VERIFICA

Verifica di fine parte · Il campo magnetico

Tempo indicativo: 100 minuti · Punteggio totale: 100 punti

Fisica 4 · Parte V · Il campo magnetico · versione 1.0
Verifica: Verifica di fine parte · Il campo magnetico · pagine 513–518 del volume completo · estratto per lo studio

La verifica riguarda i capitoli 15 e 16. È ammessa la calcolatrice scientifica; per gli angoli usa i gradi (DEG). Scrivi sempre le formule che usi, i passaggi e le unità di misura: un risultato senza unità è considerato incompleto. Esprimi i risultati con un numero di cifre significative coerente con i dati. Quando ti si chiede un verso (di una forza, di un campo, di una rotazione), indicalo a parole o con i simboli ⊙ e ⊗, e di' quale regola della mano destra hai usato. Puoi consultare le tabelle dell'appendice. Dove non è indicato diversamente usa: carica elementare $e = 1{,}60 \times 10^{-19}$ C, massa dell'elettrone $9{,}11 \times 10^{-31}$ kg, massa del protone $1{,}67 \times 10^{-27}$ kg, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A, $g = 9{,}8$ m/s^2. I fili «lunghi» vanno considerati infinitamente lunghi rispetto alle distanze in gioco.

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

1. ● Un filo orizzontale, percorso da corrente verso est, si trova in un campo magnetico uniforme diretto verticalmente verso il basso. La forza magnetica sul filo è diretta:

   A. verso sud
   B. verso l'alto
   C. verso nord
   D. verso ovest

2. ●● Un protone e una particella alfa (carica $2e$, massa circa quattro volte quella del protone) entrano con la stessa velocità, perpendicolare alle linee di campo, nello stesso campo magnetico uniforme. Fra i raggi delle loro traiettorie vale:

   A. $r_\alpha = 2r_p$
   B. $r_\alpha = 4r_p$
   C. $r_\alpha = r_p/2$
   D. $r_\alpha = r_p$, perché la velocità è la stessa

3. ●● Una bobina rettangolare di 100 spire, di lati 5,0 cm e 4,0 cm, è percorsa da una corrente di 0,50 A in un campo magnetico uniforme di 0,20 T. La normale alla bobina forma con il campo un angolo di 30°. Il momento della coppia sulla bobina vale:

   A. 0,017 N·m
   B. 0,020 N·m
   C. $1{,}0 \times 10^{-4}$ N·m
   D. 0,010 N·m

4. ● Un elettrone entra in un campo magnetico uniforme con velocità perpendicolare alle linee di campo. Quale affermazione è corretta?

   A. l'elettrone accelera e il modulo della sua velocità cresce, perché il campo compie lavoro su di esso

   B. il modulo della velocità resta costante e l'elettrone descrive una circonferenza

   C. l'elettrone prosegue in linea retta, perché la forza è perpendicolare alla velocità

   D. l'elettrone descrive una parabola, come in un campo elettrico uniforme

5. ●● Una lamina è percorsa da una corrente diretta verso destra ed è immersa in un campo magnetico $\boldsymbol{B}$ uscente dalla pagina. Si misura che il bordo superiore della lamina è a potenziale più alto del bordo inferiore. I portatori di carica:

   A. sono negativi, e la forza magnetica li accumula sul bordo inferiore

   B. sono positivi, e la forza magnetica li accumula sul bordo superiore

   C. sono positivi, e la forza magnetica li accumula sul bordo inferiore

   D. non si possono riconoscere, perché la tensione di Hall non dipende dal segno delle cariche

6. ● Il campo magnetico a 5,0 cm da un lungo filo rettilineo percorso da 15 A vale:

   A. $3{,}8 \times 10^{-4}$ T

   B. $6{,}0 \times 10^{-7}$ T

   C. $6{,}0 \times 10^{-5}$ T

   D. $1{,}9 \times 10^{-4}$ T

7. ●● Due lunghi fili paralleli, distanti 4,0 cm, sono percorsi da correnti di 8,0 A e 5,0 A in versi opposti. La forza per metro di lunghezza fra i fili è:

   A. $2{,}0 \times 10^{-4}$ N/m, attrattiva

   B. $2{,}0 \times 10^{-4}$ N/m, repulsiva

   C. $2{,}0 \times 10^{-6}$ N/m, repulsiva

   D. più intensa sul filo da 5,0 A, perché si trova nel campo del filo con la corrente maggiore

8. ●● All'interno di un lungo solenoide, lontano dalle estremità, si misura un campo di 3,0 mT quando la corrente è 1,5 A. Il numero di spire per metro è circa:

   A. $5{,}0 \times 10^{3}$

   B. $2{,}0 \times 10^{4}$

   C. $3{,}6 \times 10^{3}$

   D. $1{,}6 \times 10^{3}$

9. ●● Una spira quadrata di lato 20 cm si trova in un campo magnetico uniforme di 0,50 T; il piano della spira forma un angolo di 30° con le linee di campo. Il flusso del campo magnetico attraverso la spira vale, in modulo:

   A. 0,010 Wb

   B. 0,017 Wb

   C. 0,020 Wb

   D. 0,10 Wb

10. ●● Quale affermazione sui materiali ferromagnetici è corretta?

A. un materiale dolce ha una rimanenza elevata, ed è per questo adatto ai nuclei degli elettromagneti

B. il campo coercitivo è il campo che resta nel materiale quando la corrente si annulla

C. un materiale con un ciclo di isteresi largo, con rimanenza e campo coercitivo elevati, è adatto a diventare un magnete permanente

D. al di sopra della temperatura di Curie il ciclo di isteresi diventa più largo

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

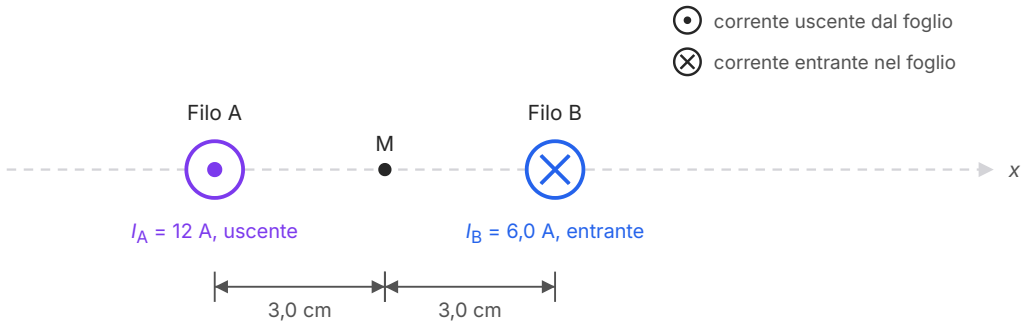


Figura V5.1 Due lunghi fili paralleli perpendicolari alla pagina, visti in sezione (esercizio 13): il filo A è percorso da 12 A uscenti dalla pagina, il filo B da 6,0 A entranti; M è il punto medio del segmento che li congiunge. Schema in scala.

11. ●● Un'asta metallica orizzontale, lunga 40 cm e di massa 12 g, è disposta in direzione est-ovest in un campo magnetico uniforme orizzontale di 0,15 T, diretto verso nord. Due fili leggeri e flessibili la collegano a un generatore, senza sostenerla. a) Quale corrente deve attraversare l'asta perché la forza magnetica equilibri il suo peso? (2 punti) b) In quale verso deve circolare la corrente? Giustifica la risposta con la regola della mano destra (2 punti). c) Si ruota l'asta nel piano orizzontale finché forma un angolo di 60° con il campo. Quale corrente serve ora per tenerla sospesa? (2 punti)

12. ●● Un protone con velocità $3{,}0 \times 10^6$ m/s attraversa perpendicolarmente una parete piana ed entra in una regione, oltre la parete, in cui c'è un campo magnetico uniforme di 0,25 T parallelo alla parete. a) Calcola il modulo della forza di Lorentz e il raggio della traiettoria (2 punti). b) Dopo quanto tempo il protone esce di nuovo dalla regione del campo, e con quale velocità? (2 punti) c) Se il protone entrasse con la stessa velocità in modulo, ma inclinata di 60° rispetto alle linee di campo, quali sarebbero il raggio e il passo della sua traiettoria a elica? (2 punti)

13. ●● La Figura V5.1 mostra due lunghi fili paralleli, perpendicolari alla pagina e distanti 6,0 cm: il filo A è percorso da 12 A uscenti dalla pagina, il filo B da 6,0 A entranti. a) Calcola intensità, direzione e verso del campo magnetico nel punto M, a metà strada fra i fili (2 punti). b) Calcola la forza per metro di lunghezza che agisce sul filo B e indicane il verso (2 punti). c) In quale punto della retta che passa per i due fili il campo magnetico totale è nullo? (2 punti)

14. ●● Una superficie chiusa è formata da una semisfera di raggio 3,0 cm e dal cerchio piano che ne è la base. Si trova in un campo magnetico uniforme di 0,050 T, perpendicolare alla base, che entra nella superficie attraverso la base; la normale di ogni parte della superficie è orientata verso l'esterno. a) Calcola il flusso del campo magnetico attraverso la base, con il suo segno (2 punti). b) Senza calcolare alcuna somma sulla superficie curva, ricava il flusso attraverso la semisfera e spiega su quale teorema ti basi (2 punti). c) Si inclina la superficie in modo che le linee di campo formino un angolo di 60° con la normale alla base: quanto valgono ora i due flussi? (1 punto) d) Come cambiano i tre flussi (base, semisfera, totale) se il raggio raddoppia? (1 punto)

15. ●● Tre lunghi fili paralleli, perpendicolari alla pagina, sono percorsi da $I_1 = 8{,}0$ A uscente dalla pagina, $I_2 = 3{,}0$ A entrante e $I_3 = 5{,}0$ A uscente. Tre linee chiuse giacciono nel piano della pagina e sono percorse in verso antiorario: la linea C_1 circonda soltanto i fili 1 e 2, la linea C_2 soltanto i fili 2 e 3, la linea C_3 tutti e tre. a) Calcola la circuitazione di $\boldsymbol{B}$ lungo ciascuna linea (3 punti). b) Si può ricavare dalla circuitazione lungo C_3 l'intensità del campo nei suoi punti? Motiva la risposta (1 punto). c) Quale corrente, e in quale verso, deve avere un quarto filo, interno a C_3, perché la circuitazione lungo C_3 sia nulla? In quel caso il campo è nullo nei punti di C_3? (2 punti)

Parte C · Problemi (3 problemi, 50 punti in totale)

16. ●●● **(17 punti)** Una sonda di Hall è una piastrina di semiconduttore larga $d = 4{,}0$ mm e spessa $h = 0{,}20$ mm, in cui la corrente è trasportata da $2{,}0 \times 10^{22}$ portatori positivi per metro cubo, ciascuno con carica e. La piastrina è percorsa da una corrente di 5,0 mA ed è disposta perpendicolarmente al campo da misurare. a) Calcola la velocità di deriva dei portatori (3 punti). b) Calcola la tensione di Hall in un campo di 0,10 T (3 punti). c) Inserita nel traferro di un magnete, la sonda misura 1,95 mV. Quanto vale il campo nel traferro? (2 punti) d) Il magnete viene usato per costruire un selettore di velocità, con due piastre parallele distanti 1,0 cm. Quale differenza di potenziale bisogna applicare alle piastre per selezionare protoni di velocità $2{,}0 \times 10^5$ m/s? Passerebbero indisturbati anche elettroni della stessa velocità? (3 punti) e) Un compagno osserva: «Nel selettore i protoni più veloci di $2{,}0 \times 10^5$ m/s vengono deviati dalla forza magnetica, quindi il campo magnetico ha cambiato la loro energia cinetica». Spiega perché la forza magnetica non compie lavoro su una carica in moto, e quale forza cambia davvero l'energia cinetica dei protoni deviati (6 punti).

17. ●●● **(16 punti)** Un toroide ha $N = 500$ spire avvolte su un anello di sezione quadrata, di raggio interno 4,0 cm, raggio esterno 6,0 cm e altezza 2,0 cm, ed è percorso da una corrente di 0,80 A. All'inizio dentro l'anello c'è aria. a) Usando il teorema di Ampère su una circonferenza di raggio r interna all'anello, ricava l'espressione del campo e calcolalo per $r = 4{,}0$ cm, 5,0 cm e 6,0 cm (4 punti). b) Stima il flusso del campo attraverso una sezione dell'anello usando il campo sulla circonferenza media, e spiega perché il risultato è solo una stima (3 punti). c) Usando ancora il teorema di Ampère, spiega quanto vale il campo in un punto del foro centrale e in un punto esterno all'anello (3 punti). d) L'anello viene sostituito da un nucleo di ferro che, in queste condizioni, ha $\mu_r = 800$. Quanto vale il campo sulla circonferenza media? Se poi si porta la corrente a zero, il campo nel nucleo si annulla? (3 punti) e) Con la corrente di 0,80 A, il nucleo di ferro viene scaldato fino a 900 °C. Quanto vale, circa, il campo sulla circonferenza media? Motiva la risposta (3 punti).

18. ●●● **(17 punti)** (Capitoli 15 e 16.) Un solenoide lungo 60 cm, con 1200 spire di raggio 5,0 cm, è percorso da una corrente di 2,0 A. a) Calcola il numero di spire per metro e il campo magnetico all'interno, lontano dalle estremità (3 punti). b) Un cannone elettronico accelera elettroni, partiti quasi da fermi, con una differenza di potenziale di 150 V. Calcola la velocità degli elettroni (3 punti). c) Gli elettroni vengono lanciati dentro il solenoide, vicino all'asse, con velocità perpendicolare all'asse. Calcola il raggio e il periodo della loro traiettoria, e stabilisci se urtano le spire (4 punti). d) Ora gli elettroni entrano da un'estremità del solenoide, sull'asse, con la stessa velocità in modulo ma inclinata di 30° rispetto all'asse. Calcola il passo dell'elica e quanti giri completi compiono prima di uscire dall'altra estremità (trascura l'indebolimento del campo vicino alle estremità) (4 punti). e) Nella situazione del punto c), quale corrente dimezzerebbe il raggio della traiettoria? Che cosa cambierebbe nel moto, e che cosa no, se si invertisse il verso della corrente nel solenoide? (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	problema 16 (17), problema 17 (16), problema 18 (17)	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. C (2 punti). $\boldsymbol{F} = I\,\boldsymbol{L} \times \boldsymbol{B}$: con est = $+x$, nord = $+y$, alto = $+z$, $\boldsymbol{L}$ è lungo $+x$ e $\boldsymbol{B}$ lungo $-z$; $\mathbf{i} \times (-\mathbf{k}) = -(\mathbf{i} \times \mathbf{k}) = \mathbf{j}$: la forza è orizzontale, verso nord. (A è il verso che si ottiene con la mano sinistra, o con il campo verso l'alto.)

2. A (2 punti). $r = mv/(|q|B)$: a parità di v e B, il raggio è proporzionale a $m/|q|$, che per la particella alfa è $4m/(2e) = 2\,m/e$, il doppio di quello del protone. (B trascura la carica doppia, D ignora massa e carica.)

3. D (2 punti). $S = 0{,}050\ \text{m} \times 0{,}040\ \text{m} = 2{,}0 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$; $M = NISB\ \text{sen}\ \theta = 100 \times 0{,}50\ \text{A} \times 2{,}0 \times 10^{-3}\ \text{m}^2 \times 0{,}20\ \text{T} \times \text{sen}\ 30° = 0{,}010\ \text{N·m}$. (A usa cos 30°, B pone sen θ = 1, C dimentica le 100 spire.)

4. B (2 punti). La forza di Lorentz è sempre perpendicolare alla velocità: non compie lavoro, il modulo della velocità resta costante e la forza, di modulo costante evB, fa da forza centripeta. La traiettoria è una circonferenza di raggio $mv/(eB)$.

5. A (2 punti). Una carica positiva, che si muoverebbe verso destra, subirebbe la forza $q\,\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$ verso il basso ($+x \times +z = -y$) e caricherebbe positivamente il bordo inferiore. Un elettrone si muove verso sinistra, e per lui $q\,\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$ è ancora verso il basso: il bordo inferiore si carica negativamente e quello superiore resta a potenziale più alto, come misurato. Quindi i portatori sono negativi.

6. C (2 punti). $B = \mu_0 I/(2\pi r) = 2 \times 10^{-7}\ \text{T·m/A} \times 15\ \text{A} / 0{,}050\ \text{m} = 6{,}0 \times 10^{-5}\ \text{T}$. (A dimentica il 2π, D usa la formula della spira $\mu_0 I/(2R)$, B lascia la distanza in centimetri.)

7. B (2 punti). $F/L = \mu_0 I_1 I_2/(2\pi d) = 2 \times 10^{-7}\ \text{T·m/A} \times 8{,}0\ \text{A} \times 5{,}0\ \text{A} / 0{,}040\ \text{m} = 2{,}0 \times 10^{-4}\ \text{N/m}$; con correnti discordi i fili si respingono. Per il terzo principio la forza ha la stessa intensità sui due fili (D è falsa).

8. D (2 punti). $n = B/(\mu_0 I) = 3{,}0 \times 10^{-3}\ \text{T} / (4\pi \times 10^{-7}\ \text{T·m/A} \times 1{,}5\ \text{A}) \approx 1{,}6 \times 10^{3}$ spire/m (1592). (A dimentica il π, B il fattore 4π, C moltiplica B per I invece di dividere.)

9. A (2 punti). L'angolo che conta è quello fra $\boldsymbol{B}$ e la normale alla spira: se il piano forma 30° con le linee di campo, la normale forma 90° − 30° = 60°. $\Phi = BS\ \cos 60° = 0{,}50\ \text{T} \times (0{,}20\ \text{m})^2 \times 0{,}50 = 0{,}010\ \text{Wb}$. (B usa l'angolo fra il piano e il campo, C pone cos θ = 1, D usa il lato invece dell'area e pone cos θ = 1.)

10. C (2 punti). I materiali duri, con ciclo largo, restano magnetizzati dopo la saturazione: sono i magneti permanenti. A è falsa (i materiali dolci hanno ciclo stretto e rimanenza piccola), B scambia il campo coercitivo con la rimanenza, D è falsa (sopra la temperatura di Curie il materiale diventa paramagnetico e il ciclo scompare).

11. a) Il peso è $mg = 0{,}012\ \text{kg} \times 9{,}8\ \text{m/s}^2 = 0{,}118\ \text{N}$; con l'asta perpendicolare al campo, $ILB = mg$ dà $I = mg/(LB) = 0{,}118\ \text{N} / (0{,}40\ \text{m} \times 0{,}15\ \text{T}) \approx 2{,}0\ \text{A}$ (1,96 A) (2 punti). b) La forza deve essere verso l'alto. Con est = $+x$, nord = $+y$, alto = $+z$: $\boldsymbol{B}$ è lungo $+y$ e serve $\boldsymbol{L} \times \boldsymbol{B}$ lungo $+z$; poiché $\mathbf{i} \times \mathbf{j} = \mathbf{k}$, $\boldsymbol{L}$ deve essere lungo $+x$: la corrente va da ovest verso est. Con la mano destra: dita verso est, piegate verso nord, il pollice punta in alto (2 punti). c) Asta e campo restano orizzontali, quindi la forza resta verticale, ma il suo modulo è $ILB\ \text{sen}\ 60°$: $I = mg/(LB\ \text{sen}\ 60°) = 1{,}96\ \text{A} / 0{,}866 \approx 2{,}3\ \text{A}$ (2 punti).

12. a) $F = evB = 1{,}60 \times 10^{-19}\ \text{C} \times 3{,}0 \times 10^{6}\ \text{m/s} \times 0{,}25\ \text{T} = 1{,}2 \times 10^{-13}\ \text{N}$; $r = mv/(eB) = 1{,}67 \times 10^{-27}\ \text{kg} \times 3{,}0 \times 10^{6}\ \text{m/s} / (1{,}60 \times 10^{-19}\ \text{C} \times 0{,}25\ \text{T}) \approx 0{,}13\ \text{m}$ (12,5 cm) (1 punto ciascuno). b) Il protone descrive mezza circonferenza e torna alla parete: il tempo è metà periodo, $T/2 = \pi m/(eB) = \pi \times 1{,}67 \times 10^{-27}\ \text{kg} / (4{,}0 \times 10^{-20}\ \text{C·T}) \approx 1{,}3 \times 10^{-7}$ s. Esce con velocità di modulo $3{,}0 \times 10^{6}$ m/s, invariato perché la forza magnetica non compie lavoro, e verso opposto a quello d'ingresso (2 punti). c) $v_\perp = v\ \text{sen}\ 60° = 2{,}6 \times 10^{6}$ m/s, $v_\parallel = v\ \cos 60° = 1{,}5 \times 10^{6}$ m/s. Raggio: $mv_\perp/(eB) = 12{,}5\ \text{cm} \times \text{sen}\ 60° \approx 11$ cm. Il periodo non cambia, $T = 2\pi m/(eB) \approx 2{,}6 \times 10^{-7}$ s, quindi il passo è $p = v_\parallel T = 1{,}5 \times 10^{6}\ \text{m/s} \times 2{,}62 \times 10^{-7}\ \text{s} \approx 0{,}39\ \text{m}$ (2 punti).

13. a) Il campo di A in M: $\mu_0 I_A/(2\pi r) = 2 \times 10^{-7}$ T·m/A × 12 A / 0,030 m = $8{,}0 \times 10^{-5}$ T; quello di B: 2×10^{-7} T·m/A × 6,0 A / 0,030 m = $4{,}0 \times 10^{-5}$ T. Le linee di A (corrente uscente) girano in verso antiorario, e in M, alla destra di A, il campo è verso l'alto della pagina; le linee di B (corrente entrante) girano in verso orario, e in M, alla sinistra di B, il campo è ancora verso l'alto. I campi si sommano: $B = 1{,}2 \times 10^{-4}$ T, perpendicolare alla congiungente, verso l'alto della pagina (2 punti). b) $F/L = \mu_0 I_A I_B/(2\pi d) = 2 \times 10^{-7}$ T·m/A × 12 A × 6,0 A / 0,060 m = $2{,}4 \times 10^{-4}$ N/m. Le correnti sono discordi: i fili si respingono, e la forza sul filo B è diretta verso destra, lontano da A (2 punti). c) Fra i fili i due campi hanno lo stesso verso (punto a) e non si annullano; fuori dal segmento hanno versi opposti, e si annullano dove le intensità sono uguali, che deve essere dalla parte del filo con la corrente minore, B. A distanza x a destra di B: 12 A/(6,0 cm + x) = 6,0 A/x, da cui x = 6,0 cm. Il campo è nullo a 6,0 cm a destra di B, cioè a 12 cm da A. Controllo: $2 \times 10^{-7} \times 12/0{,}12 = 2{,}0 \times 10^{-5}$ T e $2 \times 10^{-7} \times 6{,}0/0{,}060 = 2{,}0 \times 10^{-5}$ T (2 punti).

14. a) Area della base: $\pi r^2 = \pi \times (0{,}030\text{ m})^2 = 2{,}83 \times 10^{-3}$ m^2. La normale uscente dalla base ha verso opposto a $\boldsymbol{B}$ (il campo entra), quindi $\theta = 180°$ e $\Phi_{base} = BS \cos 180° = -0{,}050$ T × $2{,}83 \times 10^{-3}$ m^2 ≈ $-1{,}4 \times 10^{-4}$ Wb (2 punti). b) Per il teorema di Gauss per il magnetismo il flusso attraverso la superficie chiusa è zero: $\Phi_{semisfera} = -\Phi_{base} = +1{,}4 \times 10^{-4}$ Wb. Le linee che entrano dalla base escono tutte dalla semisfera, perché le linee di $\boldsymbol{B}$ non nascono né finiscono dentro la superficie (2 punti). c) Ora l'angolo fra $\boldsymbol{B}$ e la normale uscente dalla base è 180° − 60° = 120°: Φ_{base} = 0,050 T × $2{,}83 \times 10^{-3}$ m^2 × cos 120° ≈ $-7{,}1 \times 10^{-5}$ Wb e $\Phi_{semisfera} \approx +7{,}1 \times 10^{-5}$ Wb (1 punto). d) L'area della base quadruplica: i flussi attraverso la base e la semisfera diventano quattro volte più grandi in modulo ($-5{,}7 \times 10^{-4}$ Wb e $+5{,}7 \times 10^{-4}$ Wb nel caso del punto a), il flusso totale resta zero (1 punto).

15. a) Con il verso antiorario il pollice della mano destra esce dalla pagina: le correnti uscenti contano come positive, quelle entranti come negative. C_1: $\Gamma = \mu_0(8{,}0\text{ A} - 3{,}0\text{ A}) = 4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A × 5,0 A ≈ $6{,}3 \times 10^{-6}$ T·m. C_2: $\Gamma = \mu_0(-3{,}0\text{ A} + 5{,}0\text{ A}) \approx 2{,}5 \times 10^{-6}$ T·m. C_3: $\Gamma = \mu_0(8{,}0\text{ A} - 3{,}0\text{ A} + 5{,}0\text{ A}) = \mu_0 \times 10\text{ A} \approx 1{,}3 \times 10^{-5}$ T·m (1 punto ciascuna). b) No: il teorema dà la somma dei prodotti $B_t \Delta l$ lungo la linea, non il campo nei singoli punti. Senza una simmetria che renda il campo tangente e costante lungo il percorso (come per un solo filo e una circonferenza centrata su di esso), il campo non si ricava dalla circuitazione (1 punto). c) Serve una corrente di 10 A entrante nella pagina, perché la somma algebrica delle correnti concatenate si annulli (1 punto). Il campo sui punti di C_3 non è nullo: ogni filo produce un campo in ogni punto della linea; è nulla soltanto la somma dei contributi lungo il percorso chiuso (1 punto).

16. a) Sezione della piastrina: $S = dh = 4{,}0 \times 10^{-3}$ m × $2{,}0 \times 10^{-4}$ m = $8{,}0 \times 10^{-7}$ m^2 (1 punto). Da $I = neSv_d$: $v_d = I/(neS) = 5{,}0 \times 10^{-3}$ A / ($2{,}0 \times 10^{22}$ m^{-3} × $1{,}60 \times 10^{-19}$ C × $8{,}0 \times 10^{-7}$ m^2) = $5{,}0 \times 10^{-3}$ / $2{,}56 \times 10^{-3}$ m/s ≈ 2,0 m/s (1,95 m/s) (2 punti). b) All'equilibrio $eE_H = ev_dB$, quindi $V_H = v_d B d = 1{,}95$ m/s × 0,10 T × $4{,}0 \times 10^{-3}$ m ≈ $7{,}8 \times 10^{-4}$ V = 0,78 mV (2 punti). Controllo con $V_H = IB/(neh) = 5{,}0 \times 10^{-3}$ A × 0,10 T / ($2{,}0 \times 10^{22}$ × $1{,}60 \times 10^{-19}$ C × $2{,}0 \times 10^{-4}$ m) = $7{,}8 \times 10^{-4}$ V (1 punto). c) V_H è proporzionale a B (a parità di corrente e di piastrina): B = 0,10 T × 1,95 mV / 0,781 mV ≈ 0,25 T (2 punti). d) Nel selettore passano indisturbate le particelle con $v = E/B$: $E = vB = 2{,}0 \times 10^5$ m/s × 0,25 T = $5{,}0 \times 10^4$ V/m, e $\Delta V = Ed = 5{,}0 \times 10^4$ V/m × 0,010 m = $5{,}0 \times 10^2$ V (2 punti). Sì: la condizione $qE = qvB$ non dipende né dalla carica né dalla massa; per un elettrone le due forze cambiano verso entrambe e restano in equilibrio (1 punto). e) Traccia: la forza magnetica $q\,\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$ è, per le proprietà del prodotto vettoriale, sempre perpendicolare a $\boldsymbol{v}$, cioè allo spostamento della carica in ogni istante; il lavoro di una forza perpendicolare allo spostamento è zero (cos 90° = 0) (2 punti). Per il teorema dell'energia cinetica, se il lavoro è nullo l'energia cinetica non cambia: il campo magnetico cambia la direzione della velocità, non il suo modulo (2 punti). Un protone più veloce di E/B viene deviato dalla parte della forza magnetica, cioè contro la forza elettrica $q\boldsymbol{E}$: muovendosi in verso opposto al campo elettrico, il campo elettrico compie su di esso un lavoro negativo e la sua energia cinetica diminuisce (aumenterebbe per un protone più lento, deviato nel verso di $\boldsymbol{E}$). A cambiare l'energia è

dunque la forza elettrica; il campo magnetico decide soltanto da che parte la traiettoria si curva (2 punti).

17. a) Per simmetria le linee di campo dentro l'anello sono circonferenze concentriche con il toroide, e su ciascuna il campo è tangente e costante. Una circonferenza di raggio r interna all'anello è attraversata N volte dalla corrente I, sempre nello stesso verso: $B \cdot 2\pi r = \mu_0 NI$, cioè $B = \mu_0 NI/(2\pi r)$ (2 punti). Con $\mu_0 NI/(2\pi) = 2 \times 10^{-7}$ T·m/A × 500 × 0,80 A = $8{,}0 \times 10^{-5}$ T·m: $B = 2{,}0 \times 10^{-3}$ T a 4,0 cm, $1{,}6 \times 10^{-3}$ T a 5,0 cm, $1{,}3 \times 10^{-3}$ T a 6,0 cm (1,33 mT) (2 punti). b) Sezione: 2,0 cm × 2,0 cm = $4{,}0 \times 10^{-4}$ m^2, perpendicolare al campo; $\Phi \approx 1{,}6 \times 10^{-3}$ T × $4{,}0 \times 10^{-4}$ m^2 = $6{,}4 \times 10^{-7}$ Wb (2 punti). È una stima perché il campo non è uniforme sulla sezione: varia come $1/r$, da 2,0 mT sul bordo interno a 1,3 mT su quello esterno, e la formula $BS\cos\theta$ vale per un campo uniforme (1 punto). c) Una circonferenza nel foro centrale non è attraversata da alcuna corrente: $B \cdot 2\pi r = 0$ e, per simmetria, $B = 0$. Una circonferenza esterna all'anello è attraversata N volte verso l'alto (lato interno delle spire) e N volte verso il basso (lato esterno): la corrente concatenata totale è zero e anche lì $B = 0$. Il campo resta tutto dentro l'anello (3 punti). d) $B = \mu_r B_0 = 800 \times 1{,}6 \times 10^{-3}$ T ≈ 1,3 T (1,28 T) (2 punti). No: per il ciclo di isteresi nel ferro resta una magnetizzazione residua (la rimanenza), piccola se il ferro è dolce; per annullarla bisogna applicare un campo opposto, il campo coercitivo (1 punto). e) 900 °C è sopra la temperatura di Curie del ferro (circa 770 °C): i domini scompaiono e il ferro diventa paramagnetico, con μ_r di pochissimo maggiore di 1. Il campo torna circa quello senza nucleo, $1{,}6 \times 10^{-3}$ T: circa 800 volte meno (3 punti).

18. a) $n = N/L$ = 1200 / 0,60 m = $2{,}0 \times 10^3$ spire/m; $B = \mu_0 nI = 4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A × $2{,}0 \times 10^3$ m^{-1} × 2,0 A ≈ $5{,}0 \times 10^{-3}$ T (5,03 mT) (1 + 2 punti). b) Il campo elettrico del cannone compie il lavoro $e\Delta V$: $\frac{1}{2}mv^2 = e\Delta V$, $v = \sqrt{(2e\Delta V/m)} = \sqrt{(2 \times 1{,}60 \times 10^{-19}}$ C × 150 V / $9{,}11 \times 10^{-31}$ kg) = $\sqrt{(5{,}27 \times 10^{13})}$ m/s ≈ $7{,}3 \times 10^6$ m/s (3 punti). c) $r = mv/(eB)$ = $9{,}11 \times 10^{-31}$ kg × $7{,}26 \times 10^6$ m/s / ($1{,}60 \times 10^{-19}$ C × $5{,}03 \times 10^{-3}$ T) ≈ $8{,}2 \times 10^{-3}$ m = 8,2 mm (2 punti); $T = 2\pi m/(eB) = 2\pi \times 9{,}11 \times 10^{-31}$ kg / ($8{,}04 \times 10^{-22}$ C·T) ≈ $7{,}1 \times 10^{-9}$ s (1 punto). Partendo vicino all'asse, l'elettrone si allontana dall'asse al massimo di un diametro, $2r \approx 16$ mm, meno del raggio delle spire (50 mm): non le urta (1 punto). d) $v_\parallel = v\cos 30° = 6{,}29 \times 10^6$ m/s, $v_\perp = v \operatorname{sen} 30° = 3{,}63 \times 10^6$ m/s (1 punto). Il periodo non dipende dalla velocità: $T = 7{,}1 \times 10^{-9}$ s; il passo è $p = v_\parallel T = 6{,}29 \times 10^6$ m/s × $7{,}12 \times 10^{-9}$ s ≈ $4{,}5 \times 10^{-2}$ m = 4,5 cm (raggio dell'elica 4,1 mm) (2 punti). In 60 cm: 0,60 m / 0,0447 m ≈ 13,4, quindi 13 giri completi (1 punto). e) $r = mv/(eB)$ e $B = \mu_0 nI$: per dimezzare il raggio bisogna raddoppiare il campo, quindi la corrente: 4,0 A (1 punto). Invertendo la corrente si inverte $\boldsymbol{B}$: la forza di Lorentz cambia verso e l'elettrone gira in verso opposto, ma il modulo del campo è lo stesso, quindi raggio, periodo e modulo della velocità non cambiano (2 punti).