



Colisiones

Introducción

Hasta ahora, hemos encontrado una amplia teoría que nos permite describir los procesos mecánicos de partículas puntuales. Es decir, poseemos un conjunto de ecuaciones que al ser combiadas entre sí, dan como solución el comportamiento de una partícula cuando interactúa con el resto del universo. Sin embargo, hasta ahora no hemos considerado qué ocurre cuando el sistema de estudio no posee una sino un conjunto de partículas.

En esta situación, debemos considerar las interacciones de cada partícula con el universo y las interacciones internas, es decir interacciones *partícula - partícula*. Cuando dos partículas se aproximan entre sí, su interacción mutua (la cual puede ser consecuencia de sus propiedades como masa, carga, entre otras) altera su movimiento, produciendo un intercambio de momentum y/o energía. Decimos entonces que ha ocurrido una **colisión**. El mecanismo que se emplea para realizar el intercambio de energía y/o momentum no es conocido y, de hecho, no es de importancia física. El interés del estudio se centra cómo varía el comportamiento del sistema luego que las interacciones ocurren.

Así, decimos que ocurre una colisión entre partículas (o sistemas de partículas) si existe una interacción capaz de generar un cambio en el estado dinámico de las partículas (o de los sistemas de partículas).

¿Qué es el estado dinámico de un sistema?

Se conoce como *estado dinámico* de un sistema al conjunto de variables que permiten obtener el comportamiento del sistema en un instante determinado. Considere un sistema compuesto de N partículas con energía E y confinadas a moverse dentro de un volumen V . Los N átomos poseen $3N$ coordenadas de posición $(r_1, r_2, \dots, r_{3N})$ y $3N$ coordenadas de momentum $(p_1, p_2, \dots, p_{3N})$. La especificación de estas $6N$ coordenadas nos da un estado particular del sistema. Es posible representar las posiciones de las N partículas a partir de N puntos en un espacio tridimensional o por un único punto en un espacio $3N$ -dimensional conocido como *espacio configuración*. De forma análoga, los momentum de las partículas pueden representarse como un único punto en otro espacio $3N$ -dimensional conocido como *espacio de momentum*. Sin embargo, en vez de especificar un estado particular del sistema de esta manera, es decir usando dos espacios separados, es posible combinar el espacio configuración y espacio momentum en un espacio matemático $6N$ -dimensional unificado donde un estado particular está representado por un único punto con coordenadas $(r_1, r_2, \dots, r_{3N}; p_1, p_2, \dots, p_{3N})$. Este espacio $6N$ -dimensional se conoce como *espacio fase*, o espacio- Γ (Γ -space) del sistema, mientras que un punto en este espacio se conoce como punto de fase (Γ -punto). El Γ -punto representa el estado dinámico del sistema:

$$\Gamma \equiv (r_1, r_2, \dots, r_{3N}; p_1, p_2, \dots, p_{3N}) \equiv (\{r_i, q_i\}) \equiv (r, q)$$

donde $i = 1, 2, 3, \dots, 3N$. Es evidente que el primer set de tres coordenadas, $i = 1, 2, 3$, se refieren a la primera partícula, mientras que el segundo set, $i = 4, 5, 6$, corresponde a la segunda y así sucesivamente. En el caso que se considere una sola partícula, bien sea un átomo o una molécula por ejemplo, ésta puede estar representada por su propio espacio fase seis-dimensional, generalmente llamado espacio- μ (μ -space), donde cada punto del espacio se conoce como μ -punto. Es evidente que los μ -espacios individuales se combinan para formar un Γ -espacio.

El factor contacto

Como se ha establecido, ocurre una colisión si podemos cuantificar un cambio en el estado dinámico de un sistema, es decir, si podemos determinar que existe una variación bien sea en el momentum como en la energía del sistema. Además, hemos dicho que la forma como se realice el intercambio de momentum y/o energía no es parte

de nuestro estudio, solamente estamos interesados en conocer las consecuencias de la interacción. Ahora, ¿qué es en sí una interacción?

La forma legal de definir una interacción, como ya hemos visto, es cualquier fenómeno capaz de cambiar el estado dinámico de un sistema. Por ejemplo, si soltamos una esfera desde un punto mayor a la superficie de la tierra, esta caerá en base a una interacción tierra-esfera, la cual llamamos fuerza de gravedad y no requiere del contacto directo entre los constituyentes del sistema. Por otro lado, cuando una bola de billar choca contra otra, vemos que existe un cambio en el estado dinámico de ambas, consecuencia de la interacción que han sufrido en vista del contacto mutuo. Por lo tanto, el hecho que se pueda medir un cambio en el estado del sistema es razón suficiente para indicar que existió una interacción, la cual puede venir dada por contacto directo entre partículas o puede ser en base a fuerzas que actúen a distancias lejanas, como es el caso de la curvatura en la trayectoria de un cometa cuando se aproxima a un planeta o a una estrella.

Resumen: Una colisión **no** tiene que implicar un contacto directo entre las partículas o los sistemas.

Scattering

El término *Scattering* (generalmente traducido como *difusión*) se refiere al cambio en la trayectoria de partículas, desviándose de una trayectoria recta, en vista a la interacción con el medio por donde se desplazan. Se dice que existe scattering si luego del choque las partículas finales son las mismas que las iniciales, como ocurre cuando un gas noble interactúa dentro de un recipiente o cuando un electrón libre es desviado por la interacción con el campo eléctrico de algún átomo. No obstante, este no es siempre el caso que ocurre en la naturaleza. En algunos choques las partículas finales no son necesariamente iguales a las iniciales. Por ejemplo, en un choque entre un átomo A y una molécula BC , el resultado puede ser la molécula AB y el átomo C . De hecho, las colisiones entre átomos y moléculas (en ambientes físicos y químicos generalmente extremos), constituyen una de las formas en que ocurren las reacciones químicas.

Análisis de colisiones

Ya hemos introducido la idea general que describe el comportamiento de un sistema en interacción. A continuación veremos cuál es el análisis físico matemático correspondiente a estos fenómenos.

En un experimento de colisiones generalmente se conocen la configuración inicial del sistema, la cual depende de la forma como se ha planificado el experimento. Así, si conocemos las fuerzas entre las partículas podemos computar el estado final siempre que conozcamos el inicial, principio básico del análisis dinámico como ya lo sabemos. De esta forma, el análisis de estos experimentos nos dan información valiosa acerca de qué tan acertadas son nuestras predicciones teóricas y los modelos de fuerzas que estamos empleando.

En un choque entre las partículas de un sistema solamente actúan fuerzas internas, por lo que tanto el momentum como la energía totales son conservadas. Considerémos el análisis para dos partículas¹ que llamaremos 1 y 2. Sean \vec{p}_1 y \vec{p}_2 los momentum de las partículas antes del choque y \vec{p}'_1 y \vec{p}'_2 los momentum finales. La ley de conservación del momentum establece que:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}'_1 + \vec{p}'_2 \quad (1)$$

Nótese que en un choque no solamente puede existir un cambio en la velocidad de las partículas sino que además podemos especular que pudiera ocurrir un cambio en las masas de los sistemas, por ejemplo, cuando un átomo es ionizado.

Por otro lado, sea U_{12} la energía potencial antes del choque. Después del choque, en vista que pueden existir re-agrupaciones internas de las partículas, dicha energía puede ser diferente y la denotaremos por U'_{12} . La conservación de la energía nos dice que:

$$K + U_{12} = K' + U'_{12} \quad (2)$$

¹Este análisis se puede extender de forma directa a dos sistemas en vez de dos partículas, para obtener los mismos resultados.

donde,

$$K = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 = \frac{p_1^2}{2m_1} + \frac{p_2^2}{2m_2} \quad (3)$$

y

$$K' = \frac{1}{2}m_1v_1'^2 + \frac{1}{2}m_2v_2'^2 = \frac{p_1'^2}{2m_1} + \frac{p_2'^2}{2m_2} \quad (4)$$

Así, basados en la aplicación de estas leyes de conservación podemos realizar el análisis de las colisiones en diversas situaciones.

Clasificación de las colisiones

Podemos introducir un término Q definido como:

$$Q = K' - K = U_{12} - U'_{12} \quad (5)$$

la cual, como se puede ver, está íntimamente relacionada con el concepto de trabajo. Usando las ecuaciones (3), (4) y (5) podemos obtener:

$$\frac{p_1^2}{2m_1} + \frac{p_2^2}{2m_2} = \frac{p_1'^2}{2m_1} + \frac{p_2'^2}{2m_2} + Q \quad (6)$$

De esta manera, si $Q = 0$, la energía cinética del sistema permanece constante y decimos que la colisión es **elástica**. De lo contrario ($Q \neq 0$) la colisión es **inelástica**. Cuando $Q < 0$, hay una disminución en la energía cinética con un correspondiente en la energía potencial interna y la colisión se clasifica como **inelástica de primera clase** o **endoérgica**. Cuando $Q > 0$ hay un aumento en la energía cinética a expensas de la energía potencial interna y tenemos una colisión **inelástica de segunda clase** o **exoérgica**. La variable Q está íntimamente relacionada con la conversión de energía cinética a otras formas energéticas (como calor). Sin embargo, aunque la energía cinética del sistema no siempre permanezca constante, la energía total sí lo hace.

Caso 1: Colisiones elásticas

Si no existe conversión de energía cinética en otras formas de energía después de una colisión, decimos que la colisión es elástica. Ejemplo de colisiones elásticas son la interacción entre una nave espacial y un cuerpo gravitatorio, colisiones entre átomos y dispersión Rutherford (Rutherford backscattering). Sin embargo, las colisiones entre moléculas no son casos de colisiones elásticas, puesto que su forma compleja lleva a cambios en la energía cinética y en los grados de libertad internos.

En colisiones elásticas, podemos usar tanto la ley de conservación de momentum como la conservación de la energía cinética, es decir las ecuaciones (1) y (6), con la condición $Q = 0$. Asimismo, podemos obtener una tercera ecuación para el caso elástico, considerando las componentes del movimiento y suponiendo que la colisión es 1D. Empleando la conservación de la energía cinética podemos obtener:

$$m_1(v_1'^2 - v_1^2) = m_2(v_2^2 - v_2'^2) \quad (7)$$

expandiendo el producto obtenemos:

$$m_1(v_1' - v_1)(v_1' + v_1) = m_2(v_2 - v_2')(v_2 + v_2') \quad (8)$$

Por otro lado, la conservación del momentum, en componentes nos dice que:

$$m_1(v_1' - v_1) = m_2(v_2 - v_2') \quad (9)$$

Sustituyendo (9) en (8) se obtiene:

$$v'_1 + v_1 = v_2 + v'_2 \quad (10)$$

depejando:

$$v_1 - v_2 = v'_2 - v'_1 \quad (11)$$

Por lo tanto, la componente de las velocidades relativas de una partícula respecto a la otra es invertida luego de la colisión. Combinando (11) con (1) y (6), se puede resolver de manera directa el problema de las colisiones elásticas. Se puede corroborar que este resultado es independiente del sistema de referencia que se esté tomando en cuenta, siempre y cuando éste sea galileano.

Caso 2: Colisiones inelásticas

En las colisiones inelásticas, la energía cinética no se conserva sino que se transforma en otras formas de energía, como energía vibracional lo que causa la generación de calor en el sistema. Por ejemplo, cuando las dimensiones de un conductor son lo suficientemente grandes, el flujo de electrones choca contra las paredes del conductor, cediéndole energía y generando calor. Esto se conoce como *Efecto Joule*. En física nuclear una colisión inelástica es aquella en que la partícula entrante choca contra el núcleo para excitarlo o romperlo.

Al igual que en el caso anterior, no existe una ecuación general que describa este tipo de choques. Sin embargo, ahora solamente podemos emplear la conservación del momentum en caso que no sea conocida la transformación de la energía que ocurrió.

Existe un caso particular en las colisiones inelásticas. Si dos partículas colisionan y quedan unidas, se dice que la colisión es **perfectamente inelástica**. En este caso, la conservación del momentum dice que:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = (m_1 + m_2)\vec{v}_f \quad (12)$$