VERIFICA

Verifica di fine parte · Il corpo rigido e i fluidi in movimento

Tempo indicativo: 100 minuti · Punteggio totale: 100 punti

Fisica 3 · Parte III · Il corpo rigido e i fluidi in movimento · versione 1.0
Verifica: Verifica di fine parte · Il corpo rigido e i fluidi in movimento · pagine 319–324 del volume completo · estratto per lo studio

La verifica riguarda i capitoli 9–11. È ammessa la calcolatrice scientifica, in modalità gradi (DEG). Scrivi sempre le formule che usi, i passaggi e le unità di misura: un risultato senza unità è considerato incompleto. Esprimi i risultati con un numero di cifre significative coerente con i dati. Nei problemi di dinamica indica le forze (e i momenti) che agiscono sui corpi; quando usi una legge di conservazione, scrivi quale grandezza si conserva e perché. Puoi consultare le tabelle dell'appendice (momenti d'inerzia, densità e viscosità). Dove non è indicato diversamente usa $g = 9{,}8\ \text{m/s}^2$, trascura la resistenza dell'aria e usa per l'acqua $d = 1{,}00 \times 10^3\ \text{kg/m}^3$.

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

1. ● Un ventilatore passa da fermo a 300 giri/min in 5,0 s con accelerazione angolare costante. L'accelerazione angolare vale circa:
   - **A.** 60 rad/s²
   - **B.** 6,3 rad/s²
   - **C.** 1,0 rad/s²
   - **D.** 31 rad/s²

2. ● Due masse puntiformi di 2,0 kg ciascuna sono fissate agli estremi di un'asta leggera lunga 0,80 m. Il momento d'inerzia rispetto a un asse perpendicolare all'asta, passante per il suo centro, è:
   - **A.** 0,32 kg·m²
   - **B.** 1,28 kg·m²
   - **C.** 0,64 kg·m²
   - **D.** 2,56 kg·m²

3. ●● Una forza di 20 N è applicata a 0,50 m dall'asse di rotazione e forma un angolo di 30° con il raggio che va dall'asse al punto di applicazione. Il modulo del momento della forza rispetto all'asse è:
   - **A.** 10 N·m
   - **B.** 8,7 N·m
   - **C.** 0 N·m
   - **D.** 5,0 N·m

4. ● Una sfera piena rotola senza strisciare. La frazione della sua energia cinetica totale che è energia cinetica di rotazione è:
   - **A.** 2/7
   - **B.** 2/5
   - **C.** 1/2
   - **D.** 5/7

5. ●● Una pattinatrice in piroetta, con le braccia raccolte, ha momento d'inerzia 1,2 kg·m^2 e compie 2,0 giri/s. Allarga le braccia e il suo momento d'inerzia diventa 3,0 kg·m^2. Trascurando gli attriti, ora compie:

   A. 5,0 giri/s
   B. 0,80 giri/s
   C. 2,0 giri/s
   D. 1,3 giri/s

6. ●● Un satellite percorre un'orbita ellittica attorno alla Terra. Nel punto più vicino, a 7000 km dal centro della Terra, la sua velocità è 8,0 km/s; nel punto più lontano, a 14 000 km dal centro, la sua velocità è:

   A. 16 km/s
   B. 8,0 km/s
   C. 2,0 km/s
   D. 4,0 km/s

7. ● In un tubo l'acqua scorre a 0,50 m/s dove la sezione è 6,0 cm^2. Dove la sezione è 1,5 cm^2 la velocità è:

   A. 0,13 m/s
   B. 1,0 m/s
   C. 2,0 m/s
   D. 8,0 m/s

8. ● Da un piccolo foro, 45 cm sotto la superficie libera dell'acqua di una vasca larga, l'acqua esce con velocità di circa:

   A. 3,0 m/s
   B. 8,8 m/s
   C. 4,4 m/s
   D. 9,0 m/s

9. ●● Una sferetta d'acciaio cade in un olio e raggiunge la velocità limite di 2,0 mm/s. In un olio quattro volte più viscoso, ma con la stessa densità, la stessa sferetta raggiungerebbe la velocità limite di:

   A. 8,0 mm/s
   B. 2,0 mm/s
   C. 1,0 mm/s
   D. 0,50 mm/s

10. ●● In un tubo orizzontale l'acqua scorre a 2,0 m/s con pressione $1{,}50 \times 10^5$ Pa; più avanti la sezione si dimezza. Trattando l'acqua come un fluido ideale, nel tratto stretto la pressione è:

    A. $1{,}56 \times 10^5$ Pa

    B. $1{,}44 \times 10^5$ Pa

    C. $1{,}50 \times 10^5$ Pa

    D. $1{,}38 \times 10^5$ Pa

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

11. ●● Un motore elettrico mette in rotazione un volano, un disco pieno di massa 6,0 kg e raggio 0,20 m inizialmente fermo, esercitando un momento costante di 2,5 N·m; gli attriti sono trascurabili. a) Calcola il momento d'inerzia del volano e la sua accelerazione angolare (2 punti). b) Calcola la velocità angolare dopo 8,0 s, in rad/s e in giri/min (2 punti). c) Calcola l'energia cinetica di rotazione dopo 8,0 s e verifica che è uguale al lavoro del momento motore (2 punti).

12. ●● Un'asta sottile omogenea è lunga 1,20 m e ha massa 0,60 kg. a) Calcola il suo momento d'inerzia rispetto a un asse perpendicolare all'asta passante per il centro (1 punto). b) Con il teorema di Huygens-Steiner calcola il momento d'inerzia rispetto a un asse parallelo al primo, a 0,30 m dal centro (2 punti), e rispetto a un asse passante per un estremo (1 punto). c) Spiega perché, fra tutti gli assi paralleli, quello che passa per il centro dà il momento d'inerzia minimo (2 punti).

13. ●● Una sfera piena e un anello sottile, entrambi di raggio 5,0 cm, partono da fermi dalla cima di un piano inclinato di 20°, lungo 2,0 m, e rotolano senza strisciare. a) Calcola l'accelerazione del centro di massa di ciascuno (2 punti). b) Calcola i tempi di discesa: quale arriva prima? (2 punti) c) Calcola la velocità e la velocità angolare della sfera in fondo al piano (2 punti).

14. ●● Il tubo di una doccia ha diametro interno 1,5 cm e porta 9,0 L/min al soffione, che ha 40 fori di diametro 1,0 mm, alla stessa quota del tubo. a) Calcola la velocità dell'acqua nel tubo (2 punti). b) Calcola la velocità dell'acqua che esce dai fori (2 punti). c) Trattando l'acqua come un fluido ideale, calcola di quanto la pressione nel tubo, subito prima del soffione, supera quella atmosferica (2 punti).

15. ●● Un granello di sabbia fine (quarzo, $d = 2650$ kg/m^3), assimilabile a una sfera di raggio 0,040 mm, si deposita sul fondo di un lago con acqua ferma ($\eta = 1{,}0 \times 10^{-3}$ Pa·s). a) Indica le forze che agiscono sul granello e calcola la sua velocità limite (3 punti). b) Verifica con il numero di Reynolds che la legge di Stokes è applicabile (1 punto). c) Quanto tempo impiega a scendere di 2,0 m? (1 punto) d) Una particella d'argilla dello stesso materiale ha raggio 1,0 µm: quanto tempo impiega a scendere di 2,0 m? (1 punto)

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

16. ●●● **(18 punti)** Un disco pieno di massa 2,0 kg e raggio 0,20 m può ruotare senza attrito attorno a un asse orizzontale fisso passante per il suo centro. Al disco è fissato un rocchetto coassiale di raggio $r = 0{,}10$ m e massa trascurabile; una fune leggera, avvolta sul rocchetto, sostiene un blocco di 0,50 kg; il sistema parte da fermo e la fune non slitta. a) Disegna le forze sul blocco e sul disco, scrivi il secondo principio per il blocco e quello per le rotazioni per il disco, e ricava l'accelerazione del blocco e la tensione della fune (5 punti). b) Calcola la velocità del blocco e la velocità angolare del disco dopo che il blocco è sceso di 1,0 m, e verifica il risultato con la conservazione dell'energia (5 punti). c) Calcola in quell'istante il momento angolare del sistema disco + blocco rispetto all'asse, e verifica che è uguale al momento della forza esterna che lo fa variare moltiplicato per il tempo trascorso (4 punti). d) Spiega perché la tensione della fune è minore del peso del blocco e perché, con un rocchetto di raggio maggiore, il blocco scenderebbe più velocemente (4 punti).

17. ●●● **(16 punti)** Una cisterna aperta, molto larga, alimenta una fontanella a livello del suolo. La superficie dell'acqua nella cisterna è 12 m sopra la bocca della fontanella. L'acqua arriva in un tubo di diametro 2,0 cm ed esce dalla bocca, di diametro 1,0 cm, alla stessa quota del tubo. Tratta l'acqua come un fluido ideale. a) Calcola la velocità di uscita dell'acqua (3 punti). b) Calcola la portata in L/min (3 punti). c) Calcola la velocità nel tubo e di quanto, nel tubo subito prima della bocca, la pressione supera quella atmosferica (3 punti). d) Se la fontanella viene chiusa, quanto vale questa differenza di pressione? Perché è maggiore che nel caso c)? (3 punti) e) Calcola il numero di Reynolds nel tubo ($\eta = 1{,}0 \times 10^{-3}$ Pa·s) e spiega perché la portata misurata davvero è minore di quella calcolata in b) (4 punti).

18. ●●● **(16 punti)** Uno studente è seduto su uno sgabello girevole, inizialmente fermo, che ruota senza attrito attorno a un asse verticale; studente e sgabello hanno momento d'inerzia 3,0 kg·m^2. Tiene sopra la testa una ruota di bicicletta (un anello di massa 1,8 kg e raggio 0,33 m) con l'asse verticale; la ruota gira a 20 rad/s in verso antiorario visto dall'alto. a) Calcola il momento angolare della ruota (3 punti). b) Lo studente capovolge la ruota, che ora gira a 20 rad/s in verso orario visto dall'alto. Quale grandezza si conserva, e perché? Giustifica tenendo conto delle forze esterne che agiscono sul sistema studente + sgabello + ruota (4 punti). c) Calcola la velocità angolare con cui lo studente e lo sgabello si mettono a ruotare, e il loro verso (3 punti). d) Calcola l'energia cinetica di rotazione dello studente con lo sgabello: da dove viene? (3 punti) e) Se invece lo studente avesse portato l'asse della ruota in orizzontale, con quale velocità angolare avrebbe ruotato lo sgabello? (3 punti)

Griglia di valutazione Punti per sezione.

Sezione	Contenuto	Punti
Parte A	domande 1–10 × 2 punti	20
Parte B	esercizi 11–15 × 6 punti	30
Parte C	problema 16 (18), problema 17 (16), problema 18 (16)	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). $\omega = 300 \times 2\pi/60$ rad/s $\approx 31{,}4$ rad/s; $\alpha = \Delta\omega/\Delta t = 31{,}4$ rad/s $\div$ 5,0 s $\approx 6{,}3$ rad/s^2.

2. C (2 punti). $I = \Sigma m_i r_i^2 = 2 \times 2{,}0$ kg $\times$ (0,40 m)$^2 = 0{,}64$ kg·m^2.

3. D (2 punti). $M = rF$ sen $\theta = 0{,}50$ m $\times$ 20 N $\times$ sen 30° = 5,0 N·m.

4. A (2 punti). $K_{rot}/K = \frac{1}{2}I\omega^2/(\frac{1}{2}mv_{CM}^2 + \frac{1}{2}I\omega^2)$; con $I = (2/5)mR^2$ e $v_{CM} = \omega R$: $(2/5)/(1 + 2/5) = 2/7$.

5. B (2 punti). Senza momenti esterni si conserva il momento angolare: $I_1\omega_1 = I_2\omega_2$, $\omega_2 = 1{,}2 \times 2{,}0$ giri/s $\div$ 3,0 = 0,80 giri/s.

6. D (2 punti). La forza è centrale: il momento angolare si conserva. Nei due punti estremi la velocità è perpendicolare al raggio: $r_1v_1 = r_2v_2$, $v_2 = 8{,}0$ km/s $\times$ 7000/14 000 = 4,0 km/s.

7. C (2 punti). Continuità: $S_1v_1 = S_2v_2$, $v_2 = 0{,}50$ m/s $\times$ 6,0/1,5 = 2,0 m/s.

8. A (2 punti). $v = \sqrt{(2gh)} = \sqrt{(2 \times 9{,}8\ \text{m/s}^2 \times 0{,}45\ \text{m})} \approx 3{,}0$ m/s.

9. D (2 punti). $v_{lim} = 2r^2g(d_s - d_f)/(9\eta)$ è inversamente proporzionale a η: 2,0 mm/s $\div$ 4 = 0,50 mm/s.

10. B (2 punti). Continuità: la velocità raddoppia, 4,0 m/s. Bernoulli: $p_2 = p_1 + \frac{1}{2}d(v_1^2 - v_2^2) = 1{,}50 \times 10^5$ Pa + $\frac{1}{2} \times 1000$ kg/m$^3 \times (4{,}0 - 16)$ m^2/s$^2 = 1{,}50 \times 10^5$ Pa $- 6{,}0 \times 10^3$ Pa $= 1{,}44 \times 10^5$ Pa.

11. a) $I = \frac{1}{2}mR^2 = \frac{1}{2} \times 6{,}0$ kg $\times$ (0,20 m)$^2 = 0{,}12$ kg·m^2; $\alpha = M/I = 2{,}5$ N·m $\div$ 0,12 kg·m$^2 \approx 21$ rad/s^2 (20,8 rad/s^2) (2 punti). b) $\omega = \alpha t = 20{,}8$ rad/s$^2 \times 8{,}0$ s $\approx 1{,}7 \times 10^2$ rad/s (167 rad/s), cioè $167 \times 60/(2\pi) \approx 1{,}6 \times 10^3$ giri/min (2 punti). c) $K_{rot} = \frac{1}{2}I\omega^2 = \frac{1}{2} \times 0{,}12 \times 166{,}7^2$ J $\approx 1{,}7 \times 10^3$ J. Angolo descritto: $\theta = \frac{1}{2}\alpha t^2 = \frac{1}{2} \times 20{,}8 \times 8{,}0^2$ rad ≈ 667 rad; lavoro del momento $W = M\theta = 2{,}5$ N·m $\times 667$ rad $\approx 1{,}7 \times 10^3$ J: coincide (teorema dell'energia cinetica per le rotazioni) (2 punti).

12. a) $I_{CM} = (1/12)mL^2 = (1/12) \times 0{,}60$ kg $\times$ (1,20 m)$^2 = 0{,}072$ kg·m^2 (1 punto). b) $I = I_{CM} + md^2$, qui d è la distanza fra gli assi: $0{,}072 + 0{,}60 \times 0{,}30^2 = 0{,}126$ kg·m$^2 \approx 0{,}13$ kg·m^2 (2 punti); per l'estremo $d = 0{,}60$ m: $0{,}072 + 0{,}60 \times 0{,}36 = 0{,}288$ kg·m$^2 \approx 0{,}29$ kg·m^2, uguale a $(1/3)mL^2$ della Tabella A.4 (1 punto). c) Il termine md^2 è sempre positivo e si annulla solo per $d = 0$: allontanando l'asse dal centro di massa, la massa nel complesso si allontana dall'asse e il momento d'inerzia cresce (2 punti).

13. Su ciascun corpo agiscono il peso, la reazione normale e l'attrito statico (che non compie lavoro). a) $a_{CM} = g$ sen $\alpha/(1 + I/(mR^2))$: sfera $9{,}8 \times$ sen 20°/1,4 $\approx$ 2,4 m/s^2; anello $9{,}8 \times$ sen 20°/2 $\approx 1{,}7$ m/s^2 (2 punti). b) $t = \sqrt{(2s/a)}$: sfera $\sqrt{(2 \times 2{,}0/2{,}39)}$ s $\approx 1{,}3$ s; anello $\sqrt{(2 \times 2{,}0/1{,}68)}$ s $\approx 1{,}5$ s; arriva prima la sfera, che ha una frazione minore di energia in rotazione (2 punti). c) $v = \sqrt{(2as)} = \sqrt{(2 \times 2{,}39 \times 2{,}0)}$ m/s $\approx 3{,}1$ m/s; $\omega = v/R = 3{,}09$ m/s $\div$ 0,050 m ≈ 62 rad/s (2 punti).

14. a) $q = 9{,}0$ L/min $= 1{,}5 \times 10^{-4}$ m^3/s; $S = \pi(0{,}75 \times 10^{-2}$ m$)^2 \approx 1{,}77 \times 10^{-4}$ m^2; $v = q/S \approx 0{,}85$ m/s (2 punti). b) Sezione totale dei fori: $40 \times \pi(0{,}50 \times 10^{-3}$ m$)^2 \approx 3{,}14 \times 10^{-5}$ m^2; per la continuità $v = 1{,}5 \times 10^{-4} \div 3{,}14 \times 10^{-5}$ m/s $\approx 4{,}8$ m/s (2 punti). c) Bernoulli alla stessa quota, con la pressione atmosferica all'uscita: $p - p_{atm} = \frac{1}{2}d(v_{fori}^2 - v_{tubo}^2) = \frac{1}{2} \times 1000 \times (4{,}77^2 - 0{,}85^2)$ Pa $\approx 1{,}1 \times 10^4$ Pa (2 punti).

15. a) Agiscono il peso (in basso), la spinta di Archimede e la resistenza viscosa (in alto); a velocità limite la risultante è nulla: $v_{lim} = 2r^2g(d_s - d_f)/(9\eta) = 2 \times (4{,}0 \times 10^{-5}$ m$)^2 \times 9{,}8$ m/s$^2 \times 1650$ kg/m$^3 \div (9 \times 1{,}0 \times 10^{-3}$ Pa·s$) \approx 5{,}7 \times 10^{-3}$ m/s (3 punti). b) Re $= dv(2r)/\eta = 1000 \times 5{,}75 \times 10^{-3} \times 8{,}0 \times 10^{-5} \div 1{,}0 \times 10^{-3} \approx 0{,}46$, minore di 1: moto laminare, Stokes vale (1 punto). c) $t = 2{,}0$ m $\div 5{,}75 \times 10^{-3}$ m/s $\approx 3{,}5 \times 10^2$ s, circa 6 minuti (1 punto). d) $v_{lim} \propto r^2$: con un raggio 40 volte minore la velocità è 1600 volte minore, $3{,}6 \times 10^{-6}$ m/s; $t \approx 2{,}0$ m $\div 3{,}6 \times 10^{-6}$ m/s $\approx 5{,}6 \times 10^5$ s, più di 6 giorni: per questo l'acqua torbida d'argilla resta torbida a lungo (1 punto).

16. a) Sul blocco: peso mg in basso, tensione T in alto. Sul disco con il rocchetto: la tensione T, tangente al rocchetto (braccio r), il peso e la reazione dell'asse (momento nullo, perché passano per l'asse). Blocco: $mg - T = ma$; disco: $Tr = I\alpha$ con $I = \frac{1}{2}MR^2 = 0{,}040$ kg·m^2 e $\alpha = a/r$ (la fune si svolge dal rocchetto senza slittare), quindi $T = Ia/r^2 = (4{,}0\text{ kg})a$. Sommando: $a = mg/(m + I/r^2) = 0{,}50 \times 9{,}8 \div (0{,}50 + 4{,}0)$ m/s$^2 \approx 1{,}09$ m/s^2; $T = 4{,}0$ kg $\times$ 1,09 m/s$^2 \approx 4{,}4$ N (5 punti). b) $v = \sqrt{(2ah)} = \sqrt{(2 \times 1{,}09 \times 1{,}0)}$ m/s $\approx 1{,}48$ m/s; $\omega = v/r \approx 14{,}8$ rad/s (2 punti). Energia (si conserva: lavora solo il peso, la tensione compie lavori opposti sul blocco e sul disco): $mgh = 4{,}9$ J; $\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 = 0{,}54$ J + 4,36 J = 4,9 J ✓: quasi tutta l'energia va nella rotazione del disco (3 punti). c) $L = I\omega + mvr = 0{,}040 \times 14{,}76 + 0{,}50 \times 1{,}476 \times 0{,}10 \approx 0{,}590 + 0{,}074 =$ 0,66 kg·m^2/s (2 punti). L'unico momento esterno è quello del peso del blocco, $mgr = 0{,}49$ N·m (la reazione dell'asse e il peso del disco hanno momento nullo); il tempo è $t = v/a \approx 1{,}36$ s, e 0,49 N·m $\times$ 1,36 s $\approx$ 0,66 kg·m^2/s $= \Delta L$ ✓ (2 punti). d) Il blocco accelera verso il basso, quindi la risultante su di esso è diretta in basso: $T < mg$. Con un rocchetto di raggio maggiore il momento della tensione, Tr, è maggiore e per ogni metro di discesa il disco gira di un angolo minore: nella formula $a = mg/(m + I/r^2)$ il termine I/r^2 diminuisce e l'accelerazione aumenta (in termini di energia: a parità di velocità del blocco, il disco ruota più lentamente e assorbe meno energia cinetica) (4 punti).

17. a) Bernoulli fra la superficie libera (pressione atmosferica, velocità trascurabile perché la cisterna è larga) e la bocca (pressione atmosferica): $v = \sqrt{(2gh)} = \sqrt{(2 \times 9{,}8 \times 12)}$ m/s ≈ 15 m/s (15,3 m/s) (3 punti). b) $q = \pi(0{,}50 \times 10^{-2}\text{ m})^2 \times 15{,}3$ m/s $\approx 1{,}2 \times 10^{-3}$ m^3/s ≈ 72 L/min (3 punti). c) Continuità: il diametro è doppio, la sezione 4 volte maggiore: $v_{tubo} = 15{,}3/4$ m/s $\approx 3{,}8$ m/s. Bernoulli fra il tubo e la bocca, alla stessa quota: $p - p_{atm} = \frac{1}{2}d(v_{bocca}^2 - v_{tubo}^2) = \frac{1}{2} \times 1000 \times (15{,}3^2 - 3{,}83^2)$ Pa $\approx 1{,}1 \times 10^5$ Pa (3 punti). d) Con l'acqua ferma vale la legge di Stevino: $p - p_{atm} = dgh = 1000 \times 9{,}8 \times 12$ Pa $\approx 1{,}2 \times 10^5$ Pa. È maggiore perché, quando l'acqua scorre, una parte dell'energia per unità di volume dgh è diventata energia cinetica ($\frac{1}{2}dv_{tubo}^2 \approx 7 \times 10^3$ Pa) (3 punti). e) Re $= dvL/\eta = 1000 \times 3{,}83 \times 0{,}020 \div 1{,}0 \times 10^{-3} \approx 7{,}7 \times 10^4$: molto più di 2000, il moto nel tubo è turbolento. L'acqua reale è viscosa e, soprattutto in moto turbolento, dissipa energia lungo il tubo e nelle curve: l'energia disponibile all'uscita è minore di dgh, quindi la velocità di uscita e la portata sono minori di quelle del modello ideale (2 punti per Re, 2 per la spiegazione).

18. a) $I_{ruota} = mR^2 = 1{,}8$ kg $\times$ (0,33 m)$^2 \approx 0{,}196$ kg·m^2; $L = I\omega = 0{,}196 \times 20 \approx 3{,}9$ kg·m^2/s, diretto verso l'alto (regola della mano destra, rotazione antioraria vista dall'alto) (3 punti). b) Si conserva la componente verticale del momento angolare del sistema studente + sgabello + ruota. Le forze esterne sono i pesi (verticali) e la reazione del pavimento sull'asse dello sgabello; i loro momenti rispetto all'asse verticale sono nulli, e l'asse gira senza attrito. Le forze fra lo studente e la ruota sono interne e non possono cambiare il momento angolare totale (4 punti). c) Prima: $L_z = +3{,}92$ kg·m^2/s. Dopo: ruota $-3{,}92$ kg·m^2/s, quindi studente + sgabello devono avere +7,84 kg·m^2/s: $\omega = 7{,}84 \div 3{,}0$ rad/s $\approx 2{,}6$ rad/s, in verso antiorario visto dall'alto, cioè nel verso in cui girava la ruota all'inizio (3 punti). d) $K = \frac{1}{2} \times 3{,}0 \times 2{,}61^2$ J ≈ 10 J (la ruota ha sempre $\frac{1}{2} \times 0{,}196 \times 20^2$ J ≈ 39 J). L'energia cinetica totale è aumentata di circa 10 J: viene dal lavoro dei muscoli dello studente mentre capovolge la ruota (forze interne che compiono lavoro) (3 punti). e) Con l'asse orizzontale la ruota non ha più momento angolare verticale: tutto il momento angolare verticale, 3,92 kg·m^2/s, passa allo studente con lo sgabello: $\omega = 3{,}92 \div 3{,}0$ rad/s $\approx 1{,}3$ rad/s, verso antiorario (3 punti).