

FÍSICA GENERAL: MECÁNICA



COLECCIÓN: MONOGRAFÍAS DE ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

DIRECTOR DE LA COLECCIÓN

Rodríguez Rubio, Francisco. Universidad de Sevilla

CONSEJO DE REDACCIÓN

Arahal Junco, Consuelo. Universidad de Sevilla.

Carballar Rincón, Alejandro. Universidad de Sevilla.

Limón Marruedo, Daniel. Universidad de Sevilla.

Rodríguez Luis, Alejandro José. Universidad de Sevilla.

Rodríguez Rubio, Francisco. Universidad de Sevilla.

Salas Gómez, Francisco. Universidad de Sevilla.

COMITÉ CIENTÍFICO

Aracil Santonja, Javier. Universidad de Sevilla y Universidad de Málaga

Bernelli Zazzera, Franco. Politecnico di Milano

Chinesta, Francisco. École Centrale de Nantes

Félez Mindan, Jesús. Universidad Politécnica de Madrid

Gallego Sevilla, Rafael. Universidad Politécnica de Madrid

García-Lomas Jung, Francisco Javier. Universidad de Sevilla

Giner Maravilla, Eugenio. Universidad Politécnica de Valencia

González Díez, Isabel. Universidad de Sevilla

Montañés García, José Luis. Universidad Politécnica de Madrid

Montes Martos, Juan Manuel. Universidad de Sevilla

Navarro Esteve, Pablo José. Universidad Politécnica de Valencia.

Ollero de Castro, Pedro. Universidad de Sevilla

Verdú, Sergio. Princeton University

Antonio González Fernández

FÍSICA GENERAL: MECÁNICA



SEVILLA 2020

Serie: Ingeniería
Colección: Monografías de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería
de la Universidad de Sevilla
Núm.: 19

COMITÉ EDITORIAL:

José Beltrán Fortes
(Director de la Editorial Universidad de Sevilla)
Araceli López Serena
(Subdirectora)
Concepción Barrero Rodríguez
Rafael Fernández Chacón
María Gracia García Martín
Ana Ilundáin Larrañeta
María del Pópulo Pablo-Romero Gil-Delgado
Manuel Padilla Cruz
Marta Palenque Sánchez
María Eugenia Petit-Breuilh Sepúlveda
José-Leonardo Ruiz Sánchez
Antonio Tejedor Cabrera

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin permiso escrito de la Editorial Universidad de Sevilla.

© Editorial Universidad de Sevilla 2020
C/ Porvenir, 27 - 41013 Sevilla.
Tlfs.: 954 487 447; 954 487 451; Fax: 954 487 443
Correo electrónico: eus4@us.es
Web: <<https://www.editorial.us.es>>

© Antonio González Fernández 2020

Impreso en papel ecológico
Impreso en España-Printed in Spain

ISBN 978-84-472-3040-2
Depósito Legal: SE 1694-2020
Diseño de cubierta: Santi García Hernández
Maquetación: Antonio González Fernández
Impresión: Ulzama Digital

*En memoria de Antonio Castellanos
Profesor, investigador, amigo y maestro*

Índice

Prefacio	xi
1 Introducción a la física	1
1.1 Modelos y teorías físicas. El método científico	1
1.1.1 Objeto de la física	1
1.1.2 Teorías físicas	2
1.2 Mecánica	6
1.3 Medidas	7
1.3.1 Medidas directas e indirectas	8
1.3.2 Dimensiones de una magnitud	8
1.3.3 Unidades de medida	11
1.3.4 Incertidumbres	18
1.3.5 Órdenes de magnitud	26
1.4 Para saber más...	29
1.5 Cuestiones y problemas	30
2 Cinemática del movimiento rectilíneo	33
2.1 Posición	34
2.1.1 Posición como función del tiempo	34
2.1.2 Intervalo y desplazamiento	37
2.1.3 Distancia recorrida	38
2.2 Velocidad	40
2.2.1 Velocidad media	40
2.2.2 Velocidad instantánea	42
2.2.3 Cálculo de la posición a partir de la velocidad	46
2.2.4 Rapidez (celeridad) y distancia recorrida	50

2.2.5 Velocidad en función de la posición	52
2.3 Aceleración	54
2.3.1 Definición	54
2.3.2 Aceleración tangencial	55
2.3.3 Caso de velocidad como función de la posición	57
2.3.4 Cálculo de la velocidad y posición	58
2.4 Casos particulares de movimiento rectilíneo	58
2.4.1 Movimiento rectilíneo y uniforme	58
2.4.2 Movimiento uniformemente acelerado	59
2.4.3 Movimiento armónico simple (MAS)	62
2.5 Para saber más...	64
2.6 Cuestiones y problemas	65
3 Vectores en física	67
3.1 Magnitudes escalares y vectoriales	67
3.2 Principio de homogeneidad	70
3.3 Operaciones con magnitudes vectoriales	71
3.3.1 Suma de vectores	72
3.3.2 Producto por un escalar	73
3.3.3 Combinación lineal	74
3.3.4 Producto escalar	74
3.3.5 Producto vectorial	77
3.3.6 Doble producto vectorial	79
3.3.7 Producto mixto	80
3.4 Elementos geométricos	81
3.4.1 Puntos del espacio	81
3.4.2 Planos	81
3.4.3 Rectas	82
3.4.4 Momento de un vector respecto a un punto	84
3.5 Sistemas de referencia	85
3.5.1 Definición	85
3.5.2 Componentes de un vector	86
3.5.3 Vector de posición	88
3.5.4 Expresión de las operaciones	88
3.6 Derivación e integración de vectores	94
3.7 Para saber más...	96
3.8 Cuestiones y problemas	97
4 Cinemática en dos y tres dimensiones	99
4.1 Posición, trayectoria y ley horaria	99
4.1.1 Posición instantánea	99

4.1.2 Desplazamiento	100
4.1.3 Trayectoria	100
4.1.4 Ley horaria	105
4.2 Velocidad	106
4.2.1 Velocidad media	106
4.2.2 Velocidad instantánea	106
4.2.3 Cálculo de la posición a partir de la velocidad	107
4.2.4 Velocidad y ley horaria	109
4.2.5 Rapidez o celeridad	109
4.2.6 Dirección de la velocidad. Vector tangente	111
4.3 Aceleración	114
4.3.1 Definición	114
4.3.2 Componentes cartesianas	115
4.3.3 Cálculo de la velocidad y la posición a partir de la aceleración	116
4.3.4 Caso de una aceleración constante	117
4.3.5 Componentes intrínsecas	118
4.3.6 Vector normal	121
4.3.7 Radio de curvatura	123
4.4 Triedro de Frenet	125
4.5 Descripción del movimiento en otras coordenadas	128
4.5.1 Sistemas de coordenadas	128
4.5.2 Bases vectoriales	130
4.5.3 Posición	133
4.5.4 Velocidad	133
4.5.5 Aceleración	134
4.6 Caracterización del movimiento	135
4.6.1 Movimiento uniforme	135
4.6.2 Movimiento rectilíneo	137
4.6.3 Movimiento rectilíneo y uniforme	138
4.6.4 Movimiento plano	138
4.6.5 Movimiento circular	140
4.6.6 Movimiento parabólico	140
4.7 Estudio del movimiento circular	142
4.7.1 Posición. Eje del movimiento circular	142
4.7.2 Velocidad angular	143
4.7.3 Aceleración lineal y aceleración angular	143
4.7.4 Movimiento circular uniforme	145
4.8 Para saber más...	147
4.9 Cuestiones y problemas	148

5 Dinámica de la partícula	151
5.1 Leyes de Newton	151
5.1.1 Introducción	151
5.1.2 Primera ley de Newton: principio de inercia	152
5.1.3 Segunda ley de Newton: ecuación fundamental de la dinámica	156
5.1.4 Tercera ley de Newton: principio de acción y reacción	162
5.2 Análisis de problemas en dinámica de la partícula	164
5.2.1 Condiciones iniciales	165
5.2.2 Vínculos o ligaduras	165
5.2.3 Ecuaciones de movimiento	168
5.2.4 Diagramas de cuerpo libre	171
5.3 Estática de la partícula	172
5.3.1 Condición de equilibrio	172
5.3.2 Estabilidad del equilibrio	174
5.4 Movimiento por acción de la gravedad	176
5.4.1 En las proximidades de la superficie terrestre	176
5.4.2 A distancias planetarias o estelares	179
5.5 Péndulos e hilos	184
5.5.1 Tensión de un hilo	184
5.5.2 Máquina de Atwood	186
5.5.3 Péndulo simple	188
5.6 Fuerzas de rozamiento	190
5.6.1 Introducción	190
5.6.2 Rozamiento seco	191
5.6.3 Rozamiento viscoso	195
5.7 Movimiento sobre curvas y superficies	198
5.7.1 Movimiento sobre una superficie	198
5.7.2 Partícula en una superficie curva	200
5.7.3 Movimiento a lo largo de una curva	203
5.8 Para saber más...	205
5.9 Cuestiones y problemas	206
6 Energía y leyes de conservación	211
6.1 Constantes de movimiento	211
6.2 Cantidad de movimiento (o momento lineal)	215
6.2.1 Definición	215
6.2.2 Teorema de la cantidad de movimiento (TCM)	215
6.2.3 Impulso	216
6.2.4 Percusiones	217
6.2.5 Teorema de conservación de la cantidad de movimiento	218

6.3 Momento cinético (o angular)	219
6.3.1 Definición y propiedades	219
6.3.2 Caso del movimiento plano	220
6.3.3 Momento de una fuerza	221
6.3.4 Teorema del momento cinético (TMC)	222
6.3.5 Teorema de conservación del momento cinético	223
6.3.6 Fuerzas centrales	226
6.4 Trabajo y energía cinética	227
6.4.1 Trabajo	227
6.4.2 Potencia	229
6.4.3 Energía cinética. Teorema trabajo-energía cinética	229
6.4.4 Teorema de conservación de la energía cinética	234
6.4.5 Disipación de energía cinética	235
6.5 Energía potencial y mecánica	235
6.5.1 Energía potencial	235
6.5.2 Trabajo y energía potencial	239
6.5.3 Balance de energía	240
6.5.4 Energía mecánica	241
6.5.5 Aplicaciones de la conservación de la energía mecánica	243
6.5.6 Curvas de potencial	247
6.5.7 Estabilidad de una partícula	251
6.6 Para saber más...	254
6.7 Cuestiones y problemas	255
7 Movimiento oscilatorio	259
7.1 Introducción	259
7.1.1 Fuerzas recuperadoras y equilibrios estables	259
7.1.2 Movimiento periódico	260
7.1.3 Ley de Hooke	261
7.1.4 Resortes en serie y en paralelo	263
7.2 Movimiento armónico simple (MAS)	265
7.2.1 Definición	265
7.2.2 Solución y propiedades del MAS	266
7.2.3 Estudio empleando variable compleja	268
7.3 El oscilador armónico en tres dimensiones	273
7.4 Energía de un oscilador	278
7.4.1 De un oscilador armónico en una dimensión	278
7.4.2 De un oscilador armónico en 2 o 3 dimensiones	280
7.5 Oscilaciones no lineales	282
7.5.1 Aproximación lineal y parabólica	283

7.5.2 Dependencia con la amplitud	285
7.5.3 El péndulo simple	286
7.6 Oscilaciones amortiguadas	289
7.6.1 Amortiguadores mecánicos	289
7.6.2 Ecuación del oscilador amortiguado	290
7.6.3 Caracterización de las soluciones	291
7.6.4 Solución matemática del oscilador amortiguado	292
7.7 Oscilaciones forzadas	300
7.7.1 Ecuación del oscilador forzado	300
7.7.2 El caso de una fuerza constante	301
7.7.3 Caso de una fuerza sinusoidal	302
7.8 Para saber más...	307
7.9 Cuestiones y problemas	308
8 Dinámica de los sistemas de partículas	313
8.1 Definición y propiedades de un sistema de partículas	314
8.1.1 Definición de sistema de partículas	314
8.1.2 Grados de libertad de un sistema de partículas	315
8.1.3 Masa total	316
8.1.4 Centro de masas (CM)	319
8.1.5 Cantidad de movimiento (o momento lineal)	323
8.1.6 Momento cinético (o angular)	325
8.1.7 Energía cinética	328
8.1.8 Energía potencial gravitatoria	330
8.2 Leyes de evolución y conservación	331
8.2.1 De la masa	331
8.2.2 De la cantidad de movimiento	331
8.2.3 Del momento cinético	334
8.2.4 De la energía cinética	338
8.3 Colisiones de dos partículas	341
8.3.1 Definición	341
8.3.2 Conservación de la cantidad de movimiento	343
8.3.3 Conservación de la energía	343
8.3.4 Impacto de un proyectil en un blanco	345
8.3.5 Caso general	349
8.3.6 Colisiones en tres dimensiones	349
8.4 Propulsión a reacción	352
8.5 Para saber más...	356
8.6 Cuestiones y problemas	357

9 Cinemática del sólido rígido	361
9.1 Modelo de sólido rígido	361
9.1.1 Compresibilidad nula	361
9.1.2 Extensión indefinida	362
9.1.3 Condición de rigidez	363
9.1.4 Grados de libertad	366
9.1.5 Sistemas de referencia fijo y ligado	367
9.2 Movimientos rígidos	368
9.2.1 Movimientos finitos e instantáneos	368
9.2.2 Estado de reposo	369
9.2.3 Traslaciones	369
9.2.4 Rotaciones	372
9.2.5 Movimiento general	386
9.2.6 Campo de velocidades	387
9.2.7 Movimiento helicoidal	389
9.3 Caracterización del movimiento	391
9.4 Campo de aceleraciones	392
9.5 Movimiento plano	398
9.5.1 Definición	398
9.5.2 Propiedades particulares del movimiento plano	398
9.5.3 Expresión en el plano director	400
9.5.4 Centro instantáneo de rotación (CIR)	403
9.6 Para saber más...	410
9.7 Cuestiones y problemas	411
10 Cinemática del movimiento relativo	415
10.1 Notación y definiciones	415
10.1.1 Sólidos y sistemas de referencia	415
10.1.2 Notación	417
10.2 Relación entre derivadas en distintos sistemas de referencia	419
10.2.1 Derivada temporal en una base	419
10.2.2 Relación entre derivadas temporales	420
10.3 Composición de velocidades	421
10.3.1 Composición de velocidades lineales	421
10.3.2 Composición de velocidades angulares	425
10.4 Composición de aceleraciones. Teorema de Coriolis	430
10.4.1 Composición de aceleraciones angulares	430
10.4.2 Composición de aceleraciones lineales	432
10.5 Composición general de movimientos	436
10.5.1 Generalización de las fórmulas	436

10.5.2 Composiciones equivalentes	437
10.5.3 Sólido con un punto fijo	440
10.6 Contacto entre sólidos	444
10.6.1 Pares cinemáticos	444
10.6.2 Pares cinemáticos en el movimiento plano	449
10.6.3 Deslizamiento, rodadura y pivotamiento	451
10.7 Composición de movimientos planos	452
10.7.1 Propiedades generales	452
10.7.2 Teorema de los tres centros	455
10.8 Para saber más...	460
10.9 Cuestiones y problemas	461
11 Dinámica en sistemas no inerciales	467
11.1 Introducción. Fuerzas ficticias	467
11.2 Planteamiento general	468
11.3 Sistema con aceleración rectilínea	469
11.3.1 Fuerza de inercia	469
11.3.2 El caso del sistema centro de masas	474
11.4 Sistema de referencia en rotación uniforme	476
11.4.1 Fuerza centrífuga	477
11.4.2 Fuerza de Coriolis	478
11.4.3 Fuerza ficticia por aceleración angular	484
11.4.4 Caso general	485
11.5 Energía en un sistema de referencia no inercial	485
11.6 Para saber más...	486
11.7 Cuestiones y problemas	487
12 Dinámica del sólido rígido	491
12.1 Cinética	492
12.1.1 Masa y densidad de masa	492
12.1.2 Centro de masas	493
12.1.3 Cantidad de movimiento	495
12.1.4 Momento cinético	496
12.1.5 Momento de inercia	499
12.1.6 Energía cinética	508
12.2 Sistemas de fuerzas	510
12.2.1 Sistemas equivalentes	510
12.2.2 Tipos de sistemas equivalentes	511
12.2.3 Sistemas planos	517
12.3 Ecuaciones de la dinámica	518
12.3.1 Traslación. Teorema de la cantidad de movimiento	519

12.3.2 Rotación. Teorema del momento cinético	519
12.3.3 Teorema de la energía cinética	522
12.4 Vínculos en un sólido	524
12.4.1 Sistemas equivalentes de fuerzas de reacción	524
12.4.2 Vínculos bilaterales y unilaterales	527
12.4.3 Pares cinemáticos	528
12.5 Sistemas simples de sólidos rígidos	530
12.5.1 Sistemas planos	530
12.5.2 Dinámica del sólido libre	532
12.5.3 Equilibrio de un sólido	533
12.5.4 Vuelco inminente	538
12.5.5 Rotor. Péndulo compuesto	542
12.5.6 Rodadura	548
12.5.7 Vehículo tomando una curva	556
12.6 Para saber más...	559
12.7 Cuestiones y problemas	560
13 Movimiento ondulatorio	565
13.1 Deducción de la ecuación de onda	565
13.1.1 Ondas transversales en una cuerda tensa	565
13.1.2 Ondas longitudinales en un sólido elástico	567
13.2 Soluciones de la ecuación de onda	572
13.2.1 Ondas viajeras	572
13.2.2 Ondas sinusoidales	574
13.2.3 Ondas estacionarias	575
13.3 Condiciones en los extremos	576
13.3.1 Posibles condiciones de contorno	577
13.3.2 Cuerda con dos extremos fijos	578
13.4 Reflexión y transmisión de ondas	581
13.4.1 En un extremo fijo	581
13.4.2 En un extremo libre	582
13.4.3 En la frontera entre dos medios	583
13.5 Energía y potencia en el movimiento ondulatorio	586
13.5.1 Energía cinética	586
13.5.2 Energía potencial	588
13.5.3 Potencia de una onda	591
13.6 Para saber más...	594
13.7 Cuestiones y problemas	595
Índice de términos	597
Referencias	605

Prefacio

Dada la abundante bibliografía existente en manuales de física general, tanto para estudiantes de Física como de Ingeniería, siempre cabe preguntarse para qué uno más. Claro que también tenemos el refrán castellano “cada maestrillo tiene su librillo”. Y, por mucho que busquemos motivaciones elevadas, en el fondo la razón es esta. Con los años, a un profesor le gusta organizar los contenidos de una determinada manera, dar énfasis a algunos aspectos, considerar superfluos otros... El punto de partida de este manual es justamente la recolección de notas publicadas¹ a lo largo de los años.

¿Qué pretende aportar este libro? Se trata de un manual orientado a alumnos de primer curso de ingenierías, para cubrir las competencias en mecánica de primer curso. Por ello, no he incluido apenas el estudio de ramas de la mecánica más teórica, como el movimiento planetario, y en cambio analizo extensamente la cinemática del sólido rígido. Es un libro extenso, como se aprecia a simple vista, aparte de porque (casi) no puedo evitar el incluir todo lo que me parece de interés, refleja también un esfuerzo ser inclusivo en cuanto a los programas de los diferentes grados en ingeniería, de manera que, si se usa como referencia en un grado concreto, habrá temas y secciones que podrán omitirse por completo, mientras que en un grado diferente se podrá hacer una selección distinta.

Éste es un libro de teoría. Incluye numerosos ejemplos y aplicaciones, pero no soluciones de problemas, cuya inclusión podría duplicar el espacio necesario. Sobre este aspecto, en mi opinión, hay dos extremos que representan perversiones de lo que debe ser el estudio universitario. En un extremo está el “aprendizaje” favorecido por muchos alumnos y academias, basado en la resolución sistemática y machacona de problemas, preferiblemente extraídos de exámenes de

años anteriores, con el objeto de llegar a un 5.0, sin que importe si los conceptos se adquieren o no. En el otro, el aprendizaje basado en “estrategias” y en el “aprender a aprender” de manera que el estudiante se enfrente a nuevos retos en un mundo cambiante... pero minimizando el que la humanidad lleva miles de años adquiriendo conocimientos concretos y transmitiéndolos a las nuevas generaciones. Las leyes de Newton ya están descubiertas y es nuestra obligación como profesores el explicarlas a los que vengan detrás de nosotros, de forma que las entiendan y las apliquen o las transmitan a su vez, junto con los nuevos avances que se vayan produciendo. Siempre se enfrentará mejor a nuevos retos el ingeniero que disponga de una surtida caja de herramientas que el que tenga una hermosa caja, pero que solo contiene un martillo y un destornillador.

El nivel matemático y conceptual que requiere este manual no es trivial. Es una falta que encuentro en muchos excelentes manuales de origen americano^{2 3 4}, que mientras que abordan una muy amplia variedad de conceptos, se quedan muy cortos en el manejo de herramientas matemáticas de uso necesario, como el álgebra vectorial, el cálculo diferencial o las ideas básicas de ecuaciones diferenciales. He procurado, no obstante, que en estos aspectos sea autocontenido y que, aunque los conceptos sean sutiles, los ejemplos y aplicaciones no requieran cálculos de gran complejidad.

Sí pido perdón por el elevadísimo número de fórmulas, que puede provocar el que los árboles no dejen ver el bosque. No obstante, debe recordarse siempre que el objetivo del aprendizaje es entender los conceptos, no aprenderse las fórmulas de memoria (“Profesor, solo dígame qué formula tengo que usar” no es la mejor actitud), aunque alguna habrá que saberse. Para aplicar las fórmulas de manera maquinal ya existen los ordenadores.

Por supuesto, la elaboración de este trabajo no habría sido posible sin la colaboración de todos los compañeros del departamento de Física Aplicada III y del grupo de investigación EHD-CGM, que a través de miles de conversaciones han contribuido a definir ideas, localizar puntos delicados o proponer ejemplos adecuados. Y, por supuesto, gracias a todos esos alumnos que se atreven a preguntar sus dudas y convertir una clase en un proceso en el que todos aprendemos. A ellos, y al resto de sus compañeros, va dirigido este libro.

1 Introducción a la física

ANTES DE ANALIZAR ASPECTOS CONCRETOS DE LA FÍSICA, en particular de la mecánica, que es el objeto de este manual, conviene caracterizar los aspectos generales de esta rama de la ciencia, así como de sus principales subdivisiones.

En el tema, comenzaremos por una descripción muy simplificada del método científico y el papel importante que desempeñan los modelos.

El tema incluye así mismo un análisis de los aspectos relacionados con la medida: unidades, incertidumbre de los resultados, órdenes de magnitud y estimaciones.

1.1 Modelos y teorías físicas. El método científico

1.1.1 Objeto de la física

La física suele entenderse como la ciencia que describe matemáticamente el comportamiento de los sistemas (y del Universo en general) atendiendo a sus propiedades físicas (y no químicas), esto es, masa, carga eléctrica, etc.

Esta definición que, como todas, es parcial e imprecisa, omite un aspecto esencial: el cómo se hace esa descripción matemática del Universo. La física realmente no describe el Universo o los sistemas. La realidad es algo inalcanzable que solo podemos conocer indirectamente a partir de observaciones y medidas. El estudio del conocimiento constituye el objeto de la epistemología.

En su lugar, lo que se hace en física es construir un modelo de la Realidad. Un modelo es una construcción mental que refleja algunos aspectos de la realidad y las relaciones entre ellos.

Un ejemplo paradigmático de modelo lo tenemos en la figura 1.1, que todos hemos visto más de una vez en alguna de sus múltiples versiones. Ante esta figura, nuestra primera pregunta debe ser ¿y esto cómo se sabe? No basta con responder “viene en un libro”. Tampoco puede ser por observación directa, ya que el pozo más profundo que se ha cavado mide 12.3 km. Lo que vemos en esta figura ni es una verdad revelada, ni es una observación. Es un modelo de como suponemos que es el interior de la Tierra, a partir de medidas de los tiempos de propagación de las ondas sísmicas y de otras observaciones geológicas, como puede ser el movimiento de las placas continentales.

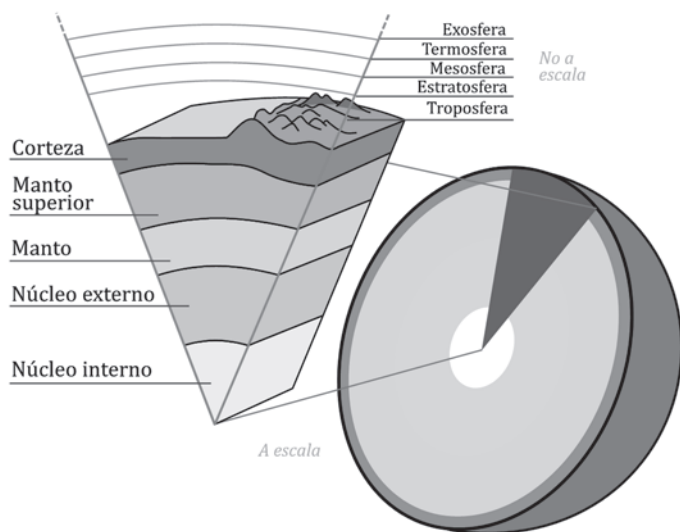


Figura 1.1. Un modelo de la estructura terrestre (de Wikimedia Commons⁵).

1.1.2 Teorías físicas

En física, desde los tiempos de Galileo, los modelos se construyen de manera matemática, es decir, los distintos aspectos y las relaciones entre ellos se modelan mediante la formulación de ecuaciones. Los modelos, no obstante, no pueden estar desconectados de la experiencia. Típicamente afirmamos que “la gravedad apunta hacia abajo” y también “definimos abajo como la dirección en la que apunta la gravedad”. Esta circularidad, que nos hace sonreír, expresa un hecho profundo: la física no se reduce a un conjunto de deducciones y fórmulas, sino que debe estar conectada con la experiencia. Es ésta la que nos informa de lo que significa “abajo”. Una parte de estos modelos estará formada entonces por datos empíricos y otra parte por deducciones matemáticas.

Todo el conocimiento en física está organizado en teorías (termodinámica, electromagnetismo, relatividad), donde no hay que entender el término en el sentido de algo improbable (“es solo una teoría”), sino como de un modelo físico-matemático basado en el método científico.

Hipótesis

A partir de evidencias empíricas y de consideraciones teóricas, se definen una serie de conceptos básicos (masa, partícula, sólido rígido...) y se formulan una serie de hipótesis o postulados, a partir de los cuales se desarrolla la teoría.

Estos conceptos y postulados permiten construir un modelo matemático de la realidad. Esto es, no es que en física se describa la realidad “tal cual es”, sino que elabora un modelo o analogía que captura los aspectos que se consideren más relevantes de ella. Un electrón no es una partícula o una onda. Un electrón es un electrón, sea eso lo que sea. Pero existen modelos que lo describen como partícula y modelos que lo tratan como ondas (y como una combinación de ambos conceptos) y cada uno posee una utilidad y una validez concretas.

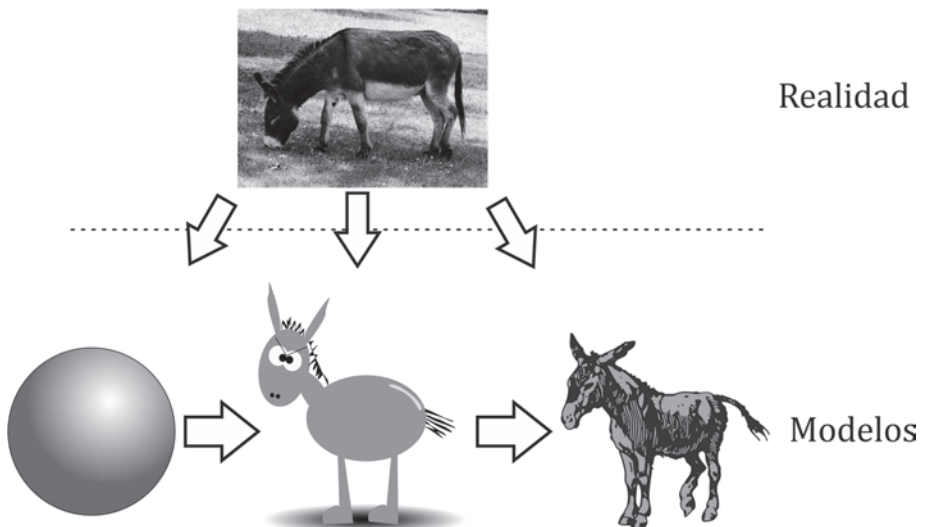


Figura 1.2. Refinamientos del modelo del burro, comenzando con el burro esférico

Para construir una teoría, se empieza tomando solo algunos aspectos relevantes (“supongamos que el burro es esférico”) como muestra la figura 1.2 y posteriormente se le van añadiendo refinamientos y nuevos detalles. Así tenemos en primer lugar el modelo de la partícula material, luego el del sólido rígido, más tarde el del sólido elástico... cada vez más elaborados.

Límites de validez

Cada modelo posee unos límites de validez. Solo son aplicables dentro de ciertos rangos de las variables. Fuera de ellos, es de esperar que no se correspondan con la realidad.

Un sólido completamente rígido no existe, pero el modelo de sólido rígido es completamente válido a la hora de estudiar el movimiento de una pieza de un mecanismo. Si en cambio intentamos aplicar este modelo a la propagación del sonido, comprobamos que no funciona, porque ese fenómeno requiere conocer las deformaciones del sólido. Queda fuera de los límites de validez del modelo.

Predicciones

Una vez que se dispone del modelo, y de los postulados, se hacen predicciones de resultados verificables experimentalmente. Una teoría no es nada si no puede ser contrastada con experiencias ya conocidas o con experimentos diseñados con el fin de verificarla.

De esta forma, si al realizar el experimento sugerido hay concordancia entre teoría y práctica, no hay problema y aumenta nuestra confianza en la teoría. Sin embargo, si se obtiene un resultado que contradice las predicciones de la teoría, puede rechazarse ésta o mostrar sus incorrecciones (en términos filosóficos, se dice que la teoría debe ser *falsable*). Las discrepancias entre teoría y un experimento pueden ser por múltiples razones:

- Que el experimento caiga fuera de los límites de validez de la teoría y haya que revisar el experimento.
- Que haya que ajustar y acotar los límites de validez de la teoría.
- Que haya que refinar la teoría, incluyendo factores no considerados previamente
- Que haya que revisar el modelo matemático y los postulados en que se apoya la teoría
- En última instancia, puede que haya que abandonar la teoría por completo y elaborar una nueva.

El caso de la gravedad (ejemplo 1.1) muestra que teorías de alcance limitado pueden ser incluidas dentro de una teoría más general que consiga una mayor precisión, pero que el precio de esta generalidad suele ser una mayor complejidad matemática. Por ello, a menudo hay que hacer un balance entre la precisión de los cálculos y la simplicidad del modelo. En ocasiones interesa trabajar con una teoría más limitada pero más simple, que con una más amplia y completa pero que requiere cálculos más difíciles. Esto requiere tener siempre claros los límites de validez de una teoría.

Ejemplo 1.1. Teorías sobre la gravedad

Un ejemplo claro de teoría que ha ido evolucionando a lo largo de la historia es la de la caída de los cuerpos. Aristóteles afirmó que los cuerpos tienden a su lugar natural y por eso las piedras caen y las burbujas suben. Este modelo fracasa cuando se mide que la gravedad actúa sobre todos los cuerpos por igual.

Galileo establece que, en ausencia de rozamiento, todos los cuerpos caen con la misma aceleración. Este modelo es válido si queremos estudiar el movimiento de un proyectil a corta distancia. Falla si hablamos de un misil balístico o del movimiento planetario.

Newton extendió el trabajo de Galileo al espacio exterior, elaborando su ley de la Gravitación Universal, que permite explicar y predecir el movimiento planetario, pero falla en situaciones de campos gravitatorios muy intensos.

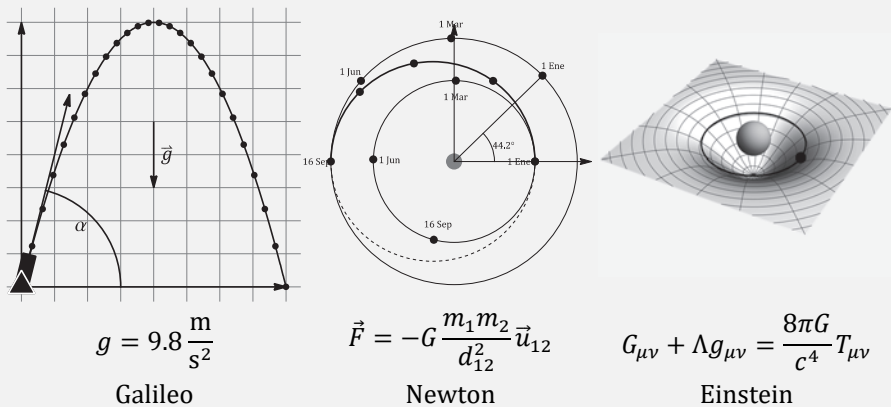


Figura 1.3. Tres teorías sobre la gravedad.

Einstein reformuló el problema en su teoría de la relatividad general⁶⁶. Interpretando la gravedad como geometría llegó a las llamadas ecuaciones de