

## ESTRUCTURA DE LA MATERIA 4

### SEGUNDO CUATRIMESTRE DE 2018

#### PRÁCTICA 1: CONSERVACIÓN DE ENERGÍA Y MOMENTO RELATIVISTAS

De la conjunción de la relatividad especial y la mecánica cuántica surgieron modelos que materializan la posibilidad de convertir la energía en reposo (en la famosa fórmula escrita como  $E = mc^2$ ) en energía cinética y viceversa. Los ejercicios que siguen ayudarán a entender las leyes de conservación de la energía y el momento, que se desprenden de una simetría exacta de la teoría relativista.

1. 🐰 A partir de la definición del cuadrimomento  $p^\mu = m \frac{dx^\mu}{d\tau}$  de una partícula de masa  $m$  (siendo  $\tau$  el tiempo propio asociado a una partícula,  $x^0 \equiv ct$ , y  $\mu = 0, \dots, 3$ ):
  - (a) Verifique el carácter de cuadvectores de esta cantidad. Es decir, que ante una transformación de Lorentz,  $p^\mu$  transforma igual que las coordenadas espacio-temporales  $x^\mu$ .
  - (b) Escriba la expresión del momento y energía  $E \equiv cp^0$  relativista de una partícula en términos de la masa  $m$  y velocidad  $\mathbf{v}$ .
  - (c) Derive a partir de ella las relaciones:
$$E^2/c^2 - |\vec{p}|^2 = m^2 c^2 \quad \vec{p} = E \frac{\mathbf{v}}{c^2}$$
  - (d) Reescriba la primera relación en la forma  $p^2 \equiv p^\mu p_\mu = m^2 c^2$
  - (e) Obtenga las relaciones entre energía y momento para el caso  $m = 0$  (donde la definición  $p^\mu = m \frac{dx^\mu}{d\tau}$  carecería de sentido). Verifique que esta relación es similar a las del caso masivo en el límite de velocidades cercanas a la de la luz.
  - (f) A fin de apreciar la diferencia entre la expresión relativista del momento y la newtoniana, grafique numéricamente su cociente y vea cuándo empieza a diferir apreciablemente de 1. Ensucie sus manos con una calculadora para esto.
  - (g) Definiendo la energía cinética  $T \equiv E - mc^2$ , obtenga el límite no relativista de ésta.

Del ítem siguiente en adelante usaremos  $c = 1$ .


2. Muestre que ante un boost, el cuadrimomento de una partícula cambia moviéndose en una hipérbola determinada por la masa (grafique ésta). Muestre gráficamente que la suma de cuadrimomentos de dos partículas (cuadvectores de tipo tiempo o luz) es de nuevo un cuadvector de tipo tiempo o luz.
3. Si se tienen dos partículas de masa  $m_1$  y  $m_2$ , verifique que la masa asociada al cuadrimomento total  $p^\mu = p_1^\mu + p_2^\mu$  es mayor o igual que la suma  $m_1 + m_2$ , recuperándose la noción de aditividad de la masa en el límite de velocidades pequeñas.
4. 🐰 Usando conservación del cuadrimomento para un proceso  $1 + 2 + 3 \dots N \rightarrow 1 + 2 + \dots M$  con  $N$  partículas iniciales y  $M$  partículas finales, halle las relaciones (igualdades o desigualdades) que deben darse para las masas de las partículas involucradas (si es que hay alguna restricción) para que el proceso sea posible en los casos:

(a)  $N = 1$  y  $M = 1$


(b)  $N = 1$  y  $M \geq 2$



(c)  $N \geq 2$  y  $M = 1$

(d)  $N \geq 2$  y  $M \geq 2$

5.  Considere una desintegración de un cuerpo en el estado inicial, a dos cuerpos en el estado final, i.e.  $A \rightarrow BC$ . Halle las energías de las partículas  $B$  y  $C$  en el sistema en que la partícula  $A$  se halla en reposo. Verifique que estas energías están unívocamente definidas por las masas de  $A$ ,  $B$  y  $C$ .


6. A partir de lo anterior, calcule el impulso del muón en la desintegración  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ , suponiendo que el pión se encuentra inicialmente en reposo. Conociendo el tiempo de vida media del muón, ¿qué distancia recorrería este muón en el vacío (en promedio) antes de desintegrarse? Deje el resultado escrito en términos de las masas de las partículas involucradas y el tiempo de vida media del muón.

7.  En base al ejercicio anterior, reconsidere el análisis del decaimiento del neutrón en un electrón y un protón que llevó a suponer la existencia del neutrino. Es decir, vea cómo las energías del electrón y protón observadas experimentalmente muestran que debe haber una partícula adicional en el estado final.

8.   Decida si los procesos siguientes son posibles en base a leyes de conservación relativista:

a)  $e^- e^+ \rightarrow \gamma$    b)  $e^- e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$

siendo  $\gamma$  un fotón.

9.  Los primeros antiprotones fueron creados en el Bevatrón (Berkeley) en la reacción  $pp \rightarrow ppp\bar{p}$ . En tal caso se utilizó un haz de protones de energía  $E$  que colisiona con un blanco fijo de protones. Cuál debe ser la energía cinética mínima del protón incidente (uno de los dos  $pp$ ) para que el proceso sea posible? Compare esta con la energía del proton incidente en el sistema centro de masa y diga cuál es mayor.

10. En una teoría relativista, un choque elástico entre dos partículas es definido como aquel en el que no cambia la identidad de las partículas. Es decir,  $A + B \rightarrow A + B$ . En este choque se conserva no solo la energía total sino la cinética. Muestre que en este tipo de colisión, en el sistema centro de masa, los módulos de las velocidades de cada partícula no cambian.

11. Considere el proceso elástico  $\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$ . Demuestre que en el sistema del laboratorio, donde el electrón se halla originalmente en reposo, el ángulo de emisión  $\theta$  del electrón respecto del antineutrino incidente está dado por

$$\sin^2 \theta = \frac{2m}{T + 2m} \left( 1 - \frac{T}{E_\nu} - \frac{mT}{2E_\nu^2} \right),$$

donde  $m$  es la masa del electrón,  $E_\nu$  la energía del antineutrino incidente y  $T = E - m$  la energía cinética del electrón saliente.