DIMENSIONES Y UNIDADES.

1. Propiedades físicas.

Medir una propiedad física consiste en comparar el valor de dicha propiedad con un patrón, una medida de la misma propiedad, fácilmente reproducible y considerada como unidad de medida.

La afirmación anterior plantea la duda inmediata acerca de qué se entiende por propiedad física. En principio, cualquier magnitud susceptible de ser medida cuantitativamente mediante un experimento reproducible de tal modo que bajo las mismas condiciones produjera los mismos resultados [1], se podría considerar como una propiedad física. Conviene distinguir entre propiedades físicas derivadas, cuya cuantía es deducible a partir de la de otras propiedades físicas y propiedades físicas fundamentales cuya cuantía no se puede obtener a partir de la de otras propiedades fundamentales. Por supuesto, no hay nada que impida invertir la definición de una propiedad derivada para hacerla fundamental y convertir otra fundamental en una derivada de las nuevas variables fundamentales; sin embargo, sí que se ha podido llegar a la conclusión de que basta con un conjunto de siete propiedades físicas fundamentales para obtener, como derivadas, todas las demás.

Las primeras propiedades físicas que se estudiaron fueron el espacio y el tiempo. El espacio se asocia con la disposición de distintos cuerpos sometidos a estudio y el tiempo con el modo en que se ordenan los eventos que tienen lugar sobre dichos cuerpos. Aquí nuevamente se puede introducir la duda acerca de qué se entiende por cuerpo; si el espacio y el tiempo tienen existencia independiente; si, por el contrario, son simples magnitudes relativas que se obtienen al comparar el devenir de distintos cuerpos; o si, siguiendo a Kant, ambos conceptos son "intuiciones a priori puras". Para los propósitos de este curso, basta con quedarse con la idea de que la longitud es una magnitud física fundamental que mide la distancia entre cuerpos, tal y como se puede medir con una regla; mientras que el tiempo es una magnitud física

[1] Téngase en cuenta que, en realidad, cualquier resultado que se obtenga no será exacto, sino que tendrá un cierto margen de error asociado.

fundamental que mide la separación entre eventos, tal y como se puede medir con un cronómetro. La introducción de la Teoría Especial de la Relatividad relacionó ambas magnitudes fundamentales bajo la idea de suceso espacio-temporal, con distancias espaciales que, a través de la velocidad de la luz, se pueden relacionar con separaciones temporales. Esto plantea la idea de que se podría trabajar con el tiempo y la velocidad de la luz como magnitudes fundamentales y, luego, definir el espacio como una magnitud derivada a partir del camino recorrido por la luz en la unidad de tiempo; sin embargo, se ha mantenido el convenio de seguir usando tanto el espacio como el tiempo, como propiedades fundamentales.

Se ha hablado de cuerpo, una idea que está relacionada con la cantidad de una cierta sustancia que se puede aislar y considerar independiente por sí misma. De modo natural, se introdujo la masa como propiedad física adicional que indicaba tanto la inercia (la resistencia al movimiento, entendido como cambio de posición espacial al avanzar en el tiempo) de una cierta cantidad de sustancia, como la atracción gravitatoria que distintos cuerpos experimentan entre sí. No se sabe por qué, pero lo cierto es que la masa a efectos inerciales es igual que la masa a efectos gravitatorios, al menos hasta donde llega la precisión de los experimentos efectuados al respecto; este resultado se conoce como "principio de equivalencia". Cuando se introdujo la Teoría Especial de la Relatividad, se encontró que la masa también es la misma a efectos energéticos [2] que la inercial y la gravitatoria.

Para estudiar la Termodinámica, se vio que se necesitaba alguna propiedad que sirviera para medir los intercambios de calor. En principio, el calor es una forma de energía y, por lo tanto, no es un buen candidato a propiedad fundamental ya que se puede derivar a partir de la masa, la longitud y el tiempo. Sin embargo, los intercambios de calor no dependen de qué cuerpo tenga más calor. Se introdujo el concepto de temperatura a partir del estudio de los flujos espontáneos de calor al poner en contacto dos cuerpos: el calor fluye desde el cuerpo a mayor temperatura hacia el cuerpo a menor temperatura, independientemente de la cantidad absoluta de calor que almacene cada cuerpo. Las contribuciones de Boltzmann permitieron asociar la temperatura con la densidad de energía, en forma desordenada, acumulada por la distintas partículas que forman un cuerpo, de todas las formas posibles.

Un nuevo concepto se ha introducido en el párrafo previo: "las distintas partículas que forman un cuerpo". Esto conecta con la teoría atómica, los cuerpos no son medios continuos a escala microscópica sino que están formados por la unión de multitud de átomos (constituyentes elementales de la materia ordinaria). Para determinar una cantidad de sustancia, no basta con

[2] A través de la equivalencia entre masa y energía propuesta por Einstein

su masa, se necesita saber cuántos átomos la componen; a partir de esta idea se introdujo como magnitud fundamental la cantidad de sustancia.

Al estudiar las propiedades electromagnéticas de la naturaleza, se vio que se necesitaba alguna propiedad física que sirviera para cuantificar estos fenómenos. Por analogía con la masa asociada a la gravedad, se introdujo la carga eléctrica asociada a los campos eléctricos. Sin embargo, resulta mucho más fácil medir experimentalmente la corriente eléctrica (la carga que fluye por unidad de tiempo) que el valor absoluto de la carga eléctrica; así que se añadió como propiedad fundamental la intensidad de corriente eléctrica [3].

Finalmente, cuando se estudiaron los problemas de iluminación se introdujo la última propiedad fundamental de la física: la intensidad luminosa definida como la potencia luminosa por unidad de ángulo sólido, promediada a través de su efecto sobre el ojo humano en condiciones de luz diurna típica (respuesta fotópica del ojo, en oposición a su respuesta escotópica que es típica de condiciones nocturnas).

El lector habrá advertido en el párrafo previo que se ha introducido el concepto de "ángulo sólido". Aquí conviene explicar que se entiende por ángulo plano y por ángulo sólido y por qué no se consideran "propiedades físicas fundamentales".

La idea de ángulo plano es la de la longitud (espacio por lo tanto) de un arco de circunferencia que se mide tomando como patrón el radio de la propia circunferencia. Por su parte, la idea de ángulo sólido es la de la superficie (espacio al cuadrado por lo tanto) de un casquete esférico que se mide tomando como patrón el radio al cuadrado de la propia esfera. Así, una circunferencia completa comprende 2π unidades de longitud con el radio tomado como patrón de medida y se dice que equivale a 2π radianes; mientras que una esfera completa comprende 4π unidades de área con el radio al cuadrado tomado como patrón de medida y se dice que equivale a 4π estereorradianes.

En la definición de intensidad luminosa, se sobreentiende que la luz se propaga desde un punto común, cubriendo un área cada vez mayor pero de modo que el ángulo sólido de la región iluminada se mantenga constante. Lo que crece es la distancia entre la fuente y la región iluminada que desempeña el papel de radio de la zona iluminada, considerada como un casquete esférico con centro en la fuente.

[3] La carga eléctrica se convierte, de este modo, en una propiedad derivada que se puede definir como el producto de intensidad por tiempo.

2. Tiempo.

El patrón de medidas de tiempo se comenzó a asociar al ciclo diurno de la Tierra y se estableció que un segundo era 1/86400 del tiempo entre dos mediodías sucesivos sobre un mismo punto del planeta. Esta definición, que recibe el nombre de tiempo UTC, tiene el problema de que el periodo de rotación de la Tierra no es uniforme; por lo que, o bien se cambia el patrón (lo cual no es práctico), o bien se le añaden segundos de vez en cuando al tiempo UTC para tener en cuenta las variaciones de la velocidad angular de la Tierra.

Para poder tener una definición universalmente válida e independiente del comportamiento de un objeto de gran tamaño e irregular como es la Tierra, se busco una definición más fácilmente reproducible a partir del estudio de los espectros de emisión de radiación por parte de los átomos. En concreto, la definición actual de segundo es la de 9192631770 oscilaciones entre los dos estados base hiperfinos [4] del átomo de Cesio, en ausencia de influencias externas. Este último requisito exige, por ejemplo, apantallar el campo magnético terrestre en la región de operación de un reloj atómico de Cesio.

3. Longitud.

Tradicionalmente, las unidades de longitud estaban asociadas a las dimensiones del cuerpo humano: pies, codos, pasos, zancadas, pulgadas, ... Pero, obviamente, cada humano tiene unas dimensiones distintas, un patrón distinto por lo tanto, y dichas medidas son útiles para efectuar estimaciones pero no para obtener datos precisos.

Los primeros esfuerzos por buscar una unidad estándar de longitud fácilmente medible y reproducible echaron mano de las dimensiones del planeta Tierra. Se pretendió definir la circunferencia polar (pasa por los polos) terrestre de modo que midiese exactamente 40000km y, a partir de allí, definir un metro como la milésima parte de un kilómetro asociado a un patrón depositado en la Oficina de Medidas de París. Sin embargo, errores en la medida exacta del achatamiento de la Tierra llevaron a que su circunferencia polar mida 40008km cuando se toma como patrón el metro de la Oficina de París.

Al igual que pasó en el caso de la medición de tiempos, una medida de longitudes basada en las dimensiones de la Tierra (un cuerpo inhomogéneo y

[4] Los efectos hiperfinos se deben a la interacción entre las propiedades electromagnéticas de alto orden (dipolo magnético y cuadrupolo eléctrico) del campo electromagnético debido al núcleo atómico y el campo magnético y eléctrico debido a los electrones que posee el átomo.

de forma cambiante, aunque sea a largo plazo) no resulta un buen candidato para definir un patrón uniforme y fácilmente reproducible. Una vez definido el segundo y, aceptando que la velocidad de la luz en el vacío es una constante, tal y como propone la Teoría de la Relatividad que, al menos en ausencia de masa (su versión especial), ha superado todas las pruebas experimentales a las que ha sido sometida; el paso lógico fue definir la unidad de longitud a partir del segundo y de la velocidad de la luz. La definición moderna de metro es la de la distancia recorrida por un rayo de luz en el vacío durante un intervalo de 1/299792458 segundos; o, dicho de otro modo, el metro se define de modo que la velocidad de la luz en el vacío valga, exactamente, 299792458m/s.

4. Masa

Históricamente, se empezó a definir la masa en función del peso de granos de cereales de uso alimenticio. Obviamente, esto presenta el problema de que el peso de los granos no es homogéneo sino que depende de variables difícilmente controlables como el tipo de terreno de cultivo, la lluvia recibida, ...

Para definir la masa de una manera fácilmente reproducible se comenzó tomando como patrón el agua pura en el punto de fusión del hielo. Más en concreto la unidad de masa era la masa de un decímetro cúbico de agua pura a su temperatura de fusión en condiciones estándar de presión. En la práctica, la medida exacta resultaba laboriosa ya que requiere de controlar un buen número de variables adicionales como la presión, la temperatura y el ajuste de la cantidad exacta de agua con los problemas causados a este respecto por la tensión superficial [5]. Así que, al igual que había pasado con el metro, se pasó a definir el kilogramo a partir de la masa de un cierto patrón metálico, una aleación de platino-iridio, depositado en la Oficina de Medidas de París. Sin embargo, tanto este patrón, como sus copias no están libres de experimentar minúsculas variaciones de su masa; así que se ha acabado por adoptar una definición de masa basada en constantes universales.

Modernamente, el kilogramo, la unidad de masa se define de modo que el valor exacto de la constante de Planck sea $h = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{s}^{-1}$, donde el segundo se ha definido a partir de la estructura hiperfina del átomo de Cesio, ver sección 2, y el metro como una fracción entera del camino

[5] Propiedad física responsable de la formación de "meniscos". Cerca de la superficie de contacto del agua con un recipiente, la altura de la lámina de agua es ligeramente mayor que en su zona central. Se trata de un fenómeno fácilmente observable si simplemente se observa con detalle un vaso lleno de agua.

recorrido por la luz en un segundo, ver sección 3.

5. Temperatura.

La temperatura se empezó normalizando conforme a dos propiedades del agua: sus puntos de fusión y de ebullición, en condiciones estándar de presión, para el agua pura. Esto implicaba el problema de cómo ajustar exactamente las condiciones de presión a su valor estándar en una atmósfera cambiante.

La primera mejora en la definición de la temperatura supuso obviar las condiciones estándar de presión y buscar una propiedad realmente invariante del agua: su punto triple. El punto triple es la situación determinada por una temperatura y una presión específicas (en el caso del agua la presión tiene que valer $661,657$Pa, compárese con las condiciones estándar de $101325,0$Pa) en la que una sustancia coexiste en fase gaseosa, líquida y sólida simultáneamente. El aspecto de una bombona de agua mantenida en su punto triple es el de un líquido hirviendo con trozos de hielo en el que la proporción de vapor, líquido y sólido se mantiene indefinidamente. Se trata de una propiedad universal, reproducible en cualquier lugar del Universo, y la unidad de temperatura, el grado Kelvin, se definió de modo que la temperatura del punto triple del agua fuese, exactamente, $273,16$K [6].

Sin embargo, una vez que la masa se definió de modo que la constante de Planck tomase un valor exacto; se consideró que también sería muy útil definir la temperatura de modo que la constante de Boltzmann, de amplio uso en Termodinámica y Física Estadística, también tomase un valor exacto. La definición moderna de grado Kelvin viene dada por exigir que la constante de Boltzmann tome exactamente el siguiente valor $k_B = 1,380649 \cdot 10^{-23}\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{s}^{-2} \cdot K^{-1}$, donde el kilogramo, el metro y el segundo se han medido de acuerdo a los convenios explicados en las secciones 4, 3 y 2.

6. Cantidad de sustancia.

La cantidad de sustancia empezó definiéndose, de modo riguroso, a partir del concepto de "mol", de amplio uso tanto en Termodinámica como en Química. Así, la cantidad "elemental" de sustancia se definió como el número de átomos que hay en $0,012$ kilogramos del isótopo 12 del átomo de Carbono.

El lector que haya estudiado Química no tendrá muchos problemas en reconocer el "número de Avogadro" detrás de la definición previa. Nuevamente,

[6] Nótese que esto corresponde a $0,01$ grados Celsius; el punto triple del agua no es igual que su punto de fusión en atmósfera estándar

había problemas con la purificación del Carbono para tener únicamente isótopos 12 y la necesidad de medir exactamente $0,012$ kilogramos de una tal sustancia.

La definición moderna ha consistido en darle un valor exacto al número de Avogadro "por definición". Así, un mol, la unidad de cantidad de sustancia, se define como $6,02214076 \cdot 10^{23}$ entidades elementales de la sustancia estudiada; ya bien sean átomos, moléculas, iones, electrones, o cualquier otra partícula o agrupación de partículas.

7. Intensidad eléctrica.

Resultando bastante fácil medir en un laboratorio la fuerza magnética entre hilos conductores paralelos, se definió el Amperio, la unidad de corriente eléctrica, como la corriente eléctrica continua que, circulando por dos cables paralelos de longitud infinita y sección transversal despreciable, con una separación de un metro entre ambos, diese lugar a una fuerza entre ambos cables de $2 \cdot 10^{-7}$Newton por unidad de longitud de los cables.

Sin embargo, esta definición, que es muy útil en la mayoría de los laboratorios que deben trabajar con equipos electromagnéticos, presenta graves problemas para conseguir una medición ultraprecisa: los cables infinitos no existen en la práctica, su sección transversal puede ser pequeña pero nunca nula, mantener dos cables paralelos a una distancia exacta de un metro acaba siendo bastante difícil para longitudes de cable muy largas, ...

Así que, modernamente, se ha optado por darle un valor exacto a la carga elemental del electrón con signo positivo: $q_e = 1,602176634 \cdot 10^{-19}\mathrm{A} \cdot \mathrm{s}$, donde el segundo se mide de acuerdo a la indicado en la sección 2. Con respecto a la definición previa, nótese que solo requiere conocer el segundo y una propiedad fundamental, la carga de un electrón; mientras que la definición tradicional requería mediciones de fuerza que es una magnitud derivada que requería un conocimiento previo de los patrones de masa, longitud y tiempo [7].

8. Iluminación.

La unidad de intensidad luminosa, la candela, basada en la sensibilidad del ojo humano, se empezó definiendo como la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente monocromática de frecuencia $540 \cdot 10^{12}$Hz (muy próxima al máximo de sensibilidad de la retina humana en condiciones fotópicas) que estuviese emitiendo una intensidad radiante de $(1/683)$W/sr,

[7] $1\mathrm{N} = 1$ Newton $= 1\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2}$.

donde W representa la unidad de potencia, el Watio, definido como la unidad de trabajo por segundo, o como la unidad de fuerza por velocidad, y sr representa el estereorradián definido como la unidad de ángulo sólido, véase la sección 1. Nótese también que se ha introducido el Hz o Hertzio como el inverso del segundo: $1\text{Hz} = 1\text{s}^{-1}$.

La definición moderna de candela es un refraseo de la antigua. La candela, como unidad de intensidad luminosa, se define de modo que la luz monocromática de frecuencia $540 \cdot 10^{12}$Hz tenga una eficacia luminosa de valor exacto 683. La eficacia luminosa se define como el cociente entre la percepción luminosa de la radiación luminosa recibida por parte del ojo humano y su potencia radiante [8]. En función de ese parámetro exacto y de otras medidas fundamentales, la candela se define de modo que la eficacia luminosa de la luz monocromática de frecuencia $540 \cdot 10^{12}$Hz valga exactamente $638\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3$, donde el estereorradián, sr, el kilogramo, kg, el metro, m y el segundo, s han sido definidos en las secciones previas. Nótese que $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3 = \text{cd} \cdot \text{sr/W}$, si se permite el uso del Watio como unidad derivada.

[8] Así, por ejemplo, la radiación infrarroja y la ultravioleta tienen eficacia luminosa nula, aun cuando su potencia radiante no lo sea y pueda dar lugar a fenómenos de calentamiento o de emisión fotoeléctrica.