

_=NBAω

F.e.m. di picco di una bobina rotante

Procedimento

1. In PhET Faraday’s Law, fai passare il magnete nella bobina lentamente e poi rapidamente; registra ogni volta la tensione di picco e nota il cambio di segno all’uscita.
2. In PhET Faraday’s Electromagnetic Lab (scheda Generator), cambia la velocità della turbina e registra la risposta di picco della lampadina o del voltmetro.
3. Calcola ε_max per una bobina modello con N = 200, A = 0.01 m² e B = 0.05 T a 1, 2 e 3 giri al secondo.
4. A casa: avvolgi 100 spire di filo sottile isolato attorno a un tubo di carta igienica, collega un multimetro su mV e lascia cadere un magnete potente al suo interno.

Tabella dei dati

Velocità di rotazione (giri/s)	F.e.m. di picco (V)
1	0.628
2	1.26
3	1.88

Valori calcolati per la bobina modello (valori di esempio).

Calcolo di esempio

1. ε_max = NBA(2πf) = 200 × 0.05 × 0.01 × 2π f = 0.628 V per giro/s, quindi raddoppiare la velocità raddoppia la f.e.m.
2. Un magnete più veloce dà un impulso più alto e più breve; l’area sotto la curva f.e.m.-tempo (variazione totale di flusso × N) resta la stessa.

> **Sicurezza**
>
> - I potenti magneti al neodimio si attraggono con forza e possono pizzicare la pelle o frantumarsi; maneggiali uno alla volta.

- Tieni i magneti lontano da pacemaker ed elettronica.

Alternativa a casa o virtuale

- Il passaggio bobina-magnete è la versione casalinga; va bene qualsiasi multimetro sulla scala dei millivolt.

PhET: Faraday's Law (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-law) · PhET: Faraday's Electromagnetic Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-electromagnetic-lab) · PhET: Generator (https://phet.colorado.edu/en/simulations/generator)

Legame con il pianeta: Ogni turbina eolica e centrale idroelettrica esegue questo laboratorio su scala di megawatt: la turbina fa girare un generatore per produrre elettricità. DOE degli Stati Uniti: come funzionano le turbine eoliche? (in inglese) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work) · U.S. DOE: How hydropower works (https://www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works)

☐ **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio F: rifrazione e legge di Snell

SETTIMANA 14

Obiettivo: Misura gli angoli di rifrazione dall'aria all'acqua, trova l'indice di rifrazione e osserva la riflessione totale interna.

$$n = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$$

```
n=(θ_1)/(θ_2)
```

Pendenza di sin θ_1 in funzione di sin θ_2

Procedimento

1. In PhET Bending Light, imposta l'acqua come mezzo inferiore e punta il laser da 10° a 60° dalla normale a passi di 10°; leggi l'angolo di rifrazione con il goniometro.
2. Traccia sin θ_1 in funzione di sin θ_2 e adatta una retta per l'origine; la pendenza è n.
3. Metti il laser nell'acqua e aumenta l'angolo finché il raggio rifratto scompare; registra l'angolo critico.
4. A casa: punta un laser a bassa potenza o un fascio stretto di torcia in una scatola trasparente d'acqua con una goccia di latte e misura gli angoli su un goniometro stampato.

Tabella dei dati

θ_1 in aria (°)	θ_2 in acqua (°)
10	7.5
20	14.9
30	22.1
40	28.9
50	35.2
60	40.6

Valori calcolati con la legge di Snell e n = 1.33.

Calcolo di esempio

1. sin 30°/sin 22.1° = 0.500/0.376 = 1.33, e ogni riga dà lo stesso rapporto.
2. Angolo critico dall'acqua all'aria: $\sin^{-1}(1/1.33) = 48.8°$.

> **Sicurezza**

- Usa solo un puntatore laser di classe 2 (sotto 1 mW), non guardare mai nel fascio e non puntarlo mai agli occhi di nessuno; attenzione ai riflessi su acqua e vetro.

Alternativa a casa o virtuale

- Il passaggio con la scatola d'acqua è la versione casalinga.

PhET: Bending Light (https://phet.colorado.edu/en/simulations/bending-light)

Legame con il pianeta: I sensori satellitari sono costruiti con lenti, specchi e filtri progettati secondo queste stesse leggi di rifrazione e riflessione. NASA Landsat Science: Landsat 9 instruments and spectral bands (https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-instruments/)

☐ **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Serie di esercizi per gli esami

Cronometrati: circa 10 minuti per problema. Poi confronta con le soluzioni complete.

Esercizi di preparazione all'esame intermedio (unità 1–5)

1. Cariche di +2.0 μC e +8.0 μC distano 0.30 m. Trova la forza tra loro e il punto tra loro in cui E = 0.

    1. $F = k(2 \times 10^{-6})(8 \times 10^{-6})/0.09$.
    2. $k(2)/x^2 = k(8)/(0.3 - x)^2$ dà $x = 0.10$ m.

    Risposta: 1.60 N, repulsiva; a 0.10 m dalla carica di 2.0 μC.

2. Una superficie chiusa racchiude una carica di 3.0 nC. Trova il flusso netto.

    1. $\Phi = Q/\varepsilon_0$.

    Risposta: ≈ 339 $N \cdot m^2/C$.

3. Un condensatore da 10 μF è caricato a 12 V. Trova Q e U.

    1. $Q = CV$; $U = \frac{1}{2}CV^2$.

    Risposta: 120 μC; 0.72 mJ.

4. Una pila da 9 V alimenta 3 Ω in serie con una coppia in parallelo di 6 Ω e 3 Ω. Trova la corrente e la potenza totale.

    1. Coppia in parallelo = 2 Ω; totale 5 Ω.
    2. $I = 9/5$; $P = IV$.

    Risposta: 1.8 A; 16.2 W.

5. Un protone si muove a 1.0×10^6 m/s attraverso un campo di 0.20 T. Trova il raggio dell'orbita.
    1. $r = mv/(eB)$.

    Risposta: ≈ 5.22 cm.

Serie di esercizi finale (tutte le unità)

1. Trova B a 0.10 m da un filo lungo percorso da 50 A.
    1. $B = \mu_0 I/(2\pi r)$.

    Risposta: 100 μT, circa il doppio del campo terrestre.

2. Una bobina di 50 spire di area 0.05 m^2 ruota a 50 giri/s in un campo di 0.20 T. Trova la f.e.m. di picco.
    1. $\varepsilon = NBA\omega$, $\omega = 2\pi \times 50$.

    Risposta: ≈ 157 V.

3. Un circuito RL ha L = 0.5 H e R = 100 Ω. Trova τ e la frazione della corrente finale dopo 5 ms.
    1. $\tau = L/R$.

    Risposta: 5 ms; 63%.

4. Trasmetti 50 MW a 230 kV su una linea con resistenza di 5 Ω. Trova la corrente e la perdita.
    1. $I = P/V$; perdita $= I^2R$.

    Risposta: 217 A; 0.236 MW (0.47%).

5. Trova la frequenza e l'energia del fotone di una luce da 500 nm.
    1. $f = c/\lambda$; $E = hf$.

    Risposta: 6.00×10^{14} Hz; 2.48 eV.

6. La luce entra nel vetro (n = 1.5) a 45°. Trova l'angolo di rifrazione.
    1. $\sin \theta_2 = \sin 45°/1.5$.

    Risposta: 28.1°.

Formulario

$$F = k|q_1 q_2|/r^2 \qquad \vec{E} = \vec{F}/q$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = Q_{\text{enc}}/\varepsilon_0$$

$$V = kq/r,\ E_x = -dV/dx$$

$$C = \kappa\varepsilon_0 A/d,\ U = \tfrac{1}{2}CV^2$$

$$V = IR,\ R = \rho L/A,\ P = IV$$

$$\tau = RC,\ \tau = L/R$$

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B},\ r = mv/(qB)$$

$$\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B},\ \tau = NIAB\sin\theta$$

$$B = \mu_0 I/(2\pi r),\ B = \mu_0 nI$$

$$\varepsilon = -N\, d\Phi_B/dt,\ \varepsilon = BLv$$

$$L = \mu_0 N^2 A/l,\ U = \tfrac{1}{2}LI^2$$

$$X_L = \omega L,\ X_C = 1/(\omega C),\ Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)}$$

$$V_2/V_1 = N_2/N_1$$

$$c = 1/\sqrt{\mu_0\varepsilon_0} = f\lambda,\ E = hf$$

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2,\ 1/f = 1/d_o + 1/d_i$$

Costanti

Costante	Valore
Carica elementare, e	1.602 × 10⁻¹⁹ C
Costante di Coulomb, k = 1/(4πε₀)	8.988 × 10⁹ N·m²/C²
Permittività del vuoto, ε₀	8.854 × 10⁻¹² F/m
Permeabilità del vuoto, μ₀	1.257 × 10⁻⁶ T·m/A (≈ 4π × 10⁻⁷)
Velocità della luce, c	2.998 × 10⁸ m/s
Massa dell’elettrone, mₑ	9.109 × 10⁻³¹ kg
Massa del protone, mₚ	1.673 × 10⁻²⁷ kg
Costante di Planck, h	6.626 × 10⁻³⁴ J·s

Fonte: NIST: costanti fisiche fondamentali (in inglese) (https://physics.nist.gov/cuu/Constants/)

Testi e simulazioni gratuiti

Usa questi libri, lezioni e simulazioni gratuiti insieme al corso.

- OpenStax University Physics Volume 2 (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/1-introduction): Libro di testo gratuito e completo per questo corso.
- MIT OpenCourseWare 8.02 Physics II: Electricity and Magnetism (https://ocw.mit.edu/courses/8-02-physics-ii-electricity-and-magnetism-spring-2019/): Lezioni, esercizi ed esami del MIT, gratuiti.
- OpenStax University Physics Volume 3 (optics) (https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/1-2-the-law-of-reflection): Capitoli di ottica gratuiti per l'unità 10.
- PhET: Charges and Fields (https://phet.colorado.edu/en/simulations/charges-and-fields): Posiziona cariche e mappa campi ed equipotenziali.
- PhET: Circuit Construction Kit: DC (https://phet.colorado.edu/en/simulations/circuit-construction-kit-dc): Costruisci e misura circuiti.
- PhET: Faraday's Electromagnetic Lab (https://phet.colorado.edu/en/simulations/faradays-electromagnetic-lab): Magneti, bobine, generatori e trasformatori.

Glossario

Legge di Ampère
$\oint B \cdot dl = \mu_0 I_enc$.

Capacità
Carica immagazzinata per volt, $C = Q/V$.

Legge di Coulomb
Forza tra cariche puntiformi, $F = k|q_1 q_2|/r^2$.

Angolo critico
Angolo oltre il quale la luce viene totalmente riflessa all'interno di un mezzo più denso.

Corrente di spostamento
$\varepsilon_0 \, d\Phi_E/dt$, l'aggiunta di Maxwell alla legge di Ampère.

EMF
Energia per carica fornita da una sorgente come una batteria o un generatore.

Campo elettrico
Forza per unità di carica.

Potenziale elettrico
Energia potenziale per unità di carica, in volt.

Legge di Faraday
Un flusso magnetico variabile induce una f.e.m.

Legge di Gauss
Il flusso elettrico netto uscente da una superficie chiusa è uguale a Q_enc/ε_0.

Corrente geomagneticamente indotta
Corrente indotta in reti e gasdotti dalle tempeste geomagnetiche.

Impedenza
Opposizione totale alla corrente alternata, Z.

Induttanza

F.e.m. per rapidità di variazione della corrente, in henry.

Legge di Lenz
La corrente indotta si oppone alla variazione di flusso.

Flusso magnetico
$\Phi_B = \int B \cdot dA$, in weber.

Equazioni di Maxwell
Quattro leggi che unificano elettricità, magnetismo e luce.

Fattore di potenza
$\cos \varphi$, la frazione della potenza apparente che compie lavoro.

Valore efficace
Valore efficace (radice della media dei quadrati), $V_0/\sqrt{2}$ per un'onda sinusoidale.

Resistività
Proprietà del materiale ρ in $R = \rho L/A$.

Legge di Snell
$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$.

Trasformatore
Due bobine accoppiate che cambiano la tensione alternata.

Griglia di autovalutazione

Non si assegnano voti né crediti. Usala per valutare onestamente a che punto sei in ogni unità.

Livello	Come si presenta
4 · Padronanza	Imposta campi e circuiti da una descrizione, sceglie la legge giusta, gestisce segni e versi e controlla unità e casi limite.
3 · Competente	Risolve gli esercizi con qualche errore occasionale di segno o di unità.
2 · In sviluppo	Segue gli esempi svolti ma fatica a scegliere una superficie gaussiana, un percorso o la regola della mano destra.
1 · Principiante	Inserisce numeri nelle formule senza un disegno; deve rivedere l'unità.

Pesi suggeriti se vuoi un punteggio

Parte	Peso
Esercizi	25%
Laboratori (PHYS 210L)	20%

Parte	Peso
Serie di esercizi di metà corso	25%
Serie di esercizi finale	30%

Punta al livello 3 o superiore in ogni unità prima di passare al corso successivo.

Corsi correlati

- Equazioni differenziali MATH 220
- Statica ENGR 211
- Analisi III MATH 210
- Tutti i corsi