

**Ejercicio 1:** Una partícula no relativista de carga  $Ze$ , masa  $m$  y energía cinética inicial  $\mathcal{E}$  incide frontalmente desde el infinito sobre un centro de fuerzas fijo en el origen. La interacción es repulsiva y está descrita por un potencial  $V(r)$  que es mayor que  $\mathcal{E}$  a distancias suficientemente cercanas al origen.

- a. Mostrar que la energía total radiada está dada por

$$\Delta W = \frac{4}{3} \frac{Z^2 e^2}{m^2 c^3} \sqrt{\frac{m}{2}} \int_{r_{\min}}^{\infty} dr \frac{V'(r)^2}{\sqrt{V(r_{\min}) - V(r)}},$$

donde  $r_{\min}$  es la distancia de mínimo acercamiento al centro de fuerzas.

- b. Si la interacción es Coulombiana,  $V(r) = ZZ'e^2/r$ , mostrar que la energía total irradiada es

$$\Delta W = \frac{8}{45} \frac{Z m v_0^5}{Z' c^3},$$

donde  $v_0$  es la velocidad de la carga incidente en el infinito.

- c. Como caso particular, considerar un positrón que incide sobre un protón. Si la velocidad inicial del positrón en el infinito es  $v_0$ , estimar su velocidad final como resultado de la pérdida de energía por radiación, despreciando el movimiento del protón. ¿Cómo está polarizada la radiación? Despreciando ahora los efectos de la pérdida de energía por radiación, pero teniendo en cuenta la masa finita del protón, estimar la velocidad final del positrón. Compare los dos resultados para la velocidad final.

**Ejercicio 2:** Este problema es la versión relativista del anterior. Una partícula relativista de carga  $q$  y masa  $m$  que se mueve sobre el eje  $x$  incide sobre una partícula de carga  $Q$  fija en el origen. Las dos cargas tienen el mismo signo. Inicialmente, en  $x \rightarrow \infty$  y  $t \rightarrow -\infty$ , la partícula de masa  $m$  está caracterizada por un factor relativista  $\gamma_0$ .

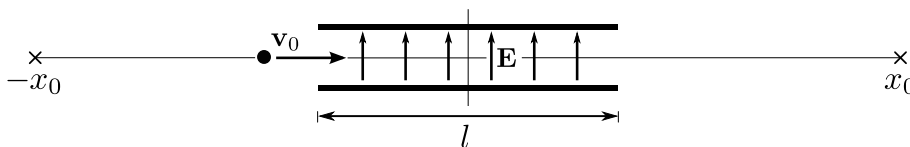
- a. Demuestre primero que para una partícula de masa  $m$  y carga  $q$

$$m\gamma(\mathbf{v})\dot{\mathbf{v}} = q[\mathbf{E} + \boldsymbol{\beta} \times \mathbf{B} - (\boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{E})\boldsymbol{\beta}].$$

Esta fórmula se usa mucho en los problemas relativistas para obtener  $\dot{\mathbf{v}}$ .

- b. Encuentre  $x$  como función de  $\gamma$ . ¿Cuál es la distancia de mínimo acercamiento?  
 c. Encuentre  $\dot{v}$  como función de  $\gamma$ .  
 d. Encuentre  $\dot{\gamma}$  como función de  $\gamma$ .  
 e. Escriba la potencia radiada como función de  $\gamma$ .  
 f. Escriba la energía total radiada como una integral,  $\Delta W = \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} d\gamma f(\gamma)$ , dando los valores de  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  y la función  $f$  en términos de los datos del problema.

**Ejercicio 3:** Una partícula relativista de carga  $q$  y masa  $m$  pasa a través de un capacitor de placas paralelas de longitud  $l$ . El campo  $\mathbf{E}$  en el interior del capacitor es homogéneo y constante. La partícula ingresa al capacitor con una velocidad  $\mathbf{v}_0$  perpendicular a  $\mathbf{E}$  y paralela a las placas, y viaja tan rápido que su desviación puede despreciarse.



- Calcule la energía total irradiada durante el paso de la partícula por el capacitor.
- Escriba la expresión del campo eléctrico de radiación y gráfiquelo cualitativamente en función del tiempo para los puntos  $-x_0$  y  $x_0$ , que se encuentran sobre la línea que sigue la partícula, simétricos respecto del centro del capacitor y muy alejados de éste. Tenga especial cuidado en el cálculo de los intervalos temporales en que ese campo es distinto de cero.

#### Ejercicio 4:

- Una partícula de carga  $-e$  y masa  $m$  gira alrededor de otra mucho más pesada de carga  $Ze$ . El radio de la órbita circular es inicialmente  $R$ . Calcular el tiempo que tarda la partícula más liviana en caer al centro debido a la pérdida de energía por radiación, y calcular el número de vueltas que realiza antes de caer. Asumir que el movimiento es no relativista y que la energía radiada por ciclo es mucho menor que la energía potencial de la partícula en movimiento circular. Recordar que para una órbita circular en un potencial atractivo de la forma  $-\alpha/r$ , la energía total (sin considerar la energía en reposo  $mc^2$ ) es igual a  $1/2$  de la energía potencial.
- Calcular el tiempo de caída y el número de vueltas en el caso de un electrón orbitando alrededor de un protón. Inicialmente el electrón se mueve en una órbita circular correspondiente al radio de Bohr. Datos:  $m_e c^2 = 511$  keV, energía de ionización = 13.6 eV, radio de Bohr =  $5.29 \times 10^{-11}$  m,  $c = 3 \times 10^8$  m/s. ¿Qué falla primero, la aproximación no relativista o la aproximación de energía radiada por ciclo mucho menor que la energía potencial?

#### Ejercicio 5: Para todos los sistemas que se enumeran más abajo:

- Calcular los campos de radiación  $\mathbf{E}$  y  $\mathbf{B}$  hasta orden dipolar magnético y cuadrupolar eléctrico.
- Graficar cualitativamente  $\mathbf{E}$  y  $\mathbf{B}$  sobre la superficie de una esfera.
- Calcular la potencia por unidad de ángulo sólido y graficar su promedio temporal en función de la dirección.
- Calcular la potencia total emitida en todas las direcciones y su promedio temporal.
- Indicar la frecuencia angular de la radiación emitida.

- a. Una carga  $q$  que gira en una órbita circular de radio  $a$  y frecuencia angular  $\omega$ .
- b. Dos cargas  $q$  y  $-q$  que giran en el plano  $xy$  con frecuencia angular  $\omega$ , separadas una distancia  $d$ .
- c. Ídem al anterior pero ahora para dos cargas iguales de valor  $q$ .
- d. Un anillo circular cuyo radio es una función del tiempo  $a(t) = r_0 \cos^2 \omega t$ . El anillo tiene carga  $q$  distribuida uniformemente.
- e. Un dipolo magnético  $\mathbf{m}$  que rota con velocidad angular  $\boldsymbol{\omega}$ . El ángulo entre  $\mathbf{m}$  y  $\boldsymbol{\omega}$  es  $\alpha$ .