

AC 14 15

En esta emisión trataremos de desarrollar los conceptos básicos contenidos en el tema 10 del texto, referente a una cuestión de importancia capital en física, cual es la conservación del momento lineal. Pero antes de abordar este problema, creo que sería conveniente revisar sumariamente las cuestiones que ya han sido tratadas en emisiones anteriores y que hoy especialmente deberemos recordar. ¿Os parece bien? Muy bien.

Por ejemplo, veo que en el texto que vamos a comentar aparece repetidas veces la magnitud denominada fuerza en relación con el momento lineal. ¿Podría aclararnos, profesor, la noción de fuerza? Sí, desde luego. Como es sabido, a diferencia de la cinemática, la dinámica estudia los movimientos de las partículas y de los sistemas de partículas en relación a las causas que originan dichos movimientos o bien los varían.

Estas causas son las interacciones. Una interacción es en física cualquier proceso por el que dos o más partículas suficientemente próximas cambian su estado de movimiento. La intensidad de una interacción se expresa cuantitativamente a través de una magnitud que tiene carácter vectorial y que llamamos fuerza.

Toda fuerza actuante sobre una partícula provoca en general un cambio en su velocidad instantánea, salvo que existan ligaduras que lo impiden. Para una partícula dada, la variación de su velocidad, medida por la aceleración instantánea, será tanto más apreciable cuanto más intensa sea la fuerza actuante. Diversos ejemplos de fuerzas de interacción podrían enumerarse, pero sólo un número limitado de éstas tienen un carácter fundamental en la naturaleza.

Por el momento, consideramos tan sólo las fuerzas gravitatorias y eléctricas. Las primeras dan cuenta de las interacciones entre masas, regidas por la ley de Newton de la gravitación, en tanto que las segundas definen las interacciones entre cargas eléctricas caracterizadas por la ley de Coulomb de la electrostática. La ley de Newton de la gravitación señala que la fuerza con que se atraen dos masas puntuales es directamente proporcional al producto de las dos masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de separación, siendo la constante de proporcionalidad la llamada constante de gravitación universal designada por la letra G mayúscula y cuyo valor es 6,67 por 10 elevado a menos 11 Newton metro dos kilogramos menos dos.

La ley de Coulomb de la electrostática indica que la fuerza con que se atraen o se repelen dos cargas eléctricas puntuales de distinta o igual clase respectivamente es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de separación, dependiendo la constante de proporcionalidad K del sistema de unidades elegido. En el sistema internacional su valor aproximado es de 9 por 10 elevado a 9 Newton metro dos Coulombie menos dos. Resulta evidente la analogía formal existente entre las leyes mencionadas, aun cuando cada una de ellas se refiere a procesos de interacción bien

diferentes asociados a la existencia de propiedades distintas de la materia como son la masa y la carga eléctrica.

Perdone profesor pero antes que continúe me gustaría que me aclarase una duda. Usted ha dicho que la fuerza es una magnitud vectorial y sin embargo todas las magnitudes que intervienen en la formulación de las leyes fundamentales de la gravitación y de la electrostática tienen un carácter escalar, ¿no? Evidentemente cuando he enunciado dichas leyes me he referido a la intensidad de la fuerza, es decir a su módulo que es un número, un escalar. Para imprimir un carácter vectorial a las fuerzas mencionadas debemos multiplicar su módulo por el vector unitario en la dirección de la recta que separa las dos partículas interactuantes, teniendo presente por otro lado que el sentido de las fuerzas vendrá dado por la naturaleza de la interacción.

Así dos masas siempre se atraen mientras que dos cargas eléctricas se atraen cuando son de distinta clase o signo, una positiva y otra negativa, o se repelen cuando son de igual signo, las dos positivas o las dos negativas. A este respecto debemos notar que hay un solo tipo de masa en tanto que hay dos tipos de carga, ¿comprendido? Sí, sí, sí, desde luego. Bien, sigamos adelante.

Según se desprende de nuestra definición de interacción entre partículas, una partícula que no interactúa con otra u otras no se ve afectada en su movimiento. De esta forma podemos enunciar el principio de inercia, también llamado ley de la inercia o primera ley de Newton de la dinámica, afirmando que toda partícula no sometida a interacción conserva invariable su estado de movimiento, es decir, se mueve libremente. Por consiguiente, al mantener constante su velocidad, el movimiento libre de una partícula tendrá la apariencia de un movimiento rectilíneo uniforme.

Es decir que la energía cinética de la partícula permanecerá constante, ¿no es así? Así es, en efecto, y no solo esta magnitud escalar será una constante del movimiento, sino que también una magnitud de carácter vectorial permanecerá constante en el tiempo cuando la partícula no sufra interacción alguna. Esta magnitud se denomina momento lineal, aunque a veces también se la designa con el nombre de cantidad de movimiento. Se representa por la letra p minúscula y se define como el producto de la masa de la partícula por su velocidad instantánea.

Así pues, la dirección y sentido del momento lineal serán los mismos que los que tenga la velocidad instantánea de la partícula, pero su módulo diferirá del de esta en un factor dado por la masa de dicha partícula. De esta forma, partículas con igual velocidad pero de diferente masa tendrán distinto momento lineal. Puesto que las dimensiones del momento lineal son masa, longitud, tiempo menos uno, en el Sistema Internacional de Unidades se medirá en kilogramo, metro, segundo menos uno.

Bueno, ahora veo claro por qué ha dicho usted antes que una partícula no sometida a interacción conserva constante su momento lineal en el transcurso del tiempo. Según el principio de inercia, si una partícula no interactúa con otra o con otras, mantiene invariable su

estado de movimiento, es decir, su velocidad es constante, tanto en módulo como en dirección. Por otra parte, cuando la partícula aislada que consideramos se mueve a velocidades pequeñas comparadas con la de la propagación de la luz en el vacío, su masa no varía.

Por lo tanto, en el movimiento libre de una partícula, su momento lineal se conservará constante en el tiempo. ¿Es así? Exactamente. El acerto anterior constituye el enunciado del principio o ley de conservación del momento lineal, y es como usted implícitamente ha señalado, consecuencia directa del principio de inercia y de la definición de momento lineal.

Puesto que esta magnitud viene representada por un vector, su conservación se traduce en la conservación de sus tres componentes, P_x , P_y y P_z , en el sistema de referencia Ox y Z utilizado. Conviene notar, por otro lado, que la definición del momento lineal es de sumo interés, puesto que además de dar cuenta del estado de movimiento de la partícula a través de su velocidad instantánea, incluye una propiedad característica de la misma, cual es su masa, que representa la capacidad de respuesta de la partícula frente a perturbaciones, interacciones, que tiendan a alterar el referido estado de movimiento. Así pues, definimos el momento lineal de una partícula con el fin de caracterizar su estado dinámico, en tanto que la velocidad instantánea, junto con la posición, definen su estado cinemático.

Hay que observar, asimismo, que cuando una partícula se mueve libremente, a velocidades relativistas, el momento lineal también se conserva para los distintos observadores inerciales, es decir, para aquellos situados en sistemas de referencia en los que se verifica el principio de inercia, aunque la masa de la partícula sea diferente de la masa en reposo. Baste señalar este hecho, aunque en este curso no podamos dar una justificación adecuada del mismo. Perdón, profesor, queda claro que cuando una partícula no aparece sometida a ninguna fuerza, su momento lineal es una constante del movimiento, pero ¿qué ocurre si la partícula sufre la acción de alguna fuerza? En tal caso, la velocidad no será ya constante y el movimiento no tendrá las características del movimiento libre, esto es, rectilíneo y uniforme.

De esta forma, el momento lineal deja de ser una magnitud constante en el tiempo. Bueno, pero ¿no es verdad que hay alguna relación entre la fuerza aplicada y el momento lineal de la partícula? En efecto, existe una relación de suma importancia entre fuerza y momento lineal. Si derivamos con respecto al tiempo la igualdad que define el momento lineal, recordando la definición de aceleración, así como la segunda ley de Newton de la dinámica, y suponiendo constante de la masa de la partícula, encontramos que la variación temporal de su momento lineal, expresada a través de la correspondiente derivada, es precisamente igual a la fuerza que actúa sobre la partícula.

Se obtiene así una nueva formulación de la ley fundamental de la dinámica, o segunda ley de Newton de la dinámica, de validez más general que la antigua, fuerza igual a masa por aceleración, ya que la teoría de la relatividad de Einstein muestra una dependencia de la masa de un cuerpo con su velocidad. El estudiante no debe ver en esta ley fundamental de la dinámica tan sólo una fórmula que hay que memorizar para resolver problemas, sino que debe

comprender su exacto significado. La formulación de esta ley implica ante todo la aceptación de un principio de causalidad de la filosofía natural.

Una causa, la interacción con otra u otras partículas, provoca un efecto, el cambio en el momento lineal de cada partícula interactuante, de modo que el estado de movimiento de la partícula, caracterizado ahora por su momento lineal, puede alterarse debido a su interacción con el resto del universo, interacción caracterizada por la magnitud llamada fuerza de naturaleza vectorial, si precisamente se define a través de la derivada temporal del momento lineal. Así que si no hay causa, fuerza, no hay efecto, cambio en el momento lineal. De manera que la ley fundamental de la dinámica está de acuerdo con el principio de inercia y con la ley de conservación del momento lineal.

Muy bien, por otra parte, una misma fuerza provocará sobre partículas de distinta masa y animadas de igual velocidad, variaciones instantáneas diferentes en el momento lineal respectivo. La masa, o más exactamente la masa inercial, expresa la propiedad de la materia según la cual los cuerpos tienden a permanecer en el mismo estado de movimiento, oponiéndose a los cambios del mismo como consecuencia de alguna interacción. La conservación del momento lineal puede considerarse también como un teorema deducible a partir de la ley fundamental de la dinámica.

En efecto, si la fuerza es nula, se sigue que el momento lineal es constante. Bueno profesor, aparte de su evidente importancia conceptual, ¿tiene alguna utilidad práctica la ley fundamental de la dinámica? Ciertamente, dicha ley recibe también el nombre de ecuación de movimiento de la partícula. Al actuar una fuerza sobre la partícula, su movimiento no será rectilíneo y uniforme, es decir, con velocidad constante, sino que corresponderá a unas variables cinemáticas, posición, velocidad y aceleración instantáneas, cuya variación temporal viene impuesta por la fuerza de interacción, obedeciendo a una cierta ley como la de Newton de la gravitación o la de Coulomb de la electrostática.

De esta forma, la ecuación de movimiento hace posible, conocidas la velocidad y la posición en un instante dado, las llamadas condiciones iniciales, así como la ley de interacción, la determinación del estado cinemático de la partícula en un instante posterior a aquel. Matemáticamente, esto se logrará integrando la ecuación de movimiento, con lo cual obtendremos la velocidad como una función del tiempo, resultado que nos permitirá encontrar, tras una nueva integración, acudiendo a la definición de velocidad instantánea, la dependencia funcional de la posición con el tiempo. En definitiva, podemos determinar la historia de la partícula en lo que a su movimiento se refiere.

Concluimos pues reafirmando el carácter determinista de la ley fundamental de la dinámica, determinismo causal que preside toda la mecánica clásica de Newton y que debe revisarse en la moderna mecánica cuántica. Bien, hasta ahora usted ha hablado del caso de una partícula. ¿Es posible extender la definición del momento lineal al caso de un sistema de partículas? En efecto, si en lugar de una sola partícula consideramos un sistema de n partículas, se define el

momento lineal total del sistema, representado por la letra P mayúscula, como la suma vectorial de los momentos lineales individuales de cada una de las partículas que constituyen el sistema.

El momento lineal total describe el movimiento del macrosistema como un todo, es decir, como si se tratase de una partícula única de masa igual a la total del sistema y con velocidad tal que el momento lineal total sea igual al producto de la masa total por dicha velocidad. ¿Y cómo se puede reformular la ley de conservación del momento lineal para el caso de un sistema de partículas? Se dice que un sistema de partículas es aislado o cerrado cuando no interactúa con otros sistemas. En tal caso, el sistema en conjunto se mueve libremente y el momento lineal total se conserva constante en el tiempo.

Esto no es sino la misma formulación de la ley de conservación del momento lineal para una partícula, considerando al sistema de partículas como una sola partícula. Hay que resaltar que el hecho de que se conserve el momento lineal total del sistema cuando este no interactúa con otros, no implica en absoluto que los momentos lineales individuales de cada partícula se conserven. Efectivamente, las partículas pueden interactuar entre ellas cambiando sus momentos lineales en el transcurso del tiempo.

Estos momentos lineales caracterizan los movimientos internos de las partículas a los que se superpone el movimiento global del sistema en conjunto. Por ejemplo, tal sería el caso de una corriente de aire en la que a los movimientos térmicos de las moléculas se superpone el flujo direccional de la corriente. Y díganos, profesor, ¿también es posible generalizar la ley fundamental de la dinámica cuando consideramos un sistema de partículas? Ciertamente así es.

Supongamos en principio que el sistema es aislado, de manera que no interactúa con ningún otro. Entonces, el momento lineal total es constante en el tiempo. Así pues, derivando con respecto al tiempo la igualdad vectorial momento lineal total igual a suma de momentos lineales individuales, encontramos, recordando la ley fundamental de la dinámica para una partícula, que la suma de las fuerzas que actúan sobre las partículas del sistema es nula.

Ahora bien, puesto que el sistema es aislado, estas fuerzas estarán asociadas únicamente a las interacciones internas, es decir, las ejercidas entre las partículas que constituyen el sistema. En particular, si el sistema está formado por sólo dos partículas, encontramos que las fuerzas ejercidas mutuamente son iguales en intensidad, teniendo la misma dirección, pero siendo opuestos sus sentidos, tanto en el caso de atracción como en el de repulsión mutua. Esta es la llamada ley de acción y reacción, o tercera ley de Newton de la dinámica, y es válida para todo par de partículas integrantes de un sistema formado por un número cualquiera de estas.

Si suponemos ahora que el sistema en conjunto interactúa con otros, el momento lineal total variará en el tiempo bajo la acción de la fuerza resultante asociada a las interacciones externas, de manera que la ecuación de movimiento del sistema podrá escribirse del siguiente modo, derivada temporal del momento lineal total igual a la resultante de las fuerzas externas que

actúan sobre el sistema. Nuevamente, la conservación del momento lineal puede verse como un teorema. Si la fuerza externa es nula, el momento lineal total es constante, evidentemente.

¿Y qué aplicaciones tiene en la práctica la conservación del momento lineal total de un sistema aislado de partículas? Innumerables. En el texto quedan recogidos unos cuantos ejemplos fácilmente comprensibles desde la perspectiva de este curso introductorio, movimiento de una nave espacial y de un avión bajo fuerzas de reacción, retroceso de un fusil al disparar el proyectil, explosión de una granada. Más detalladamente se considera el problema de la colisión o choque entre partículas, proceso de gran interés en física y que posiblemente constituya la aplicación más característica de la ley de conservación del momento lineal.

La conservación del momento lineal total de un sistema requiere que éste sea aislado, pero ¿existen realmente tales sistemas? Su observación es acertada. Estrictamente hablando, es difícil imaginar un sistema aislado, salvo quizá en un espacio intergaláctico. Sin embargo, aun cuando estas circunstancias ideales no se den en la realidad, siempre que el sistema objeto de estudio esté suficientemente alejado de otros como para suponer despreciable cualquier posible interacción, diremos que es aislado.

En otras ocasiones, las fuerzas de interacción desarrolladas en el interior del sistema pueden ser tan intensas frente a las fuerzas externas que el sistema podrá considerarse razonablemente aislado en lo que respecta a la conservación del momento lineal total. Esto es lo que ocurre en las colisiones. Señalaremos a este respecto que cuando consideramos cuerpos macroscópicos, la noción de colisión es bastante intuitiva.

En tal caso, diremos que dos o más cuerpos sufren una colisión o choque cuando después de haber experimentado un contacto material, las trayectorias seguidas son diferentes de las que hubieran descrito en caso de no haberse encontrado. Esta idea intuitiva no resulta ya tan evidente cuando los cuerpos susceptibles de sufrir una colisión son de dimensiones microscópicas como, por ejemplo, átomos, núcleos atómicos o partículas elementales. En estos casos, la colisión, más que un problemático contacto material, supone más bien una interacción a corta distancia, asociada a la existencia de fuerzas no siempre bien conocidas, fuerzas, por otro lado, muy intensas pero de muy corta duración, en conformidad con la ley fundamental de la dinámica y con el hecho de que la variación de velocidad del cuerpo o partícula colisionante es una cantidad finita.

En definitiva, podemos definir una colisión como un proceso de interacción con las siguientes características. Interacción a corta distancia, fuerzas de gran intensidad, tiempo de colisión muy pequeño. Si el sistema no es aislado, deberíamos considerar las fuerzas exteriores de modo que el momento lineal total no se conservará constante.

De todas formas, el hecho ya señalado de que en el muy pequeño intervalo de tiempo de existencia de la colisión, la fuerza que describe este proceso es muy intensa, hará posible el desprestigiar todas las posibles fuerzas exteriores actuantes sobre las partículas que chocan. Las leyes de conservación del momento lineal y de la energía aportan en muchos casos condiciones

suficientes para determinar el movimiento de las partículas tras la colisión. Conociendo los movimientos iniciales, sin necesidad de especificar la fuerza de colisión, que en general sólo se conocerá en forma aproximada.

Esto resulta particularmente adecuado en las colisiones o reacciones nucleares propias de la física cuántica, en donde la naturaleza de las fuerzas de interacción sólo se conoce a través de expresiones aproximadas de la energía potencial del sistema. ¿Podría indicarnos, profesor, qué problemas pueden aparecer en el estudio de las colisiones? Bien, en primer lugar, conviene señalar que en una colisión el número de partículas anteriores a la interacción no debe ser necesariamente igual al número de partículas posteriores a tal proceso, número que por lo menos será igual a uno. Asimismo, notemos que las masas de las nuevas partículas serán en general diferentes de las masas de las partículas iniciales, aun en el caso de que el número de esas partículas iniciales y finales fuera el mismo.

Esto es lo que ocurrirá generalmente en las colisiones o reacciones nucleares o también en las reacciones químicas. Por otra parte, ya se ha indicado previamente que cuando se trata del problema de colisiones entre átomos o partículas subatómicas, la noción de contacto no es tan clara como en el caso de que tales partículas fuesen cuerpos macroscópicos. Esto no quiere decir en absoluto que el análisis detallado de la colisión entre objetos de dimensiones macroscópicas sea un problema sencillo, sino todo lo contrario.

En general, el choque es un problema metamecánico, ya que exige conocer el comportamiento de cada cuerpo frente a fuerzas intensas y de corta duración, a saber, naturaleza de la deformación local producida, más o menos elástica, en el proceso de la colisión, con análisis de las perturbaciones originadas en las redes cristalinas de su estructura. Hemos señalado también que el estudio de las colisiones constituye un campo de aplicación importante de las leyes de conservación del momento lineal en general y de la energía cinética añadimos ahora cuando las colisiones son elásticas. En las colisiones llamadas perfectamente inelásticas se dispone de una condición vectorial extra, ya que después del choque los dos cuerpos permanecen unidos y por consiguiente moviéndose con la misma velocidad.

Observemos que en general las velocidades iniciales y finales de dos partículas que sufren una colisión no serán colineales ni siquiera coplanarias. En el caso de una colisión elástica unidimensional entre dos partículas, las leyes de conservación del momento lineal total y de la energía cinética total del sistema permiten la determinación de la velocidad final de cada partícula, conociendo las velocidades iniciales. Si las velocidades iniciales y finales son coplanarias, pero no colineales, el problema anterior no puede ser resuelto con nuestros conocimientos actuales.

Efectivamente, cada una de las dos velocidades finales necesita dos magnitudes para poder ser explicitadas, sus dos componentes en un sistema de referencia bidimensional o su módulo y el ángulo que forma su dirección con uno de los ejes del sistema. Así pues, debemos determinar cuatro incógnitas, pero disponemos tan sólo de tres relaciones correspondientes a la

conservación del momento lineal total, que suministra una relación vectorial o dos escalares, una para cada componente, y de la energía cinética total, que proporciona una sola relación escalar. Del mismo modo, cuando las velocidades después de la colisión no están contenidas en el mismo plano que en el que se encuentran las velocidades antes de la colisión elástica, debemos determinar seis incógnitas, tres para cada una de las dos velocidades finales, sus tres componentes en un sistema de referencia tridimensional o su módulo y dos ángulos.

Pero para resolver este problema se dispone únicamente de cuatro relaciones asociadas a la conservación del momento lineal, que da una relación vectorial equivalente a tres relaciones escalares, una para cada componente, y de la energía cinética total, que suministra siempre una única relación escalar. Naturalmente el problema se hace aún más complejo cuando hay más de dos partículas que colisionan. En este curso restringiremos, pues, el estudio de las colisiones al caso unidimensional, que es el que ofrece una menor dificultad.

Finalmente, una cuestión en la que el estudiante debe fijar su atención es que tanto en el caso de las colisiones elásticas, en las que la energía cinética total se conserva constante, como en el caso de las colisiones plásticas o inelásticas, en las que hay una pérdida de energía cinética en forma de calor, el momento lineal total del sistema permanece constante antes, durante y después de la colisión, siempre y cuando las fuerzas externas sean nulas. Si no lo son, sí al menos podrán considerarse despreciables durante la colisión, por lo que el momento lineal total será así constante en el intervalo de tiempo que marca la duración de dicho proceso. Acaban ustedes de escuchar introducción al curso de Ciencias Físico-Naturales, tema décimo, conservación del momento lineal, por el profesor don Antonio Rueda de Andrés.

Nos despedimos de ustedes hasta mañana miércoles, a esta misma hora, en que podrán escuchar Lengua Española, el adverbio, por el profesor don Teodiselo Chacón, e introducción al curso universitario de Derecho, por el profesor don Rafael Gibert y Sánchez de la Vega. El tercer programa de Radio Nacional de España les ha ofrecido Universidad Nacional de Educación a Distancia, en su emisión diaria Universidad para Todos, un universitario preparado por su claustro de profesores y adaptado y presentado radiofónicamente por el tercer programa de Radio Nacional de España.