

## 1. INTRODUCCIÓN

Antes de comenzar el desarrollo sistemático de los tópicos de este texto conviene hacer una breve introducción para dar una primera (y provisional) respuesta a interrogantes que todo estudiante se propone, a saber: ¿qué es la Física? ¿qué estudia? ¿cómo lo hace? ¿para qué sirve a quien cursa otra carrera? ¿qué debo saber yo de Física? ¿cómo debo estudiar esta materia? Trataré aquí de abordar sintéticamente estos temas.

### **Qué es la Física, qué estudia y cómo lo hace**

La Física es una ciencia de la naturaleza. Antaño las ciencias de la naturaleza eran una sola, que se llamaba *Filosofía Natural*. Comprendía la Física, la Química, la Astronomía, la Geología, la Biología, etc. La Física estudia las propiedades e interacciones de la materia y los fenómenos, procesos, transformaciones y manifestaciones que se relacionan con ella. La Física es una ciencia *experimental*: para ella el experimento es el único juez de la verdad. El conocimiento físico se basa en la aplicación del *método científico*. En esto la Física no se diferencia de las otras ciencias de la naturaleza. Los aspectos fundamentales del método científico son:

- la observación,
- la experimentación,
- el razonamiento.

Una característica importante del razonamiento físico es el empleo de *modelos*. Un modelo es una versión simplificada de la realidad, que permite el tratamiento matemático de aspectos de la misma. En pocas palabras y sin pretensión de rigor, se puede decir que un modelo físico consiste en abstraer de una situación real, y por lo tanto compleja, unos pocos elementos simples que son los más fundamentales para lo que interesa estudiar. Estos elementos se manejan y estudian con la ayuda de la *Matemática*. Mostraré oportunamente como se hace esto.

Como todo conocimiento científico, el conocimiento físico está *organizado*, estructurado e interrelacionado con criterios lógico-deductivos. Esto obedece tanto a razones prácticas de economía y síntesis, como también en gran medida a razones de carácter filosófico y estético. Así, el conocimiento físico se expresa por medio de *leyes*, y éstas se estructuran en *teorías*.

El conocimiento físico es por su propia naturaleza *limitado*, *provisorio* y está en permanente *evolución*.

Es limitado y por lo tanto representa tan sólo una *aproximación* a la realidad, por dos motivos principales:

- el conocimiento *incompleto* de las leyes fundamentales,
- las *simplificaciones* que necesariamente se introducen al tratar situaciones complejas.

Es provisorio y se encuentra en permanente evolución porque:

- toda formulación de las leyes y conceptos físicos está siempre sujeta a revisión a medida que se llevan a cabo nuevas observaciones y experimentos,
- continuamente se perfeccionan los métodos y se progresa en el estudio de las situaciones complejas de la realidad.

No está demás en esta introducción describir brevemente el estado actual del conocimiento físico.

## **Fundamentos de la Física**

La base de la física es la *Teoría Atómica*, que en su versión actual postula que toda la materia del Universo está formada a partir de ciertos constituyentes últimos: las *partículas elementales* o *fundamentales*, así llamadas porque no son ulteriormente divisibles en partes más simples. La *estructura* y las *propiedades* de la materia en sus diferentes estados (sólido, líquido, gaseoso y plasma) y el comportamiento de todo sistema físico tanto en la escala microscópica como en las escalas macroscópicas y cósmicas, están determinados por, y se pueden deducir<sup>1</sup> a partir de las propiedades de las partículas fundamentales y de sus interacciones<sup>2</sup>. Así los procesos atómicos permiten formular modelos que describen los fenómenos a escala macroscópica, por ejemplo los cambios de estado, las reacciones químicas, los procesos de disolución, difusión, etc.

Una parte básica de la Física abarca entonces el estudio de las partículas fundamentales y sus *interacciones*. En el pasado se creyó que los constituyentes últimos de la materia eran los átomos. A principios del siglo XX se encontró que los átomos no son indivisibles, sino que están constituidos por un *núcleo* rodeado por cierto número de *electrones*. Más adelante se descubrió que el núcleo está formado por *protones* y *neutrones*. Más recientemente se vio que los protones y los neutrones no son elementales, sino que son estructuras compuestas por entes más simples llamados *quarks*. Como se ve la idea de “partículas fundamentales” sigue en pie, pero con el tiempo cambió nuestra visión de cuáles son esas partículas a medida que se descubrió que los objetos que se creían elementales están formadas por partes más simples.

### El modelo standard

No pretendemos en esta breve introducción desarrollar la física de las partículas, bastará mencionar que en el momento actual las partículas fundamentales se clasifican en dos familias:

- leptones y quarks (llamados colectivamente *fermiones*),
- bosones (llamados a veces *bosones mensajeros*).

De acuerdo con la visión actual, que recibe el nombre de *modelo standard*, los constituyentes últimos de la materia son los quarks y los leptones. Los neutrones, protones, mesones, etc. que hasta hace poco se creían elementales, están compuestos por quarks. De las propiedades e interacciones de los quarks se derivan las de los protones y los neutrones. De las propiedades de éstos provienen las diferentes especies de núcleos atómicos y sus características, en particular el número de protones y neutrones que contienen, su masa y su carga eléctrica. La carga del núcleo establece cuántos electrones poseen los átomos. Los electrones atómicos determinan las propiedades físicas y químicas de los elementos y sus compuestos, es decir las moléculas. Estas características son la base de los modelos que describen la materia y los fenómenos a escala macroscópica (como los cambios de estado) y así sucesivamente. Toda la materia del universo está constituida, en última instancia, por leptones y quarks, y sus propiedades derivan (aunque de una manera muy indirecta) de las propiedades e interacciones de esas partículas.

Los *leptones* comprenden los electrones, los muones, los tauones, las tres clases de neutrinos, y sus respectivas *antipartículas*. Los *quarks* (de los cuales hay seis clases diferentes) son los constituyentes primarios del neutrón, del protón y de otras partículas que aparecen en procesos de alta energía (llamadas *bariones* y *mesones*), todas las cuales integran la familia de los *hadrones*.

---

<sup>1</sup> Por lo menos en línea de principio.

<sup>2</sup> Esto es, de las influencias que cada partícula ejerce sobre las demás y las que sufre debido a la presencia de las otras.

Igual que en el caso de los leptones, a cada quark le corresponde una antipartícula (o *antiquark*). Las antipartículas forman la *antimateria*.

Si una partícula se encuentra (choca) con una antipartícula de su misma especie se puede producir la *aniquilación* de ambas. En este proceso desaparece la materia y se libera una cantidad equivalente de energía. Es posible también el proceso inverso, por el cual desaparece energía y se crea un *par* formado por una partícula más su correspondiente antipartícula.

La segunda familia de partículas, los *bosones*, comprende los *fotones*, los *bosones*  $W^\pm$  y  $Z^0$ , los *gluones* y los *gravitones*. Los bosones son responsables de las interacciones de los leptones y quarks, como explicaremos enseguida.

Las interacciones entre quarks y leptones responden todas al mismo patrón: se trata siempre de combinaciones de procesos elementales que consisten en la emisión o en la absorción de un bosón por parte del quark o leptón. Este proceso elemental lo podemos representar gráficamente mediante un diagrama (Fig. 1.1). Este diagrama representa una interacción en que un fermión emite un bosón, el cual se lleva consigo energía, cantidad de movimiento, momento angular y eventualmente otros atributos (como carga eléctrica o de otra clase) y los puede entregar a otra partícula cuando es absorbido por ésta<sup>3</sup>. De esta manera los bosones actúan como intermediarios entre las partículas y transmiten la interacción (de ahí la denominación de “mensajeros”).

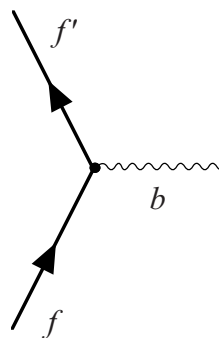


Fig. 1.1. En este diagrama, las líneas llenas representan un quark o un leptón antes ( $f$ ) y después ( $f'$ ) de la interacción ( $f$  y  $f'$  pueden ser de diferente especie). El cambio de dirección de la línea llena simboliza los cambios sufridos por dicha partícula. Estos cambios dependen de la naturaleza de la interacción y no sólo alteran el estado de movimiento de la partícula, también pueden afectar sus otros atributos (por ejemplo puede cambiar la carga, ya sea eléctrica o de otra clase) y con ello la partícula puede cambiar de especie e incluso transformarse en una antipartícula. La línea ondulada ( $b$ ) representa el bosón que transmite la interacción. El vértice donde se juntan las líneas que representan el fermión y el bosón simboliza la interacción propiamente dicha.

En la Fig. 1.2 se ven los diagramas de los procesos elementales de emisión, absorción, creación de un par partícula-antipartícula y aniquilación de un par. El tipo de interacción determina que clase de bosón es emitido o absorbido y que cambios experimenta el fermión. Dicho bosón lleva consigo una constancia de los cambios producidos en los atributos del fermión. En la interacción hay un balance entre los atributos del bosón y los cambios soportados por el fermión, de forma tal que se garantice el cumplimiento de ciertas leyes generales de conservación.

<sup>3</sup> En este tipo de diagramas, llamados diagramas de Feynman, es usual imaginar que la dirección del tiempo es hacia arriba, y que líneas de fermiones dirigidas hacia arriba representan partículas, y líneas hacia abajo, antipartículas.

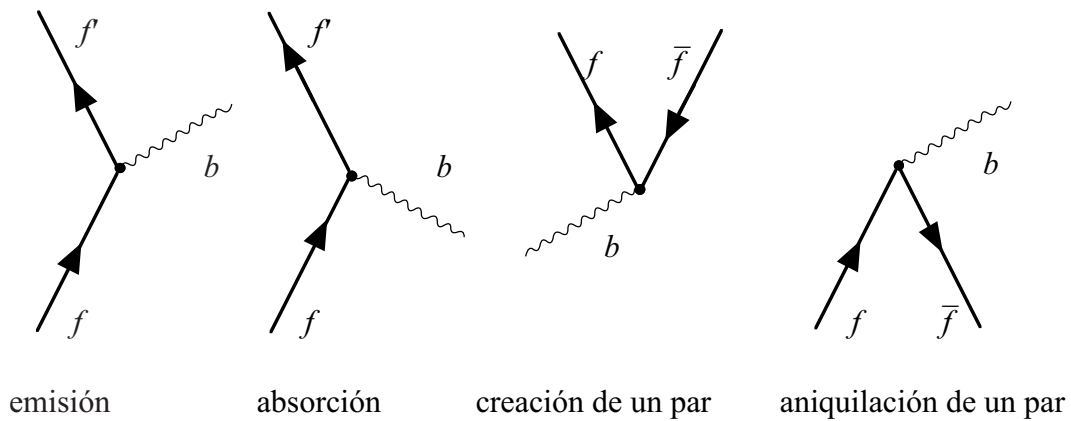


Fig. 1.2. Procesos elementales de interacción. La emisión y la absorción de un bosón puede estar acompañada por un cambio de especie del fermión. Los pares consisten siempre de una partícula y una antipartícula de la misma especie. Las antipartículas se designan con el mismo símbolo que la partícula, con una línea superpuesta.

Cualquier interacción entre dos fermiones se representa entonces mediante diagramas que se obtienen combinando los que representan los procesos elementales. Por ejemplo, dos electrones pueden interactuar intercambiando un fotón como lo indica el diagrama de la Fig. 1.3.

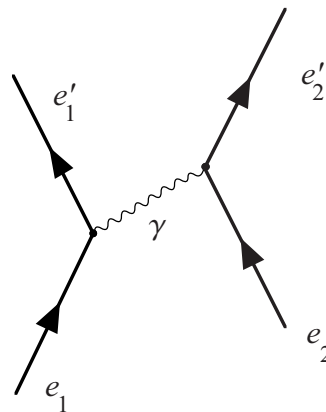


Fig. 1.3. Interacción entre dos electrones debida al intercambio de un fotón.

Como ya dijimos las interacciones entre partículas se describen mediante esquemas del tipo de la Fig. 1.3 y variantes más complejas que surgen de intercambiar dos, tres, etc. bosones. La clase de bosones intercambiados depende de reglas que establecen qué bosones puede absorber y/o emitir una partícula. De acuerdo con ello hay *tres* diferentes clases de interacciones (o *fuerzas*) fundamentales, que se resumen en la Tabla 1.1. Como se indica en la misma la interacción electromagnética y la interacción débil son dos aspectos de una única interacción: la interacción electrodébil<sup>4</sup>. No obstante se las suele separar porque sus manifestaciones son muy diferentes. La interacción electromagnética causa las transiciones entre estados nucleares y atómicos debidas a la emisión o absorción de radiación y es responsable de la estructura atómica y molecular e indirectamente de las propiedades macroscópicas de la materia. En cambio la interacción débil produce transformaciones entre quarks de diferente especie y su principal manifestación es el de-

<sup>4</sup> La unificación entre las interacciones electromagnética y débil sólo se pone en evidencia para energías muy grandes, como las que se obtienen en los grandes aceleradores, en los rayos cósmicos y que existieron en los primeros instantes de vida del Universo.

caimiento radioactivo y por lo tanto la estabilidad del núcleo atómico. La interacción fuerte es responsable de la existencia de los protones y neutrones y de sus interacciones (las fuerzas nucleares) y determina así<sup>5</sup> las propiedades del núcleo. La interacción gravitatoria produce la atracción gravitacional, que determina la estructura y evolución de la materia en escala cósmica.

Las partículas fundamentales (tanto fermiones como bosones mensajeros) se describen matemáticamente por medio de *campos cuánticos*. Más adelante introduciremos la noción de campo, que es de enorme importancia en la Física.

Tabla 1.1. Interacciones fundamentales.

Interacción :	Partículas que interactúan:	Bosón mensajero:	Manifestaciones:
Gravitatoria	todas	gravitón	Atracción gravitatoria
Electromagnética	partículas con carga eléctrica	fotón ( $\gamma$ )	Fenómenos eléctricos y magnéticos, fuerzas entre átomos y moléculas, propiedades macroscópicas de la materia
Electrodébil			
Débil	leptones y quarks	bosones $W^\pm$ y $Z^0$	Decaimiento radioactivo
Fuerte	quarks	gluones	Estructura y propiedades del núcleo atómico

En principio las tres fuerzas fundamentales de la Tabla 1.1 determinan por completo las propiedades y el comportamiento de la materia, no sólo a escala microscópica, sino también macroscópica o cósmica. Esta afirmación es cierta con las salvedades que provienen de la falta de completitud y de la provisoriedad del conocimiento físico.

El marco para la descripción de las partículas fundamentales y sus interacciones está dado por dos teorías fundamentales:

- la *Teoría Cuántica de Campos*, que comprende la teoría electrodébil y la cromodinámica; la *teoría electrodébil* (que comprende a su vez la *electrodinámica cuántica* y la *teoría de la fuerza débil*) describe las interacciones electromagnética y débil; la *cromodinámica* describe las interacciones de los quarks mediadas por los gluones;
- la *Teoría General de la Relatividad*, que es la descripción más fundamental de la interacción gravitatoria.

Las características de las partículas y de sus interacciones se relacionan con, y están subordinadas a, simetrías de la naturaleza y propiedades muy generales de la geometría del espacio-tiempo. No vamos a entrar en los detalles de estas cuestiones que son bastante profundas, pero conviene mencionar aquí que las leyes fundamentales de conservación provienen de propiedades del espacio-tiempo. Algunos ejemplos de estas relaciones se dan en la Tabla 1.2.

<sup>5</sup> Juntamente con la interacción electromagnética.

Además de las que figuran en la Tabla 1.2 hay otras propiedades de simetría del espacio-tiempo y de los campos que residen en él. Se relacionan con otras leyes de conservación, por ejemplo la que establece la conservación de la carga eléctrica, y otras más. No nos detendremos más sobre estos temas, pero conviene que el lector sepa que hay un marco más amplio dentro del cual se insertan las nociones y conceptos que desarrollaremos en estas páginas.

Tabla 1.2. Simetrías y leyes de conservación.

Propiedad:	Ley de conservación relacionada:
Homogeneidad del espacio	Conservación de la cantidad de movimiento
Isotropía del espacio	Conservación del momento angular
Homogeneidad del tiempo	Conservación de la energía

### Más allá del modelo standard

Por lo que sabemos el modelo standard (MS) describe correctamente el comportamiento de la naturaleza dentro de los límites hasta los que se ha podido llegar hoy con las observaciones y los experimentos. Sin embargo los físicos teóricos no están del todo satisfechos con él, porque deja sin respuesta interrogantes importantes: ¿porqué hay tres fuerzas fundamentales? ¿porqué hay tantas variedades de leptones y quarks, siendo que la materia ordinaria consiste de solamente dos especies de quarks y dos de leptones? Además el MS depende de varios parámetros<sup>6</sup> cuyos valores se tienen que asignar “a dedo”, lo cual es poco satisfactorio. Por estos motivos se piensa que el MS es todavía incompleto y que se debe poder hallar una descripción más simple y más fundamental de la naturaleza. Hay indicios, en efecto, que así como las interacciones electromagnética y débil se unifican en una única fuerza electrodébil cuando se observa el comportamiento de las partículas a energía muy grande, también las interacciones fuerte y electrodébil tienden a unificarse a energías mucho mayores. Se han propuesto así diversas teorías unificadas<sup>7</sup>, pero hasta ahora no hay evidencia experimental que permita decidir cual es la correcta. Las energías necesarias para llegar a la “gran unificación” son tan enormemente grandes que es difícil imaginar que se pueda desarrollar la tecnología necesaria para obtenerlas. Sin embargo se alcanzan (y superan) en los rayos cósmicos y también en los primerísimos instantes del Big Bang. Por este motivo hay mucho interés en observar fenómenos de altísima energía en los rayos cósmicos, pero tal observación es muy difícil ya que se trata de eventos extraordinariamente raros. Por otra parte los primerísimos instantes del Universo son inaccesibles a la observación directa, pero lo que entonces ocurrió ha dejado rastros que se pueden detectar hoy en el Cosmos. De allí proviene el gran interés que ha cobrado la Cosmología.

Otro motivo de insatisfacción de los físicos teóricos es que en el MS coexisten dos teorías fundamentales (la Teoría Cuántica y la Relatividad General). Les gustaría tener una *única* teoría fundamental, y también una *única fuerza* entre las partículas. Desde principios del siglo XX se hicieron intentos de unificar la interacción gravitatoria con la electromagnética (la única otra que

<sup>6</sup> Entre ellos las *constantes de acoplamiento*, que determinan la intensidad de las diferentes interacciones fundamentales.

<sup>7</sup> Que se suelen designar con el acrónimo GUT, que proviene de Great Unified Theory.

se conocía entonces) pero todos fracasaron. Como también fracasaron los intentos de unificar la Teoría Cuántica con la Relatividad General. Debido a eso el problema de unificar la gravitación con las demás fuerzas se dejó de lado y hasta hace poco no se hizo nada nuevo al respecto. Pero recientemente se han encontrado teorías consistentes del punto de vista matemático y que permiten lograr ese objetivo tan anhelado (como la llamada *Teoría M*). Sin embargo por el momento (y quizás por mucho tiempo) las predicciones de esas teorías están fuera del alcance de la verificación experimental.

Más allá de que se logre o no una teoría unificada de todas las partículas y fuerzas, debe quedar en claro al lector que nada cambiará en lo referente a la descripción de la naturaleza en las escalas que podemos observar hoy. Para eso las teorías actuales son perfectamente satisfactorias.

### Características de las leyes y principios fundamentales de la Física

Es importante señalar dos características de las leyes y principios fundamentales de la Física. Una de ellas es la simplicidad. La otra es la universalidad. Las leyes básicas de la Física son sumamente *simples* (basta ver en efecto los diagramas de las Figs. 1.1 a 1.3) y dependen de pocos parámetros y magnitudes. Sin embargo esto no significa que sea fácil aplicarlas a situaciones concretas. En la práctica esto puede ser muy difícil, cuando no lisa y llanamente imposible. Justamente, el esfuerzo de los físicos ha consistido siempre (y sigue consistiendo) en superar dos clases de dificultades:

- reconocer en la compleja realidad de la naturaleza las leyes simples que la rigen, y
- conocidas las leyes, deducir sus consecuencias en los casos de interés.

Que las leyes fundamentales de la Física sean simples no significa que sean fáciles de entender. Su simplicidad se logró al precio de introducir conceptos cada vez más abstractos y por lo tanto menos intuitivos. En efecto, gran parte del proceso de aprendizaje consiste en familiarizarse con estos conceptos, para manejarlos y usarlos correctamente. Por eso la sencillez de las leyes básicas *no* es evidente para el profano y se percibe sólo después de un estudio paciente y profundo.

La segunda característica que quiero destacar es la *universalidad* de las leyes físicas fundamentales: consiste en que éstas son aplicables al macrocosmos y al microcosmos. Rigen tanto para los seres vivos como para la materia inanimada. Valen en nuestros laboratorios, en el espacio, en las estrellas, y hasta los confines del universo. Se extienden desde el pasado más remoto hasta el más lejano futuro. Esto, por lo menos, dentro de límites muy amplios.

### **Física de sistemas macroscópicos**

No todas las leyes de la Física gozan de universalidad: sólo la tienen las leyes fundamentales. Veremos más adelante muchas otras leyes que por no ser fundamentales tienen un ámbito de validez *limitado*. Un ejemplo de esta clase es la ley del resorte:

$$F = kx \tag{1.1}$$

Esta ley vincula la fuerza  $F$  con que tiramos de (o comprimimos) un resorte con el estiramiento (o acortamiento)  $x$  que sufre el mismo, y establece que el estiramiento (o acortamiento) es proporcional a la fuerza que lo produce; la constante de proporcionalidad  $k$  es una característica del resorte y se llama *constante del resorte* (ver la Fig. 1.4). La ley (1.1) vale sólo si el cambio de

longitud del resorte es *pequeño*, y si el mismo está hecho de un material *elástico*. Además la “constante”  $k$  depende de muchos factores<sup>8</sup>. Pero eso lo veremos mejor más adelante.

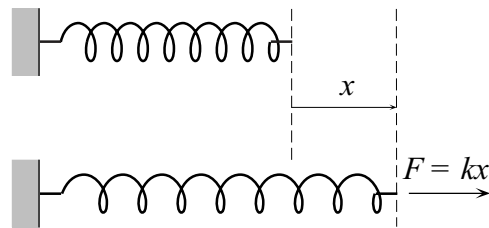


Fig. 1.4. La ley del resorte: el cambio de longitud del resorte es proporcional a la fuerza que lo produce.

Este ejemplo es típico de las leyes que describen el comportamiento de los sistemas macroscópicos. Cuando se quiere aplicar la física al estudio de sistemas macroscópicos (por ejemplo a un organismo viviente, a una roca, al agua de un río, etc.), y éste es el tipo de problemas que más le interesan a los estudiantes de otras carreras y que se presentan en la inmensa mayoría de las aplicaciones prácticas de la Física, tropezamos de inmediato con grandes dificultades.

El origen de los inconvenientes es que los sistemas bajo estudio, lejos de ser simples, están compuestos por un número inmenso de moléculas o átomos. Es así que aún si conocemos las leyes que rigen el comportamiento de las partículas fundamentales, no resulta de ningún modo evidente cómo proceder para describir lo que le pasa al sistema en su conjunto, que es lo que nos interesa. Recordemos que un *mol* contiene unas  $6 \times 10^{23}$  moléculas. Éste es un número enorme, y es obvio que es imposible dar una descripción detallada del movimiento de todas y cada una de esas moléculas<sup>9</sup>. Pero no sólo esto es impracticable: en realidad (y afortunadamente) *carece de interés*. Cuando estudiamos la materia del punto de vista macroscópico, es decir en su conjunto y en cantidades apreciables, *no nos interesa* saber qué le sucede a cada una de las moléculas que la integran. Lo que nos interesa es conocer el comportamiento de los *parámetros macroscópicos* que describen al sistema, como la temperatura, la presión, la densidad, etc., y contar con las leyes que establecen las relaciones que hay entre ellos y su evolución con el tiempo.

Los métodos para estudiar los sistemas macroscópicos son varios y en parte complementarios. La *Termodinámica* estudia las relaciones entre las variables macroscópicas que describen un sistema en *equilibrio* a partir de postulados muy generales acerca de la conservación de la energía y el sentido de los procesos espontáneos, sin hacer ninguna hipótesis sobre la estructura microscópica y las interacciones de las moléculas, átomos o partículas que integran el sistema. Al ser tan general, la Termodinámica vale para un rango muy amplio de situaciones. Pero al mismo tiempo está limitada, por cuanto no puede decir *nada* acerca de las propiedades de las sustancias,

<sup>8</sup> El valor de  $k$  está determinado por el grosor del alambre, el diámetro de las espiras, la cantidad y el paso de las mismas y por el módulo de rigidez del material.

<sup>9</sup> En condiciones standard de temperatura y de presión un mol de un gas ocupa un volumen de 22.6 litros. Incluso una porción diminuta del gas, por ejemplo un micromol (que ocupa un volumen de  $22.6 \text{ mm}^3$ ), comprende  $6 \times 10^{14}$  moléculas, un número gigantesco. Sin contar que cada molécula está compuesta por átomos, que a su vez se componen de electrones y núcleos y éstos últimos se componen de protones y neutrones, que tampoco son partículas elementales. Está claro que cada molécula es ya un objeto sumamente complejo, y deducir sus propiedades a partir de las leyes que rigen las partículas fundamentales es una tarea ímproba.



salvo establecer relaciones entre ellas. Por ejemplo, la Termodinámica no nos puede decir cuánto vale el calor específico de un gas, o su conductividad térmica, etc. Estos datos se tienen que obtener de otra forma, por ejemplo mediante mediciones de laboratorio. Además, la Termodinámica no trata sistemas fuera del equilibrio<sup>10</sup>.

La *Física Estadística* permite tender un puente entre las propiedades de los átomos y las moléculas y los parámetros macroscópicos. Mediante la Física Estadística se puede *calcular* el calor específico de una sustancia, sus propiedades eléctricas y magnéticas y muchas otras características, a partir de las propiedades e interacciones de las moléculas y átomos que la integran<sup>11</sup>. Pero las más de las veces en el curso de estos cálculos es preciso efectuar aproximaciones y simplificaciones. En última instancia se trata de plantear modelos, más o menos sofisticados pero siempre aproximados. Además la Física Estadística trata solamente sistemas en equilibrio o muy cerca del equilibrio.

La *Teoría Cinética* permite tratar sistemas macroscópicos fuera del equilibrio, pero sólo al precio de aproximaciones drásticas y sólo en situaciones muy simples se logra llegar a planteos que se pueden manejar matemáticamente.

Todos estos métodos conducen a descripciones de los sistemas macroscópicos que se caracterizan por las siguientes particularidades:

- La introducción de fuerzas *no fundamentales*, como las fuerzas de rozamiento, de viscosidad, las fuerzas elásticas, de tensión superficial, etc. Estas fuerzas no son fundamentales porque no representan *nuevas* interacciones, sino que derivan en forma más o menos complicada de las interacciones que figuran en la Tabla 1.1. En particular todas las fuerzas que acabamos de mencionar son de origen eléctrico.
- La aparición de la *irreversibilidad*. A escala microscópica las interacciones entre moléculas son reversibles: si se registraran en un film los movimientos un sistema compuesto por un número muy pequeño de moléculas y se pasara el film al revés, o sea comenzando por el fin y terminando por el principio, un espectador no vería nada extraño en esos movimientos. Por el contrario el comportamiento de un sistema macroscópico tiene un sentido bien definido en el tiempo: un cubito de hielo en un vaso de agua se derrite. Si se registra este proceso y se pasa el film al revés, cualquier observador (aunque no sepa nada de Física) dirá que lo que está viendo no ocurre *jamás*. La irreversibilidad es una consecuencia de nuestra descripción de los sistemas que contienen muchas moléculas, de resultas de la cual los parámetros macroscópicos se obtienen por métodos estadísticos a partir del comportamiento microscópico.
- El empleo de *modelos*, como veremos oportunamente más adelante. Estos modelos consisten esencialmente en el intento de condensar las propiedades de los medios materiales en un pequeño conjunto de parámetros. Los conceptos de gas, líquido y sólido elástico que se emplean en la Mecánica del Continuo son típicos modelos. Pero hay muchos otros.

---

<sup>10</sup> Por ejemplo, no nos puede decir cuánto va a demorar en fundirse un trozo de hielo que hemos colocado en un vaso de agua.

<sup>11</sup> Las propiedades de los átomos y las moléculas son materia de estudio de la Física Atómica y la Física Molecular. En ambos casos se trata de sistemas compuestos por cierto número (a veces muy grande) de partículas. Afortunadamente ocurre que para calcular sus propiedades basta tomar en cuenta solamente las fuerzas eléctricas entre los núcleos y los electrones, y para los fines de la Física Estadística en muchos casos alcanza con conocer unas pocas de esas propiedades, como la masa, el tamaño y el comportamiento aproximado de las interacciones electrostáticas entre átomos y moléculas. Aún así es preciso hacer numerosas aproximaciones.

- El uso de la *Mecánica del Continuo*, que trata el objeto de estudio (gas, líquido o sólido) como un *medio continuo* en el sentido matemático (es decir un medio que se puede dividir indefinidamente en partes más pequeñas) y *no* como un conjunto de átomos y/o moléculas. Está claro que esta hipótesis *contradice* la Teoría Atómica, por lo tanto la Mecánica del Continuo es tan solo un modelo, una aproximación a la realidad que resulta tanto mejor cuanto mayores son las dimensiones del sistema en comparación con el tamaño de las moléculas que lo constituyen y las distancias entre ellas. Claramente este modelo da resultados *falsos* si se lo intenta aplicar para describir fenómenos a escala demasiado pequeña. Esto, sin embargo, no afecta para nada su inmensa utilidad ni sus innumerables aplicaciones prácticas a la ingeniería, la tecnología y a muchas otras Ciencias.
- Correspondiendo a los diferentes modelos existen diferentes *regímenes*, cada uno adecuado para describir al sistema dentro de ciertos rangos de valores de los parámetros que lo caracterizan. Estos rangos están determinados por las condiciones de validez de las aproximaciones en que se funda el modelo, aproximaciones que a su vez dependen de cuáles son los aspectos que se han dejado de lado para simplificar el problema y hacerlo manejable.
- Del punto de vista matemático la descripción de sistemas macroscópicos como los fluidos presenta importantes dificultades debido a que da lugar a ecuaciones *no lineales*. Un ejemplo de comportamiento no lineal son las olas del mar, que se *deforman* al propagarse y finalmente *rompen*. La no linealidad se relaciona también con otro importante fenómeno, la *turbulencia*, que oportunamente trataremos con detalle.

En resumen y para concluir estos párrafos introductorios, podemos decir que en contraposición con la sencillez de la física fundamental, la física de los sistemas macroscópicos es extremadamente compleja y su complicación *crece* a medida que se refina y perfecciona la descripción incluyendo elementos y factores que se despreciaron previamente. Las leyes que se obtienen *no son universales*, sino que tienen un ámbito de validez limitado. Esto se debe tener siempre presente para no caer en errores. En compensación por su complicación, la física macroscópica es menos abstracta y más *intuitiva*, porque los objetos que estudia son más familiares.

### **La Mecánica y su rol en el contexto de la Física**

La Mecánica es la parte de la Física que estudia el movimiento prescindiendo de las propiedades y características del objeto que se mueve. Por ese motivo es un ingrediente básico tanto de las teorías fundamentales como de la descripción de los sistemas macroscópicos.

La Mecánica que se presenta en estas páginas es la que los físicos denominan Clásica o Newtoniana y *no* es la teoría más general. No es aplicable en los dominios *atómico* y *subatómico*. Tampoco se puede aplicar cuando se quiere describir movimientos con velocidades cercanas a la *velocidad de la luz* (aproximadamente 300 000 km/s). Ni se puede usar en presencia de *campos gravitatorios muy intensos* como los que existen en las proximidades de las estrellas de neutrones y de los agujeros negros. En los primeros dos casos la teoría correcta es la Mecánica Cuántica Relativística, en el tercero se debe recurrir a la Relatividad General. La presentación de estas teorías excede el nivel de un texto introductorio y por ese motivo no las vamos a tratar, aunque oportunamente daré al lector una idea de sus fundamentos. La discusión de estos tópicos, aún a nivel elemental, requiere un examen crítico de los conceptos de espacio y tiempo y de los procesos de medición, algo que dejo para más adelante.

Es importante sin embargo que el lector tome conciencia desde el comienzo de las limitaciones de la teoría que va a estudiar. En síntesis, la Mecánica Newtoniana es el límite de la Mecánica

Cuántica Relativística para bajas velocidades y para sistemas macroscópicos, y es el límite para campos gravitatorios débiles de la Relatividad General. Dentro de esos límites está la inmensa mayoría de los sistemas y fenómenos del ámbito terrestre y para ellos la Mecánica Newtoniana es una teoría correcta y confiable. Nada nuevo que se descubra en los ámbitos exóticos del dominio subnuclear, de los agujeros negros y estrellas de neutrones, o de los primerísimos instantes de vida del universo puede alterar nuestra confianza en la Mecánica Newtoniana, siempre que la usemos dentro de su ámbito de validez. Oportunamente daré criterios prácticos para determinar en casos concretos si se pueden o no tratar por medio de la Mecánica Newtoniana.

### ***El lenguaje de la Física***

El conocimiento físico se expresa por medio de un lenguaje que emplea la sintaxis, la gramática y las palabras del idioma común a las que se suman neologismos y términos técnicos cuyo significado se debe aprender, además de símbolos y fórmulas matemáticas. El uso de términos del lenguaje común ayuda la intuición y facilita la transmisión del conocimiento, pero puede provocar confusiones al neófito. En efecto palabras como calor, energía, volumen, temperatura, onda, trayectoria y muchas más que pertenecen al lenguaje cotidiano, tienen en la Física un significado algo diferente, mucho más preciso y restringido. Los símbolos y fórmulas matemáticas son una suerte de estenografía que permite condensar y sintetizar con extrema eficiencia conceptos, procedimientos y relaciones que sería imposible expresar con igual economía y precisión por medio de palabras. Por este motivo parte de las dificultades del aprendizaje de la Física provienen de que el neófito tiene que aprender este idioma, para interpretarlo y expresarse correctamente por medio de él. Es fundamental entonces que el lector se familiarice con el significado de los términos y preste mucha atención al uso correcto de los mismos.

En el empleo de símbolos y fórmulas es preciso prestar particular atención. Toda vez que se introduce un símbolo es imprescindible definir su significado, esto es, decir qué representa. Un símbolo no definido puede representar cualquier cosa. Por lo tanto una expresión como la ec. (1.1) carece de significado si no se aclara qué representan<sup>12</sup> los símbolos  $F$ ,  $k$  y  $x$ . Es fundamental aclarar estas cosas, dado que existe una absoluta libertad en la elección de los símbolos, y muchas veces el mismo símbolo se usa, en diferentes contextos, para designar conceptos distintos. Por ejemplo  $F$  se suele emplear en Mecánica para designar la magnitud de una fuerza, mientras que en Termodinámica se acostumbra designar con  $F$  un concepto completamente diferente<sup>13</sup>. Además caracteres como  $F$ ,  $F$ ,  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{F}$ ,  $f$ ,  $f$ ,  $\mathbf{f}$ ,  $\mathbf{f}$ ,  $f'$ ,  $\dot{f}$ ,  $\ddot{f}$ , etc. que difieren solo por el estilo y la presencia o no de adornos, subíndices, superíndices, etc. se consideran símbolos *diferentes* y pueden representar (de hecho representan) distintos conceptos. Existen ciertas convenciones sobre la notación, que facilitan la tarea del lector, pero no todos los autores emplean las mismas convenciones y además en distintas ramas de la Física se usan convenciones diferentes. Todo esto puede confundir a quien toma en sus manos por primera vez un libro de Física, pero con la práctica se adquiere el dominio necesario para entenderlo y se aprecian las enormes ventajas que se obtienen gracias al uso de símbolos y fórmulas.

He procurado en este libro introducir la mayoría de los términos, símbolos, notaciones y convenciones que se emplean en la literatura física, incluso muchos que no aparecen en los textos de

---

<sup>12</sup> Si no se dice qué representan los símbolos, expresiones como la (1.1) son simplemente expresiones matemáticas sin contenido físico.

<sup>13</sup> La función de estado llamada Energía Libre o Función de Helmholtz.

nivel introductorio. Los estudiantes de Física los encuentran recién en los textos más avanzados, pero en mi opinión no hace daño introducirlos en este nivel. En cuanto a los estudiantes de otras carreras, es fundamental que los conozcan pues en caso contrario nunca podrán establecer comunicación con los físicos y la literatura física les resultará incomprensible. También existe el problema inverso: los biólogos, los geólogos, los astrónomos, los meteorólogos, etc. tienen cada uno su propio lenguaje y la mayoría de los físicos no lo entienden, cosa que dificulta la comunicación entre ellos y por lo tanto las colaboraciones multidisciplinarias. En vista de esto traté de aportar un granito de arena, introduciendo en las aplicaciones y ejemplos algunos conceptos y términos de otras disciplinas para que los físicos se familiaricen con ellos.

### **Los servicios que presta la Física a las otras Ciencias**

En el pasado las ciencias de la naturaleza eran una sola que comprendía la Física, la Química, la Biología, la Geología, la Astronomía, etc. El gran desarrollo científico y correlativamente el volumen creciente de conocimientos que se fue acumulando especialmente a partir del siglo XIX, tendió a separar estas disciplinas porque es imposible para una única persona adquirir el dominio de todas ellas.

Puesto que la Física estudia los fenómenos y propiedades de la naturaleza en sus formas más simples y básicas, es lógico que haya sido la primera en alcanzar un grado de refinamiento que le permite plantear sus problemas mediante el lenguaje matemático. Este fue un avance de enorme importancia, ya que permite emplear el poderoso arsenal de la Matemática para procesar las expresiones y fórmulas y encontrar resultados. Este refinamiento no se ha alcanzado todavía en igual medida en otras disciplinas, debido a que los objetos que estudian son más complejos y no se prestan fácilmente a una descripción matemática. De resultados de eso la comunicación entre los físicos y los cultores de otras ciencias no es fácil y quien no es físico suele ver la Física como una ciencia abstracta, extraña y fuera de este mundo.

No es así, naturalmente. Tanto el físico, como el biólogo, el geólogo, el químico, etc. estudian aspectos de la naturaleza. La diferencia está en el enfoque, que es distinto. Pero tanto una célula como un mineral, una montaña, una nube o una estrella son sistemas físicos, y como tales se comportan de acuerdo con las leyes de la física. Por este motivo la Física tiene mucho que ver con las demás ciencias naturales. Todo cultor de una ciencia natural que deja atrás el estudio meramente descriptivo para buscar las respuestas a problemas más profundos y encontrar explicaciones más rigurosas y básicas de los misterios de la naturaleza, a medida que avanza encuentra más y más frecuentemente cuestiones donde la Física juega un papel importante y tanto mayores son los servicios que le puede prestar.

Sintéticamente, la Física es útil a las otras Ciencias por dos razones que comentaré brevemente.

- La primera razón es que cuenta con un extenso y sofisticado repertorio de *instrumentos y técnicas experimentales*, que sirven también para las demás ciencias naturales. Para dar una idea de la importancia que esto puede tener basta mencionar el avance que significó para la Biología la introducción del microscopio. Entre las técnicas e instrumentos puedo mencionar la microscopía óptica y electrónica, las técnicas de rayos X, los radioisótopos, la espectroscopía, el radar, la magnetometría, la gravimetría, el sonar, los sensores remotos, la inmensa variedad de instrumentos ópticos, eléctricos, electrónicos, etc.

En las últimas décadas se ha asistido a un vertiginoso progreso en el campo de la instrumentación y de las técnicas experimentales. Es imposible en el marco de un texto introductorio tratar siquiera superficialmente la mayoría de los instrumentos y técnicas modernas de interés para las

otras ciencias. Además, para discutir la mayor parte de ellos hacen falta conocimientos de Física bastante más avanzados de los que tiene un estudiante del primer año. Ya pasó el tiempo que bastaba entender cómo funcionan el microscopio, el termómetro, el péndulo, la balanza y quizás un par de instrumentos más, para saber qué hacer en un laboratorio. Esta es la época del láser, de los detectores infrarrojos, de la ecografía, etc.

- La segunda razón es que la Física estudia problemas fundamentales de las otras ciencias, y da la base teórica para entenderlos. En más de un caso el beneficio de la interacción entre las ciencias de la naturaleza ha sido mutuo. Un caso clásico fue el estudio del metabolismo animal, que sirvió de base para formular una de las leyes físicas más importantes: la conservación de la energía. Otro ejemplo fue la larga polémica que hubo hace alrededor de 100 años entre geólogos y físicos en relación con la edad de la Tierra.

Hojeando las revistas donde los físicos publican sus trabajos se encuentran muchos artículos de indiscutible relevancia para otras ciencias. En la revisión bibliográfica que llevé a cabo para preparar estas notas busqué artículos de interés para la Biología y la Geología. Entre los temas relacionados con la Biología que encontré figuran: metabolismo y balance energético, circulación de líquidos biológicos, física del aparato circulatorio, física de las membranas celulares, transmisión de impulsos nerviosos, física de los sentidos y de sus órganos, locomoción animal (acuática, aérea y terrestre), fenómenos de transporte en sistemas biológicos (intercambio de calor, difusión), respiración, leyes de escala de organismos vivos, bioelectricidad, efectos de las radiaciones sobre organismos vivos, vida extraterrestre, etc. Estos estudios no sólo pueden interesar para satisfacer la curiosidad de saber, por ejemplo, como funciona un órgano, sino también para entender porqué se ha desarrollado en el curso de la evolución de un cierto modo y no de otro, porqué es más eficiente o más ventajosa cierta adaptación al medio, etc. Los artículos de interés para la Geología se inscriben en la Geofísica y tocan (entre otros) los siguientes temas: procesos que modifican la corteza terrestre (orogénesis, volcanismo, erosión, sedimentación, etc.), sismología, magnetismo terrestre, estructura interna, origen y evolución de la Tierra y los planetas, geocronología, gravimetría, hidrología y oceanografía física, mecánica de suelos, propiedades de rocas, etc. Son también numerosos los artículos de claro interés para otras disciplinas, que tratan tópicos de cosmología, cosmogonía, astrofísica, fenómenos atmosféricos, meteorología, oceanografía, etc. En la medida que lo permite el espacio y la dificultad de los temas trato en estas páginas varios de ellos en forma sencilla y con carácter informativo, para que el lector pueda apreciar mejor la aplicación de la física a los temas de su interés.

### ***Qué debe saber de Física quien cursa otra carrera***

Esta cuestión tiene dos aspectos, referidos a la amplitud del conocimiento y la profundidad del mismo. Después de lo dicho debería quedar claro al lector que cuánta más física aprenda y con cuánta mayor profundidad, tanto mejor. Pero también es evidente que hoy día es una utopía plantear así la cuestión. Salta a la vista que no es mucho el tiempo que le puede dedicar a la Física un estudiante de otra carrera, y si le concediera más sería a costa de dejar de lado otros estudios importantes para él. Además es un contrasentido que quien no tiene intención de ser físico acabe por convertirse en uno. El interrogante es otro, hay que preguntarse: ¿qué es lo mínimo indispensable que un científico debe saber de Física para desempeñarse bien en su profesión? y ¿cómo podemos determinar ese mínimo? Creo que el criterio a emplear surge de observar que nuestro futuro científico debe apuntar a:

- conocer y entender las leyes básicas y los principios fundamentales de la Física, aunque no es necesario que domine los métodos de cálculo ni los formalismos más abstractos,
- estar en condiciones de reconocer en un problema de su disciplina cuáles son los aspectos en los que la Física le puede ser útil,
- tener cierta familiaridad con el lenguaje de la Física para poder plantearle al físico los problemas en que éste lo puede ayudar,
- estar en condiciones de leer en una revista científica los trabajos de física que tocan temas de su directo interés (como los que mencionamos arriba) y aunque no pueda seguir el detalle de los cálculos y desarrollos, debe ser capaz de asimilar la sustancia de los resultados para apreciar en que medida le pueden servir.

De lo dicho resulta, a mi entender, que el objetivo de este texto debe ser dar al estudiante un panorama lo más amplio posible, poniendo énfasis sobre aquellos capítulos que más aplicaciones tienen en las otras ciencias. El enfoque tiene que ser fenomenológico y aplicado, evitando la teorización excesiva, pero al mismo tiempo debe recalcar la unidad conceptual de los temas y las conexiones entre diferentes modelos y problemas. El tratamiento de los temas tiene que ser simple. Entre la amplitud del panorama y la profundidad, algo se debe sacrificar. Lo lógico en este caso es que sea la profundidad. El desarrollo profundo y riguroso de los temas corresponde a los físicos, que lo verán más adelante en sus estudios. En este nivel no se justifica. Es con estos criterios que elegí los temas que se tratan en este libro y la forma de presentarlos.

### **Como se debe estudiar la Física**

El carácter de los objetivos que acabo de señalar indica como se debe encarar el estudio. El lector debe apuntar a asimilar y comprender los conceptos fundamentales. ¿Cómo sabe si los ha asimilado y comprendido? Esto se reconoce viendo si adquirió la *capacidad de aplicarlos a casos concretos*. Recordar de memoria los enunciados de leyes y el detalle de fórmulas es perfectamente inútil si no se sabe usarlas y sacarles provecho. Muchos creen que “saben” la materia cuando en realidad sólo *recuerdan* fórmulas y enunciados. No basta la memoria (aunque *ayuda*) para manejarse con la física. Es preciso *comprender*. Comprender, en este caso, significa saber relacionar los enunciados abstractos y las fórmulas matemáticas entre sí y con el mundo que nos rodea. En realidad, visto desde esta óptica, el proceso de comprender las leyes de la física no se completa nunca porque a medida que se estudian más aspectos se va entendiendo más y mejor, aunque siempre quedarán temas por conocer e investigar. En la práctica el nivel de comprensión que se quiere lograr mediante este texto está fijado por los temas tratados y los problemas propuestos al lector.

Dejando de lado estas generalidades, lo que el estudiante quiere saber es algo más práctico: cómo estudiar para aprender la materia y por lo tanto aprobar el correspondiente examen, y procuraré dar indicaciones lo más claras posibles al respecto.

En primer lugar debe estudiar detenidamente y en forma reflexiva todos los temas, siguiendo los desarrollos matemáticos<sup>14</sup> y aclarando todas las dudas que pudiera tener. No debe estudiar “de memoria”. No se le exigirá memorizar sino *muy pocas* leyes, definiciones y fórmulas, y el valor de contadas constantes. No se le exigirá recordar largos desarrollos matemáticos. Sin embargo quien ha estudiado *bien*, buscando entender y prestando atención al significado, con un poco de tiempo y trabajo debería poder *reconstruir* por sí mismo muchos desarrollos y deducciones,

---

<sup>14</sup> Esto significa que tiene que completar todos los pasos, incluso aquellos que para abreviar se omiten en el texto.

aunque no los haya retenido en la memoria. Debería también ser capaz de explicarlos a otro y de reconocer si un planteo físico es correcto o no.

En segundo lugar debe procurar resolver, eventualmente con alguna ayuda, los problemas que muestran como se aplica la teoría a casos concretos. No se trata aquí de aprender recetas de manual. La realidad es tan compleja y variada que ningún manual la puede abarcar. El sentido de los problemas no es enseñar “recetas” para todos los casos que se pudieran plantear, sino mostrar como se usa el razonamiento para aplicar las leyes y principios que se han estudiado. En principio una persona muy inteligente que conoce bien la teoría debería poder resolver los problemas por sí solo, aunque no lo haya hecho previamente. Pero en la práctica conviene ejercitarse para adquirir soltura, agilidad, experiencia y confianza en uno mismo, y también para reconocer los puntos débiles del estudio, o sea aquellos conceptos teóricos que uno cree haber entendido pero que en realidad no ha asimilado bien.

De lo dicho se desprende que no es provechoso estudiar la parte práctica de la materia sin haber primero afirmado bien la parte teórica. Ambas partes son interdependientes y se deben estudiar en paralelo. La una sostiene la otra. No sólo hay esta interdependencia entre la teoría y la práctica de la materia. También hay una estrecha interdependencia entre los distintos tópicos, que se apoyan mutuamente. Por eso no es posible estudiar provechosamente un capítulo sin haber entendido *bien* los anteriores. Asimismo conviene volver a leer los primeros capítulos luego de haber estudiado los últimos, porque el nuevo conocimiento permite comprender *mejor* los alcances de lo que se estudió antes. Se debe tener presente que la Física no es una yuxtaposición de tópicos sin relación entre sí, sino que comprende un conjunto de nociones que se encadenan conceptualmente y deductivamente. Si fallan una o más de las partes de esa estructura el resto pierde apoyo y se viene abajo.

En tercer lugar el estudiante debe interactuar con el profesor y los demás docentes, asistiendo a clase y concurriendo a consultar sus dudas y dificultades en el estudio. Si bien en nuestra Universidad no es obligatorio asistir a las clases teóricas y a las prácticas, y se puede aprender lo necesario para aprobar sin asistir a ellas, nunca insistiré demasiado en aconsejar la asistencia a clase. No se deben desaprovechar las oportunidades de dialogar con los docentes.

Puede parecer extraño, pero la experiencia de quien escribe estas páginas es que las mayores dificultades las suelen tener los estudiantes con aquellas partes de la materia que a primera vista parecen las más simples y básicas, y en la aplicación de las leyes de la física a los fenómenos familiares de la vida cotidiana. Por lo tanto además de estudiar la teoría y resolver los problemas que se plantean en el curso, es muy útil que por propia iniciativa el estudiante se ejercite en observar el mundo que lo rodea con una visión física, que intente interpretar lo que ve en base a las leyes que ha estudiado, y que plantee sus razonamientos, conclusiones, dudas e inquietudes al profesor.

Por último resumiré brevemente cuáles son a mi entender las principales causas de los fracasos en superar esta materia. Son ellas:

- *Insuficiente dedicación.* La Mecánica es una materia difícil. El programa es extenso y comprender bien los fundamentos es laborioso. Quien quiere cursar Física I junto con otra materia que requiere mucha dedicación, o junto a dos otras materias, no está haciendo algo prudente.
- *No estudiar en la forma correcta.* Aunque la dedicación sea mucha se puede fracasar por esforzarse en memorizarlo todo o por perderse en detalles. Como expliqué antes, el esfuerzo se debe concentrar en la *comprensión*.

- *Discontinuidad del esfuerzo.* Para que sea eficiente y rinda buenos frutos el esfuerzo debe ser intenso y continuado. Si se interrumpe el estudio por muchas semanas o meses, se olvida lo anterior y al retomar la materia hay que volver sobre aquello que mientras tanto se ha olvidado. Para evitar este despilfarro inútil de tiempo y energía hay que fijar un ritmo y mantenerlo. Las discontinuidades se deben evitar. Es un error, que los estudiantes siempre descubren cuando ya es tarde, esforzarse para aprobar los trabajos prácticos y dejar el examen final para el cuatrimestre o el año siguiente. De esta forma se acaba por estudiar el doble, se aprende menos, y las notas son insatisfactorias.
- *Malos hábitos de estudio.* Muchos estudiantes dedican largas horas al estudio pero con escaso rendimiento. Aquí cada uno debe analizar su caso particular y actuar en concordancia. En general, es fundamental estudiar con concentración, evitando las distracciones y las interrupciones. La práctica de estudiar entre varias personas no es buena: es fácil perder tiempo en charlas y la jornada no rinde.
- *Falta de interés por la Física.* Esta causal no es importante por sí misma, sino porque lleva al estudiante a incurrir en los hábitos negativos que acabo de mencionar. Es comprensible que estudiantes de otras carreras no se sientan atraídos por la Física, y no es ningún pecado. Lo que sí es una pena es que por no ocuparse con el debido empeño en el estudio, acaben por condenarse a sí mismos a multiplicar ese esfuerzo que les desagrada, pues eso es precisamente lo que sucede cuando se fracasa en los trabajos prácticos o en el examen final y hay que repetir la cursada. Lo acertado entonces es hacer el esfuerzo necesario y suficiente para superar la materia sin contratiempos.
- *Defectuosa base previa.* Esto es común especialmente en lo que se refiere al álgebra, la geometría y el cálculo, y tiene sus raíces en defectos de la enseñanza preuniversitaria. Está claro que corregir esta falencia no puede ni debe ser función de la Universidad. El estudiante que observa esta dificultad (los docentes pueden ayudar a diagnosticarla) deberá resignarse a dedicar tiempo y esfuerzo por su cuenta para remediarla, de lo contrario el estudio de la Física le resultará muy laborioso y no le rendirá ya que en lugar de esforzarse por entender lo que tiene que aprender, o sea la Física, pasará su tiempo tratando de entender la manipulación de las fórmulas matemáticas y perderá de vista el resto.
- *Falta de aptitud para la Física.* Muchas veces se invoca esta causal cuando en realidad el motivo es otro. Las dotes requeridas para el estudio de las ciencias son básicamente las mismas ya sea que se trate de la Física, la Geología, la Biología, la Astronomía, etc. La elección de una u otra es una cuestión de gustos y preferencias más que de aptitud. Es difícil creer que sea negado para la Física quien ha demostrado poseer la capacidad de aprender otra ciencia. En general lo que ocurre es que se confunde la falta de aptitud con el empleo de métodos de estudio incorrectos. El estudiante se acostumbra a los métodos y hábitos de estudio propios de las materias de su carrera, que muchas veces no sirven para la Física, y al obtener malos resultados cree que es por falta de aptitud.

Para concluir, recomiendo enfáticamente a los alumnos que no esperen a que se consume un fracaso en la cursada, sino que tan pronto adviertan signos que indiquen que el estudio no progresa satisfactoriamente acudan al profesor y a los docentes para que los ayuden a encaminarse correctamente.