Índice

Cómo leer este libro 9

Cómo estudiar física con este libro 11

Agradecimientos 15

1. Introducción a la Física 17
2. Medir la naturaleza 29
3. El análisis físico del movimiento 45
4. Movimiento en dos dimensiones 59
5. Las leyes de Newton 67
6. El momento lineal 77
7. La energía 83
8. Producto escalar y producto vectorial 91
9. Rotaciones 97
10. El momento angular 107
11. Elasticidad 117
12. Campos y análisis vectorial 125
13. La física de los fluidos 135
14. Midiendo el universo: la gravitación 149
15. Oscilaciones y ondas 161
16. Termodinámica 177
17. Carga y campos eléctricos y magnéticos 195
18. Electromagnetismo 203
19. Naturaleza y electromagnetismo 215
20. La luz y la óptica física 221
21. Relatividad 231

22. La física cuántica 243
23. La estructura de la materia 257
24. Cosmología física 267

Epílogo 281

Apéndices 283

Índice de términos 291

Índice de onomástico 298

Cómo leer este libro

Este libro es una introducción a la física, con énfasis en cómo se aplica esta ciencia en el estudio de la naturaleza del planeta Tierra, es decir, en el análisis de las plantas, los animales, la atmósfera y las rocas y los minerales. Los ejemplos que se ponen son en su mayoría de estos ámbitos e intentan revelar elementos inesperados que ayuden a entender mejor el planeta al mismo tiempo que se aprende física. Poca gente conoce que, por ejemplo, la orientación de los pájaros en sus migraciones aprovecha una propiedad central de la naturaleza como es el entrecruzamiento cuántico, que hay peces capaces de compensar la refracción de luz o que las sepias utilizan la polarización de la radiación electromagnética para comunicarse en secreto.

El libro no asume conocimientos previos de física o de matemáticas. Alguien que no haya estudiado nunca estas disciplinas y que hojee el volumen puede abrumarse ante un texto con fórmulas y símbolos extraños, pero puedo prometerle que el texto está autocontenido. Para aprender física con este libro, solo hace falta empezar a leer despacio, línea a línea, como se leería una obra literaria, tomándose el tiempo necesario para comprender lo que está escrito. Es decir, el libro hay que leerlo desde el principio y siguiendo el orden de los contenidos, porque al igual que no puedes abrir una novela por la mitad y pretender saber quién es cada personaje y por qué hace lo que hace, en física hay que empezar por la presentación de unos conceptos básicos que luego se desarrollan.

Se empieza por tanto desde un nivel elemental. Solo hay que conocer las cuatro reglas de la aritmética y ser capaz de leer

con atención, porque la forma de avanzar en la materia consiste en que se van presentando las herramientas, como las derivadas y las integrales, según se van necesitando. Poniendo un poco de concentración, al final de la lectura de este libro se habrá adquirido un bagaje considerable en la física y en su lenguaje. Para poder resolver problemas y responder a preguntas intrincadas, es necesario estudiarse el libro, pero de eso hablaré en el siguiente apartado.

Los recuadros que se intercalan en cada capítulo contienen aspectos un poco más avanzados o demostraciones interesantes. Son accesibles, pero requieren más atención y quizá utilizar lápiz y papel para entenderlos por completo. Se pueden dejar para una segunda lectura, o para el estudio, sin perder el hilo.

El resto del contenido se puede leer frase a frase sin mayor dificultad, aunque a veces sea necesario pararse a pensar o volver hacia atrás para recordar algún concepto. En este sentido, la lectura de un libro de física básica difiere un poco de la de, por ejemplo, un libro de historia, que puede ser leído sin grandes interrupciones. Uno de física requiere más tiempo de proceso, y más esfuerzo, pero también –puedo asegurar– ofrece una mayor recompensa. Nada menos que entender la intrincada mecánica del universo. Saber cómo se mueven los objetos, cómo giran los planetas, cómo se comporta la electricidad y el magnetismo, o qué es en realidad el calor. Conocer las leyes que rigen el movimiento de los fluidos, qué es la luz o cómo sabemos que la Tierra gira. Saber cómo de grande es el universo, o qué edad tiene.

Pero quizá más importante que las respuestas, que son siempre provisionales, es que la física nos muestra paso a paso la secuencia de razonamientos elementales que nos lleva a ellas. La física permite darse cuenta de que existe una explicación racional a todo lo que vemos y que esta se reduce a unas pocas leyes fundamentales, simples y a veces poco intuitivas, que sorprendentemente se aplican a todo el universo conocido, desde los árboles del parque más cercano hasta la galaxia más lejana. En este ejemplo concreto no hay que olvidar que durante decenas de siglos la humanidad pensó que las leyes que regían el movimiento de los planetas y los objetos de la superficie eran diferentes. La idea de que son iguales es sorprendentemente moderna, como tantas otras que iremos viendo a lo largo del libro.

Cómo estudiar física con este libro

Aunque este libro está pensado para un público general, es idóneo como curso introductorio de física para estudiantes que no posean una buena formación previa en disciplinas STEM (*science, technology, engineering and mathematics*). El material cubre los contenidos de una física universitaria tal y como aparecen en los programas oficiales de un grado de ciencias en la mayoría de los países (y en particular de España). La programación típica de una asignatura semestral es de tres horas semanales de clases teóricas y otra de problemas durante 15 semanas (6 créditos ECTS), por lo que el esfuerzo y el trabajo personal del estudiante han de estar ajustados a esa carga docente. Es decir, un estudiante que quiera superar la asignatura debería dedicarle unas 150 horas de trabajo personal.

El libro también puede ser útil como "curso cero" para estudiantes de primero de una carrera como Física, Química, Matemáticas o cualquier ingeniería. En estas disciplinas, la física general tiene un nivel avanzado y se explica en cuatro asignaturas en dos semestres, pero este texto puede servir como una introducción para los que nunca la hayan cursado o para los que la estudiaran solo para aprobar el bachillerato.

El libro está diseñado para que se pueda explicar completo en un semestre a estudiantes de primero de grado y se trata, de hecho, del curso que he venido ofreciendo en las dos últimas décadas en mi Facultad, en Toledo. Mis clases de teoría consisten, fundamentalmente, en ir explicando despacio cada párrafo del libro, de forma que el estudiante pueda concentrarse en entender los conceptos, tomando nota de la idea para completarla después.

Uno de los objetivos que se persiguen en un curso de física de primero, en cualquier carrera, es facilitar el acercamiento a la literatura especializada. La intención de este libro incluye cubrir los aspectos preparatorios necesarios para que alguien que lo haya leído con atención pueda tener una idea de qué principios físicos se aplican en los artículos de una revista como *Biophysics*, *Journal of Biomechanics* o el *Journal of Biological Physics*. Aunque el estudiante no vaya a convertirse en un especialista en física, es importante que cualquiera que acabe una carrera relacionada con las ciencias domine la notación física, sepa las magnitudes que se suelen utilizar y sea capaz de interpretar las leyes más importantes de la naturaleza. En esta línea, el texto incluye numerosos ejemplos sacados de artículos clásicos y recientes. Mi intención con esto es ofrecer contenidos más allá de lo que se ve en bachillerato con la idea de enganchar al alumno, transmitiéndole mi entusiasmo por esta ciencia y mi pasión docente.

La extensión de cada tema se adecúa a la importancia que tiene cada materia en las ciencias de la naturaleza. Así pues, el capítulo del oscilador armónico está más desarrollado que el resto, dando cuenta del conocido chiste (conocido, entre los físicos) de que la carrera de Física consiste en diferentes maneras cada vez más sutiles de aplicar el problema del oscilador armónico al mayor número posible de cosas. El capítulo de las fuerzas es también importante, ya que muchos problemas del mundo natural, como los relacionados con la locomoción animal, emplean técnicas sencillas de descomposición de fuerzas y de cálculo de torque. Y la astronomía también aparece en diferentes partes, puesto que una gran parte de los ciclos naturales y atmosféricos, empezando por las estaciones, dependen de la posición de la Tierra en el sistema solar. Y tampoco hay que olvidar que el desarrollo de la física ha estado ligado, desde antiguo, a la observación de los cielos.

El libro cuenta con notables diferencias respecto a lo que figura en los manuales pensados para un año completo. Resulta difícil condensar una física general en un semestre. O se opta por un nivel de secundaria para cubrir todo el temario –lo cual no es recomendable– o se ofrece un nivel universitario centrado en lo que se considera que puede ser lo más útil para el resto de un grado genérico en ciencias. Se puede, claro está, recorrer los contenidos del *Serway*, del *Sears* o del *Tipler* a toda velocidad, pero dudo mucho que los estudiantes sometidos a tal ordalía aprendan algo útil de esa experiencia si solo disponen de 150 horas de trabajo. Aún con un cierto bagaje de bachillerato, el *Tipler* necesita de más del triple de ese tiempo: al menos tres asignaturas semestrales; lo mismo que el *Sears*. El *Serway*, aunque más accesible, necesita al menos dos semestres. Este libro, por el contrario, se puede cubrir en uno.

Una de las omisiones conscientes del texto es el concepto de *marco inercial*, que no se trata casi hasta llegar al capítulo 21, el de la relatividad. Los axiomas de la termodinámica simplemente se mencionan, ya que esta parte de la física se explora con más profundidad en asignaturas posteriores de casi todas las carreras, como en las de Química o Ingeniería Química en el caso de Ciencias Ambientales. Lo mismo respecto a radiación y ruido.

La presentación de los fenómenos eléctricos difiere notablemente de la de otros textos. Una diferencia es que trato la corriente eléctrica y el flujo inmediatamente después de hablar de la carga y antes del campo eléctrico. Creo que de esta forma la narrativa es más fluida. Otra es que abandono la presentación histórica tradicional basada en los experimentos clásicos de Faraday, Henry o Lenz; una didáctica que creo que viene arrastrada por la inercia, pero que considero de escaso valor pedagógico. Prefiero mostrar cuanto antes el paralelismo entre el campo eléctrico y el magnético, y centrarme más en los conceptos físicos que en aplicaciones concretas en ingeniería, como circuitos o motores. Siendo un texto introductorio, tampoco entro en matices, como que el campo magnético es un pseudovector.

Mi propuesta docente al respecto –y la novedad– es dedicar un poco de tiempo a explicar análisis vectorial (gradiente, divergencia y rotacional) y luego presentar el electromagnetismo con ese formalismo. Creo que así es más natural, más directo y perfectamente en línea con la teoría de campos, que hoy es la base de la física a varios niveles. Este sistema, además, permite

introducir aspectos novedosos a lo ya visto en la educación secundaria, algo vital para que no se aburran los alumnos más aventajados. Entiendo también que es bueno que si un estudiante se topa en sus lecturas con un símbolo matemático nuevo para él, este no le resulte extraño y que sepa interpretarlo. En este sentido, el uso del operador nabla tiene como propósito simplificar las explicaciones, no complicarlas, y sirve para introducir al alumno a una notación que le será útil en las asignaturas de Meteorología y Climatología, o en estudios de postgrado en la rama de Física de la Tierra. El formalismo vectorial también facilita que se pueda explicar la parte de electricidad (y los fluidos) con unas pocas fórmulas.

El énfasis que se hace en ligar la conservación de momento lineal, momento angular y energía con las correspondientes simetrías de traslación, rotación y tiempo puede parecer ajeno a un curso introductorio, pero creo que es importante hacer ver al estudiante el porqué de algo que puede parecer arbitrario. La explicación del teorema de Noether no es posible a este nivel, pero es necesario saber que existe y que proporciona una razón lógica para que se den esas leyes de conservación, puesto que de otra forma se perciben como algo metafísico. En este sentido, el texto hace múltiples referencias a la aplicación del método científico hipotético-deductivo, puesto que es crucial que un estudiante sepa distinguir cuanto antes lo que es ciencia de lo que no.

La parte de problemas y ejercicios está reducida al mínimo por dos razones: porque ya existen muchos libros de ejercicios de física básica y porque los estudiantes de Biología, Geología o Ciencias Ambientales de primer curso no tienen por qué saber resolver problemas de física que requieran técnicas complejas o ingeniosas. Solo necesitan saber cómo se resuelve un problema tipo de cada categoría (analizando el método y familiarizándose con él) para entender la física que está detrás, que es el objetivo de la docencia. Tengo la convicción de que plantearles problemas de "idea feliz" es antipedagógico y solo sirve para que se desesperen. En mi opinión, a ese nivel no se trata tanto de aprender a resolver acertijos como de saber qué leyes físicas se emplean en la elucidación de un ejercicio, entender lo que quiere decir la solución al problema y familiarizarse con los métodos por los cuales se llega al resultado. Creo también que es importante tomar conciencia de las asunciones que se realizan en la modelización de un proceso y ser capaz de plantear su solución; mucho más que ser capaz de resolver las ecuaciones diferenciales implicadas mediante una técnica que llevó siglos desarrollar, y que es probable que –sin ayuda– solo se le ocurra al 1% de los estudiantes.

Por último, debo señalar que el lenguaje del libro procura seguir la llamada *norma culta del castellano*, es decir, el idioma que debería dominar un universitario tanto en su expresión oral como en la escrita. Las palabras que se desconozcan hay que buscarlas en el diccionario para que pasen a formar parte del léxico del estudiante. Eso forma parte de lo que hay que aprender en una carrera. Aunque en ocasiones puede parecer que las frases del libro están demasiado condensadas, se trata de ser preciso. Un texto científico se puede aligerar notablemente si se emplean las palabras exactas en cada ocasión. Este proceder no solo evita explicaciones largas y farragosas, sino que favorece el aprendizaje, al dotar a la memoria de una clave, de una melodía en la que apoyarse.

El proceso de enseñanza-aprendizaje que propongo tiene como objetivo que el estudiante pueda expresar los conceptos no solo correctamente, sino de una manera propia. El trabajo del estudiante consiste en asimilar el conocimiento en su propio marco de referencia. El valor de las explicaciones del profesor se inserta precisamente aquí, en ayudar a desbrozar y aclarar la materia, glosando y expandiendo las frases sintéticas y precisas del libro de referencia de la asignatura. La asistencia a clase en la universidad no es obligatoria, pero eso no quiere decir que sea prescindible. Las explicaciones que se dan en ellas no son irrelevantes, sino que forman parte de la educación. Aunque hoy en día casi todo pueda ser entendido sin ayuda, solo leyendo y buscando en internet lo que no se comprenda, supone una clara ventaja para el aprendizaje que alguien que domina la materia te acompañe en el análisis de cada frase e idea.

El trabajo de Emmy Noether (1882-1935) sobre la simetría, y en concreto el ahora llamado *teorema de Noether*, permite ofrecer una visión armónica y unificada de los principios de conservación que permean a toda la física general que veremos en este libro y que sirven como hilo conductor al texto. Los principios de conservación del momento lineal, del momento angular y de la energía surgen de forma natural como consecuencia de que las leyes físicas no dependen del lugar, de la orientación o del tiempo, respectivamente.

Fuente: Bryn Mawr College Archive.

Agradecimientos

Este libro no habría sido posible sin los cientos de estudiantes que a lo largo de los últimos veinte años han cursado la asignatura de Física en la carrera de Ciencias Ambientales de la Universidad de Castilla-La Mancha. Gracias a ellos he ido afinando las explicaciones, ajustando el nivel de la exposición hasta el adecuado para su etapa formativa, e inventado nuevas formas de hacer más atractiva una Física de primero que no suele ser la asignatura preferida de los estudiantes cuando se deciden a estudiar Ambientales.

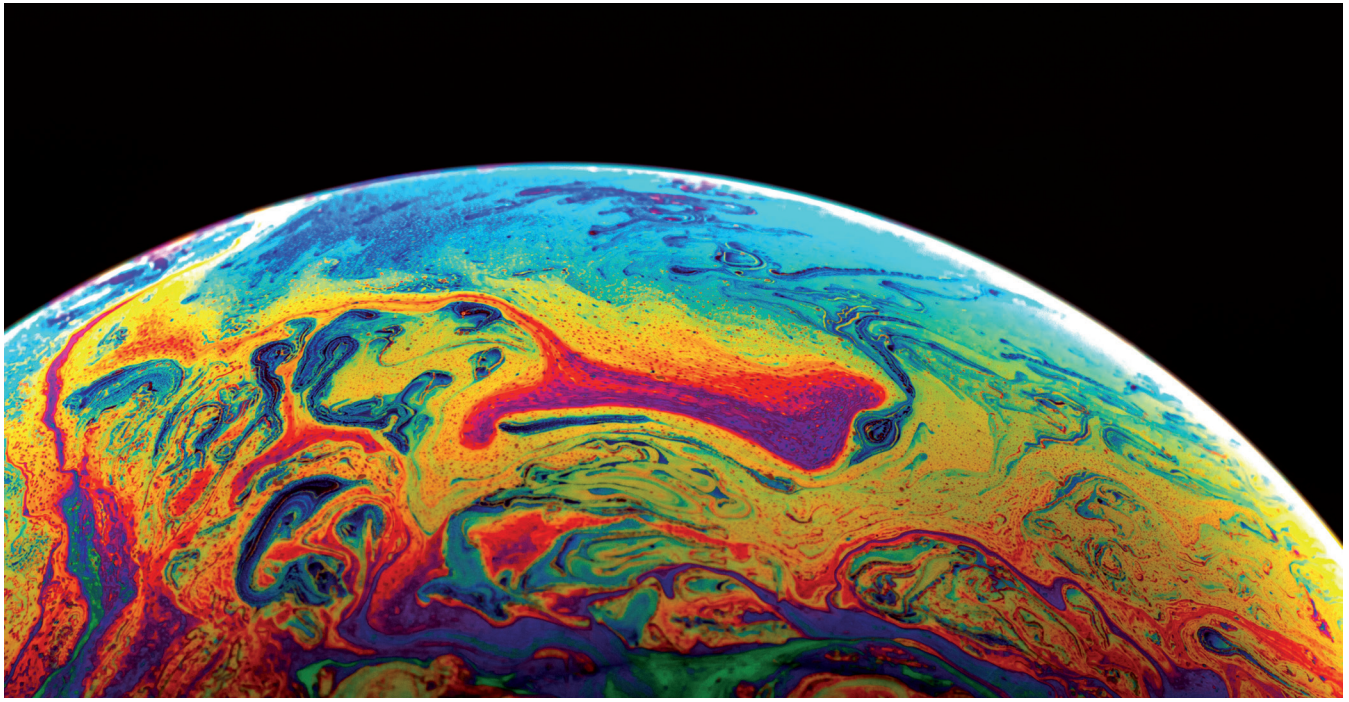
Debo un agradecimiento a Rocío Pliego, que me proporcionó el material del resto de las asignaturas de la carrera para ir entresacando dónde y cómo asomaba la física. Eso no solo me permitió ajustar la asignatura a lo que iban a necesitar los estudiantes en el resto de los cursos de la carrera, sino que me ayudó a entender mejor el papel de mi docencia. Su servicio compensa con creces la guerra que me dio como delegada –haciendo perfectamente bien su trabajo; eso es lo que tiene hacer un buen delegado– hacia el final de los nueve años en que fui decano de la facultad. La perfecta organización y orden de sus recursos y apuntes me resultaron de gran ayuda y me animaron a dirigir después un trabajo de fin de grado específico sobre los contenidos de física en las asignaturas de Ciencias Ambientales.

En esta misma línea de agradecimientos debidos, tengo que listar a mi compañera Susana Seseña por la evaluación que hizo de dicho trabajo como parte del tribunal de trabajos fin de grado. A pesar de su interés y originalidad, el estudio no consiguió la nota máxima, pero los comentarios hechos en la defensa

me convencieron de seguir orientando mi docencia en esa dirección, en la de explicar una física general con un ojo puesto en lo que iba a necesitar un estudiante y el otro en el tipo de profesorado con el que se iban a encontrar.

En la parte de agradecimientos especiales, uno muy personal a mi amigo Eduardo García-Ortega, catedrático de Física Aplicada de la Universidad de León, que se dejó engañar en aquella comida de julio en Madrid para leerse el primer borrador de mi libro. Ha sido muy generoso sacrificando su valioso tiempo para leerse línea a línea el texto y sugerirme mejoras. Solo puedo estarle eternamente agradecido, lo mismo que a mi mujer, la doctora Raquel Verdejo, investigadora científica del CSIC, física también, y que junto a Eduardo se fue leyendo pacientemente mis borradores, a pesar de que tampoco dispone de mucho tiempo. Sus múltiples comentarios y notas han mejorado notablemente el texto inicial, corregido erratas, mejorado las explicaciones y afinado la parte gráfica. Los errores que persistan son solo culpa mía.

Por último, mis compañeros Andrés Navarro Martínez de la Casa y Livia J. Leganés me hicieron también apreciaciones inteligentes sobre algunas partes del libro y fueron los primeros en aplicarlo a la docencia.



Fuente: iStock / Getty Images Plus.

1. Introducción a la Física

La Física es una ciencia experimental que intenta responder a una pregunta básica: ¿qué leyes sigue el mundo natural, entendiendo aquí por naturaleza todo lo animal, vegetal y mineral que hay en el planeta Tierra? La respuesta resulta ser, contra todo pronóstico, sencilla. Como se verá, la mayoría de lo que observamos en nuestra vida se puede explicar a nivel fundamental sin más que aplicar las tres leyes de la dinámica de Newton. De hecho, todo lo que se recoge en los primeros dieciséis capítulos de este libro se deriva, de una u otra forma, de ellas, incluyendo la temperatura o las ondas. Si a las tres leyes les sumamos el concepto de *carga eléctrica* y añadimos el concepto de *simetría* (el que las ecuaciones sean invariantes respecto a traslación, rotación o tiempo) tendremos una explicación racional básica –pero no obstante precisa– de la mayor parte de los fenómenos físicos del mundo natural.

1.1. El concepto de naturaleza

El significado de la palabra *naturaleza* ha ido variando a lo largo de la historia. Desde la Antigüedad se refería al mundo vivo y al planeta, pero en los últimos dos siglos se refiere en general a todo el universo, excluyendo tan solo a los humanos y a sus obras. Así pues, la física del mundo natural es, en principio, un campo muy extenso. Estudia tanto el interior del planeta como la atmósfera o la biosfera, así como la forma de las galaxias. Proporciona explicaciones a fenómenos tales como los huracanes, los terremotos, las migraciones de aves, la locomoción animal

Figura 1.1. Conocer en detalle los procesos naturales es fundamental para mejorar la vida de los humanos sobre nuestro planeta. Gracias a la física hemos mejorado notablemente los medios de observación, y con ellos nuestra capacidad de anticiparnos a los problemas ambientales tanto naturales como antropogénicos.

Fuente: NASA/Goddard Space Flight Center y Reto Stöckli.

o el movimiento de los peces, pero también al movimiento de Júpiter o al de los cometas. Este libro se centra en los primeros fenómenos, los que suceden en el planeta Tierra. Hay muchos libros que tratan los otros de una forma más o menos compleja, pero este libro en concreto presenta la física como una herramienta para entender algunos aspectos clave de otras ciencias naturales.

La física tiene muchas aplicaciones en ciencias ambientales, geología o biología, pero hay otras buenas razones para interesarse por esta disciplina en sí misma. Al fin y al cabo, es la ciencia que explica cómo se comportan los cuerpos inanimados de todo el universo, no solo de nuestro planeta (figura 1.1). Nos dice por qué se caen las cosas, a qué velocidad lo hacen, de qué está hecha la materia, cómo se transmite la luz, cómo giran las galaxias y qué hay dentro y más allá de las estrellas. Nos explica el origen de todos los átomos que forman nuestro cuerpo y cómo se mueve la sangre en los cuerpos de algunos animales.

Pero ¿por qué es necesario saber algo de física si uno quiere formarse en una ciencia natural como la biología, la geología, la ecología, la bioquímica o las ciencias ambientales? Hay tres razones principales para ello.

La primera es que hay partes de las ciencias ambientales, como la meteorología, la climatología, la radiación, el ruido y el cambio climático, que requieren conocimientos básicos en física para poder ser bien aprovechadas. En el caso de la meteorología, está claro que solo se puede entender bien la formación de un tornado si se conoce el principio de conservación del momento angular. Si no se ha visto antes este concepto, no se entenderá por qué al estrecharse una columna de aire su velocidad de giro ha de aumentar.

Figura 1.2. El comportamiento anómalo del agua sólida, que tiene una densidad menor que el agua líquida, es lo que hace posible que floten los icebergs. Calcular la parte que se encuentra sumergida de un bloque de hielo es un ejercicio sencillo de aplicación del principio de Arquímedes.

Fuente: Francisco J. Tapiador.

Otro ejemplo es la anomalía en la densidad del agua (el que el agua líquida tenga un máximo de densidad a 4 ºC) o el hecho de que el hielo sea menos denso que el agua líquida (figura 1.2). Estas dos características permiten la vida en los lagos que se congelan en invierno y hace que el deshielo del Polo Norte –en donde todo el hielo está sobre el mar– no eleve el nivel del océano global, al contrario que el hielo que reposa sobre Groenlandia o sobre la Antártida, que, si se fundiera, elevaría considerablemente su nivel.

La segunda razón es que cualquier persona que quiera comprender el mundo natural ha de tener unos conocimientos básicos de las leyes del mundo inanimado. Es necesario saber, por ejemplo, que el color verde, las microondas y los rayos X son lo mismo: radiación electromagnética, es decir, fotones de mayor o menor energía; o que la Tierra gira alrededor del Sol siguiendo una elipse en uno de cuyos focos está nuestra estrella, y que lo hace a una velocidad diferente según sea la distancia a ese foco. Entender que las estaciones son el fruto de la inclinación de eje terrestre y no de la distancia al Sol o que no es posible extraer energía de la nada son conceptos físicos básicos que un científico no puede permitirse desconocer. Hay que saber también, cualquiera que sea la ciencia que se esté estudiando, de qué está hecha la materia, qué relación tiene esta con la energía y qué fuerzas rigen todo el universo.

Hay, además, contenidos concretos de física tanto en ecología como en biología o en geología y conviene conocer los principios físicos implicados para entender mejor algunos aspectos de estas materias. Un ejemplo clásico es la visión animal. La única forma de llegar a saber cómo perciben los animales es mediante modelos de biofísica.

Erratas y actualizaciones de La Física de la Naturaleza

Francisco J. Tapiador

15 de marzo 2023

página 15

Falta un 'que': "eso es lo que tiene que hacer un buen delegado"

página 69

En el pie de la figura 5.1, falta un "de" antes de 17.000 años.

página 86

Falta un punto de derivada en el cuarto paso del producto escalar. Debe poner:

$$= \int_i^f d\vec{p} \cdot \dot{r} =$$

página 89

En el pie de la figura 7.1, falta un "perfectamente" antes de "inelástico".

página 92

Debe decir "añadimos que el resultado del producto vectorial"

página 95

Naturalmente, Clifford no murió antes de nacer. Las fechas correctas de su nacimiento y muerte son: (1845-1879)

página 98

El texto recoge bien cómo se calcula la aceleración centrípeta, pero la ecuación aparece cambiada. La correcta es esta:

$$|\vec{a_c}| = \frac{|\vec{v}|^2}{|\vec{r}|} = r|\vec{\omega}|^2$$

página 129

Las dos primeras figuras de arriba están cambiadas de orden.

página 130

Para evitar confusiones, en la definición de divergencia hay que anotar que:

$$F \equiv \vec{V}(x, y, z)$$

O bien definir la operación así:

$$\nabla \cdot \vec{V}(x, y, z) \equiv \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial z}$$

página 142

En la primera línea debe decir *fluido incompresible*, no *incomprensible*. El resto de las veces que aparece la palabra está bien escrita. Esta errata es un clásico de los libros de Física.

página 142

En el recuadro 13.2, la figura a la que se refiere es la 13.6, no la 13.5.

página 173

En el pie de foto, debe decir *(arriba)* en vez de *(esquina superior derecha)*

página 184

Al final de la segunda columna hay un subíndice cambiado. Debe decir:

$$\frac{V}{T} = cte \rightarrow \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = ... = \frac{V_n}{T_n} = cte.$$

página 188

Al final de la página, debe poner adiabática en vez de isoterma. La frase queda: En el caso ideal, es la diferencia entre la energía aportada para la expansión isoterma y la que sale del sistema en la compresión adiabática a otra temperatura.

página 205

En la última ecuación, el 3 está, lógicamente, dentro del paréntesis. El resultado de la integral volumétrica es entonces $56\epsilon L^5$ (despreciando los términos de orden menor al cuarto), que es el flujo del campo eléctrico a través de las seis caras.

En el segundo caso, el simple, no se imprimió una línea con la última integral y el resultado de las cuentas es cero porque $\vec{i} \cdot (-\vec{i}) = -1$

página 209

En la columna de la derecha en la cuarta ecuación de Maxwell aparece un $\cdot$ en vez de un $\times$. En la columna de la izquierda está bien escrita.

Las ecuaciones de Maxwell son:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

página 235

En la sexta línea, se imprimió g en vez de γ. Debe decir pues: "multiplicando por γ". Lo mismo en la columna de la derecha, donde debe decir: "Si noto como γ a esa expresión:"

página 239

Mismo error de edición: pone g en vez de γ.

página 244

[Segundo párrafo de la izquierda] Debe decir: "(desplaza el máximo hacia mayores frecuencias según aumenta: Ley de Wien"). Alternativamente, se puede decir "hacia menores longitudes de onda".

página 249

En la segunda columna, las primeras y segundas derivadas en 0 de $sin(x)$ están cambiadas. Debe decir:

$$f^{(1)}(0) = 1$$
$$f^{(2)}(0) = 0$$
$$f^{(3)}(0) = -1$$
$$f^{(4)}(0) = 0$$

página 261

En la tabla, debajo de $W\pm$ debe poner "interacción débil". En la página 263 se dice correctamente.

página 272

La última actualización sobre la edad del universo conocido (en 2021) es de 13.787 millones de años, no de 14.700 como escribí en 2020.

página 273

Debe decir "Hace quince millones de años", no "Hace quince mil millones de años".

página 289

En la sexta columna del formulario, la fórmula de la temperatura es:

$$T = \frac{1}{3k_B} m_0 \bar{v^2}$$

y por consistencia con el texto, el vector de Poynting es:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$