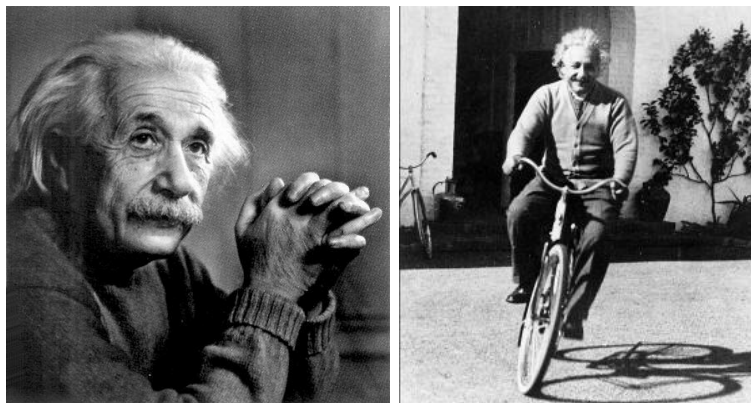


Descubre la Relatividad

José Ignacio Illana*

*Departamento de Física Teórica y del Cosmos
Universidad de Granada*

Enero de 2013



*Email: jillana@ugr.es.

Índice

I	Relatividad Especial	1
1	Constancia de la velocidad de la luz	3
1.1	Naturaleza y velocidad de la luz	3
1.2	El “éter luminífero”	4
1.3	Primeros experimentos	5
1.3.1	Aberración estelar	5
1.3.2	Arrastre del éter: experimento de Fizeau	5
1.3.3	Preludio del experimento de Michelson-Morley	6
1.4	El experimento de Michelson-Morley	7
1.5	La hipótesis de contracción de Lorentz-Fitzgerald	8
1.6	El experimento de Kennedy-Thorndike	9
1.7	Otros experimentos	10
1.8	El segundo postulado de Einstein	11
	Ejercicios	11
2	Espacio, tiempo y espaciotiempo: diagramas de Minkowski	13
2.1	Introducción: los postulados de la relatividad especial	13
2.2	La definición de tiempo	14
2.2.1	¿Qué se entiende por medir el tiempo?	14
2.2.2	El sistema común de tiempos: relojes sincronizados	14
2.2.3	La relatividad de las medidas del tiempo: dilatación temporal	16
2.3	La definición de espacio	17
2.3.1	¿Qué se entiende por medir una longitud?	17
2.3.2	La relatividad de la medidas espaciales: contracción espacial	17
2.4	Resumen: las transformaciones de Lorentz	18
2.5	El espaciotiempo: diagramas de Minkowski	18

2.5.1	Observador en reposo	19
2.5.2	Observador en movimiento relativo: transformaciones de Lorentz	20
2.5.3	El intervalo y la calibración de los ejes	20
2.5.4	Orden temporal: pasado, presente, futuro y causalidad	21
	Ejercicios	22
3	Relatividad: la misma historia según distintos protagonistas	25
3.1	La historia	25
3.2	Análisis de los hechos: diagrama espacio-tiempo	25
3.2.1	Protagonistas: dos observadores inerciales	25
3.2.2	Los puntos de vista: sistemas de referencia espacio-tiempo	25
3.2.3	Distintas varas de medir: calibrado de los ejes	26
3.2.4	Los hechos: líneas de universo	26
3.2.5	Momentos clave: sucesos relevantes	27
3.2.6	Longitudes	27
3.2.7	Secuencia temporal	27
3.2.8	Tiempo que el tren tarda en cruzar la estación	28
3.3	Versiones de lo ocurrido	28
3.3.1	La película según el jefe de estación	28
3.3.2	La película según el maquinista del tren	28
3.4	Conclusiones	29
	Ejercicios	30
4	La paradoja de los gemelos	31
4.1	La aventura de los gemelos	31
4.2	La paradoja	31
4.3	Solución	32
4.3.1	Diagrama espacio-tiempo	32
4.3.2	El número de felicitaciones por Año Nuevo	33
4.3.3	Interpretación de lo sucedido	34
4.3.4	Algunos comentarios	34
4.4	Comprobación experimental: relojes voladores	35
	Ejercicios	36
5	Apariencia de los objetos que se mueven a altas velocidades	37

5.1	Introducción	37
5.2	Mecanismos de distorsión de las imágenes	37
5.2.1	Contracción de Lorentz	37
5.2.2	Rotación aparente	38
5.2.3	Retrasos de la luz	38
5.2.4	Ejemplos	39
5.3	San Jorge y el dragón	44
5.3.1	Historia	44
5.3.2	Sucesos importantes	44
5.3.3	Versión de San Jorge	45
5.3.4	Versión del dragón ... si pudiera contarlo	45
	Ejercicios	46
6	El efecto Doppler y el desplazamiento cosmológico al rojo	47
6.1	Introducción	47
6.2	Efecto Doppler acústico	47
6.2.1	Fuente y receptor en movimiento respecto al aire	48
6.2.2	Fuente en reposo	48
6.2.3	Receptor en reposo	49
6.3	Efecto Doppler para la luz	49
6.3.1	Fuente y observador se alejan	49
6.3.2	Fuente y observador se acercan	50
6.3.3	Caso general y efecto Doppler transversal	50
6.4	Desplazamiento cosmológico al rojo como efecto Doppler	52
6.4.1	El parámetro de desplazamiento al rojo	52
6.4.2	La ley de Hubble-Humanson	52
	Ejercicios	53
7	Dinámica relativista: $E = mc^2$ y movimiento acelerado	55
7.1	Introducción	55
7.2	La equivalencia entre masa y energía	55
7.3	Transformaciones de Lorentz de velocidades y aceleraciones	58
7.4	El sistema de referencia de reposo instantáneo	58
7.5	Ejemplo práctico	59
	Ejercicios	60

8 Electromagnetismo y relatividad especial	61
8.1 Introducción	61
8.2 Las ecuaciones de Maxwell y el concepto de campo	62
8.2.1 Las ecuaciones	62
8.2.2 El campo eléctrico y las fuerzas eléctricas	63
8.2.3 El campo magnético y las fuerzas magnéticas	64
8.2.4 La relación entre campos eléctricos y magnéticos	65
8.3 Las ondas electromagnéticas	66
8.4 La velocidad de la luz y el segundo postulado de Einstein	67
8.5 La unificación de la electricidad y el magnetismo	68
8.5.1 Una paradoja del electromagnetismo resuelta por la relatividad . . .	69
II Relatividad General	71
9 El principio de equivalencia de inercia y gravedad	73
9.1 Introducción	73
9.2 El principio de equivalencia	73
9.2.1 La relatividad general	74
9.2.2 La igualdad de masa inercial y masa gravitatoria	75
9.2.3 La teoría de la gravitación	77
9.3 Relatividad general y el principio de Mach	78
10 Gravedad y espaciotiempo	81
10.1 Relatividad de las medidas del tiempo	81
10.2 Relatividad de las medidas espaciales	83
10.3 Métrica, curvatura y geodésicas	83
10.3.1 El concepto de métrica	83
10.3.2 La geometría euclídea	84
10.3.3 La geometría de Minkowski	85
10.3.4 Otras geometrías no euclídeas	86
10.4 Las ecuaciones de campo de Einstein	87
10.5 Volviendo al principio de equivalencia	88
Ejercicios	89
11 Tests de la relatividad general	91

11.1	Introducción	91
11.2	La deflexión de la luz y lentes gravitatorias	91
11.3	El avance del perihelio de Mercurio	93
11.4	Ondas gravitatorias	94
11.5	Agujeros negros	95
12	Cosmología	97
12.1	Introducción	97
12.2	Modelos de universo	97
12.3	La paradoja de Olbers	102
	Ejercicios propuestos	105
	Bibliografía	107

