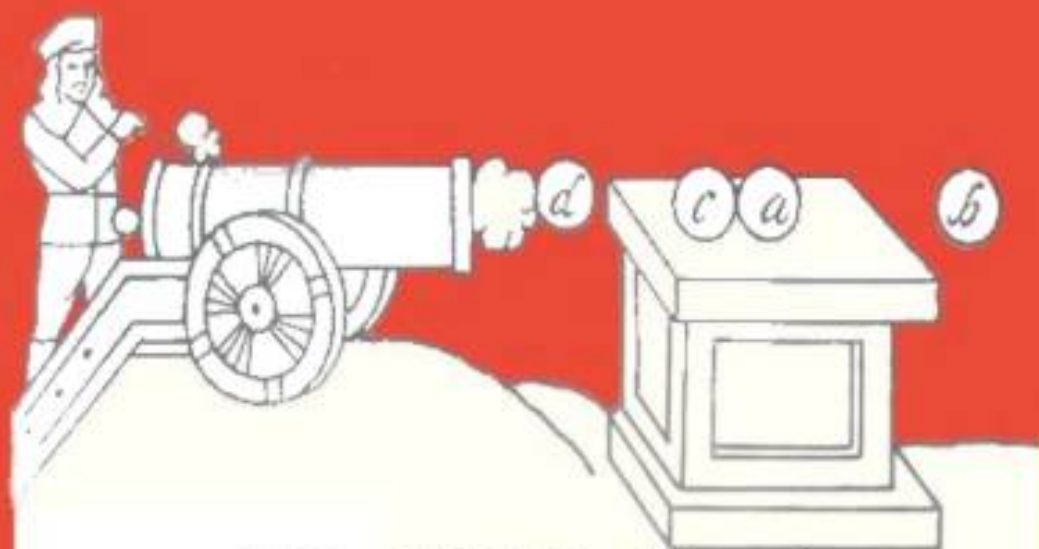


Física para Todos

Libro I

L. D. Landau y A. I. Kitaigorodski

Cuerpos Físicos



Editorial MIR - Moscú

Prólogo a la cuarta edición rusa

Tras muchos años me decidí a volver a la «Física para todos», libro no terminado que había escrito junto con *Dau*, así llamaban lo llamaban los amigos al académico L. D. Landau, admirable científico y hombre de gran atractivo.

Este libro es sumamente «conjunto», Y durante un largo período me resultó difícil ponerse a escribir su continuación. Muchos lectores me lo reprocharon.

Y he aquí que ahora someto al juicio de los lectores la nueva edición de la «Física para todos» dividida en cuatro libros pequeños. Los he intitulado como sigue: «Cuerpos físicos», «Moléculas», «Electrones», «Fotones y núcleos». La división se ha hecho, por decirlo así, conforme a la profundidad de penetración en la estructura de la materia. Los mencionados cuatro libros abarcan todas las leyes fundamentales de la física. Tal vez tiene sentido continuar la «Física para todos» dedicando los fascículos posteriores al fundamento de las distintas ramas de las ciencias naturales y de la técnica.

Los dos primeros libros no son sino el libro anterior hasta cierto punto revisado y en algunas partes sustancialmente aumentado. Los dos últimos libros los he escrito yo.

Comprendo perfectamente que un lector atento percibirá la diferencia existente entre ellos. Sin embargo, se han observado los principios generales de exposición del material que adoptamos con *Dau*. Se trata del carácter deductivo de la exposición, ateniéndose a la lógica del objeto de estudio y no a la historia de su desarrollo. Estimarnos útil con-

versar con el lector empleando el lenguaje sencillo, cotidiano sin que nos infundiese miedo recurrir al humor. Cabe advertir también que no tuvimos lástima del lector.

En lo concerniente a la diferencia entre los nuevos libros y el viejo, esta consiste en lo siguiente. Cuando se escribía el libro anterior los autores lo consideraban como el «primer» libro de física suponiendo incluso que le podía hacer competencia al manual escolar. Sin embargo, las opiniones de los lectores y la experiencia de los maestros de física demostraron que no es así. El auditorio de este libro lo formaron los maestros, los ingenieros y los escolares que querían elegir la física como su profesión. Resultó que nadie consideró la «Física para Todos» como libro de texto. Se aprecia como un libro de divulgación científica que amplía los conocimientos escolares y, con frecuencia, centra la atención en los problemas que debido a una u otra razón no figuran en los programas.

A resultas de ello y suponiendo que el lector del libro está más o menos iniciado en la física, y, como es lógico, me sentí más libre en la elección de los temas.

Por cuanto la conversación sobre la física comienza hablando de los fenómenos que no exigen conocer la estructura de la materia es natural dar al primer libro el nombre de «Cuerpos físicos». Desde luego, se hubiera podido intitular estas páginas —tal como está admitido generalmente— con la palabra «mecánica», es decir, ciencia sobre el movimiento. Pero, no olvide que la teoría del calor que se expone en el segundo libro también es la ciencia sobre el movimiento..., sólo que se trata del movimiento de los cuerpos invisibles para el ojo: de las moléculas y los átomos. En

consecuencia, el nombre escogido se me representa más acertado.

El primer libro está dedicado principalmente, al estudio de las leyes del movimiento y de la gravitación universal las cuales, para siempre, serán el fundamento de la física y, por consiguiente, también de las ciencias naturales.

Septiembre de 1977

A. I. Kitaigorodski

Capítulo 1

Conceptos fundamentales

Contenido:

1. *Sobre el centímetro y el segundo*
2. *Peso y masa*
3. *El sistema SI y sus patrones*
4. *Ley de conservación de la masa*
5. *Acción y reacción*
6. *Cómo sumar las velocidades*
7. *La fuerza como vector*
8. *Plano inclinado*

1. Sobre el centímetro y el segundo

Todos tenemos la necesidad de medir longitudes, contar el tiempo y pesar diversos cuerpos. Por eso, todos sabemos bien qué es el centímetro, el segundo y el gramo. Pero, para la física, estas medidas tienen una importancia extraordinaria, puesto que son necesarias para la apreciación de la mayoría de los fenómenos físicos. Los hombres procuran medir con la mayor precisión posible las distancias, los intervalos de tiempo y el peso, llamados en la física conceptos fundamentales.

Los instrumentos modernos de la física ofrecen la posibilidad de determinar la diferencia de las longitudes de dos varillas de un metro, incluso cuando esta diferencia sea menor de una mil millonésima parte de metro. Se pueden distinguir intervalos de tiempo que se diferencian en una millonésima parte de segundo. Una buena balanza puede pesar con gran precisión un grano de amapola.

No hace más que unos cuantos cientos de años atrás, empezó a desarrollarse la técnica de las mediciones, y no hace mucho, relativamente, que se ha convenido sobre qué segmento de longitud y qué intervalo del tiempo se deben tomar como unidades.

¿Por qué el centímetro y el segundo se han elegido tal como los conocemos? Pues está claro que no tiene importancia alguna que el centímetro o el segundo sean más largos o más cortos.

Lo único que se pide, es que la unidad de medida sea cómoda. Estaría bien, si ésta estuviese a mano. Lo más sencillo sería tomar por unidad de medida la misma mano. Precisamente así lo hirieron en los tiempos antiguos; esto lo testimonian los mismos nombres de las unidades, por ejemplo, «codo», que es la distancia desde el codo hasta los extremos de los dedos de la mano estirada; pulgada, que es el grosor del dedo pulgar en su base. También se utilizaba el pie como medida; de aquí la denominación de longitud «pie», que es la longitud de la planta del pie.

Aunque estas unidades son de gran comodidad, puesto que siempre las tenemos consigo, sus inconveniencias son evidentes: mucho se diferencian unas personas de otras, para que la mano o el pie puedan servir de unidades de medida y no dé lugar a discusiones.

Con el desarrollo del comercio surgió la necesidad de llegar a un acuerdo sobre las unidades de medidas. Los patrones de longitud y de peso se establecieron, primero, para un mercado, después, para una ciudad, más tarde, para todo un país y por fin, para todo el mundo. El patrón es una medida que sirve de modelo, como la regla, la pesa, etc. El Es-

tado guarda con mucho cuidado los patrones y otras reglas y pesas que tienen que ser construidas exactamente de acuerdo con el patrón.

En la Rusia zarista, las medidas principales de peso y de longitud —llamadas «funt» y «arshín»— fueron fabricadas en el año 1747. En el siglo XIX aumentaron las necesidades de precisión de las medidas y estos patrones resultaron ser imperfectos. D. Mendeleiev dirigió en los años 1893-1898 los trabajos, muy complicados y de gran responsabilidad, de la elaboración de patrones exactos. El gran químico consideraba de suma importancia el establecimiento de medidas exactas. Por iniciativa de él, a fines del siglo XIX se fundó la Cámara principal de medidas y pesas, en donde se guardaban los patrones y se elaboraban sus copias.

Unas distancias se expresan en unidades mayores, otras, en menores. En efecto, a nadie se le ocurrirá expresar la distancia de Moscú a Leningrado en centímetros y el peso de un tren del ferrocarril en gramos. Por eso, los hombres acordaron establecer una determinada relación entre las medidas grandes y pequeñas. Como todos saben, en el sistema de unidades que utilizamos, las unidades grandes se diferencian de las pequeñas en 10, 100, 1000, etc., veces. Tal conveniencia resulta muy cómoda y facilita los cálculos. Sin embargo, este sistema tan cómodo no está establecido en todos los países. En Inglaterra y en los EE.UU., hasta ahora utilizan muy poco el metro, el centímetro y el kilómetro, y también el gramo y el kilogramo¹ a pesar de que es indudable la comodidad del sistema métrico.

En el siglo XVII surgió la idea de elegir un patrón que existiese en la naturaleza y que no variase con los años y con los

siglos. En el año 1664, Cristián Huygens propuso tomar por unidad de longitud la de un péndulo que efectuara una oscilación en un segundo. Después de cien años, aproximadamente en el año 1771, se propuso tomar por patrón la longitud del espacio recorrido por un cuerpo en su caída libre durante un segundo. Sin embargo, las dos variantes resultaron ser incómodas y no fueron aprobadas. Para que surgieran las medidas modernas hizo falta una revolución: el kilogramo y el metro aparecieron durante la Gran Revolución Francesa. En el año 1700, la Asamblea Constituyente creó una comisión especial para elaborar medidas únicas; en ella tomaban parte los mejores físicos y matemáticos. De todas las variantes propuestas para unidad de longitud, la comisión eligió una diezmillonésima parte del cuadrante del meridiano terrestre y dio a esta unidad el nombre de «metro». En el año 1799 fue fabricado el patrón del metro y entregado al depósito del archivo de la República.

Sin embargo, muy pronto quedó claro que la idea, abstractamente justa, sobre la conveniencia de la elección de las unidades ejemplares, escogiéndolas de la naturaleza, no se puede realizar por completo. Unas mediciones más exactas, realizadas en el siglo XIX, demostraron que el patrón del metro es 0.08 milímetros más corto que la cuarenta millonésima parte del meridiano terrestre. Quedó claro que con el desarrollo de la técnica de las mediciones se irán haciendo nuevas correcciones. Conservando la definición de metro como una parte del meridiano terrestre habría que preparar nuevos patrones y calcular de nuevo todas las longitudes, siempre que hiciésemos nuevas mediciones del meridiano. Por eso, después de los debates en los congresos interna-

cionales, en los años 1870, 1872 y 1875, se decidió no tomar por unidad de longitud la cuarenta millonésima parte del meridiano, sino el patrón de metro fabricado en el año 1799, que se conserva ahora en la oficina Internacional de pesas y medidas de París.

Aquí no acaba la historia del metro. Actualmente, la definición de esta magnitud fundamental se basa en nuevas ideas físicas. La medida de longitud se reproduce otra vez de la naturaleza, pero de una manera más sutil. Con el metro, aparecieron sus divisiones: una milésima, llamada milímetro, una millonésima, llamada micrón, y la que más frecuentemente se usa, una centésima, el centímetro.

Digamos ahora unas cuantas palabras sobre el segundo. Esta es una medida más vieja que el centímetro. Al establecer la unidad de medida del tiempo no hubo ninguna discrepancia. Esto es comprensible: la alternación del día y la noche, la rotación eterna del Sol, señalan un método natural de elección de la unidad de tiempo. Para todos es bien conocida la expresión: «determinar el tiempo por el Sol». Si el Sol está alto en el cielo, quiere decir que es mediodía y, midiendo la longitud de la sombra que proyecta un jalón, resulta fácil determinar el instante en que el Sol se encuentra en el punto más alto. De este mismo modo, al día siguiente se puede señalar el mismo instante. El intervalo transcurrido de tiempo forma un día. Y luego, no queda más que dividir el día en horas, minutos y segundos.

Las unidades grandes de medición, el año y el día, las proporciona la misma naturaleza. Pero la hora, el minuto y el segundo, son inventadas por el hombre.

La división actual del día proviene desde tiempos muy remotos. En Babilonia no estaba difundido el sistema decimal, sino el sexagesimal. Sesenta se divide por 12; da aquí que en Babilonia dividieran el día en doce partes iguales.

En el Egipto antiguo se introdujo la división del día en 24 horas. Más tarde aparecieron los minutos y los segundos. El hecho de que la hora tenga 60 minutos y el minuto 60 segundos, también se debe al sistema sexagesimal de Babilonia.

En los tiempos antiguos y en la Edad Media, el tiempo se medía con relojes de sol, de agua (por el tiempo que tardaba en caer el agua de recipientes grandes) y con otros ingeniosos dispositivos de poca exactitud.

Sirviéndose de los relojes modernos es fácil comprobar que, en diferentes épocas del año, los días no son exactamente iguales. Por consiguiente, se ha convenido tomar por unidad de medida del tiempo, el día solar medio durante un año.

Una veinticuatroava parte de este día medio se llama hora. Sin embargo, cuando se estableció la unidad de tiempo, la hora, el minuto y el segundo, dividiendo el día en partes iguales, se supuso que la rotación de la Tierra era uniforme. Sin embargo, las mareas lunares-solares de los océanos retrasan la rotación de la Tierra aunque no sea más que en una pequeñísima parte. Por lo tanto, nuestra unidad de tiempo, el día, incesantemente se alarga.

Este retraso de la rotación de la Tierra es tan ínfimo, que fue posible registrarlo directamente tan sólo hace poco tiempo, cuando se inventaron los relojes atómicos, los cuales pueden medir con gran exactitud los intervalos de tiempo de

hasta millonésimas partes de segundo. La variación del día alcanzada 1-2 milésimas de segundo durante 100 años.

Pero, a ser posible, el patrón tiene que carecer, incluso, de un error tan insignificante. Más adelante contaremos como ahora se ha aceptado producirlo.

2. Peso y masa

Se llama peso, la fuerza con que un cuerpo es atraído por la Tierra. Esta fuerza se puede medir con balanzas de resorte.

Figura 1.1a

Cuanto más pesa el cuerpo, tanto más se expande el resorte en que está suspendido. El resorte se puede graduar mediante una pesa, tomada por unidad, marcando la expansión del resorte a consecuencia de la acción de las pesas de uno, dos, tres, etc., kilogramos. Si colocamos después un cuerpo en esta balanza, por la expansión del resorte podremos hallar la fuerza de su atracción por la Tierra, expresada en kilogramos (fig. 1.1a).

Para medir los pesos, no sólo se utilizan los resortes de expansión, sino también los de compresión (fig. 1.1b). Empleando resortes de diferentes tipos se pueden preparar balanzas para la medición de pesos muy grandes y muy pequeños; se basa en este principio, no sólo la balanza de tendero, de poca exactitud, sino también la construcción de muchos instrumentos exactos que se emplean en las mediciones físicas.

Un resorte graduado, no sólo sirve para medir la fuerza de la atracción terrestre, o sea, el peso, sino también para la medición de otras fuerzas. Este instrumento se llama dinamó-

metro, que quiere decir medidor de fuerzas. Muchos habrán visto cómo se emplea el dinamómetro para medir la fuerza muscular del hombre. También se puede medir la fuerza de arrastre de un motor con un resorte de alargamiento (fig. 1.2).

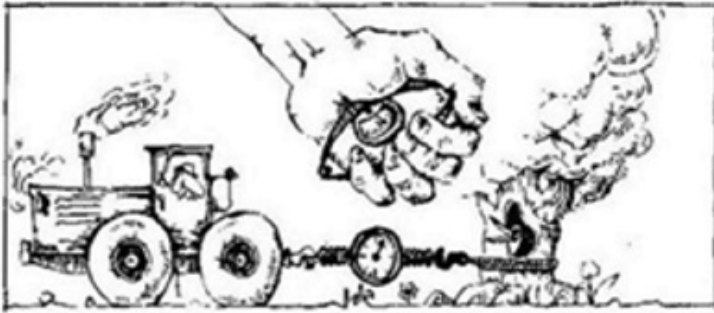


Fig. 1.2.

Una propiedad muy importante de un cuerpo es su peso. Sin embargo, el peso no depende solamente del mismo cuerpo. A éste le atrae la Tierra. ¿Y si estuviésemos en la Luna? Claro que su peso sería otro; como muestran los cálculos, éste sería, aproximadamente, 6 veces menor. Hasta en la misma Tierra es diferente el peso en diversas latitudes. Por ejemplo, un cuerpo pesa en el polo un 0,5% más que en el ecuador.

A pesar de su variabilidad, el peso posee una propiedad particular admirable: como comprueban los experimentos, la razón de los pesos de dos cuerpos, en condiciones cualesquiera, permanece constante. Si dos cuerpos diversos alargan igual el resorte, en el polo, esta igualdad se conservará con la misma exactitud en el ecuador.

Al medir el peso, comparándolo con el peso patrón, se halla una nueva propiedad del cuerpo, llamada masa.

El sentido físico de este nuevo concepto, de la masa, está estrechamente ligado a la igualdad que acabamos de señalar al comparar los pesos.

A diferencia del peso, la masa es una propiedad intrínseca del cuerpo, que no depende de nada más que del mismo cuerpo.



Figura 1.3

La comparación de los pesos, o sea, la medición de las masas, es más cómodo realizarla mediante una simple balanza de palanca (fig. 1.3). Se dice que las masas de dos cuerpos son iguales, si al colocarlos en diversos platillos de una balanza de palanca, éstos quedan rigurosamente equilibrados. Si un cuerpo se ha pesado en una balanza de resorte en el ecuador y, después, el cuerpo y las pesas se han trasladado al polo, resultará que la alteración de sus pesos es igual. El resultado de pesar en el polo es equivalente: los pesos se mantienen en equilibrio.

Podemos ir a la Luna a comprobar esta afirmación. Como tampoco varía allí la razón de los pesos de los cuerpos, el

cuerpo colocado en una balanza de palanca queda equilibrado con las mismas pesas. En donde quiera que se encuentre el cuerpo, su masa es la misma.

Las unidades de masa y de peso están ligadas con la elección de la pesa patrón. Del mismo modo que en la historia del metro y del segundo, los hombres procuraron hallar un patrón de masa natural. La misma comisión preparó una pesa de una aleación determinada que se mantuvo en equilibrio, en una balanza de palanca, con un decímetro cúbico de agua, a cuatro grados centígrados². Este patrón tomó el nombre de kilogramo.

Sin embargo, más tarde, quedó claro que no es tan fácil «tomar» un decímetro cúbico de agua. En primer lugar, el decímetro, como parte del metro, se alteraría junto con cada precisión que se hiciese del metro patrón. En segundo lugar, ¿qué agua tiene que ser? ¿Químicamente pura? ¿Dos veces destilada? ¿Sin partículas de aire? Y, ¿qué hacer con las mezclas de «agua pesada»? El colmo de todas las desgracias es que la exactitud en las mediciones de los volúmenes es considerablemente menor que la exactitud en el peso.

Hubo que desistir otra vez de la unidad natural y tomar por medida de masa la de una pesa preparada especialmente. Esta pesa también se conserva en París junto con el patrón del metro.

Para la medida de masas también se emplean las milésimas y millonésimas partes del kilogramo: el gramo y el miligramo. La Décima y Onceava Asamblea General (año 1960) de pesas y medidas elaboraron un nuevo sistema internacional de unidades (SI), que más tarde fue aprobado por la mayoría de los países. En el nuevo sistema la denominación kilogra-

mo (kg) se conserva para la masa. Toda fuerza, incluyendo, naturalmente, el peso, se mide en el sistema nuevo en newtones. Más adelante veremos por qué se llama así esta unidad y cuál es su definición.

Sin duda, el nuevo sistema no hallará aplicación inmediatamente en todos los sitios y, por eso, es conveniente recordar, mientras tanto, que el kilogramo masa (kg) y el kilogramo fuerza (kgf) son unidades diferentes y que las operaciones aritméticas entre ellas se deben efectuar igual que con números de diferente denominación.

Escribir $5 \text{ kg} + 2 \text{ kgf}$ es tan absurdo como sumar metros y segundos.

3. El sistema SI y sus patrones

Si el presente libro es su primer libro de física, entonces, por favor, deje para más tarde la lectura de este párrafo. Hemos comenzado de una manera tradicional, desde lo más simple. En efecto, ¿puede haber algo más sencillo que las mediciones de las distancias, de los intervalos de tiempo y de la masa? ¿Sencillo? Sí, en la época anterior fue sencillo, pero hoy en día no lo es. En la actualidad, la técnica de medición de la longitud, del tiempo y de la masa requiere conocimientos de toda la física, y los fenómenos sobre los cuales hablaremos a continuación se analizarán más o menos detalladamente sólo en el libro 4.

El sistema SI (Sistema Internacional) fue adoptado en el año 1960. Lenta, muy lentamente, pero con paso inexorable este sistema va conquistando el reconocimiento. Mientras tanto, por ahora, en los años ochenta del siglo veinte, a pesar de todo siguen utilizándose muy frecuentemente las viejas y