

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA

1.1 ¿Qué es la Física?

Antes de responder esta pregunta vamos a poner un ejemplo que motivará en parte la respuesta. Imaginemos que asistimos a un partido de fútbol y pensemos por un momento en la enorme cantidad de diferentes fenómenos que presenciamos: los jugadores pasándose la pelota y chutando, el movimiento posterior del balón, el silbato del árbitro y el sonido que produce, los espectadores, algunos sentados y otros de pie, haciendo diferentes movimientos y provocando diferentes sonidos, los comentaristas que escuchamos si tenemos nuestro receptor de radio encendido, la luz que emiten los focos del estadio, etcétera. Podemos decir, sin exagerar, que la cantidad de fenómenos de diferente naturaleza que se producen en cualquier situación cotidiana es casi infinita. Pues bien, *la Física tiene por objeto analizar al máximo los fenómenos que se producen en la naturaleza así como los componentes básicos de la misma, y gestar unas leyes que permitan comprender y predecir su comportamiento.* Todo ello a través de la observación, la experimentación y el razonamiento que es lo que se conoce como método científico. La definición anterior de la Física es una definición de andar por casa, es decir, para que todos nos entendamos desde un principio y poder continuar con la exposición, porque si nos detuviésemos por un momento y analizásemos detenidamente cada uno de los términos de la misma, tal como: ¿Qué es predecir? ¿Qué es observar? ¿Qué es la naturaleza? Llegaríamos con certeza a una serie de inconsistencias lógicas que han sido estudiadas con profundidad por filósofos, físicos, historiadores, etcétera. Como no tenemos tiempo para profundizar en estas importantes materias nos contentaremos con esa idea más o menos elaborada que todos tenemos sobre lo que es la Física.

1.2 División histórica de la Física

Desde un punto de vista histórico podemos establecer dos grandes etapas en el desarrollo de la Física. La primera de ellas es mucho más extensa que la segunda:

se trata del periodo que va desde la Antigua Grecia (o incluso antes) hasta finales del siglo XIX, y recibe el nombre de Física Clásica. La segunda, es la Física que se ha desarrollado en el siglo XX, y recibe el nombre de Física Moderna.

En términos estrictamente cronológicos (y, por tanto, históricos) la división anterior es correcta, pero además, como veremos en la sección siguiente, existen razones de índole conceptual que la justifican. Pero al margen de esto último, el análisis histórico de la Física (o de cualquier otra disciplina) es importante para la adecuada comprensión de la misma. Porque la Física no ha sido siempre igual. Ha evolucionado en el tiempo; ha progresado. Pero ¿cómo ha progresado? La idea intuitiva de progreso por acumulación de conocimiento falla, y el estudio del modo adecuado de progreso constituye toda una nueva disciplina: La Filosofía de la Física (con mayor generalidad, de la Ciencia). Simplificando mucho podemos decir que la ciencia progresa por aproximaciones sucesivas: cada nueva teoría mejora a la anterior en su ámbito, y lo amplía.

Dado que no tenemos mucho tiempo para adentrarnos en estos temas, pues ello nos llevaría muchas clases, nos limitaremos a esbozar brevemente en qué consisten la Física Clásica y la Física Moderna¹. A finales del siglo XIX se pensaba que se tenía un conocimiento completo del universo a través de las tres grandes teorías de la Física Clásica: la Mecánica Clásica de Newton, de la cual nos ocuparemos en las siguientes clases, la Teoría Clásica de la Gravitación, también de Newton, y el Electromagnetismo de Maxwell. En realidad, sintetizar todos los avances de la Física por aquel entonces en los nombres de estos dos grandes científicos puede resultar un poco desconcertante. Intervinieron muchos otros científicos, aportando cada uno su granito de arena. Sin embargo, Newton y Maxwell fueron capaces de sintetizar, el primero, todo el conocimiento adquirido a lo largo de los siglos en el estudio del movimiento de los cuerpos, tanto en la Tierra como en el resto del universo conocido hasta entonces, y el segundo, todo el conocimiento relativo a los fenómenos electromagnéticos, en unas cuantas leyes en las que todo este conocimiento se resumía; leyes que permitían predecir todos estos fenómenos y muchos más. Por tanto, figuras tan importantes como Galileo, Kepler, Copérnico, Pascal, Faraday, Coulomb, etcétera, fueron relevantes para la gestación de estas teorías aunque no representasen el último eslabón de las mismas. Sus observaciones, sus leyes fenomenológicas, etcétera, fueron la base para la gestación de leyes más fundamentales a partir de las cuales podían deducirse. A finales del siglo XIX, Electromagnetismo, Gravitación, y Mecánica Newtoniana, parecían ser la base de todo el conocimiento científico adquirido hasta el momento, y del desarrollo tecnológico por aquel entonces. Hemos de comentar que, en el desarrollo de la Física, el conocimiento se fue parcelando en

¹A quienes estén interesados en el estudio de la evolución de la ciencia (casi exclusivamente de la Física) a través de la historia les recomiendo la lectura de “Introducción histórica a la filosofía de la ciencia”, de John Losee (Alianza Editorial); pero les advierto que no es una lectura fácil. Bastante más ameno, y también dirigido al análisis filosófico del conocimiento científico, pero no desde una perspectiva histórica, es el libro de Alan Chalmers: “¿Qué es esa cosa llamada ciencia?” (Editorial siglo XXI).

un principio en diferentes partes, como la Acústica, la Electricidad, el Magnetismo, la Termodinámica, la Óptica, etcétera, y que con el paso del tiempo se vio que eran teorías que podían deducirse de las dos teorías anteriores. Por ejemplo, la luz es una onda electromagnética y por tanto todo lo que se refiere a la generación y propagación de la misma se puede explicar a partir de las cuatro ecuaciones de Maxwell. Las ondas sonoras, de cuyo estudio se ocupa la Acústica, son un fenómeno puramente Mecánico para cuyo estudio se usa una teoría que sintetiza el comportamiento de los sistemas de un número ingente de partículas (del orden del número de Avogadro), y que es la Termodinámica.

Parecía que la Física había llegado a su fin y que todo podía explicarse a través de estas teorías. Sin embargo, una serie de resultados experimentales novedosos en aquella época, los cuales no podían explicarse con la Física Clásica, unido a algunas inconsistencias de la Física Clásica, dio lugar a una revolución en la Física que se representó en la gestación de las dos teorías que constituyen la Física Moderna: nos referimos a la Relatividad y a la Mecánica Cuántica. La Relatividad, tanto Especial como la General, se debe a Albert Einstein, y la Mecánica Cuántica a varios científicos como Heisenberg, De Broglie, Schrödinger, etcétera.

Señalaremos brevemente dos de los fenómenos contradictorios con la Física Clásica, y que guardan relación con la Física del microcosmos. Dado el poder de la Mecánica Clásica y el Electromagnetismo para explicar los fenómenos más cercanos a nuestros sentidos, se llegó a pensar que el comportamiento del mundo atómico y subatómico estaba regido por las mismas leyes, sin más que aplicar las mismas al movimiento de los electrones en torno al núcleo, formado por protones y neutrones. Sin embargo, había dos resultados experimentales que estas teorías no eran capaces de explicar. Nos referimos al fenómeno de la cuantización de la energía, y el de la estabilidad de los átomos. Desde un punto de vista clásico, si pensamos en un átomo de hidrógeno, el cual contiene un único electrón, la energía del mismo, suma de las energías cinética y potencial, puede tomar en principio cualquier valor, dependiendo de las condiciones iniciales del movimiento. Pero el Electromagnetismo nos dice que una partícula cargada que se mueve aceleradamente (tal y como ocurre con el electrón clásico moviéndose en órbitas elípticas) irradia continuamente energía, es decir emite energía, y por tanto, al ir perdiendo esta energía (de forma continua) no describiría una elipse, sino una espiral, y acabaría colapsando sobre el núcleo². Es decir, con la Física del siglo XIX **¡la materia es inestable!** Y por tanto no podríamos existir nosotros, puesto que estamos compuestos por átomos. Otro resultado experimental, previo a la Relatividad Especial de Einstein, pero que no fue precisamente lo que motivó la gestación de esta teoría por el que es considerado el Físico más importante de todos los tiempos, es que la velocidad de la luz es una constante independiente del sistema de referencia que la mide, lo que contradice a la Mecánica Clásica.

He puesto estos ejemplos con el objeto de mostrar la relevancia de la Física Moderna, y la importancia de dar unas breves nociones de la misma en cualquier

²En el caso del electrón de un átomo de Hidrógeno, un simple cálculo muestra que el impacto con el núcleo se produciría en menos de 10^{-10} segundos!

curso de Física General.

1.3 La estructura conceptual de la Física

Este bosquejo histórico puede resumirse en la siguiente tabla:

FÍSICA CLÁSICA	FÍSICA MODERNA
Mecánica newtoniana (Newton, 1660)	Relatividad (Einstein, 1905)
Termodinámica, Acústica, etc. (siglos XVIII y XIX)	Mecánica Cuántica (1926)
Electromagnetismo (Maxwell, 1860)	

Ahora bien, desde un punto de vista conceptual esta tabla no clarifica la estructura básica de la Física. En cambio, esta estructura se clarifica si se piensa que la Física sólo tiene dos partes: La mecánica y las leyes de fuerza o teorías de interacción.

El objeto de la mecánica es la investigación del comportamiento de las cosas en función de las fuerzas que actúan sobre ellas.

El objeto de las leyes de fuerza es dar el valor de las fuerzas con que interaccionan las cosas en cada situación concreta.

De acuerdo con lo anterior, en nuestra tabla la Mecánica newtoniana, la Relatividad einsteniana y la Mecánica Cuántica son mecánicas³; mientras que el Electromagnetismo es una teoría de interacción. ¿Y qué pasa con la Termodinámica, la Acústica, etc.? ¿Son mecánicas o teorías de interacción? Tratemos de explicarlo. Cuando, equipados con la mecánica y las teorías de interacción, tratamos de resolver un problema concreto y realista, quedamos abrumados por la fantástica complejidad matemática del mismo. Nos vemos obligados a simplificarlo, inventando con ello un nuevo problema. Hemos creado un **modelo** de nuestro problema original.

La Termodinámica, Acústica, Óptica, etc., tratan ámbitos de problemas (usando la mecánica y las teorías de interacción) que comparten ciertas características o propiedades que permiten simplificar el problema original, transformándolo en un modelo más asequible. Más adelante, en este capítulo, diremos algo sobre cada una de estas disciplinas, con objeto de aclarar su contenido, pues lo dicho ahora es demasiado abstracto.

Volvamos a nuestra tabla: Mecánica Clásica, Relatividad y Mecánica Cuántica son tres clases de mecánica que sirven para estudiar los mismos tipos de fenómenos físicos. Sin embargo, las respuestas que dan a una misma pregunta pueden ser muy diferentes. Como todas las respuestas no podrán ser correctas a la vez, será necesario saber cuál es la correcta. Resulta que cada cual tiene su ámbito de aplicación, como se recoge en el siguiente diagrama.

³Siendo más precisos, al genio de Newton le debemos dos cosas: Sus tres leyes (Inercia, $\vec{F} = m\vec{a}$, y principio de acción y reacción) y la teoría de la gravitación. De acuerdo con nuestra clasificación conceptual, las tres leyes de Newton constituyen una mecánica, mientras que su teoría de la gravitación es una teoría de interacción.

	Bajas velocidades	Altas velocidades
Sistemas Macroscópicos	Física Clásica (1850)	Física Relativista (1900)
Sistemas Microscópicos	Física Cuántica (1930)	Física Cuántica Relativista(1950)

En el mundo al alcance de nuestros sentidos la Mecánica Clásica manda, al ser más simple e intuitiva (aunque los resultados de las otras mecánicas son prácticamente los mismos). Pero para objetos que viajan muy rápido (a velocidades comparables a la velocidad c de la luz) las reglas clásicas son modificadas por la Relatividad Especial. Cuando el tamaño del objeto de nuestro estudio es muy pequeño (digamos que del tamaño de un átomo o menor) la Mecánica Clásica se ve superada por la Cuántica. Finalmente, cuando las cosas son pequeñas y rápidas, debemos estudiarlas con la Teoría Cuántica Relativista.

Examinemos ahora las teorías de interacción. ¿Cuántos tipos de fuerza (con sus correspondientes teorías) existen? La Física dice que cuatro, cuyo listado, en orden de intensidad decreciente, es este:

- Fuerza fuerte
- Fuerza electromagnética
- Fuerza débil
- Fuerza gravitatoria

La brevedad de esta lista debiera sorprender e impresionar. ¿Dónde está la fuerza de rozamiento? ¿Y la fuerza del sillón que me mantiene ahora sentado impidiendo que la Tierra me trague? ¿Y las fuerzas que mantienen los enlaces moleculares, o la que impulsa a la pelota de tenis cuando la golpeo con la raqueta, etc.? Acontece que todas estas fuerzas son electromagnéticas, de modo que no exageramos lo más mínimo diciendo que vivimos en un mundo electromagnético. Con la excepción de la gravedad, todas las fuerzas que experimentamos en nuestra vida cotidiana son de origen electromagnético.

La fuerza fuerte, encargada de mantener unidos a protones y neutrones en el núcleo de los átomos, es de un alcance extremadamente corto (del orden del tamaño del núcleo), lo cual justifica que no la sintamos aún cuando es unas cien veces más intensa que la electromagnética.

La fuerza débil es responsable de ciertas clases de desintegración radiactiva y, además de ser de corto alcance, es unas mil veces más débil que la electromagnética.

En cuanto a la fuerza gravitatoria, es la más deeeeébil de todas ($\approx 10^{-36}$ la electromagnética), y si la percibimos es por el efecto acumulativo de cantidades ingentes de materia.

Las fuerzas electromagnéticas no sólo son las predominantes en nuestra vida diaria, sino que son las únicas bien comprendidas y experimentalmente contrastadas en todas las versiones de la mecánica (clásica, relativista y cuántica). No se puede decir lo mismo de las otras. Por ejemplo, existe una buena teoría clásica de la gravitación (la de Newton) y una relativista (la Relatividad General de Einstein), pero no existe una teoría cuántica satisfactoria de la gravitación, aún cuando hay una pléyade de físicos tratando de construirla. Actualmente existe una exitosamente

contrastada aunque compleja teoría de las interacciones débiles, y una candidata (Cromodinámica Cuántica) para explicar las fuertes que tiene buena pinta, aunque está pendiente de una mayor contrastación experimental.

1.4 La estructura lógico-matemática de las teorías físicas

Todas las teorías de la Física, ya sean mecánicas o teorías de interacción, están estructuradas de la misma forma desde un punto de vista lógico. Durante el curso de esta explicación pondremos el ejemplo de la Mecánica clásica para aclarar bien las ideas. Toda teoría se basa en unas leyes, que también reciben el nombre de *postulados, principios o axiomas*. Estas leyes relacionan distintos conceptos básicos de la teoría, que reciben el nombre de *conceptos primitivos*. De las leyes se pueden deducir resultados que se denominan *teoremas*, los cuales son estériles desde un punto de vista lógico, pero son de gran importancia en la resolución de muchos problemas. Estos teoremas suelen estar expresados a partir de *conceptos definidos* a partir de los conceptos primitivos, los cuales son también estériles desde un punto de vista lógico.

Por ejemplo, en el caso de la Mecánica Clásica los conceptos básicos son el espacio (se considera que los cuerpos se mueven en un escenario que recibe el nombre de espacio absoluto, y que tiene la estructura de un espacio euclídeo tridimensional), el tiempo (se considera también la existencia de un tiempo absoluto que transcurre de forma independiente de los sistemas de referencia), la fuerza, y la masa, también llamada masa inercial o masa inerte. Las leyes de la Mecánica Clásica han sido históricamente tres, aunque ya veremos en el tema siguiente que una de ellas puede deducirse de las otras. Estas leyes son: la ley de inercia (toda partícula aislada mantiene su estado de movimiento uniforme respecto al espacio absoluto), la segunda ley de Newton ($\vec{F} = m\vec{a}$), y el principio de acción y reacción o tercera ley de Newton (la fuerza que una partícula a ejerce sobre otra b es igual en magnitud y de sentido contrario a la que b ejerce sobre a, y estas fuerzas están dirigidas según la línea que une ambas partículas). Con estos principios se sintetiza todo el conocimiento relativo a los movimientos mecánicos de cuerpos macroscópicos. Nótese la simplicidad de la Física, la cantidad de conocimiento encerrado en unos pocos principios, y la complejidad de los problemas que se pueden resolver aplicándolos. Usando la segunda ley de Newton se puede deducir el teorema de la energía ($\Delta E = W$), donde E es la energía cinética ($mv^2/2$) y W el trabajo. Estos conceptos se definen a partir de los conceptos básicos de espacio, tiempo, masa y fuerza. De la misma forma, los teoremas de la cantidad de movimiento, del momento cinético, del centro de masas, se deducen a partir de los principios anteriores y se expresan a partir de conceptos derivados.

Desde un punto de vista matemático, las leyes se expresan normalmente en forma de ecuaciones diferenciales, que son ecuaciones que ligan los conceptos primitivos y

las derivadas de los mismos. Por ejemplo la aceleración, que aparece en la segunda ley de Newton, es la derivada segunda del vector de posición respecto al tiempo. La fuerza es en general una función que depende de la posición, la velocidad y el tiempo, de manera que la expresión matemática de la segunda ley de Newton es, en general, una relación entre masa, tiempo, posición, velocidad y aceleración. Para resolver el problema fundamental de la Mecánica Clásica, que es obtener el movimiento, es decir, la posición en función del tiempo, hay que integrar la ecuación diferencial. Ni que decir tiene que no nos vamos a ocupar en este curso de resolver muchas ecuaciones diferenciales, porque por un lado esto no es un curso de matemáticas sino de física, y por otro lado la resolución de ecuaciones diferenciales es un problema de gran complejidad y que constituye toda una parte de las matemáticas. Sin embargo, asentemos aquí algunos conceptos básicos. El alumno sabe que cada vez que se hace una integral indefinida aparece una constante de integración. En el caso de la segunda ley de Newton, aparecen dos constantes (dado que al aparecer una derivada segunda hay que hacer dos integrales), y éstas guardan relación con lo que se denominan condiciones iniciales, es decir, la posición y velocidad de la partícula en un instante dado.

Para aclarar esto pongamos un ejemplo. Estudiemos el movimiento de un trozo de tiza que lanzamos al aire. Supongamos que despreciamos el efecto del aire tomamos en consideración solamente la gravedad. Aplicado la segunda ley de Newton vemos que la aceleración es igual a \vec{g} , la aceleración de la gravedad, la cual es constante cuando nos movemos cerca de la superficie de la Tierra. ¿Cómo se mueve la tiza sometida a una aceleración constante \vec{g} ? Todos sabemos que se puede mover de muchas maneras: en línea recta hacia abajo, hacia arriba primero y hacia abajo después, siguiendo una parábola, otra parábola distinta, etcétera. Es decir, para saber exactamente dónde se encontrará el objeto en cada instante de tiempo hay que saber qué posición y qué velocidad tenía inicialmente el objeto. En todos los casos anteriores la ecuación diferencial es la misma ($\vec{a} = \vec{g}$), pero las condiciones iniciales cambian. Veremos esto con más detenimiento a lo largo del curso.

1.5 Toda la Física Clásica

Estamos ahora en disposición de escribir las ecuaciones **fundamentales** que representan las leyes de la Física Clásica. Cualquier otra ecuación estará siempre contenida en éstas; se deducirá de estas y de algunas hipótesis adicionales que permitan simplificar el problema, y cuyo ámbito de validez será menor que el de las ecuaciones **fundamentales**. Las leyes son las siguientes:

Bloque I:

$$\int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} q_e; \quad (\text{ley de Gauss para el campo eléctrico}) \quad (1.1)$$

$$\int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0; \quad (\text{ley de Gauss para el campo magnético}) \quad (1.2)$$

$$\int_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}; \quad (\text{ley de Faraday}) \quad (1.3)$$

$$\int_L \frac{\vec{B}}{\mu_0} \cdot d\vec{l} = \frac{d}{dt} \int_S (\epsilon_0 \vec{E}) \cdot d\vec{S} + \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S}; \quad (\text{ley de Ampere}) \quad (1.4)$$

$$\int_S \vec{G} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{k} q_g; \quad (\text{ley de Gauss para el campo gravitatorio}) \quad (1.5)$$

Bloque II:

$$\vec{F}_e = q_e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}); \quad (\text{ley de fuerza de Lorentz}) \quad (1.6)$$

$$\vec{F}_g = q_g \vec{G} \quad (1.7)$$

Bloque III:

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \frac{\vec{F}_e + \vec{F}_g}{m}; \quad (\text{Segunda ley de Newton}) \quad (1.8)$$

Pasemos a “explicar” su significado.

Bloque I

Las cuatro primeras ecuaciones reciben colectivamente el nombre de ecuaciones de Maxwell. Nos dicen dos cosas. Por un lado nos dicen qué campos (eléctrico y magnético) genera un conjunto de cargas. Por otro, nos dan cómo se propagan estos campos por el espacio. La ecuación quinta es análoga al conjunto de ecuaciones de Maxwell, pero para el campo gravitatorio. Esto es, dado un conjunto de cargas gravitatorias, nos da el campo gravitatorio que generan. Estas ecuaciones las hemos escrito en forma integral, que como dijimos es equivalente (aunque su aspecto sería obviamente distinto) a escribir ecuaciones diferenciales. El hacerlo así es porque resulta más fácil comprender su significado.

Bloque II

Una vez que los campos se han generado y se han propagado por el espacio, alcanzan otras partículas ejerciendo fuerzas sobre ellas. La fuerza que ejercen los campos eléctricos y magnéticos está resumida en la ecuación sexta. Es lo que se llama Fuerza de Lorentz. La fuerza ejercida por el campo gravitatorio viene dada por la ecuación séptima. Habrá una ecuación de este tipo para cada partícula que compone el sistema.

Bloque III

Por último la ecuación octava, la segunda ley de Newton, nos permite calcular la aceleración de la partícula si conocemos las fuerzas (obtenidas a partir de todo el conjunto de ecuaciones anteriores) que actúan sobre ella y su masa. Al igual que ocurría con las ecuaciones sexta y séptima, habrá una ecuación de este tipo para cada partícula que compone el sistema.

1.6 La imagen clásica del universo

El universo está compuesto por partículas que se mueven al sentir los efectos de unas sobre las otras. Los electrones, protones, y neutrones forman átomos. Estos átomos se unen entre sí y forman moléculas. La materia presenta tres estados, sólido, líquido y gaseoso, según la manera que tengan los átomos y las moléculas de organizarse entre sí debido a sus interacciones mutuas. Los árboles, las hojas, las células, los edificios, los animales son, en última instancia, átomos agrupados de muy diversas formas. Cada partícula tiene asociadas tres propiedades escalares, que son: la carga eléctrica, que puede ser positiva o negativa, la carga gravitatoria, que tiene un único signo, y la masa. Diferenciamos entre carga gravitatoria y masa porque conceptualmente, para la Física Clásica, son cosas distintas⁴. Las partículas generan perturbaciones en el espacio absoluto que reciben el nombre de campos. Por ejemplo, cada partícula crea un campo gravitatorio, el cual es proporcional a la carga gravitatoria de la partícula y al inverso del cuadrado de la distancia a la partícula; también crea un campo eléctrico proporcional a la carga de la partícula, y si la partícula se mueve, un campo magnético. El valor de los campos gravitatorio y electromagnético en cada punto del espacio, creado por todas las partículas que hay en el universo, se puede obtener resolviendo, por un lado las cuatro ecuaciones de Maxwell que relacionan los campos eléctrico y magnético con las fuentes que los producen (las densidades de carga y las densidades de corriente), y la ley de Gauss para el campo gravitatorio. Cada partícula del universo se mueve a su vez debido a los campos que generan las demás. ¿Cómo? La presencia de un campo en un punto da lugar a una fuerza sobre otra partícula colocada en ese punto. Si \vec{E} , \vec{B} y \vec{G} son los campos eléctrico, magnético y gravitatorio en dicha posición, y q_e y q_g son la carga eléctrica y la carga gravitatoria de la partícula, y \vec{v} su velocidad, entonces la partícula está sometida a una fuerza $\vec{F} = q_e(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}) + q_g\vec{G}$. El primer término de la expresión anterior, el que contiene los campos eléctrico y magnético, es la fuerza de Lorentz; el segundo es la fuerza de gravitación. Debido a esta fuerza, la partícula experimenta una aceleración que es directamente proporcional a la fuerza e inversamente proporcional a la masa de la partícula, es decir, $\vec{a} = \vec{F}/m$ (segunda ley de Newton). Conocidas las condiciones iniciales del universo, es decir, la posición inicial y la velocidad inicial de cada partícula, y conocidos los campos eléctrico, magnético y gravitatorio y sus derivadas en el instante inicial, se podría conocer, aplicando las ecuaciones de Maxwell, la ley de Gauss para el campo gravitatorio, la ley de fuerzas de Lorentz y la segunda ley de Newton, dónde se encontrará cada partícula en cualquier instante futuro, así como el valor de los campos eléctrico, magnético y gravitatorio en dicho instante. Esta es la imagen clásica del universo,

⁴Para la Física Clásica es un misterio la inexistencia de partículas que, compartiendo la carga gravitatoria, tengan masas distintas. En cambio, existen muchas partículas que, compartiendo la carga eléctrica, tienen masas distintas (por ejemplo, el protón y el pión). El misterio lo resolvió Einstein al crear la Teoría General de la Relatividad, donde inercia y gravitación se funden en una misma unidad conceptual.

y nos muestra la importancia de la Física en el estudio del comportamiento de la naturaleza.

1.7 Las partes de la Física Clásica

La resolución del sistema de ecuaciones (1 \rightarrow 8) es, en la mayoría de los casos de interés, increíblemente difícil. Por tanto, se hace necesario simplificarlo, ya sea abordando sólo una parte del mismo, o añadiendo hipótesis adicionales que lo simplifiquen, aunque sea al coste de hacerlo menos general. Según qué parte del sistema (1 \rightarrow 8) abordemos, o qué hipótesis simplificativas adoptemos, nos moveremos en la arena propia de esta o aquella parte de la Física Clásica. Pero antes de comentar algo de cada una de ellas, es imprescindible avisar de que históricamente las ramas clásicas de la Física que vamos a comentar surgieron con anterioridad al establecimiento completo del sistema fundamental (1 \rightarrow 8). Sólo a posteriori ha sido posible deducir dichas ramas del conjunto formado por (1 \rightarrow 8) más las hipótesis antes aludidas.

La Óptica

Es el estudio de la luz. ¿Dónde apareció la luz en el esquema anterior? Dijimos que en el universo sólo existen partículas y campos eléctricos, magnéticos y gravitatorios. ¿Y la luz? ¿Qué es la luz? La luz es la conjunción de un campo eléctrico y uno magnético que cambian en el espacio y en el tiempo de una forma particular: propagándose como una onda. En esta propagación los campos pueden encontrarse con objetos tales como espejos, lentes, etc. Cuando esto ocurre, echando mano de las ecuaciones anteriores (1 \rightarrow 8) podríamos predecir cuál sería el resultado. Sin embargo un espejo o una lente están compuestos por multitud de partículas y estudiar la respuesta de todas estas partículas ante la presencia de un campo electromagnético (es así como se le llama a la existencia conjunta de un campo eléctrico y otro magnético) sería una labor de titanes. Por ello se opta por dos vías alternativas. Una consiste en hacer algunas aproximaciones y simplificaciones en el conjunto de las (1 \rightarrow 8) que lleven a una solución alcanzable del problema. Es lo que se llama *Óptica Ondulatoria*. La otra vía consiste en establecer una serie de teoremas deducidos de las ecuaciones anteriores válidos únicamente en casos muy idealizados. Es lo que se llama *Óptica Geométrica*. Quizá la diferencia fundamental entre una y otra Óptica resida en que históricamente la Óptica Geométrica no se obtuvo así. En realidad estos teoremas de los que hablo fueron obtenidos *experimentalmente*, se usaron durante mucho tiempo y a mediados del siglo pasado se vió que se podían deducir de una teoría mucho más general, que es la que está resumida en el conjunto de ecuaciones (1 \rightarrow 8).

Hemos dicho que la óptica trata del estudio de la luz, pero hemos de aclarar un poco más este punto. La luz se produce cuando el campo eléctrico y magnético están

vibrando a una frecuencia que ronda los 10^{15} Hz, o lo que es lo mismo, cuando la longitud de onda de estas oscilaciones es de unos cuantos cientos de nanómetros⁵. A frecuencias más altas o más bajas también pueden estar vibrado estos campos, pero nuestro ojo no percibe este movimiento en forma de luz, aunque su naturaleza es la misma. A frecuencias más bajas la radiación electromagnética (que así es como se le llama de forma genérica) recibe los nombres de infrarrojo y microondas. Las ondas de televisión y de radio corresponden aún a frecuencias más bajas. A frecuencias más altas (o lo que es lo mismo, a longitudes de onda más cortas) la radiación electromagnética se llama ultravioleta, rayos X y rayos gamma.

Como ya podéis imaginar, la carrera de Telecomunicaciones tiene mucho que ver con la habilidad para generar, conducir y detectar este tipo especial de movimiento de los campos eléctrico y magnético (electromagnético). Esto se consigue siempre aplicando el conjunto de ecuaciones (1 \rightarrow 8). Bueno, aunque he dicho siempre, existen situaciones en las que es imprescindible acudir a la Física Moderna, cada vez más, pero esto lo dejaremos para más adelante, cuando sepamos Física Clásica.

La Electricidad y el Magnetismo

El conjunto de ecuaciones de Maxwell no se gestó de la noche a la mañana, sino que fue fruto de la observación del comportamiento de las cargas y corrientes de éstas (corriente eléctrica). Asociada a esta observación hay un vasto repertorio fenomenológico⁶ acumulado durante años de Física “pre-maxwelliana”. Los primeros intentos de explicar esta fenomenología dieron lugar a un importante conjunto de “leyes”⁷ que es lo que muchas veces se estudia bajo el nombre de *Electricidad y Magnetismo*. Lo que ocurre es que cuando el repertorio de estas “reglas” de limitado alcance fue capaz de abarcar casi todos los fenómenos eléctricos y magnéticos conocidos, y además este conjunto fue ordenado, sistematizado y en la medida de lo posible, axiomatizado, nació la teoría de Maxwell. Muchos libros prefieren hacer una exposición de la Física (y en particular del Electromagnetismo) partiendo de este repertorio fenomenológico, en vez de dar desde el principio las ecuaciones (1 \rightarrow 8), y sólo al final, cuando se ha acumulado mucha evidencia empírica en forma de “reglas”, organizarla y decir que ello constituyen las ecuaciones de Maxwell, punto de partida, en realidad, de la teoría. Es como si en vez de conocer desde el principio la segunda Ley de Newton de la Mecánica, lo que nos dieran fuera la “fórmula” para un tiro parabólico, para un plano inclinado, el teorema de conservación de la energía, de la cantidad de movimiento, etc., y de ahí, con bastante esfuerzo deducir la gran ley, la segunda Ley de Newton. Creemos sin embargo que es preferible

⁵Un nanómetro (1nm) son 10^{-9} metros.

⁶O sea, de hechos experimentales sin que exista en principio una teoría que los explique.

⁷Cuando aquí utilizamos la palabra “leyes” no nos estamos refiriendo a leyes en el sentido lógico (básico), sino más bien sería sinónimo de “reglas” que aplicadas a una serie de fenómenos muy concretos permiten hacer predicciones, aunque bastante limitadas. La frontera que separa estos dos conceptos es obviamente bastante vaga y relativa.

dar las leyes (1 \rightarrow 8) y después aplicarlas a cada problema concreto, haciendo las aproximaciones que la situación requiera, para así no perder la idea de conjunto.

La Mecánica

Supongamos que tenemos una partícula que está sometida a una serie de fuerzas. El origen de estas fuerzas estará obviamente en los campos que la bañan, y estos a su vez fueron generados por otras partículas. Sin embargo todo esto no le interesa a la Mecánica. Lo único que sabemos es que sobre la partícula están actuando unas fuerzas. ¿Cómo se moverá la partícula? Este es el objetivo de la Mecánica. La respuesta está contenida en la segunda ley de Newton. En realidad, lo que se llama Mecánica no solamente se apoya en la segunda ley de Newton sino también en el llamado *principio de acción y reacción* (o tercera ley de Newton). Más adelante tendremos ocasión de ver el papel de este *principio* y su relación con el conjunto de ecuaciones (1 \rightarrow 8). También es cierto que muchas veces no se aplica directamente la segunda ley de Newton, sino los teoremas que de ella se deducen. Esto suele evitar hacer integrales, por la forma matemática de estos teoremas.

La Termodinámica

Cuando el sistema bajo estudio está compuesto por muchas partículas (un gramo de hierro o de aire), como suele ocurrir en la mayoría de los casos, la aplicación minuciosa de las ecuaciones (1 \rightarrow 8) resulta en la práctica imposible. Habría una ecuación del tipo de la (1.6), (1.7) y (1.8) para cada partícula y sería una locura intentar integrar el sistema⁸. Por ello, utilizando los teoremas de la Mecánica y una serie de consideraciones estadísticas aplicables siempre que se tienen grandes poblaciones, uno puede extraer una valiosa información acerca de algunas propiedades macroscópicas del sistema, como son su temperatura, su densidad, su conductividad eléctrica, calorífica, etc. Las consecuencias que se derivan de estos teoremas de la Mecánica y la Estadística quedan resumidas en dos grandes teoremas llamados Primer Principio de la Termodinámica y Segundo Principio de la Termodinámica, a partir de los cuales pueden extraerse, a su vez, todos los teoremas de la Termodinámica. El que se llamen Primer y Segundo *Principio* de la Termodinámica en vez de *teoremas* atiende a razones históricas. Originalmente el Primer y el Segundo Principio de la Termodinámica no fueron deducidos como teoremas, sino que se postularon atendiendo a la evidencia empírica. Fue después cuando los físicos se percataron de que era posible deducirlos de una teoría mucho más general, que abarcaba fenómenos que incluso trascendían de lo que hasta entonces habían dado en llamar Termodinámica. Nos referimos al conjunto de ecuaciones (1 \rightarrow 8). La parte de la Física que estudia la conexión de la Termodinámica con la Mecánica y las leyes estadísticas se llama Mecánica Estadística. Es una rama muy importante de la

⁸Sería una locura incluso plantear las ecuaciones.

Física actual, pues consigue explicar la aparición de propiedades macroscópicas como resultado de la aplicación de las leyes básicas ($1 \rightarrow 8$) a los sistemas microscópicos.

La Acústica

La Acústica es la parte de la Física que estudia los sonidos. Al igual que hemos dicho que la luz consiste en la propagación de ondas electromagnéticas, el sonido consiste en la propagación de ondas de presión. Cuando la frecuencia de estas ondas pertenece a un determinado rango nuestro oído es capaz de percibirlos como sonido. La presión es el resultado macroscópico de multitud de impactos de las moléculas del medio por el que se propaga el sonido. El hecho de que el número de moléculas que tienen los sistemas físicos a la escala ordinaria⁹ es enorme permite hacer una hipótesis que suele simplificar extraordinariamente el estudio de dichos sistemas: La aproximación de medio continuo. Aunque a escala microscópica nuestro sistema tenga consistencia corpuscular, a la escala macroscópica puede pasar perfectamente por un medio continuo. Existen diversas ramas de la Física Clásica que adoptan la hipótesis de medio continuo y que constituyen la denominada Física de los medios continuos. La Termodinámica es un ejemplo, pero también la Acústica, la Mecánica de Fluidos, la Elasticidad, etc.

⁹Del orden del número de Avogadro: $N_A \simeq 10^{23}$.