VERIFICA

Verifica di fine parte · Induzione e onde elettromagnetiche

Tempo indicativo: 100 minuti · Punteggio totale: 100 punti

Fisica 5 · Parte IV · Induzione e onde elettromagnetiche · versione 1.0
Verifica: Verifica di fine parte · Induzione e onde elettromagnetiche · pagine 305–312 del volume completo · estratto per lo studio

La verifica riguarda i capitoli 8, 9 e 10. È ammessa la calcolatrice scientifica. Scrivi sempre le formule che usi, i passaggi e le unità di misura: un risultato senza unità è incompleto. Esprimi i risultati con un numero di cifre significative coerente con i dati. Dove non è indicato diversamente usa $c = 3{,}00 \times 10^8$ m/s, $g = 9{,}8$ m/s^2 e le costanti della Tabella A.1 dell'Appendice; le tensioni e le correnti alternate sono valori efficaci, salvo indicazione contraria, e i trasformatori sono ideali. La domanda sulla fonte (Parte C) vale da sola 14 punti: leggi il testo con attenzione e rispondi con frasi complete.

Parte A · Domande a scelta multipla (10 domande, 2 punti ciascuna)

1. ● Un weber al secondo equivale a:
   - **A.** 1 T
   - **B.** 1 V
   - **C.** 1 A
   - **D.** 1 H

2. ●● Un magnete, con il polo nord rivolto verso una spira di rame, viene allontanato dalla spira lungo il suo asse. Quale affermazione è corretta?
   - **A.** la spira respinge il magnete
   - **B.** la spira non esercita forze, perché il magnete si allontana
   - **C.** la corrente indotta produce, dentro la spira, un campo opposto a quello del magnete
   - **D.** la spira attrae il magnete

3. ●● Una sbarretta scorre a velocità costante su due guide collegate da un resistore, in un campo magnetico uniforme perpendicolare al piano delle guide. Se la velocità raddoppia, a parità di campo, di lunghezza e di resistenza, la potenza dissipata nel resistore:
   - **A.** quadruplica
   - **B.** raddoppia
   - **C.** resta la stessa, perché il campo non cambia
   - **D.** si dimezza, perché raddoppia la forza frenante

4. ● L'induttanza di una bobina:
   - **A.** raddoppia se raddoppia la corrente che la percorre
   - **B.** si misura in weber
   - **C.** dipende dalla forma della bobina, dal numero di spire e dal materiale del nucleo, non dalla corrente
   - **D.** è nulla se la corrente è costante

5. ●● In un alternatore la bobina ruota con velocità angolare costante in un campo magnetico uniforme. La f.e.m. indotta è massima negli istanti in cui:
   A. il flusso attraverso la bobina è massimo
   B. il flusso attraverso la bobina è nullo, perché il piano della bobina è parallelo alle linee di campo
   C. la bobina è perpendicolare alle linee di campo
   D. mai: la f.e.m. di un alternatore è costante

6. ●● Un condensatore viene collegato direttamente alla presa di casa (230 V, 50 Hz). L'isolante fra le sue armature deve sopportare una tensione di almeno:
   A. 115 V, la metà del valore della presa
   B. 163 V, cioè 230 V/√2
   C. 230 V, perché la tensione della presa non supera mai quel valore
   D. circa 325 V, il valore massimo della tensione

7. ●● Un trasformatore ideale abbassa la tensione da 230 V a 11,5 V; il secondario eroga una corrente di 2,0 A. La corrente nel primario vale:
   A. 0,10 A
   B. 2,0 A, perché la corrente è la stessa nei due avvolgimenti
   C. 40 A
   D. 0,20 A

8. ● Mentre un condensatore piano si carica, nello spazio vuoto fra le armature non passa alcuna carica. Intorno a quello spazio:
   A. non c'è campo magnetico, perché non c'è corrente
   B. c'è soltanto un campo elettrico con linee chiuse
   C. c'è un campo magnetico, prodotto dal campo elettrico che cresce fra le armature
   D. c'è un campo magnetico solo se fra le armature c'è un dielettrico

9. ● Nel vuoto, le onde radio e i raggi gamma:
   A. sono fenomeni di natura diversa: le prime sono onde meccaniche, i secondi onde elettromagnetiche
   B. sono onde elettromagnetiche che viaggiano alla stessa velocità e differiscono per la lunghezza d'onda
   C. viaggiano a velocità diverse, perché i raggi gamma hanno frequenza maggiore
   D. hanno la stessa lunghezza d'onda ma frequenze diverse

10. ●● Luce non polarizzata di intensità I_0 attraversa un polarizzatore e poi un secondo polarizzatore con l'asse inclinato di 60° rispetto al primo. L'intensità che esce è:
    A. $I_0/8$
    B. $I_0/4$
    C. $I_0/2$
    D. $3I_0/8$

Parte B · Esercizi (5 esercizi, 6 punti ciascuno)

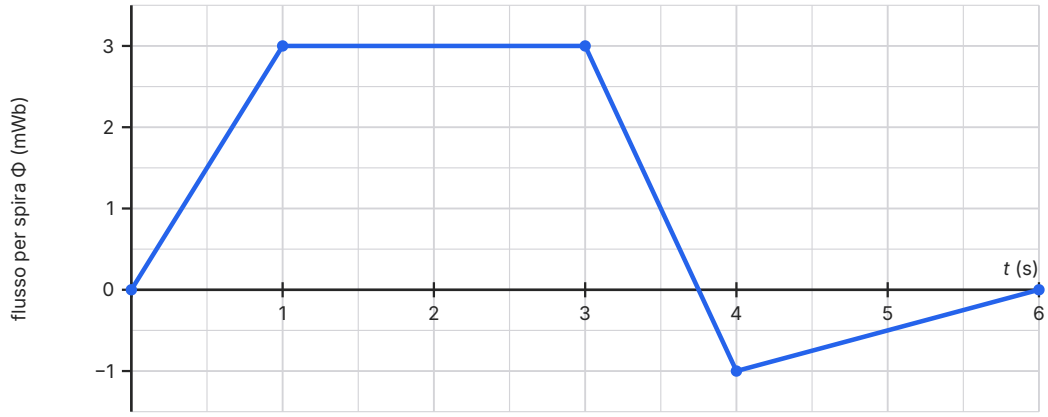


Figura V4.1 Il flusso del campo magnetico attraverso ciascuna spira della bobina del primo esercizio della Parte B, in funzione del tempo. La griglia fine ha passo 0,5 s e 0,5 mWb; fra un punto segnato e il successivo il flusso varia in modo uniforme.

11. ●● Una bobina di 40 spire, con resistenza totale 4,0 Ω, è collegata a un amperometro. La Figura V4.1 riporta il flusso del campo magnetico attraverso ciascuna spira in funzione del tempo. a) Calcola la f.e.m. indotta, con il suo segno, negli intervalli 0–1 s, 1–3 s, 3–4 s e 4–6 s (3 punti). b) Calcola la corrente indotta in ciascun intervallo (1 punto). c) All'istante $t = 3{,}75$ s il flusso è nullo: è nulla anche la f.e.m.? E fra 1 s e 3 s, quando il flusso è massimo? Motiva (1 punto). d) Quanta carica attraversa l'amperometro fra 3 s e 4 s? (1 punto)

12. ●● Un magnete al neodimio di massa 20 g viene lasciato cadere dentro un tubo verticale di rame lungo 1,00 m; quasi subito raggiunge una velocità costante di 0,25 m/s, che mantiene fino all'uscita. a) Calcola il tempo di discesa nel tubo di rame e quello in un tubo di plastica uguale, in cui il magnete cade liberamente (trascura l'attrito dell'aria) (2 punti). b) Quanta energia potenziale gravitazionale perde il magnete nel tubo di rame, e quanta ne ritrova come energia cinetica all'uscita? Dove va a finire la differenza? (2 punti) c) Calcola la potenza dissipata nel tubo durante la discesa (1 punto). d) Se il tubo di rame viene tagliato per tutta la lunghezza con una sottile fessura, il magnete scende più in fretta. Perché? Quale accorgimento usato nei nuclei dei trasformatori si basa sulla stessa idea? (1 punto)

13. ●● Una lampada alogena da «12 V – 50 W» è alimentata da un trasformatore collegato alla rete a 230 V; il primario ha 1380 spire. a) Quante spire ha il secondario? (1 punto) b) Calcola la corrente nella lampada e quella nel primario (2 punti). c) Calcola la resistenza della lampada in funzionamento e i valori massimi della tensione e della corrente nella lampada (2 punti). d) La lampada, collegata direttamente a una batteria da 12 V, brillerebbe allo stesso modo? E che cosa succederebbe se si collegasse la batteria al primario del trasformatore? (1 punto)

14. ●● Un router Wi-Fi trasmette onde elettromagnetiche alla frequenza di 2,4 GHz. a) Calcola la lunghezza d'onda e la lunghezza di un'antenna a dipolo a mezz'onda adatta a questa frequenza (2 punti). b) In un punto della stanza il campo elettrico dell'onda ha ampiezza 3,0 V/m. Calcola l'ampiezza del campo magnetico e confrontala con il campo magnetico terrestre, circa 5×10^{-5} T (2 punti). c) Quanto tempo impiega il segnale ad attraversare un appartamento lungo 15 m? (1 punto) d) In quale banda dello spettro cade la radiazione del Wi-Fi? È ionizzante? Che cosa significa, per questo tipo di radiazione, che «gli enti di protezione stabiliscono limiti di esposizione»? (1 punto)

15. ●● a) Luce non polarizzata di intensità 120 W/m^2 attraversa quattro polarizzatori in fila, con gli assi a 0°, 30°, 60° e 90° rispetto a una stessa direzione. Calcola l'intensità dopo ciascun polarizzatore (3 punti). b) Quanta luce esce se si tolgono i due polarizzatori intermedi? Spiega perché, con i polarizzatori intermedi, passa più luce, anche se ciascun filtro assorbe soltanto (1 punto). c) Lo schermo di un telefono emette luce polarizzata in una direzione inclinata di 45° rispetto alla verticale. Quale frazione della sua luce passa attraverso occhiali da sole polarizzati, che hanno l'asse verticale? Che cosa succede inclinando la testa di 45° da una parte o dall'altra? (1 punto) d) Perché la luce si può polarizzare e il suono nell'aria no? (1 punto)

Parte C · Problemi e domanda sulla fonte (50 punti in totale)

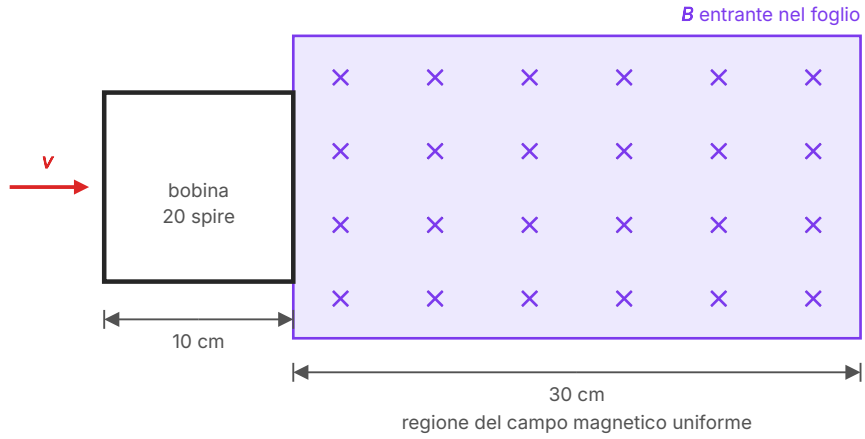


Figura V4.2 La bobina del primo problema della Parte C (vista dall'alto, in scala), nell'istante $t = 0$, quando il suo lato destro raggiunge il bordo della regione in cui c'è il campo magnetico uniforme, entrante nel foglio.

16. ●● **(12 punti)** Una bobina quadrata di 20 spire, di lato 10 cm e resistenza totale 0,50 Ω, si muove con velocità costante di 0,50 m/s verso una regione larga 30 cm in cui c'è un campo magnetico uniforme di 0,40 T, entrante nel foglio (Figura V4.2); fuori dalla regione il campo è nullo. All'istante $t = 0$ il lato destro della bobina raggiunge il bordo del campo. a) Descrivi come cambia il flusso attraverso una spira dall'istante $t = 0$ fino a quando la bobina è uscita del tutto dalla regione; calcola il flusso massimo per spira e disegna qualitativamente il grafico del flusso in funzione del tempo, indicando gli istanti in cui cambia andamento (3 punti). b) Calcola la f.e.m. e la corrente indotte durante l'entrata, durante la permanenza nel campo e durante l'uscita, e indica con la legge di Lenz il verso della corrente (orario o antiorario, guardando la figura) all'entrata e all'uscita (3 punti). c) Quale forza bisogna applicare alla bobina, durante l'entrata, per mantenerne costante la velocità? Verifica che la potenza meccanica è uguale alla potenza elettrica dissipata (3 punti). d) Calcola l'energia trasformata in calore nell'intero attraversamento. Come cambierebbero la forza necessaria e quell'energia se la bobina si muovesse a velocità doppia? Quale dispositivo descritto nel capitolo 8 sfrutta questo comportamento? (3 punti)

17. ●●● **(12 punti)** Una piccola centrale idroelettrica di montagna ha un alternatore la cui bobina, di 200 spire di area 0,050 m^2, ruota a 50 giri al secondo in un campo magnetico uniforme di 0,60 T, con l'asse di rotazione perpendicolare al campo (considera per semplicità un'unica bobina). a) Calcola la velocità angolare, il valore massimo e il valore efficace della f.e.m. (3 punti). b) Con la legge di Faraday–Neumann del capitolo 8 calcola la f.e.m. media nel quarto di giro in cui la bobina passa dalla posizione perpendicolare al campo a quella parallela; confrontala con il valore massimo e spiega perché è minore (3 punti). c) La centrale immette in una linea la potenza di 400 kW. Un trasformatore elevatore porta la tensione dal valore efficace trovato in a) a 20 kV: calcola il rapporto fra le spire del secondario e quelle del primario, la corrente efficace in uscita dall'alternatore e quella nella linea (3 punti). d) La linea ha una resistenza complessiva di 2,0 Ω. Calcola la potenza persa per effetto Joule a 20 kV e quella che si perderebbe collegando la linea direttamente all'alternatore, in valore assoluto e in percentuale della potenza trasmessa. Commenta il rapporto fra i due risultati (3 punti).

18. ●● **(12 punti)** Un satellite televisivo geostazionario si trova a $3{,}58 \times 10^7$ m dal suolo e trasmette a 12,0 GHz. La sua antenna concentra una potenza di 120 W su una regione della superficie terrestre di circa $1{,}0 \times 10^{13}$ m^2 (all'incirca l'Europa); considera l'intensità uniforme su tutta la regione. a) Calcola la lunghezza d'onda del segnale e indica la banda dello spettro a cui appartiene. La radiazione è ionizzante? Motiva (3 punti). b) Quanto tempo impiega il segnale ad arrivare dal satellite a un'antenna sotto di esso? E un segnale che sale da una stazione a terra al satellite e ridiscende? (2 punti) c) Calcola l'intensità del segnale al suolo e la potenza raccolta da una parabola circolare di diametro 60 cm, rivolta verso il satellite (3 punti). d) Per trasmettere due segnali diversi alla stessa frequenza, il satellite ne polarizza uno orizzontalmente e l'altro verticalmente; il ricevitore al fuoco della parabola si comporta come un polarizzatore. Se il ricevitore, che dovrebbe essere allineato con il segnale orizzontale, è ruotato per errore di 15°, quale frazione dell'intensità di quel segnale raccoglie, e quale frazione dell'intensità del segnale verticale? Perché ruotarlo di 90° significa cambiare segnale? (4 punti)

19. ●●● **(14 punti) Domanda sulla fonte.** Nella memoria *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* (1865) James Clerk Maxwell presenta così la sua teoria: «La teoria che propongo si può dunque chiamare una teoria del *campo elettromagnetico*, perché ha a che fare con lo spazio nelle vicinanze dei corpi elettrici o magnetici, e si può chiamare una teoria *dinamica*, perché ammette che in quello spazio vi sia materia in movimento, dalla quale sono prodotti i fenomeni elettromagnetici osservati. Il campo elettromagnetico è quella parte dello spazio che contiene e circonda i corpi in condizioni elettriche o magnetiche» (Parte I, introduttiva; traduzione della redazione). a) Spiega con parole tue che cosa intende Maxwell con «campo», e indica due risultati dei capitoli 8 e 10 che mostrano che nello spazio intorno ai corpi elettrici o magnetici «succede qualcosa» anche dove non ci sono cariche né conduttori (3 punti). b) Che cosa è, per Maxwell, la «materia in movimento» che riempie lo spazio? Quale parte della frase è stata confermata dagli esperimenti di Hertz, e quale non è richiesta dalla descrizione delle onde elettromagnetiche data nel capitolo 10? (4 punti) c) Un radar invia verso la Luna, distante $3{,}84 \times 10^{8}$ m, un impulso di microonde della potenza di 50 kW e della durata di 2,0 ms. Calcola il tempo che l'impulso impiega a raggiungere la Luna e quello dopo cui torna l'eco, l'energia dell'impulso e la lunghezza del tratto di spazio che esso occupa mentre viaggia. Dove si trova quell'energia 0,64 s dopo l'emissione? (4 punti) d) Usa il risultato di c) per spiegare perché le onde elettromagnetiche hanno reso il campo un oggetto fisico «reale» e non soltanto un modo comodo di calcolare le forze. Collega la questione a un tema di Filosofia: come una teoria scientifica può cambiare l'idea di che cosa esiste (3 punti).

Griglia di valutazione Punti per sezione.

Sezione	Contenuto	Punti
Parte A	domande 1–10 × 2 punti	20
Parte B	esercizi 11–15 × 6 punti	30
Parte C	problemi 16, 17 e 18 (12 punti ciascuno), domanda sulla fonte 19 (14 punti)	50
Totale		**100**

Dal punteggio al voto Corrispondenza indicativa fra punteggio e voto in decimi.

Punteggio	0–24	25–34	35–44	45–54	55–64	65–74	75–84	85–94	95–100
Voto	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Soluzioni

1. B (2 punti). Per la legge di Faraday–Neumann una variazione di flusso di 1 Wb in 1 s induce una f.e.m. di 1 V: 1 Wb/s = 1 T·m^2/s = 1 V. Il tesla (A) è l'unità del campo, l'henry (D) quella dell'induttanza (1 H = 1 Wb/A).

2. D (2 punti). Allontanandosi il magnete, il flusso attraverso la spira diminuisce; la corrente indotta produce un campo con lo stesso verso di quello del magnete, che tende a mantenere il flusso (C è falsa): sulla faccia della spira rivolta al magnete compare un polo sud, che attrae il polo nord. La spira si oppone all'allontanamento.

3. A (2 punti). $f_{em} = BLv$ raddoppia, quindi raddoppia la corrente $I = f_{em}/R$, e la potenza RI^2 quadruplica. Raddoppia anche la forza frenante ILB, e la potenza meccanica Fv, uguale a quella elettrica, quadruplica a sua volta (D confonde forza e potenza).

4. C (2 punti). L'induttanza è il rapporto fra il flusso che la bobina produce attraverso sé stessa e la corrente: è una caratteristica della bobina, come la capacità per un condensatore. Si misura in henry (B è falsa) e non si annulla a corrente costante: in quel caso è nulla la f.e.m. autoindotta, non l'induttanza (D).

5. B (2 punti). La f.e.m. è la rapidità di variazione del flusso, cambiata di segno: il flusso $NBS\cos\omega t$ cambia più in fretta quando passa per lo zero, con il piano della bobina parallelo alle linee di campo, e lì $f_{em} = \pm f_0$. Quando il flusso è massimo (A e C sono la stessa situazione) il suo grafico è per un istante orizzontale e la f.e.m. è nulla.

6. D (2 punti). I 230 V della presa sono un valore efficace; la tensione raggiunge, cento volte al secondo, il valore massimo $V_0 = \sqrt{2} \cdot 230\ \text{V} \approx 325\ \text{V}$, e un isolante deve reggere il picco. B divide per √2 invece di moltiplicare.

7. A (2 punti). Il rapporto delle tensioni è 11,5/230 = 1/20, quindi $N_1/N_2 = 20$ e, per la conservazione della potenza, $I_1 = I_2 \cdot N_2/N_1 = 2{,}0\ \text{A}/20 = 0{,}10\ \text{A}$. Controllo: 230 V · 0,10 A = 11,5 V · 2,0 A = 23 W. C moltiplica invece di dividere.

8. C (2 punti). È la corrente di spostamento di Maxwell: il campo elettrico che cresce fra le armature produce un campo magnetico con linee chiuse, uguale a quello che c'è intorno ai fili, anche nel vuoto. Il campo elettrico con linee chiuse (B) è quello indotto da un campo magnetico variabile.

9. B (2 punti). Onde radio, luce, raggi X e raggi gamma sono tutte onde elettromagnetiche; nel vuoto viaggiano a c qualunque sia la frequenza, e per ciascuna $\lambda = c/f$: frequenza maggiore significa lunghezza d'onda minore, non velocità maggiore (C).

10. A (2 punti). Il primo polarizzatore trasmette metà dell'intensità della luce non polarizzata, $I_0/2$; il secondo, per la legge di Malus, ne trasmette la frazione $\cos^2 60° = 0{,}25$: in tutto $I_0/2 \cdot 1/4 = I_0/8$. Chi risponde B dimentica il dimezzamento nel primo polarizzatore.

11. a) $f_{em} = -N\,\Delta\Phi/\Delta t$, con $\Delta\Phi$ per spira letto sul grafico (1 punto per il metodo). 0–1 s: $\Delta\Phi/\Delta t = 3{,}0 \times 10^{-3}$ Wb/1,0 s, $f_{em} = -40 \cdot 3{,}0 \times 10^{-3}$ Wb/s = −0,12 V. 1–3 s: flusso costante, $f_{em} = 0$. 3–4 s: $\Delta\Phi = -1{,}0$ mWb − 3,0 mWb = $-4{,}0 \times 10^{-3}$ Wb in 1,0 s, $f_{em} = +0{,}16$ V. 4–6 s: $\Delta\Phi = +1{,}0 \times 10^{-3}$ Wb in 2,0 s, $f_{em} = -40 \cdot 5{,}0 \times 10^{-4}$ Wb/s = −0,020 V (2 punti). b) $I = |f_{em}|/R$: 0,030 A, 0, 0,040 A e $5{,}0 \times 10^{-3}$ A; la corrente fra 3 s e 4 s ha verso opposto a quella degli altri due intervalli (1 punto). c) A $t = 3{,}75$ s il flusso è nullo ma sta cambiando con la stessa rapidità di tutto l'intervallo 3–4 s: la f.e.m. vale +0,16 V. Fra 1 s e 3 s il flusso è massimo ma costante, e la f.e.m. è zero: conta la rapidità di variazione, non il valore del flusso (1 punto). d) $Q = I\Delta t = 0{,}040\ \text{A} \cdot 1{,}0\ \text{s} = 0{,}040\ \text{C}$ (1 punto).

12. a) Nel rame $\Delta t = h/v = 1{,}00\ \text{m}/(0{,}25\ \text{m/s}) = 4{,}0$ s (1 punto). Nella plastica, caduta libera: $\Delta t = \sqrt{(2h/g)} =$

$\sqrt{(2 \cdot 1{,}00\ \text{m}/9{,}8\ \text{m/s}^2)} \approx 0{,}45$ s, quasi nove volte meno (1 punto). b) $mgh = 0{,}020\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 \cdot 1{,}00\ \text{m} \approx 0{,}20$ J; energia cinetica all'uscita $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 0{,}020\ \text{kg} \cdot (0{,}25\ \text{m/s})^2 \approx 6 \times 10^{-4}$ J, trascurabile (1 punto). La differenza, circa 0,20 J, diventa energia interna del tubo: le correnti indotte nel rame lo scaldano per effetto Joule. Per la legge di Lenz le correnti respingono il magnete da sotto e lo attirano da sopra, frenandolo (1 punto). c) A velocità costante la potenza dissipata è uguale a quella con cui la gravità compie lavoro: $P = mgv = 0{,}020\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 \cdot 0{,}25\ \text{m/s} \approx 0{,}049$ W (1 punto). d) Le correnti indotte circolano lungo le circonferenze del tubo, intorno al magnete; la fessura interrompe quei percorsi chiusi, le correnti di Foucault si riducono e con esse la forza frenante. Per la stessa ragione i nuclei dei trasformatori sono fatti di lamierini sottili isolati fra loro (1 punto).

13. a) $N_2 = N_1 \cdot V_2/V_1 = 1380 \cdot 12\ \text{V}/230\ \text{V} = 72$ spire (1 punto). b) $I_2 = P/V_2 = 50\ \text{W}/12\ \text{V} \approx 4{,}2$ A (1 punto); trasformatore ideale: $I_1 = P/V_1 = 50\ \text{W}/230\ \text{V} \approx 0{,}22$ A, oppure $I_2 \cdot 72/1380 \approx 0{,}22$ A (1 punto). c) $R = V_{\text{eff}}^2/P = (12\ \text{V})^2/50\ \text{W} \approx 2{,}9\ \Omega$ (1 punto); valori massimi: $V_0 = \sqrt{2} \cdot 12\ \text{V} \approx 17$ V e $I_0 = \sqrt{2} \cdot 4{,}17\ \text{A} \approx 5{,}9$ A (1 punto). d) Sì: 12 V efficaci producono nella lampada la stessa potenza media di 12 V continui, per la definizione stessa di valore efficace. Con la batteria sul primario, invece, il flusso nel nucleo cambia solo alla chiusura del circuito: al secondario compare un breve impulso, poi più nulla, e la lampada resta spenta (1 punto).

14. a) $\lambda = c/f = 3{,}00 \times 10^8\ \text{m/s} / 2{,}4 \times 10^9\ \text{Hz} \approx 0{,}125\ \text{m} = 12{,}5$ cm (1 punto); dipolo a mezz'onda: $\lambda/2 \approx 6{,}3$ cm (1 punto). b) $B = E/c = 3{,}0\ \text{V/m} / 3{,}00 \times 10^8\ \text{m/s} = 1{,}0 \times 10^{-8}$ T (1 punto), circa 5000 volte meno del campo terrestre; eppure l'onda trasporta energia in parti uguali nei due campi (1 punto). c) $\Delta t = d/c = 15\ \text{m} / 3{,}00 \times 10^8\ \text{m/s} = 5{,}0 \times 10^{-8}$ s $= 50$ ns (1 punto). d) Microonde (da 1 mm a 30 cm): radiazione non ionizzante, perché ogni «pacchetto» di energia è troppo piccolo per strappare elettroni. Ad alta intensità potrebbe scaldare i tessuti: per questo enti scientifici e autorità sanitarie fissano limiti di esposizione con ampi margini, che gli apparecchi devono rispettare (1 punto).

15. a) Primo polarizzatore: metà della luce non polarizzata, 60 W/m^2 (1 punto). Ogni polarizzatore successivo forma 30° con il precedente e trasmette $\cos^2 30° = 0{,}75$: dopo il secondo $60 \cdot 0{,}75 = 45$ W/m^2, dopo il terzo $45 \cdot 0{,}75 \approx 34$ W/m^2, dopo il quarto $33{,}75 \cdot 0{,}75 \approx 25$ W/m^2 (2 punti). b) Senza i polarizzatori intermedi il primo e l'ultimo sono incrociati, $\cos^2 90° = 0$: non passa nulla. Ogni filtro intermedio assorbe una parte della luce ma ne ruota la direzione di polarizzazione, e la luce che ne esce ha una componente lungo l'asse del filtro successivo (1 punto). c) $\cos^2 45° = 0{,}50$: passa metà della luce. Inclinando la testa di 45° l'asse degli occhiali diventa parallelo o perpendicolare alla direzione di polarizzazione: lo schermo appare luminoso al massimo o quasi nero (1 punto). d) La polarizzazione è la direzione in cui oscilla il campo elettrico, perpendicolare alla propagazione: si può polarizzare solo un'onda trasversale. Il suono nell'aria è un'onda longitudinale, che oscilla lungo la direzione di propagazione, e non ha direzioni trasversali da selezionare (1 punto).

16. a) Da $t = 0$ a $t = 0{,}10\ \text{m}/0{,}50\ \text{m/s} = 0{,}20$ s la bobina entra nel campo: l'area attraversata dal campo cresce in modo uniforme e il flusso per spira passa da zero al massimo $Ba^2 = 0{,}40\ \text{T} \cdot (0{,}10\ \text{m})^2 = 4{,}0 \times 10^{-3}$ Wb (1 punto). Da 0,20 s a 0,60 s, quando il lato destro arriva all'altro bordo dopo aver percorso 30 cm, la bobina è tutta nel campo e il flusso resta costante; da 0,60 s a 0,80 s esce e il flusso scende in modo uniforme a zero (1 punto). Il grafico è un trapezio: salita rettilinea, tratto orizzontale, discesa rettilinea con la stessa pendenza in valore assoluto (1 punto). b) Entrata: $f_{\text{em}} = N\Delta\Phi/\Delta t = 20 \cdot 4{,}0 \times 10^{-3}\ \text{Wb}/0{,}20\ \text{s} = 0{,}40$ V, oppure $NBav = 20 \cdot 0{,}40\ \text{T} \cdot 0{,}10\ \text{m} \cdot 0{,}50\ \text{m/s} = 0{,}40$ V; $I = 0{,}40\ \text{V}/0{,}50\ \Omega = 0{,}80$ A (1 punto). Dentro il campo il flusso non cambia: $f_{\text{em}} = 0$ e $I = 0$, benché la bobina sia immersa nel campo. Uscita: di nuovo 0,40 V e 0,80 A (1 punto). All'entrata il flusso entrante aumenta e la corrente indotta deve produrre dentro la bobina un campo uscente dal foglio: verso antiorario; all'uscita il flusso entrante diminuisce, il campo indotto è entrante e la corrente gira in verso orario (1 punto). c) Solo il lato destro, con 20 conduttori percorsi da 0,80 A, è nel campo: $F = NILB = 20 \cdot 0{,}80\ \text{A} \cdot 0{,}10\ \text{m} \cdot 0{,}40\ \text{T} \approx 0{,}64$ N, opposta al moto

(legge di Lenz); serve una forza esterna di 0,64 N nel verso del moto (2 punti). $P_{mecc} = Fv = 0{,}64\ \text{N} \cdot 0{,}50\ \text{m/s} = 0{,}32\ \text{W}$; $P_{el} = f_{em} \cdot I = 0{,}40\ \text{V} \cdot 0{,}80\ \text{A} = 0{,}32\ \text{W} = RI^2$ (1 punto). d) La corrente circola per 0,20 s all'entrata e 0,20 s all'uscita: $E = 0{,}32\ \text{W} \cdot 0{,}40\ \text{s} \approx 0{,}13\ \text{J}$ (1 punto). A velocità doppia f_{em}, corrente e forza raddoppiano (0,80 V, 1,6 A, 1,28 N) e la potenza quadruplica (1,28 W), ma la corrente circola per metà del tempo (0,20 s in tutto): l'energia dissipata raddoppia, circa 0,26 J (1 punto). Una forza frenante proporzionale alla velocità, senza contatto, è quella dei freni elettromagnetici a correnti di Foucault di treni e ottovolanti, che frenano tanto più quanto più il mezzo è veloce e non possono fermarlo del tutto (1 punto).

17. a) $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50\ \text{Hz} \approx 314\ \text{rad/s}$ (1 punto); $f_0 = NBS\omega = 200 \cdot 0{,}60\ \text{T} \cdot 0{,}050\ \text{m}^2 \cdot 314\ \text{rad/s} \approx 1{,}88 \times 10^3\ \text{V}$ (1 punto); $V_{eff} = f_0/\sqrt{2} \approx 1{,}33 \times 10^3\ \text{V}$ (1 punto). b) Nel quarto di giro il flusso totale passa da $NBS = 200 \cdot 0{,}60\ \text{T} \cdot 0{,}050\ \text{m}^2 = 6{,}0\ \text{Wb}$ a zero, in $\Delta t = T/4 = 0{,}020\ \text{s}/4 = 5{,}0\ \text{ms}$ (1 punto). F.e.m. media: $6{,}0\ \text{Wb}/5{,}0 \times 10^{-3}\ \text{s} = 1{,}2 \times 10^3\ \text{V}$ (1 punto). Il rapporto con il valore massimo è 1200/1885 ≈ 0,64 (il rapporto esatto è 2/π): in quel quarto di giro la f.e.m. parte da zero, quando la bobina è perpendicolare al campo, e raggiunge il massimo solo alla fine, quindi la media è minore del picco: la legge di Faraday–Neumann applicata a un intervallo finito dà la f.e.m. media, non quella istantanea (1 punto). c) $N_2/N_1 = V_2/V_1 = 20\,000\ \text{V}/1333\ \text{V} \approx 15$ (1 punto). $I_1 = P/V_1 = 4{,}00 \times 10^5\ \text{W}/1333\ \text{V} \approx 300\ \text{A}$ (1 punto); $I_{linea} = 4{,}00 \times 10^5\ \text{W}/2{,}0 \times 10^4\ \text{V} = 20\ \text{A}$, 15 volte meno (1 punto). d) A 20 kV: $P_{persa} = RI^2 = 2{,}0\ \Omega \cdot (20\ \text{A})^2 = 800\ \text{W}$, lo 0,20% della potenza trasmessa (1 punto). Senza trasformatore: $2{,}0\ \Omega \cdot (300\ \text{A})^2 \approx 1{,}8 \times 10^5\ \text{W}$, il 45% (1 punto). Il rapporto è circa $225 = 15^2$: a parità di potenza le perdite vanno come $1/V^2$, e moltiplicare la tensione per 15 le divide per 225. Senza il trasformatore quasi metà dell'energia della centrale scalderebbe i cavi: è il motivo per cui le reti usano la corrente alternata (1 punto).

18. a) $\lambda = c/f = 3{,}00 \times 10^8\ \text{m/s} / 1{,}20 \times 10^{10}\ \text{Hz} = 2{,}5 \times 10^{-2}\ \text{m} = 2{,}5\ \text{cm}$ (1 punto): microonde, fra 1 mm e 30 cm (1 punto). Non è ionizzante: è molto al di sotto dell'ultravioletto, e ogni «pacchetto» di energia è troppo piccolo per strappare un elettrone a un atomo, qualunque sia l'intensità (1 punto). b) $\Delta t = d/c = 3{,}58 \times 10^7\ \text{m} / 3{,}00 \times 10^8\ \text{m/s} \approx 0{,}119\ \text{s}$ (1 punto); salita e discesa: circa 0,24 s, un ritardo che si avverte in una conversazione via satellite (1 punto). c) $I = P/S = 120\ \text{W} / 1{,}0 \times 10^{13}\ \text{m}^2 = 1{,}2 \times 10^{-11}\ \text{W/m}^2$ (1 punto). Area della parabola: $\pi(0{,}30\ \text{m})^2 \approx 0{,}28\ \text{m}^2$ (1 punto); potenza raccolta: $1{,}2 \times 10^{-11}\ \text{W/m}^2 \cdot 0{,}28\ \text{m}^2 \approx 3{,}4 \times 10^{-12}\ \text{W}$, pochi millesimi di miliardesimo di watt, che il ricevitore amplifica (1 punto). d) Il ricevitore trasmette la componente del campo elettrico parallela al suo asse; per la legge di Malus il segnale orizzontale, a 15° dall'asse, passa con la frazione $\cos^2 15° \approx 0{,}93$ (1 punto); il segnale verticale forma con l'asse 75° e passa con la frazione $\cos^2 75° = \text{sen}^2 15° \approx 0{,}067$ (1 punto). Il segnale voluto resta circa 14 volte più intenso dell'altro, ma il disturbo non è più nullo, come sarebbe con l'allineamento perfetto (1 punto). Ruotando il ricevitore di 90° l'asse diventa verticale: passa tutto il segnale verticale e nulla di quello orizzontale. Così due segnali alla stessa frequenza si separano grazie alla polarizzazione (1 punto).

19. Traccia di risposta. a) Il campo è lo spazio intorno ai corpi elettrici o magnetici, considerato come sede di grandezze fisiche in ogni punto; i fenomeni non sono più azioni fra corpi a distanza, ma qualcosa che accade nello spazio fra loro (1 punto). Esempi: un campo magnetico variabile genera un campo elettrico con linee chiuse anche dove non c'è una spira, che serve solo a rivelarlo (capitolo 10, rilettura della legge di Faraday–Neumann del capitolo 8); il campo magnetico di una bobina contiene energia, $U = \frac{1}{2} LI^2$, che riappare nella scintilla di apertura (capitolo 8); fra le armature di un condensatore che si carica non passano cariche ma c'è un campo magnetico (corrente di spostamento); le onde elettromagnetiche viaggiano nel vuoto. Bastano due esempi motivati (2 punti). b) La «materia in movimento» è l'etere, il mezzo che Maxwell, come i fisici del suo tempo, pensava riempisse lo spazio e di cui il campo sarebbe uno stato (1 punto). Hertz, nel 1887–88, confermò la previsione centrale della teoria: produsse e rivelò onde elettromagnetiche, ne misurò la lunghezza d'onda, trovò una velocità vicina a quella della luce e mostrò che si riflettono, si rifran-

gono e si polarizzano come la luce (2 punti). Nel capitolo 10 l'onda è invece descritta come un'oscillazione dei campi stessi, che esistono anche nel vuoto e non hanno bisogno di un mezzo materiale: l'etere non serve a descriverla, e la domanda sulla sua esistenza è ripresa nel capitolo 11 (1 punto). c) $\Delta t = d/c = 3{,}84 \times 10^8$ m / $3{,}00 \times 10^8$ m/s = 1,28 s; l'eco torna dopo 2,56 s (1 punto). Energia dell'impulso: $E = P\Delta t = 5{,}0 \times 10^4$ W · $2{,}0 \times 10^{-3}$ s = $1{,}0 \times 10^2$ J (1 punto). Lunghezza: $c\Delta t = 3{,}00 \times 10^8$ m/s · $2{,}0 \times 10^{-3}$ s = $6{,}0 \times 10^5$ m = 600 km (1 punto). A 0,64 s l'impulso è a metà strada, a circa $1{,}9 \times 10^8$ m dalla Terra: i 100 J non sono più nel radar e non sono ancora arrivati alla Luna, ma si trovano in un tratto di spazio vuoto lungo 600 km, nei campi elettrico e magnetico dell'onda, divisi in parti uguali fra i due (1 punto). d) Se si vuole che l'energia si conservi istante per istante, durante il viaggio essa deve stare da qualche parte: nel campo. Un'azione a distanza istantanea non spiegherebbe né il ritardo di 1,28 s né dove sia l'energia nel frattempo; il campo, che ha energia, la trasporta e si propaga a velocità finita, diventa un oggetto fisico come la materia (2 punti). Collegamento: il passaggio da una fisica di corpi e forze a una fisica dei campi è un esempio di come una teoria cambi il catalogo di ciò che consideriamo reale; si può discutere la differenza fra chi considera le teorie descrizioni della realtà e chi le considera strumenti di calcolo e di previsione (nel positivismo e nella sua crisi), oppure ricordare che già Newton, in una lettera a Richard Bentley del 1693, giudicava assurda un'azione a distanza attraverso il vuoto senza alcun intermediario. Sono richiesti fatti certi e un collegamento argomentato, non un elenco (1 punto).