VERIFICA

Verifica di fine parte · Il magnetismo

Tempo indicativo: 100 minuti · Punteggio totale: 100 punti

Fisica 5 · Parte III · Il magnetismo · versione 1.0
Verifica: Verifica di fine parte · Il magnetismo · pagine 219–228 del volume completo · estratto per lo studio

La verifica riguarda i capitoli 6 e 7. 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. Quando ti si chiede il verso di un campo o di una forza, indica la regola che usi. Dove non è indicato diversamente usa $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A, $e = 1{,}60 \times 10^{-19}$ C, $m_p = 1{,}67 \times 10^{-27}$ kg, $m_e = 9{,}11 \times 10^{-31}$ kg, 1 u = 1,660 54 × 10^{-27} kg, $g = 9{,}8$ m/s^2, e trascura il peso delle particelle cariche. 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 lungo filo verticale è percorso da una corrente diretta verso l'alto. Una bussola è posata sul tavolo a pochi centimetri dal filo, a nord di esso. Nel punto in cui si trova la bussola il campo magnetico prodotto dal filo è diretto verso:
   - **A.** nord
   - **B.** ovest
   - **C.** est
   - **D.** l'alto, parallelo al filo

2. ●● Un filo orizzontale è percorso da una corrente diretta verso est, in un campo magnetico uniforme verticale diretto verso l'alto. La forza magnetica sul filo è diretta verso:
   - **A.** nord
   - **B.** il basso
   - **C.** ovest
   - **D.** sud

3. ● Due solenoidi lunghi hanno lo stesso numero di spire per metro e sono percorsi dalla stessa corrente; il raggio del secondo è triplo di quello del primo. Il campo magnetico all'interno del secondo è:
   - **A.** uguale a quello del primo
   - **B.** triplo di quello del primo
   - **C.** un terzo di quello del primo
   - **D.** nove volte quello del primo

4. ●● Due lunghi fili paralleli si attraggono con una certa forza per unità di lunghezza. Se si raddoppiano entrambe le correnti e anche la distanza fra i fili, la forza per unità di lunghezza diventa:

   A. la metà

   B. la stessa

   C. il doppio

   D. il quadruplo

5. ● Nel motore elettrico in corrente continua il collettore (o commutatore) serve a:

   A. invertire la corrente nella spira a ogni mezzo giro, così che la coppia la faccia ruotare sempre nello stesso verso

   B. rendere uniforme il campo magnetico fra i poli della calamita

   C. aumentare l'intensità della corrente nella spira quando il momento è nullo

   D. frenare la spira quando il momento della coppia è massimo

6. ●● Un protone e una particella α (carica $2e$, massa circa 4 volte quella del protone) entrano con la stessa velocità, perpendicolare allo stesso campo magnetico uniforme. Il rapporto r_α / r_p fra i raggi delle loro traiettorie è circa:

   A. 1/2

   B. 1

   C. 2

   D. 4

7. ●● Un elettrone si muove verso nord in un campo magnetico uniforme verticale, diretto verso il basso. La forza di Lorentz sull'elettrone è diretta verso:

   A. ovest

   B. est

   C. l'alto

   D. sud

8. ●● In un ciclotrone la tensione fra le due D cambia segno con una frequenza fissa, anche se i protoni diventano sempre più veloci. Ciò è possibile perché:

   A. dentro le D il campo elettrico è nullo

   B. il campo magnetico aumenta man mano che i protoni accelerano

   C. la forza di Lorentz compie lavoro e mantiene costante la velocità dei protoni

   D. il tempo impiegato a percorrere ogni semicirconferenza non dipende dalla velocità

9. ●● Una lamina metallica percorsa da corrente è immersa in un campo magnetico perpendicolare alla lamina, e fra i suoi due bordi laterali si misura una piccola differenza di potenziale. Questa tensione:

   A. nasce perché la forza di Lorentz spinge gli elettroni di conduzione verso uno dei bordi e, a parità di corrente, è proporzionale al campo

   B. nasce perché il campo magnetico compie lavoro sugli elettroni e li accelera

   C. è uguale alla differenza di potenziale del generatore che alimenta la lamina

   D. si misura anche senza campo magnetico, perché la lamina ha una resistenza

10. ● Per il nucleo dell'elettromagnete di una gru che solleva rottami di ferro, e che deve lasciarli cadere appena si spegne la corrente, conviene un materiale:

    A. diamagnetico, perché respinge il ferro quando la corrente è spenta

    B. paramagnetico, come l'alluminio

    C. ferromagnetico dolce, con un ciclo di isteresi stretto

    D. ferromagnetico duro, con una grande magnetizzazione residua

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

11. ●● Devi costruire un solenoide lungo 15,0 cm che produca all'interno un campo di 4,0 mT; il filo che hai a disposizione sopporta al massimo una corrente di 1,50 A. a) Quante spire servono, come minimo? (2 punti) b) Avvolgi 320 spire: calcola il campo interno con la corrente massima (1 punto). c) Infili nel solenoide un nucleo di ferro dolce che, per campi così deboli, ha $\mu_r \approx 500$. Quale corrente basta ora per avere nel ferro lo stesso campo di 4,0 mT? (2 punti) d) Con il nucleo e la corrente massima la relazione $B = \mu_r B_0$ darebbe un campo di circa 2 T. Perché questo valore non è affidabile? Che cosa succede al campo nel nucleo quando apri il circuito? (1 punto)

12. ●● Per misurare il campo fra i poli di una calamita a ferro di cavallo, la calamita è appoggiata su una bilancia elettronica; un tratto di filo rigido, fissato a un sostegno che non tocca la bilancia, attraversa il campo perpendicolarmente alle linee per una lunghezza di 5,0 cm. Si fa passare nel filo una corrente crescente e si annota di quanto aumenta la lettura della bilancia: per $I = 0{,}50$ A, 1,00 A, 1,50 A, 2,00 A, 2,50 A l'aumento è $\Delta m = 0{,}30$ g, 0,62 g, 0,91 g, 1,23 g, 1,52 g (incertezza ± 0,02 g). a) Perché cambia la lettura della bilancia, che sostiene la calamita e non il filo? Calcola la forza corrispondente a ciascuna misura, in mN (2 punti). b) Mostra che la forza è proporzionale alla corrente e ricava il modulo del campo magnetico (2 punti). c) Quale forza agirebbe sul filo, con 2,00 A, se formasse un angolo di 30° con le linee del campo? (1 punto) d) Guardando la calamita di fronte, il polo N è a sinistra, il polo S a destra e il filo è perpendicolare al foglio. Sapendo che la lettura della bilancia aumenta, stabilisci se la corrente nel filo è uscente dal foglio o entrante (1 punto).

13. ●● Il vento solare porta verso la Terra protoni con velocità tipiche di $4{,}0 \times 10^5$ m/s. Uno di essi entra in una regione lontana dalla Terra in cui il campo magnetico è uniforme, vale 20 nT ($2{,}0 \times 10^{-8}$ T) ed è perpendicolare alla sua velocità. a) Calcola il modulo della forza di Lorentz sul protone (1 punto). b) Calcola il raggio della traiettoria, in kilometri, e il periodo del moto (2 punti). c) Calcola l'energia cinetica del protone, in joule e in elettronvolt. Quanto vale dopo dieci giri? Perché? (2 punti) d) Un elettrone del vento solare, con la stessa velocità, entra nello stesso campo: in quale verso gira rispetto al protone, e su quale raggio? (1 punto)

14. ●● Vuoi costruire un selettore di velocità che lasci passare senza deviarli gli ioni con velocità $2{,}00 \times 10^5$ m/s. Le lastre distano 1,50 cm e il campo magnetico, perpendicolare al campo elettrico e alla velocità degli ioni, vale 0,0800 T. a) Quale campo elettrico serve, e quale differenza di potenziale fra le lastre? (2 punti) b) Nel selettore entra un protone con velocità $3{,}00 \times 10^5$ m/s. Calcola la forza elettrica, la forza magnetica e la loro risultante. Il protone devia dalla parte verso cui lo spinge la forza elettrica o dalla parte opposta? (2 punti) c) Un elettrone e una particella α, entrambi con velocità $2{,}00 \times 10^5$ m/s, attraversano il selettore senza deviare? Motiva (1 punto). d) Senza cambiare il campo magnetico, quale differenza di potenziale fra le lastre serve per selezionare gli ioni con velocità $4{,}00 \times 10^5$ m/s? (1 punto)

15. ●● Rispondi a ciascuna domanda in 3–4 righe (2 punti ciascuna). a) Il punto dell'Artico verso cui si orienta il polo nord dell'ago di una bussola si chiama «polo nord magnetico». Che tipo di polo magnetico è, fisicamente? Motiva con la regola dell'attrazione fra i poli. b) Spezzando una calamita non si ottiene mai un polo nord isolato. Come spiega questo fatto l'ipotesi delle correnti molecolari di Ampère? Che cosa ha a che fare con le linee chiuse del campo magnetico? c) Una calamita di ferro viene scaldata a 800 °C e poi lasciata raffreddare lontano da altri magneti. Torna a essere la calamita di prima? Spiega con i domini di Weiss, e di' perché lo stesso fenomeno permette alle lave di «registrare» il campo magnetico terrestre.

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

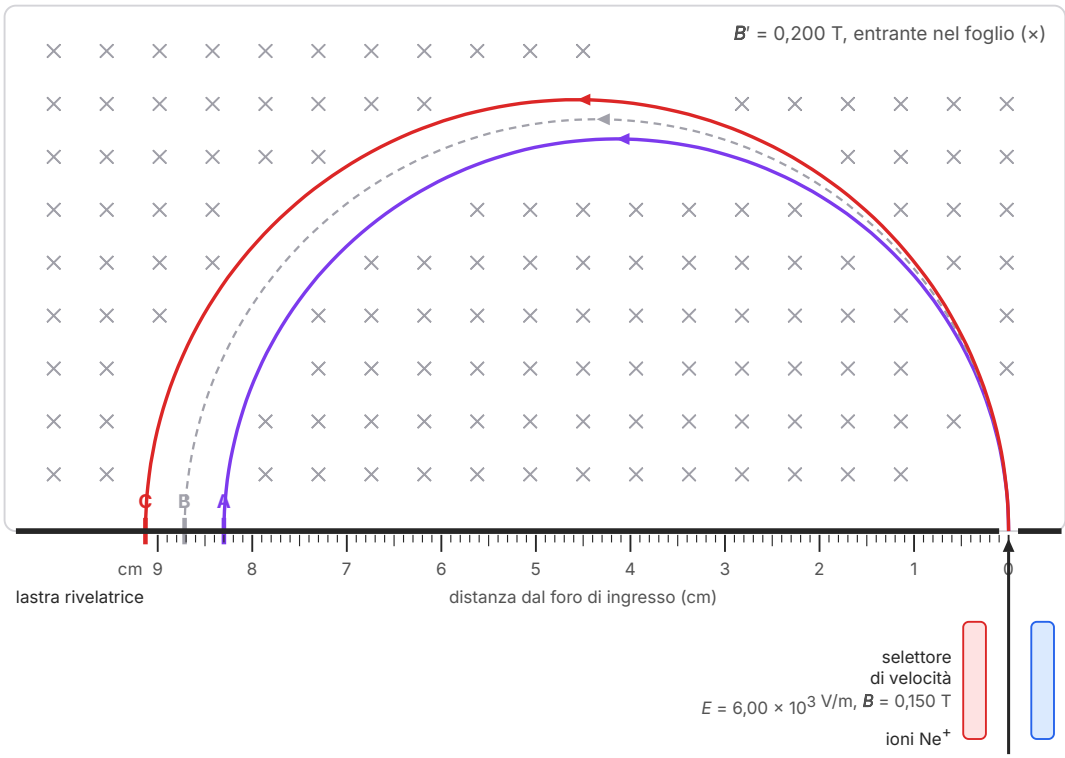


Figura V3.1 Lo spettrometro di massa del secondo problema della Parte C, disegnato in scala. Gli ioni Ne^+ escono dal selettore di velocità, entrano nel campo B' e percorrono semicirconferenze che terminano sulla lastra rivelatrice; la scala sotto la lastra misura la distanza dal foro di ingresso. Traiettorie calcolate; la riga B, debole, è tratteggiata.

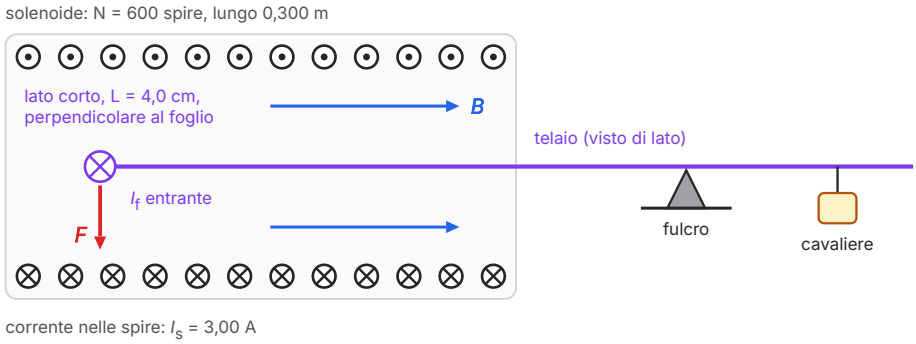


Figura V3.2 La bilancia di corrente del primo problema della Parte C, in sezione lungo l'asse del solenoide (schema, non in scala: nel problema il cavaliere e il lato corto sono alla stessa distanza dal fulcro). Nelle spire la corrente esce dal foglio sopra (⊙) ed entra sotto (⊗). Il telaio a U giace in un piano orizzontale: di lato si vedono i suoi lati lunghi sovrapposti e il lato corto, perpendicolare al foglio, in cui la corrente è entrante.

16. ●● **(12 punti)** La Figura V3.2 mostra una «bilancia di corrente». Dentro un solenoide orizzontale di 600 spire, lungo L_{sol} = 0,300 m e percorso dalla corrente I_s = 3,00 A, entra un telaio rigido a forma di U, che giace in un piano orizzontale ed è imperniato su un fulcro fuori dal solenoide. I due lati lunghi del telaio sono paralleli all'asse del solenoide; il lato corto, lungo L = 4,0 cm, è perpendicolare all'asse e al foglio. Nel telaio passa la corrente I_f = 2,50 A, che nel lato corto è entrante nel foglio. A correnti spente il telaio è in equilibrio orizzontale. a) Calcola il campo magnetico all'interno del solenoide e indica il suo verso, motivandolo con il verso delle correnti nelle spire disegnato in figura (2 punti). b) Calcola modulo, direzione e verso della forza magnetica sul lato corto (2 punti). c) Perché i due lati lunghi del telaio, anch'essi percorsi da corrente e immersi nel campo, non subiscono forze magnetiche? (2 punti) d) Per riportare il telaio in equilibrio si appoggia un cavaliere sul braccio esterno, alla stessa distanza dal fulcro del lato corto. Quale massa deve avere il cavaliere, in milligrammi? (2 punti) e) Se si raddoppiano sia I_s sia I_f, come deve cambiare la massa del cavaliere? (1 punto) f) In una misura reale, con i dati di questo problema, il cavaliere che riporta l'equilibrio ha massa (76 ± 1) mg. Ricava da questa misura il valore di μ_0 e confrontalo con $4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A. Quale effetto sistematico può contribuire alla differenza? (3 punti)

17. ●●● **(12 punti)** Nel 1913 J. J. Thomson trovò il primo indizio che il neon è una miscela di isotopi. Ripeti oggi la misura con lo spettrometro di massa della Figura V3.1, disegnato in scala. Atomi di neon ionizzati una volta (ioni Ne^+, carica $+e$) attraversano un selettore di velocità con $E = 6{,}00 \times 10^3$ V/m e $B = 0{,}150$ T, ed entrano nel campo uniforme $B' = 0{,}200$ T, perpendicolare alla loro velocità. Sulla lastra compaiono tre righe, A, B e C; la B è molto debole. Le righe B e C distano dal foro di ingresso 8,72 cm e 9,13 cm (± 0,02 cm). a) Calcola la velocità degli ioni che escono dal selettore (2 punti). b) L'isotopo più abbondante, il neon-20, ha massa 19,992 u. Calcola il raggio della sua traiettoria e la distanza dal foro alla quale colpisce la lastra. Quale riga produce? Controlla sulla scala della figura (3 punti). c) Ricava la massa degli ioni che producono le righe B e C, in kg e in u, e di' di quali isotopi si tratta (3 punti). d) Le frazioni di atomi che producono le righe A, B e C sono 90,48%, 0,27% e 9,25%. Calcola la massa atomica media del neon, usando per i tre isotopi le masse 19,992 u, 20,994 u e 21,991 u, e confrontala con il valore della tavola periodica, 20,18 u (2 punti). e) Alcuni atomi di neon-20 perdono due elettroni (ioni Ne^{2+}). Escono dal selettore con la stessa velocità degli altri? A quale distanza dal foro colpiscono la lastra? Con quale ione potrebbero essere confusi, e che cosa misura davvero lo spettrometro? (2 punti)

18. ●●● **(12 punti)** (Capitoli 6 e 7.) Un'ampolla di vetro, quasi vuota d'aria, contiene un cannone elettronico che accelera elettroni, partiti praticamente fermi, con una differenza di potenziale di 300 V. L'ampolla è al centro di un solenoide lungo 0,600 m, di diametro 20 cm, con 500 spire percorse da una corrente di 1,50 A; il fascio esce dal cannone perpendicolare all'asse del solenoide, e il poco gas rimasto si illumina dove passano gli elettroni, rendendo visibile la traiettoria. a) Calcola il campo magnetico nella zona dell'ampolla con la formula del solenoide lungo (2 punti). b) Calcola l'energia cinetica degli elettroni, in eV e in J, e la loro velocità (2 punti). c) Prevedi il raggio della traiettoria circolare (2 punti). d) Guardi l'ampolla lungo l'asse del solenoide, e il campo è diretto verso di te. Gli elettroni girano in verso orario o antiorario? Motiva (2 punti). e) Il raggio misurato è (3,7 ± 0,1) cm. Mostra che, combinando $r = mv/(eB)$ con la conservazione dell'energia, si ottiene $e/m = 2\Delta V/(B^2 r^2)$, e calcola e/m con la sua incertezza, considerando soltanto quella sul raggio (3 punti). f) Se si quadruplica la differenza di potenziale del cannone, come cambia il raggio? Come varia l'energia cinetica degli elettroni mentre percorrono la circonferenza? (1 punto)

19. ●●● **(14 punti) Domanda sulla fonte.** Nel sesto libro del *De rerum natura* Lucrezio, dopo aver spiegato perché il magnete attira il ferro, racconta un fenomeno che lo aveva colpito: *exsultare etiam Samothracia ferrea vidi / et ramenta simul ferri furere intus ahenis / in scaphiis, lapis hic Magnes cum subditus esset*, «ho visto anche anelli di ferro di Samotracia saltare, e insieme limatura di ferro agitarsi come impazzita dentro coppe di bronzo, quando sotto era posta questa pietra, il magnete» (VI, 1044–1046, traduzione della redazione). Lucrezio spiega il fenomeno con il suo modello atomistico: dalla pietra esce di continuo un flusso di particelle (*aestus*); se fra la pietra e il ferro c'è il bronzo, il flusso del bronzo arriva per primo a occupare le «vie» aperte nel ferro, e quello della pietra, sopraggiungendo, trova le vie già occupate e urta il ferro, spingendolo via. a) Descrivi con parole tue il fenomeno osservato da Lucrezio. Che cosa ne ricavi sul modo in cui l'azione del magnete attraversa il bronzo? (3 punti) b) Spiega il fenomeno con i concetti dei capitoli 6 e 7: che cosa succede ai granelli di limatura nel campo del magnete, perché si dispongono «in piedi» e perché sembrano respingersi fra loro? (4 punti) c) Il bronzo è una lega di rame, e la sua permeabilità magnetica relativa è praticamente quella del rame, $\mu_r = 0{,}999\,990$. Di quanto, in percentuale, il fondo della coppa modifica il campo del magnete? Che cosa resta, allora, della spiegazione di Lucrezio? Proponi un esperimento che metta alla prova la sua ipotesi, e prevedi che cosa succederebbe con una coppa di ferro (4 punti). d) Lucrezio cerca una causa materiale che passi di corpo in corpo, invece di ammettere un'azione a distanza. In che cosa la sua idea somiglia al concetto di campo, e in che cosa ne è lontana? (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). Le linee del campo del filo sono circonferenze centrate sul filo; con il pollice della mano destra verso l'alto, le dita girano in verso antiorario visto dall'alto. A nord del filo la circonferenza, percorsa in verso antiorario, è diretta verso ovest. Il campo non è mai parallelo al filo (D).

2. D (2 punti). $\boldsymbol{F} = I\,\boldsymbol{L} \times \boldsymbol{B}$: piegando le dita della mano destra da est (verso della corrente) verso l'alto (verso del campo), il pollice punta verso sud. Il filo e il campo sono perpendicolari, quindi la forza non è nulla ed è orizzontale, perpendicolare a entrambi (B è esclusa).

3. A (2 punti). Dentro un solenoide lungo $B = \mu_0 NI/L$: il campo dipende soltanto dal numero di spire per unità di lunghezza e dalla corrente, non dal raggio.

4. C (2 punti). $F/L = \mu_0 I_1 I_2/(2\pi d)$: il prodotto delle correnti diventa 4 volte maggiore, la distanza doppia lo divide per 2. In tutto 4/2 = 2.

5. A (2 punti). Quando la spira supera la posizione di momento nullo, il collettore scambia i collegamenti con le spazzole e la corrente nella spira si inverte: si invertono le forze e la coppia continua a farla ruotare nello stesso verso.

6. C (2 punti). $r = mv/(|q|B)$: a parità di velocità e di campo r è proporzionale a $m/|q|$, che per la particella α è 4/2 = 2 volte quello del protone.

7. B (2 punti). Per una carica positiva il verso è quello di $\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$: dita da nord verso il basso, pollice verso ovest. L'elettrone è negativo e la forza ha verso opposto: verso est. Chi risponde A dimentica il segno della carica.

8. D (2 punti). Il periodo $T = 2\pi m/(|q|B)$ non dipende dalla velocità: i protoni più veloci percorrono semicirconferenze più grandi nello stesso tempo $T/2$, e la tensione può invertirsi sempre con la stessa frequenza. A è vera, ma non spiega la frequenza fissa; B è falsa, perché nel ciclotrone il campo magnetico resta costante; C è falsa, perché la forza di Lorentz non compie lavoro.

9. A (2 punti). È l'effetto Hall: gli elettroni di conduzione, spinti dalla forza di Lorentz, si accumulano su un bordo e lasciano l'altro carico positivamente, finché il campo elettrico trasversale non equilibra la forza magnetica. A corrente fissata la tensione è proporzionale al campo: è il principio della sonda di Hall. Il campo magnetico non compie lavoro (B).

10. C (2 punti). Un materiale dolce si magnetizza fortemente quando passa la corrente e, con un ciclo di isteresi stretto, si smagnetizza quasi del tutto quando la corrente si spegne: i rottami cadono. Un materiale duro (D) resterebbe magnetizzato e li tratterrebbe; diamagnetici e paramagnetici (A, B) non rinforzano in modo apprezzabile il campo.

11. a) Da $B = \mu_0 NI/L$: $N = BL/(\mu_0 I) = 4{,}0 \times 10^{-3}\ \text{T} \cdot 0{,}150\ \text{m} / (4\pi \times 10^{-7}\ \text{T·m/A} \cdot 1{,}50\ \text{A}) \approx 318$ (1 punto); servono almeno 319 spire, cioè in pratica circa 320 (1 punto). b) $B = 4\pi \times 10^{-7}\ \text{T·m/A} \cdot 320 \cdot 1{,}50\ \text{A} / 0{,}150\ \text{m} \approx 4{,}02 \times 10^{-3}\ \text{T} = 4{,}02\ \text{mT}$ (1 punto). c) Ora basta che la corrente produca da sola $B_0 = B/\mu_r = 4{,}0\ \text{mT}/500 = 8{,}0 \times 10^{-6}\ \text{T}$ (1 punto); $I = B_0 L/(\mu_0 N) = 8{,}0 \times 10^{-6}\ \text{T} \cdot 0{,}150\ \text{m} / (4\pi \times 10^{-7}\ \text{T·m/A} \cdot 320) \approx 3{,}0 \times 10^{-3}\ \text{A} = 3{,}0$ mA, cinquecento volte meno (1 punto). d) Per le sostanze ferromagnetiche μ_r non è una costante: quando quasi tutti i domini sono allineati il ferro si avvicina alla saturazione e il campo cresce molto meno di quanto prevede $B = \mu_r B_0$. Aprendo il circuito, il ferro dolce, con un ciclo di isteresi stretto, conserva soltanto una piccola magnetizzazione residua: il campo nel nucleo quasi si annulla (1 punto).

12. a) Per il terzo principio, se la calamita spinge il filo con una forza, il filo spinge la calamita con una forza uguale e opposta, che la bilancia registra come una variazione di peso apparente (1 punto). $F = \Delta m \cdot g$: $0{,}30 \times 10^{-3}\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2 \approx 2{,}9\ \text{mN}$; poi 6,1 mN, 8,9 mN, 12,1 mN, 14,9 mN (1 punto). b) I rapporti F/I valgono 5,9; 6,1; 5,9; 6,0; 6,0 mN/A: sono

uguali entro le incertezze (± 0,2 mN sulla forza, cioè circa ± 0,4 mN/A nella prima misura), quindi la forza è proporzionale alla corrente (1 punto). Con il rapporto medio, 6,0 mN/A, e il filo perpendicolare al campo: $B = F/(IL) = 6{,}0 \times 10^{-3}$ N/A / 0,050 m ≈ 0,12 T (1 punto). c) $F = ILB$ sen 30° = 2,00 A · 0,050 m · 0,12 T · 0,50 ≈ $6{,}0 \times 10^{-3}$ N = 6,0 mN, la metà del valore misurato con il filo perpendicolare (1 punto). d) La lettura aumenta: la calamita è spinta verso il basso, quindi il filo è spinto verso l'alto. Il campo va da N a S, cioè da sinistra a destra; perché $I\boldsymbol{L} \times \boldsymbol{B}$ punti in alto, piegando le dita da $\boldsymbol{L}$ verso destra il pollice deve salire: $\boldsymbol{L}$, e quindi la corrente, è uscente dal foglio (1 punto).

13. a) $F = evB = 1{,}60 \times 10^{-19}$ C · $4{,}0 \times 10^{5}$ m/s · $2{,}0 \times 10^{-8}$ T ≈ $1{,}3 \times 10^{-21}$ N (1 punto). b) $r = m_p v/(eB) = 1{,}67 \times 10^{-27}$ kg · $4{,}0 \times 10^{5}$ m/s / ($1{,}60 \times 10^{-19}$ C · $2{,}0 \times 10^{-8}$ T) ≈ $2{,}1 \times 10^{5}$ m, circa 210 km (1 punto); $T = 2\pi m_p/(eB) = 2\pi \cdot 1{,}67 \times 10^{-27}$ kg / ($1{,}60 \times 10^{-19}$ C · $2{,}0 \times 10^{-8}$ T) ≈ 3,3 s (1 punto). c) $K = \frac{1}{2} m_p v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1{,}67 \times 10^{-27}$ kg · ($4{,}0 \times 10^{5}$ m/s)^2 ≈ $1{,}3 \times 10^{-16}$ J (1 punto), cioè $1{,}34 \times 10^{-16}$ J / $1{,}60 \times 10^{-19}$ J/eV ≈ $8{,}4 \times 10^{2}$ eV. Dopo dieci giri l'energia cinetica è la stessa: la forza di Lorentz è sempre perpendicolare alla velocità, non compie lavoro e cambia soltanto la direzione del moto (1 punto). d) La carica ha segno opposto: l'elettrone gira nel verso contrario. Il raggio è proporzionale alla massa: $r = 9{,}11 \times 10^{-31}$ kg · $4{,}0 \times 10^{5}$ m/s / ($1{,}60 \times 10^{-19}$ C · $2{,}0 \times 10^{-8}$ T) ≈ $1{,}1 \times 10^{2}$ m, circa 1800 volte meno (1 punto).

14. a) Equilibrio fra le forze: $|q|E = |q|vB$, quindi $E = vB = 2{,}00 \times 10^{5}$ m/s · 0,0800 T = $1{,}60 \times 10^{4}$ V/m (1 punto); fra le lastre $\Delta V = Ed = 1{,}60 \times 10^{4}$ V/m · 0,0150 m = 240 V (1 punto). b) Forza elettrica: $eE = 1{,}60 \times 10^{-19}$ C · $1{,}60 \times 10^{4}$ V/m ≈ $2{,}56 \times 10^{-15}$ N; forza magnetica: $evB = 1{,}60 \times 10^{-19}$ C · $3{,}00 \times 10^{5}$ m/s · 0,0800 T ≈ $3{,}84 \times 10^{-15}$ N (1 punto). Le due forze hanno versi opposti: la risultante vale $1{,}28 \times 10^{-15}$ N, nel verso della forza magnetica, che per il protone più veloce prevale. Il protone devia dalla parte opposta a quella verso cui lo spinge la forza elettrica, e non esce dalla fenditura (1 punto). c) Sì, entrambi: nell'equilibrio $|q|E = |q|vB$ la carica si semplifica e la massa non compare; per l'elettrone le due forze cambiano entrambe verso e continuano a equilibrarsi (1 punto). d) La velocità selezionata è E/B: per raddoppiarla a B fisso serve un campo elettrico doppio, quindi $\Delta V = 4{,}00 \times 10^{5}$ m/s · 0,0800 T · 0,0150 m = 480 V (1 punto).

15. Traccia di risposta. a) Il polo nord dell'ago è attratto verso quel punto, e poli di nome diverso si attraggono: il «polo nord magnetico» della geografia si comporta, fisicamente, come il polo sud di una calamita. Il nome indica il luogo, non il tipo di polo (2 punti). b) Secondo Ampère il magnetismo di una calamita nasce da minuscole correnti circolari nella materia, allineate fra loro; ogni corrente circolare, come una spira, ha sempre una faccia nord e una faccia sud. Comunque si spezzi la calamita, ogni pezzo contiene correnti intere, e quindi ha entrambi i poli (1 punto). Poiché le sorgenti del campo sono correnti e non «cariche magnetiche», le linee del campo non hanno punti da cui partire o in cui finire: sono chiuse, come le circonferenze attorno a un filo, e il flusso del campo attraverso una superficie chiusa è nullo (1 punto). c) Oltre la temperatura di Curie del ferro, circa 770 °C, l'agitazione termica distrugge l'allineamento spontaneo dei magneti atomici e la calamita perde la sua magnetizzazione. Raffreddandosi i domini si riformano, ma orientati senza la direzione di prima: la calamita non torna com'era, e resta soltanto una debole magnetizzazione nella direzione del campo presente durante il raffreddamento, quello terrestre (1 punto). Allo stesso modo i minerali magnetici di una lava, raffreddandosi sotto la loro temperatura di Curie, si magnetizzano nella direzione del campo terrestre di quel momento e la conservano: le rocce di età diverse mostrano così che il campo della Terra si è invertito molte volte (1 punto).

16. a) $B = \mu_0 N I_s / L_{sol} = 4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A · 600 · 3,00 A / 0,300 m ≈ $7{,}54 \times 10^{-3}$ T = 7,54 mT (1 punto). Nelle spire la corrente esce dal foglio in alto ed entra in basso: piegando le dita della mano destra in questo verso lungo le spire, il pollice punta verso destra. Il campo all'interno è diretto lungo l'asse, verso destra (1 punto). b) Il lato corto è perpendicolare al campo: $F = I_f LB = 2{,}50$ A · 0,040 m · $7{,}54 \times 10^{-3}$ T ≈ $7{,}5 \times 10^{-4}$ N (1 punto). Direzione e verso: $\boldsymbol{L}$ entra nel foglio, $\boldsymbol{B}$ va verso destra; piegando le dita da «entran-

te» verso «destra» il pollice punta in basso. La forza è verticale, verso il basso (1 punto). c) I lati lunghi sono paralleli all'asse, quindi al campo: la forza, proporzionale a sen θ con θ = 0° o 180°, è nulla. Nel tratto fuori dal solenoide il campo è debole, e comunque nelle due braccia la corrente ha versi opposti (2 punti). d) La forza verso il basso sul lato corto fa ruotare il telaio; il cavaliere, alla stessa distanza dal fulcro dalla parte opposta, deve avere lo stesso momento: $mg = F$ (1 punto), $m = F/g = 7{,}54 \times 10^{-4}$ N / 9,8 m/s^2 ≈ $7{,}7 \times 10^{-5}$ kg = 77 mg (1 punto). e) Raddoppiando I_s raddoppia il campo, e raddoppiando I_f raddoppia la corrente nel lato corto: la forza diventa 4 volte maggiore, e così la massa del cavaliere, circa 310 mg (1 punto). f) Da $mg = I_f L \cdot \mu_0 N I_s / L_{sol}$ si ricava $\mu_0 = mgL_{sol}/(NI_sI_fL)$ (1 punto) = 76×10^{-6} kg · 9,8 m/s^2 · 0,300 m / (600 · 3,00 A · 2,50 A · 0,040 m) ≈ $1{,}24 \times 10^{-6}$ T·m/A (1 punto). Il valore è circa l'1% più piccolo di $4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A ≈ $1{,}26 \times 10^{-6}$ T·m/A, una differenza dell'ordine dell'incertezza sulla massa (1 mg su 76, circa 1,3%). Un effetto sistematico va comunque nello stesso verso: la formula vale per un solenoide infinitamente lungo, e il campo di un solenoide reale è un po' più debole, tanto più quanto più il lato corto è vicino alle estremità (come nel laboratorio del capitolo 6) (1 punto).

17. a) Nel selettore passano gli ioni con $v = E/B = 6{,}00 \times 10^3$ V/m / 0,150 T = $4{,}00 \times 10^4$ m/s (2 punti). b) $m = 19{,}992 \cdot 1{,}660\,54 \times 10^{-27}$ kg ≈ $3{,}320 \times 10^{-26}$ kg (1 punto); $r = mv/(eB') = 3{,}320 \times 10^{-26}$ kg · $4{,}00 \times 10^4$ m/s / ($1{,}60 \times 10^{-19}$ C · 0,200 T) ≈ $4{,}15 \times 10^{-2}$ m = 4,15 cm (1 punto); $d = 2r$ ≈ 8,30 cm: è la riga A, la più vicina al foro, come si legge sulla scala della figura (1 punto). c) Da $d = 2mv/(eB')$: $m = eB'd/(2v)$ (1 punto). Riga B: $m = 1{,}60 \times 10^{-19}$ C · 0,200 T · 0,0872 m / (2 · $4{,}00 \times 10^4$ m/s) ≈ $3{,}488 \times 10^{-26}$ kg ≈ 21,01 u, il neon-21 (1 punto). Riga C: $m \approx 3{,}652 \times 10^{-26}$ kg ≈ 21,99 u, il neon-22 (1 punto). L'incertezza di 0,02 cm sulle distanze corrisponde a circa 0,05 u: le masse sono compatibili con quelle degli isotopi, e i tre valori stanno come le distanze. d) Media pesata: (19,992 · 90,48 + 20,994 · 0,27 + 21,991 · 9,25)/100 ≈ 20,18 u (1 punto), in accordo con la tavola periodica: la massa «non intera» del neon nasce dalla miscela degli isotopi (1 punto). e) Sì: la velocità selezionata, E/B, non dipende dalla carica (1 punto). Con carica doppia il raggio si dimezza: d ≈ 4,15 cm. In quel punto arriverebbe anche uno ione di carica $+e$ e massa 10,0 u: lo spettrometro non misura la massa, ma il rapporto fra massa e carica (1 punto).

18. a) $B = \mu_0 NI/L_{sol} = 4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A · 500 · 1,50 A / 0,600 m ≈ $1{,}57 \times 10^{-3}$ T (2 punti; il solenoide è lungo tre volte il suo diametro e l'ampolla è al centro, quindi la formula è una buona approssimazione). b) Il lavoro del campo elettrico diventa energia cinetica: $K = e\Delta V = 300$ eV = 300 · $1{,}60 \times 10^{-19}$ J = $4{,}80 \times 10^{-17}$ J (1 punto); $v = \sqrt{(2K/m_e)} = \sqrt{(2 \cdot 4{,}80 \times 10^{-17}\text{ J} / 9{,}11 \times 10^{-31}\text{ kg})} \approx 1{,}03 \times 10^7$ m/s, circa il 3% della velocità della luce (1 punto). c) $r = m_e v/(eB) = 9{,}11 \times 10^{-31}$ kg · $1{,}03 \times 10^7$ m/s / ($1{,}60 \times 10^{-19}$ C · $1{,}57 \times 10^{-3}$ T) ≈ $3{,}7 \times 10^{-2}$ m = 3,7 cm (2 punti): la circonferenza, di 7,4 cm di diametro, sta nell'ampolla. d) Per una carica positiva, con il campo entrante nel foglio, il moto è antiorario (capitolo 7); con il campo uscente, cioè verso l'osservatore, è orario (1 punto). L'elettrone è negativo e gira nel verso opposto: antiorario (1 punto). e) Da $r = mv/(eB)$: $v = eBr/m$. Sostituendo in $\frac{1}{2}mv^2 = e\Delta V$: $\frac{1}{2}m(eBr/m)^2 = e\Delta V$, cioè $e/m = 2\Delta V/(B^2r^2)$ (1 punto). $e/m = 2 \cdot 300$ V / (($1{,}571 \times 10^{-3}$ T)^2 · (0,037 m)^2) ≈ $1{,}78 \times 10^{11}$ C/kg (1 punto). Il raggio compare al quadrato: l'incertezza relativa è 2 · 0,1/3,7 ≈ 5%, cioè ± $0{,}10 \times 10^{11}$ C/kg. $e/m = (1{,}78 \pm 0{,}10) \times 10^{11}$ C/kg, compatibile con il valore accettato, $1{,}76 \times 10^{11}$ C/kg (1 punto). f) r è proporzionale a v, cioè a $\sqrt{(\Delta V)}$: quadruplicando la tensione il raggio raddoppia, a circa 7,4 cm. Sulla circonferenza l'energia cinetica resta costante (1200 eV), perché la forza di Lorentz non compie lavoro (1 punto).

19. Traccia di risposta. a) Lucrezio vede anelli di ferro saltare e limatura di ferro agitarsi dentro coppe di bronzo, quando sotto la coppa si pone una calamita: il ferro si muove senza toccare la pietra, e fra i due c'è uno strato di metallo (1 punto). Interpreta il moto come un «fuggire» del ferro, cioè una repulsione (1 punto). Se ne ricava che il bronzo non ferma l'azione del magnete, che si esercita anche attraverso un corpo solido; Oersted noterà lo stesso per l'effetto della corrente sull'ago, che attraversa vetro, legno e acqua (1 punto). b) Il campo del magnete attraversa il fondo della coppa e raggiunge la

limatura (1 punto). Ogni granello è ferromagnetico: nel campo i suoi domini di Weiss si orientano e il granello diventa una piccola calamita (1 punto). Come l'ago di una bussola, si dispone lungo le linee del campo, che sopra un polo della calamita sono quasi verticali: i granelli si alzano «in piedi» e si attaccano in catene, come gli anelli della catena descritta da Lucrezio e da Platone (1 punto). Granelli vicini, affiancati, sono magnetizzati nello stesso verso e hanno uno accanto all'altro poli dello stesso nome: si respingono di fianco; e quando la calamita si sposta il campo cambia direzione, i granelli ruotano e saltano. È l'«agitarsi» che Lucrezio vede (1 punto). c) $B = \mu_r B_0$, con $\mu_r = 0{,}999\,990$: il campo diminuisce di una parte su centomila, lo 0,001%. Il bronzo è praticamente trasparente al campo magnetico (1 punto). Della spiegazione di Lucrezio resta l'osservazione, non la causa: il bronzo non ha alcun ruolo, e il fenomeno si presenta allo stesso modo senza bronzo (1 punto). Esperimento: ripetere la prova con coppe di vetro, di legno, di plastica, di alluminio e con un semplice cartoncino. Se la limatura si comporta sempre allo stesso modo, il bronzo non c'entra e l'ipotesi di Lucrezio è smentita (1 punto). Con una coppa di ferro, ferromagnetico, le linee del campo si incanalano nel ferro del fondo e delle pareti: sopra il fondo il campo diventa molto più debole e la limatura si agita molto meno, mentre la coppa stessa è attratta dalla calamita (1 punto). d) Somiglianza: anche per Lucrezio l'azione passa attraverso lo spazio, portata da qualcosa che sta fra i corpi, e non è un'azione a distanza; il campo, allo stesso modo, è una proprietà dello spazio intorno al magnete che agisce sul ferro nel punto in cui si trova, come voleva Faraday (capitolo 2) (1 punto). Differenze: l'*aestus* è un flusso di particelle materiali, che i corpi possono intercettare; il campo non è fatto di materia, attraversa il bronzo indisturbato, ha in ogni punto modulo, direzione e verso misurabili (con un ago o una sonda di Hall), e le sue linee sono chiuse (1 punto). Soprattutto, la teoria del campo fa previsioni quantitative verificabili, come $B = \mu_0 I/(2\pi r)$, mentre il modello di Lucrezio è qualitativo; ma il suo metodo, cercare una causa naturale invece di una forza misteriosa, è quello che la fisica ha conservato (1 punto).