ESAME DI STATO



Verso l'esame di Stato · Materiali per il colloquio

Materiali per il colloquio · La fisica di tutto il quinto anno

Fisica 5 · Parte V · La fisica del Novecento · versione 1.0
Verifica: Verso l'esame di Stato · Materiali per il colloquio · pagine 429–438 del volume completo · estratto per lo studio

Questa unità raccoglie materiali per prepararti al colloquio dell'esame di Stato e, più in generale, per imparare a parlare di fisica in modo ordinato. Non è una verifica: non ci sono punteggi. I dieci materiali partono da un documento (una fonte, un grafico, una tabella di dati, una situazione reale) e toccano tutte le parti del volume. Per ciascuno prepara prima un discorso di 3–5 minuti che presenti il fenomeno, la legge che lo spiega e un collegamento con un'altra disciplina; poi rispondi alle domande guida, che sono le domande che potrebbero seguire il tuo discorso. Le sei trattazioni sintetiche chiedono 10–15 righe scritte su un'idea chiave del volume; i quattro problemi, da risolvere per passi, si chiudono con un commento del risultato. Nelle soluzioni trovi, per i materiali e le trattazioni, una traccia: i punti che una risposta completa tocca, i collegamenti possibili e gli errori più frequenti; per i problemi, la soluzione completa. Usa la calcolatrice scientifica e le costanti della Tabella A.1, e scrivi sempre le unità di misura.

Materiali per il colloquio

1. ●● **Dal documento · Un'«assurdità» molto utile.** In una lettera del 1692–93 al teologo Richard Bentley, Isaac Newton scrive: «Che la gravità sia innata, inerente ed essenziale alla materia, così che un corpo possa agire su un altro a distanza attraverso il vuoto, senza la mediazione di nient'altro [...], è per me un'assurdità così grande che credo che nessuno che abbia in materia filosofica una competente facoltà di pensiero possa mai caderci» (traduzione della redazione). a) Quale modello di interazione contesta Newton? Perché la legge di Coulomb pone lo stesso problema della legge di gravitazione universale? b) Come risponde il concetto di campo elettrico? Dai la definizione di $\boldsymbol{E}$, spiega che cosa rappresentano le linee di forza di Faraday e perché non sono traiettorie. c) Finché le cariche sono ferme, campo e azione a distanza danno le stesse previsioni. Quali fenomeni studiati nel volume rendono il campo indispensabile? Indicane almeno due, di parti diverse. d) Collegamento con la Filosofia: il rifiuto meccanicista delle azioni senza contatto (Leibniz parlava di «qualità occulta») e la domanda su che cosa una teoria fisica ci autorizza a considerare reale.

Tabella V6.1 Cinque goccioline d'olio tenute sospese fra due piastre orizzontali distanti 8,0 mm (materiale sulle gocce d'olio). La massa è ricavata dalla velocità di caduta a piastre scariche; ΔV è la differenza di potenziale che tiene ferma la goccia.

Goccia	Massa m (10^{-15} kg)	ΔV (V)
A	2,10	518
B	3,35	547
C	1,62	796
D	4,50	440
E	2,95	360

2. ●● **Dal documento · Gocce d'olio.** In un esperimento del tipo di Millikan cinque goccioline d'olio con carica negativa vengono tenute sospese, una alla volta, fra due piastre metalliche orizzontali distanti 8,0 mm, regolando la differenza di potenziale fra le piastre. I dati sono nella Tabella V6.1. a) Disegna le forze che agiscono sulla goccia sospesa e ricava la formula della sua carica, $q = mgd/\Delta V$, ricordando che fra le piastre il campo è uniforme. Calcola le cinque cariche. b) Le cariche trovate sono multipli interi di uno stesso valore? Quale? Che cosa significa che la carica è quantizzata, e che cosa accade, in termini di elettroni, quando una goccia si carica? c) Quale delle due piastre deve essere positiva? Che cosa succederebbe alla goccia A se la tensione venisse raddoppiata? d) Collegamento con il Greco e la Filosofia: gli atomisti, da Democrito a Lucrezio, pensavano la materia fatta di corpuscoli indivisibili. In che senso la carica elementare è un «atomo» di elettricità? E perché la parola ἄτομος, «indivisibile», si è rivelata inadatta all'atomo dei chimici?

Tabella V6.2 Potenza di alcuni apparecchi di un appartamento (valori di targa tipici), alimentati dalla tensione efficace di 230 V (materiale sull'impianto di casa).

Apparecchio	Potenza (W)
forno elettrico	2200
lavatrice, mentre scalda l'acqua	2000
asciugacapelli	1800
frigorifero	150
televisore	100
lampade LED (in tutto)	80

3. ●● **Dal documento · L'impianto di casa.** Un appartamento ha un contratto di fornitura da 3 kW: se la potenza assorbita resta a lungo sopra quella prevista, il contatore interrompe l'erogazione. Gli apparecchi principali sono nella Tabella V6.2. a) Perché gli apparecchi di una casa sono collegati in parallelo? Calcola la corrente e la resistenza del forno e dell'asciugacapelli quando funzionano. b) Una sera sono accesi insieme il forno, la lavatrice e l'asciugacapelli: calcola la potenza e la corrente totali e spiega che cosa accade. Quale dispositivo del quadro elettrico protegge i cavi da una corrente eccessiva, e come funziona? c) Un asciugacapelli acceso cade in un lavandino pieno d'acqua. Perché è pericoloso, quale dispositivo interviene e su quale principio? Perché l'involucro metallico della lavatrice è collegato a terra? d) Il forno resta acceso un'ora e mezza alla potenza di targa: quanta energia consuma, in kWh e in joule, e quanto costa con un prezzo ipotetico di 0,25 € al kWh? Collegamento con l'Educazione civica (la sicurezza elettrica) e con la Storia (l'elettrificazione delle città nella seconda rivoluzione industriale).

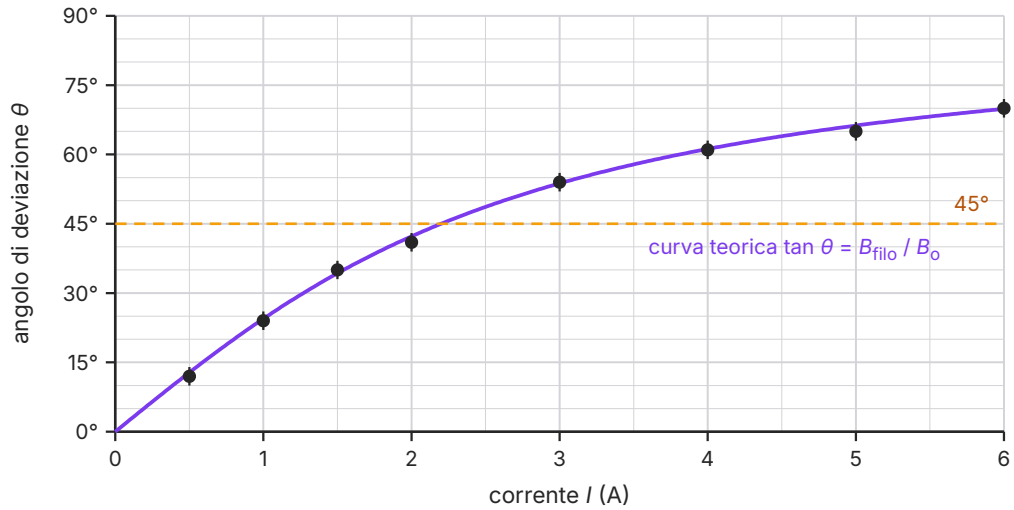


Figura V6.1 L'angolo di cui devia l'ago di una bussola, posta 2,0 cm sotto un lungo filo rettilineo teso in direzione nord-sud, in funzione della corrente nel filo (materiale sull'esperienza di Oersted). I punti sono le misure, con un'incertezza di ± 2°; la curva viola è la legge tan $\theta = B_{filo}/B_o$ che si ricava nel materiale; la retta tratteggiata segna $\theta = 45°$. La griglia fine ha passo 0,5 A e 5°.

4. ●● **Dal documento · L'ago e il filo.** Una classe ripete l'esperienza di Oersted del 1820: un lungo filo rettilineo, teso in direzione nord-sud, passa 2,0 cm sopra una bussola. Senza corrente l'ago punta verso nord, nella direzione della componente orizzontale B_0 del campo magnetico terrestre; con una corrente I nel filo l'ago devia di un angolo θ. Le misure sono nella Figura V6.1. a) Quale campo produce il filo, con quale intensità e quale direzione nel punto in cui si trova l'ago? Se la corrente va verso nord, l'ago devia verso est o verso ovest? E se la corrente si inverte? b) Il campo del filo è perpendicolare a B_0, e l'ago si dispone lungo il campo totale: spiega perché $\tan\theta = B_{\text{filo}}/B_0$. Leggi sul grafico la corrente per cui $\theta = 45°$ e ricava B_0. Perché il valore è minore dei 5×10^{-5} T del campo terrestre? c) Perché l'ago non arriva mai a 90°, per quanto intensa sia la corrente? d) Collegamento con la Filosofia: Oersted era vicino alla *Naturphilosophie* romantica di Schelling. Quale idea lo guidava nella ricerca di un legame fra elettricità e magnetismo, e che cosa mostra il suo caso sul rapporto fra idee filosofiche ed esperimenti?

5. ●● **Dal documento · Aurore in Italia.** Nella notte fra il 10 e l'11 maggio 2024 una forte tempesta magnetica rese visibili le aurore in gran parte d'Italia. Le aurore si accendono quando particelle cariche, arrivate dal Sole e guidate dal campo magnetico terrestre, penetrano nell'alta atmosfera vicino alle regioni polari e ne eccitano gli atomi. a) Scrivi la forza di Lorentz e spiega perché non compie lavoro. Che moto descrive una particella carica con velocità perpendicolare a un campo magnetico uniforme? E con velocità obliqua? b) Un protone ha velocità $4{,}0 \times 10^5$ m/s perpendicolare a un campo magnetico di $3{,}0 \times 10^{-5}$ T, dell'ordine di quello vicino alla Terra. Calcola il raggio e il periodo della sua orbita, e confronta il raggio con le dimensioni della Terra: che cosa significa che le particelle cariche restano «legate» alle linee di campo? c) Perché le aurore si vedono soprattutto vicino ai poli, e perché sono colorate? (Pensa a come sono fatte le linee del campo terrestre e agli spettri a righe degli atomi.) d) Collegamento con le Scienze naturali, la Storia e l'Educazione civica: la tempesta magnetica del 1859 osservata da Carrington e i guasti alle linee telegrafiche; i rischi di oggi per i satelliti, i sistemi di posizionamento e le reti elettriche.

6. ●● **Dal documento · Il 29 agosto 1831.** Faraday avvolge due bobine, A e B, su un anello di ferro; collega A a una pila attraverso un interruttore e B a un galvanometro. Alla chiusura del circuito l'ago del galvanometro devia, «ma, benché il contatto fosse mantenuto, l'effetto non era permanente, perché l'ago tornò presto nella sua posizione naturale». E ancora: «Interrompendo il contatto con la pila, l'ago fu di nuovo deviato con forza, ma in direzione contraria» (*Experimental Researches in Electricity*, Prima serie, 1831; traduzione della redazione). a) Perché nella bobina B passa corrente soltanto alla chiusura e all'apertura del circuito, e non mentre in A circola una corrente costante? Definisci il flusso del campo magnetico ed enuncia la legge di Faraday–Neumann. b) Perché alla chiusura e all'apertura l'ago devia in versi opposti? Enuncia la legge di Lenz e spiega perché un verso diverso della corrente indotta violerebbe la conservazione dell'energia. c) L'anello di Faraday è l'antenato del trasformatore. Che cosa fa un trasformatore, perché non funziona con la corrente continua, e perché l'energia elettrica si trasporta ad alta tensione? d) Collegamento con la Storia: l'elettrificazione nella seconda rivoluzione industriale e la «guerra delle correnti» fra corrente continua e alternata (Edison, Westinghouse, Tesla, Galileo Ferraris).

7. ●● **Dal documento · Una perturbazione elettromagnetica.** Nel 1865 James Clerk Maxwell scrive: «L'accordo dei risultati sembra mostrare che la luce e il magnetismo sono affezioni della stessa sostanza, e che la luce è una perturbazione elettromagnetica che si propaga attraverso il campo secondo le leggi dell'elettromagnetismo» (*A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*; traduzione della redazione). a) Di quale «accordo dei risultati» parla Maxwell? Calcola $1/\sqrt{(\varepsilon_0\mu_0)}$ con i valori della Tabella A.1 e confrontalo con la velocità della luce. b) Spiega come i due campi si generano a vicenda e descrivi un'onda elettromagnetica: come sono orientati $\boldsymbol{E}$ e $\boldsymbol{B}$, che relazione c'è fra i loro moduli, che cosa la produce. c) Una stazione radio FM trasmette a 100 MHz; un apparecchio per radiografie produce raggi X di lunghezza d'onda 0,10 nm. Calcola la lunghezza d'onda della prima, la frequenza dei secondi e l'energia di un fotone di ciascuna radiazione in elettronvolt. Perché si dice che sono la stessa onda, e perché solo i raggi X sono ionizzanti? d) Collegamento con la Storia: dalle esperienze di Hertz (1887–88) alla radio di Marconi; il naufragio del *Titanic* (1912) e la radio come strumento di propaganda dei regimi totalitari.

8. ●● **Dal documento · Dalla nave di Galileo all'etere superfluo.** Nel *Dialogo* (1632) Salviati, il portavoce di Galileo, dopo aver descritto gli esperimenti nella stiva di una nave, conclude: «Fate muover la nave con quanta si voglia velocità; chè (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, nè da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina o pure sta ferma» (Giornata seconda; Edizione Nazionale, vol. VII, pp. 212–213). Nel 1905 Einstein, nell'introduzione dell'articolo sull'elettrodinamica dei corpi in movimento, annuncia: «L'introduzione di un “etere luminifero” si rivelerà superflua» (traduzione della redazione). a) Enuncia il principio di relatività di Galileo. Perché l'elettromagnetismo di Maxwell, con la sua velocità c, sembrava metterlo in crisi? Che cosa cercava e che cosa trovò l'esperimento di Michelson e Morley (1887)? b) Enuncia i due postulati di Einstein. Perché il secondo contraddice la regola galileiana di composizione delle velocità, e perché con essi l'etere diventa «superfluo»? c) Con l'orologio a luce spiega perché un orologio in moto risulta più lento, $\Delta t = \gamma \Delta t_0$. Un'astronave viaggia a 0,80 c rispetto alla Terra: mentre il suo orologio segna 3,0 anni, quanti anni passano sulla Terra? Chi misura il tempo proprio? d) Collegamento con la Filosofia: la relatività non è relativismo; le critiche di Mach allo spazio e al tempo assoluti e la crisi del positivismo.

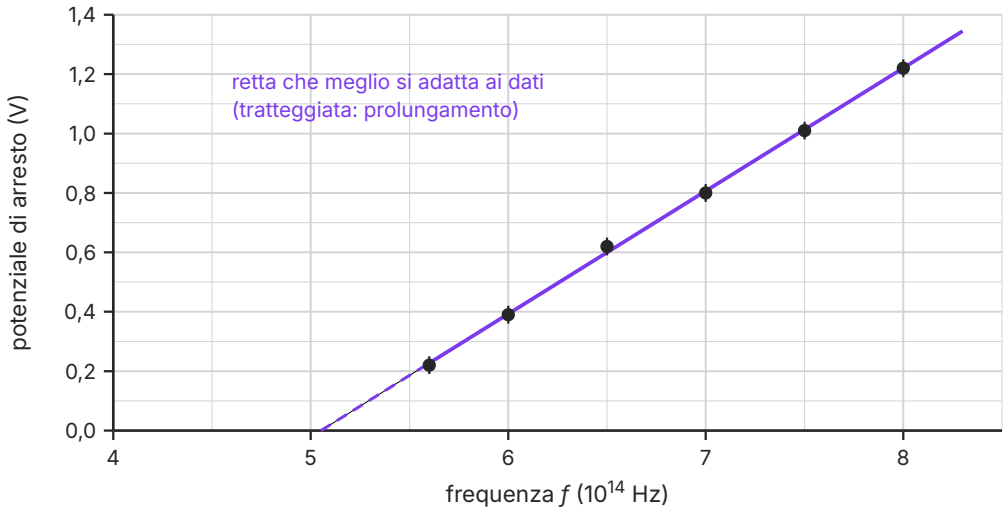


Figura V6.2 Il potenziale di arresto dei fotoelettroni emessi da un catodo metallico in funzione della frequenza della luce che lo illumina (materiale sulla costante di Planck). Le barre indicano l'incertezza di ± 0,03 V; la retta che meglio si adatta ai punti è prolungata, tratteggiata, fino all'asse delle frequenze. La griglia fine ha passo 0,5 × 10^{14} Hz e 0,1 V.

9. ●● **Dal documento · Una misura della costante di Planck.** Il catodo di una cella fotoelettrica viene illuminato con luce di diverse frequenze, e per ciascuna si misura il potenziale di arresto (Figura V6.2). Con luce di frequenza minore di circa 5×10^{14} Hz non si osserva corrente, per quanto intensa sia la luce. a) Descrivi l'effetto fotoelettrico. Quali fatti sperimentali la teoria ondulatoria della luce non riesce a spiegare? b) Scrivi l'equazione di Einstein e spiega perché la pendenza della retta è h/e. Dal grafico ricava la costante di Planck, la frequenza di soglia e il lavoro di estrazione; di quale metallo della Tabella A.5 può trattarsi? c) Come cambierebbe il grafico se si raddoppiasse l'intensità della luce? E se il catodo fosse di zinco ($W = 4{,}3$ eV)? d) Collegamento con la Storia e la Filosofia: Planck nel 1900 e Einstein nel 1905 non dissero la stessa cosa (rileggi l'epigrafe del capitolo 13); il premio Nobel del 1921 a Einstein, e per quale ragione; l'idea di una luce che è insieme onda e particella e la fine di un mondo prevedibile.

10. ●●● **Dal documento · Una carica centrale.** Nel 1911 Ernest Rutherford interpreta gli esperimenti di Geiger e Marsden con le particelle α: «Considerando l'insieme dei dati, sembra più semplice supporre che l'atomo contenga una carica centrale distribuita in un volume molto piccolo, e che le grandi deviazioni singole siano dovute alla carica centrale nel suo complesso, e non ai suoi costituenti» (*Philosophical Magazine*, 1911; traduzione della redazione). a) Quali osservazioni portano Rutherford a questa conclusione, e perché il modello di Thomson non le spiega? Perché, secondo la fisica classica, l'atomo di Rutherford non dovrebbe essere stabile, e come risponde Bohr? b) Di che cosa è fatto il nucleo, e quale forza lo tiene insieme? Con le masse della Tabella A.6 calcola il difetto di massa e l'energia di legame del nucleo di elio-4, in MeV e per nucleone. c) Perché liberano energia sia la fissione dei nuclei pesanti sia la fusione di quelli leggeri? Confronta i circa 200 MeV di una fissione di uranio-235 con i pochi elettronvolt di una reazione chimica. d) Collegamento con la Storia e l'Educazione civica: i «ragazzi di via Panisperna» e i neutroni lenti (1934), le leggi razziali del 1938 e l'emigrazione di Fermi, la prima pila atomica (Chicago, 2 dicembre 1942), Hiroshima e Nagasaki (6 e 9 agosto 1945), la responsabilità degli scienziati e il dibattito sull'energia nucleare.

Trattazioni sintetiche

11. ●● **Trattazione sintetica · Il campo.** In 10–15 righe, spiega perché la fisica dell'Ottocento ha sostituito all'azione a distanza il concetto di campo, e quali fatti hanno trasformato il campo da strumento di calcolo in un oggetto fisico.

12. ●● **Trattazione sintetica · L'induzione e l'energia.** In 10–15 righe, enuncia la legge di Faraday–Neumann–Lenz e mostra, con l'esempio della sbarretta che scorre su due guide in un campo magnetico, che il verso della corrente indotta è imposto dalla conservazione dell'energia.

13. ●● **Trattazione sintetica · La luce è un'onda elettromagnetica.** In 10–15 righe, ripercorri il ragionamento che porta dalle equazioni di Maxwell alle onde elettromagnetiche, la conferma sperimentale di Hertz e ciò che accomuna tutte le bande dello spettro.

14. ●● **Trattazione sintetica · Il tempo degli orologi in moto.** In 10–15 righe, enuncia i due postulati della relatività ristretta, spiega come ne segue la dilatazione dei tempi e descrivi una prova sperimentale.

15. ●● **Trattazione sintetica · L'effetto fotoelettrico.** In 10–15 righe, descrivi i fatti sperimentali dell'effetto fotoelettrico, spiega perché la teoria ondulatoria non li spiega e come li spiega l'ipotesi dei quanti di luce di Einstein.

16. ●● **Trattazione sintetica · Il nucleo e la sua energia.** In 10–15 righe, descrivi com'è fatto il nucleo atomico e spiega da dove viene l'energia liberata nella fissione e nella fusione, usando l'energia di legame e la relazione $E = mc^2$.

Problemi brevi commentati

17. ●● **Problema breve commentato · Il condensatore del flash.** Il flash di una fotocamera usa un condensatore da 150 μF, caricato a 300 V, che si scarica nella lampada in circa 1,0 ms. a) Calcola la carica del condensatore e il numero di elettroni che sono passati da un'armatura all'altra attraverso il circuito durante la carica. b) Calcola l'energia immagazzinata e la potenza media durante il lampo. c) Il circuito di carica equivale a una resistenza di 2,0 kΩ in serie al condensatore. Calcola la costante di tempo e dopo quanto tempo, all'incirca, il flash è di nuovo pronto. d) Se fosse un condensatore piano con aria fra armature distanti 0,10 mm, quale area dovrebbero avere le armature? Commenta il risultato: confronta la potenza del lampo con quella di una stufetta da 2 kW e l'area trovata in d) con le dimensioni di una fotocamera.

18. ●●● **Problema breve commentato · Sotto una linea ad alta tensione.** Una linea elettrica trasporta la potenza di 200 MW alla tensione efficace di 380 kV. Per semplicità tratta la linea come un solo lungo conduttore rettilineo percorso dalla corrente totale. a) Calcola la corrente efficace nella linea. b) Calcola il campo magnetico efficace a 20 m dal conduttore e confrontalo con il campo terrestre, 5×10^{-5} T. In che cosa i due campi sono diversi, oltre che nell'intensità? c) Una spira di area 1,0 m^2 è disposta a quella distanza in modo che il campo della linea la attraversi perpendicolarmente. Considerando il campo uniforme sulla spira, calcola il valore massimo della f.e.m. indotta (la rete è a 50 Hz). d) La linea è lunga 100 km e ha una resistenza di 0,030 Ω per kilometro. Calcola la potenza persa per effetto Joule e la sua frazione della potenza trasmessa; ripeti il calcolo per la stessa potenza trasmessa a 20 kV. Commenta il risultato.

19. ●●● **Problema breve commentato · Un muone dall'alta atmosfera.** Un muone (massa circa 207 volte quella dell'elettrone) nasce a 12 km di quota e scende verticalmente a 0,99 c. Nel sistema in cui il muone è fermo, metà dei muoni di un gruppo decade in 1,5 μs. a) Calcola il fattore di Lorentz e il tempo che il muone impiega a raggiungere il suolo nel sistema della Terra. b) Quanto tempo passa per l'orologio del muone? Con la legge del decadimento $N = N_0 \cdot 2^{-t/T_{½}}$ calcola la frazione di muoni che arriva al suolo, e quella che arriverebbe se il tempo non si dilatasse. c) Descrivi lo stesso viaggio nel sistema del muone: quanto è spesso lo strato d'atmosfera da attraversare, e quanto tempo impiega il suolo a raggiungerlo? d) Calcola l'energia a riposo del muone, la sua energia totale e la sua energia cinetica, in MeV, e confronta l'energia cinetica con il valore classico $½mv^2$. Commenta il risultato.

20. ●●● **Problema breve commentato · Dall'atomo alle galassie.** a) Con il modello di Bohr calcola l'energia, in elettronvolt, del fotone emesso dall'atomo di idrogeno nel salto dal livello $n = 4$ al livello $n = 2$, e la sua lunghezza d'onda. In quale banda dello spettro cade, e di che colore è? b) Nello spettro di una galassia la stessa riga, Hβ, che in laboratorio si misura a 486,1 nm, è osservata a 496,0 nm. Calcola lo spostamento verso il rosso z e la velocità di allontanamento della galassia. c) Con $H_0 = 70$ km/s/Mpc calcola la distanza della galassia in megaparsec e in anni luce (1 Mpc = $3{,}26 \times 10^6$ anni luce). Da quanto tempo, all'incirca, viaggia la luce che riceviamo? d) Stima l'età dell'universo come $1/H_0$, in anni (1 Mpc = $3{,}09 \times 10^{19}$ km; 1 anno = $3{,}16 \times 10^7$ s). Commenta il risultato: che cosa hanno a che fare i livelli di energia di un atomo con la misura dell'universo?

Soluzioni

1. Traccia di risposta. a) Newton contesta l'azione a distanza: un corpo che agisce su un altro attraverso il vuoto, istantaneamente e senza nulla in mezzo. La legge di Coulomb, $F = k_0|q_1q_2|/r^2$, ha la stessa forma della legge di gravitazione (capitolo 1): dice quanto vale la forza, non come arriva da una carica all'altra. b) Il campo elettrico in un punto è la forza per unità di carica su una carica di prova positiva, $\boldsymbol{E} = \boldsymbol{F}/q$, in N/C: è una proprietà dello spazio intorno alla carica sorgente, che esiste anche se la carica di prova non c'è. Una carica non agisce sull'altra direttamente, ma attraverso il campo presente nel punto in cui si trova. Le linee di forza (di campo) sono tangenti in ogni punto a $\boldsymbol{E}$ e più fitte dove il campo è più intenso; non sono traiettorie, perché la forza dà la direzione dell'accelerazione, non della velocità. c) Esempi: il campo contiene energia (in un condensatore, densità $\frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2$, capitolo 3); un campo magnetico variabile genera un campo elettrico con linee chiuse anche dove non ci sono cariche (capitoli 8 e 10); le onde elettromagnetiche viaggiano nel vuoto a velocità finita e trasportano energia: un segnale radio inviato alla Luna impiega più di un secondo, e nel frattempo la sua energia non è in nessun corpo, ma nel campo. d) I meccanicisti, eredi di Cartesio, ammettevano solo azioni per contatto; Leibniz accusò la gravità di Newton di essere una «qualità occulta», e Newton nei *Principia* si limitò a descriverla con una legge (Fisica 4, capitolo 5). Con Faraday e Maxwell il campo diventa un ente fisico con energia propria: una teoria scientifica può cambiare il catalogo di ciò che consideriamo reale. Errori frequenti: dire che il campo è «solo un disegno»; confondere le linee di campo con le traiettorie; usare per il campo il simbolo della forza.

2. Traccia di risposta. a) Sulla goccia sospesa agiscono il peso mg, verso il basso, e la forza elettrica $|q|E$, verso l'alto (la spinta dell'aria è trascurabile e, da ferma, la goccia non subisce attrito). Fra le piastre $E = \Delta V/d$, quindi $|q|\Delta V/d = mg$ e $|q| = mgd/\Delta V$. Goccia A: $2{,}10 \times 10^{-15}$ kg · 9,8 m/s^2 · $8{,}0 \times 10^{-3}$ m / 518 V ≈ $3{,}18 \times 10^{-19}$ C; B: $4{,}80 \times 10^{-19}$ C; C: $1{,}60 \times 10^{-19}$ C; D: $8{,}02 \times 10^{-19}$ C; E: $6{,}42 \times 10^{-19}$ C. b) Dividendo per la carica più piccola si ottengono, entro l'1%, i numeri interi 2, 3, 1, 5, 4: tutte le cariche sono multipli di circa $1{,}60 \times 10^{-19}$ C, la carica elementare e. La carica è quantizzata: $Q = ne$, con n intero. Una goccia si carica negativamente acquistando elettroni (per strofinio nello spruzzatore), non creando carica: la carica si conserva (capitolo 1). c) Su una carica negativa la forza è opposta al campo: perché sia verso l'alto il campo deve puntare verso il basso, dalla piastra superiore, positiva, a quella inferiore. Con tensione doppia la forza elettrica raddoppia e supera il peso: la goccia sale, accelerando all'inizio con $a = g$ verso l'alto e poi, frenata dall'aria, con velocità costante. d) Democrito e Lucrezio pensavano la materia fatta di corpuscoli indivisibili; la carica elementare è un «atomo» di elettricità perché nessuna carica libera osservata è una frazione di e. L'atomo dei chimici invece è divisibile: contiene elettroni e un nucleo, a sua volta fatto di protoni e neutroni (capitoli 7 e 14). Millikan ottenne nel 1913 $1{,}592 \times 10^{-19}$ C; si discute ancora la sua scelta di non pubblicare tutte le gocce. Errori frequenti: dimenticare la conversione da mm a m; confondere la tensione con il campo; dire che la goccia carica ha «creato» elettroni.

3. Traccia di risposta. a) In parallelo ogni apparecchio lavora alla stessa tensione di 230 V per cui è costruito, si accende e si spegne in modo indipendente, e se uno si guasta gli altri continuano a funzionare. Forno: $I = P/\Delta V$ = 2200 W/230 V ≈ 9,6 A, $R = \Delta V^2/P$ = (230 V)^2/2200 W ≈ 24 Ω. Asciugacapelli: 1800 W/230 V ≈ 7,8 A, R ≈ 29 Ω. b) P = 2200 W + 2000 W + 1800 W = 6000 W = 6,0 kW, il doppio della potenza del contratto; I = 6000 W/230 V ≈ 26 A (le correnti dei rami si sommano, la resistenza equivalente diminuisce). Dopo poco il contatore interrompe l'erogazione. I cavi sono protetti dall'interruttore magnetotermico:

una lamina bimetallica, scaldata per effetto Joule, apre il circuito se il sovraccarico dura; un elettromagnete lo apre in una frazione di secondo in caso di cortocircuito. c) L'acqua del rubinetto conduce: parte della corrente può passare dall'apparecchio all'acqua e da questa, attraverso le tubature o una persona, a terra. Interviene l'interruttore differenziale, che confronta la corrente che va lungo la fase con quella che ritorna dal neutro e apre il circuito quando sono diverse, già per qualche decina di milliampere. La messa a terra dell'involucro metallico offre alla corrente di un guasto una via a bassa resistenza: il differenziale scatta prima che qualcuno tocchi l'apparecchio. d) $E = P\Delta t = 2{,}2\ \text{kW} \cdot 1{,}5\ \text{h} = 3{,}3\ \text{kWh} = 3{,}3 \cdot 3{,}6 \times 10^6\ \text{J} \approx 1{,}2 \times 10^7\ \text{J}$; costo $3{,}3 \cdot 0{,}25\ € \approx 0{,}83\ €$. La bolletta fa pagare l'energia, non la corrente, che non si consuma. Collegamenti: le regole di sicurezza elettrica (Educazione civica); Edison, la centrale di Pearl Street a New York (1882) e quella di Santa Radegonda a Milano (1883) nella seconda rivoluzione industriale. Errori frequenti: dire che il salvavita protegge dai sovraccarichi (è il compito del magnetotermico); sommare le resistenze come in serie; dimenticare che 230 V è un valore efficace.

4. Traccia di risposta. a) Il filo percorso da corrente produce un campo magnetico con linee circolari intorno al filo, di intensità $B_{\text{filo}} = \mu_0 I/(2\pi r)$ (capitolo 6); sotto il filo il campo è orizzontale e perpendicolare al filo, quindi diretto verso est o verso ovest. Con la corrente verso nord, per la regola della mano destra il campo sotto il filo punta verso ovest e il polo nord dell'ago devia verso ovest; invertendo la corrente devia verso est. b) L'ago si orienta lungo il campo totale, somma vettoriale di $\boldsymbol{B}_{\text{o}}$ (verso nord) e $\boldsymbol{B}_{\text{filo}}$ (verso ovest), perpendicolari fra loro: nel triangolo rettangolo dei due vettori $\tan\theta = B_{\text{filo}}/B_{\text{o}}$. Per $\theta = 45°$ i due campi sono uguali; sul grafico la curva incontra la retta dei 45° a $I \approx 2{,}2$ A. Quindi $B_{\text{o}} = \mu_0 I/(2\pi r) = 4\pi \times 10^{-7}\ \text{T·m/A} \cdot 2{,}2\ \text{A}/(2\pi \cdot 0{,}020\ \text{m}) \approx 2{,}2 \times 10^{-5}\ \text{T}$. Il campo terrestre è inclinato rispetto all'orizzonte: la bussola sente solo la sua componente orizzontale, minore del modulo totale. c) $\tan\theta$ cresce con la corrente ma θ raggiungerebbe 90° solo se B_{o} fosse nullo rispetto a B_{filo}: l'ago si avvicina a 90° senza mai arrivarci (a 6 A, circa 70°). d) La *Naturphilosophie* sosteneva che tutte le forze della natura sono manifestazioni di un'unica attività; dunque elettricità e magnetismo dovevano essere collegati. Oersted cercò il legame per anni e nel 1820 lo pubblicò in un opuscolo in latino. Un'idea filosofica può orientare la ricerca, ma diventa fisica solo quando un esperimento la mette alla prova; subito dopo Ampère, Biot e Savart e Faraday trasformarono la scoperta in leggi quantitative. Errori frequenti: sommare i moduli dei due campi invece dei vettori; credere che il campo terrestre sia orizzontale ovunque; dimenticare la conversione da cm a m.

5. Traccia di risposta. a) $\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$, di modulo $|q|vB$ sen θ: è perpendicolare alla velocità, quindi non compie lavoro e non cambia l'energia cinetica, ma solo la direzione del moto. Con $\boldsymbol{v} \perp \boldsymbol{B}$ il moto è circolare uniforme, di raggio $r = mv/(|q|B)$; con velocità obliqua la componente parallela al campo resta costante e la particella descrive un'elica intorno alle linee di campo. b) $r = 1{,}67 \times 10^{-27}\ \text{kg} \cdot 4{,}0 \times 10^5\ \text{m/s}/(1{,}60 \times 10^{-19}\ \text{C} \cdot 3{,}0 \times 10^{-5}\ \text{T}) \approx 1{,}4 \times 10^2\ \text{m}$; $T = 2\pi m/(|q|B) \approx 2{,}2 \times 10^{-3}\ \text{s}$. Il raggio è decine di migliaia di volte più piccolo del raggio terrestre: in direzione perpendicolare al campo la particella si sposta di poco, mentre lungo le linee scivola liberamente. Le particelle cariche sono quindi guidate lungo le linee del campo. c) Le linee del campo terrestre, come quelle di una calamita, convergono verso le regioni polari ed entrano lì nell'atmosfera: lungo di esse le particelle raggiungono l'alta atmosfera soprattutto alle alte latitudini. Gli urti eccitano gli atomi e le molecole dell'aria, che tornando allo stato fondamentale emettono fotoni di energie precise, cioè luce di colori caratteristici (righe spettrali, capitolo 14). d) Dopo il brillamento osservato da Carrington il 1° settembre 1859 le aurore furono viste fino ai tropici e le linee telegrafiche subirono guasti in Europa e in America; oggi una tempesta simile metterebbe alla prova satelliti, posizionamento satellitare e reti elettriche: per questo l'attività del Sole è sorvegliata (meteorologia spaziale). Errori frequenti: dire che il campo magnetico «accelera» le particelle aumentandone la velocità; dimenticare che la forza dipende solo dalla componente della velocità perpendicolare al campo.

6. Traccia di risposta. a) Una corrente indotta nasce solo se cambia il flusso del campo magnetico attraverso il circuito. Il flusso attraverso una spira di area S è $\Phi(\boldsymbol{B}) = BS\cos\theta$, in weber. Con corrente costante in A il ferro è magnetizzato e il campo in B è intenso, ma costante: nessuna f.e.m.; il campo cambia solo alla chiusura (cresce) e all'apertura (diminuisce). Legge di Faraday–Neumann: $f_{em} = -N\Delta\Phi/\Delta t$; conta la rapidità della variazione, non il valore del flusso. b) Alla chiusura il flusso aumenta, all'apertura diminuisce: le variazioni hanno segno opposto, e così le correnti indotte. Legge di Lenz: la corrente indotta ha il verso che si oppone alla variazione di flusso che la produce. Se la favorisse, la variazione crescerebbe da sé e con essa la corrente: si otterrebbe energia elettrica dal nulla (per esempio un magnete risucchiato sempre più velocemente in una bobina), contro la conservazione dell'energia. c) Il trasformatore cambia tensione e corrente alternata nel rapporto fra le spire, $V_2/V_1 = N_2/N_1$, conservando idealmente la potenza; con la corrente continua il flusso nel nucleo è costante e al secondario non si induce nulla (come nell'anello di Faraday a contatto mantenuto). A parità di potenza, alzando la tensione si abbassa la corrente, e le perdite RI^2 nelle linee diminuiscono con il quadrato del fattore (capitolo 9). d) L'elettrificazione è un capitolo centrale della seconda rivoluzione industriale: Edison difese la corrente continua; il sistema di Gaulard e Gibbs, presentato a Torino nel 1884 e studiato da Galileo Ferraris, e i brevetti di Tesla acquistati da Westinghouse portarono alla vittoria dell'alternata, con la centrale del Niagara (1896). Ferraris ideò anche il campo magnetico rotante, principio del motore a induzione. Errori frequenti: dire che un campo intenso e costante induce corrente; dire che la corrente indotta si oppone al campo invece che alla sua variazione.

7. Traccia di risposta. a) Dalle misure elettriche e magnetiche, che danno ε_0 e μ_0, Maxwell calcolò la velocità delle onde previste dalle sue equazioni e la trovò uguale a quella della luce: $1/\sqrt{(8{,}85 \times 10^{-12}\ \text{F/m} \cdot 4\pi \times 10^{-7}\ \text{T·m/A})} \approx 3{,}00 \times 10^8$ m/s. Due misure di laboratorio senza alcun legame con l'ottica danno la velocità della luce: per questo la luce dev'essere un'onda elettromagnetica. b) Un campo magnetico variabile genera un campo elettrico con linee chiuse; un campo elettrico variabile genera un campo magnetico (corrente di spostamento). I due campi si sostengono a vicenda e si propagano anche nel vuoto. In un'onda $\boldsymbol{E}$ e $\boldsymbol{B}$ sono perpendicolari fra loro e alla direzione di propagazione (onda trasversale), oscillano in fase e nel vuoto $E = cB$. Le onde sono prodotte da cariche accelerate, per esempio dagli elettroni che oscillano in un'antenna. c) FM: $\lambda = c/f = 3{,}00 \times 10^8$ m/s$/1{,}00 \times 10^8$ Hz $= 3{,}0$ m. Raggi X: $f = c/\lambda = 3{,}00 \times 10^8$ m/s$/1{,}0 \times 10^{-10}$ m $= 3{,}0 \times 10^{18}$ Hz. Energie dei fotoni: FM, $hf = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J·s $\cdot\ 1{,}00 \times 10^8$ Hz $\approx 6{,}6 \times 10^{-26}$ J $\approx 4 \times 10^{-7}$ eV; raggi X, 1240 eV·nm/0,10 nm $\approx 1{,}2 \times 10^4$ eV. Sono onde dello stesso tipo, che nel vuoto viaggiano tutte a c e differiscono solo per frequenza e lunghezza d'onda; solo i raggi X hanno fotoni abbastanza energetici (più di una decina di eV) da strappare elettroni agli atomi. d) Hertz produsse e rivelò le onde nel 1887–88 e mostrò che si riflettono, si rifrangono e si polarizzano come la luce; Marconi ne fece un mezzo di comunicazione, fino al collegamento transatlantico del 1901. Nel 1912 i segnali radio del *Titanic* permisero al *Carpathia* di salvare circa settecento persone; negli anni Venti e Trenta la radio divenne uno strumento di propaganda. Errori frequenti: pensare che le onde elettromagnetiche abbiano bisogno di un mezzo; dire che le onde radio sono «suono»; ritenere pericolosa ogni radiazione o innocua ogni radiazione non ionizzante, qualunque sia l'intensità.

8. Traccia di risposta. a) Le leggi della meccanica sono le stesse in tutti i sistemi inerziali: nessun esperimento meccanico fatto dentro la nave rivela il suo moto uniforme. Le equazioni di Maxwell prevedono una velocità della luce c ben definita, e secondo la composizione galileiana delle velocità questo valore poteva valere in un solo sistema, quello dell'etere: misurando la velocità della luce si sarebbe potuto scoprire il proprio moto rispetto all'etere. Michelson e Morley cercarono con un interferometro lo spostamento di frange dovuto al «vento d'etere» e non trovarono nulla. b) Primo postulato: le leggi della fisica, tutte, sono le stesse in tutti i sistemi inerziali. Secondo: la luce nel vuoto ha la stessa

velocità c in tutti i sistemi inerziali, qualunque sia il moto della sorgente. Per Galileo la luce emessa da una sorgente in moto dovrebbe avere velocità $c + v$; con i postulati non esiste un sistema privilegiato in cui la luce va a c, e un etere che li distingua non serve. c) Nell'orologio a luce in moto il lampo percorre una diagonale, più lunga del percorso verticale; poiché la sua velocità è sempre c, ogni tic dura di più: $\Delta t = \gamma \Delta t_0$, con $\gamma = 1/\sqrt{(1 - v^2/c^2)}$. A 0,80 c, $\gamma = 1/\sqrt{(1 - 0{,}64)} = 5/3 \approx 1{,}67$; sulla Terra passano $1{,}67 \cdot 3{,}0$ anni = 5,0 anni. Il tempo proprio è quello dell'orologio dell'astronave, per cui partenza e arrivo dell'intervallo accadono nello stesso luogo. d) La relatività non dice che «tutto è relativo»: alcune grandezze dipendono dal sistema (durate, lunghezze, simultaneità) proprio perché altre sono uguali per tutti (le leggi fisiche, c, l'intervallo spaziotemporale, l'ordine fra causa ed effetto). Mach aveva criticato spazio e tempo assoluti come concetti senza riscontro nell'esperienza; la crisi del positivismo e la riflessione del Novecento sul metodo (Popper) trovarono nella relatività un esempio di teoria che corregge una teoria di grande successo. Errori frequenti: dire che Einstein partì dal risultato di Michelson e Morley (il suo articolo argomenta dall'elettrodinamica); dire che l'orologio in moto è «davvero» lento (l'effetto è reciproco).

9. Traccia di risposta. a) La luce estrae elettroni da un metallo. I fatti: esiste una frequenza di soglia sotto la quale non esce alcun elettrone, per quanto intensa sia la luce; sopra la soglia l'emissione è immediata; l'energia cinetica massima degli elettroni cresce con la frequenza e non dipende dall'intensità, che cambia solo il loro numero. Per un'onda l'energia dipende dall'intensità e si accumula con il tempo: non dovrebbe esserci soglia, e la luce intensa dovrebbe dare elettroni più veloci. b) $K_{max} = hf - W$ e $K_{max} = e\Delta V_{arresto}$, quindi $\Delta V_{arresto} = (h/e)f - W/e$: una retta di pendenza h/e. Dai punti estremi della retta, $(5{,}6 \times 10^{14}$ Hz; 0,22 V) e $(8{,}0 \times 10^{14}$ Hz; 1,22 V): pendenza $1{,}00\ \text{V}/(2{,}4 \times 10^{14}\ \text{Hz}) \approx 4{,}2 \times 10^{-15}$ V·s, $h \approx 1{,}60 \times 10^{-19}\ \text{C} \cdot 4{,}2 \times 10^{-15}\ \text{V·s} \approx 6{,}7 \times 10^{-34}$ J·s, entro l'1% del valore della Tabella A.1. La retta incontra l'asse delle frequenze a $f_0 \approx 5{,}1 \times 10^{14}$ Hz; $W = hf_0 \approx 6{,}63 \times 10^{-34}\ \text{J·s} \cdot 5{,}1 \times 10^{14}\ \text{Hz} \approx 3{,}4 \times 10^{-19}$ J $\approx 2{,}1$ eV: il cesio. c) Raddoppiando l'intensità i punti non cambiano: raddoppia il numero di fotoni e quindi di elettroni (la corrente), non la loro energia massima. Con lo zinco la retta è parallela (stessa pendenza h/e) ma spostata a destra: $f_0 = 4{,}3 \cdot 1{,}60 \times 10^{-19}$ J/$6{,}63 \times 10^{-34}$ J·s $\approx 1{,}0 \times 10^{15}$ Hz, nell'ultravioletto: con le frequenze del grafico non uscirebbe alcun elettrone. d) Planck (1900) suppose che la materia scambi energia con la radiazione a pacchetti hf; Einstein (1905) che la luce stessa sia fatta di quanti, i fotoni. Einstein ebbe il Nobel del 1921 per la legge dell'effetto fotoelettrico, non per la relatività; Millikan, che voleva smentirla, la confermò con le sue misure. La luce si comporta da onda nell'interferenza e da particella nello scambio di energia: con la fisica dei quanti le leggi prevedono probabilità, e il determinismo di Laplace entra in crisi. Errori frequenti: dire che la luce più intensa estrae elettroni più veloci; confondere il quanto di Planck con il fotone di Einstein.

10. Traccia di risposta. a) Quasi tutte le particelle α attraversano una sottile lamina d'oro deviando pochissimo, ma alcune deviano di grandi angoli e qualcuna torna indietro. Nel modello di Thomson la carica positiva è diffusa in tutto l'atomo e il campo elettrico non è mai abbastanza intenso da respingere una particella α veloce; serve una carica concentrata in un volume minuscolo, il nucleo, che contiene quasi tutta la massa. Per la fisica classica un elettrone che gira intorno al nucleo è una carica accelerata e dovrebbe irraggiare energia fino a cadere sul nucleo; Bohr (1913) postulò orbite stazionarie con energie fissate, $E_n = -13{,}6\ \text{eV}/n^2$ per l'idrogeno, e salti con emissione di fotoni. b) Il nucleo è fatto di protoni e neutroni, tenuti insieme dalla forza nucleare forte, attrattiva, molto intensa e di cortissimo raggio, che vince la repulsione elettrica fra i protoni. Elio-4: $\Delta m = 2 \cdot 1{,}007\ 825$ u + $2 \cdot 1{,}008\ 665$ u − 4,002 603 u = 0,030 377 u; $E_{legame} = 0{,}030\ 377 \cdot 931{,}5$ MeV $\approx 28{,}3$ MeV, cioè circa 7,07 MeV per nucleone. (Le masse sono atomiche: gli elettroni dei due atomi di idrogeno compensano quelli dell'atomo di elio.) c) L'energia di legame per nucleone è massima intorno al ferro: spezzando un nucleo pesante o unendo due nuclei leggeri si ottengono prodotti più

legati, con massa totale minore, e la differenza di massa si libera come energia, $\Delta E = \Delta m\, c^2$. Una fissione libera circa 200 MeV, una reazione chimica qualche eV: un rapporto dell'ordine di 10^7–10^8, che spiega l'enorme energia di un chilogrammo di combustibile nucleare. d) A Roma, nel 1934, il gruppo di Fermi scoprì l'efficacia dei neutroni lenti; nel 1938 le leggi razziali spinsero all'estero Fermi, la cui moglie era ebrea, e Segrè; Fermi guidò a Chicago la prima reazione a catena controllata (2 dicembre 1942); le bombe su Hiroshima e Nagasaki (6 e 9 agosto 1945) posero la questione della responsabilità degli scienziati, ripresa nel manifesto Russell–Einstein del 1955. Educazione civica: vantaggi (nessuna emissione di anidride carbonica durante il funzionamento) e problemi (sicurezza, scorie) del nucleare; i referendum italiani del 1987 e del 2011. Errori frequenti: dire che la massa si trasforma in energia solo nelle reazioni nucleari (vale per ogni sistema legato, ma in chimica il difetto è incommensurabilmente piccolo); confondere fissione e fusione; pensare che i prodotti siano «meno legati».

11. Traccia di una risposta modello. Newton descrisse la gravità con una legge precisa, ma senza dire come la forza attraversi il vuoto: un corpo agirebbe su un altro a distanza, istantaneamente. La legge di Coulomb, con la stessa forma, eredita lo stesso problema. Faraday propose un'altra immagine: ogni carica modifica lo spazio intorno a sé, riempiendolo di linee di forza, e un'altra carica risente del campo che trova nel punto in cui si trova, $\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{E}$. Finché le cariche sono ferme, le due descrizioni danno le stesse previsioni e il campo sembra solo un modo comodo di calcolare. Tre fatti lo hanno reso reale. Il campo possiede energia: un condensatore carico la immagazzina fra le armature, con densità $\frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2$. Un campo magnetico variabile genera un campo elettrico anche dove non ci sono cariche, e viceversa. Infine, le onde elettromagnetiche previste da Maxwell e prodotte da Hertz si propagano nel vuoto a velocità finita e trasportano energia: mentre un segnale viaggia dalla Terra alla Luna, l'energia non appartiene a nessun corpo, ma al campo. Da allora l'interazione non è più azione a distanza, ma azione locale del campo, che si propaga con velocità c. Punti da non dimenticare: la definizione di $\boldsymbol{E}$, il ruolo di Faraday e Maxwell, almeno due prove della realtà del campo.

12. Traccia di una risposta modello. Il flusso del campo magnetico attraverso una spira di area S è $\Phi = BS\cos\theta$. Faraday scoprì nel 1831 che in un circuito nasce una forza elettromotrice solo quando il flusso concatenato cambia, per una variazione del campo, dell'area o dell'orientazione; la legge di Faraday–Neumann la quantifica: $f_{\text{em}} = -N\Delta\Phi/\Delta t$. Il segno meno è la legge di Lenz: la corrente indotta ha il verso che si oppone alla variazione di flusso che la genera. Consideriamo una sbarretta di lunghezza L che scorre con velocità v su due guide collegate da un resistore, in un campo B perpendicolare al piano: l'area del circuito cresce, e la f.e.m. vale BLv. La corrente indotta I percorre la sbarretta, che subisce la forza ILB; per la legge di Lenz questa forza è opposta alla velocità e frena la sbarretta. Per mantenerla in moto bisogna spingerla, con una potenza $Fv = ILBv = f_{\text{em}}I$: proprio la potenza che il resistore dissipa per effetto Joule. Se la forza avesse il verso del moto, la sbarretta accelererebbe da sola mentre il resistore si scalda: energia dal nulla. Lenz è quindi la conservazione dell'energia, e l'induzione è il modo in cui l'energia meccanica diventa energia elettrica negli alternatori. Punti da non dimenticare: conta la variazione del flusso, non il flusso; la corrente si oppone alla variazione, non al campo.

13. Traccia di una risposta modello. Maxwell riunì le leggi dell'elettricità e del magnetismo e vi aggiunse un termine nuovo: anche un campo elettrico variabile genera un campo magnetico (corrente di spostamento), come un campo magnetico variabile genera un campo elettrico (induzione). Ne segue che i due campi possono sostenersi a vicenda e propagarsi nel vuoto, staccati dalle cariche che li hanno prodotti, come un'onda. Le equazioni ne danno la velocità, $c = 1/\sqrt{(\varepsilon_0\mu_0)} \approx 3{,}00 \times 10^8$ m/s: la velocità della luce, calcolata con costanti misurate in esperimenti di elettricità e magnetismo. Nel 1865 Maxwell concluse che la luce è una perturbazione elettromagnetica. Nel 1887–88 Hertz produsse con un circuito oscillante onde di lunghezza d'onda dell'ordine del metro, ne misurò la velocità e mostrò

che si riflettono, si rifrangono e si polarizzano come la luce. Tutte le onde elettromagnetiche sono trasversali, con $\boldsymbol{E}$ e $\boldsymbol{B}$ perpendicolari fra loro e alla direzione di propagazione, in fase, con $E = cB$; sono prodotte da cariche accelerate, trasportano energia e nel vuoto viaggiano tutte a c. Onde radio, microonde, infrarosso, luce visibile, ultravioletto, raggi X e gamma differiscono solo per frequenza e lunghezza d'onda, legate da $c = \lambda f$. Punti da non dimenticare: il ruolo della corrente di spostamento, il calcolo di c, la conferma di Hertz, l'unità dello spettro.

14. Traccia di una risposta modello. Primo postulato: le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali, ed è quindi impossibile stabilire con qualunque esperimento quale sia «fermo». Secondo postulato: la luce si propaga nel vuoto con la stessa velocità c in tutti i sistemi inerziali, qualunque sia il moto della sorgente. Consideriamo un orologio a luce: un lampo che rimbalza fra due specchi posti a distanza d; nel sistema in cui è fermo, un tic dura $\Delta t_0 = 2d/c$. Visto da un sistema in cui l'orologio si muove con velocità v, il lampo percorre una diagonale, più lunga; poiché la sua velocità è ancora c, il tic dura di più. Il teorema di Pitagora dà $\Delta t = \gamma \Delta t_0$, con $\gamma = 1/\sqrt{(1 - v^2/c^2)} \geq 1$. Vale per ogni orologio, anche biologico, per il primo postulato; l'effetto è reciproco e diventa grande solo vicino a c. La prova classica sono i muoni prodotti dai raggi cosmici nell'alta atmosfera: vivono in media 2,2 μs e, anche alla velocità della luce, percorrerebbero poco più di 600 m, eppure arrivano numerosi al suolo dopo oltre 10 km, perché nel sistema della Terra la loro vita è dilatata di un fattore γ che può valere 10 e più. Punti da non dimenticare: il tempo proprio, la reciprocità, una prova sperimentale con i numeri.

15. Traccia di una risposta modello. Quando la luce colpisce un metallo può estrarne elettroni. Gli esperimenti mostrano tre fatti. Esiste una frequenza di soglia, caratteristica del metallo: sotto di essa non esce alcun elettrone, per quanto intensa sia la luce. Sopra la soglia l'emissione è immediata, anche con luce debolissima. L'energia cinetica massima degli elettroni, misurata con il potenziale di arresto, cresce linearmente con la frequenza e non dipende dall'intensità, che cambia soltanto il numero di elettroni emessi. Per la teoria ondulatoria l'energia dell'onda è proporzionale all'intensità e si distribuisce con continuità: una luce intensa di qualunque frequenza, o una luce debole dopo un tempo sufficiente, dovrebbe estrarre elettroni, e quelli estratti da luce più intensa dovrebbero essere più veloci. Nel 1905 Einstein propose che la luce sia fatta di quanti di energia $E = hf$, che un elettrone assorbe uno alla volta e per intero. Se il quanto supera il lavoro di estrazione W, l'elettrone esce con energia cinetica massima $K_{max} = hf - W$; la soglia è $f_0 = W/h$; l'intensità conta i fotoni. Millikan verificò la legge con misure precise, ed Einstein ebbe il Nobel del 1921 proprio per questa. Punti da non dimenticare: i tre fatti, perché l'onda fallisce, l'equazione di Einstein, la differenza fra il quanto di Planck (scambio di energia) e il fotone di Einstein (la luce stessa).

16. Traccia di una risposta modello. L'atomo ha al centro un nucleo piccolissimo, decine di migliaia di volte più piccolo dell'atomo, che ne contiene quasi tutta la massa. Il nucleo è formato da Z protoni e N neutroni, con $A = Z + N$; gli isotopi di un elemento hanno lo stesso Z e diverso N. I protoni si respingono con forze elettriche enormi a quelle distanze; li tiene insieme la forza nucleare forte, attrattiva fra tutti i nucleoni, intensissima ma di cortissimo raggio. La massa di un nucleo è minore della somma delle masse dei suoi nucleoni: il difetto di massa Δm corrisponde, per $E = mc^2$, all'energia di legame $\Delta m c^2$, l'energia che servirebbe per separare i nucleoni. L'energia di legame per nucleone cresce rapidamente nei nuclei leggeri, è massima intorno al ferro (circa 8,8 MeV) e diminuisce lentamente nei nuclei pesanti. Per questo un nucleo pesante come l'uranio-235, spezzandosi in due frammenti medi (fissione), e due nuclei leggeri come quelli dell'idrogeno, unendosi in elio (fusione), danno prodotti più legati, di massa minore: la massa mancante si libera come energia, circa 200 MeV per fissione, milioni di volte più di una reazione chimica. La fissione alimenta i reattori nucleari, la fusione il Sole e le stelle. Punti da non dimenticare: la forza forte, il difetto

di massa, la curva dell'energia di legame, perché entrambi i processi liberano energia.

17. a) $Q = C\Delta V = 150 \times 10^{-6}$ F · 300 V = $4{,}5 \times 10^{-2}$ C; $n = Q/e = 4{,}5 \times 10^{-2}$ C/$1{,}60 \times 10^{-19}$ C ≈ $2{,}8 \times 10^{17}$ elettroni. b) $U = \frac{1}{2}C\Delta V^2 = \frac{1}{2} \cdot 150 \times 10^{-6}$ F · (300 V)^2 ≈ 6,8 J; $P = U/\Delta t = 6{,}75$ J/$1{,}0 \times 10^{-3}$ s ≈ $6{,}8 \times 10^3$ W. c) $\tau = RC = 2{,}0 \times 10^3\ \Omega \cdot 150 \times 10^{-6}$ F = 0,30 s; la carica è praticamente completa dopo circa $5\tau \approx 1{,}5$ s. d) Da $C = \varepsilon_0 S/d$: $S = Cd/\varepsilon_0 = 150 \times 10^{-6}$ F · $1{,}0 \times 10^{-4}$ m/$8{,}85 \times 10^{-12}$ F/m ≈ $1{,}7 \times 10^3$ m^2, un quadrato di circa 41 m di lato. Commento. Durante il lampo la potenza è più di tre volte quella di una stufetta da 2 kW, ma per un millesimo di secondo: l'energia è piccola, meno di 7 J. Il condensatore serve proprio a questo: si carica lentamente (in circa un secondo e mezzo, con una potenza media di pochi watt) e cede l'energia in un istante, cosa che la batteria da sola non potrebbe fare. L'area di d) è quella di un campo da pallavolo moltiplicata per una decina: i condensatori reali raggiungono capacità così grandi in pochi centimetri cubi usando isolanti sottilissimi con costante dielettrica relativa maggiore di 1, avvolti in strati sovrapposti. Il numero di elettroni spostati, centinaia di milioni di miliardi, è enorme, ma è una frazione infima degli elettroni liberi delle armature.

18. a) $I = P/V = 200 \times 10^6$ W/380×10^3 V ≈ 526 A ≈ $5{,}3 \times 10^2$ A. b) $B = \mu_0 I/(2\pi r) = 4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A · 526 A/(2π · 20 m) ≈ $5{,}3 \times 10^{-6}$ T, circa un decimo del campo terrestre. Il campo terrestre è (quasi) costante; quello della linea è alternato: cambia verso cento volte al secondo, oscillando con la frequenza di 50 Hz, e il suo valore massimo è √2 volte quello efficace. c) Valore massimo del campo: $B_0 = \sqrt{2} \cdot 5{,}26 \times 10^{-6}$ T ≈ $7{,}4 \times 10^{-6}$ T. Il flusso oscilla come quello di un alternatore, $\Phi = B_0 S \cos \omega t$, con $\omega = 2\pi \cdot 50$ Hz ≈ 314 rad/s; il valore massimo della f.e.m. è $f_0 = B_0 S\omega = 7{,}4 \times 10^{-6}$ T · 1,0 m^2 · 314 rad/s ≈ $2{,}3 \times 10^{-3}$ V. d) R = 0,030 Ω/km · 100 km = 3,0 Ω; $P_{\text{persa}} = RI^2 = 3{,}0\ \Omega \cdot (526\text{ A})^2 \approx 8{,}3 \times 10^5$ W, lo 0,42% della potenza trasmessa. A 20 kV: $I = 200 \times 10^6$ W/$2{,}0 \times 10^4$ V = $1{,}0 \times 10^4$ A e $P_{\text{persa}} = 3{,}0\ \Omega \cdot (1{,}0 \times 10^4\text{ A})^2 = 3{,}0 \times 10^8$ W. Commento. A 20 kV la potenza «persa» risulterebbe maggiore di quella trasmessa: un risultato impossibile, che significa che a quella tensione la linea non potrebbe trasportare 200 MW (i conduttori fonderebbero molto prima). Alzando la tensione di un fattore 19 le perdite diminuiscono di $19^2 \approx 360$ volte: è la ragione dell'alta tensione e, poiché la tensione si cambia con i trasformatori, della corrente alternata. Il campo magnetico sotto la linea è circa un decimo di quello terrestre e induce in una spira di un metro quadrato solo qualche millivolt; il modello di un solo conduttore lo sovrastima, perché nelle linee reali le correnti delle tre fasi si compensano in parte. I limiti di esposizione ai campi delle linee sono fissati per legge sulla base degli studi scientifici: questo calcolo dà l'ordine di grandezza, non un giudizio sanitario.

19. a) $\gamma = 1/\sqrt{(1 - 0{,}99^2)} = 1/\sqrt{0{,}0199} \approx 7{,}09$. Tempo nel sistema della Terra: $\Delta t = h/v$ = 12 000 m/(0,99 · 3,00 × 10^8 m/s) ≈ $4{,}04 \times 10^{-5}$ s = 40,4 μs. b) Tempo proprio: $\Delta t_0 = \Delta t/\gamma$ = 40,4 μs/7,09 ≈ 5,7 μs, cioè 5,70/1,5 ≈ 3,8 tempi di dimezzamento; frazione che arriva: $2^{-3{,}8} \approx 0{,}072$, circa il 7%. Senza dilatazione: 40,4/1,5 ≈ 27 tempi di dimezzamento, frazione $2^{-27} \approx 8 \times 10^{-9}$, meno di un muone su cento milioni. c) Nel sistema del muone è l'atmosfera a muoversi a 0,99 c, e il suo spessore è contratto: $L = L_0/\gamma$ = 12 000 m/7,09 ≈ $1{,}69 \times 10^3$ m. Il suolo lo raggiunge in 1693 m/($2{,}97 \times 10^8$ m/s) ≈ 5,7 μs: lo stesso tempo proprio di b), e quindi la stessa frazione di sopravvissuti. d) $mc^2 \approx 207 \cdot 0{,}511$ MeV ≈ 106 MeV; $E = \gamma mc^2 \approx 7{,}09 \cdot 105{,}8$ MeV ≈ 750 MeV; $K = (\gamma - 1)mc^2 \approx 644$ MeV ≈ $6{,}4 \times 10^2$ MeV. Valore classico: $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 0{,}99^2 \cdot 105{,}8$ MeV ≈ 52 MeV, oltre dodici volte meno. Commento. Senza la dilatazione dei tempi praticamente nessun muone arriverebbe al suolo; con essa ne arriva circa uno su quattordici, ed è ciò che si osserva: i rivelatori al livello del mare contano molti muoni. Le due descrizioni, dilatazione dei tempi per la Terra e contrazione delle lunghezze per il muone, sono diverse ma danno lo stesso risultato misurabile, come richiede il primo postulato. A 0,99 c la meccanica di Newton sbaglia anche l'energia di oltre un ordine di grandezza: l'energia cinetica è molte volte l'energia a riposo, e avvicinarsi ancora a c richiederebbe un'energia senza limite. Il problema mette insieme tre capitoli: la relatività (11), l'energia relativistica (12) e la legge statistica del decadimento (14).

20. a) $E_4 = -13{,}6\ \text{eV}/16 = -0{,}85\ \text{eV}$; $E_2 = -13{,}6\ \text{eV}/4 = -3{,}40\ \text{eV}$; $hf = E_4 - E_2 = 2{,}55\ \text{eV}$; $\lambda = 1240\ \text{eV}\cdot\text{nm}/2{,}55\ \text{eV} \approx 486\ \text{nm}$: luce visibile, azzurra (la riga Hβ della serie di Balmer). b) $z = \Delta\lambda/\lambda_0 = (496{,}0\ \text{nm} - 486{,}1\ \text{nm})/486{,}1\ \text{nm} \approx 0{,}0204$; poiché $v \ll c$, $v \approx cz = 3{,}00 \times 10^5\ \text{km/s} \cdot 0{,}0204 \approx 6{,}1 \times 10^3\ \text{km/s}$. c) $d = v/H_0 = 6{,}1 \times 10^3\ \text{km/s}/(70\ \text{km/s/Mpc}) \approx 87\ \text{Mpc} \approx 87 \cdot 3{,}26 \times 10^6$ anni luce $\approx 2{,}8 \times 10^8$ anni luce. La luce viaggia da circa 280 milioni di anni (stima che trascura l'espansione avvenuta nel frattempo). d) $1/H_0 = 3{,}09 \times 10^{19}\ \text{km}/(70\ \text{km/s}) \approx 4{,}4 \times 10^{17}\ \text{s} \approx 4{,}4 \times 10^{17}\ \text{s}/3{,}16 \times 10^7\ \text{s/anno} \approx 1{,}4 \times 10^{10}$ anni. Commento. Il modello di Bohr riproduce la lunghezza d'onda misurata in laboratorio con un errore dello 0,04%: è proprio perché ogni atomo emette righe fisse e riconoscibili che si può misurare lo spostamento verso il rosso di una galassia lontana. Lo spostamento, appena il 2%, basta a dare la velocità e, con la legge di Hubble, la distanza: la fisica del microcosmo diventa uno strumento per misurare il macrocosmo. La luce che riceviamo è partita quando sulla Terra non erano ancora comparsi i dinosauri: guardare lontano significa guardare nel passato. La stima $1/H_0 \approx 14$ miliardi di anni è un ordine di grandezza dell'età dell'universo, coerente con il modello del Big Bang, non una misura esatta: suppone che l'espansione sia stata sempre alla stessa velocità.