AC 14 23

Facultad de Ciencias, Curso de Introducción a las Ciencias Físico-Naturales Novena Emisión Radiofónica, Sistemas Disipativos Doctor Antonio Rueda de Andrés Como habrán observado hasta ahora, los sistemas físicos objeto de estudio han sido la partícula y el cuerpo rígido, sistema este, cuyo movimiento traslacional puede asimilarse al de una partícula en virtud del vínculo de rigidez y a pesar de que el número de partículas constitutivas, átomos o moléculas será enormemente grande, del orden de magnitud del número de abogadro. Por otro lado, queremos recordar una vez más que la noción de partícula tal como se entiende en mecánica clásica, es decir, como un punto material, constituye una idealización de sistemas físicos, bien porque su tamaño sea muy pequeño al nivel de la observación macroscópica, tal es el caso, por ejemplo, de las partículas elementales, de los átomos o de las moléculas, o bien porque sus dimensiones geométricas, aun siendo considerables, resulten pequeñas con respecto a las distancias que separan dichos sistemas. En ciertos casos, pues, un astro, un sistema estelar o incluso una galaxia podrán considerarse como partículas.

En cualquier caso, hemos estudiado hasta el presente el movimiento de un sistema reducible a un punto material, y en este sentido se han definido la energía cinética de una partícula móvil y la energía potencial de una partícula situada en un campo de fuerzas, es decir, en interacción con otra u otras partículas. Conviene notar a este respecto que, como ya sabemos, la energía potencial es una magnitud que caracteriza una interacción conservativa, mecanismo o proceso que requiere la existencia de al menos dos partículas, de manera que la energía potencial es una energía no tanto de una partícula en concreto como del sistema global formado por las partículas interactuantes. Sin embargo, reiteradamente, hemos aludido a la energía potencial de una partícula.

Bien, evidentemente, quiere esto decir, no que la partícula se encuentre aislada del resto del universo, en cuyo caso no tendría sentido alguno hablar de energía potencial, sino que por las circunstancias propias de cada caso resultaba conveniente analizar la evolución dinámica de dicha partícula por separado, ignorando a las demás y reemplazándolas en consecuencia por el formalismo del campo de fuerzas. No debemos olvidar, sin embargo, que el número de partículas, átomos o moléculas integrantes de un cuerpo de dimensiones macroscópicas es enorme, y que el vínculo de rigidez no deja de ser sino una idealización de la realidad física aplicable, por supuesto, sólo a los sólidos. No obstante, los cuerpos sólidos estarán formados por átomos o moléculas localizados con arreglo a una determinada simetría en los nudos de la red cristalina, pero esta disposición no es en absoluto estática, sino que las mencionadas partículas describirán oscilaciones de pequeña amplitud en torno a las posiciones de equilibrio correspondientes a los nudos de la red.

En cuanto a las moléculas de un líquido de un gas, resulta evidente que el vínculo de rigidez será a todas luces inaplicable. En estos casos, si bien las moléculas están sometidas a interacciones mutuas, sus movimientos tendrán una componente aleatoria, de índole térmica,

de manera que las velocidades moleculares obedecerán a cierta ley probabilística de distribución. Esto se hace aún más evidente en el caso de un gas ideal, al admitir que las moléculas sólo interactúan durante la brevísima facción de tiempo en que colisionan, moviéndose el resto del tiempo como partículas libres.

De esta forma, vemos que al estudiar el movimiento de un sistema de partículas, se impone una distinción entre los movimientos internos de las partículas y el movimiento macroscópico del sistema como un todo. Por movimientos internos, entenderemos los que apreciaría un observador que se desplazase juntamente con el macrosistema, a la misma velocidad que éste. El movimiento macroscópico sería el observado desde un sistema de referencia exterior.

Ilustraremos esta cuestión con un ejemplo. Supongamos que nuestro sistema de partículas en movimiento es una corriente de aire. Un observador ante el que pasa detecta un movimiento macroscópico unidireccional del aire en conjunto, con una cierta velocidad.

Por el contrario, para un observador que pudiese desplazarse juntamente con la masa de aire, tal velocidad sería nula, pero no por eso dejaría de notar ciertos movimientos de naturaleza térmica de las moléculas de aire. Estos serían, en el presente ejemplo, los movimientos internos a los que hemos aludido con anterioridad. No es nuestra intención desarrollar exhaustivamente en este curso introductorio el formalismo de la dinámica de un sistema de partículas.

Esta será tarea de un curso posterior. No obstante, a fin de lograr una completa comprensión de los conceptos contenidos en este tema, será provechoso generalizar al caso de un sistema de partículas algunas de las cuestiones que ya han sido tratadas en el estudio de la dinámica de la partícula. Empecemos por decir que, por definición, la energía cinética de un sistema de partículas viene dada por la suma de las energías cinéticas individuales de cada partícula.

Como es sabido, la energía cinética de una partícula será diferente según se calcule en un sistema de referencia o en otro, ya que la velocidad será evidentemente diferente en los distintos sistemas de referencia. De esta forma, también la energía cinética de un sistema de partículas tomará distintos valores según cuál sea el sistema de referencia con respecto al cual sean medidas las velocidades de las partículas constitutivas del sistema. La energía cinética asociada a los movimientos internos, a que antes hemos hecho alusión, recibe el nombre de energía cinética interna.

De acuerdo con la idea ya expuesta de que el movimiento de un sistema de partículas puede verse como la superposición de los movimientos internos de las partículas y del movimiento del macrosistema como un todo, resulta razonable pensar que la energía cinética del sistema pueda expresarse como suma de dos términos. Uno, la energía cinética interna, y otro, asociado al movimiento conjunto del sistema, que puede demostrarse correspondería a la energía cinética de una partícula de masa igual a la total del sistema con un momento lineal igual a la suma de los momentos lineales de cada partícula. Suma vectorial, por supuesto, al tratarse los momentos de magnitudes vectoriales.

Así pues, dado un sistema de partículas, el menor valor posible de su energía cinética corresponde a la energía cinética interna al anularse el término que describe el movimiento macroscópico del sistema mediante una adecuada elección del sistema de referencia. Deberemos observar ahora que tanto si el sistema de partículas objeto de estudio es aislado como si interactúa con otros, las partículas que lo constituyen interactuarán en general entre sí por lo que los movimientos internos no tendrán la apariencia de movimientos libres. Dichas interacciones, en caso de que las fuerzas implicadas sean conservativas, podrán caracterizarse por medio de las correspondientes energías potenciales.

De esta forma, definimos la energía potencial interna de un sistema de partículas como la suma de las energías potenciales de interacción para todos los pares de partículas del sistema. En el supuesto, claro está de que las fuerzas de interacción sean conservativas. Puesto que la energía potencial que define la interacción entre dos partículas depende sólo de la distancia de separación entre ellas, tomará el mismo valor en todos los posibles sistemas de referencia.

Así, otro tanto ocurrirá con la energía potencial interna que, como hemos dicho, viene dada por la suma de las energías potenciales de interacción entre cada par de partículas del sistema. Recapitulando sobre todo lo que hoy hemos venido exponiendo, es probable que ustedes se pregunten cuál es la razón de haber definido las energías cinética y potencial internas de un sistema de partículas. El motivo fundamental de haber procedido así es que las definiciones anteriores nos permiten definir nuevamente una magnitud que permanece constante en el tiempo siempre que el sistema sea aislado.

Tal magnitud se denomina energía interna del sistema de partículas, definiéndose como suma de sus energías cinética y potencial internas. La energía interna es quizá la magnitud que define con mayor detalle el estado de un sistema de muchas partículas, un gas molecular por ejemplo, pero no es directamente accesible a la medición, por lo que habrá de introducirse una nueva magnitud que desde un punto de vista fenomenológico describa el estado del sistema y que pueda ser medida. Esta magnitud es la temperatura.

No podemos entrar ahora en cómo es definida la temperatura de un sistema, pero basta el hecho de su íntima relación con la energía interna para considerar la estrecha conexión existente entre los fenómenos térmicos y los mecánicos. Recordemos a este respecto que cuando tratamos el problema del movimiento de un sistema físico constituido por un conjunto de partículas, habremos de distinguir entre el movimiento del macrosistema y los movimientos internos de las partículas que lo forman. Este sería por ejemplo el caso de nuestro sistema solar, el cual describe en conjunto movimientos relativos a otros sistemas solares de la galaxia que se superponen a los movimientos internos de los planetas con relación al Sol y de los satélites con relación a los planetas.

Otro tanto que habría de decir de un gas molecular que se desplaza de una región a otra del espacio, en cuyo caso, además del movimiento macroscópico conjunto, las moléculas correspondientes describen movimientos microscópicos de naturaleza térmica. Sin embargo,

en el primer ejemplo, los movimientos internos de las partículas, planetas, satélites, son ordenados, obedeciendo a la ley de gravitación, mientras que en el segundo, los movimientos internos de las partículas, las moléculas del gas, tienen un carácter aleatorio, asociado a las colisiones estocásticas de dichas partículas. La energía interna correspondiente a estos movimientos desordenados internos recibe el nombre de energía térmica, y su valor denota el grado de agitación térmica de las moléculas del gas.

A una mayor agitación térmica, a una mayor energía térmica, corresponde una mayor temperatura, y viceversa. En el caso de un gas ideal, su energía interna es únicamente cinética, puesto que el modelo que describe tal gas reposa en la hipótesis de suponer que las moléculas se mueven como partículas libres durante la mayor parte del tiempo, variando sus respectivas energías cinéticas como consecuencia tan solo de las colisiones que puedan sufrir entre ellas, procesos que serán de muy corta duración. Recordaremos ahora que al finalizar la emisión anterior, ya nos referimos entonces a la eventualidad de que sobre una partícula o un cuerpo dados actuasen, además de fuerzas conservativas, otras no conservativas o disipativas.

Sin embargo, hemos creído que sería útil comenzar hoy exponiendo las ideas generales anteriores, con objeto de poder comprender exactamente los conceptos contenidos en el presente tema. Bien, empecemos considerando una partícula moviéndose bajo la acción simultánea de fuerzas conservativas y no conservativas. En tal caso, el trabajo total realizado por estas fuerzas puede escribirse como suma del trabajo efectuado por las fuerzas conservativas más el trabajo realizado por las fuerzas no conservativas.

Puesto que el teorema del trabajo y de la energía cinética se aplica tanto a fuerzas conservativas como no conservativas, y en cambio el teorema del trabajo y de la energía potencial sólo se aplica a las fuerzas conservativas, y recordando la definición de energía mecánica de una partícula, encontramos que el trabajo realizado por las fuerzas no conservativas durante el movimiento de la partícula corresponde precisamente a la variación de su energía mecánica. Es decir, a la diferencia de la energía mecánica final menos la inicial. Por consiguiente, cuando sobre una partícula actúa alguna fuerza no conservativa, su energía mecánica ya no es una constante del movimiento, es decir, no se mantiene constante en el tiempo, sino que su variación es igual al trabajo realizado por las fuerzas no conservativas.

Por ejemplo, si la fuerza no conservativa es una fuerza de fricción que se opone al movimiento de la partícula, el trabajo realizado por tal fuerza es negativo, por lo que la energía mecánica disminuye, decreciendo pues también la energía cinética. En tal caso ha tenido lugar un proceso de degradación o disipación de energía mecánica. Es decir, la energía mecánica de la partícula o parte de ella se ha convertido en una forma degradada de energía que llamamos calor, de manera que la pérdida de energía mecánica por parte de la partícula se traduce en un aumento de las energías mecánicas asociadas a los movimientos desordenados de las partículas constitutivas del medio en el que se desplazaba la primera partícula, resultando pues que la temperatura de dicho medio experimentará a sí mismo un aumento.

Este calor corresponde precisamente al trabajo, cambiado de signo, realizado por las fuerzas disipativas. Hay que llamar la atención sobre el hecho de que la noción de calor, al igual que ocurre con el trabajo, tiene un sentido dinámico, como trasvase de energía, como energía en tránsito. Por ello, el calor no define el estado de un sistema, siendo la energía interna la magnitud que lo especifica.

Sólo tiene sentido, pues, hablar de calor en tanto se desarrollan los procesos disipativos, dejando de tener después significado físico alguno. Observemos, por otra parte, que si nos hemos referido inicialmente a una partícula, ha sido en aras de una mayor simplicidad en los razonamientos que han conducido al resultado de que la energía mecánica de un móvil no se conserva cuando actúan fuerzas disipativas sobre aquel. No debemos olvidar, además, que la noción de partícula, tal como se entiende la mecánica clásica, supone una abstracción de la realidad, útil en ciertos casos, pero que en otros puede enmascarar aspectos relevantes de los sistemas físicos y de los procesos que tienen lugar en ellos.

En última instancia, sólo las partículas elementales de la física moderna podrían considerarse como indivisibles, aunque no sabemos realmente si quizá presentan una estructura interna. De todas formas, la asimilación a un punto de un cuerpo de dimensiones tanto macroscópicas como microscópicas sólo puede hacerse en un marco meramente matemático cuando procede a tal abstracción, pero, desde luego, esta simplificación no corresponderá a la realidad física. Por otro lado, cuando hablamos de una partícula única, no tiene ningún sentido, por supuesto, establecer distinción alguna entre movimiento macro o microscópico.

Ciertamente, la discusión anterior referente a la disipación de la energía mecánica de una partícula no sólo es generalizable a un sistema de partículas, sino que es aquí donde este fenómeno puede interpretarse fielmente de acuerdo con la realidad física. Tales sistemas de partículas podrán ser, por ejemplo, un péndulo oscilando en un medio viscoso, un cuerpo que desliza sobre una superficie rugosa, un gas que es obligado a atravesar un orificio estrecho, etc. En definitiva, tendremos que, en cualquier caso, la disipación, bajo fuerzas de fricción, de la energía cinética o potencial asociadas al movimiento ordenado y conjunto del sistema como un todo se traduce en un aumento de la energía interna del sistema, es decir, en un aumento de las energías cinéticas de los movimientos más o menos desordenados de las partículas que forman el sistema.

En este sentido, podemos decir que, en realidad, no ha habido pérdida de energía mecánica, sino una conversión de la energía macroscópica ordenada en energía microscópica desordenada, distribuyéndose entre las distintas partículas del sistema. Podemos, pues, anunciar la ley de conservación de la energía total, diciendo que, cualquiera que sea su forma, la energía del sistema en consideración y de los sistemas exteriores con los que interactúa permanece constante en el tiempo.