

Tiempo y distancia

5-1 El movimiento

5-2 El tiempo

5-3 Tiempos cortos

5-4 Tiempos largos

5-5 Unidades y patrones de tiempo

5-6 Distancias grandes

5-7 Distancias pequeñas

5-1 El movimiento

En este capítulo consideraremos algunos aspectos de los conceptos de *tiempo* y *distancia*. Se ha puesto énfasis desde un comienzo que la física, como todas las ciencias, depende de la *observación*. Se puede decir, también, que el desarrollo de las ciencias físicas en su forma actual ha dependido en gran medida del énfasis que se ha puesto en hacer observaciones cuantitativas. Sólo mediante observaciones cuantitativas puede llegar uno a relaciones cuantitativas, que son el corazón de la física.

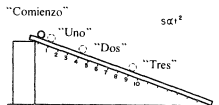


Fig. 5-1. Una bola baja rodando por una pista inclinada.

A muchas personas les gusta colocar el comienzo de la física en el trabajo hecho hace 350 años por Galileo y llamarlo el primer físico. Hasta esa época el estudio del movimiento había sido filosófico y basado en argumentos que podían idearse con la cabeza. La mayoría de los razonamientos había sido presentada por Aristóteles y otros filósofos griegos y se tomaban como "probados". Galileo era escéptico, e hizo un experimento sobre el movimiento, que fue esencialmente el siguiente: hizo rodar una bola hacia abajo en un plano inclinado y observó el movimiento. Sin embargo, no sólo observó; midió *la distancia* que recorrió la bola y en *cuánto tiempo*.

El modo de medir una distancia era bien conocido mucho antes de Galileo, pero no había modos precisos de medir el tiempo, particularmente tiempos cortos. Aunque después diseñó relojes más satisfactorios (aunque no como los que conocemos ahora), el primer experimento de Galileo

sobre el movimiento fue hecho usando su pulso para contar intervalos iguales de tiempo. Hagamos lo mismo.

Podemos contar los latidos del pulso mientras la bola rueda hacia abajo sobre la pista: "uno...dos...tres...cuatro...cinco...seis...siete...ocho..." Pedimos a un amigo que haga una pequeña marca en la ubicación de la bola para cada cuenta; podemos entonces medir la *distancia* que se movió la bola desde el punto en que se soltó en uno, o dos, o tres, etc., intervalos iguales de tiempo. Galileo expresó el resultado de sus observaciones de este modo: si la ubicación de la bola es marcada a 1, 2, 3, 4.... unidades de tiempo desde el instante en que se suelta, esas marcas distan del punto de partida en proporción a los números 1, 4, 9, 16... Hoy diríamos que la distancia es proporcional al cuadrado del tiempo.

$$D \propto t^2.$$

El estudio del *movimiento*, que es básico para todos los físicos, implica las preguntas ¿dónde?, y ¿cuándo?

5-2 El tiempo

Consideremos primero lo que queremos decir por *tiempo*. ¿Qué es el tiempo? Sería estupendo encontrar una buena definición del tiempo. El diccionario Webster define "un tiempo" como "un periodo", y este último como "un tiempo", lo que no parece ser muy útil. Quizás debiéramos decir: "tiempo es lo que ocurre, cuando nada más ocurre". Lo que tampoco nos lleva muy lejos. Puede ser que sea igualmente bueno que enfrentemos el hecho que el tiempo es una de las cosas que probablemente no podemos definir (en el sentido del diccionario), y sólo decir que es lo que ya sabemos que es: ¡es cuánto esperamos!

De todos modos, lo que realmente importa no es *definir* el tiempo, sino como medirlo. Una manera de medir el tiempo es utilizar algo que ocurra una y otra vez de modo regular —algo que sea *periódico*—. Por ejemplo un día. Una día parece ocurrir una y otra vez. Pero cuando comienzan a pensar acerca de ello, bien pueden preguntar: "¿Son los días periódicos? ¿Son regulares? ¿Son todos los días de la misma duración?" Ciertamente, uno tiene la impresión que los días de verano son más largos que los de invierno. Por supuesto, algunos días de invierno parecen ser desagradablemente largos si uno está muy aburrido. Seguramente han oído decir a alguien: "¡Caramba, éste sí que ha sido un día largo!"

Sin embargo, parece ser que los días son casi del mismo largo *en promedio*. ¿Hay algún modo para verificar si los días son del mismo largo —sea de un día al siguiente—, o por lo menos en promedio? Una manera es hacer una comparación con algún otro fenómeno periódico. Veamos cómo puede hacerse tal comparación usando un reloj de arena. Con un reloj de arena podemos "crear" un suceso periódico siempre que tengamos a alguien ocupado durante el día y la noche para girarlo cuando el último grano de arena haya caído.

Entonces podríamos contar las vueltas del reloj de arena desde cada mañana a la siguiente. Encontraríamos esta vez que el número de "horas" (es decir, vueltas del reloj de arena) no fue el mismo cada "día". Podríamos desconfiar del sol, o del reloj de arena o de ambos.

Después de pensar un poco, puede ocurrirnos contar las "horas" de mediodía a mediodía (el mediodía *no* está definido aquí como las 12,00 horas, sino como el instante en que el sol está en su punto más alto). Encontraríamos esta vez que el número de horas de cada día es el mismo.

Tenemos ahora alguna confianza en que tanto la "hora" como el "día" tienen una periodicidad regular, es decir, indican sucesivos intervalos iguales de tiempo, aunque no hemos *probado* que cada uno sea "realmente" periódico. Alguien puede preguntar si no pudiera haber algún ser omnipotente que hiciera disminuir el flujo de arena cada noche y aumentarlo durante el día. Nuestro experimento, por supuesto, no nos da una respuesta sobre esta clase de preguntas. Todo lo que podemos decir es que encontramos que una regularidad en una cosa lleva consigo una regularidad en la otra. Podemos sólo decir que basamos nuestra *definición* del tiempo en la repetición de algún evento aparentemente periódico.

5-3 Tiempos cortos

Podríamos indicar ahora que en el proceso de verificar la reproductibilidad del día, hemos recibido un importante subproducto. Hemos encontrado la manera de medir en forma más precisa *fracciones* de día. Hemos encontrado un modo de contar el tiempo en pequeñas partes. ¿Podemos llevar más lejos este proceso y aprender a medir intervalos de tiempo aún más pequeños?

Galileo determinó que un péndulo siempre oscila en intervalos iguales de tiempo, siempre que el tamaño de la oscilación se mantenga pequeño. Un ensayo que compare el número de oscilaciones de un péndulo en una "hora" demuestra que éste es efectivamente el caso. En esta forma podemos marcar fracciones de una hora. Si usamos un dispositivo mecánico para contar las oscilaciones —y para mantenerlas—, tenemos el reloj de péndulo de nuestros abuelos.

Convengamos que si nuestro péndulo oscila 3.600 veces en una hora (y si hay 24 de tales horas en un día) llamaremos a cada periodo del péndulo un "segundo". Hemos dividido entonces nuestra unidad original de tiempo en aproximadamente 10^5 partes. Podemos aplicar los mismos principios para dividir el segundo en intervalos más y más pequeños. Se darán cuenta que no es práctico hacer péndulos mecánicos que funcionen arbitrariamente rápido, pero ahora podemos hacer péndulos *eléctricos* llamados osciladores, que pueden proporcionar sucesos periódicos con un tiempo de oscilación muy pequeño. En estos osciladores electrónicos hay una corriente eléctrica que oscila en forma análoga a la oscilación de la lenteja del péndulo.

Podemos hacer una serie de tales osciladores electrónicos cada uno con un periodo 10 veces más corto que el precedente. Podemos "calibrar" cada oscilador con el siguiente más lento, contando el número de oscilaciones que hace por una oscilación del más lento. Cuando el periodo de oscilación de nuestro reloj es menor que una fracción de segundo, no podemos contar las oscilaciones sin la ayuda de algún dispositivo que extienda nuestro poder de observación. Un dispositivo tal es un osciloscopio de haz electrónico, el cual actúa como una especie de microscopio para tiempos cortos. Este dispositivo traza en una pantalla fluorescente un gráfico de la corriente eléctrica (o el voltaje) en función del tiempo. Al conectar el osciloscopio a dos de nuestros osciladores uno después del otro de modo

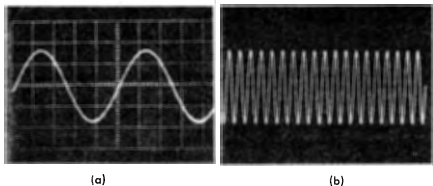


Fig. 5-2. Dos vistas de la pantalla de un osciloscopio. En (a) el osciloscopio está conectado a un oscilador, en (b) está conectado a un oscilador con un período de un décimo de duración.

que primero hace un gráfico de la corriente en uno de nuestros osciladores y después de la corriente en el otro, obtenemos dos gráficos como los que se muestran en la figura 5-2. Podemos determinar fácilmente el número de periodos del oscilador más rápido en un periodo del oscilador más lento.

Con las modernas técnicas electrónicas se han construido osciladores que tienen periodos tan pequeños como 10^{-12} segundos, y han sido calibrados (por métodos de comparación como los que hemos descrito) en términos de nuestra unidad patrón de tiempo, el segundo. Con la invención y perfeccionamiento del "laser" o amplificador de luz, en estos últimos años, ha llegado a ser posible construir osciladores con periodos aún más cortos que 10^{-12} segundos; pero no ha sido todavía posible calibrarlos mediante los métodos que hemos descrito, aunque no hay duda que pronto será posible.

Se han medido intervalos de tiempo más pequeños que 10^{-12} segundos, pero mediante una técnica diferente. En efecto, se ha usado una *definición* diferente del "tiempo". Una manera ha sido observar la *distancia* entre dos sucesos para un objeto en movimiento. Si, por ejemplo, las luces delanteras de un automóvil en movimiento se prenden y después se apagan, podemos calcular *cuánto tiempo* estuvieron cargadas las luces, si sabemos *dónde* fueron encendidas y apagadas y la velocidad con que se movió el automóvil. El tiempo es la distancia durante la cual las luces estuvieron encendidas, dividida por la velocidad.

En estos últimos años justamente se utilizó una técnica así para medir el tiempo de vida del mesón π^0 . Al observar en un microscopio las pequeñas trazas dejadas en una emulsión fotográfica, en la cual los mesones π^0 habían sido creados, se vio que un mesón π^0 (se sabe que viaja a una velocidad cercana a la de la luz) se movió una distancia de 10^{-7} metros en promedio antes de desintegrarse. Vivió sólo durante unos 10^{-16} seg. Deberá ponerse énfasis que aquí hemos utilizado una definición un poco diferente del "tiempo" que las anteriores. Mientras no haya contradicciones en nuestra comprensión, nos sentimos bastante seguros que nuestras definiciones son suficientemente equivalentes.

Extendiendo nuestras técnicas aún más —y si es necesario nuestras definiciones— podemos inferir el tiempo de duración de acontecimientos aún más rápidos. Podemos hablar del

período de una vibración nuclear. Podemos hablar del tiempo de vida de las recientemente descubiertas resonancias extrañas (partículas) mencionadas en el capítulo 2. Su vida entera dura un lapso de sólo 10^{-24} segundos, el tiempo que aproximadamente tardaría la luz (la que se mueve a la mayor de las velocidades conocidas) en atravesar el núcleo de hidrógeno (el más pequeño de los objetos conocidos).

¿Qué hay de tiempos aún más pequeños? ¿Existe el "tiempo" en una escala aún más pequeña? ¿Tiene sentido hablar de tiempos menores si no los podemos medir —o quizás incluso ni pensar en ello sensatamente—, algo que sucede en un tiempo aún más pequeño? Quizás no. Estos son algunos de los problemas no resueltos que ustedes estarán preguntando y quizás contestando en los próximos veinte o treinta años.

5-4 Tiempos largos

Consideremos ahora tiempos mayores que un día. La medida de tiempos largos es fácil; sólo contamos los días siempre que haya alguien que lleve la cuenta. Desde luego encontramos que hay otra periodicidad natural: el año, de alrededor de 365 días. También hemos descubierto que la naturaleza entrega algunas veces un contador para los años, en forma de anillos de los árboles o sedimentos del fondo de los ríos. En algunos casos podemos usar esos marcadores naturales del tiempo para determinar el lapso que ha transcurrido desde algún acontecimiento primitivo.

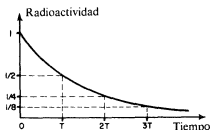


Fig. 5-3. El decrecimiento de la radioactividad en el tiempo. La actividad decrece a la mitad en cada "vida media", T .

Cuando no podemos contar los años para la medida de tiempos largos, debemos buscar otras formas de medir. Una de las que ha tenido más éxito es usar como "reloj" un material radioactivo. En este caso no tenemos un acontecer periódico como el día o el péndulo, sino un nuevo tipo de "regularidad". Encontramos que la radioactividad de una muestra de material particular decrece la misma *fracción* para sucesivos aumentos iguales en su edad. Si trazamos un gráfico de la radioactividad observada como función del tiempo (digamos en días), obtenemos una curva como la que se muestra en la figura 5-3. Observamos que si la radioactividad decrece a la mitad en T días (llamada la "vida media"), entonces decrece a un cuarto en otros T días, y así sucesivamente. En un intervalo de tiempo arbitrario t hay t/T "vidas medias", entonces la fracción que queda después de este tiempo t es $(\frac{1}{2})^{t/T}$.

Si supiéramos que un pedazo de material, digamos un pedazo de madera, contenía una cantidad A de material radioactivo cuando se formó, y encontráramos por una medida directa que ahora contiene una cantidad B , podríamos calcular la edad

TIEMPOS		VIDA	
AÑOS	SEGUNDOS	MEDIA DE	
		????????	
	10^{18}	Edad del universo	
10^9		Edad de la tierra	U^{238}
	10^{15}		
10^6		Primeros hombres	
	10^{12}	Edad de las pirámides	
10^3			Ra^{226}
	10^9	Edad de los E. E. U. U.	
	10^9	Vida de un hombre	H^3
1			
	10^6		
		Un día	
	10^3	La luz va del sol a la tierra	Neutrón
	1	Un latido del corazón	
	10^{-3}	Período de una onda sonora	
	10^{-6}	Período de una onda de radio	Muón
			Mesón π^+
	10^{-9}	La luz viaja 30 centímetros	
	10^{-12}	Período de la rotación molecular	
	10^{-15}	Período de la vibración atómica	
			Mesón π^0
	10^{-18}	La luz atraviesa un átomo	
	10^{-21}		
		Período de la vibración nuclear	
	10^{-24}	La luz atraviesa un núcleo	Partícula extraña
		????????	

del objeto, t , resolviendo la ecuación

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{t/T} = B/A.$$

Afortunadamente hay casos en los cuales podemos conocer la cantidad de radioactividad que tenía un objeto cuando se formó. Sabemos, por ejemplo, que el dióxido de carbono en el aire contiene una cierta pequeña fracción del isótopo radioactivo del carbono, C^{14} (reabastecido continuamente por la acción de los rayos cósmicos). Si medimos el contenido *total* de carbono de un objeto, sabemos que cierta fracción de esa cantidad era originalmente el C^{14} radioactivo; conocemos, por lo tanto, la cantidad inicial A a usar en la fórmula anterior. El carbono-14 tiene una vida media de 5.000 años. Con medidas cuidadosas podemos medir la cantidad que queda después de 20 vidas medias o algo así, y podemos por lo tanto “fechar” objetos orgánicos que crecieron hace 100.000 años.

Nos gustaría conocer, y creemos conocer, la vida de cosas aún más antiguas. Mucho de nuestro conocimiento está basado en las medidas de otros isótopos

radioactivos que tienen diferentes vidas medias. Si hacemos medidas con un isótopo de vida media mayor, entonces podremos medir tiempos mayores. Por ejemplo, el uranio tiene un isótopo cuya vida media es alrededor de 10^9 años, de modo que si algún material se formó con uranio en él hace 10^9 años, hoy en día sólo quedaría la mitad del uranio. Cuando el uranio se desintegra, se convierte en plomo. Consideren un pedazo de roca que se formó mucho tiempo atrás en algún proceso químico. El plomo, siendo de naturaleza química diferente al uranio, aparecería en una parte de la roca y el uranio aparecería en otra parte de la roca. El uranio y el plomo estarían separados. Si observamos hoy ese pedazo de roca, donde debiera haber sólo uranio encontraremos ahora una cierta fracción de uranio y una cierta fracción de plomo. Por comparación de estas fracciones podemos decir cuál es el porcentaje de uranio que desapareció y se transformó en plomo. Con este método se ha determinado la edad de ciertas rocas, resultando ser de varios miles de millones de años. Una extensión de este método que no usa rocas particulares, pero que observa el uranio y plomo en los océanos y usa promedios sobre la tierra, ha sido usada para determinar (en los últimos años) que la edad de la tierra misma es aproximadamente de 5,5 mil millones de años.

Es alentador que se haya encontrado que la edad de la tierra sea la misma que la edad de los meteoritos que caen sobre ella, según se determina por el método del uranio. Parece que la tierra surgió de las rocas que flotan en el espacio, y que los meteoritos, muy probablemente, son algo de aquel material que quedó. En un cierto instante, hace más de 5 mil millones de años, comenzó el universo. Se cree ahora que por lo menos nuestra parte del universo tuvo su comienzo hace cerca de diez a veinte mil millones de años. No sabemos lo que ocurrió antes de esto. De hecho, podemos muy bien preguntar de nuevo: ¿Tiene algún sentido la pregunta? ¿Tienen los tiempos anteriores algún significado?

5-5 Unidades y patrones de tiempo

Hemos dado a entender que es conveniente comenzar con alguna unidad patrón de tiempo, digamos un día o un segundo, y referir todos los otros tiempos a algún múltiplo o fracción de esta unidad. ¿Qué tomaremos como nuestro patrón básico de tiempo? ¿Tomaremos el pulso humano? Si comparamos los pulsos, encontramos que ellos varían mucho. Al comparar dos relojes se encuentra que no varían tanto. Ustedes podrían entonces decir: bien, tomemos un reloj. ¿Pero el reloj de quién? Hay una historia de un niño suizo que quería que todos los relojes de la ciudad sonaran al mediodía al mismo tiempo. Entonces fue a todas partes tratando de convencer a todos del valor de esto. ¡Todos pensaron que era una idea maravillosa que todos los otros relojes sonaran al mediodía cuando lo hiciera el propio! Es más bien difícil decidir el reloj de quién debiéramos tomar como patrón. Afortunadamente todos compartimos un reloj —la tierra—. Desde hace mucho tiempo se ha tomado el periodo rotacional de la tierra como el patrón básico del tiempo. Sin embargo, a medida que se han ido haciendo medidas más y más precisas se ha encontrado que la rotación de la tierra no es exactamente periódica cuando se mide con los mejores relojes. Estos "mejores" relojes son aquellos para los cuales tenemos razón de creer que son precisos, porque coinciden entre sí. Creemos ahora que, por varias razones, algunos días son más largos que otros, algunos días son más cortos y que en promedio el periodo de la tierra llega a ser un poco más largo a medida que los siglos pasan.

Hasta hace muy poco no hemos encontrado nada mejor que el período de la tierra, así todos los relojes se han referido a la longitud del día y se ha definido el segundo como $1/86400$ de un día promedio. Recientemente hemos estado ganando experiencia con algunos osciladores naturales que creemos ahora podrían proporcionar una referencia de tiempo más constante que la tierra y que también están basados en un fenómeno natural disponible para todos. Estos son los así llamados "relojes atómicos". Su período interno básico es el de una vibración atómica que es muy insensible a la temperatura o cualesquiera otros efectos externos. Estos relojes se mantienen en hora con una precisión de una parte en 10^9 , o mejor. Dentro de los dos últimos años un reloj atómico perfeccionado que opera basado en la vibración del átomo de hidrógeno ha sido diseñado y construido por el Profesor Norman Ramsey de la Universidad de Harvard. Él piensa que este reloj podría ser 100 veces más preciso aún. Las mediciones que se están realizando mostrarán si esto es verdad o no.

Podemos esperar que ya que ha sido posible construir relojes mucho más precisos que el tiempo astronómico, habrá pronto un acuerdo entre los científicos para definir la unidad de tiempo en términos de un reloj atómico patrón.

5-6 Distancias grandes

Volvamos ahora al problema de la *distancia*. ¿A qué distancia están o qué tamaño tienen las cosas? Cualquiera sabe que la manera de medir distancias es empezar con una regla y contar. O empezar con un pulgar y contar. Empiezan con una unidad y cuentan. ¿Cómo mide uno cosas más pequeñas? ¿Cómo subdivide una distancia? De la misma manera que subdividimos el tiempo: tomamos una unidad menor y contamos el número de tales unidades que se necesitan para obtener la unidad mayor. Así podemos medir longitudes más y más pequeñas.

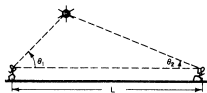


Fig. 5-4. La altura de un Sputnik se determina por triangulación.

Pero no siempre entendemos por distancia lo que se obtiene contando sucesivamente con una varilla métrica. Sería difícil medir la distancia horizontal entre las cumbres de dos montañas usando sólo una varilla métrica. Hemos encontrado por experiencia que la distancia puede medirse de otro modo: por triangulación. Aunque esto significa que realmente estamos usando una definición diferente de distancia, concuerdan cuando ambas pueden usarse. El espacio es más o menos lo que Euclides pensó que era, de modo que los dos tipos de definición de distancia concuerdan. El hecho que concuerden en la tierra nos da confianza para usar la triangulación para distancias aún más grandes. Por ejemplo, pudimos usar la triangulación para medir la altura del primer Sputnik. Encontramos que estaba aproximadamente a 5×10^5 metros de altura. Con mediciones más cuidadosas puede medirse de la misma manera la distancia a la luna. Dos

DISTANCIAS

AÑOS-LUZ METROS

		????????????
	10^{27}	Borde del universo
10^9	10^{24}	A la galaxia vecina más cercana
10^6	10^{21}	Al centro de nuestra galaxia
10^3	10^{18}	A la estrella más cercana
1	10^{15}	Radio de la órbita de Plutón
	10^{12}	Al sol
	10^9	A la luna
	10^6	Altura de un Sputnik
	10^3	Altura de una torre de TV Altura de un niño
	1	
	10^{-3}	Un grano de sal
	10^{-6}	Un virus
	10^{-9}	Radio de un átomo
	10^{-12}	Radio de un núcleo
	10^{-15}	????????????