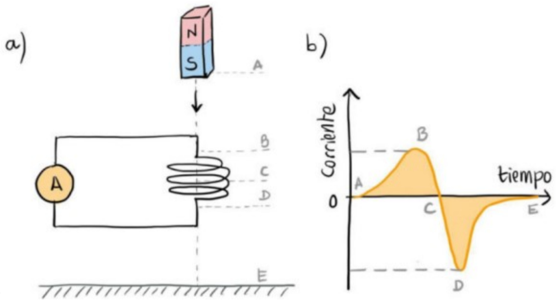
OLIMPIADA DE FÍSICA 2023.

FASE LOCAL DE GRANADA. 3 de marzo de 2023

Prueba resuelta.

CUESTIÓN 1

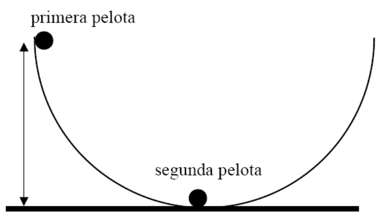
La figura muestra un experimento en el que se deja caer sin velocidad inicial un imán desde el punto A. Durante la caída, el imán atraviesa una pequeña bobina conductora de resistencia total R según se muestra en la figura a). Con un amperímetro se mide la corriente eléctrica inducida en la bobina durante la caída, obteniendo la gráfica de la figura b).



i. Explique por qué se ha generado una corriente en la bobina.
ii. Razone por qué la corriente cambia de sentido. ¿Dónde está el imán en el instante en el que se produce el campo? ¿Por qué, en valor absoluto, la altura del segundo pico es mayor que la del primero en la figura b)?
iii. Cuando el imán impacta contra el suelo, ¿su velocidad es mayor, menor o igual a la que tendría si se repitiese el experimento quitando la bobina? Razone su respuesta.

CUESTIÓN 2

Dos pelotas iguales, de masa m, se colocan dentro de un cuenco como indica la figura. Se suelta la primera pelota sin velocidad inicial, que acaba golpeando a la segunda pelota. Tras chocar, las dos pelotas permanecen en contacto, pegadas entre sí. Calcule, en función de m, la altura máxima alcanzada por las dos pelotas.



CUESTIÓN 3

Calcule a qué profundidad h de la superficie terrestre el campo gravitatorio es igual al que hay a una altura sobre la superficie terrestre igual al radio de la Tierra, R_T.

Nota: considere que la Tierra es homogénea (su densidad es por tanto la misma en todos los puntos de su interior). Tenga en cuenta que para un punto que está dentro de la Tierra, la masa que hay entre dicho punto y la superficie terrestre no afecta gravitatoriamente al punto.

CUESTIÓN 4

Un protón está fijo en el origen de coordenadas. Un electrón está inicialmente en el punto (1,0) m. En el instante inicial se impulsa al electrón de manera que comienza a moverse con velocidad inicial $\vec{v}_0 = 10\,\hat{j}\ \mathrm{m/s}$.

i. Calcule la distancia máxima a la que se aleja el electrón del protón y qué velocidad tiene en dicho punto.
ii. Calcule el módulo de la velocidad inicial que debe tener el electrón para alejarse infinitamente del protón si dicha velocidad tiene la misma dirección y sentido que en apartado i.
iii. Si el electrón sustituye por un positrón y se le comunica la misma velocidad inicial, calcule la distancia máxima a la que se aleja el positrón del protón y qué velocidad tiene en dicho punto.

Nota: se desprecia la interacción gravitatoria entre las cargas; un positrón es la antipartícula del electrón y tiene la misma carga que el electrón en valor absoluto, pero de signo contrario.

Datos: constante Coulomb $K = 9{\cdot}10^9\ \mathrm{N\,m^2\,C^{-2}}$, masa del electrón $m_e = 9{,}1{\cdot}10^{-31}\ \mathrm{kg}$, valor absoluto de la carga del electrón $q_e = 1{,}609{\cdot}10^{-19}\ \mathrm{C}$, masa del protón $m_p = 1{,}67{\cdot}10^{-27}\ \mathrm{kg}$.

PROBLEMA 1

Una pelota pequeña de masa m se mueve, con módulo de velocidad constante en una circunferencia horizontal, en la superficie interior de un cuenco semiesférico sin rozamiento. La fuerza de reacción normal $\vec{N}$ forma un ángulo θ con la horizontal.

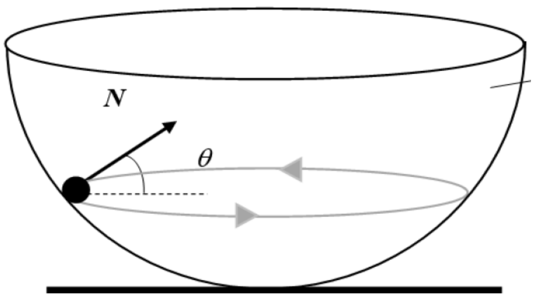
i. Dibuje sobre la figura la dirección y sentido de la fuerza resultante sobre la pelota.

ii. Demuestre que el módulo de la fuerza neta F ejercida sobre la pelota viene dado por la expresión $F = \dfrac{m\,g}{tg\,\theta}$.

iii. Si radio del cuenco es $R = 0{,}8\,\mathrm{m}$ y $\theta = 22^{\circ}$ determine el módulo de la velocidad de la pelota.

iv. Explique si esta pelota puede desplazarse con módulo de la velocidad constante en una trayectoria circular horizontal de radio igual al radio del cuenco.

Datos: módulo de la aceleración de la gravedad $g = 9.8\,\mathrm{m/s^2}$.



PROBLEMA 2

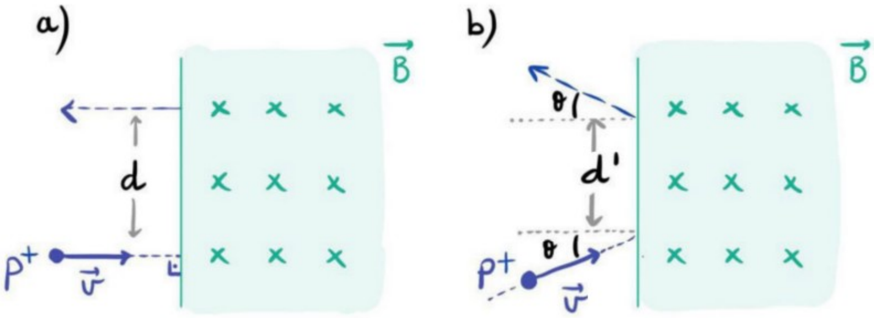
Un protón se lanza con una velocidad de módulo $v = 10^5\,\mathrm{m/s}$ hacia una región del espacio donde hay un campo magnético uniforme de módulo $B = 0{,}1\,\mathrm{T}$ como se muestra en las figuras.

i. Calcule el módulo de la fuerza magnética que se ejerce sobre el protón para los dos casos descritos en las figuras a) y b).

ii. Calcule la distancia d a la que sale el protón de la región donde hay campo en la figura a).

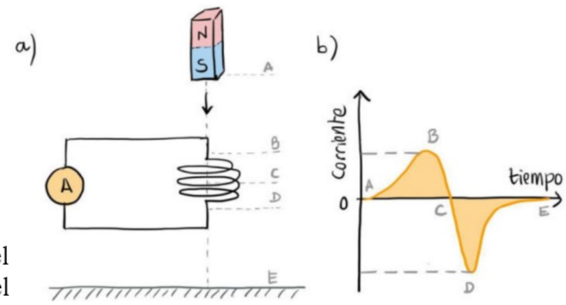
iii. La figura b) muestra al protón entrando con el mismo módulo de velocidad que en la figura a), pero con un ángulo $\theta = 30^{\circ}$. Determine la distancia d' de la figura.

Nota: Desprecie la fuerza gravitatoria ejercida sobre el protón.
Datos: masa del protón $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg}$, valor absoluto de la carga del electrón $q_e = 1{,}609 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}$.



CUESTIÓN 1

La figura muestra un experimento en el que se deja caer sin velocidad inicial un imán desde el punto A. Durante la caída, el imán atraviesa una pequeña bobina conductora de resistencia total R según se muestra en la figura a). Con un amperímetro se mide la corriente eléctrica inducida en la bobina durante la caída, obteniendo la gráfica de la figura b).



i. Explique por qué se ha generado una corriente en la bobina.
ii. Razone por qué la corriente cambia de sentido. ¿Dónde está el imán en el instante en el que se produce el campo? ¿Por qué, en valor absoluto, la altura del segundo pico es mayor que la del primero en la figura b)?
iii. Cuando el imán impacta contra el suelo, ¿su velocidad es mayor, menor o igual a la que tendría si se repitiese el experimento quitando la bobina? Razone su respuesta.

i) Se trata de una cuestión acerca de inducción electromagnética, generación de corriente eléctrica en un circuito debido a la variación de flujo magnético que atraviesa la superficie encerrada por el circuito.

Según la ley de Faraday-Henry-Lenz: $\varepsilon = -\frac{d\phi_m}{dt}$ Siendo el flujo magnético: $\phi_m = \iint \vec{B} \cdot d\vec{s}$

Y la corriente inducida está relacionada con la fuerza electromotriz por la ley de Ohm:

$I = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{1}{R} \cdot \frac{d\phi_m}{dt}$

Vemos que a cuanto más rápido varíe el flujo magnético con el tiempo, mayor será la corriente.

El imán está orientado con el polo sur hacia abajo. El campo magnético en la zona en la que está la bobina está orientado hacia el imán. Al caer el imán y acercarse a la bobina, aumenta el valor del campo B, con lo que, por la ley de Faraday-Henry-Lenz, se inducirá corriente en la bobina.

ii) Al dejar caer el imán, que suponemos puntual, el campo magnético que atraviesa la bobina va aumentando y con ello el flujo magnético. Se induce una corriente que crea un campo inducido en sentido contrario al campo externo, que se opone al aumento de flujo. Como el imán cae con movimiento acelerado, la corriente cada vez será mayor. Consideremos que este es el sentido positivo de la corriente.

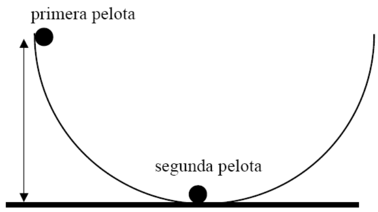
El máximo de corriente se produce cuando el imán llega a la bobina (punto B). A partir de ahí, en el interior de la bobina el aumento de flujo es menor, por lo que la corriente inducida disminuye hasta llegar a cero en el centro de la bobina (punto C). A partir de ahí, el imán comienza a “salir” de la bobina. Ahora el flujo magnético comienza a disminuir, con lo que la corriente inducida irá en sentido contrario al anterior, creando ahora un campo magnético inducido en el sentido del campo externo, que intenta volver a aumentar el flujo. Llega a un máximo (negativo) en el punto D, para ir disminuyendo conforme el imán se aleja hasta llegar al suelo (E).

El máximo de corriente en D es mayor (en valor absoluto) que en B, ya que el imán car con movimiento acelerado. La velocidad del imán en D es mayor que en B, por lo que el flujo magnético variará más rápidamente, y se inducirá una corriente mayor, en valor absoluto.

iii) Aplicando el principio de conservación de la energía, vemos que la energía eléctrica que se ha suministrado a los electrones del circuito para generar la corriente, debe provenir de algún sitio. Efectivamente, se ha transformado parte de la energía cinética del imán en energía eléctrica. Es decir, la bobina ha frenado un poco al imán. Llegará al suelo con menor energía cinética (y por tanto con menor velocidad) que en el caso de que no hubiera bobina, o de que el circuito tuviera un interruptor abierto.

CUESTIÓN 2

Dos pelotas iguales, de masa m, se colocan dentro de un cuenco como indica la figura. Se suelta la primera pelota sin velocidad inicial, que acaba golpeando a la segunda pelota. Tras chocar, las dos pelotas permanecen en contacto, pegadas entre sí. Calcule, en función de m, la altura máxima alcanzada por las dos pelotas.

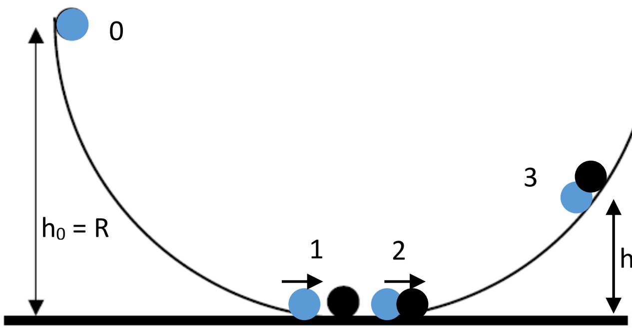


Suponemos, aunque el enunciado no lo especifica, que no existe rozamiento. Las únicas fuerzas que actúan durante la caída y la posterior subida son la gravitatoria, que es conservativa, y la normal, que es en todo momento perpendicular al desplazamiento y no realiza trabajo. Se mantiene constante la energía mecánica drante ambos desplazamientos.

La colisión es completamente inelástica (ambas bolas permanecen unidas tras el choque).

Consideramos los instantes 0 (inicial), 1 (justo antes de la colisión), 2 (justo tras la colisión), y 3(altura máxima que alcanzan).

El nivel cero de Epg se sitúa en el suelo, donde está inicialmente la segunda pelota.



0 →1 $v_0 = 0\frac{m}{s}, \ \ h_0 = R$

$$E_{M0} = E_{M1} \rightarrow \ E_{Pg0} + E_{c0} = E_{Pg1} + E_{c1} \rightarrow \ mgh_0 = \frac{1}{2}mv_1^2 \rightarrow \ v_1 = \sqrt{2gh_0} = \sqrt{2gR}$$

1 →2 Colisión completamente inelástica. $\Sigma\vec{p} = cte$. Ambas bolas permanecen unidas, salen con la misma velocidad $\vec{v}_2$. Inicialmente la segunda bola está en reposo. Las velocidades sólo tienen componente x.

$$m \cdot v_1\,\vec{\imath} + 0 = 2m \cdot v_2\,\vec{\imath} \ \rightarrow \ v_2 = \frac{v_1}{2} = \frac{\sqrt{2gR}}{2}$$

2 →3 La masa de las dos bolas juntas: $2m$, $v_3 = 0\frac{m}{s}$,

$$E_{M3} = E_{M2} \rightarrow \ E_{Pg3} + E_{c3} = E_{Pg2} + E_{c2} \rightarrow \ \cancel{2m}gh_3 = \frac{1}{2}\cancel{2m}v_2^2 \rightarrow \ \cancel{g}h_3 = \frac{2\cancel{g}R}{2\cdot 4} \ \rightarrow \ h_3 = \frac{R}{4}$$

La altura que alcanza no depende de m, sino del radio del cuenco R.

CUESTIÓN 3

Calcule a qué profundidad h de la superficie terrestre el campo gravitatorio es igual al que hay a una altura sobre la superficie terrestre igual al radio de la Tierra, R_T.

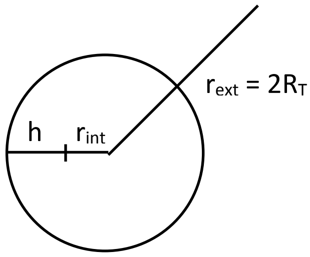
Nota: considere que la Tierra es homogénea (su densidad es por tanto la misma en todos los puntos de su interior). Tenga en cuenta que para un punto que está dentro de la Tierra, la masa que hay entre dicho punto y la superficie terrestre no afecta gravitatoriamente al punto.

Consideraciones iniciales:

Densidad terrestre: $\rho = \frac{M_T}{V_T} \rightarrow M_T = \rho \cdot V_T = \rho \cdot \frac{4}{3}\pi \cdot R_T^3$

En el interior: Profundidad $h = R_T - r_{int}$

En el exterior: $r_{ext} = 2 \cdot R_T$



Cálculo del campo gravitatorio:

El campo gravitatorio en el exterior de la Tierra viene dado por

$$g_{ext} = \frac{G \cdot M_T}{{r_{ext}}^2} = \frac{G \cdot M_T}{(2 \cdot R_T)^2} = \frac{G \cdot M_T}{4 \cdot {R_T}^2} = \frac{G \cdot \rho \cdot \frac{4}{3}\pi \cdot R_T^3}{4 \cdot {R_T}^2} = \frac{G \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T}{3}$$

En el interior, aplicando el teorema de Gauss $\oiint \vec{g} \cdot d\vec{s} = -4\pi G \cdot M_{int}$

$$-g_{int} \cdot \cancel{4\pi} \cdot r_{int}^2 = -\cancel{4\pi} \cdot G \cdot \rho \cdot \frac{4}{3}\pi \cdot r_{int}^3 \quad \rightarrow \quad g_{int} = \frac{4 \cdot G \cdot \rho \cdot \pi \cdot r_{int}}{3}$$

Para que ambos campos sean iguales:

$$g_{int} = g_{ext} \quad \rightarrow \quad \frac{4 \cdot G \cdot \rho \cdot \pi \cdot r_{int}}{3} = \frac{G \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T}{3} \quad \rightarrow \quad r_{int} = \frac{R_T}{4}$$

Así, la profundidad $h = R_T - r_{int} = R_T - \frac{R_T}{4} = \frac{3 \cdot R_T}{4}$

CUESTIÓN 4

Un protón está fijo en el origen de coordenadas. Un electrón está inicialmente en el punto (1,0) m. En el instante inicial se impulsa al electrón de manera que comienza a moverse con velocidad inicial $\vec{v}_0 = 10\,\hat{j}$ m/s .

i. Calcule la distancia máxima a la que se aleja el electrón del protón y qué velocidad tiene en dicho punto.

ii. Calcule el módulo de la velocidad inicial que debe tener el electrón para alejarse infinitamente del protón si dicha velocidad tiene la misma dirección y sentido que en apartado i.

iii. Si el electrón sustituye por un positrón y se le comunica la misma velocidad inicial, calcule la distancia máxima a la que se aleja el positrón del protón y qué velocidad tiene en dicho punto.

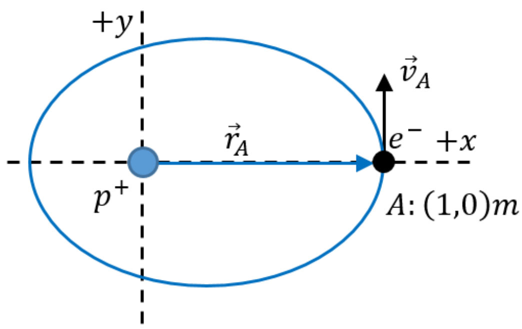
Nota: se desprecia la interacción gravitatoria entre las cargas; un positrón es la antipartícula del electrón y tiene la misma carga que el electrón en valor absoluto, pero de signo contrario.

Datos: constante Coulomb $K = 9{\cdot}10^9\ \mathrm{N\,m^2\,C^{-2}}$, masa del electrón $m_e = 9{,}1{\cdot}10^{-31}$ kg, valor absoluto de la carga del electrón $q_e = 1{,}609{\cdot}10^{-19}$ C , masa del protón $m_p = 1{,}67{\cdot}10^{-27}$ kg .

i) Despreciando la fuerza gravitatoria entre el electrón y el protón, la única fuerza que actúa sobe el electrón es la eléctrica, que es central, conservativa y, en este caso, atractiva. Viene dada por la ley de Coulomb

$\vec{F}_e = \frac{KQq}{r^2}\vec{u}_r$ en módulo $\quad F_e = \frac{K|Qq|}{r^2}$

Como inicialmente la velocidad no va en la dirección del radio, la trayectoria será una elipse (siempre y cuando la velocidad no supere o iguale la velocidad de escape, que calcularemos en ii; en este caso, describirá una parábola o una hipérbola, alejándose indefinidamente)



Inicialmente, la velocidad es perpendicular al radio. En una órbita elíptica esto sólo sucede en los puntos de máximo acercamiento o de máximo alejamiento (si la velocidad es perpendicular, en ese momento el radio deja de aumentar para empezar a disminuir, o viceversa).

Comprobamos si el instante inicial corresponde con el punto de máximo acercamiento o de máximo alejamiento, comparando con la velocidad orbital que tendría en órbita circular.

M.C.U → $F_e = \frac{K|Q\cdot q|}{r^2} = m\cdot a_n \rightarrow \frac{K|Q\cdot q|}{r^2} = m\cdot\frac{v^2}{r} \rightarrow v_{orb} = \sqrt{\frac{K|Q\cdot q|}{m\cdot r}} = 16{,}00\ m\ s^{-1}$

Como la velocidad inicial (10 m s^{-1}) es menor que la necesaria para mantener al electrón en órbita circular, éste "caerá" hacia el protón, acercándose al mismo en trayectoria elíptica. El punto de máximo alejamiento que nos piden es el punto inicial que nos han dado, el (1,0) m, la distancia máxima es 1 m y la velocidad de 10 m s^{-1}.

(No estoy seguro de si pretendían esto con la pregunta, o ha sido un error en el enunciado y en realidad querían que se calculara el punto de máximo acercamiento, para lo cual hay que tener en cuenta la conservación de la energía mecánica y del momento angular, y es más laborioso)

ii) Nos están preguntando por la velocidad de escape del electrón (algo similar a la velocidad de escape en el campo gravitatorio), la velocidad mínima para que se aleje indefinidamente hasta que su energía cinética se haga cero a una distancia infinita. La energía mecánica se mantiene constante (e igual a cero) en todo momento.

Así, $E_{MA} = E_{M\infty} \;\rightarrow\; Ec_A + Ep_A = Ec_\infty + Ep_\infty = 0 \rightarrow \frac{1}{2}mv^2 + \frac{KQq}{r} = 0$

Como $Q>0$ y $q<0$, $Q\cdot q<0$, y se cumple $Q\cdot q = -|Q\cdot q|$ Por tanto

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{K|Qq|}{r} = 0 \;\rightarrow\; v_{esc} = \sqrt{\frac{2K|Qq|}{m\cdot r}} = 22{,}63\ m\ s^{-1}$$

La dirección de la velocidad no influye en el valor de la misma. Describirá una órbita parabólica ($E_M = 0$)

iii) El positrón tiene carga positiva, por lo que ambas partículas se repelerán y se alejarán indefinidamente. La "distancia máxima" es infinita. La velocidad límite a la que tiende se calcula aplicando la conservación de la energía mecánica. A una distancia infinita la energía potencial se anula (nivel cero establecido)

$$E_{MA} = E_{M\infty} \;\rightarrow\; Ec_A + Ep_A = Ec_\infty + Ep_\infty \rightarrow \frac{1}{2}m{v_A}^2 + \frac{KQq}{r_A} = \frac{1}{2}m{v_\infty}^2 + 0$$

Sustituyendo los valores y despejando $v_\infty = 24{,}74\ m\ s^{-1}$

PROBLEMA 1

Una pelota pequeña de masa m se mueve, con módulo de velocidad constante en una circunferencia horizontal, en la superficie interior de un cuenco semiesférico sin rozamiento. La fuerza de reacción normal $\vec{N}$ forma un ángulo θ con la horizontal.

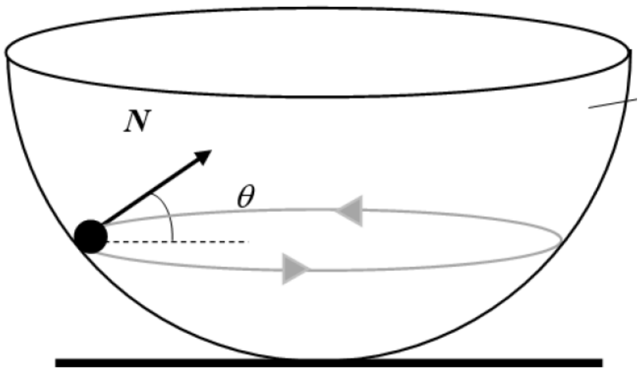
i. Dibuje sobre la figura la dirección y sentido de la fuerza resultante sobre la pelota.

ii. Demuestre que el módulo de la fuerza neta F ejercida sobre la pelota viene dado por la expresión $F = \dfrac{m\,g}{tg\,\theta}$.

iii. Si radio del cuenco es $R = 0{,}8\,\text{m}$ y $\theta = 22^\circ$ determine el módulo de la velocidad de la pelota.

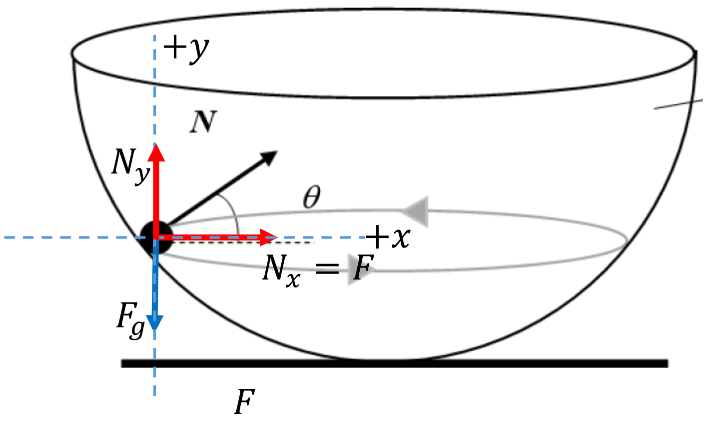
iv. Explique si esta pelota puede desplazarse con módulo de la velocidad constante en una trayectoria circular horizontal de radio igual al radio del cuenco.

Datos: módulo de la aceleración de la gravedad $g = 9.8\,\text{m/s}^2$.



i) Al no existir rozamiento las dos únicas fuerzas que actúan son la gravitatoria y la normal, que es perpendicular a la superficie y apunta hacia el centro de la esfera.

Al describir la pelota un movimiento circular uniforme sobre un plano horizontal, como indica la figura, la fuerza resultante debe ser una fuerza centrípeta, que apunte hacia el centro de la trayectoria circular. Por tanto, las dos fuerzas en el eje *y* (N_y y Fg) se anulan, y la resultante F es igual a la componente *x* de la normal.

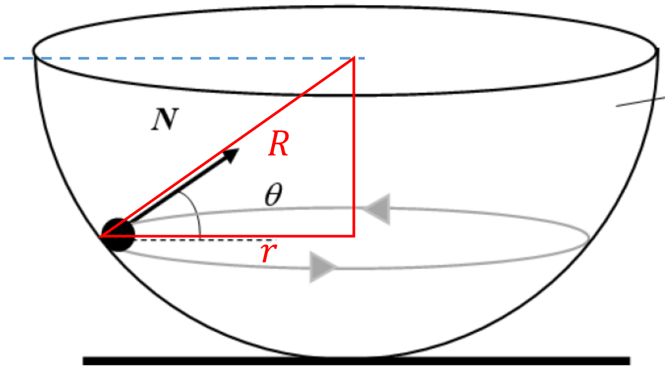


ii) Como hemos dicho anteriormente, las dos fuerzas en dirección vertical se anulan:

$$\Sigma F_y = 0 \rightarrow \quad N_y - F_g = 0 \rightarrow \quad N \cdot sen\theta = m \cdot g \rightarrow \quad N = \frac{m \cdot g}{sen\theta}$$

Y la fuerza neta F, que es igual a Nx

$$F = N_x = N \cdot cos\theta = \frac{m \cdot g}{sen\theta} \cdot cos\theta = \frac{m \cdot g}{tg\theta} \qquad \text{c.q.d}$$



iii) R : radio de la esfera

r : radio de la trayectoria circular. $r = R \cdot cos\theta$

La fuerza neta F es una fuerza centrípeta.

$$F = m \cdot \frac{v^2}{r} \rightarrow \frac{\cancel{m} \cdot g}{tg\theta} = \cancel{m} \cdot \frac{v^2}{R \cdot cos\theta}$$

Por tanto $v = \sqrt{\frac{g \cdot R \cdot cos\theta}{tg\theta}}$

Sustituyendo $R = 0,8\ m$, $\theta = 22^o$ → $v = 4,24\ m\ s^{-1}$

iv) Para que la pelota haga un movimiento circular uniforme con un radio igual al radio R del cuenco, el ángulo θ debe ser nulo ($r = R \cdot cos\theta$, si $r = R$ → $cos\theta = 1$ → $\theta = 0^o$). La trayectoria coincidiría con el borde superior del cuenco.

Sustituyendo en la expresión de la velocidad, obtendríamos un valor infinito, ya que tg0º = 0. Por tanto, es imposible la situación que se propone.

Otra forma de razonarlo: si la trayectoria coincide con el borde del cuenco, la normal iría en dirección horizontal, sólo tendría componente x. No habría, por tanto, una componente Ny que compense la fuerza gravitatoria. La situación es imposible.

PROBLEMA 2

Un protón se lanza con una velocidad de módulo $v = 10^5$ m/s hacia una región del espacio donde hay un campo magnético uniforme de módulo $B = 0{,}1$ T como se muestra en las figuras.

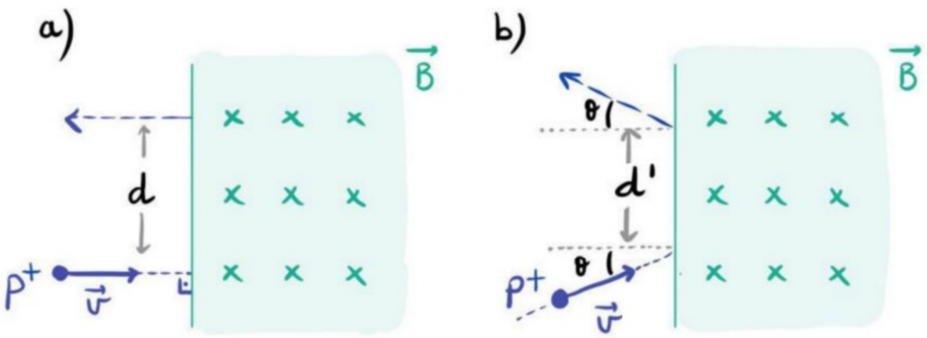
i. Calcule el módulo de la fuerza magnética que se ejerce sobre el protón para los dos casos descritos en las figuras a) y b).

ii. Calcule la distancia d a la que sale el protón de la región donde hay campo en la figura a).

iii. La figura b) muestra al protón entrando con el mismo módulo de velocidad que en la figura a), pero con un ángulo $\theta = 30^{\circ}$. Determine la distancia d' de la figura.

Nota: Desprecie la fuerza gravitatoria ejercida sobre el protón.

Datos: masa del protón $m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg, valor absoluto de la carga del electrón $q_e = 1{,}609 \cdot 10^{-19}$ C.



i) Los dos casos son similares. Una partícula cargada q que entra en una región en la que existe un campo magnético constante y uniforme con una velocidad que es perpendicular a la dirección del campo ($\vec{v}$ en el plano del papel y $\vec{B}$ perpendicular al plano del papel).

La fuerza magnética viene dada por la ley de Lorentz: $\vec{F}_m = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$

En módulo $F_m = |q| \cdot v \cdot B \cdot sen\alpha$

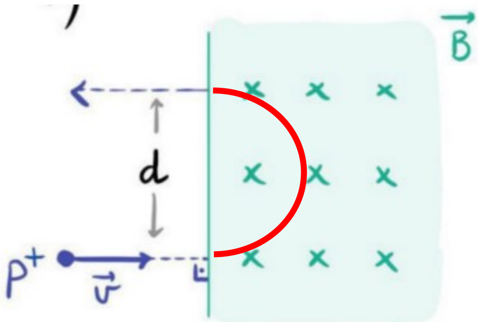
En este caso $\alpha = 90^{\circ}$, $q = e = 1{,}609 \cdot 10^{-19}$ C, $v = 10^5$ ms^{-1}, B = 0,1 T → $F_m = 1{,}609 \cdot 10^{-15}\ N$

ii) La dirección de la fuerza, que es perpendicular a la velocidad, irá cambiando conforme se desvía la trayectoria. Como la fuerza es perpendicular a la velocidad, es una fuerza centrípeta (el movimiento sólo posee aceleración normal, no tangencial) y hace que la partícula describa un movimiento circular uniforme, y su trayectoria será un arco de circunferencia. El radio de la trayectoria se calcula:

$F_m = |q| \cdot v \cdot B \cdot sen\alpha$ En este caso $F_m = e \cdot v \cdot B$

$F_m = m \cdot \frac{v^2}{R} \rightarrow e \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{R} \rightarrow R = \frac{m \cdot v}{e \cdot B}$

La distancia que propone la cuestión es igual al diámetro de la circunferencia, como vemos en la figura



$d = 2 \cdot R = \frac{2 \cdot m \cdot v}{e \cdot B}$ Sustituyendo los valores: d = 0,0208 m

iii) El caso b) es similar al a). La fuerza magnética es igual en módulo, es también perpendicular a la velocidad, está en el plano del papel, y la partícula describirá un movimiento circular uniforme con un radio igual al del caso a). La única diferencia estriba en que ahora no describe media circunferencia en el interior del campo, sino un arco de menor tamaño, como vemos en la figura. Calculamos d' aplicando trigonometría (teorema del seno)

$$\frac{R}{sen\theta} = \frac{d\prime}{sen(180^{o}-2\theta)} \quad \rightarrow \quad d' = \frac{R\cdot sen(180^{o}-2\theta)}{sen\theta} = \frac{m\cdot v}{e\cdot B}\cdot\frac{sen(180^{o}-2\theta)}{sen\theta}$$

Sustituyendo los datos, obtenemos d' = 0,018 m