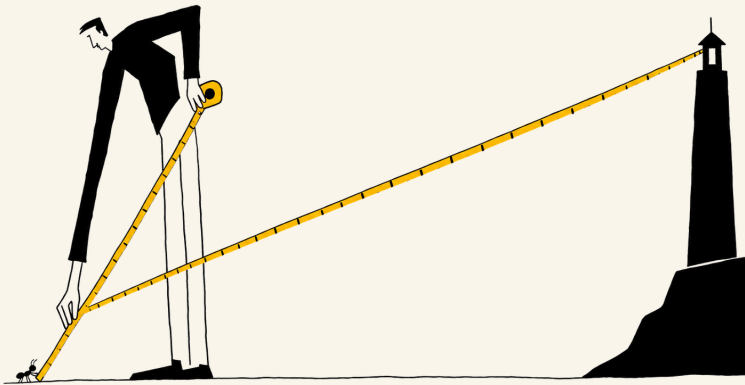


Física universitaria



Paul Peter Urone, Roger Hinrichs · 2022

Audiolecciones ilustradas

Lecturized

Física universitaria

Audiolecciones ilustradas

Paul Peter Urone, Roger Hinrichs · 2022

Contado como lecciones ilustradas por Lecturized
lecturized.com

Del original: College Physics 2e, OpenStax (CC BY 4.0 edition, osbooks-college-physics-bundle@f98d7a792138)

Índice

La física está más cerca de lo que cree

Patatas fritas, una batería y una ley

Velocidad, distancia, tiempo y su teléfono

De los microondas a los modelos

Leyes, predicciones y el método científico

De la filosofía natural a la física clásica

Lo muy rápido, lo muy pequeño y la necesidad de unidades

Cuatro piezas básicas y el segundo

El metro y el kilogramo

Prefijos y órdenes de magnitud

La amplitud de la naturaleza y el arte de convertir

Un trayecto corto a casa

El volumen a partir de la longitud, y dos maneras de estar bien

Incertidumbre: la advertencia honesta

Incertidumbre porcentual

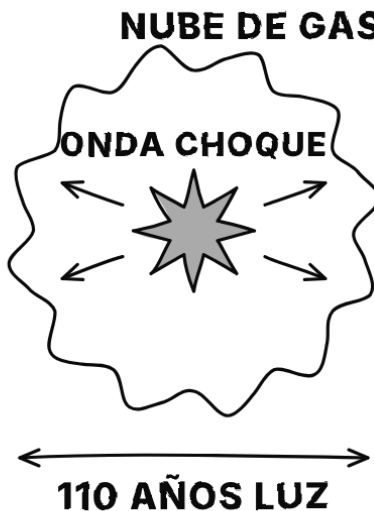
Las cifras significativas y el enigma de los ceros

Las cifras significativas en los cálculos

Aproximación: ¿qué altura tiene un billón de dólares?

La física está más cerca de lo que cree

¿Qué siente cuando oye la palabra «física»? Para mucha gente es un pequeño escalofrío: páginas de ecuaciones difíciles, fórmulas aprendidas para un examen y nunca más usadas. El libro empieza admitiendo justo eso y luego se propone hacerle cambiar de idea. Su afirmación es sencilla: la física tiene en su vida un papel mucho mayor del que cree, se dedique a lo que se dedique.

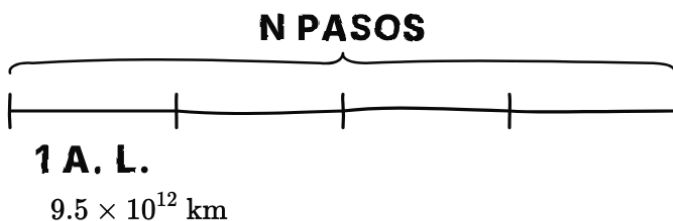


Cómo se formó la nebulosa del Velo

La primera prueba es una fotografía del cielo. Muestra la nebulosa del Velo, una enorme nube de polvo y gas caliente, dibujada en finas

cuerdas retorcidas y amplias láminas brillantes. Así es como se formó. Una estrella unas veinte veces mayor que nuestro Sol explotó; una explosión así se llama supernova. El libro dice que ocurrió hace unos ocho mil años. La explosión lanzó una onda de choque, y esa onda sigue avanzando, choca contra nubes de gas y polvo y las hace brillar con esas formas de cuerdas y de láminas. Hoy toda la nube se extiende a lo largo de más de ciento diez años luz.

Esa palabra merece un momento. Un año luz suena a un periodo de tiempo, pero es una distancia: lo que recorre la luz en un año. El libro da su tamaño: unos nueve billones y medio de kilómetros. Así que una distancia en años luz se pasa a kilómetros con una sola multiplicación: el número de años luz por nueve billones y medio de kilómetros. En símbolos, $d = n \times 9,5 \times 10^{12} \text{ km}$, donde d es la distancia y n es el número de años luz. ¿Por qué funciona? Cada año luz es un paso igual de nueve billones y medio de kilómetros, así que n pasos son n veces más largos, igual que diez pasos de un metro hacen diez metros. Ahora, el cálculo en voz alta. La nebulosa del Velo está a unos dos mil cuatrocientos años luz. Dos mil cuatrocientos por nueve billones y medio de kilómetros son unos veintidós mil ochocientos billones de kilómetros, o $2,3 \times 10^{16} \text{ km}$. El cuentakilómetros de su coche puede marcar ciento veinte mil kilómetros después de muchos años de conducir; tendría que recorrer eso unos doscientos mil millones de veces para llegar a la nebulosa. Y hay una segunda manera de leer el mismo número: la luz que esta noche llega a su ojo desde el Velo salió hace unos dos mil cuatrocientos años.



$$d = n \times 9.5 \times 10^{12} \text{ km}$$

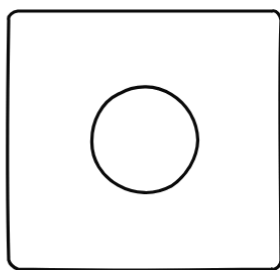
$$n = 2400$$

$$d \approx 2.3 \times 10^{16} \text{ km}$$

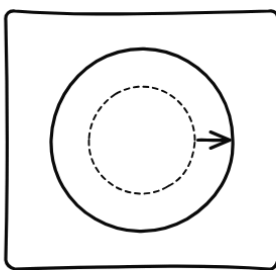
De años luz a kilómetros

Pruébalo

Esta noche, salga y mire las estrellas durante un minuto. Elija la más brillante que pueda ver. La luz que entra en su ojo salió de esa estrella hace años, quizá siglos, y ha estado cruzando el espacio todo ese tiempo. Lo que ve no es la estrella tal como es ahora, sino tal como era cuando la luz partió.



1997



AHORA

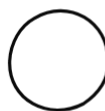
SE MOVIÓ



=



=



MISMAS FUERZAS

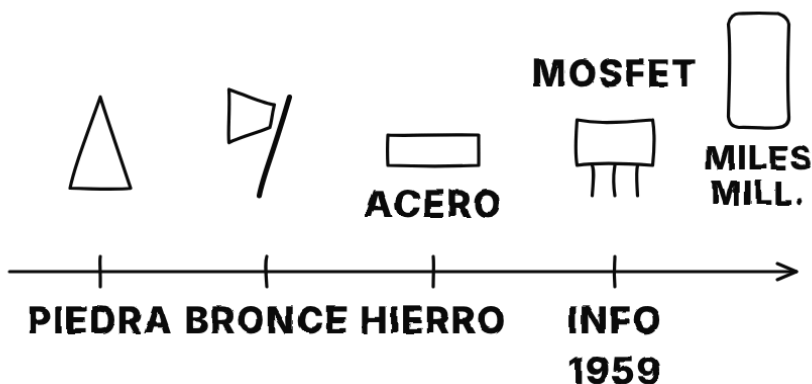
Dos fotos con años de diferencia

¿Cómo estudian los científicos algo tan lejano? Lo observan cambiar. El telescopio espacial Hubble tomó imágenes detalladas del Velo en 1997. Las imágenes nuevas se colocan junto a las antiguas, y la diferencia muestra cuánto ha avanzado la onda de choque y cómo se ha extendido la nube. Es como comparar en su teléfono dos fotos del mismo lugar tomadas con años de diferencia: lo que se ha movido le dice lo que pasó entre medias.

Ahora viene la clave de toda la imagen. Las fuerzas que hacen que este resto de supernova se comporte así son las mismas fuerzas con las que tratamos aquí en la Tierra. Los ingenieros se las encuentran cuando planean enviar un cohete al espacio, y también cuando simplemente calculan cómo calentar una casa nueva. La escala es enormemente

distinta, pero los gases del Velo empujan y se mezclan de forma muy parecida a como lo hacen en la Tierra. Incluso los colores son conocidos: son los brillos del hidrógeno, el azufre, el oxígeno y elementos parecidos, los mismos elementos que forman todo lo que nos rodea. En palabras del libro, «las fuerzas de allí arriba son las mismas que las de aquí en la Tierra». Dicho de otro modo, no hay una física aparte para el cielo; un mismo conjunto de reglas vale para las estrellas y para su cocina.

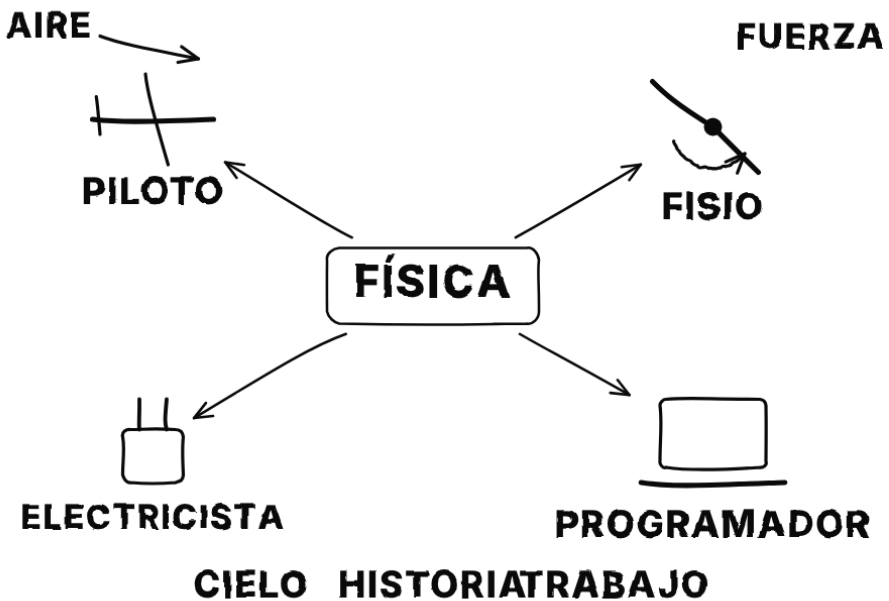
La segunda prueba es la historia de nuestras herramientas. Damos a las épocas de la historia nombres de materiales: la Edad de Piedra, la Edad del Bronce, la Edad del Hierro. Cada edad estuvo marcada por conocer las propiedades físicas de algún material y saber trabajarlo. Ese conocimiento es física, ya fuera cómo se desprenden lascas de una piedra al golpearla para hacer una punta de lanza, cómo el carbono incorporado al hierro en hornos del sur de la India y de Sri Lanka dio el primer acero de alta calidad, o cómo tallar y pulir vidrio y montar las piezas en instrumentos ópticos.



Edades con nombre de material

Nuestra propia época, la era de la información, se apoya en todo eso, y en un pequeño invento en particular. En 1959, en un laboratorio de Nueva Jersey, Mohamed Atalla, nacido en Egipto, y Dawon Kahng, nacido en Corea, inventaron el MOSFET, un transistor de efecto de campo de metal-óxido-semiconductor: un diminuto interruptor eléctrico. Casi nadie ha oído hablar de él, y sin embargo se han fabricado más que cualquier otro objeto en la historia de la humanidad. El teléfono de su bolsillo contiene miles de millones, igual que los chips de los controles de su coche y el microondas de su cocina. El libro usa esta historia para señalar algo más: las grandes innovaciones de nuestro tiempo surgieron de personas de muchos orígenes trabajando juntas.

La tercera prueba es el trabajo de la gente. Trenes que flotan sobre sus vías, capas que desvían la luz a su alrededor y robots diminutos que combaten células cancerosas se basan en los principios de la física. Pero también los trabajos corrientes. Ingenieros, pilotos, médicos, fisioterapeutas, electricistas y programadores usan la física todos los días. Un piloto debe entender cómo las fuerzas del viento empujan el avión fuera de su ruta; un fisioterapeuta debe entender las fuerzas que sienten los músculos cuando el cuerpo se mueve y se dobla. Incluso la dosis de la etiqueta de un medicamento se basa en una medición cuidadosa, que es hacia donde se dirige este capítulo.



Trabajos que usan la física

Así que el libro presenta su argumento tres veces: con el cielo, con la historia y con el trabajo diario. La física no es un conjunto de

fórmulas separadas de la vida; describe el mundo en el que usted ya vive.

Para recordar

La nebulosa del Velo son los restos brillantes de una estrella que explotó, y su onda de choque sigue extendiéndose a través del gas y el polvo. Un año luz es una distancia, unos nueve billones y medio de kilómetros, así que los dos mil cuatrocientos años luz de la nebulosa son unos dos coma tres por diez a la dieciséis kilómetros. Las fuerzas que dan forma a esa nube son las mismas que en la Tierra, en los cohetes y en la calefacción de una casa. Cada era tecnológica, desde las herramientas de piedra hasta los transistores de su teléfono, se basó en saber cómo se comportan los materiales. Muchas profesiones, de piloto a fisioterapeuta, usan la física todos los días.

Preguntas

1. En $d = n \times 9,5 \times 10^{12} \text{ km}$, ¿por qué el número de años luz se multiplica en vez de sumarse?
 - a. Porque la luz se acelera en distancias largas
 - b. Porque cada año luz es un paso igual de la misma longitud, y n pasos iguales dan n veces la longitud
 - c. Porque los años luz y los kilómetros son la misma unidad
 - d. Porque la fórmula da un tiempo, no una distancia

2. La luz de la nebulosa del Velo, a 2400 años luz, llega esta noche a su ojo. ¿Qué le dice eso?
- a. La luz salió hace unos 2400 años
 - b. La nebulosa tiene 2400 años
 - c. La luz tardó un año en llegar
 - d. La nebulosa explotó hace 2400 años
3. ¿Qué muestran los colores de la fotografía de la nebulosa del Velo?
- a. Pintura añadida para que la imagen resulte atractiva
 - b. Elementos que solo existen en el espacio lejano
 - c. Los brillos del hidrógeno, el azufre, el oxígeno y otros elementos conocidos parecidos
 - d. El calor de la estrella original, que sigue ardiendo
4. ¿Por qué la lección llama a la historia de las herramientas una prueba a favor de la física?
- a. Porque los herreros antiguos escribían leyes físicas
 - b. Porque las herramientas siempre las inventaron físicos
 - c. Porque la piedra, el bronce y el hierro son constantes físicas
 - d. Porque cada edad se basó en saber cómo se comporta un material y cómo trabajarlo

Respuestas

- 1. b)** Cada año luz es un paso igual de nueve billones y medio de kilómetros, así que n pasos son n veces más largos.
- 2. a)** Un año luz es lo que recorre la luz en un año, así que la luz que viene de 2400 años luz lleva unos 2400 años viajando.

3. c) Los colores son los brillos de elementos conocidos, los mismos que forman todo lo que nos rodea.

4. d) Cada edad estuvo marcada por conocer las propiedades físicas de algún material y saber trabajarlo, y ese conocimiento es física.

Ejemplos resueltos

De años luz a kilómetros La nebulosa del Velo está a unos 2400 años luz de la Tierra, y un año luz son unos $9,5 \times 10^{12}$ km. ¿A qué distancia está en kilómetros?

Use $d = n \times 9,5 \times 10^{12}$ km, porque cada año luz es un paso igual de $9,5 \times 10^{12}$ km.

Aquí $n = 2400$, así que $d = 2400 \times 9,5 \times 10^{12}$ km.

Multiplique primero los números sueltos: $2400 \times 9,5 = 22\,800$.

Así que $d = 22\,800 \times 10^{12}$ km, que es $2,28 \times 10^{16}$ km, unos $2,3 \times 10^{16}$ km.

Respuesta: unos $2,3 \times 10^{16}$ km

Ejercicios

1. La nebulosa del Velo mide unos 110 años luz de ancho. Usando $d = n \times 9,5 \times 10^{12}$ km, ¿cuánto mide en kilómetros?

Pista: Ponga $n = 110$ y multiplique primero los números sueltos.

Respuesta: Unos $1,0 \times 10^{15}$ km: $110 \times 9,5 = 1045$, así que $d = 1045 \times 10^{12}$ km $\approx 1,0 \times 10^{15}$ km.

2. Explique con sus propias palabras por qué tanto un piloto como un fisioterapeuta necesitan la física.

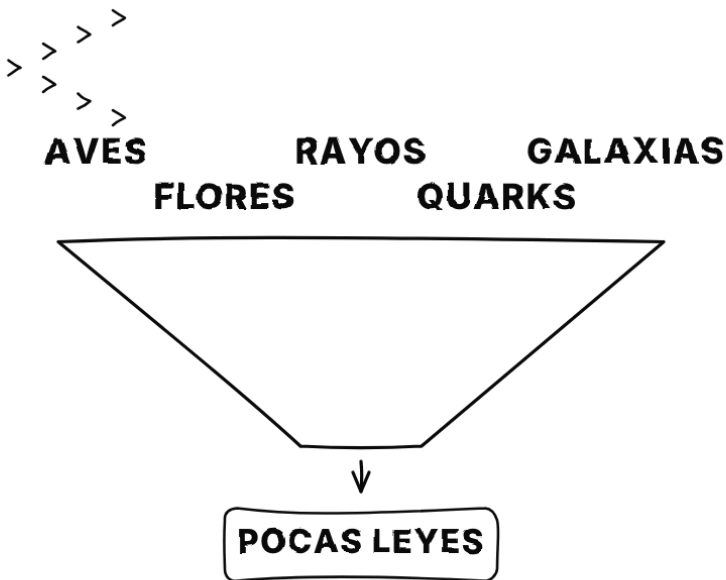
Pista: Nombre las fuerzas que cada uno debe entender.

Respuesta: Un piloto debe entender cómo las fuerzas del viento empujan el avión fuera de su ruta, y un fisioterapeuta debe entender las

fuerzas que sienten los músculos cuando el cuerpo se mueve y se dobla.
Ambos trabajan con fuerzas, así que ambos necesitan la misma física.

Patatas fritas, una batería y una ley

Mire una bandada de gansos que vuela hacia el sur en otoño: una V perfecta que cruza el cielo. El libro muestra una imagen así y dice, sin más, que esa formación se rige por las leyes de la física. Es una afirmación atrevida, y el comienzo del capítulo explica por qué se puede hacer.

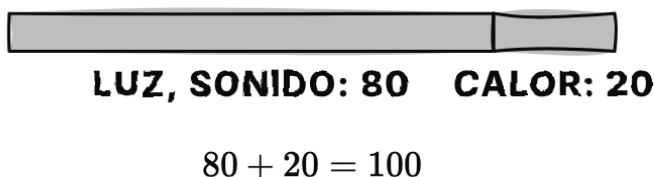
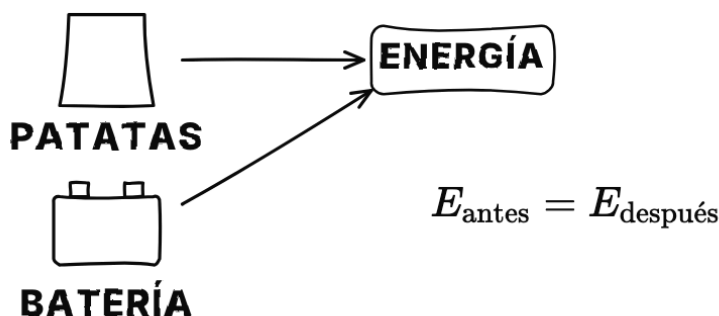


Muchos datos, pocas leyes

El mundo es enormemente complicado en sus detalles. Cada día vemos una gran variedad de cosas, y a lo largo de los siglos la gente ha reunido un enorme caudal de datos: sobre el vuelo de las aves y los

colores de las flores, el rayo y la gravedad, las diminutas partículas llamadas quarks y los inmensos cúmulos de galaxias, el paso del tiempo y el misterio de cómo empezó el universo. Ante todo ese detalle, la gente descubrió algo inesperado: un conjunto sorprendentemente pequeño y unificado de leyes físicas explica lo que observamos. Buscamos orden, y la naturaleza, en palabras del libro, es «notablemente colaboradora».

Este es el ejemplo del propio libro. ¿Qué tienen en común una bolsa de patatas fritas y la batería de un coche? Ambas guardan energía que puede convertirse en otras formas. La ley que las une se llama conservación de la energía: la energía puede cambiar de forma, pero nunca se pierde. Escrito como fórmula, $E_{\text{antes}} = E_{\text{después}}$, donde E representa la energía total, contada en todas sus formas a la vez. En palabras: tome las formas que tome la energía, súmelas todas antes de un cambio y después, y los dos totales son iguales. ¿De dónde sale la idea, por intuición? Piense en dinero que se pasa de un bolsillo a otro: las monedas pueden ir de un bolsillo a otro, pero si ninguna sale de usted, el total sigue igual. Supongamos que la batería de su teléfono entrega cien unidades de energía mientras ve una película; quizá ochenta acaban como luz y sonido y veinte como el calor que nota en la parte trasera del teléfono. Ochenta más veinte son cien, el mismo total que antes; nada ha desaparecido, solo ha cambiado de forma.



La energía nunca se pierde

Una sola ley, y une las calorías de los alimentos, las baterías, el calor, la luz y el muelle de un reloj al que se ha dado cuerda. Entenderla facilita cada uno de esos temas, porque ve cómo se relacionan entre sí las formas de la energía. Dicho de otro modo: temas que parecen no tener relación están unidos por leyes que se aplican muy ampliamente, y eso le permite entender en lugar de memorizar listas de datos.

Estas dos ideas, que unas pocas leyes lo unifican todo y que la naturaleza es en el fondo sencilla, recorren todo el libro. Mientras aprende a aplicar las leyes conocerá, por supuesto, los temas principales de la física. Pero el libro subraya algo más importante: los hábitos de análisis que le permiten usar estas leyes mucho más allá de

lo que cabe en un solo libro. Esos hábitos le ayudan a tener éxito en los estudios y a pensar de forma crítica en cualquier carrera que elija.

Después el libro traza el camino que tiene por delante. Recorrerá la historia del estudio cuidadoso de la naturaleza, empezando por la filosofía natural y los antiguos pensadores de Oriente Medio y el Mediterráneo, hasta llegar a sir Isaac Newton y las leyes que llevan su nombre. Presentará los patrones que usan los científicos para medir magnitudes físicas, un sistema de medida compartido que permite a los científicos de todas partes hablar un mismo lenguaje matemático. Es el mismo acuerdo que hace que una báscula de cocina en un país y una dosis de medicamento impresa en otro signifiquen exactamente los mismos gramos. Y examinará los límites de la medición: cuán exactos y cuán precisos podemos ser, y por qué los científicos se esfuerzan tanto en decir claramente lo que no pueden saber. Por último, esta primera sección promete tres cosas: decir qué es la física, mostrar cómo sirve a otros campos y explicar qué es realmente una ley física y por qué el experimento importa tanto para la teoría.

Para recordar

Un conjunto pequeño y unificado de leyes explica un mundo enormemente variado, y la naturaleza resulta ser ordenada y sencilla en el fondo. La conservación de la energía dice que la energía total antes de un cambio es igual al total después: la energía cambia de forma, pero nunca se pierde. Esa única ley relaciona los alimentos, las baterías, el calor, la luz y los muelles, de modo que entender sustituye a memorizar. Por delante quedan la historia de la física, los patrones de medida compartidos y los límites honestos de lo precisamente que podemos medir.

Preguntas

1. ¿Qué afirma la fórmula $E \text{ antes} = E \text{ después}$?
 - a. En cada cambio se crea energía
 - b. La energía total, contada en todas sus formas, es la misma antes y después de un cambio
 - c. La energía antes de un cambio siempre es mayor
 - d. Solo se conserva la energía térmica
2. La batería de un teléfono entrega 100 unidades de energía; 80 acaban como luz y sonido. ¿Dónde están las otras 20?
 - a. Se destruyen
 - b. Vuelven a la batería
 - c. Se convierten en calor en el teléfono

- d. Nunca existieron
3. ¿Por qué la lección compara la energía con monedas que se pasan de un bolsillo a otro?
- a. Porque las monedas pueden pasar de un bolsillo a otro y el total sigue igual si ninguna sale
 - b. Porque la energía cuesta dinero
 - c. Porque las monedas y la energía son de metal
 - d. Porque la energía se pierde como monedas gastadas
4. ¿Qué considera el libro más importante que aprender los temas principales de la física?
- a. Memorizar los valores de las constantes
 - b. Aprender los nombres de físicos famosos
 - c. Leer tantas aplicaciones como sea posible
 - d. Adquirir hábitos de análisis que aplican las leyes mucho más allá de un solo libro

Respuestas

1. **b)** Tome las formas que tome la energía, los totales antes y después de un cambio son iguales: la energía cambia de forma, pero nunca se pierde.
2. **c)** Ochenta más veinte son cien: el resto se convierte en calor, así que el total no cambia.
3. **a)** La energía pasa de una forma a otra como las monedas de un bolsillo a otro; el total sigue igual.
4. **d)** El libro subraya los hábitos de análisis que le permiten usar las leyes mucho más allá de lo que cabe en un solo libro.

Ejemplos resueltos

Seguir la energía a través de un cambio Una batería entrega 100 unidades de energía; 80 unidades se convierten en luz y sonido.

Usando $E_{\text{antes}} = E_{\text{después}}$, ¿cuánto se convierte en calor?

La energía se conserva, así que el total después debe ser igual a las 100 unidades de antes.

Escriba $100 = 80 + \text{calor}$.

Reste: $\text{calor} = 100 - 80 = 20$.

Respuesta: 20 unidades

Ejercicios

1. Una lámpara recibe 60 unidades de energía cada segundo y entrega 6 unidades como luz. Si no se pierde energía, ¿cuánta sale como calor cada segundo?

Pista: El total después debe ser igual al total antes: $60 = \text{luz} + \text{calor}$.

Respuesta: 54 unidades: $60 - 6 = 54$, porque la energía cambia de forma pero su total sigue siendo 60.

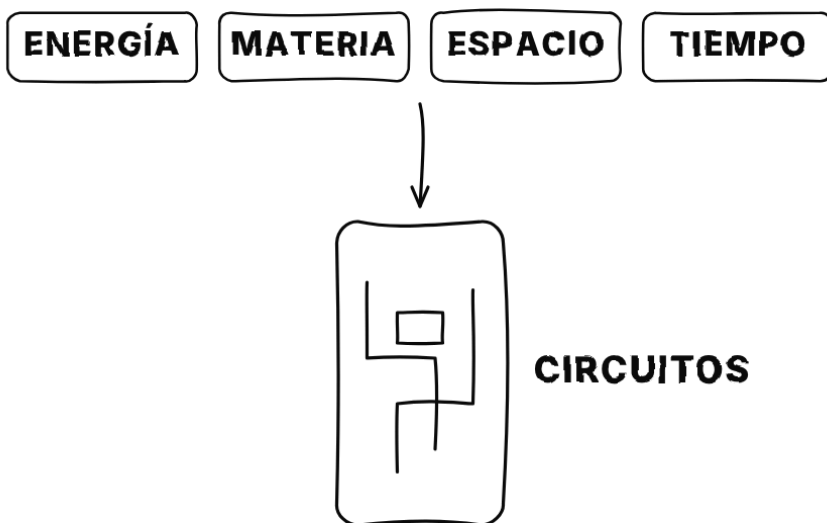
2. Explique con sus propias palabras por qué el libro dice que la naturaleza es «notablemente colaboradora».

Pista: Compare el número de datos con el número de leyes.

Respuesta: Hemos reunido enormes cantidades de datos sobre el mundo, y sin embargo un conjunto sorprendentemente pequeño y unificado de leyes los explica. La naturaleza muestra un orden y una sencillez de fondo, que es lo que esperamos cuando buscamos generalizaciones.

Velocidad, distancia, tiempo y su teléfono

Abra el mapa de su teléfono y pida una ruta para cruzar la ciudad. En un segundo le dice la distancia y cuánto durará el trayecto. ¿Cómo puede saber eso una pequeña placa de vidrio en su mano? La respuesta empieza por lo que es la física y por una de sus relaciones más sencillas.



Lo que describe la física

Primero, la definición del libro. La ciencia está formada por teorías y leyes, las verdades generales de la naturaleza, junto con todo el

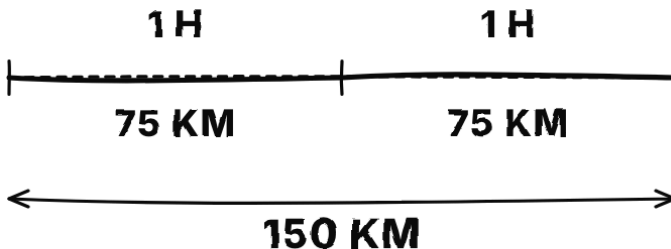
conocimiento que contienen; los científicos siguen añadiendo a ese conocimiento y afinando la forma de enunciar las leyes. La física es la parte de la ciencia que describe cómo la energía, la materia, el espacio y el tiempo actúan unos sobre otros. Sobre todo, se pregunta qué mecanismo básico hay debajo de cada suceso. Ese interés por los mecanismos más básicos de la naturaleza es lo que distingue a la física de otras ciencias. Su alcance va desde el movimiento de diminutas partículas cargadas hasta el movimiento de personas, coches y naves espaciales, y casi todo lo que le rodea puede describirse con bastante exactitud mediante sus leyes.

Tome el propio teléfono. Dentro de su teléfono, la electricidad circula por muchos circuitos pequeños, y la física describe exactamente cómo lo hace. Los ingenieros usan ese conocimiento para elegir los materiales y disponer los circuitos cuando construyen el teléfono.

Ahora, el mapa. La física describe cómo se relacionan la velocidad de un objeto, la distancia que recorre y el tiempo que tarda. En símbolos, $d = vt$. Aquí d es la distancia recorrida, v es la velocidad y t es el tiempo; vt significa v multiplicada por t . En palabras: la distancia es igual a la velocidad multiplicada por el tiempo. ¿De dónde sale? A velocidad constante, cada hora añade el mismo tramo de carretera, así que tras dos horas tiene dos tramos así, tras tres horas, tres; los tramos simplemente se suman, y sumar partes iguales es multiplicar. Supongamos que el velocímetro de su coche se mantiene en setenta y cinco kilómetros por hora durante dos horas: $d = 75 \text{ km/h} \times 2 \text{ h} = 150 \text{ km}$. Fíjese en que las horas se cancelan y quedan kilómetros, como debe ser en una distancia. La misma relación al revés da el tiempo: $t = d/v$. Un viaje de ciento cincuenta kilómetros a setenta y cinco kilómetros por hora dura ciento cincuenta entre setenta y cinco, que

son dos horas; esa es la cuenta que hace su mapa cuando estima el tiempo de conducción.

$$d = v t$$



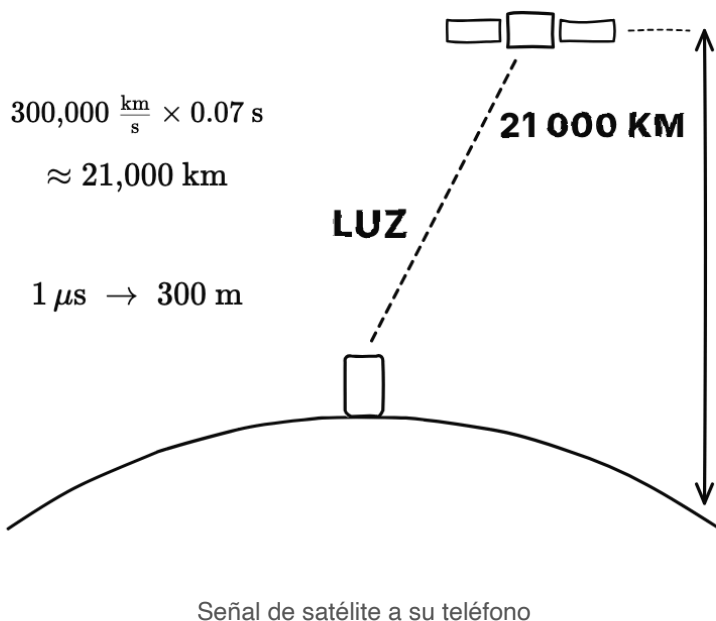
$$\frac{150}{75} = 2 \text{ h}$$

$$t = \frac{d}{v}$$

Distancia es velocidad por tiempo

El sistema de navegación que hay detrás del mapa, llamado GPS, usa la misma relación de una forma mucho más grandiosa. Tiene que tener en cuenta la forma de la superficie terrestre, las distancias exactas a los satélites que giran muy por encima y hasta un efecto sutil llamado dilatación del tiempo, por el que los relojes que se mueven deprisa o están en una gravedad más débil marchan a ritmos ligeramente distintos. Su receptor halla su distancia a cada satélite a partir de lo que tarda en llegar la señal del satélite, y la señal viaja a la velocidad de la luz, unos trescientos mil kilómetros por segundo. Así que otra vez $d = vt$: una señal que tarda siete centésimas de segundo

ha recorrido unos trescientos mil por siete centésimas, aproximadamente veintiún mil kilómetros, que es más o menos la altura a la que vuelan esos satélites. Como la luz es tan rápida, un error del reloj de solo una millonésima de segundo desplazaría la respuesta trescientos metros, y por eso hace falta tanto cuidado con el tiempo. La mayoría de estos cálculos se basan en métodos desarrollados por Gladys West, matemática e informática que programó los primeros ordenadores capaces de posicionar con gran precisión a distancia. Cuando el punto azul del mapa de su teléfono muestra dónde está, son sus métodos, y la relación entre distancia, velocidad y tiempo, los que lo ponen ahí.



Después el libro amplía la mirada. No hace falta ser científico para usar la física: explica cómo un microondas calienta la comida y por qué el metal debe quedarse fuera, y por qué un tejado blanco mantiene fresca una casa. También es la base de otras ciencias: la química se apoya en la física de átomos y moléculas, la mayor parte de la ingeniería es física aplicada y la medicina la usa en los rayos X, los escáneres y la radioterapia.

Pero esta es la idea que el libro quiere que usted conserve. No tiene que estudiar cada uno de estos usos. Lo que más importa es conocer las leyes básicas y tener la habilidad de aplicarlas. La relación $d = vt$ es un buen ejemplo: una ley corta sirve igual para un viaje en coche, una aplicación de mapas y la señal de un satélite. Dicho de otro modo, aprenda la ley y el método, y las aplicaciones vendrán solas. El libro añade que este tipo de estudio agudiza su capacidad para resolver problemas, y como la física conserva las partes más básicas de la ciencia, hace más fácil aprender cualquier otra ciencia.

Para recordar

La física describe cómo la energía, la materia, el espacio y el tiempo actúan unos sobre otros y busca el mecanismo básico bajo cada suceso. La distancia es igual a la velocidad multiplicada por el tiempo, $d = vt$, así que setenta y cinco kilómetros por hora durante dos horas recorren ciento cincuenta kilómetros. Al revés, $t = d/v$ da el tiempo de viaje, que es como un mapa estima un trayecto. La navegación por satélite usa la misma relación con señales que viajan a la velocidad de la luz, así que los errores mínimos de tiempo importan mucho. Lo que más cuenta no es una lista de aplicaciones, sino las leyes básicas y la habilidad de aplicarlas.

Preguntas

1. Según la lección, ¿qué distingue a la física de otras ciencias?
 - a. Usa más matemáticas que cualquier otra ciencia
 - b. Estudia solo objetos muy grandes
 - c. Describe cómo la energía, la materia, el espacio y el tiempo actúan unos sobre otros y busca el mecanismo básico bajo cada suceso
 - d. Trata solo de la electricidad
2. En $d = vt$, ¿qué le pasa a la distancia si conduce a la misma velocidad el triple de tiempo?
 - a. Se triplica

- b. Sigue igual
 - c. Se reduce a un tercio
 - d. Se multiplica por nueve
3. ¿Por qué importa tanto un error mínimo del reloj en la navegación por satélite?
- a. Porque los satélites se mueven despacio
 - b. Porque las señales viajan a la velocidad de la luz, así que una millonésima de segundo desplaza la distancia unos trescientos metros
 - c. Porque la superficie de la Tierra es plana
 - d. Porque los relojes de los satélites nunca marchan de otro modo
4. ¿Qué conclusión saca la lección de que la relación $d = vt$ sirva para un viaje en coche, un mapa y la señal de un satélite?
- a. Que cada aplicación necesita su propia ley
 - b. Que los mapas son más exactos que los velocímetros
 - c. Que el GPS no necesita la física
 - d. Que conocer una ley básica y saber aplicarla importa más que memorizar aplicaciones

Respuestas

1. **c)** La física describe cómo la energía, la materia, el espacio y el tiempo actúan unos sobre otros, y su interés por los mecanismos más básicos de la naturaleza la distingue.
2. **a)** A velocidad constante cada hora añade el mismo tramo, así que el triple de tiempo da el triple de distancia.

- 3. b)** La luz recorre unos trescientos mil kilómetros por segundo, así que incluso una millonésima de segundo supone unos trescientos metros.
- 4. d)** Una ley corta sirve para muchos usos; aprenda la ley y el método, y las aplicaciones vendrán.

Ejemplos resueltos

Distancia y tiempo en un viaje en coche Su velocímetro se mantiene en 75 km/h durante 2 h. ¿Qué distancia recorre? ¿Y cuánto duraría un viaje de 150 km a esa velocidad?

Use $d = vt$: la distancia es igual a la velocidad multiplicada por el tiempo.

$d = 75 \text{ km/h} \times 2 \text{ h} = 150 \text{ km}$; las horas se cancelan y quedan kilómetros.

Dé la vuelta a la relación para el tiempo: $t = d/v$.

$t = 150 \text{ km} \div 75 \text{ km/h} = 2 \text{ h}$.

Respuesta: 150 km, y 2 h

Ejercicios

1. Conduce 210 km a una velocidad constante de 70 km/h. ¿Cuánto dura el viaje?

Pista: Use $t = d/v$.

Respuesta: 3 h: $t = 210 \text{ km} \div 70 \text{ km/h} = 3 \text{ h}$.

2. Una señal recorre unos 300 000 km cada segundo. ¿Qué distancia recorre en 0,05 s?

Pista: Use $d = vt$ con $v = 300 \text{ 000 km/s}$ y $t = 0,05 \text{ s}$.

Respuesta: Unos 15 000 km: $300 \text{ 000} \times 0,05 = 15 \text{ 000}$, y los segundos se cancelan, quedando kilómetros.

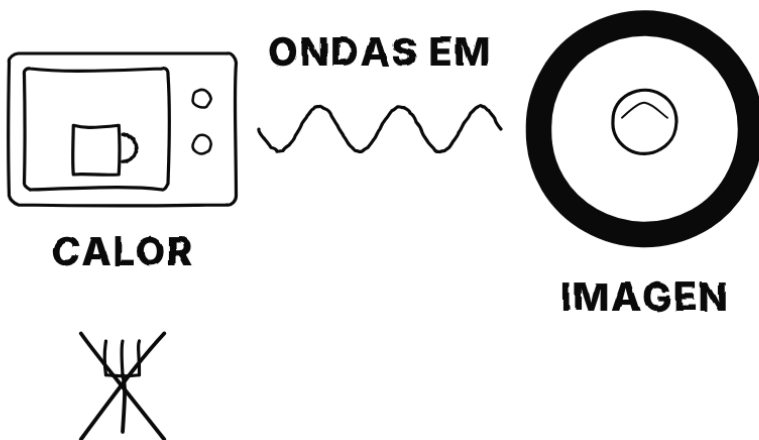
3. Un viaje de 120 km dura 1,5 h. ¿Cuál fue la velocidad media?

Pista: Despeje v de $d = vt$.

Respuesta: 80 km/h: $v = d/t = 120 \text{ km} \div 1,5 \text{ h} = 80 \text{ km/h}$.

De los microondas a los modelos

Meta una taza de café frío en el microondas, pulse inicio y espere un minuto. La taza sale caliente, pero las paredes del horno siguen frías y nada se puso al rojo dentro como en una cocina. Ahora imagine algo muy distinto: un paciente que se desliza en el túnel de un escáner de hospital, que produce una imagen nítida del cerebro. ¿Qué pueden tener en común un electrodoméstico y un escáner de hospital?

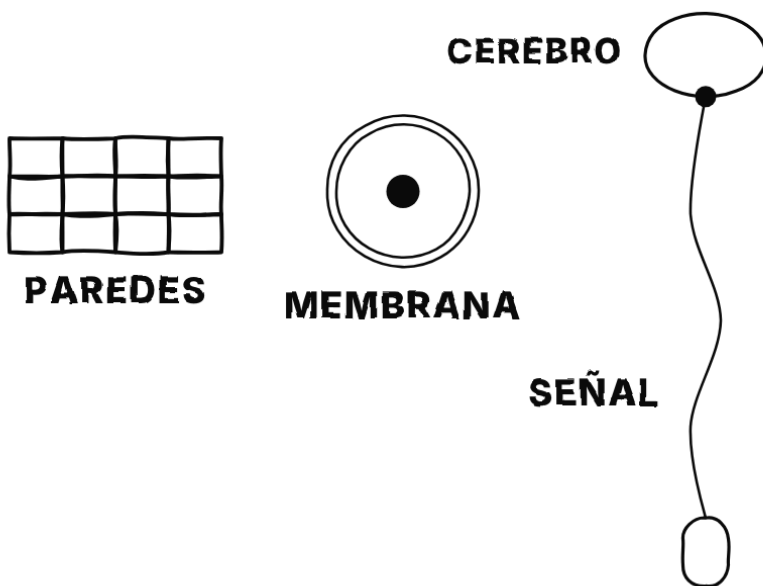


Un tipo de onda, dos máquinas

El libro responde con un par de imágenes. Ambas máquinas usan ondas electromagnéticas, la misma familia de ondas a la que

pertenecen la luz y la radio. El horno de microondas las usa para calentar la comida. El escáner, llamado resonancia magnética, o RM, las usa para construir una imagen del cerebro tan detallada que muestra exactamente dónde está un tumor. Dicho de otro modo, un mismo trozo de física sirve para la cena y para el diagnóstico. Las mismas leyes explican también por qué nunca deben meterse objetos metálicos en un microondas, y por eso el libro llama a las leyes de la física una clave de los aparatos corrientes.

La física llega también a los seres vivos. Mire al microscopio una capa fina de piel de cebolla y verá filas ordenadas de cajitas: las paredes de las células vegetales. La física, junto con la química y la biología, ayuda a describir cómo se comportan esas paredes. Las células animales no tienen paredes rígidas; en su lugar, cada una está envuelta en una membrana fina y compleja que marca su límite. Muchas de las propiedades más básicas de la vida dependen de esas membranas, entre ellas el disparo de las neuronas, que lleva cada señal desde la punta de sus dedos hasta el cerebro. Para entenderlas hacen falta la biología, la química y la física juntas. La vibración de su teléfono cuando llega un mensaje, que nota en los dedos, viaja al cerebro precisamente por neuronas así.



Paredes y membranas celulares

Hasta ahora hemos visto qué explica la física. Ahora el libro pasa a cómo lo explica: qué son las leyes, los modelos y las teorías, y por qué el experimento manda sobre todos ellos.

Empecemos por las leyes de la naturaleza. El libro las llama descripciones concisas del universo: enunciados humanos de las reglas de fondo que sigue todo proceso natural. Las reglas mismas pertenecen al universo. Las personas no las hicieron y no pueden cambiarlas; solo podemos descubrirlas y entenderlas. Y el descubrimiento es un esfuerzo muy humano, lleno de misterio, imaginación, lucha, triunfo y decepción, como cualquier trabajo creativo.

Dos retratos del libro dan vida a ese lado humano. Isaac Newton tenía tan pocas ganas de publicar su obra revolucionaria que otros tuvieron que convencerle. Más tarde dirigió la Real Casa de la Moneda, y se tomó el puesto tan en serio que introdujo estrías en el canto de las monedas, para que los tramposos ya no pudieran recortarles plata antes de gastarlas. Marie Curie pagó de su bolsillo sus primeras investigaciones y dañó su salud por la exposición a la radiación; es la única persona que ha ganado premios Nobel tanto de física como de química, y una de sus hijas también ganó un premio Nobel.

Sea cual sea la lucha, una cosa sostiene todo el esfuerzo: la observación. En palabras del libro, la ciencia debe describir el universo «tal como es, no como podamos imaginarlo».

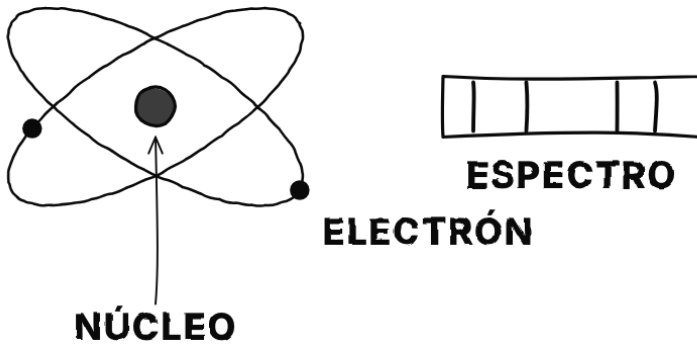
Pruébalo

Durante una semana, mire el cielo cada mañana y anote qué tipo de nubes ve. Luego apunte si llovió ese día. Al final de la semana, busque una regularidad: ¿ciertas nubes vinieron antes de la lluvia? Acaba de hacer lo que el libro describe como el primer paso, informal, de la ciencia: mirar, generalizar e intentar entender.

Así empezamos todos. Cuando nos lo tomamos en serio, dice el libro, nos volvemos más organizados: reunimos y analizamos datos de forma rigurosa, buscamos más precisión, hacemos experimentos controlados donde podemos y anotamos cómo podrían encajar los datos. Después construimos modelos, teorías y leyes para resumir los resultados y compartirlos con otros.

Primero, un modelo. Un modelo es una representación de algo demasiado difícil, o imposible, de mostrar directamente. El ejemplo del libro es el modelo planetario del átomo: electrones imaginados girando alrededor de un núcleo, como los planetas alrededor del Sol. Nadie puede ver la órbita de un electrón, pero la imagen ayuda a explicar cosas que sí podemos observar, como los colores concretos de luz que emiten los gases calientes, llamados espectros atómicos. Este es el límite crucial: un modelo está respaldado por el experimento, pero solo es exacto en situaciones limitadas. La aplicación de mapas de su teléfono es una buena comparación: una imagen simplificada excelente para encontrar una calle, pero que no le dice nada de la altura de los edificios. Los físicos usan modelos para analizar una situación y hacer un cálculo, o para representarla como una simulación por ordenador.

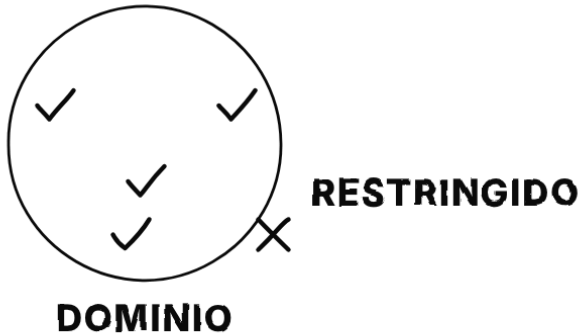
MODELO LIMITADO



El modelo planetario del átomo

Después, una teoría. En el habla cotidiana una teoría es una suposición, una idea, como mucho una hipótesis, y la gente descarta cosas diciendo que son «solo una teoría». A los científicos esa frase les suena absurda, porque la propia ciencia está construida sobre teorías. Una teoría científica es una explicación comprobable de regularidades de la naturaleza, respaldada por pruebas y confirmada muchas veces por distintos grupos de investigadores. Algunas teorías usan modelos y otras no; la teoría de la gravedad de Newton no necesita una imagen mental, porque los cuerpos que caen y orbitan que describe pueden verse directamente.

TEORÍA



DECIDE EL EXPERIMENTO

Una teoría se prueba en su dominio

La diferencia entre un modelo y una teoría está en su alcance. Un modelo solo pretende describir con exactitud ciertos aspectos de un sistema. Una teoría debe describir todos los aspectos de cualquier sistema que entre en su dominio de aplicabilidad, el conjunto de casos que dice abarcar. Esa pretensión es una promesa que se puede comprobar: toda consecuencia de una teoría que pueda probarse con un experimento debe verificarse. Y si alguna vez un experimento muestra que una consecuencia es falsa, la teoría se descarta o se ajusta, por ejemplo restringiendo su dominio. Dicho de otro modo, el experimento traza las fronteras de cada modelo y de cada teoría.

Para recordar

Los hornos de microondas y los escáneres de resonancia magnética usan ondas electromagnéticas, unos para calentar comida y otros para obtener imágenes del cerebro. La física, con la química y la biología, explica las paredes celulares y las membranas de las que dependen las señales nerviosas. Las leyes de la naturaleza pertenecen al universo; solo las descubrimos, y la observación del mundo tal como es sostiene la ciencia. Un modelo es una imagen de lo que no puede mostrarse directamente, como el átomo planetario, y solo es exacto en situaciones limitadas. Una teoría científica es una explicación bien probada que debe abarcar todo lo de su dominio y cambiarse o abandonarse si un experimento la contradice.

Preguntas

1. Según la lección, ¿qué tienen en común un horno de microondas y un escáner de resonancia magnética?
 - a. Ambos usan ondas electromagnéticas
 - b. Ambos calientan comida
 - c. Ambos funcionan solo con metal
 - d. Ambos usan material radiactivo
2. ¿Por qué la imagen planetaria del átomo se llama modelo y no descripción de lo que vemos?
 - a. Porque la dibujó un artista

- b. Porque está demostrada en todas las situaciones
 - c. Porque las órbitas de los electrones no pueden observarse, aunque la imagen explica lo que sí podemos observar
 - d. Porque los átomos son de verdad sistemas solares diminutos
3. ¿Qué le pasa a una teoría si un experimento muestra que una de sus consecuencias es falsa?
- a. Se convierte en un modelo
 - b. Se descarta o se ajusta, por ejemplo restringiendo su dominio
 - c. Nada, ya que las teorías son solo suposiciones
 - d. Se mantiene porque ya se había probado antes
4. ¿En qué se diferencia el alcance de una teoría del de un modelo?
- a. Un modelo lo abarca todo; una teoría solo algunos aspectos
 - b. Ambos abarcan exactamente los mismos casos
 - c. Ninguno puede probarse con un experimento
 - d. Un modelo describe solo ciertos aspectos; una teoría debe describir todos los aspectos de cualquier sistema de su dominio

Respuestas

- 1. a)** El microondas usa ondas electromagnéticas para calentar comida; el escáner de resonancia las usa para obtener imágenes del cerebro.
- 2. c)** Nadie puede ver la órbita de un electrón, pero la imagen ayuda a explicar observaciones como los espectros atómicos.
- 3. b)** Toda consecuencia comprobable debe verificarse; si una falla, la teoría se abandona o se restringe su dominio.

4. d) Un modelo pretende describir con exactitud ciertos aspectos, mientras que una teoría debe abarcar todos los aspectos dentro de su dominio de aplicabilidad.

Ejercicios

1. Alguien dice que la evolución es «solo una teoría». Usando la lección, explique por qué a un científico este comentario le parece absurdo.

Pista: Compare el significado cotidiano de teoría con el científico.

Respuesta: En el habla cotidiana una teoría es una suposición, pero para los científicos una teoría es una explicación comprobable de regularidades de la naturaleza, respaldada por pruebas y confirmada muchas veces por distintos investigadores. La ciencia está construida sobre teorías, así que llamar a algo «solo una teoría» es no entender la palabra.

2. ¿Por qué la teoría de la gravedad de Newton no necesita un modelo, mientras que el átomo planetario es un modelo? Explíquelo con sus propias palabras.

Pista: Pregúntese si los objetos en juego pueden verse directamente.

Respuesta: Los cuerpos que caen y orbitan en la teoría de Newton pueden observarse directamente con los sentidos, así que no hace falta una imagen mental. Los electrones de un átomo no pueden verse, así que usamos una imagen, el modelo planetario, para explicar lo que sí podemos observar.

3. La lección dice que la piedra angular del descubrimiento de las leyes es la observación. ¿Qué significa eso para una idea elegante que no concuerda con observaciones cuidadosas?

Pista: Recuerde qué debe describir la ciencia.

Respuesta: La ciencia debe describir el universo tal como es, no como lo imaginamos, así que la idea debe ceder: si la observación cuidadosa la contradice, la idea es errónea o debe cambiarse, por elegante que sea.

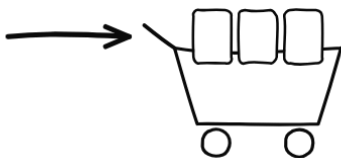
Leyes, predicciones y el método científico

Empuje un carro de la compra vacío por un aparcamiento y rodará con facilidad. Ahora cárguelo con bolsas pesadas y dele el mismo empujón: gana velocidad mucho más despacio. Para que el carro lleno acelere tan rápido como el vacío, tiene que empujar más fuerte. Esa sensación cotidiana la recoge una de las leyes más famosas de la física, y es un buen lugar para ver qué diferencia a una ley de una teoría.

EMPUJÓN



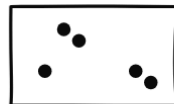
RÁPIDO



LENTO



MODELO GAS



Mismo empujón, distinta carga

Primero, unas palabras sobre las imágenes. Algunas teorías vienen con un modelo, una imagen mental de lo que no puede verse; otras no lo necesitan. La teoría de la gravedad de Newton no necesita modelo, porque los cuerpos que caen y orbitan que describe pueden verse directamente. La teoría cinética de los gases, en cambio, imagina un gas formado por átomos y moléculas, demasiado pequeños para nuestros sentidos, y los imaginamos para poder entender lo que nos dicen los instrumentos sobre el comportamiento de los gases.

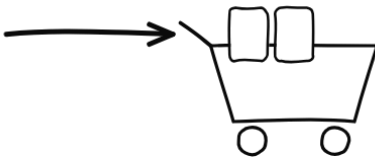
Ahora, la ley. Una ley describe una regularidad general de la naturaleza en un lenguaje conciso, respaldada por pruebas y experimentos repetidos, y a menudo puede escribirse como una sola ecuación. El ejemplo del libro es la segunda ley del movimiento de Newton: $F = ma$. Aquí F es la fuerza, el empuje o el tirón, medida en newtons; m es la masa, en kilogramos; y a es la aceleración, lo rápido que cambia la velocidad, en metros por segundo ganados cada segundo. En palabras: la fuerza necesaria es igual a la masa multiplicada por la aceleración. ¿De dónde sale, por intuición? El doble de masa es como dos carros uno al lado del otro, y cada uno necesita su propio empujón, así que la fuerza se duplica; y para acelerar el mismo carro el doble de rápido, hay que empujar el doble de fuerte. Ahora, un cálculo en voz alta. Un carro de veinte kilogramos que gana dos metros por segundo de velocidad cada segundo necesita $F = 20 \text{ kg} \times 2 \text{ m/s}^2 = 40 \text{ N}$. Cárguelo hasta cuarenta kilogramos y mantenga la misma aceleración, y la fuerza se duplica hasta ochenta newtons. Otra ley que nombra el libro es la conservación de la energía: en cualquier proceso, la energía se conserva.

$$F = m a$$

$$\text{N} \qquad \text{kg} \qquad \text{m/s}^2$$



$$20 \text{ kg} \times 2 \text{ m/s}^2 = 40 \text{ N}$$



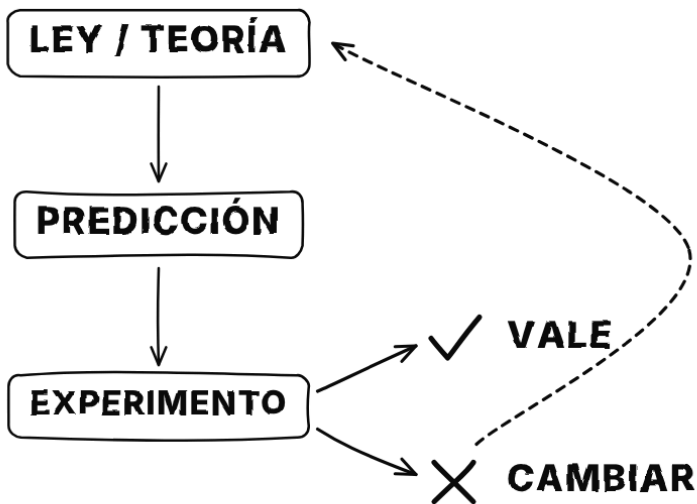
$$40 \text{ kg} \times 2 \text{ m/s}^2 = 80 \text{ N}$$

Segunda ley de Newton, $F = ma$

¿En qué se diferencian las leyes y las teorías? Se parecen en una cosa: ambas son enunciados científicos que surgieron de hipótesis comprobadas y están respaldados por pruebas. Pero la palabra ley se reserva para un enunciado corto y muy general, como $F = ma$. Una teoría es una explicación menos concisa; la teoría de la evolución y la teoría de la relatividad no caben en un solo enunciado corto, así que no se llaman leyes. Una ley describe un solo tipo de acción, mientras que una teoría explica todo un grupo de sucesos relacionados, y una teoría es mucho más compleja y cambiante. El libro resume el contraste en una línea: una ley es un supuesto de partida sobre el que construye el método científico, y una teoría es el resultado final de ese método. Los enunciados de aplicación más estrecha suelen llamarse

principios, como el principio de Pascal, que solo se cumple en los fluidos, aunque la gente no siempre separa estrictamente las palabras.

Los modelos, las teorías y las leyes no sirven solo para ordenar los datos ya reunidos. A menudo, una vez establecidos, señalan a los científicos descubrimientos que nunca habrían hecho de otro modo. A veces implican que existe algo que nadie ha visto todavía, y cuando luego se encuentra, es un triunfo notable de la ciencia. El libro atribuye esas predicciones espectaculares al orden de fondo del universo. Pero la regla corta en ambos sentidos: si el experimento no confirma una predicción, la teoría o la ley es errónea, por elegante o conveniente que sea.



La predicción frente al experimento

Por eso una ley nunca puede conocerse con certeza absoluta. Para estar seguros tendríamos que hacer todos los experimentos imaginables en todas las situaciones posibles, y nadie puede. Así que los físicos consideran válidas las leyes y teorías hasta que se observa un contraejemplo. Si un experimento de buena calidad y verificable contradice una ley bien establecida, la ley debe cambiarse o abandonarse por completo. Dicho de otro modo, se confía en una ley, pero nunca queda fuera del alcance del siguiente experimento cuidadoso.

El libro llama a la ciencia una aventura, como explorar un océano sin cartografiar: se hacen descubrimientos, se forman modelos, teorías y leyes, y el universo parece aún más bello por lo que aprendemos.

La forma de trabajar que hay detrás de esta aventura tiene una historia. Ibn al-Haytham, a veces llamado Alhacén, trabajó en El Cairo en los siglos X y XI e hizo avanzar mucho la comprensión de la óptica y la visión. Su aportación mayor fue una forma de pensar. Al mostrar que las ideas anteriores eran erróneas, insistió en que un científico debe estar dispuesto a rechazar el conocimiento existente y convertirse en «el enemigo» de todo lo que lee, confiando solo en las pruebas objetivas. Insistió en repetir los experimentos y comprobar los resultados, y advirtió que nuestros sentidos y nuestras expectativas pueden llevarnos a malas conclusiones. Su obra fue precursora del método científico que usamos hoy.

El libro presenta el método como una secuencia de pasos. Suele empezar con una observación y una pregunta que investigar. Después viene documentarse sobre el tema y luego una hipótesis, una respuesta propuesta que puede comprobarse. Luego la hipótesis se pone a prueba con un experimento. Por último se analizan los

resultados y se saca una conclusión. Pesar harina en una báscula de cocina para comprobar si la «taza» de una receta es realmente igual cada vez sería un ejemplo minúsculo: pregunta, suposición, prueba, conclusión. Y el libro añade que este método no es solo para la ciencia; puede usarse en muchas situaciones y ajustarse a ellas.

Para recordar

La segunda ley de Newton, $F = ma$, dice que la fuerza necesaria es igual a la masa por la aceleración, así que un carro de veinte kilogramos que acelera dos metros por segundo cada segundo necesita cuarenta newtons. Una ley es un enunciado corto y general de una regularidad; una teoría es una explicación más amplia y compleja de todo un grupo de sucesos, como la evolución o la relatividad. Las leyes y las teorías pueden predecir cosas aún no vistas, pero cualquier predicción que falle en un experimento cuidadoso demuestra que son erróneas. Ninguna ley es nunca segura, porque nadie puede hacer todos los experimentos posibles. El método científico va de la observación y la pregunta, pasando por la documentación y la hipótesis, al experimento, el análisis y la conclusión.

Preguntas

1. En $F = ma$, ¿qué le pasa a la fuerza necesaria si la masa se duplica y la aceleración sigue igual?
 - a. Se duplica

- b. Se reduce a la mitad
 - c. Sigue igual
 - d. Se multiplica por cuatro
2. ¿Por qué la relatividad se llama teoría y no ley?
- a. Porque nunca se ha comprobado
 - b. Porque es demasiado nueva
 - c. Porque explica todo un grupo de sucesos y no cabe en un solo enunciado corto
 - d. Porque es solo una suposición
3. ¿Por qué una ley nunca puede conocerse con certeza absoluta?
- a. Porque las leyes cambian cada año
 - b. Porque nadie puede hacer todos los experimentos imaginables en todas las situaciones posibles
 - c. Porque las leyes son solo suposiciones
 - d. Porque los científicos discrepan sobre ellas
4. En el método científico, ¿qué viene justo después de la hipótesis?
- a. La conclusión
 - b. La observación
 - c. La documentación
 - d. Un experimento que la pone a prueba

Respuestas

1. a) El doble de masa es como dos carros uno al lado del otro, cada uno con su propio empujón, así que la fuerza se duplica.

2. c) Una teoría es una explicación menos concisa de todo un grupo de sucesos relacionados; la relatividad no cabe en un solo enunciado corto.

3. b) Para estar seguros tendríamos que hacer todos los experimentos posibles, así que las leyes se consideran válidas hasta que aparece un contraejemplo.

4. d) El método va de la observación y la pregunta a la documentación y la hipótesis, y luego la hipótesis se pone a prueba con un experimento.

Ejemplos resueltos

La fuerza sobre un carro cargado Un carro de 20 kg gana 2 m/s de velocidad cada segundo. ¿Qué fuerza necesita? ¿Y si su masa es de 40 kg con la misma aceleración?

Use la segunda ley de Newton, $F = ma$.

$$F = 20 \text{ kg} \times 2 \text{ m/s}^2 = 40 \text{ N.}$$

$$\text{Con } m = 40 \text{ kg: } F = 40 \text{ kg} \times 2 \text{ m/s}^2 = 80 \text{ N.}$$

Duplicar la masa con la misma aceleración duplica la fuerza.

Respuesta: 40 N, y 80 N

Ejercicios

1. Se empuja una caja de 12 kg de modo que gana 0,5 m/s de velocidad cada segundo. ¿Qué fuerza actúa sobre ella?

Pista: Multiplique la masa por la aceleración.

$$\textbf{Respuesta: } 6 \text{ N: } F = 12 \text{ kg} \times 0,5 \text{ m/s}^2 = 6 \text{ N.}$$

2. Una fuerza de 90 N actúa sobre un carrito de 30 kg. ¿Cuál es su aceleración?

Pista: Dé la vuelta a $F = ma$: $a = F/m$.

Respuesta: 3 m/s^2 : $a = 90 \text{ N} \div 30 \text{ kg} = 3 \text{ m/s}^2$, así que gana 3 m/s de velocidad cada segundo.

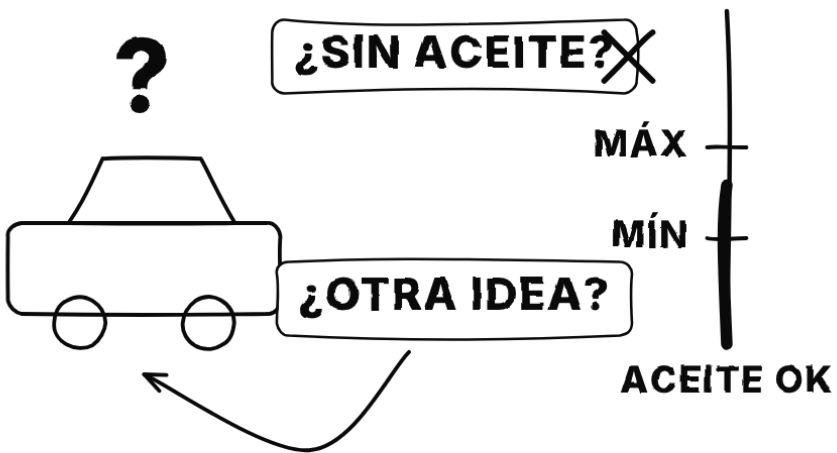
3. Una teoría preciosa predice algo que un experimento cuidadoso y repetible no encuentra. ¿Qué dice la lección que debe seguir?

Pista: Recuerde qué pasa cuando el experimento no confirma una predicción.

Respuesta: La teoría es errónea, por elegante o conveniente que sea, y debe cambiarse o abandonarse. Decide el experimento, no la elegancia.

De la filosofía natural a la física clásica

Una mañana fría gira la llave y el coche no arranca. ¿Qué hace? El libro usa justo esta escena para mostrar el método científico en la vida corriente.

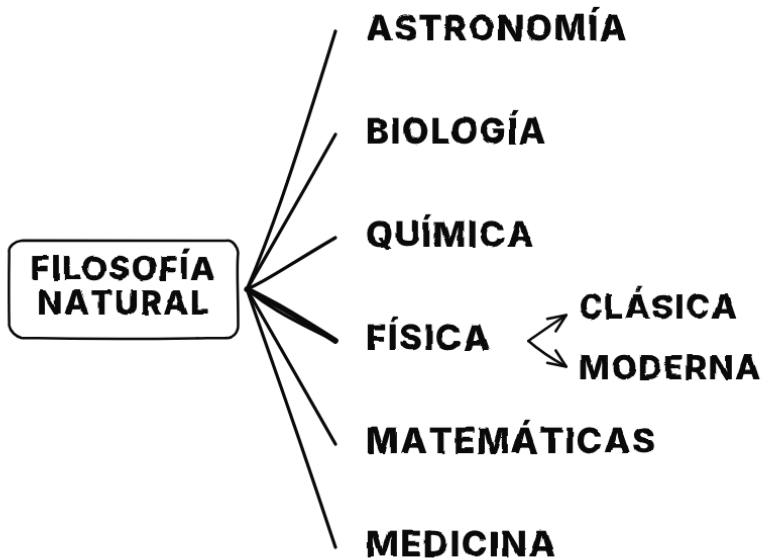


¿Por qué no arranca el coche?

La pregunta es sencilla: ¿por qué no arranca el coche? Primero investiga las posibles razones por las que un coche puede fallar. Luego formula una hipótesis: quizá no tiene aceite de motor. Para comprobarla, abre el capó y mira el nivel de aceite. El aceite resulta estar a un nivel aceptable, así que concluye que el aceite no es la

causa. Y luego el paso importante: formula una nueva hipótesis, la comprueba y repite el proceso hasta encontrar la causa. Dicho de otro modo, una suposición fallida no se pierde: tacha a un sospechoso de la lista. Arreglar un teléfono que no carga va igual: sospecha del cable, prueba otro y, si el teléfono sigue sin cargar, pasa al siguiente sospechoso, el cargador o el enchufe.

Ahora el libro vuelve a la historia. La física no siempre fue una materia aparte, y aún hoy sigue conectada con las demás ciencias. La palabra física viene de la palabra griega para naturaleza, y el estudio de la naturaleza se llamó durante mucho tiempo filosofía natural. Desde la Antigüedad hasta el Renacimiento, la filosofía natural abarcaba a la vez la astronomía, la biología, la química, la física, las matemáticas y la medicina. El filósofo griego Aristóteles, por ejemplo, escribió sobre física, animales, el alma, la política y la poesía. En los últimos siglos, al crecer el conocimiento, la filosofía natural se ramificó en campos cada vez más especializados, y la física se quedó con las partes más básicas de todas. Las imágenes del libro muestran algunas de las grandes mentes del camino: Ibn al-Haytham y Galileo Galilei, tan importantes para la práctica científica que un científico posterior puso a ambos en la portada de su obra principal, y Niels Bohr, que ayudó a construir la mecánica cuántica en el siglo XX.

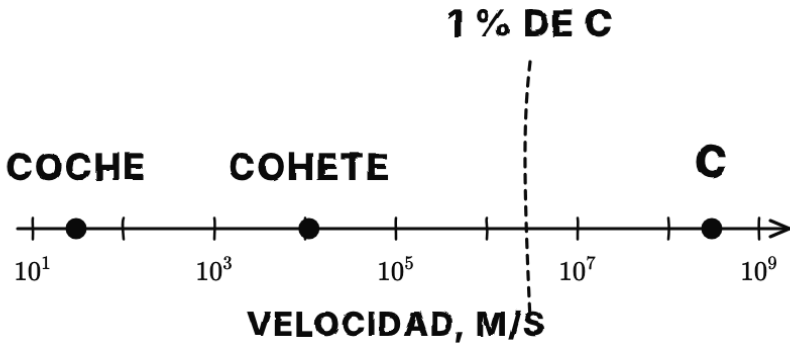


La filosofía natural se ramifica

La física tal como creció desde el Renacimiento hasta finales del siglo XIX se llama física clásica. A comienzos del siglo XX, descubrimientos revolucionarios la transformaron en física moderna.

Esta es una idea clave. La física clásica no es una descripción exacta del universo, pero es una aproximación excelente en tres condiciones. Primera, la materia debe moverse a menos de aproximadamente el uno por ciento de la velocidad de la luz. Segunda, los objetos deben ser lo bastante grandes para verse con un microscopio. Tercera, solo puede intervenir una gravedad débil, como la de la Tierra.

$$v < 0.01 c$$



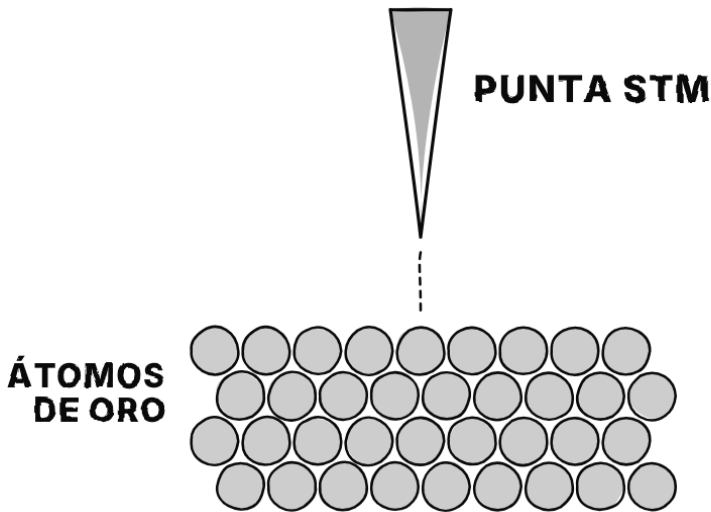
Uno por ciento de la velocidad de la luz

La primera condición puede escribirse como fórmula: $v < 0,01c$. Aquí v es la velocidad del objeto y c es la velocidad de la luz, unos 3×10^8 m/s. En palabras: la velocidad del objeto debe ser menor que una centésima de la velocidad de la luz. ¿De dónde sale el uno por ciento, por intuición? Los errores de la física clásica crecen con la velocidad; muy por debajo de la velocidad de la luz son tan diminutos que ninguna medición corriente los nota. Ahora, el cálculo en voz alta. Una centésima de tres por diez a la ocho metros por segundo es 3×10^6 m/s, es decir, tres mil kilómetros cada segundo. Un coche en la autopista a unos treinta metros por segundo, más o menos cien kilómetros por hora, es cien mil veces más lento que ese límite. Incluso un cohete que sale de la Tierra a unos once kilómetros por

segundo se mueve a menos de la mitad del uno por ciento de la velocidad de la luz, así que la física clásica le sirve perfectamente.

Pruébalo

Levante el pulgar con el brazo estirado y mire más allá, hacia la habitación. Todo lo que puede ver se mueve despacio, es lo bastante grande para verse y está en la gravedad débil de la Tierra. Las tres condiciones de la física clásica se cumplen a la vez, y por eso parece de sentido común.



[Ver átomos](#)

Como vivimos exactamente en estas condiciones, la física clásica parece natural, mientras que gran parte de la física moderna parece extraña. Por eso los modelos son tan útiles en la física moderna: nos permiten imaginar cosas que nunca experimentamos, como objetos que se mueven a velocidades enormes u objetos demasiado pequeños para nuestros sentidos. Entendemos las propiedades de un átomo porque podemos imaginar uno, aunque nadie ha visto un átomo a simple vista. Las nuevas herramientas también ayudan. Un microscopio de efecto túnel permite hoy a los científicos «ver» los átomos individuales de una lámina de oro, alineados como naranjas en una caja.

La física moderna ha dado algunos de los avances más espectaculares de la ciencia. Muchas leyes clásicas se han cambiado o rechazado, y con ellas han cambiado la tecnología, la sociedad y nuestra visión del universo. La física moderna está llena de objetos más extraños que la ciencia ficción, con la ventaja de ser reales.

¿Por qué, entonces, la mayor parte del libro sigue enseñando física clásica? El libro da dos razones. Primera, la física clásica describe el universo con muchísima exactitud en una amplia gama de situaciones cotidianas; nuestro coche en la autopista es un ejemplo perfecto. Segunda, hace falta la física clásica para poder entender la física moderna. Dicho de otro modo, la física clásica es a la vez la herramienta de cada día y la base sobre la que se construye la física más nueva.

Para recordar

Comprobar una hipótesis, descubrir que es errónea y formular otra, como con un coche que no arranca, es el método científico en la vida diaria. La física surgió de la filosofía natural, que en su día abarcaba todas las ciencias; la física se quedó con las partes más básicas. La física clásica funciona cuando las velocidades están por debajo de aproximadamente el uno por ciento de la velocidad de la luz, los objetos se ven al microscopio y la gravedad es débil. El uno por ciento de la velocidad de la luz son tres mil kilómetros por segundo, así que los coches e incluso los cohetes quedan holgadamente dentro de la física clásica. La mayor parte del libro enseña física clásica porque es muy exacta para la vida cotidiana y es la base de la física moderna.

Preguntas

1. Tras comprobar que el nivel de aceite de un coche que no arranca está bien, ¿qué dice el método científico que hay que hacer?
 - a. Concluir que el coche no tiene arreglo
 - b. Formular una nueva hipótesis y comprobarla
 - c. Volver a mirar el aceite hasta que falle
 - d. Parar, porque la prueba falló
2. ¿Qué le pasó a la filosofía natural al crecer el conocimiento?

- a. Se dividió en campos especializados, y la física se quedó con las partes más básicas
 - b. Se abandonó por completo
 - c. Se convirtió en lo mismo que la medicina
 - d. La sustituyó solo la astronomía
3. ¿Por qué la física clásica nos parece de sentido común?
- a. Porque es la física más nueva
 - b. Porque la descubrió Aristóteles
 - c. Porque es una descripción exacta del universo
 - d. Porque vivimos entre velocidades bajas, objetos visibles y gravedad débil
4. Un cohete sale de la Tierra a unos 11 km/s. ¿Basta la física clásica para describirlo?
- a. No, porque los cohetes necesitan la relatividad
 - b. No, porque es demasiado grande
 - c. Sí, porque 11 km/s es menos de la mitad del uno por ciento de la velocidad de la luz
 - d. Sí, porque los cohetes solo se ven desde la Tierra

Respuestas

- 1. b)** Una suposición fallida tacha a un sospechoso; formula una nueva hipótesis y repite hasta encontrar la causa.
- 2. a)** En los últimos siglos la filosofía natural se ramificó en campos especializados, y la física se quedó con las partes más básicas.
- 3. d)** Vivimos justo donde se cumplen las tres condiciones de la física clásica, así que parece natural.

4. c) El límite son unos 3000 km/s; 11 km/s queda muy por debajo, así que la física clásica sirve bien.

Ejemplos resueltos

El límite de velocidad de la física clásica Usando $v < 0,01c$ con $c = 3 \times 10^8$ m/s, halle la velocidad por debajo de la cual la física clásica funciona bien, en m/s y en km/s.

La condición dice que v debe ser menor que una centésima de c .

$$0,01 \times 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 3 \times 10^6 \text{ m/s}.$$

Divida entre 1000 para pasar de metros a kilómetros: 3×10^3 km/s.

Así que el límite son unos 3000 km cada segundo.

Respuesta: 3×10^6 m/s, o 3000 km/s

Ejercicios

1. Un coche va a 30 m/s. ¿Cuántas veces es más lento que el límite de la física clásica, 3×10^6 m/s?

Pista: Divida el límite entre la velocidad del coche.

Respuesta: 10^5 veces, cien mil: $3 \times 10^6 \div 30 = 10^5$.

2. Una partícula en un acelerador se mueve a 6×10^7 m/s. ¿Cumple $v < 0,01c$, con $c = 3 \times 10^8$ m/s?

Pista: Compárela con $0,01c = 3 \times 10^6$ m/s.

Respuesta: No: 6×10^7 m/s es veinte veces el límite de 3×10^6 m/s, es decir, el 20 % de c , así que la física clásica no basta.

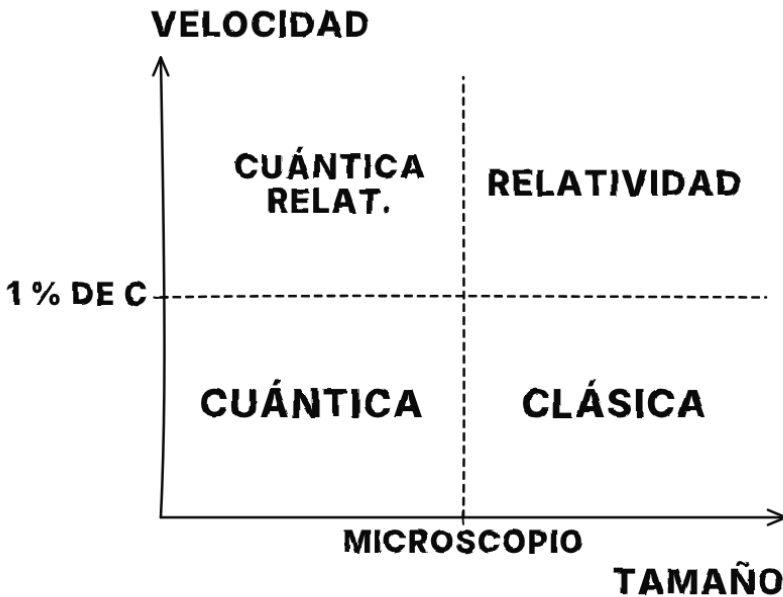
3. Dé las dos razones que ofrece el libro para enseñar sobre todo física clásica.

Pista: Una tiene que ver con la exactitud cotidiana; la otra, con la física moderna.

Respuesta: La física clásica describe el universo con muchísima exactitud en una amplia gama de situaciones cotidianas, y es necesaria para entender la física moderna.

Lo muy rápido, lo muy pequeño y la necesidad de unidades

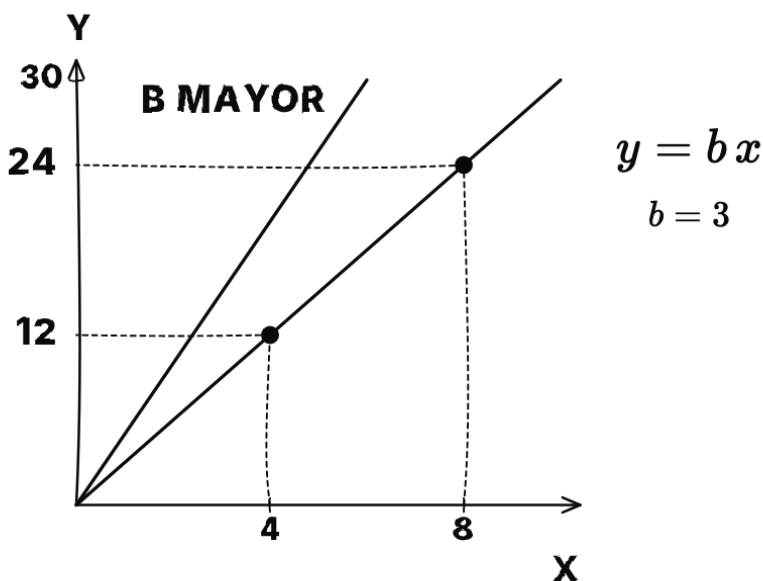
Imagine que un amigo le llama y le dice: «Hoy he andado doce». ¿Doce qué? ¿Doce pasos, doce manzanas, doce kilómetros? El número solo no sirve de nada, y el libro hasta tiene una imagen con ese pie: las distancias dadas en unidades desconocidas son desesperantemente inútiles. Pero antes de llegar a las unidades, el libro termina su historia sobre dónde toma el relevo la física moderna.



Qué teoría usar

La física moderna se apoya en dos teorías revolucionarias: la relatividad y la mecánica cuántica. La relatividad trata de lo muy rápido; la mecánica cuántica, de lo muy pequeño. La relatividad debe usarse siempre que un objeto se mueva a más de aproximadamente el uno por ciento de la velocidad de la luz, o sienta un campo gravitatorio intenso, como el que hay cerca del Sol. La mecánica cuántica debe usarse para objetos más pequeños de lo que puede verse con un microscopio. Combine las dos y obtendrá la mecánica cuántica relativista, que describe objetos pequeños que se mueven muy deprisa o sienten una gravedad intensa. Es la mejor teoría que tenemos aplicable en todas partes, pero es tan complicada matemáticamente que solo se usa cuando es necesario; las teorías más sencillas se usan siempre que son lo bastante exactas. Y el libro promete que todavía puede hacerse mucha física moderna con álgebra y trigonometría corrientes.

Fíjese en que la relatividad y la mecánica cuántica se llaman teorías. El libro pone a prueba esa idea con un pequeño acertijo. Un amigo dice que ha aprendido una nueva ley de la naturaleza. Incluso antes de oírla, sabe que será una descripción concisa del universo, el enunciado de una regla que siguen todos los procesos naturales. Si su amigo hubiera aprendido una teoría, sabría que es una generalización a gran escala y de aplicación amplia.

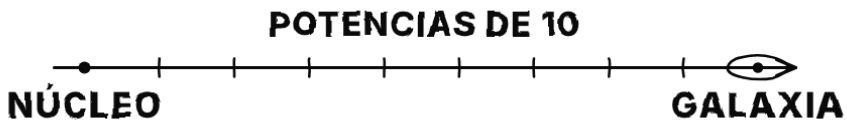


Una recta, $y = bx$

Junto a esto, el libro remite a un graficador en línea de curvas formadas por varios términos, llamadas polinomios. Una de sus piezas más sencillas es una recta, $y = bx$, donde b es un número fijo y x puede variar. En palabras: y es siempre b por x , así que duplicar x duplica y . Por ejemplo, con $b = 3$ y $x = 4$, $y = 12$; con $x = 8$, $y = 24$. Cambiar b inclina la recta, y añadir otros términos la curva.

Ahora, la nueva sección: magnitudes físicas y unidades. El libro se abre con una imagen impactante de la Tierra y la Luna, y señala que la distancia entre ellas, por inmensa que parezca, es una fracción diminuta de las distancias a otros cuerpos del cielo. La variedad de lo que estudia la física es enorme: desde la vida increíblemente corta de un núcleo atómico hasta la edad de la Tierra, desde partículas más

pequeñas que un núcleo hasta los confines del universo conocido, desde el empujón de una pulga al saltar hasta la atracción entre la Tierra y el Sol. Hay suficientes potencias de diez, dice el libro, como para desbordar la imaginación hasta del científico más experimentado.



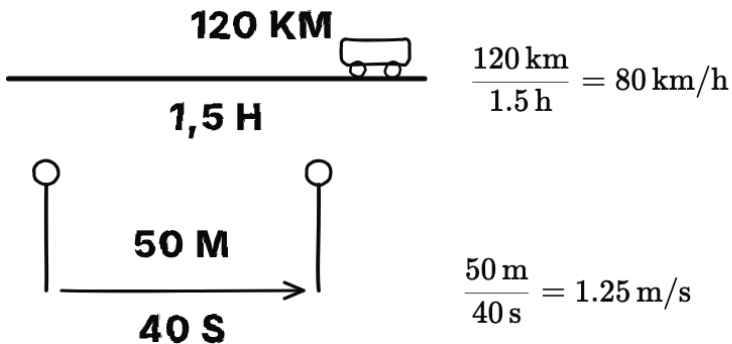
Cuatro magnitudes fundamentales

Poner números a las magnitudes y ecuaciones a los principios nos permite entender la naturaleza mucho más a fondo que solo con palabras. Pero para manejar intervalos tan enormes necesitamos unidades aceptadas. Y aquí, dice el libro, aparece una sencillez profunda: la mayoría de las magnitudes físicas pueden construirse a partir de solo cuatro básicas: longitud, masa, tiempo y corriente eléctrica.

¿Cómo se define una magnitud física? De una de dos maneras: diciendo cómo se mide o diciendo cómo se calcula a partir de otras mediciones. La distancia y el tiempo se definen por cómo los medimos. La velocidad media se define con un cálculo: velocidad media = distancia/tiempo. En palabras: cuánto ha recorrido, repartido entre lo que ha tardado. Supongamos que el ordenador de a bordo de su coche muestra que ha recorrido ciento veinte kilómetros en hora y media; su velocidad media fue ciento veinte entre uno y medio, es decir, ochenta kilómetros por hora. Fíjese en que el velocímetro pudo marcar más o menos en distintos momentos; la media solo le dice el ritmo global.

$$v = \frac{d}{t}$$

VELOCIDAD MEDIA



Velocidad media

Pruébalo

Recorra a pie un tramo medido, digamos cincuenta metros entre dos farolas, y cronométrese con el cronómetro del teléfono. Si tarda cuarenta segundos, divida cincuenta entre cuarenta. Su velocidad media al andar es de uno coma veinticinco metros por segundo.

Las mediciones se dan en unidades, que son valores normalizados. La longitud de una carrera, por ejemplo, se da en metros para los velocistas y en kilómetros para los fondistas. Sin unidades acordadas, a los científicos les resultaría difícilísimo comunicar y comparar lo que miden; de ahí las distancias «desesperantemente inútiles» en unidades desconocidas.

En el mundo se usan dos grandes sistemas de unidades. Uno es el sistema SI, también llamado sistema métrico. El otro es el sistema de unidades inglesas, también llamadas tradicionales o imperiales, usado históricamente en los países que gobernó el Imperio británico y todavía muy usado en Estados Unidos. Casi todos los demás países usan hoy las unidades del SI como estándar, y el sistema métrico es el estándar acordado por científicos y matemáticos. Las letras SI vienen del nombre francés, *Système International*, el Sistema Internacional. Por eso los gramos de su báscula de cocina y los miligramos de la etiqueta de un medicamento significan lo mismo en cualquier país.

Para recordar

La relatividad hace falta para velocidades de más de aproximadamente el uno por ciento de la velocidad de la luz o gravedad intensa; la mecánica cuántica, para cosas demasiado pequeñas para verse al microscopio. Una ley es el enunciado conciso de una regla; una teoría es una generalización a gran escala y de aplicación amplia. La mayoría de las magnitudes físicas pueden construirse a partir de cuatro básicas: longitud, masa, tiempo y corriente eléctrica. Una magnitud se define o por cómo se mide o por cómo se calcula, igual que la velocidad media es la distancia dividida entre el tiempo. Las unidades acordadas son esenciales, y el sistema SI, o métrico, es el estándar que usan los científicos y la mayor parte del mundo.

Preguntas

1. Un objeto es más pequeño de lo que puede verse con un microscopio. ¿Qué teoría debe usarse?
 - a. La relatividad
 - b. La mecánica cuántica
 - c. La física clásica
 - d. La teoría de los gases
2. En $y = bx$ con $b = 3$, ¿qué le pasa a y cuando x se duplica de 4 a 8?
 - a. Se duplica de 12 a 24

- b. Se queda en 12
 - c. Aumenta en 3
 - d. Se multiplica por cuatro
3. ¿Qué par muestra las dos maneras de definir una magnitud física?
- a. Por su tamaño o por su color
 - b. Por su unidad o por su símbolo
 - c. Por cómo se mide o por cómo se calcula a partir de otras mediciones
 - d. Por experimento o por teoría
4. El ordenador de a bordo muestra 120 km recorridos en 1,5 horas. ¿Qué le dice la velocidad media de 80 km/h?
- a. Que el velocímetro marcó 80 km/h todo el tiempo
 - b. Que la velocidad máxima fue de 80 km/h
 - c. Que el coche no se detuvo nunca
 - d. El ritmo global: la distancia repartida entre todo el tiempo

Respuestas

1. **b)** La mecánica cuántica debe usarse para objetos más pequeños de lo que puede verse con un microscopio.
2. **a)** y es siempre b por x, así que duplicar x duplica y.
3. **c)** La distancia y el tiempo se definen por cómo los medimos; la velocidad media, con un cálculo.
4. **d)** La velocidad media es la distancia dividida entre el tiempo; el velocímetro pudo marcar más o menos en distintos momentos.

Ejemplos resueltos

Velocidad media de un viaje Un coche recorre 120 km en 1,5 h.

¿Cuál es su velocidad media?

Velocidad media = distancia / tiempo.

Sustituya: 120 km / 1,5 h.

$$120 \div 1,5 = 80.$$

Respuesta: 80 km/h

Ejercicios

1. Recorre a pie 50 m entre dos farolas en 40 s. ¿Cuál es su velocidad media?

Pista: Divida la distancia entre el tiempo.

Respuesta: 1,25 m/s: $50 \text{ m} \div 40 \text{ s} = 1,25 \text{ m/s}$.

2. La velocidad media de un ciclista es de 18 km/h en un paseo de 2,5 h. ¿Qué distancia recorrió?

Pista: Velocidad media = distancia/tiempo, así que distancia = velocidad media $\times$ tiempo.

Respuesta: 45 km: $18 \text{ km/h} \times 2,5 \text{ h} = 45 \text{ km}$.

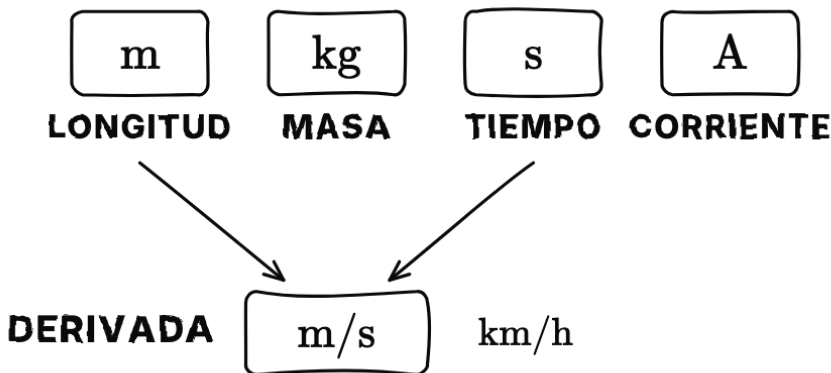
3. En $y = bx$, $y = 20$ cuando $x = 5$. ¿Cuánto vale b, y cuánto vale y cuando $x = 7$?

Pista: Halle b dividiendo y entre x.

Respuesta: $b = 4$, porque $20 \div 5 = 4$; entonces $y = 4 \times 7 = 28$.

Cuatro piezas básicas y el segundo

¿Cuánto dura de verdad un segundo? Podría decir: lo que se tarda en decir «mil uno». La ciencia necesita algo mucho mejor, y la historia del segundo muestra por qué.



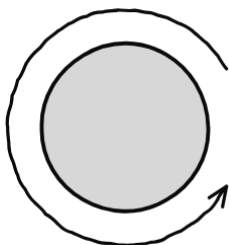
Cuatro unidades fundamentales del SI

Primero, las piezas básicas. La tabla del libro enumera cuatro unidades fundamentales del SI: el metro (m) para la longitud, el kilogramo (kg) para la masa, el segundo (s) para el tiempo y el amperio (A) para la corriente eléctrica, que llega mucho más adelante en el libro. Las magnitudes más fundamentales solo pueden definirse

mediante el procedimiento con que se miden, y sus unidades se llaman unidades fundamentales. Cualquier otra magnitud, como la fuerza o la carga eléctrica, es una combinación algebraica de estas cuatro, y su unidad es una unidad derivada. La velocidad es el ejemplo más sencillo: velocidad = longitud/tiempo, así que su unidad es el metro por segundo, m/s. Los kilómetros por hora del velocímetro de su coche son una unidad derivada del mismo tipo: una longitud dividida entre un tiempo. El libro usa unas pocas unidades ajenas al SI donde son muy comunes, como los milímetros de mercurio, mm Hg, para la presión arterial, y siempre las relaciona con las unidades del SI mediante conversiones.

Ahora, el segundo. Durante muchos años se definió como una fracción del día: $1 \text{ s} = 1/86\,400$ de un día solar medio. ¿De dónde sale ochenta y seis mil cuatrocientos? Un día tiene veinticuatro horas, cada hora sesenta minutos y cada minuto sesenta segundos: veinticuatro por sesenta son mil cuatrocientos cuarenta minutos, y otra vez por sesenta son ochenta y seis mil cuatrocientos segundos. Pero el giro de la Tierra se va frenando muy poco a poco, así que el día solar se alarga lentamente, y una unidad ligada a él se iría desviando poco a poco.

1 DÍA



$$24 \times 60 \times 60 = 86\,400$$

SE FRENA

CESIO



9,192,631,770

VIBRACIONES = 1 S

Cómo se define el segundo

Así que se eligió un nuevo patrón, basado en algo que no cambia. Los átomos de cesio pueden hacerse vibrar de forma muy estable, y esas vibraciones pueden contarse. En 1967 el segundo se redefinió como el tiempo que duran exactamente 9 192 631 770 de esas vibraciones. En palabras: cuente algo más de nueve mil millones de vibraciones del cesio y habrá pasado un segundo. Un reloj atómico basado en esto marca el tiempo con un error menor que una millonésima de segundo al año. El reloj de su teléfono se corrige con regularidad mediante señales que remiten a relojes atómicos así.

¿Por qué tanto empeño en la exactitud? Porque toda medición se expresa al final en unidades fundamentales, y ninguna medición puede ser más exacta que las propias unidades. Dicho de otro modo,

una regla no puede ser mejor que el metro que copia, ni un cronómetro mejor que el segundo que cuenta.

Para recordar

Las cuatro unidades fundamentales del SI son aquí el metro, el kilogramo, el segundo y el amperio; todas las demás unidades, como los metros por segundo, se derivan de ellas. El segundo fue en su día un ochenta y seis mil cuatrocientosavo de un día, pero el día se alarga lentamente. Desde 1967, el segundo es el tiempo de 9 192 631 770 vibraciones de un átomo de cesio. Todas las mediciones se apoyan en las unidades fundamentales, así que no pueden ser más exactas que esas unidades.

Preguntas

1. ¿Por qué se redefinió el segundo usando átomos de cesio en lugar de la duración del día?
 - a. Porque el giro de la Tierra se frena poco a poco, así que el día se alarga gradualmente
 - b. Porque los días son demasiado largos para medirlos
 - c. Porque el cesio se ve más fácilmente
 - d. Porque el día tiene exactamente 86 400 segundos
2. ¿Por qué la unidad de velocidad se llama unidad derivada?
 - a. Porque la velocidad se mide con un velocímetro

- b. Porque se construye a partir de unidades fundamentales: una longitud dividida entre un tiempo
 - c. Porque solo se usa en los coches
 - d. Porque se definió en 1967
3. ¿Por qué importa tanto la exactitud de las unidades fundamentales?
- a. Porque solo las usan los científicos
 - b. Porque son caras
 - c. Porque toda medición se expresa en ellas y no puede ser más exacta que ellas
 - d. Porque cambian cada año
4. ¿Cuál de estas NO es una de las cuatro unidades fundamentales del SI que enumera el libro?
- a. El metro
 - b. El amperio
 - c. El segundo
 - d. El newton

Respuestas

- 1. a)** Una unidad ligada a un día que se alarga lentamente se desviaría; las vibraciones del cesio no cambian.
- 2. b)** Velocidad = longitud/tiempo, así que su unidad, el metro por segundo, es una combinación algebraica de unidades fundamentales.
- 3. c)** Una regla no puede ser mejor que el metro que copia, ni un cronómetro mejor que el segundo que cuenta.

4. d) Las cuatro son el metro, el kilogramo, el segundo y el amperio; unidades como el newton son derivadas.

Ejemplos resueltos

Segundos en un día Demuestre que la antigua definición, $1 \text{ s} = 1/86\,400$ de un día, coincide con 24 horas de 60 minutos de 60 segundos.

Un día tiene 24 h.

$$24 \text{ h} \times 60 \text{ min/h} = 1440 \text{ min.}$$

$$1440 \text{ min} \times 60 \text{ s/min} = 86\,400 \text{ s.}$$

Así que un segundo es $1/86\,400$ de un día.

Respuesta: 86 400 s en un día

Ejercicios

1. ¿Cuántos segundos hay en una semana, con 86 400 s por día?

Pista: Multiplique por el número de días.

Respuesta: 604 800 s: $7 \times 86\,400 = 604\,800$.

2. ¿Aproximadamente cuántas vibraciones del cesio se producen en un minuto, con 9 192 631 770 por segundo?

Pista: Multiplique por 60.

Respuesta: Unas $5,5 \times 10^{11}$: $9\,192\,631\,770 \times 60 = 551\,557\,906\,200$.

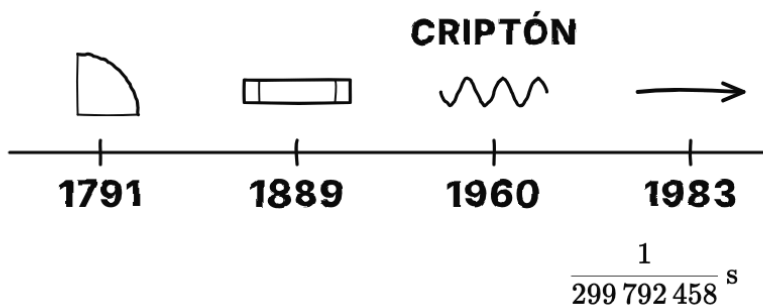
3. Expresar 10 m/s en kilómetros por hora.

Pista: Multiplique por 3600 s por hora y luego divida entre 1000 m por kilómetro.

Respuesta: 36 km/h: $10 \times 3600 = 36\,000 \text{ m}$ cada hora, que son 36 km.

El metro y el kilogramo

¿De dónde sale, al final, el metro de su cinta métrica? Durante la mayor parte de la historia la respuesta fue «de algún objeto guardado en un lugar seguro». Hoy la respuesta es «de la luz», y el cambio muestra cómo la medición se vuelve cada vez más fina.



Cuatro definiciones del metro

El metro (m) se definió por primera vez en 1791 como una diezmillonésima de la distancia del ecuador al Polo Norte. En 1889 se redefinió como la distancia entre dos líneas grabadas en una barra de platino e iridio, que hoy se guarda cerca de París. Hacia 1960 la luz

podía hacerlo mejor, y el metro pasó a ser 1 650 763,73 longitudes de onda de la luz naranja que emiten los átomos de criptón. Desde 1983 es la distancia que recorre la luz en el vacío en $1/299\,792\,458$ s.

Un pie de foto del libro da el razonamiento: la distancia recorrida es la velocidad multiplicada por el tiempo, $d = ct$. Aquí d es la distancia, c la velocidad de la luz y t el tiempo. La nueva definición fija $c = 299\,792\,458$ m/s exactamente. Ponga el tiempo: $d = 299\,792\,458$ m/s $\times$ $1/299\,792\,458$ s = 1 m. Los números grandes se cancelan y queda exactamente un metro. Así que el número ya nunca puede cambiar: una medición mejor solo nos permitiría marcar el metro con más precisión. La cinta métrica de su cajón se comprobó con copias que remiten, paso a paso, a esta definición.

$$d = ct$$

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

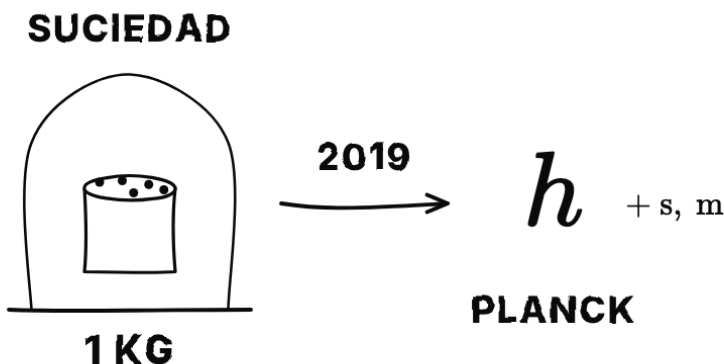
$$d = 299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \frac{1}{299\,792\,458} \text{ s} = 1 \text{ m}$$

SE CANCELAN

1 m

Por qué la luz da justo un metro

Ahora el kilogramo (kg). Antes era la masa de un cilindro de platino e iridio, guardado junto a la antigua barra del metro en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas, cerca de París. Había copias exactas en otros lugares, entre ellos el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología, el NIST, en Gaithersburg (Maryland), cerca de Washington. Cualquier otra masa podía remontarse al final a una comparación con ese cilindro. Pero, aunque el cilindro resistía la corrosión, partículas del aire se pegaban a su superficie y cambiaban poco a poco su masa. En mayo de 2019 los científicos adoptaron una definición más estable, basada en el segundo, el metro y la constante de Planck, h , un valor cuántico que relaciona la energía de una partícula de luz con su frecuencia. El kilogramo de su báscula de cocina descansa ahora, a través de una cadena de comparaciones, en una constante de la naturaleza y no en un trozo de metal.



Cómo se define el kilogramo

La cuarta unidad fundamental, el amperio para la corriente eléctrica, llegará mucho más adelante, con la electricidad y el magnetismo. Las primeras partes del libro tratan de mecánica, fluidos, calor y ondas, y ahí toda magnitud puede construirse solo con longitud, masa y tiempo. Dicho de otro modo, tres unidades, el metro, el kilogramo y el segundo, nos llevan por la primera mitad de la física.

Para recordar

El metro pasó de ser una fracción del tamaño de la Tierra a una barra grabada, a la luz del criptón y a la distancia que recorre la luz en $1/299\,792\,458$ de segundo. Como $d = ct$, esa definición hace que la velocidad de la luz sea exactamente $299\,792\,458$ m/s. El kilogramo era un cilindro de metal que cambiaba poco a poco; desde 2019 se define a partir del segundo, el metro y la constante de Planck. Para la mecánica, los fluidos, el calor y las ondas, bastan la longitud, la masa y el tiempo.

Preguntas

1. Como el metro se define mediante la luz, ¿qué cambiaría una medición más exacta de la velocidad de la luz?
 - a. El número $299\,792\,458$
 - b. La longitud del metro
 - c. Solo la precisión con que los laboratorios pueden marcar un metro
 - d. La duración del segundo
2. En $d = ct$ con $t = 1/299\,792\,458$ s, ¿por qué d es exactamente un metro?
 - a. Porque los números grandes se cancelan y queda 1 m
 - b. Porque la luz es muy rápida
 - c. Porque un segundo es corto
 - d. Porque el metro era una barra en París

3. ¿Qué problema tenía el kilogramo de platino e iridio?
- a. Se corroía deprisa
 - b. Tenía un tamaño equivocado
 - c. Las partículas del aire se le pegaban y cambiaban poco a poco su masa
 - d. Se perdió en 2019
4. ¿Qué unidades bastan para la mecánica, los fluidos, el calor y las ondas?
- a. Solo el amperio
 - b. El metro y el amperio
 - c. Las cuatro, incluido el amperio
 - d. El metro, el kilogramo y el segundo

Respuestas

1. **c)** La velocidad de la luz es ahora exacta por definición, así que el número no puede cambiar; una medición mejor solo hace más fácil marcar el metro con precisión.
2. **a)** $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$ por $1/299\,792\,458\text{ s}$ da exactamente 1 m.
3. **c)** Aunque resistía la corrosión, el cilindro acumulaba partículas del aire que cambiaban poco a poco su masa.
4. **d)** En estos primeros temas, toda magnitud puede construirse con longitud, masa y tiempo.

Ejemplos resueltos

La distancia de la luz en un tiempo dado Usando $d = ct$ con $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$, ¿qué distancia recorre la luz en $1/299\,792\,458\text{ s}$?

La distancia es igual a la velocidad por el tiempo.

$$d = 299\,792\,458 \text{ m/s} \times 1/299\,792\,458 \text{ s.}$$

Los números se cancelan y los segundos se cancelan, quedando metros.

Respuesta: exactamente 1 m

Ejercicios

1. Usando $d = ct$ y $c \approx 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$, ¿qué distancia recorre la luz en 0,0010 s?

Pista: Multiplique la velocidad por el tiempo.

Respuesta: $3,0 \times 10^5 \text{ m}$, o 300 km: $3,00 \times 10^8 \times 0,0010 = 3,0 \times 10^5$.

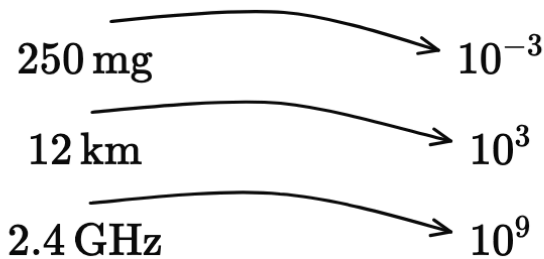
2. En 1791 el metro era una diezmillonésima de la distancia del ecuador al Polo Norte. ¿Cuál era esa distancia en kilómetros según esta definición?

Pista: Esa distancia son diez millones de metros.

Respuesta: 10 000 km: 10 000 000 m divididos entre 1000 m por km.

Prefijos y órdenes de magnitud

La etiqueta de un medicamento dice doscientos cincuenta miligramos. El mapa de su teléfono dice doce kilómetros. La caja de un router dice dos coma cuatro gigahercios. Tres prefijos distintos, mili, kilo y giga, y cada uno es simplemente una potencia de diez pegada a una unidad.



$$100 \text{ cm} = 1 \text{ m}, \quad 1000 \text{ m} = 1 \text{ km}$$

$$12 \text{ in} = 1 \text{ ft}, \quad 5280 \text{ ft} = 1 \text{ mi}$$

Prefijos en etiquetas cotidianas

Las unidades del SI pertenecen al sistema métrico, cómodo para la ciencia y la ingeniería porque sus unidades suben y bajan en factores de diez. Cada paso de conversión es siempre una potencia de diez: cien centímetros en un metro, mil metros en un kilómetro. En las

unidades tradicionales que aún se usan en Estados Unidos, los pasos son irregulares: doce pulgadas en un pie, cinco mil doscientos ochenta pies en una milla.

La tabla del libro da a cada prefijo un símbolo y un valor. Kilo, k, es 10^3 , mil; así que $1 \text{ km} = 10^3 \text{ m}$, unas seis décimas de milla. Mili, m, es 10^{-3} , una milésima; así que un milímetro es una milésima de metro, más o menos la altura de una pulga hasta los hombros. Giga, G, es 10^9 ; un gigahercio es una frecuencia típica de microondas. Mega, M, es 10^6 , y micro, μ , es 10^{-6} . Centi, c, es 10^{-2} , así que un centímetro, más o menos el grosor de la yema de un dedo, es una centésima de metro. En los extremos, exa, 10^{18} , da el exámetro, más o menos la distancia que recorre la luz en un siglo, y atto, 10^{-18} , da el attosegundo, más o menos el tiempo que tarda la luz en cruzar un átomo. En medio, el femtómetro, 10^{-15} m , es el tamaño de un protón.

exa	E	10^{18}
giga	G	10^9
mega	M	10^6
kilo	k	10^3

centi	c	10^{-2}
mili	m	10^{-3}
micro	μ	10^{-6}
femto	f	10^{-15}
atto	a	10^{-18}

Prefijos métricos

¿Cómo funciona un prefijo en un cálculo? En palabras: sustituya el prefijo por su potencia de diez y multiplique. Para el medicamento: $250 \text{ mg} = 250 \times 10^{-3} \text{ g} = 0,250 \text{ g}$, un cuarto de gramo. Para el mapa: $12 \text{ km} = 12 \times 10^3 \text{ m} = 12 \text{ 000 m}$. Dicho de otro modo, un prefijo es solo una abreviatura de una potencia de diez, y siempre puede desplegarse.

prefijo $\rightarrow 10^n$

$$250 \text{ mg} = 250 \times 10^{-3} \text{ g} = 0.250 \text{ g}$$

$$12 \text{ km} = 12 \times 10^3 \text{ m} = 12\,000 \text{ m}$$

nm: óptica

m: obras

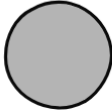
km: vuelos

Desplegar un prefijo

La gran ventaja es que una sola unidad sirve para un intervalo enorme. Los metros sirven para la construcción, los kilómetros para los viajes en avión y los nanómetros, 10^{-9} m , para el diseño de instrumentos ópticos. No hay que inventar unidades nuevas para cada tarea.

Las potencias de diez también miden la escala de un número, su orden de magnitud. Cualquier número puede escribirse como un número por una potencia de diez. $800 = 8 \times 10^2$, y $450 = 4,5 \times 10^2$. Ambos llevan el factor 10^2 , así que comparten el mismo orden de magnitud. El orden de magnitud es una estimación aproximada: le dice el tramo de la escalera de dieces, no el peldaño exacto.

$$\left. \begin{array}{l} 800 = 8 \times 10^2 \\ 450 = 4.5 \times 10^2 \end{array} \right\} \text{ MISMO ORDEN}$$

•	$\frac{10^9}{10^{-10}} = 10^{19}$	
átomo 10^{-10} m		Sol 10^9 m

Órdenes de magnitud

Ahora, una comparación a lo largo de la escalera. Un átomo mide del orden de 10^{-10} m; el Sol, del orden de 10^9 m. Para comparar, divida: $10^9 / 10^{-10} = 10^{19}$. La regla que hay detrás es que al dividir potencias de diez se restan sus exponentes: nueve menos menos diez es diecinueve. Así que el Sol es unos diecinueve órdenes de magnitud más ancho que un átomo, diez trillones de veces.

Pruébalo

Tome una regla en milímetros y una cinta métrica larga. Mida la uña del pulgar en milímetros y luego la longitud de su habitación en metros. Escriba ambas en metros como un número por una potencia de diez. Cuente cuántas potencias de diez las separan: normalmente tres o cuatro.

El libro cierra con una nota sobre el futuro de los patrones. Como la materia está hecha de átomos, a los físicos les gustaría sobre todo tener unidades basadas en cosas diminutas e inmutables de la naturaleza, como la velocidad de la luz. El tiempo ya lo está: el segundo se apoya en las oscilaciones del átomo de cesio. La longitud se basó en su día en la longitud de onda de la luz de cierto átomo, y ahora en la velocidad de la luz, más precisa. Si la masa de los átomos, o de una esfera de silicio fabricada con cuidado, puede medirse con más precisión que el patrón del kilogramo, la masa podría seguir el mismo camino. La carga eléctrica quizá se base algún día en las cargas de electrones y protones, aunque de momento la corriente y la carga están ligadas a corrientes grandes y a las fuerzas entre cables.

Para recordar

Cada prefijo métrico representa una potencia de diez: kilo es diez al cubo, mili diez a la menos tres, giga diez a la nueve. Para usar un prefijo, sustitúyalo por su potencia de diez: 250 mg son 0,250 g, y 12 km son 12 000 m. El orden de magnitud de un número es su potencia de diez: 800 y 450 son ambos del orden de diez al cuadrado. Al dividir potencias de diez se restan los exponentes, así que el Sol, diez a la nueve metros, es diecinueve órdenes de magnitud más ancho que un átomo, diez a la menos diez. Los físicos aspiran a basar todas las unidades en cosas diminutas e inmutables; el segundo ya se apoya en el átomo de cesio.

Preguntas

1. ¿Cómo se usa un prefijo métrico en un cálculo?
 - a. Sumando al número la potencia de diez del prefijo
 - b. Sustituyendo el prefijo por su potencia de diez y multiplicando
 - c. Dividiendo el número entre el símbolo del prefijo
 - d. Ignorándolo, ya que los prefijos son solo nombres
2. ¿Por qué 800 y 450 comparten el mismo orden de magnitud?
 - a. Ambos llevan el factor 10^2
 - b. Ambos son menores que 1000
 - c. Ambos terminan en cero
 - d. Ambos son divisibles entre 50

3. ¿Qué regla da $10^9 / 10^{-10} = 10^{19}$?
- a. Al dividir potencias de diez se multiplican los exponentes
 - b. Al dividir potencias de diez se suman las bases
 - c. Al dividir potencias de diez se restan los exponentes: $9 - (-10) = 19$
 - d. Al dividir potencias de diez siempre sale 10^1
4. ¿Cuál es la gran ventaja de los prefijos para el trabajo cotidiano y científico?
- a. Hacen los números más precisos
 - b. Sustituyen la necesidad de unidades
 - c. Solo funcionan para longitudes
 - d. Una sola unidad sirve para un intervalo enorme, así que no hacen falta unidades nuevas

Respuestas

1. **b)** Un prefijo es una abreviatura de una potencia de diez: $250 \text{ mg} = 250 \times 10^{-3} \text{ g}$.
2. **a)** $800 = 8 \times 10^2$ y $450 = 4,5 \times 10^2$; la potencia de diez compartida fija el orden de magnitud.
3. **c)** Cuando se dividen potencias de diez, se restan sus exponentes.
4. **d)** Los metros, los kilómetros y los nanómetros son una sola unidad con distintos prefijos, que sirve para la construcción, los viajes en avión y la óptica.

Ejemplos resueltos

Comparar un átomo con el Sol Un átomo mide unos 10^{-10} m y el Sol unos 10^9 m . ¿Cuántos órdenes de magnitud los separan?

Divida el mayor entre el menor: $10^9 / 10^{-10}$.

Al dividir potencias de diez se restan los exponentes: $9 - (-10) = 19$.

Así que la razón es 10^{19} .

Respuesta: 19 órdenes de magnitud

Ejercicios

1. Escriba 2,4 GHz en hercios, como potencia de diez.

Pista: Giga es 10^9 .

Respuesta: $2,4 \times 10^9$ Hz: sustituya G por 10^9 .

2. Escriba 0,075 m en milímetros y 3500 m en kilómetros.

Pista: $1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$ y $1 \text{ km} = 10^3 \text{ m}$.

Respuesta: 75 mm y 3,5 km: $0,075 \div 10^{-3} = 75$, y $3500 \div 10^3 = 3,5$.

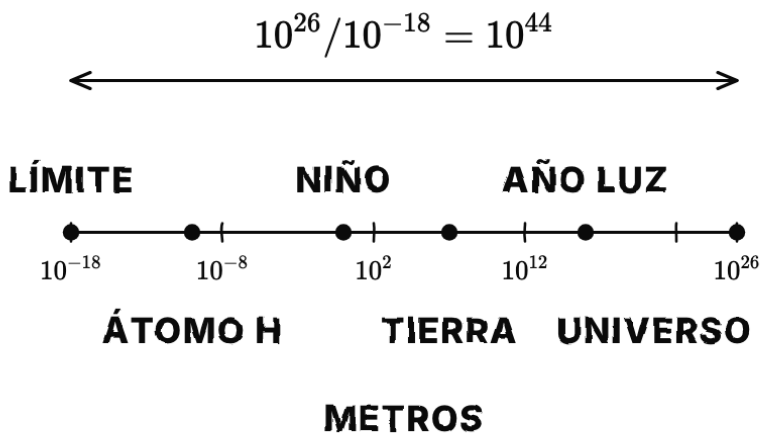
3. Un virus mide unos 10^{-7} m y una persona alrededor de 1 m de altura (10^0 m). ¿Cuántos órdenes de magnitud los separan?

Pista: Divida y reste los exponentes.

Respuesta: 7: $10^0 / 10^{-7} = 10^7$, ya que $0 - (-7) = 7$.

La amplitud de la naturaleza y el arte de convertir

Dos fotografías abren esta sección. En la primera, un diminuto fitoplancton flota entre cristales de hielo en el mar antártico; va desde unos pocos micrómetros, 10^{-6} m cada uno, hasta unos dos milímetros de largo. En la segunda, cúmulos de galaxias chocan a dos mil cuatrocientos millones de años luz. Entre una mota de plancton y un choque de galaxias está toda la amplitud de la física, y la tabla de longitudes, masas y tiempos del libro le permite recorrerla.



Cuarenta y cuatro órdenes de magnitud

Estos son algunos pasos de esa tabla, todos como potencias de diez. Para la longitud: el detalle más pequeño que podemos observar hoy, 10^{-18} m; un átomo de hidrógeno, 10^{-10} m; un niño de cuatro años, alrededor de 1 m; la Tierra, 10^7 m de diámetro; un año luz, 10^{16} m; el borde del universo conocido, 10^{26} m. Para la masa: un electrón, $9,11 \times 10^{-31}$ kg; un mosquito, 10^{-5} kg; una persona, 10^2 kg; la Tierra, $5,97 \times 10^{24}$ kg; el Sol, $1,99 \times 10^{30}$ kg. Para el tiempo: una oscilación de la luz visible, 10^{-15} s; un latido, alrededor de 1 s; un día, $8,64 \times 10^4$ s; un año, $3,16 \times 10^7$ s; la edad del universo, unos 10^{18} s. De la longitud observable más pequeña al borde del universo hay $10^{26} / 10^{-18} = 10^{44}$: cuarenta y cuatro órdenes de magnitud. Dicho de otro modo, ninguna unidad cotidiana podría con todo esto; necesitamos prefijos, y necesitamos una forma segura de pasar de unas unidades a otras.

Cambiar de unidades también es una necesidad cotidiana. Un libro de cocina europeo puede dar la leche en litros cuando su jarra medidora está marcada en tazas. Unas indicaciones para ir a pie pueden dar pies cuando usted quiere millas. El método del libro sirve para todo esto, y empieza con un caso sencillo: convertir 80 metros en kilómetros.

$$80 \text{ m} \rightarrow \text{km}$$

$$\frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}}$$

$$12 \text{ in} = 1 \text{ ft}$$

$$100 \text{ cm} = 1 \text{ m}$$

$$60 \text{ s} = 1 \text{ min}$$

$$80 \text{ m} \times \frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}} = 0.080 \text{ km}$$

Convertir 80 m en km

Paso uno: escriba la unidad que tiene, metros, y la unidad que quiere, kilómetros. Paso dos: busque un factor de conversión, una razón que diga cuántas unidades de un tipo equivalen a otra. Hay 12 pulgadas en un pie, 100 centímetros en un metro, 60 segundos en un minuto y 1000 metros en un kilómetro. Paso tres: multiplique lo que tiene por el factor, colocado de modo que la unidad no deseada se cancele: $80 \text{ m} \times 1 \text{ km}/1000 \text{ m} = 0,080 \text{ km}$.

Veamos cada parte de esa línea. El factor $1 \text{ km}/1000 \text{ m}$ tiene la misma longitud arriba y abajo, así que vale exactamente uno. Multiplicar por uno nunca cambia la cantidad; solo cambia cómo se escribe. Los metros de 80 m y los metros bajo la línea se cancelan, como se cancela un número que está encima y debajo de una raya de fracción, así que

solo quedan kilómetros. Los números hacen el resto: 80 entre 1000 es 0,080. Esta forma de dejar que las unidades guíen y comprueben el cálculo se llama análisis dimensional. Si las unidades no se cancelan como quiere, el factor está al revés, y sabe que algo va mal antes de terminar.

$$\frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}} = 1$$

$$80 \text{ m} \times \frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}} = 0.080 \text{ km}$$

m se cancela

ANÁLISIS DIMENSIONAL

$$80 \text{ m} \times \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} = 80\,000 \frac{\text{m}^2}{\text{km}} \quad \times$$

El factor vale uno

Pruébelo

Escriba «80 m × 1 km / 1000 m» en un papel. Tache la «m» de arriba de la línea y la «m» de abajo. Lea lo que queda: 80 por 1 km entre 1000. Ahora pruebe mal, con «1000 m / 1 km»: no se cancela nada, y le quedan metros cuadrados por kilómetro, que claramente no es una distancia en kilómetros.

El mismo método sirve para cualquier par de unidades. El conversor de medidas de su teléfono funciona exactamente así: multiplica por una razón guardada que vale uno. Para una lista más completa de factores, el libro remite a su apéndice C.

Con estas herramientas, los números enormes de la tabla dejan de asustar. Los prefijos los reducen a tamaños manejables, los órdenes de magnitud permiten compararlos de un vistazo y los factores de conversión permiten pasar de una unidad a otra sin perderse.

Para recordar

La tabla del libro va del detalle observable más pequeño, diez a la menos dieciocho metros, al borde del universo, diez a la veintiséis metros: cuarenta y cuatro órdenes de magnitud. Un factor de conversión es una razón entre cantidades iguales en unidades distintas, como 1 km por 1000 m. Multiplique por el factor de modo que la unidad no deseada se cancele: $80 \text{ m} \times 1 \text{ km}/1000 \text{ m} = 0,080 \text{ km}$. El factor vale uno, así que la cantidad no cambia; solo cambia su unidad. Dejar que las unidades se cancelen para guiar y comprobar un cálculo se llama análisis dimensional.

Preguntas

1. ¿Por qué el factor 1 km/1000 m no cambia la longitud que se convierte?
 - a. Porque tiene la misma longitud arriba y abajo, así que vale uno
 - b. Porque 1000 es un número redondo
 - c. Porque los kilómetros son unidades fundamentales
 - d. Porque solo se usa una vez
2. ¿Qué es el análisis dimensional?
 - a. Medir las dimensiones de un objeto
 - b. Dejar que las unidades guíen y comprueben un cálculo
 - c. Redondear al número correcto de cifras

- d. Comparar órdenes de magnitud
3. Si por error multiplica 80 m por 1000 m/1 km, ¿qué le indica que algo va mal?
- a. La respuesta es demasiado pequeña
 - b. La respuesta es negativa
 - c. Las unidades no se cancelan y obtiene metros cuadrados por kilómetro
 - d. La respuesta tiene demasiadas cifras
4. ¿Cuántos órdenes de magnitud separan la longitud observable más pequeña (10^{-18} m) del borde del universo (10^{26} m)?
- a. 8
 - b. 18
 - c. 26
 - d. 44

Respuestas

1. **a)** Arriba y abajo hay la misma longitud, así que el factor vale uno; multiplicar por uno solo cambia cómo se escribe la cantidad.
2. **b)** Dejar que las unidades se cancelen para guiar y comprobar el cálculo se llama análisis dimensional.
3. **c)** Con el factor al revés no se cancela nada, y quedan unidades que claramente no son kilómetros.
4. **d)** $10^{26} / 10^{-18} = 10^{44}$, ya que $26 - (-18) = 44$.

Ejemplos resueltos

De metros a kilómetros Convierta 80 m a kilómetros.

Tenemos metros y queremos kilómetros.

El factor de conversión es $1 \text{ km}/1000 \text{ m}$.

$80 \text{ m} \times 1 \text{ km}/1000 \text{ m}$: los metros se cancelan y quedan km.

$80 \div 1000 = 0,080$.

Respuesta: 0,080 km

Ejercicios

1. Convierta 4,5 km a metros.

Pista: Multiplique por $1000 \text{ m}/1 \text{ km}$ para que se cancelen los km.

Respuesta: 4500 m: $4,5 \text{ km} \times 1000 \text{ m}/1 \text{ km}$.

2. Convierta 250 cm a metros.

Pista: Use $1 \text{ m}/100 \text{ cm}$.

Respuesta: 2,5 m: $250 \text{ cm} \times 1 \text{ m}/100 \text{ cm}$.

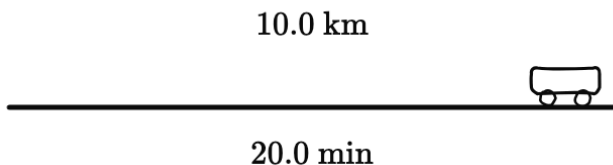
3. Un día son $8,64 \times 10^4 \text{ s}$. ¿Cuántos segundos hay en 10 días, como potencia de diez?

Pista: Multiplique por 10, lo que suma uno al exponente.

Respuesta: $8,64 \times 10^5 \text{ s}$: $10 \times 8,64 \times 10^4 \text{ s}$.

Un trayecto corto a casa

Recorre en coche los 10,0 km de su centro de estudios a casa, y el reloj dice que el viaje duró 20,0 min. ¿Cuál fue su velocidad media? El libro la pide dos veces: primero en kilómetros por hora, km/h, y luego en metros por segundo, m/s. El plan es sencillo: calcular la velocidad en las unidades dadas y luego convertir multiplicando por el factor que cancela la unidad no deseada y deja la deseada en su lugar.



$$v = \frac{d}{t} \quad \frac{10.0 \text{ km}}{20.0 \text{ min}} = 0.500 \frac{\text{km}}{\text{min}}$$

$$0.500 \frac{\text{km}}{\cancel{\text{min}}} \times \frac{60 \cancel{\text{min}}}{1 \text{ h}} = 30.0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Un trayecto a casa: 30,0 km/h

El paso uno es la definición: velocidad media = distancia/tiempo. En palabras: cuánto ha recorrido, repartido entre el tiempo que ha

tardado. Paso dos: ponga los números. velocidad media = $10,0 \text{ km} / 20,0 \text{ min} = 0,500 \text{ km/min}$. Paso tres: pase los minutos a horas. El factor que cancela los minutos y deja las horas es $60 \text{ min}/1 \text{ h}$. $0,500 \text{ km/min} \times 60 \text{ min/h} = 30,0 \text{ km/h}$. Los minutos del denominador de la primera fracción cancelan los minutos del numerador de la segunda, y quedan kilómetros por hora.

Ahora, las comprobaciones en que insiste el libro. Primera: ¿se cancelaron bien las unidades? Si hubiera puesto el factor al revés, $\text{km/min} \times 1 \text{ h}/60 \text{ min} = (1/60) \text{ km}\cdot\text{h}/\text{min}^2$: kilómetros hora por minuto al cuadrado, que claramente no es una velocidad en kilómetros por hora. Segunda: ¿es la unidad final la que se pedía? Sí, kilómetros por hora. Tercera, las cifras: 10,0 y 20,0 tienen tres cifras significativas cada uno, así que la respuesta, 30,0, también tiene tres. El 60 no cuenta, porque una hora se define como exactamente sesenta minutos; ese factor es perfectamente preciso. Cuarta: ¿es razonable la respuesta? Veinte minutos son un tercio de hora, así que en una hora entera recorrería tres veces diez kilómetros, es decir, treinta. Treinta kilómetros por hora es una velocidad que podría ver en el velocímetro de su coche en una calle tranquila de la ciudad, así que también pasa la prueba del sentido común.

El apartado (b) pide metros por segundo. Empiece con $30,0 \text{ km/h}$, que necesita dos factores: uno que pasa horas a segundos, $1 \text{ h}/3600 \text{ s}$, y otro que pasa kilómetros a metros, $1000 \text{ m}/1 \text{ km}$. $30,0 \text{ km/h} \times 1 \text{ h}/3600 \text{ s} \times 1000 \text{ m}/1 \text{ km} = 8,33 \text{ m/s}$. Las horas cancelan las horas, los kilómetros cancelan los kilómetros, y quedan metros por segundo. Con números sencillos: treinta por mil son treinta mil, entre tres mil seiscientos es más o menos ocho coma treinta y tres.

$$30.0 \text{ km/h} \rightarrow \text{m/s}$$

$$\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \qquad \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}}$$

$$30.0 \frac{\cancel{\text{km}}}{\cancel{\text{h}}} \times \frac{1 \cancel{\text{h}}}{3600 \text{ s}} \times \frac{1000 \text{ m}}{1 \cancel{\text{km}}} = 8.33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\frac{500 \text{ m}}{60 \text{ s}} \approx 8.33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

OTRO CAMINO

$$\text{a pie: } 1.4 \text{ m/s} \approx 5 \text{ km/h}$$

De km/h a m/s

Hay más de un camino. Si partiera de 0,500 km/min, usaría otros factores, sesenta segundos por minuto y mil metros por kilómetro, pero llegaría a los mismos 8,33 m/s. Compruébelo: medio kilómetro son quinientos metros, y quinientos entre sesenta es más o menos ocho coma treinta y tres. Dicho de otro modo, mientras se cancele toda unidad que no quiere, cualquier camino correcto lleva a la misma respuesta.

Pruébalo

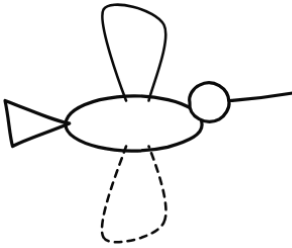
La próxima vez que camine a paso vivo, cronométrese en cien metros medidos con el cronómetro del teléfono. Si tarda unos setenta y dos segundos, divida cien entre setenta y dos: aproximadamente uno coma cuatro metros por segundo. Luego pase a kilómetros por hora: multiplique por tres mil seiscientos segundos por hora y divida entre mil metros por kilómetro. Debería obtener unos cinco kilómetros por hora, un ritmo típico de paseo.

¿Por qué todas las respuestas se dieron exactamente con tres cifras? ¿Por qué no anotar todo lo que muestra la calculadora? El libro deja esa pregunta para la sección sobre exactitud, precisión y cifras significativas.

Una breve nota sobre unidades curiosas. Muchas unidades son poco conocidas: el firkin, por ejemplo, se usó para medir cerveza, y un firkin son unos treinta y cuatro litros. El libro sugiere buscar antiguos pesos y medidas, como el grano de cebada, y averiguar cómo se relaciona cada uno con las unidades del SI.



1 firkin $\approx$ 34 L



50 ALETEOS/S

$$1 \text{ ms} = 10^{-3} \text{ s}$$

$$\frac{1 \text{ s}}{50} = 0.02 \text{ s} = 20 \text{ ms}$$

El aleteo de un colibrí

Por último, elegir una unidad sensata para un suceso rápido. Algunos colibríes baten las alas más de cincuenta veces por segundo. Una científica que cronometra un aleteo usa la unidad fundamental de tiempo, el segundo, pero necesita una versión más pequeña: el milisegundo, 10^{-3} s. En números: $1 \text{ s} / 50 = 0,02 \text{ s} = 20 \text{ ms}$ por aleteo.

Para recordar

La velocidad media es la distancia dividida entre el tiempo: 10,0 km en 20,0 min son 0,500 km/min. Multiplicar por 60 min por hora cancela los minutos y da 30,0 km/h; luego 1 h por 3600 s y 1000 m por km dan 8,33 m/s. Compruebe cada conversión: las unidades se cancelan, la unidad final es la correcta, las cifras significativas concuerdan con los datos y la respuesta es razonable. Los factores exactos, como sesenta minutos en una hora, no limitan las cifras significativas. Para sucesos rápidos elija una unidad pequeña: el aleteo de un colibrí dura unos veinte milisegundos.

Preguntas

1. ¿Por qué 60 min/h es el factor correcto para pasar de km/min a km/h?
 - a. Porque hace el número más grande
 - b. Porque sus minutos cancelan los minutos de km/min y dejan km/h
 - c. Porque hay 60 segundos en un minuto
 - d. Porque 60 tiene tres cifras significativas
2. ¿Qué mostraría que escribió el factor al revés, como 1 h/60 min?
 - a. Las unidades salen como km·h/min², no km/h
 - b. La respuesta sale negativa

- c. La respuesta tiene demasiadas cifras
 - d. La respuesta es exactamente 30
3. ¿Por qué la respuesta 30,0 km/h tiene tres cifras significativas?
- a. Porque 60 tiene dos cifras
 - b. Porque las calculadoras dan tres cifras
 - c. Porque 10,0 y 20,0 tienen tres cada uno, y el 60 exacto no la limita
 - d. Porque las velocidades siempre se dan con tres cifras
4. Partiendo de 0,500 km/min en lugar de 30,0 km/h, ¿qué respuesta obtiene en m/s?
- a. $8,33 \times 60$ m/s
 - b. 0,500 m/s
 - c. 30,0 m/s
 - d. Los mismos 8,33 m/s, por otro camino

Respuestas

1. **b)** Los minutos del denominador de km/min cancelan los minutos del numerador de 60 min/h, y quedan kilómetros por hora.
2. **a)** Al revés, no se cancela nada y obtiene kilómetros hora por minuto al cuadrado, que claramente no es una velocidad en km/h.
3. **c)** Los datos tienen tres cifras significativas cada uno; el 60 es exacto, porque una hora se define como sesenta minutos.
4. **d)** Quinientos metros cada sesenta segundos son unos 8,33 m/s; cualquier camino correcto lleva al mismo resultado.

Ejemplos resueltos

Un trayecto corto a casa Recorre 10,0 km en 20,0 min. Halle la velocidad media en km/h y en m/s.

Velocidad media = distancia/tiempo = $10,0 \text{ km} / 20,0 \text{ min} = 0,500 \text{ km/min}$.

Multiplique por 60 min/h: $0,500 \text{ km/min} \times 60 \text{ min/h} = 30,0 \text{ km/h}$.

Multiplique por 1 h/3600 s y 1000 m/1 km: $30,0 \times 1000 \div 3600 = 8,33$.

Compruebe: las unidades se cancelan, las unidades finales son correctas, tres cifras significativas, y 30 km/h es razonable.

Respuesta: 30,0 km/h y 8,33 m/s

Ejercicios

1. Una corredora recorre 1,50 km en 6,00 min. ¿Cuál es su velocidad media en km/h?

Pista: Halle primero km/min y luego multiplique por 60 min/h.

Respuesta: 15,0 km/h: $1,50 \div 6,00 = 0,250 \text{ km/min}$, y $0,250 \times 60 = 15,0 \text{ km/h}$.

2. Convierta 90,0 km/h a m/s.

Pista: Multiplique por 1000 m/km y por 1 h/3600 s.

Respuesta: 25,0 m/s: $90,0 \times 1000 \div 3600 = 25,0$.

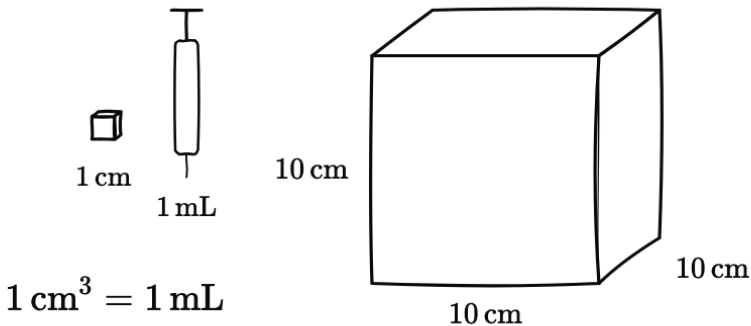
3. Una mosca bate las alas unas 200 veces por segundo. ¿Cuánto dura un aleteo en milisegundos?

Pista: Divida un segundo entre 200 y luego use $1 \text{ s} = 1000 \text{ ms}$.

Respuesta: 5 ms: $1 \text{ s} \div 200 = 0,005 \text{ s}$, que son 5 ms.

El volumen a partir de la longitud, y dos maneras de estar bien

Llene una jeringa pequeña de medicamento hasta la marca de un mililitro y vacíela en un cubo de plástico hueco de un centímetro de lado. Llena el cubo exactamente. No es casualidad, y el libro lo usa como una comprobación rápida de lo entendido.



$$(10 \text{ cm})^3 = 1000 \text{ cm}^3 = 1 \text{ L}$$

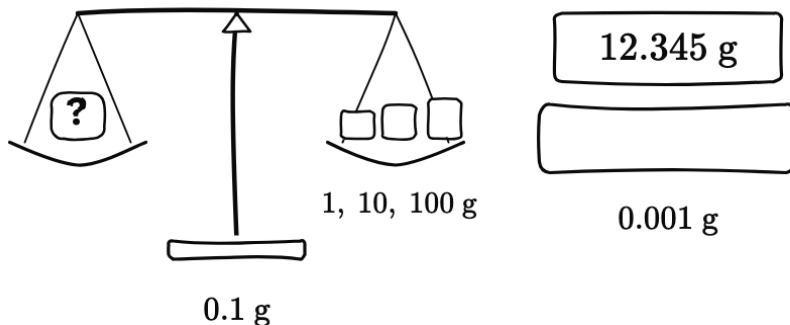
Un litro es un cubo de 10 cm

El hecho es: $1 \text{ cm}^3 = 1 \text{ mL}$. ¿Qué nos dice esto de las unidades métricas? Que la unidad de volumen, el litro, se construye a partir de la unidad de longitud, el metro; el tamaño de un mililitro depende del

tamaño de un centímetro. Dicho de otro modo, el volumen es una unidad derivada. Este es el cálculo que hay detrás. Un cubo de diez centímetros de lado tiene un volumen de $(10\text{ cm})^3 = 1000\text{ cm}^3$, y eso es exactamente un litro. Así que $1\text{ L} = 1000\text{ cm}^3$, y dividiendo ambos lados entre mil se obtiene un mililitro por centímetro cúbico. El vasito que viene con un jarabe para la tos, marcado en mililitros, en realidad mide pequeños cubos de centímetros.

Ahora, una sección nueva: exactitud, precisión y cifras significativas. Empieza con dos imágenes de pesaje. La primera es una balanza de dos platillos: el objeto desconocido va en un platillo, y en el otro se ponen masas metálicas de un gramo, diez gramos, cien gramos, hasta que la barra entre ambos queda nivelada, lo que significa que las masas son iguales. La segunda es una báscula digital, que ha sustituido a muchas de esas balanzas. Una balanza mecánica quizá solo lea hasta la décima de gramo, pero muchas básculas digitales leen hasta la milésima. Su báscula de cocina, que lee hasta el gramo, queda muy por debajo de ambas en precisión, y aun así basta de sobra para la harina.

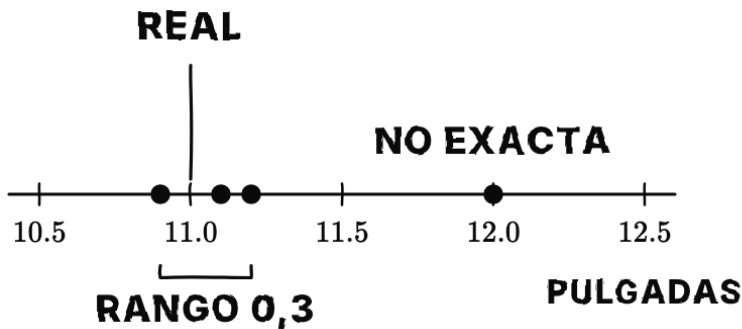
NIVELADA



Balanza y báscula digital

La ciencia se basa en la observación y el experimento, y por tanto en mediciones. Toda medición puede juzgarse de dos maneras distintas.

La primera es la exactitud: lo cerca que está una medición del valor correcto. Tome un folio estándar de impresora, vendido como de 11,0 pulgadas de largo. Lo mide tres veces y obtiene 11,1, 11,2 y 10,9 pulgadas. Cada lectura está cerca de las 11,0 pulgadas correctas, así que las mediciones son bastante exactas. Una lectura de 12 pulgadas no sería exacta.



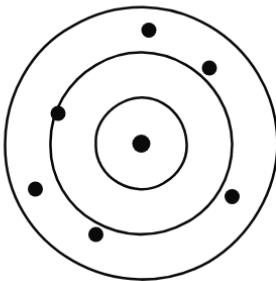
Exacto y preciso

La segunda es la precisión: lo bien que concuerdan entre sí las mediciones repetidas hechas en las mismas condiciones. Una forma de juzgar la precisión es el rango: $\text{rango} = \text{mayor} - \text{menor}$. Para el papel, $\text{rango} = 11,2 \text{ pulg.} - 10,9 \text{ pulg.} = 0,3 \text{ pulg.}$ Las lecturas difieren como mucho en tres décimas de pulgada, así que son relativamente precisas. Si en cambio hubiera medido 10,9, 11,1 y 11,9 pulgadas, el rango sería $11,9 - 10,9 = 1,0$ pulgadas, más del triple de ancho, y las mediciones no serían muy precisas. Dicho de otro modo, la exactitud tiene que ver con el blanco; la precisión, con la dispersión.

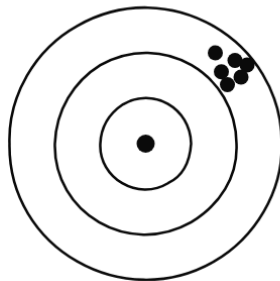
Pruébelo

Pese la misma manzana cinco veces en una báscula de cocina, quitándola y volviéndola a poner cada vez. Anote cada lectura y reste la menor de la mayor: ese rango es la precisión de su báscula para esta tarea. Si tiene una segunda báscula mejor, pese también la manzana en ella y vea cuánto se aleja su primera media de esa lectura: es una comprobación aproximada de la exactitud.

● = RESTAURANTE



**EXACTO,
NO PRECISO**



**PRECISO,
NO EXACTO**

Dos dianas de GPS

Las lecturas del papel eran exactas y precisas a la vez. Pero las dos cualidades pueden separarse, y el libro lo muestra con un sistema de

navegación por satélite que busca un restaurante. Imagine el restaurante en el centro de una diana, y cada intento de localizarlo como un punto negro. En la primera imagen, los puntos están muy separados entre sí, pero centrados cerca del restaurante. Eso es baja precisión con alta exactitud: cada localización se desvía, pero en promedio apuntan al lugar correcto. En la segunda imagen, los puntos se apiñan muy juntos, pero lejos del restaurante. Eso es alta precisión con baja exactitud: el sistema está de acuerdo consigo mismo, pero de acuerdo en el lugar equivocado. Es la diferencia entre el punto del mapa de un teléfono que tiembla alrededor de su posición real y uno que se queda tranquilo en la acera de enfrente.

Para recordar

Un centímetro cúbico es igual a un mililitro, porque el litro se deriva del metro: un cubo de diez centímetros contiene exactamente un litro. La exactitud es la cercanía al valor correcto; la precisión es la cercanía de las mediciones repetidas entre sí. El rango, el mayor menos el menor, es una medida sencilla de la precisión: para el papel, 11,2 menos 10,9 son 0,3 pulgadas. Las mediciones pueden ser exactas pero no precisas, como puntos dispersos alrededor de un blanco, o precisas pero no exactas, como un grupo apretado fuera del blanco. Una báscula digital que lee hasta la milésima de gramo es más precisa que una balanza que lee hasta la décima.

Preguntas

1. ¿Por qué un centímetro cúbico es igual a un mililitro?
 - a. Porque ambas son unidades fundamentales
 - b. Porque el litro se deriva del metro: un cubo de 10 cm contiene exactamente 1 L
 - c. Porque los mililitros se miden con jeringas
 - d. Porque el volumen y la longitud son la misma magnitud
2. Para las lecturas del papel 11,1, 11,2 y 10,9 pulgadas, ¿cuál es el rango?
 - a. 0,3 pulgadas
 - b. 0,1 pulgadas
 - c. 11,0 pulgadas
 - d. 1,0 pulgadas
3. Las localizaciones se apiñan muy juntas pero lejos del restaurante. ¿Qué muestra eso?
 - a. Alta exactitud, baja precisión
 - b. Baja exactitud, baja precisión
 - c. Alta precisión, baja exactitud
 - d. Alta exactitud, alta precisión
4. ¿Cómo se juzgan unas lecturas de 10,9, 11,1 y 11,9 pulgadas para un papel vendido como de 11,0 pulgadas?
 - a. Muy precisas, porque una es igual a 10,9
 - b. Inexactas, porque ninguna es exactamente 11,0
 - c. Precisas, porque su media está cerca de 11
 - d. No muy precisas, porque su rango es de 1,0 pulgadas

Respuestas

1. b) Un cubo de 10 cm de lado contiene 1000 cm^3 , que es 1 L, así que 1 mL es 1 cm^3 .

2. a) Rango = mayor – menor = 11,2 pulgadas – 10,9 pulgadas = 0,3 pulgadas.

3. c) Un grupo apretado indica alta precisión; estar lejos del objetivo indica baja exactitud.

4. d) Un rango de 1,0 pulgadas significa que las lecturas varían de forma importante de una a otra.

Ejemplos resueltos

De litros a centímetros cúbicos Demuestre que $1 \text{ mL} = 1 \text{ cm}^3$, partiendo de un cubo de 10 cm de lado que contiene 1 L.

Volumen del cubo = $(10 \text{ cm})^3 = 1000 \text{ cm}^3$.

Ese cubo contiene 1 L, así que $1 \text{ L} = 1000 \text{ cm}^3$.

Un mililitro es una milésima de litro: divida ambos lados entre 1000.

$1 \text{ mL} = 1 \text{ cm}^3$.

Respuesta: $1 \text{ mL} = 1 \text{ cm}^3$

Ejercicios

1. ¿Cuántos mililitros caben en una caja de $5,0 \text{ cm} \times 4,0 \text{ cm} \times 10,0 \text{ cm}$?

Pista: Halle su volumen en centímetros cúbicos; cada uno es un mililitro.

Respuesta: 200 mL: $5,0 \times 4,0 \times 10,0 = 200 \text{ cm}^3 = 200 \text{ mL}$.

2. Cuatro lecturas de un lápiz dan 17,6, 17,8, 17,5 y 17,7 cm. ¿Cuál es el rango?

Pista: Rango = mayor – menor.

Respuesta: 0,3 cm: $17,8 - 17,5$.

3. ¿Cuántos centímetros cúbicos hay en 2,5 L?

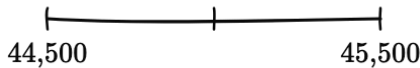
Pista: Use $1 \text{ L} = 1000 \text{ cm}^3$.

Respuesta: 2500 cm^3 ; $2,5 \times 1000$.

Incertidumbre: la advertencia honesta

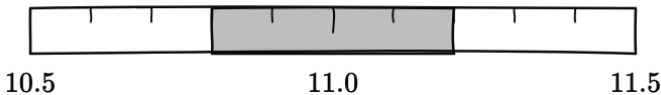
Pregunte a un amigo cuánto ha recorrido su coche y quizá le diga: «Cuarenta y cinco mil millas, quinientas arriba o abajo». Ese «arriba o abajo» es exactamente lo que los físicos llaman incertidumbre.

$$\boxed{45,000} \pm 500 \text{ mi}$$



$$A \pm \delta A$$

$$11 \pm 0.2 \text{ in}$$



$$A \pm \delta A$$

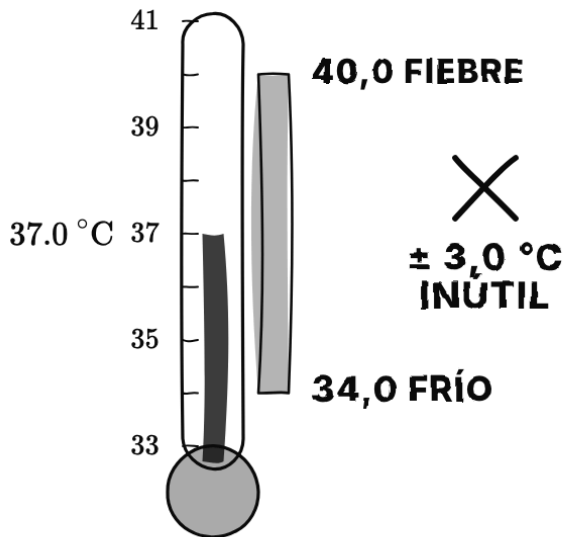
La exactitud y la precisión influyen ambas en la incertidumbre de una medición. La incertidumbre es una medida de cuánto pueden desviarse sus valores medidos de un valor patrón o esperado. Si las mediciones no son muy exactas ni precisas, la incertidumbre es alta. El libro la llama una advertencia sobre sus valores medidos. Para el

coche, la incertidumbre son las quinientas millas: la lectura real puede estar en cualquier punto entre $45\,000 - 500 = 44\,500$ y $45\,000 + 500 = 45\,500$ millas.

La notación es breve. Si una magnitud medida es A , su incertidumbre se escribe δA , y el resultado se anota como $A \pm \delta A$. En palabras: el valor y después la cantidad en que podría estar desviado en cualquier sentido. Para el folio de la parte anterior, $11\text{ pulg.} \pm 0,2\text{ pulg.}$, así que la longitud real está entre $10,8$ y $11,2$ pulgadas. Toda medición lleva algo de incertidumbre; la única pregunta es cuánta.

¿De dónde sale? El libro nombra cuatro fuentes. Primera, los límites del instrumento de medida: la división más pequeña de la regla puede ser $0,1$ pulgadas. Segunda, la habilidad de la persona: quizá ve mal. Tercera, las irregularidades del objeto: un lado del papel puede ser algo más largo que el otro. Cuarta, cualquier otra cosa que afecte al resultado, lo que depende de la situación. Una incertidumbre honesta debe basarse en pensar con cuidado en todo esto.

¿Por qué es tan importante? El caso real del libro es un niño enfermo. Sospecha fiebre y le toma la temperatura; el termómetro marca $37,0^\circ\text{C}$, la temperatura corporal normal. Ahora suponga que la incertidumbre del termómetro fuera de $3,0^\circ\text{C}$. Entonces la temperatura real está entre $37,0 - 3,0 = 34,0^\circ\text{C}$, hipotermia, y $37,0 + 3,0 = 40,0^\circ\text{C}$, una fiebre peligrosamente alta. La lectura no le dice nada de lo que necesita saber, así que el termómetro sería inútil. Un termómetro doméstico solo es útil porque su incertidumbre es mucho menor que los uno o dos grados que separan una temperatura normal de la fiebre. Dicho de otro modo, un instrumento solo es suficientemente bueno cuando su incertidumbre es pequeña comparada con las diferencias que le importan.



Un termómetro inútil

Para recordar

La incertidumbre es cuánto puede desviarse una medición del valor real o esperado; se escribe $A \pm \delta A$. Cuarenta y cinco mil millas, más o menos quinientas, significa cualquier valor entre cuarenta y cuatro mil quinientas y cuarenta y cinco mil quinientas. Procede del instrumento, de la persona, del objeto y de otros factores. Un termómetro con una incertidumbre de tres grados convertiría una lectura normal en cualquier cosa, desde hipotermia hasta fiebre alta, así que sería inútil.

Preguntas

1. ¿Qué le dice escribir un resultado como $A \pm \delta A$?
 - a. Que A se midió dos veces
 - b. El valor A y cuánto podría desviarse en cualquier sentido
 - c. Que A es exactamente correcto
 - d. Que δA es el valor real
2. Un termómetro marca $37,0^\circ\text{C}$ con una incertidumbre de $3,0^\circ\text{C}$. ¿En qué intervalo podría estar la temperatura real?
 - a. De $34,0^\circ\text{C}$ a $40,0^\circ\text{C}$
 - b. De $36,0^\circ\text{C}$ a $38,0^\circ\text{C}$
 - c. De $37,0^\circ\text{C}$ a $40,0^\circ\text{C}$
 - d. Exactamente $37,0^\circ\text{C}$
3. Según la lección, ¿cuándo es un instrumento suficientemente bueno para una tarea?
 - a. Cuando da muchas cifras
 - b. Cuando es digital
 - c. Cuando su incertidumbre es pequeña comparada con las diferencias que le importan
 - d. Cuando fue caro
4. La mala vista de quien lee una regla es un ejemplo de ¿qué fuente de incertidumbre?
 - a. Los límites del instrumento
 - b. Las irregularidades del objeto

c. La situación

d. La habilidad de la persona que mide

Respuestas

1. **b)** Primero va el valor y después la cantidad en que podría desviarse en cualquier sentido.

2. **a)** $37,0 - 3,0 = 34,0$ y $37,0 + 3,0 = 40,0$, de la hipotermia a una fiebre peligrosamente alta.

3. **c)** Un termómetro solo es útil si su incertidumbre es mucho menor que la distancia entre lo normal y la fiebre.

4. **d)** El libro cita la habilidad de la persona, como su vista, como fuente de incertidumbre.

Ejemplos resueltos

Intervalo de una medición con incertidumbre El kilometraje de un coche es de 45 000 millas $\pm$ 500 millas. ¿Entre qué valores está el kilometraje real?

La medición es $A \pm \delta A$ con $A = 45\,000$ y $\delta A = 500$.

Mínimo: $A - \delta A = 45\,000 - 500 = 44\,500$.

Máximo: $A + \delta A = 45\,000 + 500 = 45\,500$.

Respuesta: entre 44 500 y 45 500 millas

Ejercicios

1. Un folio mide 11 pulgadas $\pm$ 0,2 pulgadas. ¿Entre qué longitudes está?

Pista: Reste y sume δA .

Respuesta: Entre 10,8 y 11,2 pulgadas: $11 - 0,2$ y $11 + 0,2$.

2. Un termómetro tiene una incertidumbre de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y marca $38,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
¿Puede decir que está por encima de los $37,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ normales?

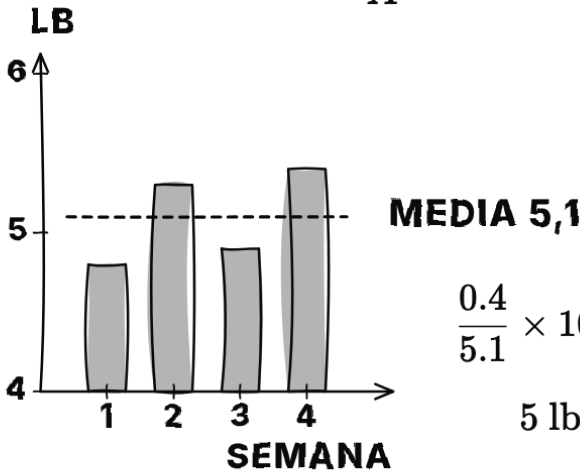
Pista: Halle el intervalo en que podría estar el valor real.

Respuesta: Sí: el valor real está entre $38,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $38,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, muy por encima de $37,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, así que el instrumento es suficientemente bueno para esto.

Incertidumbre porcentual

¿Una incertidumbre de media libra es grande o pequeña? Para un saco de patatas no es nada; para una bolsa de caramelos es enorme. Para juzgar una incertidumbre, hay que compararla con el tamaño de lo que se mide. Esa comparación es la incertidumbre porcentual.

$$\% \text{ inc} = \frac{\delta A}{A} \times 100\%$$



$$\frac{0.4}{5.1} \times 100\% = 8\%$$

$$5 \text{ lb} \pm 8\%$$

$$\frac{0.4}{2.55} \times 100\% \approx 16\%$$

Incertidumbre porcentual de una bolsa de manzanas

El libro la define así: $\% \text{ inc} = \delta A / A \times 100 \%$. Aquí A es el valor medido y δA su incertidumbre. En palabras: divida la incertidumbre entre el valor y multiplique por cien por cien. ¿Por qué dividir? Porque pregunta qué fracción de la medida es la incertidumbre; media libra

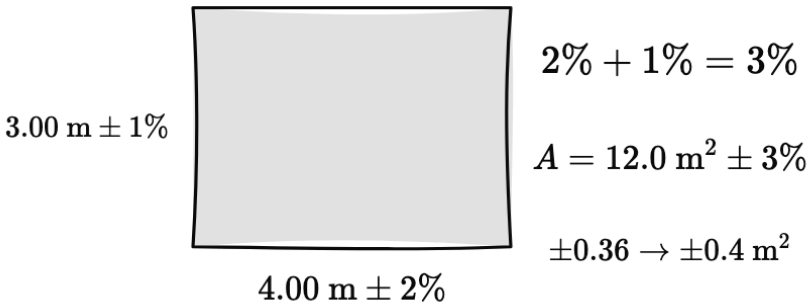
de cincuenta es un uno por ciento, pero media libra de una es un cincuenta por ciento.

El ejemplo del libro es una bolsa de manzanas de cinco libras. Compra una cada semana durante cuatro semanas y las pesa: 4,8, 5,3, 4,9 y 5,4 lb. Por otras mediciones, se sabe que la incertidumbre del peso medio es de 0,4 lb. Primero la media: $(4,8 + 5,3 + 4,9 + 5,4)/4 = 20,4/4 = 5,1$ lb. Concuerda con las 5 lb de la etiqueta dentro de la incertidumbre de 0,4 lb. Luego la incertidumbre porcentual: $\%inc = 0,4 \text{ lb}/5,1 \text{ lb} \times 100 \% = 8 \%$. Las libras se cancelan y queda un porcentaje puro. Así que la bolsa pesa $5 \text{ lb} \pm 8 \%$. En su báscula de cocina, el ocho por ciento de una bolsa de cinco libras es más o menos lo que pesa una manzana pequeña.

El libro le pide considerar una bolsa que pese la mitad con la misma incertidumbre de 0,4 lb. Entonces $0,4/2,55 \times 100 \% \approx 16 \%$, el doble. Dicho de otro modo, el mismo error absoluto pesa el doble sobre un valor de la mitad de tamaño. Y un consejo práctico: multiplique siempre la fracción por cien por cien, o le quedará un decimal, no un porcentaje.

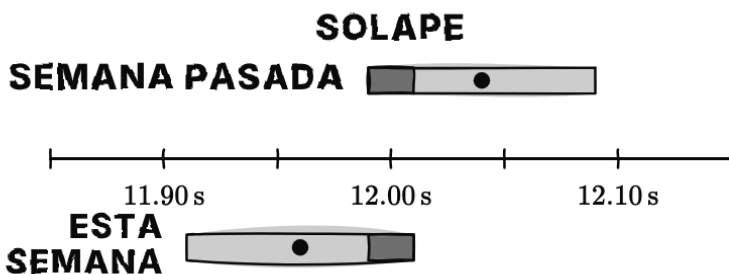
La incertidumbre también se traslada a los cálculos. Todo lo calculado a partir de magnitudes medidas es incierto también: el área de un suelo, calculada a partir de su largo y su ancho, hereda sus incertidumbres. Para la multiplicación y la división, cuando cada incertidumbre es pequeña, de unos pocos por ciento o menos, el libro da una regla: sume las incertidumbres porcentuales. Para un suelo de 4,00 m de largo con un 2 % de incertidumbre y 3,00 m de ancho con un 1 %, el área es 12,0 m² con una incertidumbre del 2 % + 1 % = 3 %. Como área, el tres por ciento de 12,0 son 0,36 m², redondeados a 0,4 m², porque el área se da hasta la décima de metro cuadrado.

multiplicar $\rightarrow$ sume los porcentajes



Sumar porcentajes para un suelo

Por último, la incertidumbre decide si dos mediciones pueden distinguirse. El cronómetro nuevo de un entrenador tiene una incertidumbre de $\pm 0,05 \text{ s}$. El mejor velocista hizo los 100 m en 12,04 s la semana pasada y en 11,96 s esta semana. La diferencia es $12,04 - 11,96 = 0,08 \text{ s}$. Pero el tiempo real de la semana pasada podría ser tan bajo como 11,99 s, y el de esta semana tan alto como 12,01 s, así que los dos intervalos se solapan. El veredicto del libro: no podemos concluir que esta semana fue más rápido; el cronómetro es demasiado incierto para distinguir los tiempos. Es la misma razón por la que una báscula de baño barata no puede decirle si ha perdido cien gramos durante la noche.



$$12.04 - 11.96 = 0.08 \text{ s}$$

¿Más rápido o no?

Para recordar

La incertidumbre porcentual es la incertidumbre dividida entre el valor medido, por cien por cien. Unas bolsas con una media de 5,1 lb y una incertidumbre de 0,4 lb dan alrededor de un ocho por ciento; una bolsa de la mitad de peso daría alrededor de un dieciséis. Al multiplicar o dividir mediciones con incertidumbres pequeñas, sume sus incertidumbres porcentuales. Un suelo de 4,00 m por 3,00 m con incertidumbres del dos y del uno por ciento tiene un área de 12,0 metros cuadrados, más o menos unos 0,4. Dos mediciones solo pueden distinguirse si su diferencia es mayor de lo que permiten sus incertidumbres.

Preguntas

1. ¿Por qué una incertidumbre de media libra es pequeña para un saco de patatas pero grande para una bolsa de caramelos?
 - a. Porque las patatas pesan más, así que el mismo error es una fracción menor del valor
 - b. Porque los caramelos se pesan con menos cuidado
 - c. Porque la incertidumbre porcentual no tiene en cuenta el peso
 - d. Porque las patatas son fruta
2. ¿Por qué desaparecen las libras en $\%inc = 0,4 \text{ lb} / 5,1 \text{ lb} \times 100 \%$?
 - a. Porque las libras no son unidades del SI
 - b. Porque las libras de arriba y de abajo se cancelan y queda un porcentaje puro
 - c. Porque la respuesta está en kilogramos
 - d. Porque 0,4 es pequeño
3. El largo de un suelo tiene un 2 % de incertidumbre y el ancho un 1 %. ¿Cuál es la incertidumbre porcentual de su área?
 - a. 1 %
 - b. 2 %
 - c. 3 %
 - d. $2 \% \times 1 \% = 2 \%$
4. ¿Por qué no podemos decir que 11,96 s es más rápido que 12,04 s con un cronómetro de $\pm 0,05 \text{ s}$?

- a. Porque 0,08 s es demasiado
- b. Porque el velocista estaba cansado
- c. Porque los cronómetros siempre atrasan
- d. Porque los intervalos posibles de los dos tiempos se solapan

Respuestas

1. **a)** La incertidumbre porcentual divide la incertidumbre entre el valor, así que el mismo error es una parte menor de un valor mayor.
2. **b)** Dividir libras entre libras deja un número puro, expresado como porcentaje.
3. **c)** En la multiplicación con incertidumbres pequeñas, las incertidumbres porcentuales se suman: $2\% + 1\% = 3\%$.
4. **d)** La semana pasada podría haber sido de solo 11,99 s y esta semana de hasta 12,01 s, así que los tiempos no pueden distinguirse.

Ejemplos resueltos

Incertidumbre porcentual de una bolsa de manzanas Cuatro bolsas pesan 4,8, 5,3, 4,9 y 5,4 lb; la incertidumbre de la media es de 0,4 lb. Halle la incertidumbre porcentual.

Media: $(4,8 + 5,3 + 4,9 + 5,4)/4 = 20,4/4 = 5,1$ lb.

Use $\%inc = \delta A/A \times 100\%$.

$0,4 \text{ lb} / 5,1 \text{ lb} \approx 0,078$.

$\times 100\% \approx 8\%$.

Respuesta: alrededor del 8 %

Ejercicios

1. Una varilla mide $2,00 \text{ m} \pm 0,04 \text{ m}$. ¿Cuál es su incertidumbre porcentual?

Pista: Divida δA entre A y multiplique por 100 %.

Respuesta: 2 %: $0,04/2,00 = 0,02$, por 100 % = 2 %.

2. Una caja mide 0,50 m de largo (4 % de incertidumbre) y 0,20 m de ancho (5 % de incertidumbre). ¿Cuál es la incertidumbre porcentual de su área?

Pista: En un producto, sume las incertidumbres porcentuales.

Respuesta: 9 %: $4 \% + 5 \% = 9 \%$, para un área de $0,10 \text{ m}^2 \pm \text{unos } 0,009 \text{ m}^2$.

3. Dos carreras se cronometran en 10,50 s y 10,30 s con un cronómetro de incertidumbre $\pm 0,05 \text{ s}$. ¿Puede decir que la segunda fue más rápida?

Pista: Halle el intervalo de cada tiempo y vea si se solapan.

Respuesta: Sí: la primera está entre 10,45 y 10,55 s y la segunda entre 10,25 y 10,35 s; los intervalos no se solapan.

Las cifras significativas y el enigma de los ceros

Coloque un palo junto a una regla y mire su extremo. Queda en algún punto entre la marca de 36,6 cm y la de 36,7 cm. Entorna los ojos, decide que está más cerca de 36,7 y lo anota. ¿Podría anotar 36,71 cm?

La respuesta del libro empieza por el instrumento. Un instrumento de medida preciso es el que mide en pasos muy pequeños. Una regla estándar lee hasta el milímetro, 0,1 cm; un calibre, un medidor deslizante de mordazas finas, lee hasta 0,01 mm, diez veces más fino que incluso una décima de milímetro. El calibre es el instrumento más preciso porque detecta diferencias de longitud mucho menores. Y cuanto más preciso el instrumento, más precisas y exactas pueden ser las mediciones. Su báscula de cocina, que lee hasta el gramo, y una báscula de joyero, que lee hasta la milésima de gramo, se diferencian justo en esto.

Al escribir un valor medido, solo podemos dar tantas cifras como midió el instrumento. Con una regla, 36,7 cm está bien; 36,71 cm no, porque una regla no puede medir una centésima de centímetro. Observe que la última cifra, el 7, ya era una estimación: usted juzgó si el extremo estaba más cerca de 36,6 o de 36,7. Esa es la regla de las cifras significativas: la última cifra escrita es la primera con algo de incertidumbre. Para contar las cifras significativas, empiece por la primera cifra medida a la izquierda y cuente hasta la última escrita a la derecha. Así que 36,7 cm tiene tres cifras significativas, y le dicen lo preciso que era el instrumento.

Los ceros requieren un cuidado especial. En 0,053 los ceros solo sitúan la coma decimal; ocupan lugares, así que 0,053 tiene dos cifras significativas. En 10,053 los ceros están entre cifras medidas, así que cuentan: cinco cifras significativas. En 1300 los ceros son ambiguos: podrían indicar que el número se conoce hasta la última unidad o solo ocupar lugares, así que podría tener dos, tres o cuatro cifras significativas. La notación científica lo resuelve: $1,3 \times 10^3$ tiene dos cifras significativas, $1,30 \times 10^3$ tiene tres y $1,300 \times 10^3$ tiene cuatro. En una línea: los ceros son significativos salvo cuando solo ocupan lugares.

	CIFRAS SIG.
0.0009	1
15,450.0	6
6×10^3	1
87.990	5
30.42	4

Qué ceros cuentan

El libro propone cinco números para probar. 0,0009 tiene una cifra significativa: los ceros ocupan lugares y marcan la coma decimal. 15

450,0 tiene seis: los ceros muestran que se midió hasta la décima, así que cuentan. 6×10^3 tiene una: la potencia de diez solo sitúa la coma decimal, no es una cifra medida. 87,990 tiene cinco: el cero final muestra una medición hasta la milésima. 30,42 tiene cuatro: un cero entre cifras significativas siempre cuenta.

Pruébalo

Tome una regla y mida el ancho de su teléfono. Escriba el resultado con exactamente tantas cifras como permite la regla, terminando con su cifra estimada. Luego cuente las cifras significativas y pregúntese si un calibre le permitiría añadir una más.

Para recordar

Un instrumento preciso mide en pasos pequeños: una regla hasta el milímetro, un calibre hasta la centésima de milímetro. Escriba solo las cifras que midió su instrumento; la última es la primera cifra incierta. Cuente las cifras significativas desde la primera cifra medida hasta la última escrita: 36,7 cm tiene tres. Los ceros que solo sitúan la coma decimal no son significativos; los que están entre cifras o se midieron al final, sí. La notación científica elimina la ambigüedad: $1,30 \times 10^3$ tiene tres cifras significativas.

Preguntas

1. ¿Por qué una medición con regla no puede escribirse como 36,71 cm?
 - a. Porque las reglas son inexactas
 - b. Porque una regla no puede medir una centésima de centímetro
 - c. Porque 36,71 tiene muy pocas cifras
 - d. Porque el palo es más corto
2. ¿Qué tiene de especial la última cifra escrita de una medición?
 - a. Siempre es cero
 - b. Se copia de la etiqueta de la báscula
 - c. Es la primera cifra con algo de incertidumbre
 - d. Siempre es exacta
3. ¿Cómo resuelve la notación científica el número de cifras significativas de 1300?
 - a. Escribir $1,30 \times 10^3$ muestra exactamente tres cifras significativas
 - b. Siempre da cuatro
 - c. Elimina todos los ceros por no tener sentido
 - d. Cambia el valor del número
4. ¿Por qué 30,42 tiene cuatro cifras significativas?
 - a. Porque es mayor que 30
 - b. Porque el cero solo ocupa un lugar
 - c. Porque tiene coma decimal
 - d. Porque un cero entre cifras significativas siempre cuenta

Respuestas

1. **b)** Solo puede dar tantas cifras como midió el instrumento, y una regla lee hasta el milímetro.
2. **c)** La última cifra escrita es una estimación, la primera con algo de incertidumbre.
3. **a)** $1,3 \times 10^3$ tiene dos, $1,30 \times 10^3$ tres y $1,300 \times 10^3$ cuatro cifras significativas.
4. **d)** Los ceros situados entre cifras significativas son a su vez significativos.

Ejemplos resueltos

Contar cifras significativas ¿Cuántas cifras significativas hay en 0,0009, 15 450,0, 6×10^3 , 87,990 y 30,42?

0,0009: los ceros solo sitúan la coma decimal, así que 1.

15 450,0: los ceros muestran una medición hasta la décima, así que 6.

6×10^3 : la potencia de diez solo sitúa la coma decimal, así que 1.

87,990: el cero final se midió, así que 5; 30,42: el cero entre cifras cuenta, así que 4.

Respuesta: 1, 6, 1, 5 y 4

Ejercicios

1. ¿Cuántas cifras significativas hay en 0,00450, 2,050 y $7,0 \times 10^4$?

Pista: Los ceros iniciales ocupan lugares; los ceros finales tras la coma decimal se midieron.

Respuesta: 3, 4 y 2: 0,00450 tiene 4, 5 y 0; 2,050 tiene sus cuatro cifras; $7,0 \times 10^4$ tiene 7 y 0.

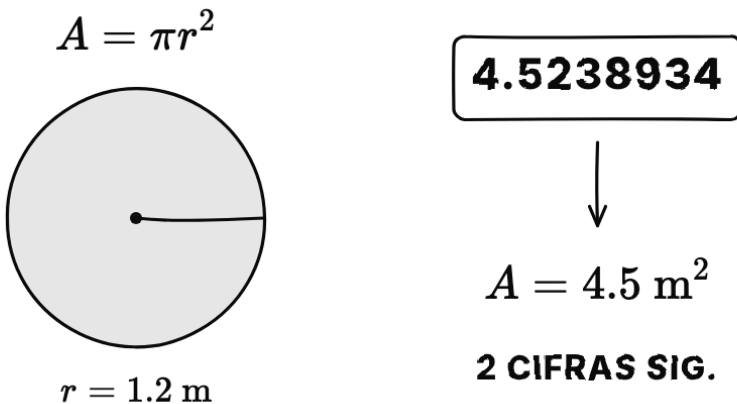
2. Escriba 52 000 en notación científica con exactamente tres cifras significativas.

Pista: Mueva la coma decimal tras la primera cifra y conserve tres cifras.

Respuesta: $5,20 \times 10^4$.

Las cifras significativas en los cálculos

Mida el radio de una mesa redonda, 1,2 m, y pida a una calculadora su área. Muestra 4,5238934 m². Ocho cifras, a partir de una cinta métrica que le dio dos. ¿De cuáles puede fiarse?



Redondear el área de un círculo

El principio del libro es sencillo: cuando se combinan mediciones de distinta precisión, la respuesta no puede tener más cifras significativas de las que permite la medición menos precisa. Hay dos reglas, una para multiplicar y dividir y otra para sumar y restar.

Regla uno, para la multiplicación y la división: el resultado conserva tantas cifras significativas como el dato que menos tenga. El área de un círculo es $A = \pi r^2$: pi por el radio por el radio. Con $r = 1,2$ m, la calculadora da $A = 3,1415927... \times (1,2 \text{ m})^2 = 4,5238934 \text{ m}^2$. El radio solo tiene dos cifras significativas, así que el área debe tener dos: $A = 4,5 \text{ m}^2$. No importa que pi se conozca con al menos ocho cifras; el eslabón débil es el radio. ¿Por qué? Porque el radio podría ser perfectamente 1,15 o 1,25 m, y entonces el área estaría entre unos 4,2 y 4,9 metros cuadrados; las cifras después de 4,5 son pura decoración.

Regla dos, para la suma y la resta: la respuesta no puede tener más decimales que la medición menos precisa. El ejemplo del libro sigue a unas patatas. Compra 7,56 kg en una tienda, en una báscula que lee hasta 0,01 kg. Deja 6,052 kg en su laboratorio, pesados en una báscula que lee hasta 0,001 kg. En casa añade 13,7 kg, pesados en una báscula de baño que solo lee hasta 0,1 kg. El total es $7,56 - 6,052 + 13,7 = 15,208$ kg. La lectura menos precisa, 13,7 kg, solo llega a las décimas, así que la respuesta se redondea a las décimas: 15,2 kg. Dicho de otro modo, una suma no es más fina que su báscula más basta. Es como sumar una cucharada pesada en una báscula de joyero a un saco pesado en su báscula de baño: el total solo se conoce con el paso de la báscula de baño.

PATATAS, KG

7.56

0.01 kg

- 6.052

0.001 kg

+ 13.7

0.1 kg

15.208

→ 15.2 kg

Sumar patatas

Después el libro indica sus propias convenciones. Se supone que la mayoría de los números del texto tienen tres cifras significativas, y los ejemplos resueltos lo mantienen. Una respuesta con tres cifras se basa en datos válidos hasta al menos tres cifras; si entran menos cifras, salen menos. En algunos temas, sobre todo en óptica, hace falta más exactitud y se usan más de tres cifras. Y los números exactos no limitan un resultado: el dos de la longitud de la circunferencia, $c = 2\pi r$, es exactamente dos, no una medida.

Dos ejercicios cierran la sección. Primero: una mujer tiene tres bolsas; dos pesan 13,5 libras cada una y una pesa 10,2 libras. El total es $2 \times 13,5 + 10,2 = 37,2$ lb. El 2 es un recuento de bolsas, un número exacto, así que no limita las cifras significativas. Segundo: la fuerza es igual a

la masa por la aceleración, $F = ma$. Un carro de 55 kg acelera a $0,0255 \text{ m/s}^2$. $F = 55 \text{ kg} \times 0,0255 \text{ m/s}^2 = 1,4025 \text{ N}$, y como 55 kg tiene dos cifras significativas, la respuesta es 1,4 N.

Para recordar

En la multiplicación y la división, conserve tantas cifras significativas como el dato menos preciso: un radio de 1,2 m da un área de 4,5 metros cuadrados. En la suma y la resta, conserve tantos decimales como el dato menos preciso: las patatas suman 15,2 kg. Este libro suele trabajar con tres cifras significativas. Los números exactos, como el 2 de $2\pi r$ o un recuento de bolsas, nunca limitan el resultado. Un carro de 55 kg a $0,0255 \text{ m/s}^2$ siente una fuerza de 1,4 N, dos cifras significativas.

Preguntas

1. ¿Por qué el área de un círculo de 1,2 m de radio debe darse como 4,5 m²?
 - a. Porque π solo tiene dos cifras
 - b. Porque el radio tiene dos cifras significativas, y el producto conserva el menor número
 - c. Porque las áreas siempre se redondean a las décimas
 - d. Porque la calculadora redondea
2. ¿Por qué el total de patatas se redondea a 15,2 kg?

- a. Porque la lectura menos precisa, 13,7 kg, solo llega a las décimas
 - b. Porque 15,208 tiene demasiadas cifras para una suma
 - c. Porque los kilogramos deben redondearse a las décimas
 - d. Porque la báscula de la tienda lee hasta las centésimas
3. ¿Por qué el 2 de $c = 2\pi r$ no limita las cifras significativas?
- a. Porque es pequeño
 - b. Porque es par
 - c. Porque es exacto, no una medida
 - d. Porque multiplica a π
4. Un carro de 55 kg acelera a $0,0255 \text{ m/s}^2$. ¿Por qué la fuerza es 1,4 N y no 1,4025 N?
- a. Porque la fuerza se mide en newtons enteros
 - b. Porque 0,0255 tiene cinco cifras
 - c. Porque la aceleración es incierta
 - d. Porque 55 kg solo tiene dos cifras significativas

Respuestas

1. **b)** En la multiplicación, el resultado conserva tantas cifras significativas como el dato menos preciso, el radio.
2. **a)** En la suma y la resta, la respuesta no tiene más decimales que la medición menos precisa.
3. **c)** Los números exactos no limitan la precisión de un resultado.
4. **d)** El producto conserva tantas cifras significativas como el dato menos preciso, 55 kg, que tiene dos.

Ejemplos resueltos

Área de una mesa redonda Una mesa tiene radio $r = 1,2$ m. Halle su área $A = \pi r^2$ con las cifras significativas correctas.

La calculadora da $3,1415927... \times (1,2 \text{ m})^2 = 4,5238934 \text{ m}^2$.

En la multiplicación, conserve el menor número de cifras significativas de los datos.

El radio $1,2$ m tiene dos; pi tiene muchas más.

Redondee a dos cifras significativas.

Respuesta: $4,5 \text{ m}^2$

Ejercicios

1. Sume $2,45$ m, $0,3$ m y $1,234$ m y dé el resultado con los decimales correctos.

Pista: Conserve tantos decimales como el valor menos preciso.

Respuesta: $4,0$ m: la suma es $3,984$ m, y $0,3$ m solo llega a las décimas.

2. Una caja tiene una masa de $4,0$ kg y acelera a $1,25 \text{ m/s}^2$. Usando $F = ma$, ¿cuál es la fuerza con las cifras significativas correctas?

Pista: Multiplique y luego conserve el menor número de cifras significativas.

Respuesta: $5,0 \text{ N}$: $4,0 \times 1,25 = 5,0$, y $4,0$ kg tiene dos cifras significativas.

3. Un círculo tiene $2,00$ m de radio. ¿Cuál es la longitud de su circunferencia, $c = 2\pi r$, con las cifras significativas correctas?

Pista: El 2 es exacto; el radio tiene tres cifras significativas.

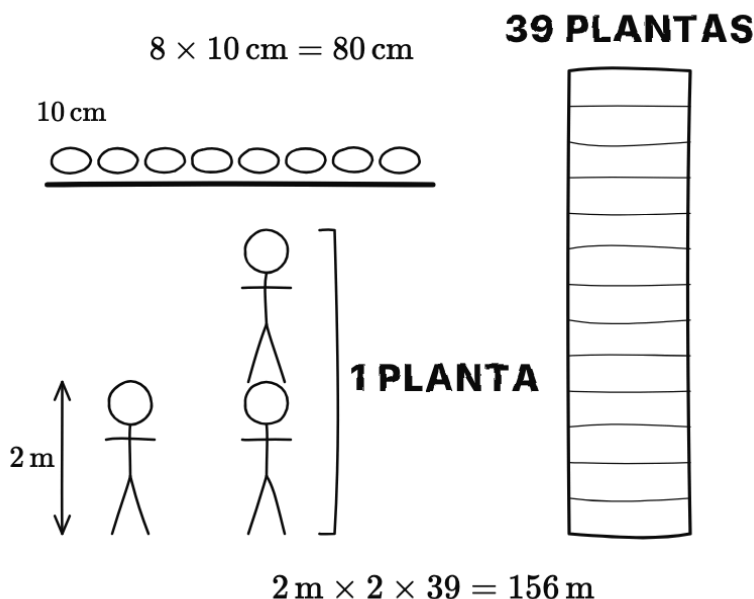
Respuesta: $12,6$ m: $2 \times 3,14159 \times 2,00 = 12,566$, redondeado a tres cifras significativas.

Aproximación: ¿qué altura tiene un billón de dólares?

En 2021 la deuda federal de Estados Unidos era algo más de veintiocho billones de dólares. ¿Puede imaginar siquiera un billón? Casi nadie puede. La última sección del capítulo muestra cómo unos pocos números aproximados, unidades cuidadosas y la disposición a suponer pueden hacer real una cantidad así.

Los físicos, los científicos y los ingenieros necesitan constantemente aproximaciones, o «estimaciones a ojo». ¿A qué distancia está cierto lugar? ¿Más o menos qué densidad tiene un objeto? ¿Más o menos qué corriente circulará por un circuito? Muchos números aproximados salen de fórmulas cuyos datos solo se conocen con una exactitud limitada. El libro dice que esta habilidad crece junto con la de resolver problemas: pensando con números, estando dispuesto a arriesgarse, y con experiencia y buen sentido de las unidades. Las aproximaciones permiten descartar situaciones imposibles y números poco realistas, cuestionar lo que afirman otros y orientar nuestro propio enfoque de un problema.

El primer ejemplo: estime la altura de un edificio de 39 plantas. La estrategia es escalar a partir de algo conocido, la estatura de una persona. Un adulto mide unos 2 m, y una planta es más o menos la altura de dos adultos. Así que la estimación es $2 \text{ m/persona} \times 2 \text{ personas/planta} \times 39 \text{ plantas} = 156 \text{ m}$. Mire las unidades: las personas cancelan las personas, las plantas cancelan las plantas, y quedan metros. El análisis dimensional, que vimos con los factores de conversión, funciona igual de bien para las estimaciones.



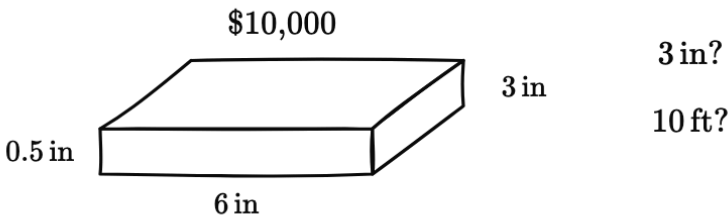
Un edificio de 39 plantas en personas

Pruébalo

Mida una vez con una regla el ancho de su mano; digamos que son 10 cm. Ahora vaya poniendo la mano a lo largo de su escritorio, contando anchos de mano. Si cuenta ocho, el escritorio mide unos $8 \times 10 \text{ cm} = 80 \text{ cm}$. Luego pregúntese, como hace el libro, qué más aparte de la longitud podría estimar así.

Ahora, el billón de dólares. Supongamos que le dieran un billón de dólares en billetes de 100 dólares, agrupados en fajos bancarios de cien billetes, cada fajo de 10 000 dólares. Coloca los fajos de forma

uniforme sobre un campo de fútbol americano, entre las zonas de anotación. ¿Qué altura tiene el montón? Un amigo calcula 3 pulgadas; otro dice 10 pies. Aquí el libro trabaja en pulgadas y pies, porque los campos de fútbol americano se miden en yardas.



$$6 \times 3 \times 0.5 = 9 \text{ in}^3$$

$$\frac{10^{12}}{10^4} = 10^8 \text{ fajos}$$

Un billón de dólares en fajos

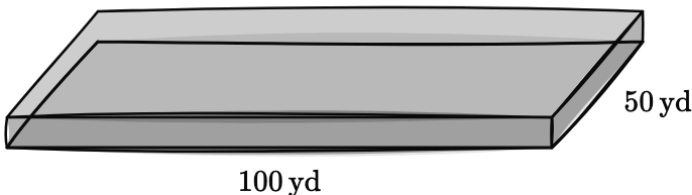
La estrategia: empezar por algo fácil de imaginar, un fajo; hallar su volumen; averiguar cuántos fajos forman un billón; y luego repartir el volumen total sobre el área del campo para hallar la altura.

Paso uno, el volumen de un fajo. Un billete mide unas 3 por 6 pulgadas, y un fajo de cien tiene un grosor de unas 0,5 pulgadas. volumen del fajo = 6 pulg. $\times$ 3 pulg. $\times$ 0,5 pulg. = 9 pulg.³. Eso es más o menos el tamaño de un teléfono grueso.

Paso dos, el número de fajos. Un billón de dólares son 1×10^{12} dólares, y un fajo son 1×10^4 dólares. 1×10^{12} dólares / 1×10^4 dólares por fajo = 1×10^8 fajos: cien millones de fajos. Al dividir potencias de diez se restan los exponentes, doce menos cuatro, como vimos con los prefijos.

Paso tres, el área del campo en pulgadas cuadradas. El campo mide $100 \text{ yd} \times 50 \text{ yd} = 5000 \text{ yd}^2$. Para convertir, use los factores tres pies por yarda y doce pulgadas por pie, cada uno dos veces, porque el área tiene dos dimensiones: $5000 \text{ yd}^2 \times 3 \text{ pies/yard} \times 3 \text{ pies/yard} \times 12 \text{ pulg./pie} \times 12 \text{ pulg./pie} = 6\,480\,000 \text{ pulg.}^2$. Para una estimación aproximada conservamos una cifra significativa: unas $6 \times 10^6 \text{ pulg.}^2$.

$$V = 9 \times 10^8 \text{ in}^3$$



$$A \approx 6 \times 10^6 \text{ in}^2$$

$$h = \frac{9 \times 10^8}{6 \times 10^6} = 150 \text{ in} \quad \approx 12 \text{ ft}$$

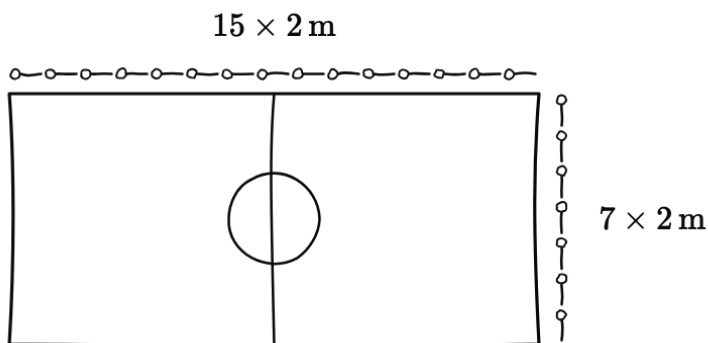
A qué altura llega el dinero

Paso cuatro, el volumen total: $9 \text{ pulg.}^3/\text{fajo} \times 10^8 \text{ fajos} = 9 \times 10^8 \text{ pulg.}^3$.

Paso cinco, la altura. El volumen es igual al área por la altura, así que la altura es igual al volumen entre el área. $\text{altura} = 9 \times 10^8 \text{ pulg.}^3 / 6 \times 10^6 \text{ pulg.}^2 = 1,5 \times 10^2 \text{ pulg.} = 150 \text{ pulg.}$ Las pulgadas cúbicas entre las pulgadas cuadradas dejan pulgadas, justo la unidad que debe tener una altura. En pies: $150 \text{ pulg.} \times 1 \text{ pie}/12 \text{ pulg.} = 12,5 \text{ pies} \approx 12 \text{ pies}$. Imagine un campo de fútbol entero cubierto de dinero apilado una vez y media más alto que el techo de su salón.

Así que la suposición de 3 pulgadas se quedaba muy corta, mientras que la de 10 pies, que son 120 pulgadas, era más o menos correcta. El libro pregunta cómo se compara su propia primera suposición y qué dice esto de las suposiciones rápidas frente a las aproximaciones cuidadosas. Dicho de otro modo, unos pocos pasos honestos con unidades convierten una suposición disparatada en un número que puede defender.

Una última comprobación: estime el área de una cancha de baloncesto reglamentaria. Use como regla a un hombre medio, de unos 2 m. Unos quince hombres tumbados uno tras otro cubren el largo, $15 \times 2 \text{ m} = 30 \text{ m}$, y unos siete cubren el ancho, $7 \times 2 \text{ m} = 14 \text{ m}$. El área es de unos $30 \text{ m} \times 14 \text{ m} = 420 \text{ m}^2$.



$$30 \text{ m} \times 14 \text{ m} \approx 420 \text{ m}^2$$

Una cancha de baloncesto en personas

Con eso se cierra el capítulo: unas pocas leyes unificadoras, unidades y patrones compartidos, una incertidumbre honesta y, por último, la confianza para estimar el mundo de cabeza.

Para recordar

Las aproximaciones descartan números poco realistas, ponen a prueba afirmaciones y guían la resolución de problemas. Un edificio de 39 plantas mide unos 2 m por persona, por 2 personas por planta, por 39 plantas, unos 156 m. Un billón de dólares en billetes de 100 son 10^8 fajos de 9 pulgadas cúbicas, 9×10^8 pulgadas cúbicas en total. Repartido sobre un campo de fútbol de unas 6×10^6 pulgadas cuadradas, el montón mide unas 150 pulgadas, unos 12 pies de alto. Una cancha de baloncesto son unas 15 por 7 personas de dos metros, unos 420 metros cuadrados.

Preguntas

1. En $2 \text{ m/persona} \times 2 \text{ personas/planta} \times 39 \text{ plantas}$, ¿por qué la respuesta está en metros?
 - a. Porque 39 es un recuento
 - b. Porque las personas y las plantas se cancelan, y quedan metros
 - c. Porque los edificios siempre se miden en metros
 - d. Porque 156 es un número grande
2. ¿Por qué dividir 10^{12} entre 10^4 da 10^8 ?
 - a. Porque al dividir potencias de diez se restan los exponentes:
 $12 - 4 = 8$
 - b. Porque 12 entre 4 es 3

- c. Porque las potencias de diez se suman al dividir
 - d. Porque un fajo contiene 10^8 dólares
3. ¿Por qué la conversión del área usa 3 pies/yd y 12 pulg./pie dos veces cada uno?
- a. Porque el campo mide 100 yardas de largo
 - b. Porque se conserva una cifra significativa
 - c. Porque el área tiene dos dimensiones, así que cada factor de longitud aparece dos veces
 - d. Porque las pulgadas son más pequeñas que los pies
4. ¿Por qué el volumen dividido entre el área da una altura en pulgadas?
- a. Porque el campo se mide en yardas
 - b. Porque los fajos son rectangulares
 - c. Porque se conserva una cifra significativa
 - d. Porque las pulgadas cúbicas entre pulgadas cuadradas dejan pulgadas

Respuestas

1. **b)** Las personas cancelan las personas y las plantas cancelan las plantas, así que el análisis dimensional deja metros.
2. **a)** Al dividir potencias de diez se restan sus exponentes, como vimos con los prefijos.
3. **c)** Las yardas cuadradas deben convertirse a lo largo y a lo ancho, así que cada factor se usa dos veces.
4. **d)** $\text{pulg.}^3/\text{pulg.}^2 = \text{pulg.}$, justo la unidad que debe tener una altura.

Ejemplos resueltos

Un billón de dólares sobre un campo de fútbol americano

Un billón de dólares en billetes de 100 dólares, en fajos de $6 \times 3 \times 0,5$ pulgadas que valen 10 000 dólares cada uno, se reparte sobre un campo de 100×50 yardas. ¿Qué altura tiene el montón?

Un fajo: $6 \times 3 \times 0,5 = 9$ pulg.³.

Fajos: $10^{12} / 10^4 = 10^8$, así que el volumen total es 9×10^8 pulg.³.

Campo: $5000 \text{ yd}^2 \times (3 \text{ pies/yard})^2 \times (12 \text{ pulg./pie})^2 = 6\,480\,000 \text{ pulg.}^2 \approx 6 \times 10^6 \text{ pulg.}^2$.

Altura = $9 \times 10^8 / 6 \times 10^6 = 1,5 \times 10^2$ pulg. = 150 pulg., unos 12 pies.

Respuesta: unas 150 pulgadas, más o menos 12 pies

Ejercicios

1. Estime la altura de un edificio de 25 plantas usando 2 m por persona y 2 personas por planta.

Pista: Multiplique los factores de modo que se cancelen las personas y las plantas.

Respuesta: 100 m: $2 \text{ m/persona} \times 2 \text{ personas/planta} \times 25 \text{ plantas}$.

2. ¿Cuántas pulgadas cuadradas hay en una yarda cuadrada?

Pista: Use 3 pies/yard y 12 pulg./pie, cada uno dos veces.

Respuesta: 1296 pulg.²: $3 \times 3 \times 12 \times 12$.

3. Mil millones de dólares (10^9) en los mismos fajos bancarios: ¿cuántos fajos son y qué volumen ocupan?

Pista: Divida entre 10^4 dólares por fajo y luego multiplique por 9 pulg.³ por fajo.

Respuesta: 10^5 fajos, cien mil, con un volumen de 9×10^5 pulg.³.