

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS  
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

---

DISCURSO INAUGURAL  
DEL AÑO ACADÉMICO 1979-1980

LEIDO EN LA SESION CELEBRADA EL DIA 31 DE OCTUBRE DE 1979

POR EL ACADÉMICO NUMERARIO

EXCMO. SR. D. CARLOS SANCHEZ DEL RIO



M A D R I D  
DOMICILIO DE LA ACADEMIA  
VALVERDE, 22.—TELEFONO 221-25-29  
1 9 7 9

ISBN: 84.600-1519-X

Depósito Legal: M. 82.917-1979

---

TALLERES GRÁFICOS VDA. DE C. BERMEJO - J. GARCÍA MORATO, 122 - MADRID

**SOBRE EL CONCEPTO DE ENERGIA**

Excmo. Sr. Presidente,  
Excmos. Sres. Académicos,  
Señoras y Señores :

La historia de la cultura nos muestra que a lo largo de los tiempos van apareciendo nuevos conceptos, muchos de los cuales llegan a ser asimilados por la población entera debido a su singular importancia. Un ejemplo relativamente reciente, es el concepto de energía en el sentido técnico que ahora damos a este vocablo. La palabra energía es hoy de uso permanente a los más variados niveles. Los medios de comunicación nos informan de la escasez futura de energía y de su posible impacto en nuestra sociedad industrializada. Los científicos y los técnicos dedican intensos esfuerzos a desarrollar nuevas fuentes de energía. Los políticos se afanan en preparar planes energéticos para los años venideros. El suministro futuro de energía es un problema social y económico de la mayor trascendencia.

La palabra energía aparece también en otros muchos contextos de la vida corriente. Los médicos, por ejemplo, prescriben dietas de bajo contenido energético a quienes precisan adelgazar. Por el contrario se recomiendan alimentos con mucha energía a los niños y adolescentes.

Dentro de la comunidad científica el concepto de energía es de uso cotidiano. Los físicos hablan continuamente de energía cinética, de energía potencial, de niveles y bandas de energía y de tantos otros conceptos derivados de la energía. No se concibe la química sin mencionar la energía de reacción, la energía de activación, la energía libre y docenas de expresiones relacionadas. Los biólogos consideran que la base de la vida está en la captación

de energía solar por las plantas verdes mediante el proceso fotosintético. Y nos explican cómo se acumula energía en las células en forma de trifosfato de adenosina.

Vemos, pues, que la energía es hoy un concepto ubíquo. Y es interesante señalar que la palabra energía en el sentido técnico y cuantitativo que ahora le damos es de uso relativamente reciente, puesto que fue introducida en 1855 por el ingeniero escocés W. G. M. Rankine. Conviene precisar que en un sentido más restringido que el actual, la palabra energía fue ya empleada por Kepler en 1618, pero cayó en desuso durante más de dos siglos a causa del prestigio de Leibniz que llamó «vis viva» (fuerza viva), al doble de lo que Kepler había denominado energía. En todo caso, ni Kepler ni Leibniz conocieron en toda su generalidad lo que hoy entendemos por energía. El concepto moderno de energía (aunque no la palabra), fue establecido en 1842 por Julius Robert Mayer, un médico alemán de Heilbronn. Llamando «fuerza» a lo que hoy denominamos energía, distinguió cinco formas de la misma: 1) de la posición, 2) del movimiento, 3) del calor, 4) eléctrica y 5) química. Y fruto de sus observaciones y reflexiones fue el sensacional descubrimiento que expresó de este modo: «No hay en realidad más que una sola y única fuerza. En cambios eternos circula a través de la naturaleza muerta y viva». Con esta frase resumió el principio de la conservación de la energía. Como Mayer vivía fuera del ambiente científico su descubrimiento genial no fue apreciado por sus contemporáneos, lo que le sumió en amargura depresiva hasta su muerte.

A pesar del tiempo transcurrido y del uso casi cotidiano de la palabra energía, pocas personas (incluso entre las que se consideran cultas) tienen idea clara de lo que significa. Y es natural porque se trata de un concepto difícil y susceptible de muchos grados de abstracción. Incluso mucho ingenieros y científicos serían incapaces de definir la energía con precisión. Considerando el cuerpo social en general puede afirmarse que la idea de energía es múltiple y poco definida. Parafraseando a los escolásticos podría concluirse que la energía se dice de muchas maneras.

Por estos motivos, me ha parecido oportuno dedicar esta diser-

tación a analizar el concepto de energía. Y me propongo llevar a cabo este análisis empezando con el lenguaje que entiende el hombre común, para continuar después en diversas etapas hasta llegar a una visión necesariamente abstracta de lo que implica la idea de energía.

#### CONSIDERACIONES ETIMOLÓGICAS Y SEMÁNTICAS

La palabra energía no es un neologismo inventado en el siglo XIX. Es un vocablo de larga tradición cuyo significado habitual está íntimamente relacionado con el concepto científico de energía. Por eso una idea imperfecta de energía es asequible a todo el mundo, cosa que no sucede, por ejemplo, con el concepto de entropía que no tiene analogía en el lenguaje corriente. Parece pertinente, por lo tanto, empezar nuestro análisis considerando el origen etimológico y el contenido lingüístico de la palabra energía.

La palabra energía (y su equivalente en otros idiomas modernos, energy, énergie, Energie) procede del latín *energía* que es a su vez esencialmente una palabra griega, *energeia* (*ενεργεία*) compuesta por el prefijo *en* (que significa en) y la raíz *ergon* (que quiere decir acción o trabajo). Este origen se refleja en el significado de energía tanto en el lenguaje vulgar como en el científico.

Para conocer el significado actual de un vocablo procede recurrir a los diccionarios. Normalmente aparecen en ellos diversas acepciones desde las más comunes a las netamente especializadas. Empecemos por lo que se nos presenta como primera acepción que debe ser la más vulgar.

El diccionario de la Lengua Española (publicado por la Real Academia Española), define la energía como : eficacia, poder, virtud para obrar. El diccionario de Oxford da como primera acepción : force, vigour, active operation, (latent) ability. Más afortunada es la explicación del diccionario de Webster : the capacity of acting or being active. Sorprendentemente el diccionario de Larousse presenta en primer lugar una definición de tipo científico : *qualité d'un corps susceptible de fournir un travail*. Cuando se

busca la palabra trabajo aparece descrita como producto de fuerza por camino de acuerdo con el concepto de trabajo mecánico definido en 1824 por J. V. Poncelet y G. G. Coriolis ; definición correcta, pero que no entiende nadie que no haya estudiado física. Concluimos que nuestro diccionario y el de Webster son probablemente los más acertados al definir la energía como poder o capacidad para obrar o actuar.

Se encuentran también en los diccionarios otras acepciones de la palabra energía entre las cuales figura la definición técnica que nos interesa. En el diccionario de la Lengua Española, energía quiere decir también : causa capaz de transformarse en trabajo mecánico. La definición correspondiente del diccionario de Webster (the capacity for doing work) es menos criticable, porque evita la palabra causa de muy difícil definición en el dominio de las ciencias de la naturaleza. Si a continuación de las anteriores definiciones se trata de averiguar lo que científicamente significa trabajo, nos encontramos con que la explicación del diccionario de la Lengua Española es correcta como la del diccionario de Larousse, pero igualmente incomprensible. La definición del diccionario de Webster es todavía peor (the transference of energy that is produced by the motion of the point of application of a force), porque hace intervenir al concepto de energía que es el que buscábamos en primer lugar.

El término fuerza que es preciso para la definición de trabajo, se describe en los diversos diccionarios con mayor o menor fortuna, aunque frecuentemente de modo aceptable en el sentido de que la fuerza provoca una modificación del estado de movimiento o reposo de un cuerpo. En ciertas definiciones, sin embargo, la explicación es ambigua y podría confundirse con la de la energía a pesar de haber pasado más de 120 años desde que quedaron diferenciados los conceptos de fuerza y energía.

Como vemos, la dificultad de definiciones precisas y correctas es insuperable dentro del espíritu de lo que debe ser un diccionario. Únicamente la descripción de vocablos en su significación más usual ilumina sobre su contenido. Cuando se trata de precisar técnicamente es imposible presentar definiciones que sean a la

vez correctas y comprensibles. Y ello porque los conceptos exactos y precisos no pueden resumirse en unas líneas ; hacen falta largos períodos de estudio para asimilar el contenido de muchos conceptos. Pero sin necesidad de tan laborioso esfuerzo pueden describirse adecuadamente si se acepta una explicación menos concisa que la que requiere una definición formal. Veamos cómo.

#### LA ENERGÍA EN FÍSICA CLÁSICA ELEMENTAL

Quienquiera que haya seguido con provecho un curso de física elemental podrá tener la tentación de sentirse satisfecho y en cierto modo superior, porque cree poseer un concepto claro y no problemático de lo que es la energía. En sus estudios de mecánica ha aprendido lo que es la energía cinética (la mitad del producto de la masa de un móvil por el cuadrado de su velocidad), la energía potencial (función de posición cuyo gradiente cambiado de signo es la fuerza) y la constancia de la suma de ambas en sistemas mecánicos conservativos. Esta suma de expresiones matemáticas es la magnitud física que se denomina energía de un cuerpo que se mueve en un campo de fuerzas conservativo. En la práctica tal sistema es frecuentemente una abstracción, porque existen rozamientos, pero la termodinámica muestra que estos rozamientos dan lugar a la producción de calor que es otra forma de energía que si se tiene en cuenta permite seguir aceptando el principio de la conservación de la energía. Ciertamente que esta energía calorífica no puede volverse a transformar íntegramente en trabajo mecánico, por lo que se suele decir que esta forma de energía es menos noble ; el segundo principio de la termodinámica da cumplida explicación de este comportamiento del calor y en nada altera el concepto de energía que puede pasar de unos cuerpos a otros, manteniéndose constante la energía total de un sistema aislado del exterior. Si se producen reacciones químicas en el sistema la cosa se complica, pero admitiendo que por algún mecanismo (que la física clásica no explica) tales reacciones pueden desprender o absorber calor, se restablece el equilibrio perdido añadiendo una nueva forma de energía que es la energía química.



Si en los sistemas que estamos considerando se añaden circuitos eléctricos nos encontramos con otra forma de energía (la energía eléctrica). Cuando las corrientes eléctricas son estacionarias o lentamente variables, la cantidad de energía que se acumula en los conductores es muy pequeña y el papel fundamental de estos es la transmisión de energía entre los generadores de corriente eléctrica (que la producen a partir de energía química o mecánica) y otros subsistemas que desprenden calor, generan trabajo mecánico o dan lugar a reacciones químicas. En el conjunto del sistema sigue conservándose la energía total si se incluye la pequeña cantidad de energía eléctrica acumulada en los conductores. En el caso de corrientes eléctricas que varíen muy rápidamente se produce un fenómeno más complejo, porque la energía total del sistema deja de conservarse aparentemente; una parte se convierte en radiación electromagnética que escapa a la velocidad de la luz. De hecho la luz es una radiación electromagnética constituida por ondas de una frecuencia adecuada para estimular nuestro sentido de la vista. La radiación electromagnética puede ser absorbida por otro sistema distinto del que la emitió, pero no deja de ser sorprendente que entre ambos actos se propague por el espacio vacío sin soporte material alguno. La teoría, sin embargo, proporciona fórmulas que permiten calcular la densidad de energía en cada punto del espacio. Teniendo en cuenta esta energía de tránsito puede comprobarse que en el conjunto de dos sistemas que intercambian energía radiante, también se cumple el principio de la conservación de la energía.

La energía nuclear es más reciente que las anteriormente mencionadas y sólo ha sido posible por el conocimiento de la estructura de la materia que es posterior a la física clásica. Desde un punto de vista macroscópico, sin embargo, las reacciones nucleares masivas producen calor, del mismo modo que las reacciones químicas exotérmicas y en este sentido la energía nuclear puede incorporarse al esquema clásico sin ninguna alteración conceptual.

Vemos, por tanto, que nuestro hipotético estudiante de un curso de física tiene una idea satisfactoria de lo que es la energía siempre que no tenga sentido crítico. En estas circunstancias se

dará por satisfecho con saber que hay una cualidad de los cuerpos y del vacío llamada energía, que puede medirse y calcularse con diversas recetas según la clase de energía de que se trate y cuyo total para un conjunto de sistemas separados del resto del universo es invariable. Las diversas formas de energía se pueden transformar unas en otras, pero la cantidad total es constante.

Un estudiante crítico, sin embargo, no dejará de plantearse varias e importantes preguntas. En primer lugar, ¿hasta qué punto las fórmulas aprendidas son algo más que un método expeditivo de calcular cuantitativamente las diversas clases de energía que en realidad forman un todo muy poco intuitivo? En segundo lugar, y esto es más grave, a lo largo del curso nuestro estudiante ha aprendido que existen otras muchas magnitudes físicas como la cantidad de movimiento, el momento angular, la carga eléctrica, etc., que también se conservan en sistemas aislados. Y de haber seguido un curso de física moderna hubiese descubierto muchas más magnitudes que se conservan en su totalidad, pero que pueden pasar de unos cuerpos a otros al igual que la energía. Y surge la pregunta ¿por qué la singularidad de la energía frente a otras magnitudes físicas? O dicho de forma más llana, ¿por qué la energía se vende y se compra y las otras magnitudes físicas no? Desde luego, esta pregunta tiene una respuesta simple. La energía puede transformarse en calor para que no pasemos frío y en luz para iluminarnos y en trabajo mecánico para levantar peso o realizar otras tareas que la gente desea que se hagan sin fatiga personal. Esta respuesta es desde luego, plenamente satisfactoria para los hombres prácticos. Pero para quienes poseen mentalidad teórica no lo es. En todo caso, queda otra cuestión. ¿Por qué la energía y otras magnitudes físicas se conservan en sistemas o conjuntos de sistemas aislados? Además, ¿qué distingue a la energía de otras magnitudes físicas, desde un punto de vista teórico? A dilucidar estas cuestiones vamos a dedicar el resto de esta disertación. Los hombres prácticos pueden abandonar aquí

## TRANSFORMACIONES DE SIMETRÍA Y TEOREMAS DE CONSERVACIÓN

Con objeto de continuar nuestro análisis, vamos a limitarnos a la energía mecánica; muchas otras formas de energía, como la radiación electromagnética, pueden describirse con ecuaciones formalmente análogas por lo que los resultados que aquí se mencionan son de una gran generalidad.

Las consideraciones que siguen se basan en las propiedades de las ecuaciones dinámicas de los sistemas mecánicos y resulta por ello conveniente expresarlas de la forma más general posible. Toda la dinámica se basa en última instancia en las leyes de Newton y en especial en la que expresa que el movimiento de un punto material ocurre de modo que en cada instante el producto de su masa por su aceleración es igual a la fuerza que sobre aquél actúe; frecuentemente la fuerza puede derivarse de una energía potencial.

Para sistemas mecánicos complicados referidos a coordenadas cualesquiera pueden sintetizarse las leyes de la dinámica en una forma muy general que es la más conveniente para proseguir nuestro argumento. Puede definirse la llamada función de Lagrange (función del tiempo, todas las coordenadas que hagan falta y las derivadas de éstas, respecto de aquél) como diferencia entre las expresiones de la energía cinética y potencial. A partir de esta función puede determinarse la trayectoria entre una posición inicial y otra final que —como puede demostrarse— será aquella que haga mínima (o más precisamente que sea un extremal) la integral temporal de la función de Lagrange entre ambas posiciones.

Esta formulación de la dinámica se conoce como principio de Hamilton y es un importante ejemplo de los muchos principios de mínimo que se usan para describir de manera concisa, el comportamiento de la naturaleza. La posibilidad de describir la naturaleza mediante principios integrales como el de Hamilton es justamente una de las razones para obviar el uso de la palabra causa en la física que sólo sería admisible si se aceptasen las causas finales en el sentido aristotélico. Prefiero no extenderme más en este aspecto epistemológico que nos alejaría de la discusión principal.

En todo caso, y prescindiendo de interpretaciones filosóficas, las condiciones integrales que implica el principio de Hamilton son equivalentes —como se muestra mediante el cálculo de variaciones— a las ecuaciones diferenciales de Lagrange que son la base de la dinámica analítica.

Sucede, sin embargo, que así como las ecuaciones de movimiento de un sistema mecánico vienen determinadas por la función de Lagrange del sistema, la recíproca no es cierta. Existe una ambigüedad en la función de Lagrange en el sentido de que si se añade a ésta la derivada, con respecto al tiempo, de cualquier función de éste y las coordenadas, las ecuaciones del movimiento permanecen en la misma forma (técnicamente se dice que son invariantes de forma). Esta observación tiene un significado profundo si se estudian las variaciones de la función de Lagrange, debidas a determinados cambios espacio-temporales.

Entre estos cambios merecen especial atención las transformaciones de las coordenadas espacio-temporales que mantienen la forma de las ecuaciones de movimiento (invariancia de forma o covariancia). Vale la pena mencionar que todas las transformaciones de simetría forman un grupo.

Pueden considerarse, en particular, las transformaciones infinitesimales de las coordenadas espaciales y del tiempo. En este caso, la condición para que la nueva función de Lagrange conduzca a las mismas ecuaciones de movimiento (condición para que la transformación sea de simetría), puede expresarse de forma que la derivada total de cierta expresión sea nula, o dicho de otro modo que dicha expresión no varíe con el tiempo. Esto implica que cada condición de invariancia de una transformación de simetría implica un teorema de conservación. En otras palabras, para cada transformación de coordenadas espacio-temporales que no alteren las ecuaciones dinámicas que describen el movimiento de un sistema, habrá una magnitud física que será constante para el sistema aislado.

La aplicación de esta conclusión a los sistemas mecánicos cuyas ecuaciones de movimiento son invariantes de forma para ciertas transformaciones obvias, conduce a interesantes resultados. La

homogeneidad del espacio es propiedad, no contradicha hasta hoy, que significa simplemente que las leyes físicas deben ser las mismas aquí o en otro lugar. De esta invariancia se deduce que la magnitud cantidad de movimiento debe ser constante. También parece estar firmemente establecida la homogeneidad del tiempo, que debe manifestarse en el hecho de que las leyes físicas sean ayer igual que hoy e igual que mañana. Consecuencia de esta invariancia es la conservación de la energía. Otra propiedad contra la cual no existe prueba experimental es la invariancia de las leyes físicas si se giran los sistemas de referencia del espacio, lo que dicho de otro modo puede expresarse como isotropía del espacio. De esta propiedad se deduce que el momento angular de un sistema aislado también debe ser constante.

De todas estas conclusiones podemos deducir una consecuencia sumamente interesante. La existencia de la energía como magnitud física que se conserva en los sistemas aislados está íntimamente relacionada con la permanencia en el tiempo del comportamiento de la naturaleza. Para profundizar en esta relación conviene mencionar todavía algunos hechos, dentro del mundo macroscópico.

Además de las transformaciones de simetría que aparecen dentro de los subgrupos puramente espaciales o temporales ya referidos, existe una transformación espacio-temporal muy importante que es la que relaciona las coordenadas de un móvil en dos sistemas inerciales que se mueven uno respecto del otro con velocidad constante. Dentro del marco de la mecánica clásica es fácil ver que estas transformaciones de coordenadas (llamadas actualmente de Galileo) son transformaciones de simetría, porque dejan en la misma forma las ecuaciones de la dinámica; por eso es imposible distinguir el reposo del movimiento, entre sistemas inerciales, por medios mecánicos. La consecuencia de esta transformación de simetría espacio-temporal es la constancia del movimiento del centro de masas de un conjunto de cuerpos en interacción.

Cuando en un sistema mecánico ocurren velocidades muy elevadas (es decir no despreciables frente a la velocidad de la luz en el vacío) es preciso modificar la mecánica clásica en el sentido que

indica la teoría especial de la relatividad (Einstein, 1905). Es interesante un breve comentario sobre este tema, porque arroja nueva luz sobre la relación de la energía con el tiempo. Según la teoría de la relatividad especial, es imposible la determinación del reposo absoluto, tanto mediante experimentos mecánicos como electromagnéticos. El cambio de coordenadas de un móvil entre dos sistemas inerciales no se efectúa por las transformaciones de Galileo, sino por las de Lorentz, que implican también un cambio en la variable tiempo. Resulta conveniente utilizar un lenguaje vectorial en un espacio de cuatro dimensiones (espacio-tiempo) —el espacio de Minkowski— con una métrica especial; en este espacio se define como vector (cuadrivector), todo objeto matemático de cuatro componentes tales que al pasar de un sistema de referencia a otro, que se mueva con respecto a él con velocidad constante, se transformen como las coordenadas tiempo y espacio, es decir, de acuerdo con las transformaciones de Lorentz para estas cuatro variables.

A partir de esta definición de cuadrivector en el espacio Minkowski es posible construir varios vectores cuya significación física se identifica fácilmente pasando al límite de la mecánica no relativista, es decir al caso en que las velocidades de los cuerpos son muy pequeñas frente a la velocidad de la luz en el vacío. Entre estos cuadrivectores es particularmente destacable el vector energía —cantidad de movimiento que se transforma al pasar de un sistema de coordenadas a otro, de modo que la energía lo hace como el tiempo y las tres componentes de la cantidad de movimiento como las respectivas coordenadas espaciales. La energía, definida así como la componente de carácter temporal de un cuadrivector, difiere de la energía cinética ordinaria en un término aditivo que es la energía en reposo de un cuerpo; el famoso término  $mc^2$  bien comprobado en física nuclear. La invarianza del cuadrado del cuadrivector de energía-cantidad de movimiento da lugar a la relación relativista entre ambas magnitudes tan comprobada experimentalmente, que es necesaria para fines técnicos tan prácticos como es el cálculo de las trayectorias de los electrones en un tubo de televisión. Otras muchas consecuencias del esquema relati-

vista esbozado aquí concisamente, han sido comprobadas hasta la saciedad.

Vemos, pues, que dentro de la teoría de la relatividad especial, cuya certeza experimental no ofrece dudas, se establece una conexión formal de la energía con el tiempo que confirma, dentro de un marco muy general, la relación que ya hemos visto como consecuencia del estudio de las transformaciones de simetría en la dinámica clásica. Analicemos a continuación como se presenta el problema dentro de la mecánica cuántica.

### LA ENERGÍA EN FÍSICA CUÁNTICA

Uno de los desafíos más importantes al ingenio de los físicos del final del siglo XIX fue la teoría de la distribución espectral de la radiación que emite el cuerpo negro a una determinada temperatura. El cuerpo negro es un ente ideal como tantos otros que se usan en física (punto material, gas perfecto, etc), pero que puede materializarse bastante fielmente con un artefacto adecuado. Pues, bien, un cuerpo negro emite radiación electromagnética que presenta un espectro continuo cuya distribución depende de la temperatura y que no pudo nunca explicarse aplicando la mecánica y el electromagnetismo clásicos. La solución al enigma fue dada en 1900 por Max Planck que postuló para ello que un oscilador armónico sólo puede poseer energías que sean un múltiplo entero del producto de su frecuencia por una constante universal que desde entonces se conoce con el nombre de constante de Planck. La relación entre energía y tiempo (puesto que frecuencia es la inversa de un tiempo) descubierta por Planck es un nuevo hecho que añadir a nuestras consideraciones anteriores y cuyo significado se extiende a toda la física moderna.

La circunstancia de que los sistemas microfísicos tengan la propiedad de que algunas de las magnitudes físicas que se definen en ellos presentan solo valores discretos que no pueden variar en forma continua (como la energía de los osciladores de Planck) es una propiedad sumamente general ampliamente comprobada en las

moléculas, en los átomos y en los núcleos atómicos. Se denominan cuánticos a los fenómenos relacionados con esta propiedad que se manifiesta claramente sobre todo en los cuerpos muy pequeños.

La comprensión de los fenómenos cuánticos se consiguió con la estructuración teórica de la mecánica cuántica realizada a partir de 1925. Esta teoría —de la cual la mecánica clásica es un caso especial— se basa matemáticamente en asociar a cada sistema físico un espacio de Hilbert (espacio de funciones). Cada magnitud física observable (concepto que se define muy precisamente) se representa por un operador que actúa sobre los vectores del espacio de Hilbert; los valores propios del operador son números reales que coinciden con los valores que puede tomar la magnitud en cuestión en el sistema físico considerado.

A escala microscópica cualquier medida perturba el sistema objeto de la misma de modo inevitable, modificando algunas de las magnitudes del mismo que no se están midiendo. Resulta de ello que no todas las magnitudes físicas de un objeto son simultáneamente medibles. En el esquema, resulta que sólo pueden medirse a la vez aquellas magnitudes cuyos operadores conmutan en el sentido matemático; estos operadores que conmutan tienen funciones propias comunes. Si en un determinado sistema se fijan todas las magnitudes físicas que sean simultáneamente medibles, la función propia común a todos los observables y que corresponde a los valores propios observados, engloba la máxima información posible sobre el estado del sistema y se denomina función o vector de estado. El conocimiento del vector de estado de un sistema permite el máximo de predicción sobre sus propiedades presentes o futuras.

Para predecir el futuro de un sistema físico es preciso averiguar como evoluciona la función de estado que lo representa (o bien proceder de algún otro modo equivalente). La estructura teórica coherente de la mecánica cuántica indica que la derivada del vector de estado, con respecto al tiempo, es proporcional al operador de la energía (llamado operador de Hamilton por analogía clásica) aplicado al propio vector de estado. La ecuación diferencial que expresa la proporcionalidad mencionada se denomina ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo; la presencia en ella del operador



de Hamilton que representa la energía (o algo parecido en ciertos casos) no es en absoluto casual. Proviene de la relación descubierta por Planck entre la energía de los osciladores y la frecuencia de los mismos. Pero la estructura total de la mecánica cuántica permite tratar cualquier sistema microfísico (y cualquier propiedad del mismo) y no simplemente los osciladores armónicos.

Vemos, por lo tanto, que el operador de la energía condiciona la evolución temporal de un sistema cuántico. Este es un resultado claro sobre el cual hemos de volver, una vez lo encuadremos en el esquema general de las transformaciones de simetría que tienen en mecánica cuántica mayor relevancia que en mecánica clásica, debido a la propia estructura matemática de la teoría. De modo muy simplificado puede resumirse lo que nos interesa, como sigue.

Se definen las transformaciones de simetría en mecánica cuántica de un modo análogo a como se hace en mecánica clásica, aunque más general. Son transformaciones de simetría aquellos cambios de coordenadas espacio-temporales o internas que no alteran el comportamiento físico de un sistema. En sentido técnico las transformaciones de simetría se caracterizan por dejar invariantes los productos escalares de los vectores en el espacio de Hilbert. Las transformaciones de simetría forman un grupo y condicionan teoremas de conservación como sucede en la mecánica clásica; la mayor generalidad del concepto de transformación de simetría en mecánica cuántica da lugar a nuevas magnitudes que se conservan y que no tienen analogía clásica. Aquí sin embargo, nos vamos a limitar a aquellas transformaciones que por su paralelismo con las clásicas son relevantes para nuestro análisis de la energía.

Puede demostrarse con carácter general que todas las transformaciones de simetría pueden instrumentarse por operadores unitarios (o en su caso antiunitarios) que actúan sobre el espacio de Hilbert del sistema físico que se estudia. Las transformaciones que corresponden a cambios de las coordenadas espacio-temporales y que son las que nos interesan forman un subgrupo particularmente interesante. Las coordenadas o combinación de las mismas son parámetros de un grupo de Lie cuyos operadores unitarios asocia-

dos pueden siempre escribirse como sumas de exponenciales de una expresión producto de un parámetro y un operador que se denomina generador infinitesimal. Dentro de este formalismo es fácil comprobar que el operador de la cantidad de movimiento es el generador infinitesimal del operador unitario cuyo efecto sobre el espacio de Hilbert refleja las traslaciones en el espacio ordinario. Del mismo modo el operador del momento angular está relacionado con las rotaciones en el espacio.

Análogamente el operador de Hamilton o de la energía es el generador infinitesimal del operador unitario que transforma el espacio de Hilbert cuando varía el tiempo. Dicho de otra manera : el operador de la energía en la mecánica cuántica condiciona la evolución de un sistema mecánico por cuanto es el generador infinitesimal del operador unitario que transforma los vectores del correspondiente espacio de Hilbert. Este resultado lo habíamos ya obtenido antes cuando se mencionó la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo, pero su nueva formulación queda englobada en el marco más amplio de las transformaciones de simetría. Entre todas ellas, la que corresponde a la evolución temporal viene relacionada con la energía ; ésta relación ya era conocida en mecánica clásica, pero su carácter específico nos aparece por primera vez y con toda claridad ahora.

## CONCLUSIÓN

Al final de esta excursión por la física, que ya va resultando enfadosa, es momento de recapitular. Os había invitado a meditar sobre el concepto de energía. Hemos visto el origen etimológico de la palabra y su significación lingüística ajustada a lo que por tal término entiende todo el mundo. O, por lo menos, lo que se entendía antes de que la energía tuviera las implicaciones económicas que tanto contribuyen hoy a confundir la energía con los productos o procedimientos que sirven para obtenerla comercialmente.

La física elemental permite clasificar la energía en diferentes

formas y expresar cuantitativamente el principio de la conservación de la energía. Lo más positivo de estas precisiones es la posibilidad de medir la energía en cuanto a su cantidad con lo que se satisfacen las aspiraciones de los mercaderes. Conceptualmente, sin embargo, la energía sigue siendo un arcano, aunque sea medible; resulta ser simplemente un algo transformable, medible y que se ha convertido en deseable.

Es preciso profundizar algo más en las leyes de la naturaleza, tal como las conocemos, para descubrir una relación entre la energía y la permanencia de las normas que rigen el comportamiento del universo. Esta relación entre la energía y el devenir temporal, se ha puesto de manifiesto cada vez más claramente, a medida que hemos conseguido descifrar nuevos enigmas de la naturaleza en los dominios de las grandes velocidades (fenómenos relativistas) o del microcosmos (fenómenos cuánticos).

El estudio de los procesos de la microfísica (átomos, moléculas, núcleos atómicos, partículas elementales) ha requerido una formulación teórica de la física (la mecánica cuántica) a la vez más abstracta y más profunda; no podría ser de otro modo si se piensa en que los fenómenos a que esta teoría se refiere son por su propia naturaleza no intuitivos. Dentro de este esquema teórico hemos podido llegar a una definición más precisa de la energía, como aquella magnitud física cuyo operador es el determinante de la evolución temporal de un sistema físico. El inconveniente de esta definición precisa es que resulta de difícil comprensión, excepto para quienes conocen la física teórica moderna. Conviene, por tanto, tratar de transcribirla al lenguaje usual, para que sea accesible, por lo menos a los hombres cultos.

En este sentido podría decirse que la energía es la cualidad que provoca una modificación de los entes naturales en su evolución temporal. La importancia práctica del concepto está probablemente en relación con que los hombres estamos insertos en vivencias temporales. Todavía debería vulgarizarse más la definición para hacerla asequible a casi todo el mundo. Tratando de buscar una formulación concisa y comprensible, he llegado a la irónica conclusión de que la definición del diccionario de la Lengua

Española : «eficacia, poder, virtud para obrar» expresa bastante bien el fruto de nuestra detallada meditación. Resulta, pues, que después de mucho cavilar hemos vuelto al punto de partida.

¿Es éste un desenlace decepcionante? ¿Ocurre que quien ha dedicado grandes esfuerzos al estudio no tiene ideas más claras sobre la energía que aquel que se limita a leer el diccionario? Entramos aquí en un terreno subjetivo, donde la comprensión es inseparable del sentimiento de haber captado mejor un concepto después de larga y cuidada meditación. Como se trata de una cuestión de sentimiento, es mejor expresarla con palabras de un poeta :

«... the end of our exploring  
Will be to arrive where we started  
And know the place for the first time».

T. S. Eliot, Little Gidding  
(Faber and Faber, London 1942)

que traducido libremente significa : «... el fin de nuestra exploración será llegar al punto de partida, y conocer el lugar por vez primera».