Associazione per l'Insegnamento della Fisica

PROGETTO AIF OLIMPIADI

32ª Edizione

Olimpiadi di Fisica 2018

Gara di 2° livello
Martedì 20 Febbraio 2018

Soluzione

Quesiti

QUESITO n. 1

Indicando l'angolo di incidenza con θ_1, quello di rifrazione con θ_2 e con v_1 e v_2 le velocità di propagazione nei due mezzi, è

$$\frac{\operatorname{sen}\theta_1}{v_1} = \frac{\operatorname{sen}\theta_2}{v_2} \quad \text{da cui} \quad \operatorname{sen}\theta_2 = \frac{v_2}{v_1}\operatorname{sen}\theta_1 \quad \Rightarrow \quad \theta_2 = 17.5^\circ\,. \qquad \text{RIS} \Rightarrow \boxed{17.4 \le \theta_2 \le 17.6 \quad [\,^\circ\,]}$$

QUESITO n. 2

Sul blocco agiscono tre forze: il peso, la forza normale e la forza d'attrito; le prime due si equilibrano, dunque quest'ultima è la forza risultante. Il carico non si sposta rispetto al camion, quindi la sua accelerazione è la stessa del camion, in modulo $a = 0.35\,g$. Per la seconda legge della dinamica il modulo dell'attrito è allora:

$$F_\mathrm{a} = Ma = 0.35\,Mg = 8.58 \times 10^3\,\mathrm{N}\,. \qquad \text{RIS} \Rightarrow \boxed{8.56 \times 10^3 \le F_\mathrm{a} \le 8.60 \times 10^3 \quad [\,\mathrm{N}\,]}$$

Notare che il risultato è indipendente dal coefficiente d'attrito statico che invece determina il valore massimo che può avere la forza d'attrito:

$$F_\mathrm{a,max} = \mu_\mathrm{s}\,N = \mu_\mathrm{s} M g = 1.23 \times 10^4\,\mathrm{N} > F_\mathrm{a}$$

il che conferma che il blocco non scivola sul pianale del camion.

QUESITO n. 3

Detti p_0 e V_0 la pressione e il volume iniziale in ciascuna delle due parti, e p_1, V_1, p_2, V_2 le pressioni e i volumi finali, per la legge di Boyle – essendo T costante – si ha $p_1V_1 = p_2V_2 = p_0V_0$.

Indicando con S l'area della sezione del pistone, con d la semialtezza (per cui $S\,d = V_0$), e con x lo spostamento del pistone dalla posizione iniziale, risulta $p_1\,S\,(d+x) = p_2\,S\,(d-x) = p_0\,S\,d$, da cui

$$p_1 = p_0\frac{d}{d+x} \qquad p_2 = p_0\frac{d}{d-x}\,.$$

Il modulo F della forza che agisce sul pistone vale

$$F = (p_2 - p_1)\,S = \frac{2d\,p_0\,x\,S}{d^2 - x^2} = \frac{2\,p_0\,x\,V_0}{d^2 - x^2} = 267\,\mathrm{N}\,. \qquad \text{RIS} \Rightarrow \boxed{264 \le F \le 270 \quad [\,\mathrm{N}\,]}$$

QUESITO n. 4

Si indichi con v_m la velocità durante la fase di marcia e con Δt_m il relativo tempo; con v_c e Δt_c i corrispondenti dati relativi alla fase di corsa e infine con $\Delta t = \Delta t_\mathrm{m} + \Delta t_\mathrm{c}$ il tempo totale della sessione di allenamento. Poiché lo spazio percorso è $v_\mathrm{m}\,\Delta t_\mathrm{m} + v_\mathrm{c}\,\Delta t_\mathrm{c}$, la velocità media risulta

$$\overline{v} = \frac{v_\mathrm{m}(\Delta t - \Delta t_\mathrm{c}) + v_\mathrm{c}\,\Delta t_\mathrm{c}}{\Delta t} = v_\mathrm{m} + (v_\mathrm{c} - v_\mathrm{m})\frac{\Delta t_\mathrm{c}}{\Delta t}\,. \quad \text{Di conseguenza} \quad \frac{\Delta t_c}{\Delta t} = \frac{\overline{v} - v_\mathrm{m}}{v_\mathrm{c} - v_\mathrm{m}} = 80\,\%\,.$$

RIS $\Rightarrow$ $\boxed{79\,\% \leq \Delta t_c/\Delta t \leq 81\,\%}$

QUESITO n. 5

Non appena il sistema si sposta dalla posizione iniziale di un angolo θ nel verso orario indicato in figura, assunto come positivo, il momento meccanico delle forze risulta

$$\mathcal{M} = -m_1\,g\,d_1\,\mathrm{sen}\,\theta + m_2\,g\,d_2\,\mathrm{sen}\,\theta = (m_2\,d_2 - m_1\,d_1)\,g\;\mathrm{sen}\,\theta = k\,g\;\mathrm{sen}\,\theta\,.$$

Sostituendo i valori numerici dati si trova

$$k = 0.05\,\mathrm{kg\,m} > 0 \quad \text{per cui} \quad \mathcal{M} \gtrless 0 \quad \text{per} \quad \theta \gtrless 0$$

essendo positivo il verso entrante per il momento totale. Di conseguenza la posizione iniziale è di equilibrio instabile e il sistema tende a portarsi nella posizione in cui m_2 si trova in basso, che è quella di equilibrio stabile.

L'energia meccanica del sistema di masse all'inizio del moto è, considerando nulla l'energia potenziale gravitazionale al livello del perno, $m_2 g\,d_2 - m_1 g\,d_1$. L'energia meccanica del sistema, nel punto di equilibrio stabile, ovvero quando la sbarra è verticale con la posizione delle masse scambiata rispetto all'inizio, è

$$\frac{1}{2}\,(m_1\,d_1^2 + m_2\,d_2^2)\,\omega^2 + m_1 g\,d_1 - m_2 g\,d_2\,.$$

Poiché gli attriti sono trascurabili, l'energia meccanica si conserva e si trova

$$\omega = 2\sqrt{\frac{m_2 d_2 - m_1 d_1}{m_1 d_1^2 + m_2 d_2^2}\,g} = 1.67\,\mathrm{rad\,s^{-1}}\,.$$

RIS $\Rightarrow$ $\boxed{1.63 \leq \omega \leq 1.71 \quad [\,\mathrm{rad\,s^{-1}}\,]}$

Soluzione alternativa

L'energia potenziale gravitazionale del sistema di masse, considerando il livello zero all'altezza del perno, è

$$U(\theta) = m_2 g\,d_2\,\cos\theta - m_1 g\,d_1\,\cos\theta = (m_2\,d_2 - m_1\,d_1)\,g\,\cos\theta$$

Poiché, come visto sopra, il termine tra parentesi è positivo con i valori assegnati, l'andamento della funzione $U(\theta)$ è lo stesso di $\cos\theta$: si ha quindi un massimo (e dunque una posizione di equilibrio instabile) in corrispondenza della posizione iniziale e un minimo (equilibrio stabile) in corrispondenza di $\theta = \pi\,\mathrm{rad}$.

Poiché gli attriti sono trascurabili l'energia meccanica si conserva. Risulta dunque

$$(m_2\,d_2 - m_1\,d_1)\,g\,\cos 0 = (m_2\,d_2 - m_1\,d_1)\,g\,\cos\pi + \frac{1}{2}\,(m_1\,d_1^2 + m_2\,d_2^2\,)\,\omega^2$$

da cui si ricava lo stesso risultato.

QUESITO n. 6

Detta η la variazione relativa di lunghezza ($\eta = 0.009$ in questo caso), dopo l'allungamento, il filo avrà lunghezza $\ell' = (1+\eta)\,\ell$. La densità del filo dipende dal materiale e dalla temperatura, e quindi non viene modificata dallo stiramento. Di conseguenza il volume del filo resta costante per cui $\ell S = \ell' S'$; all'allungamento corrisponderà una diminuzione della sezione. Quest'ultima sarà data da

$$S' = \frac{\ell}{\ell'}S = \frac{\ell}{(1+\eta)\,\ell}S = \frac{1}{(1+\eta)}S\,.$$

Tenuto conto che anche la resistività non cambia, la resistenza sarà pari a

$$R' = \rho\frac{\ell'}{S'} = \rho\,\frac{(1+\eta)^2\,\ell}{S} = (1+\eta)^2\,R = 1.812\,\Omega\,.$$

RIS $\Rightarrow$ $\boxed{1.808 \leq R' \leq 1.816 \quad [\,\Omega\,]}$

Soluzione alternativa

Poiché il volume del filo non cambia, a un aumento di lunghezza corrisponde una diminuzione della sezione del filo. Se la variazione è piccola, le variazioni percentuali sono uguali in modulo; infatti

$$V = \ell S = \text{cost} \quad \Rightarrow \quad \delta\ell\, S + \ell\, \delta S = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\delta S}{S} = -\frac{\delta \ell}{\ell}\,.$$

La resistenza è data $R = \rho\dfrac{\ell}{S}$ per cui, sempre per piccole variazioni, $\dfrac{\delta R}{R} = \dfrac{\delta\ell}{\ell} - \dfrac{\delta S}{S} = 2\dfrac{\delta\ell}{\ell}$. La resistenza varia dunque dell'1.8% e alla fine si ritrova il risultato dato sopra.

NOTA per i correttori $\Rightarrow$ *Un solo punto per chi non considera la variazione di sezione.*

QUESITO n. 7

Detta S la sezione del cilindro e Δh la variazione del livello del contenuto, si può calcolare la diminuzione di volume $\Delta V = S\Delta h$ dovuta alla fusione del ghiaccio; conoscendo la densità ρ_g del ghiaccio e quella ρ_0 dell'acqua a 0°C, si può risalire al volume iniziale del ghiaccio. La massa del ghiaccio e quella dell'acqua sono uguali, quindi

$$M = V_\text{g}\,\rho_\text{g} = V_\text{a}\,\rho_0 \qquad \Rightarrow \qquad V_\text{a} = \frac{\rho_\text{g}}{\rho_0}\,V_\text{g}$$

$$\Delta V = V_\text{a} - V_\text{g} = V_\text{g}\frac{\rho_\text{g}-\rho_0}{\rho_0} \quad \text{(notare che } \Delta V < 0 \text{ così come } \Delta h)$$

$$V_\text{g} = \frac{\rho_0}{\rho_\text{g}-\rho_0}\,\Delta V = \frac{\rho_0}{\rho_\text{g}-\rho_0}\,S\,\Delta h\,.$$

Per una massa M, detto λ_f il calore latente di fusione del ghiaccio, il calore assorbito sarà

$$Q = M\,\lambda_\text{f} = \frac{\rho_0}{\rho_\text{g}-\rho_0}\,S\,\Delta h\,\rho_\text{g}\,\lambda_\text{f} = 1.85\times 10^5\ \text{J}\,.$$

RIS $\Rightarrow$ $\boxed{1.84\times 10^5 \le Q \le 1.86\times 10^5 \quad [\,\text{J}\,]}$

QUESITO n. 8

La resistenza equivalente è data da $\dfrac{1}{R^\star} = \dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2} + \dfrac{1}{R_3}$ e quindi la differenza di potenziale ai capi del parallelo, e anche di R_2, è $V = I\,R^\star$; la corrente che attraversa R_2 è quindi

$$I_2 = \frac{V}{R_2} = \frac{I\,R^\star}{R_2} = \frac{I}{R_2\,(1/R_1+1/R_2+1/R_3)} = \frac{I}{1+R_2/R_1+R_2/R_3} = 2.94\ \text{A}\,.$$

RIS $\Rightarrow$ $\boxed{2.93 \le I_2 \le 2.95 \quad [\,\text{A}\,]}$

QUESITO n. 9

L'intensità dell'onda sonora è proporzionale al quadrato della sua ampiezza A.

Nella regione di sovrapposizione delle due onde, si avrà interferenza costruttiva nei punti in cui le due onde arrivano in fase; in questi punti l'onda risultante avrà ampiezza pari alla somma delle ampiezze delle due onde. Pertanto, indicando con α la costante di proporzionalità,

$$W = \alpha A^2 = \alpha\,(A_1+A_2)^2 = \alpha\left(\sqrt{\frac{W_1}{\alpha}} + \sqrt{\frac{W_2}{\alpha}}\right)^2 = \left(\sqrt{W_1}+\sqrt{W_2}\right)^2 = 1\ \text{W/m}^2\,.$$

QUESITO n. 10

Dalla legge dell'effetto fotoelettrico si ha che $\quad e\,V_1 = \dfrac{hc}{\lambda_1} - W_0 \quad$ e $\quad e\,V_2 = \dfrac{hc}{\lambda_2} - W_0\,.$

Dividendo membro a membro

$$\frac{e\,V_1}{e\,V_2} = k = \frac{hc/\lambda_1 - W_0}{hc/\lambda_2 - W_0} \quad \text{da cui} \quad W_0 = \frac{hc}{k-1}\left(\frac{k}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right) = 2.23\times 10^{-19}\ \text{J} = 1.39\ \text{eV}\,.$$

RIS $\Rightarrow$ $\boxed{2.20\times 10^{-19} \le W_0 \le 2.26\times 10^{-19} \quad [\,\text{J}\,]}$

Problemi

PROBLEMA n. 1 – Un granello di polvere su un satellite

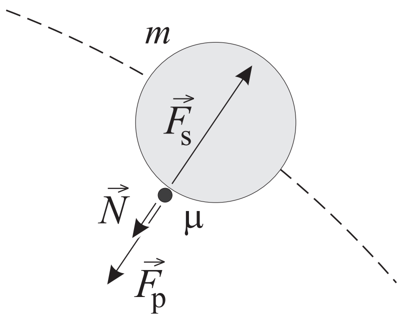
Quesito n. 1.

Il satellite è sottoposto alla sola forza di gravità del pianeta, che deve essere quindi uguale alla forza centripeta. Imponendolo si ottiene:

$$\frac{GMm}{r^2} = m\frac{v^2}{r} = m\omega^2 r \quad \text{da cui} \quad \omega = \sqrt{\frac{GM}{r^3}}\,.$$

Quesito n. 2.

Sul corpo (v. figura) agiscono tre forze: la forza di gravità del pianeta $\vec{F}_p$, la forza di gravità del satellite $\vec{F}_s$ e la forza normale $\vec{N}$.



Assumendo come positivo il verso satellite-pianeta, le prime due sono date da

$$F_p = \frac{GM\mu}{(r-a)^2} \qquad F_s = -\frac{Gm\mu}{a^2}\,.$$

mentre la forza risultante F_c (centripeta) che agisce sul corpuscolo deve essere

$$F_c = \mu\,\omega^2(r-a) = \frac{GM\mu}{r^3}(r-a)\,.$$

La condizione $\quad F_p + F_s + N = F_c \quad$ si esprime quindi come

$$\frac{GM\mu}{(r-a)^2} - \frac{Gm\mu}{a^2} + N = \frac{GM\mu}{r^3}(r-a) \quad \Rightarrow \quad N = \frac{GM\mu}{r^3}(r-a) - \frac{GM\mu}{(r-a)^2} + \frac{Gm\mu}{a^2}\,.$$

NOTA per i correttori $\Rightarrow$ *Si può arrivare agli stessi risultati dei punti 1 e 2 mettendosi in un sistema rotante e studiando l'equilibrio con l'aggiunta della forza centrifuga. In tal caso il procedimento è da considerarsi corretto.*

Quesito n. 3.

Il corpo può rimanere appoggiato sul satellite solo se il risultato del calcolo precedente fornisce $N \geq 0$. Imponendolo nell'equazione appena trovata si ricava

$$\frac{M}{r^3}(r-a) - \frac{M}{(r-a)^2} + \frac{m}{a^2} \geq 0\,.$$

NOTA per i correttori $\Rightarrow$ *Il punteggio viene attribuito anche per l'espressione $N \geq 0$.*

Quesito n. 4.

Nell'espressione precedente, conviene raccogliere r nei termini tra parentesi:

$$\frac{M}{r^2}\left(1-\frac{a}{r}\right) - \frac{M}{r^2}\left(1-\frac{a}{r}\right)^{-2} + \frac{m}{a^2} \geq 0\,.$$

Nell'ipotesi $(a/r) \ll 1$ il binomio nel secondo termine può essere approssimato con $(1 + 2a/r)$, ottenendo

$$-\frac{3Ma}{r^3} + \frac{m}{a^2} \geq 0\,.$$

Pertanto la condizione affinché il corpo non si stacchi dal satellite è

$$r \geq \left(\frac{3M}{m}\right)^{1/3} a = r_0\,.$$

NOTA per i correttori $\Rightarrow$ *Si può arrivare allo stesso risultato imponendo che la forza normale sia uguale a zero e risolvendo un'equazione. In tal caso la soluzione è da considerare corretta.*

Quesito n. 5.

Si può osservare che, detta ρ la densità del satellite, l'espressione di r_0 può essere espressa come

$$r_0 = \left(\frac{9M}{4\pi\rho}\right)^{1/3}$$

che mostra come il raggio richiesto dipenda solamente dalla densità del satellite e non dalle sue dimensioni.

Sostituendo nella formula appena trovata i dati della massa della Terra e della densità del satellite, si ottiene

$$r_0 = 1.198 \times 10^4\,\mathrm{km}\,.$$

RIS $\Rightarrow$ $\boxed{1.194 \le r_0 \le 1.201 \quad [10^4\,\mathrm{km}]}$

PROBLEMA n. 2 – Onde su corda verticale

Quesito n. 1.

Le dimensioni di velocità, forza, densità e area sono rispettivamente:

$$[\,v\,] = \mathsf{L}\,\mathsf{T}^{-1}$$
$$[F] = \mathsf{M}\,\mathsf{L}\,\mathsf{T}^{-2}$$
$$[\,\rho\,] = \mathsf{M}\,\mathsf{L}^{-3}$$
$$[A] = \mathsf{L}^2$$

avendo indicato con M, L e T le dimensioni di massa, lunghezza e tempo. Sapendo che v dipende da F, ρ e A si pone $v = F^\alpha \rho^\beta A^\gamma$ con α, β e γ esponenti da determinare. Dunque dev'essere

$$\mathsf{L}\,\mathsf{T}^{-1} = \mathsf{M}^\alpha\,\mathsf{L}^\alpha\,\mathsf{T}^{-2\alpha}\,\mathsf{M}^\beta\,\mathsf{L}^{-3\beta}\,\mathsf{L}^{2\gamma} = \mathsf{L}^{\alpha-3\beta+2\gamma}\,\mathsf{M}^{\alpha+\beta}\,\mathsf{T}^{-2\alpha}\,.$$

Uguagliando gli esponenti delle dimensioni corrispondenti si ha

$$\begin{cases} \alpha - 3\beta + 2\gamma = 1 \\ \alpha + \beta = 0 \\ -2\alpha = -1 \end{cases}$$

da cui si ricava immediatamente $\alpha = 1/2$, $\beta = -1/2$ e $\gamma = -1/2$, ovvero

$$v = F^{1/2}\,\rho^{-1/2}\,A^{-1/2} = \sqrt{\frac{F}{\rho\,A}}\,. \qquad (1)$$

Poiché il fattore numerico adimensionale è uguale a 1, la formula della velocità è proprio la (1).

NOTA per i correttori $\Rightarrow$ *Può essere accettata anche una soluzione in cui si fa uso delle unità di misura al posto delle dimensioni delle diverse grandezze fisiche.*

Quesito n. 2.

In un punto posto ad altezza h la tensione sarà uguale a quella alla base (F_0) più il peso della corda sottostante:

$$F(h) = F_0 + \rho A h g\,. \qquad (2)$$

Quesito n. 3.

Dalla (1) e dalla (2) si ricava:

$$v(h) = \sqrt{\frac{F_0}{\rho\,A} + gh} = \sqrt{v_0^2 + gh}\,.$$

Quesito n. 4.

Confrontando questa espressione con quella che dà l'accelerazione in funzione della posizione in un moto rettilineo uniformemente accelerato, $v(s) = \sqrt{v_0^2 + 2as}$ si vede che l'accelerazione è costante e pari a $g/2$.

In alternativa, l'accelerazione si può calcolare derivando la velocità rispetto al tempo, interpretando adesso la velocità come una funzione composta $v(h(t))$:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dh}\frac{dh}{dt} = \frac{g}{2v}\,v = \frac{g}{2}\,.$$

Poiché l'accelerazione è positiva, dunque nel verso scelto per h, essa è diretta verso l'alto, come doveva essere dato che il modulo della velocità cresce con h.

NOTA: in questo problema si è supposto che le variazioni relative della tensione siano piccole sulla distanza dell'ordine della larghezza dell'impulso.

PROBLEMA n. 3 – Condensatore semicircolare

Quesito n. 1.

La superficie affacciata, in funzione di θ (espresso in radianti) è data da

$$S(\theta) = \frac{\pi - |\theta|}{2}\,R^2 \quad \text{e quindi la capacità è} \quad C(\theta) = \varepsilon_0 \frac{(\pi - |\theta|)\,R^2}{2d} = \varepsilon_0 \frac{(\pi - |\theta|)\,R}{2\eta}\,.$$

Quesito n. 2.

La carica del condensatore dopo che è stato caricato (con $\theta = 0$) è

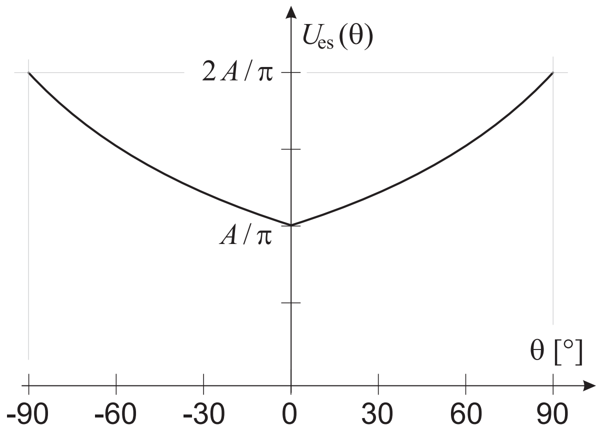
$$Q_0 = C(0)\,V_0 = \frac{\varepsilon_0 \pi\,R}{2\,\eta}\,V_0\,.$$

Con questa carica, l'energia elettrostatica del condensatore ad un angolo θ qualunque, nell'intervallo considerato, è

$$U_{\text{es}}(\theta) = \frac{1}{2}\frac{Q_0^2}{C(\theta)} = \frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon_0 \pi\,R}{2\,\eta}\,V_0\right)^2 \frac{2\eta}{\varepsilon_0(\pi - |\theta|)\,R} =$$

$$= \frac{\varepsilon_0 \pi^2\,R\,V_0^2}{4\,\eta(\pi - |\theta|)} = \frac{A}{\pi - |\theta|} \quad \text{con} \quad A = \frac{\varepsilon_0 \pi^2\,R\,V_0^2}{4\,\eta}\,.$$

L'andamento in funzione di θ nell'intervallo considerato è mostrato nel grafico a fianco.



Quesito n. 3.

La condizione di equilibrio stabile di un sistema coincide con uno stato di minimo (assoluto o relativo) di energia potenziale. Se il condensatore è scarico lo stato di minima energia (gravitazionale) è quello con il CdM più in basso possibile, quindi per $\theta = 0$; se il condensatore è carico si deve considerare anche l'energia e.s. del sistema che presenta un minimo nuovamente in $\theta = 0$; di conseguenza, in entrambi i casi, questa è la posizione di equilibrio.

Quesito n. 4.

I momenti dovuti al peso dell'armatura e quello del corpo appeso devono dare momento risultante nullo rispetto all'asse, quindi

$$mg\,R\,\cos\theta_0 - mg\,h\,\text{sen}\,\theta_0 = 0 \quad \Rightarrow \quad \text{tg}\,\theta_0 = \frac{R}{h} = \frac{3\pi}{4} \quad \Rightarrow \quad \theta_0 = 67.0°\,.$$

Quesito n. 5.

Con il condensatore carico, in un intorno del valore θ_0 l'energia gravitazionale del sistema è stazionaria mentre quella e.s. del condensatore è una funzione crescente di θ; ne segue che l'energia potenziale totale è anch'essa crescente con θ e di conseguenza il sistema lasciato da fermo in questa posizione tende a ruotare verso angoli minori.

Quesito n. 6.

Si devono quindi considerare angoli minori di θ_0, fino a trovare il minimo di energia potenziale totale; questa è data dal termine elettrostatico e da due termini di energia gravitazionale dovuti alla massa dell'armatura (1) e del corpo sospeso (2):

$$U(\theta) = U_{\text{es}}(\theta) + U_1(\theta) + U_2(\theta)$$

dove la prima è stata calcolata al punto 2, mentre le altre sono (a meno di una costante additiva arbitraria)

$$U_1(\theta) = -mg\,h\,\cos\theta = -\frac{4mg\,R}{3\,\pi}\cos\theta\,; \qquad U_2(\theta) = -mg\,R\,\text{sen}\,\theta\,.$$

In definitiva si tratta di trovare il minimo della funzione

$$U(\theta) = \frac{A}{\pi-\theta} - B\cos\theta - C\,\text{sen}\,\theta\,, \quad \text{dove } A \text{ è stata definita al punto 2}, \quad B = \frac{4mgR}{3\pi}, \quad C = mgR\,,$$

in un intorno sinistro di θ_0. Con i valori numerici dati si ottiene:

$$A = 3.072\,\text{mJ} \qquad B = 5.203\,\text{mJ} \qquad C = 12.258\,\text{mJ}\,.$$

È sufficiente valutare la funzione in 5 punti tra θ_0 e $\theta_0 - 4°$; la soluzione numerica dà circa 64°.

RIS $\Rightarrow$ $\boxed{63.5 \le \theta^\star \le 64.5 \quad [\,°\,]}$

θ [°]	θ [rad]	$U(\theta)$ [mJ]
67°	1.1694	−11.759
66°	1.1519	−11.771
65°	1.1345	−11.778
64°	1.1170	$\Rightarrow$ −11.781 $\Leftarrow$
63°	1.0996	−11.780

Utilizzando un passo più piccolo si troverebbe $\theta^\star \approx 63.79°$.

NOTA: Lo spostamento della posizione di equilibrio nel condensatore carico con la massa appesa, e dunque la presenza di una forza e.s. di richiamo, è chiaramente incompatibile con la schematizzazione assunta per il campo E (uniforme e ortogonale alle armature nella zona in cui queste sono affacciate e nullo altrove) perché si tratta proprio di un "effetto di bordo". Tuttavia l'approccio seguito ha una sua validità in quanto l'errore introdotto nel calcolo dell'energia e.s. è tanto minore quanto più la regione interessata dagli effetti di bordo è limitata spazialmente.

Materiale elaborato dal Gruppo

PROGETTO OLIMPIADI

Segreteria delle Olimpiadi Italiane di Fisica

e-mail: **segreteria@olifis.it**
WEB: **www.olifis.it**

Le Olimpiadi di Fisica sono organizzate dall'AIF su mandato del

MINISTERO DELL'ISTRUZIONE, DELL'UNIVERSITÀ E DELLA RICERCA