VERIFICA

Verifica di fine parte · La luce

Tempo indicativo: 100 minuti · Punteggio totale: 100 punti

Fisica 4 · Parte VI · La luce · versione 1.0
Verifica: Verifica di fine parte · La luce · pagine 465–472 del volume completo · estratto per lo studio

La verifica riguarda i capitoli 14, 15 e 16. È ammessa la calcolatrice scientifica, impostata in gradi (DEG). Scrivi sempre le formule che usi, i passaggi e le unità di misura: un risultato senza unità è incompleto. Esprimi i risultati con un numero di cifre significative coerente con i dati. Dove non è indicato diversamente usa $c = 3{,}00 \times 10^8$ m/s, anche nell'aria, e gli indici di rifrazione $n = 1{,}00$ per l'aria e $n = 1{,}33$ per l'acqua. Gli angoli si misurano sempre dalla normale. Per specchi e lenti vale la convenzione dei capitoli 14 e 15: le distanze reali sono positive, quelle virtuali negative.

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

1. ●● Un raggio di luce colpisce perpendicolarmente uno specchio piano e torna su se stesso. Senza spostare il raggio, lo specchio viene ruotato di 10°. Ora il raggio riflesso forma con il raggio incidente un angolo di:
   A. 10°
   B. 20°
   C. 5°
   D. 0°: il raggio torna ancora su se stesso

2. ● Un oggetto è posto nel centro di curvatura C di uno specchio concavo. L'immagine è:
   A. virtuale, diritta, grande quanto l'oggetto, dietro lo specchio
   B. reale, capovolta, rimpicciolita, nel fuoco
   C. virtuale, diritta e ingrandita
   D. reale, capovolta, grande quanto l'oggetto, anch'essa in C

3. ● La luce del Sole arriva sulla Terra in circa 500 s. Se il Sole smettesse all'improvviso di brillare, sulla Terra ce ne accorgeremmo:
   A. dopo poco più di otto minuti
   B. nello stesso istante, perché la luce si propaga istantaneamente
   C. dopo circa otto secondi
   D. dopo un anno, perché il Sole dista un anno-luce

4. ●● Un raggio di luce passa dal vetro ($n = 1{,}50$) all'acqua con un angolo di incidenza di 30°. Il raggio rifratto:
   A. si avvicina alla normale, con un angolo di rifrazione di circa 26°
   B. non viene deviato, perché vetro e acqua sono entrambi più densi dell'aria
   C. si allontana dalla normale, con un angolo di rifrazione di circa 34°
   D. non esiste: la luce è riflessa totalmente

5. ● In una fibra ottica la luce resta dentro il nucleo anche quando la fibra è curva, perché:
   A. il mantello è rivestito da uno strato metallico che fa da specchio
   B. il nucleo ha un indice di rifrazione minore del mantello, e la luce vi è più veloce
   C. il nucleo ha un indice di rifrazione maggiore del mantello, e la luce incide sulla parete con angoli maggiori dell'angolo limite
   D. nel vetro la luce si propaga sempre lungo l'asse della fibra

6. ●● Un oggetto si trova a 15 cm da una lente divergente con distanza focale −10 cm. L'immagine è:
   A. virtuale e dritta, a 6,0 cm dalla lente dalla parte dell'oggetto, con $G = +0{,}40$
   B. reale e capovolta, a 30 cm dalla lente dalla parte opposta, con $G = -2{,}0$
   C. virtuale e dritta, a 30 cm dalla lente dalla parte dell'oggetto, con $G = +2{,}0$
   D. reale e capovolta, a 6,0 cm dalla lente dalla parte opposta, con $G = -0{,}40$

7. ● Nell'arcobaleno principale il rosso è all'esterno dell'arco e il violetto all'interno. Il motivo è che:
   A. le gocce più alte nel cielo sono più grandi e riflettono soprattutto il rosso
   B. nell'acqua la luce rossa è più lenta di quella violetta
   C. l'aria assorbe il violetto più del rosso
   D. l'acqua ha per il rosso un indice di rifrazione un po' minore: le gocce che mandano il rosso all'occhio sono a circa 42° dalla direzione opposta al Sole, quelle che mandano il violetto a circa 40°

8. ●● In un esperimento di Young con luce di 520 nm, nel punto P dello schermo la differenza di cammino fra le onde che arrivano dalle due fenditure è 1,30 µm. In P c'è:
   A. una frangia chiara, la seconda a partire dal centro
   B. una frangia scura, la terza a partire dal centro
   C. una frangia chiara, la terza a partire dal centro
   D. una frangia scura, la seconda a partire dal centro

9. ● Una maglietta che alla luce del Sole appare verde viene illuminata soltanto con luce rossa. Appare:
   A. quasi nera
   B. rossa
   C. verde
   D. gialla, perché rosso e verde insieme danno il giallo

10. ●● Un CD illuminato da una lampada a luce bianca mostra bande colorate che cambiano quando lo si inclina. I colori nascono:
    A. dalla dispersione, come in un prisma: la plastica ha un indice di rifrazione diverso per ogni colore
    B. dalla riflessione totale della luce dentro la plastica
    C. dall'interferenza della luce riflessa dalle spire della traccia, distanti fra loro poche lunghezze d'onda
    D. da pigmenti colorati stesi sotto la superficie del disco

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

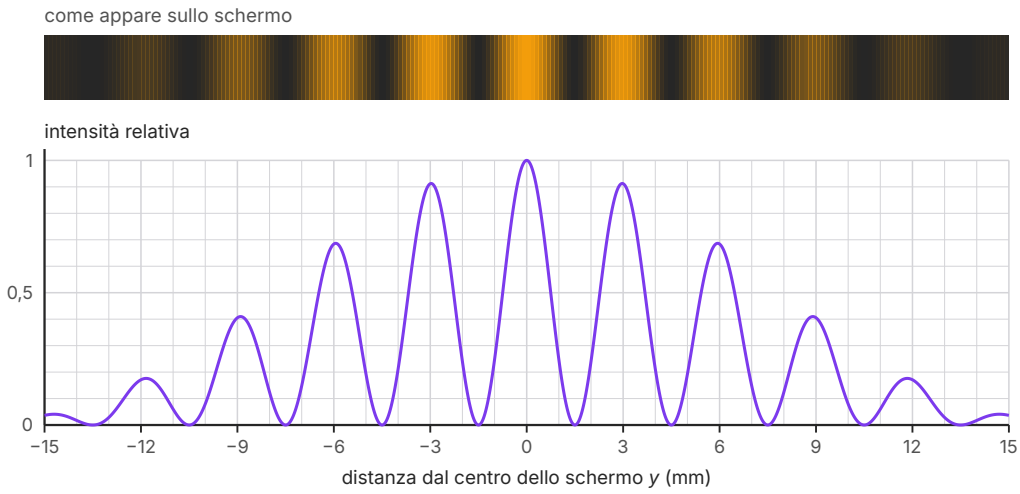


Figura V6.1 La luce sullo schermo in un esperimento di Young (andamento calcolato), in funzione della distanza y dal centro: sopra, come appare sullo schermo; sotto, l'intensità relativa al centro. Le frange più lontane sono più deboli perché ogni fenditura, di larghezza finita, diffrange la luce.

11. ●● **(6 punti)** Una pallina dell'albero di Natale, lucida e argentata, ha un diametro di 8,0 cm: la sua superficie esterna si comporta come uno specchio convesso. a) Calcola la distanza focale della pallina. Il tuo viso, alto 20 cm, è a 30 cm dalla superficie: dove si forma la sua immagine, quanto vale l'ingrandimento e quanto è alta l'immagine (3 punti)? b) Guardi ora, dalla stessa distanza di 30 cm, l'interno di un cucchiaio, che tratti come uno specchio concavo con raggio di curvatura 6,0 cm. Dove si forma l'immagine e quanto vale l'ingrandimento (2 punti)? c) Usa il segno dei due ingrandimenti per spiegare perché nel cucchiaio ti vedi a testa in giù e nella pallina diritto (1 punto).

12. ●● **(6 punti)** La Figura V6.1 mostra la luce sullo schermo in un esperimento di Young: le fenditure distano $d = 0{,}300$ mm e lo schermo è a $L = 1{,}50$ m. a) Leggi sul grafico l'interfrangia. Conviene misurare la distanza fra due frange chiare lontane fra loro invece che fra due vicine: perché (2 punti)? b) Calcola la lunghezza d'onda e la frequenza della luce. Di che colore è, secondo gli intervalli di lunghezza d'onda del capitolo 16 (2 punti)? c) A quale distanza dal centro cade la seconda frangia scura? Se con lo stesso apparato si usa luce verde di 520 nm e si porta lo schermo a 2,00 m, quanto diventa l'interfrangia (2 punti)?

13. ●● **(6 punti)** Un raggio laser rosso, di lunghezza d'onda 650 nm nell'aria, entra dall'aria nella faccia piana di un blocco di plastica trasparente con un angolo di incidenza di 55,0°; l'angolo di rifrazione misurato è 33,0°. a) Calcola l'indice di rifrazione della plastica (2 punti). b) Calcola la velocità e la lunghezza d'onda della luce nella plastica. Quale grandezza dell'onda resta invece la stessa che nell'aria (2 punti)? c) Calcola l'angolo limite per la luce che dalla plastica va verso l'aria. Un raggio che, dentro il blocco, incide su una faccia piana con un angolo di 45° esce nell'aria (2 punti)?

14. ●● **(6 punti)** Un proiettore per diapositive ha un obiettivo, che tratti come una lente convergente sottile, con $f = 10{,}0$ cm, e forma l'immagine nitida di una diapositiva alta 24 mm su uno schermo a 3,00 m dall'obiettivo. a) Quanto vale il potere diottrico dell'obiettivo (1 punto)? b) A quale distanza dall'obiettivo si trova la diapositiva (2 punti)? c) Calcola l'ingrandimento e l'altezza dell'immagine sullo schermo (2 punti). d) Perché la diapositiva va inserita nel proiettore capovolta (1 punto)?

15. ●● **(6 punti)** Gli astronauti dell'Apollo 11, nel 1969, lasciarono sulla Luna un pannello di riflettori che ancora oggi rimanda verso la Terra gli impulsi di luce inviati da potenti laser. a) Un impulso torna al telescopio che l'ha emesso 2,56 s dopo la partenza. Quanto dista la Luna (2 punti)? b) In un piano, un riflettore di questo tipo si può schematizzare con due specchi piani perpendicolari fra loro. Mostra con la legge della riflessione che un raggio che colpisce prima uno specchio e poi l'altro torna indietro parallelo alla direzione da cui è arrivato, qualunque sia l'angolo di incidenza (2 punti). c) Se si volesse misurare la distanza Terra–Luna con un'incertezza di 3 mm, con quale incertezza andrebbe misurato il tempo di andata e ritorno (2 punti)?

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

16. ●●● **(13 punti)** Sul fondo di una piscina profonda 2,00 m c'è una piccola lampada che emette luce in tutte le direzioni; l'acqua è ferma. a) Calcola l'angolo limite per la luce che dall'acqua passa nell'aria (2 punti). b) Un raggio della lampada incide sulla superficie con un angolo di 30,0°. Calcola l'angolo con cui esce nell'aria: si avvicina o si allontana dalla normale (3 punti)? c) Visto dall'alto, di notte, la luce della lampada esce dall'acqua soltanto da un disco luminoso centrato sopra di essa. Spiega perché e calcola il raggio r del disco: chiama s la distanza fra la lampada e il bordo del disco e usa $\text{sen}\,\theta_L = r/s$ insieme al teorema di Pitagora (4 punti). d) Se la piscina fosse piena di un liquido trasparente di indice 1,47, il disco sarebbe più grande o più piccolo? Calcolane il raggio (2 punti). e) Un nuotatore sott'acqua guarda verso l'alto. Spiega, con la reversibilità del cammino ottico, perché vede tutto ciò che sta sopra l'acqua, dal cielo alla riva, dentro un cono con il vertice nel suo occhio e semiapertura θ_L, e che cosa vede guardando la superficie con un angolo maggiore (2 punti).

17. ●●● **(13 punti)** L'obiettivo di una macchina fotografica si può trattare come una lente convergente sottile con $f = 50{,}0$ mm; il sensore è alto 24,0 mm. a) Dove deve trovarsi il sensore per fotografare un paesaggio lontanissimo? Per fotografare poi una persona a 5,00 m, di quanto va spostato l'obiettivo, e in che verso (3 punti)? b) La persona è alta 1,80 m: quanto è alta la sua immagine sul sensore? La persona entra tutta nella foto (2 punti)? c) Le superfici dell'obiettivo sono coperte da uno strato sottile e trasparente di fluoruro di magnesio ($n = 1{,}38$), steso sul vetro ($n = 1{,}52$). Per la luce verde, di lunghezza d'onda 550 nm nel vuoto, calcola la velocità e la lunghezza d'onda nello strato (2 punti). d) La luce, che arriva quasi perpendicolare, si riflette in parte sulla superficie aria–strato e in parte su quella strato–vetro, e le due onde riflesse interferiscono. Entrambe le riflessioni avvengono verso un mezzo di indice maggiore, e quindi entrambe le onde riflesse sono invertite. Spiega perché, per il verde, le due onde riflesse si annullano se lo spessore dello strato è un quarto della lunghezza d'onda nello strato, e calcola questo spessore (4 punti). e) Un obiettivo trattato così, guardato di riflesso, mostra un debole colore violaceo. Perché (2 punti)?

18. ●●● **(12 punti)** In un esperimento di Young si illuminano con luce bianca due fenditure distanti $d = 0{,}400$ mm; lo schermo è a $L = 2{,}00$ m. Prendi come estremi dello spettro visibile 400 nm (violetto) e 700 nm (rosso). a) Spiega perché al centro dello schermo c'è una frangia bianca, e perché è l'unica frangia bianca netta (2 punti). b) Calcola l'interfrangia per il violetto e per il rosso, e la frequenza di queste due luci (3 punti). c) In che ordine si presentano i colori nella prima frangia chiara, andando dal centro verso l'esterno? Confronta con l'ordine dei colori prodotti da un prisma (capitolo 15) e spiega perché i due fenomeni li separano in ordine opposto (3 punti). d) A quale distanza minima dal centro una frangia chiara del rosso cade esattamente sopra una frangia chiara del violetto? Di quale ordine sono le due frange (2 punti)? e) Controlla che in quel punto l'approssimazione dei piccoli angoli sia ancora accettabile, e spiega perché, lontano dal centro, lo schermo appare di un chiarore quasi uniforme e biancastro (2 punti).

19. ●● **(12 punti) Domanda sulla fonte.** L'*Ottica* di Euclide, il geometra degli *Elementi*, si apre con alcune premesse, che l'autore pone alla base di tutte le dimostrazioni. Eccone tre (traduzione della redazione dal testo greco dell'edizione di Heiberg): «La figura compresa dai raggi visivi è un cono, che ha il vertice nell'occhio e la base sui contorni degli oggetti visti. Sono visti gli oggetti sui quali cadono i raggi visivi, non sono visti quelli sui quali non cadono. Gli oggetti visti sotto un angolo maggiore appaiono maggiori, quelli visti sotto un angolo minore appaiono minori, e uguali quelli visti sotto angoli uguali.» a) Spiega con parole tue che cosa affermano le tre premesse e perché esprimono la teoria dell'estromissione. Che cosa ne conserva l'ottica geometrica moderna, e che cosa è cambiato con Ibn al-Haytham (3 punti)? b) Per la terza premessa due oggetti appaiono uguali quando li vediamo sotto lo stesso angolo, cioè quando hanno lo stesso rapporto fra diametro e distanza. Il Sole ha un diametro di $1{,}39 \times 10^{9}$ m e dista $1{,}50 \times 10^{11}$ m; la Luna ha un diametro di $3{,}47 \times 10^{6}$ m e la sua distanza dalla Terra varia fra circa $3{,}6 \times 10^{8}$ m e circa $4{,}0 \times 10^{8}$ m. Calcola i rapporti e spiega perché alcune eclissi di Sole sono totali e altre anulari (3 punti). c) Con un forellino e uno schermo posto a 1,50 m si forma l'immagine del Sole: calcolane il diametro. Perché la camera oscura mostra che la geometria del cono di Euclide funziona anche se la luce viaggia nel verso opposto, dall'oggetto verso il vertice (3 punti)? d) Supponi che i raggi visivi escano dall'occhio alla velocità della luce. Quanto tempo dopo aver aperto gli occhi vedresti la stella Proxima Centauri, che dista circa 4,2 anni-luce? Che cosa conclude questo ragionamento sulla teoria dell'estromissione, e quale semplice osservazione quotidiana porta alla stessa conclusione (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 (13), 17 (13), 18 (12); domanda sulla fonte 19 (12)	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). Ruotando lo specchio di 10° ruota di 10° anche la normale: l'angolo di incidenza, prima 0°, diventa 10°, e per la legge della riflessione anche quello di riflessione è 10°, dall'altra parte della normale. Fra raggio incidente e raggio riflesso ci sono quindi 10° + 10° = 20°: il raggio riflesso ruota del doppio dello specchio.

2. D (2 punti). In C $p = R = 2f$: $1/q = 1/f - 1/(2f) = 1/(2f)$, quindi $q = 2f$ e $G = -q/p = -1$. L'immagine è reale, capovolta, grande quanto l'oggetto e si forma nello stesso punto: i raggi che passano per C tornano su se stessi.

3. A (2 punti). La luce ha velocità finita: l'ultima luce emessa dal Sole impiega circa 500 s, cioè 8 min e 20 s, per arrivare sulla Terra, e per tutto quel tempo continueremmo a vedere il Sole.

4. C (2 punti). $\text{sen}\,\theta_2 = n_1 \,\text{sen}\,\theta_1/n_2 = 1{,}50 \times 0{,}500/1{,}33 \approx 0{,}564$, $\theta_2 \approx 34°$. L'acqua ha indice minore del vetro, e il raggio si allontana dalla normale. Non c'è riflessione totale, perché l'angolo limite vetro–acqua ($\text{sen}\,\theta_L = 1{,}33/1{,}50$, $\theta_L \approx 62°$) è maggiore di 30°.

5. C (2 punti). La riflessione totale avviene solo verso un mezzo di indice minore e per angoli di incidenza maggiori dell'angolo limite: per questo il nucleo ha un indice un po' maggiore del mantello, e la luce, quasi parallela all'asse, incide sulla parete con angoli grandi. Non serve alcuno specchio metallico.

6. A (2 punti). $1/q = 1/f - 1/p = -1/(10\text{ cm}) - 1/(15\text{ cm}) = -5/(30\text{ cm})$, quindi $q = -6{,}0$ cm: immagine virtuale, dalla parte dell'oggetto. $G = -q/p = 6{,}0/15 = +0{,}40$: dritta e rimpicciolita, come sempre per una lente divergente con un oggetto reale.

7. D (2 punti). È la dispersione: l'indice dell'acqua è un po' minore per il rosso, che esce dalla goccia a circa 42° dalla direzione della luce solare, mentre il violetto esce a circa 40°. Le gocce che mandano il rosso all'occhio stanno quindi su un arco più ampio. La B è falsa: con indice minore il rosso, nell'acqua, è più veloce del violetto.

8. B (2 punti). $\Delta/\lambda = 1{,}30\ \mu\text{m} / 0{,}520\ \mu\text{m} = 2{,}5$: la differenza di cammino è un numero dispari di mezze lunghezze d'onda, e l'interferenza è distruttiva. Le frange scure cadono a $\Delta = 0{,}5\lambda, 1{,}5\lambda, 2{,}5\lambda, \ldots$: questa è la terza.

9. A (2 punti). Un oggetto ha il colore delle lunghezze d'onda che riflette: la maglietta riflette il verde e assorbe gran parte del resto, compreso il rosso. Illuminata solo di rosso, non ha quasi nulla da rimandare e appare quasi nera.

10. C (2 punti). Le spire del CD distano 1,6 μm, poche lunghezze d'onda di luce visibile: il disco funziona come un reticolo di diffrazione a riflessione, e in ogni direzione l'interferenza rafforza un colore diverso. Non è la dispersione del prisma.

11. a) $R = 4{,}0$ cm, quindi, con il segno degli specchi convessi, $f = -R/2 = -2{,}0$ cm (1 punto). $1/q = 1/f - 1/p = -1/(2{,}0\text{ cm}) - 1/(30\text{ cm}) = -16/(30\text{ cm})$, $q \approx -1{,}9$ cm: immagine virtuale, 1,9 cm dietro la superficie (1 punto). $G = -q/p = 1{,}875/30 \approx +0{,}063$, $h' = Gh \approx 0{,}063 \times 20\text{ cm} \approx 1{,}3$ cm (1 punto). b) $f = R/2 = +3{,}0$ cm; $1/q = 1/(3{,}0\text{ cm}) - 1/(30\text{ cm}) = 9/(30\text{ cm})$, $q \approx +3{,}3$ cm: immagine reale, davanti al cucchiaio (1 punto). $G = -3{,}33/30 \approx -0{,}11$ (1 punto). c) Nella pallina $G > 0$: immagine diritta. Nel cucchiaio $G < 0$: immagine capovolta, perché il viso è oltre il centro di curvatura; in entrambi i casi l'immagine è molto rimpicciolita (1 punto).

12. a) Le frange chiare cadono sulle tacche principali: fra la quarta a sinistra (−12 mm) e la quarta a destra (+12 mm) ci sono 8 interfrange in 24 mm, quindi $\Delta y = 24\text{ mm}/8 = 3{,}0$ mm (1 punto). L'errore di lettura sulle due posizioni è lo stesso qualunque sia la loro distanza, ma diviso per 8 interfrange pesa otto volte meno: l'incertezza relativa diminuisce (1 punto). b) $\lambda = d\Delta y/L = 3{,}00 \times 10^{-4}\text{ m} \times 3{,}00 \times 10^{-3}\text{ m}$ /

1,50 m = 6,00 × 10^{-7} m = 600 nm (1 punto). $f = c/\lambda$ = 3,00 × 10^8 m/s / 6,00 × 10^{-7} m = 5,00 × 10^{14} Hz; fra 590 nm e 630 nm la luce è arancione (1 punto). c) Le frange scure sono a metà fra le chiare: la seconda a 1,5 Δy = 4,5 mm dal centro (1 punto). $\Delta y = \lambda L/d$ = 5,20 × 10^{-7} m × 2,00 m / 3,00 × 10^{-4} m ≈ 3,47 × 10^{-3} m = 3,47 mm (1 punto).

13. a) Dalla legge di Snell, con n_1 = 1,00: n = sen 55,0°/sen 33,0° = 0,819/0,545 ≈ 1,50 (2 punti). b) $v = c/n$ = 3,00 × 10^8 m/s / 1,504 ≈ 1,99 × 10^8 m/s; λ = 650 nm/1,504 ≈ 432 nm (1 punto). Resta la stessa la frequenza, fissata dalla sorgente, circa 4,62 × 10^{14} Hz; il colore, che dipende dalla frequenza, non cambia (1 punto). c) sen $\theta_L = 1/n$ = 1/1,504 ≈ 0,665, θ_L ≈ 41,7° (con n arrotondato a 1,50 si ottiene 41,8°) (1 punto). 45° > θ_L: il raggio non esce ed è riflesso totalmente; la legge di Snell chiederebbe sen θ_2 = 1,504 × 0,707 ≈ 1,06, maggiore di 1 (1 punto).

14. a) $P = 1/f$ = 1/(0,100 m) = 10,0 D (1 punto). b) $1/p = 1/f - 1/q$ = 1/(10,0 cm) − 1/(300 cm) = 29/(300 cm), p ≈ 10,3 cm: la diapositiva è appena oltre il fuoco (2 punti). c) $G = -q/p$ = −300 cm / 10,34 cm ≈ −29,0 (1 punto); $h' = Gh$ = −29,0 × 24 mm ≈ −0,70 m: immagine alta circa 70 cm (1 punto). d) $G < 0$: l'immagine reale è capovolta, e scambia l'alto con il basso e la destra con la sinistra. Inserendo la diapositiva capovolta (e rovesciata), sullo schermo la figura appare diritta (1 punto).

15. a) La luce percorre la distanza due volte: $d = c\Delta t/2$ = 3,00 × 10^8 m/s × 2,56 s / 2 = 3,84 × 10^8 m (2 punti). b) Scomponi la direzione del raggio lungo le normali dei due specchi, che sono perpendicolari fra loro. La riflessione sul primo specchio inverte la componente perpendicolare a quello specchio e lascia invariata l'altra; la riflessione sul secondo inverte l'altra componente. Dopo le due riflessioni entrambe le componenti sono invertite: il raggio viaggia nella direzione opposta a quella di arrivo, parallelo a essa, per qualunque angolo di incidenza (2 punti). (In alternativa con gli angoli: se il raggio incide sul primo specchio con angolo α, incide sul secondo con angolo 90° − α; la somma delle due deviazioni è (180° − 2α) + (180° − 2(90° − α)) = 180°.) c) $\Delta t = 2\Delta d/c$ = 2 × 3 × 10^{-3} m / 3,00 × 10^8 m/s = 2 × 10^{-11} s, due centesimi di miliardesimo di secondo (2 punti).

16. a) sen $\theta_L = n_2/n_1$ = 1,00/1,33 ≈ 0,752, θ_L ≈ 48,8° (2 punti). b) sen θ_2 = 1,33 × sen 30,0° = 1,33 × 0,500 = 0,665 (1 punto), θ_2 ≈ 41,7° (1 punto): il raggio esce allontanandosi dalla normale, perché passa nel mezzo di indice minore (1 punto). c) Escono soltanto i raggi che incidono sulla superficie con un angolo minore di θ_L; gli altri sono riflessi totalmente verso il fondo. I punti della superficie raggiunti con angoli minori di θ_L formano un disco centrato sulla verticale della lampada (1 punto). Al bordo del disco l'angolo è θ_L: nel triangolo rettangolo con cateti h = 2,00 m e r e ipotenusa s, $r = s$ sen θ_L e $s^2 = h^2 + r^2$. Quindi $s^2(1 - \text{sen}^2\,\theta_L) = h^2$, s = 2,00 m / √(1 − 0,5653) ≈ 3,03 m (2 punti), e r = 3,03 m × 0,752 ≈ 2,28 m (1 punto). d) Con indice maggiore l'angolo limite è minore: sen θ_L = 1/1,47 ≈ 0,680, θ_L ≈ 42,9°; s = 2,00 m / √(1 − 0,4628) ≈ 2,73 m, r ≈ 2,73 m × 0,680 ≈ 1,86 m: il disco è più piccolo (2 punti). e) La luce che arriva dall'aria con qualunque angolo, fino a quella radente (90°), entra in acqua con un angolo di rifrazione al massimo uguale a θ_L: è il cammino di c) percorso al contrario. Tutto ciò che sta sopra l'acqua arriva quindi all'occhio entro il cono di semiapertura θ_L (1 punto). Guardando la superficie con un angolo maggiore il nuotatore non riceve luce dall'aria: vede, riflessi totalmente come in uno specchio, il fondo e le pareti della piscina (1 punto).

17. a) Per un oggetto lontanissimo $1/p \approx 0$, quindi $q = f$: il sensore va nel fuoco, a 50,0 mm dall'obiettivo (1 punto). Per p = 5,00 m = 5000 mm: $1/q = 1/(50{,}0\text{ mm}) - 1/(5000\text{ mm})$, q ≈ 50,5 mm (1 punto). L'obiettivo va allontanato dal sensore di 50,5 mm − 50,0 mm ≈ 0,505 mm, circa mezzo millimetro (1 punto). b) $G = -q/p$ = −50,5 mm / 5000 mm ≈ −0,0101; $|h'|$ = 0,0101 × 1,80 m ≈ 18,2 mm (1 punto). L'immagine, capovolta, è alta 18,2 mm, meno dei 24,0 mm del sensore: la persona entra tutta (1 punto). c) $v = c/n$ = 3,00 × 10^8 m/s / 1,38 ≈ 2,17 × 10^8 m/s; λ_s = 550 nm/1,38 ≈ 399 nm (2 punti). d) L'onda riflessa dalla seconda superficie percorre in più due volte lo spessore t dello strato, cioè una differenza di cammino $2t$ (1 punto). Poiché entrambe le onde riflesse sono invertite, l'inversione non cambia il loro rapporto: conta solo la diffe-

renza di cammino (1 punto). Le onde si annullano se $2t$ è mezza lunghezza d'onda nello strato, cioè $2t = \lambda_s/2$, quindi $t = \lambda_s/4$ (1 punto): t = 399 nm/4 ≈ 99,6 nm, circa un decimo di micrometro (1 punto). e) La condizione vale esattamente solo per il verde. Per le luci agli estremi dello spettro $2t$ non è mezza lunghezza d'onda nello strato (per il rosso di 650 nm è circa 0,42 volte λ_s, per il violetto di 400 nm circa 0,69 volte), e l'annullamento è solo parziale (1 punto). Nella luce riflessa manca quindi soprattutto il verde, e restano un po' di rosso e di blu-violetto, la cui mescolanza appare violacea (1 punto).

18. a) Al centro O le due fenditure sono alla stessa distanza: $\Delta = 0$ per tutte le lunghezze d'onda, e tutti i colori interferiscono costruttivamente, dando il bianco (1 punto). Altrove la condizione $\Delta = n\lambda$ dipende da λ, e le frange dei diversi colori cadono in posti diversi: le altre frange sono colorate (1 punto). b) $\Delta y_v = \lambda L/d = 4{,}00 \times 10^{-7}$ m × 2,00 m / $4{,}00 \times 10^{-4}$ m = 2,00 mm; $\Delta y_r = 7{,}00 \times 10^{-7}$ m × 2,00 m / $4{,}00 \times 10^{-4}$ m = 3,50 mm (2 punti). $f_v = c/\lambda = 7{,}50 \times 10^{14}$ Hz; $f_r \approx 4{,}29 \times 10^{14}$ Hz (1 punto). c) Le frange chiare del primo ordine sono a $y_1 = \lambda L/d$, proporzionale a λ: dal centro verso l'esterno si incontrano violetto (2,0 mm), blu, verde, giallo, arancione e rosso (3,5 mm) (1 punto). Nel prisma è il contrario: il violetto, che ha indice di rifrazione maggiore, è deviato di più, il rosso di meno (1 punto). I meccanismi sono diversi: nel prisma la separazione nasce dalla dispersione, cioè dalla dipendenza di n dal colore; nell'esperimento di Young dalla differenza di cammino, che deve contenere un numero intero di lunghezze d'onda: le onde più lunghe richiedono una differenza di cammino maggiore, e quindi un punto più lontano dal centro (1 punto). d) Deve essere n × 3,50 mm = m × 2,00 mm, cioè $7n = 4m$: il caso più piccolo è $n = 4$, $m = 7$ (1 punto). Si sovrappongono la quarta frangia chiara del rosso e la settima del violetto, a 4 × 3,50 mm = 14,0 mm dal centro (1 punto). e) y/L = 14,0 mm / 2000 mm = 0,0070, molto meno di un decimo: l'approssimazione è ottima (1 punto). Lontano dal centro le frange chiare dei vari colori, di ordini diversi, si sovrappongono e si mescolano: in ogni punto c'è un po' di luce di molti colori, che l'occhio vede come un chiarore biancastro senza frange (1 punto).

19. Traccia di risposta. a) Per Euclide dall'occhio escono in linea retta dei raggi visivi, che formano un cono con il vertice nell'occhio; vediamo ciò che questi raggi raggiungono, e la grandezza apparente di un oggetto dipende dall'angolo sotto cui lo vediamo (1 punto). È la teoria dell'estromissione perché il verso del processo va dall'occhio all'oggetto (1 punto). L'ottica geometrica conserva i raggi rettilinei, il cono e l'idea che la grandezza apparente dipenda dall'angolo; Ibn al-Haytham ha invertito il verso: la luce parte da una sorgente, è rinviata dagli oggetti e da ogni loro punto entra nell'occhio (1 punto). b) Sole: $1{,}39 \times 10^9/1{,}50 \times 10^{11} \approx 0{,}0093$; Luna: $3{,}47 \times 10^6/3{,}6 \times 10^8 \approx 0{,}0096$ alla minima distanza, $3{,}47 \times 10^6/4{,}0 \times 10^8 \approx 0{,}0087$ alla massima (2 punti). I due rapporti sono quasi uguali, e quindi Sole e Luna appaiono quasi della stessa grandezza: quando la Luna è vicina il suo disco appare un po' più grande di quello del Sole e può coprirlo tutto (eclissi totale); quando è lontana appare più piccolo e lascia scoperto un anello (eclissi anulare) (1 punto). c) Per i triangoli simili con il vertice nel foro: diametro dell'immagine = 1,50 m × 0,0093 ≈ $1{,}39 \times 10^{-2}$ m, circa 1,4 cm (1 punto). L'immagine si forma sullo schermo anche se nessuno la guarda: la luce viaggia dal Sole verso il foro, e non da un occhio verso il Sole. I triangoli sono però gli stessi del cono di Euclide, con il vertice nel foro: il cammino della luce è reversibile, e la geometria non dipende dal verso in cui i raggi sono percorsi. Per questo i teoremi di Euclide sono rimasti validi mentre la sua fisica è stata abbandonata (2 punti). d) I raggi visivi dovrebbero arrivare alla stella prima che la si veda: almeno 4,2 anni dopo aver aperto gli occhi, 8,4 anni se l'informazione dovesse anche tornare all'occhio (1 punto). Ma le stelle si vedono appena si aprono gli occhi: con una velocità della luce finita, misurata da Rømer e Fizeau, la teoria dell'estromissione è insostenibile, e solo raggi infinitamente veloci potrebbero salvarla (1 punto). Lo conferma un fatto quotidiano: al buio, a occhi aperti, non vediamo nulla, mentre i raggi visivi dovrebbero uscire dall'occhio comunque (1 punto).