

ÍNDICE

Una breve observación sobre la publicación de esta obra xiii
por MENACHEM BEN-SASSON y MARTIN STRATMANN

Prólogo xv
por JOHN STACHEL

Prefacio xix

EL ENCANTO DE UN MANUSCRITO 1

HACIA LA RELATIVIDAD GENERAL. LA ODISEA INTELECTUAL DE EINSTEIN 7

EL MANUSCRITO ANOTADO 37

Los títulos en cursiva reproducen los títulos originales de los epígrafes en el manuscrito de Einstein.
Los números de página entre corchetes hacen referencia a la paginación original del manuscrito de Einstein.

El fundamento de la teoría de la relatividad general

A. *Consideraciones fundamentales acerca del postulado de la relatividad*

§1. *Observaciones sobre la teoría de la relatividad especial*

Pág. [1]: ¿Por qué fue Einstein más allá de la relatividad especial? 39

Pág. [2]: ¿Qué era incorrecto en las nociones clásicas de espacio y tiempo? 41

§2. *La necesidad de una generalización del postulado de la relatividad*

Pág. [3]: ¿Por qué se percató Einstein de dificultades que otros ignoraron? 43

Pág. [4]: ¿Cuál fue la idea más feliz de Einstein y cómo llegó a ella? 45

§3. *El continuo espaciotemporal. Necesidad de covariancia general para que las ecuaciones expresen leyes generales de la naturaleza*

Pág. [5]: ¿Por qué la teoría de Einstein de la gravitación requiere una geometría no euclidiana? 47

Pág. [6]: ¿Cuál es el papel de las coordenadas en la nueva teoría de la gravitación? 49

Pág. [7]: ¿Cuál es el significado de la covariancia general? 51

§4. *La relación de las cuatro coordenadas con la medida en el espacio y el tiempo*

Pág. [8]: ¿Qué es la geometría del espaciotiempo? 53

- Pág. [9]: ¿Cuándo se percató Einstein de que la gravedad tiene que describirse mediante una expresión matemática compleja? 55
- B. *Herramientas matemáticas para la formulación de ecuaciones generalmente covariantes*
- §5. *Cuadrivectores contravariantes y covariantes*
- Pág. [10]: ¿Por qué tenemos que distinguir entre tensores, vectores y escalares? 57
- Pág. [11]: ¿Cuándo llega Einstein a la conclusión de que necesita métodos matemáticos más complejos? 59
- §6. *Tensores de rango dos y superior*
- Pág. [12]: ¿Qué se puede aprender de la teoría del electromagnetismo? 61
- §7. *Multiplicación de tensores*
- Pág. [13]: ¿Cómo se obtienen nuevos tensores a partir de otros preexistentes mediante operaciones tensoriales? 63
- Pág. [13]: ¿Qué pautas de razonamiento heurístico siguió Einstein en su búsqueda de una teoría relativista de la gravitación? 63
- Pág. [14]: ¿Cuál fue la estrategia de Einstein para construir una ecuación de campo para la gravitación? 65
- §8. *Algunos aspectos del tensor fundamental $g_{\mu\nu}$*
- Pág. [15]: ¿Por qué es tan fundamental el tensor métrico? 67
- Pág. [16]: ¿Por qué el cuaderno de Zúrich es un documento único en la historia de la física? 69
- Pág. [16]: ¿Cómo se miden los volúmenes en un espaciotiempo curvo? 69
- Pág. [17]: ¿Cómo puede una elección adecuada de coordenadas simplificar la teoría? 71
- Pág. [17]: ¿Cuál es la diferencia entre una «condición coordenada» y una «restricción coordenada»? 71
- §9. *La ecuación de la línea geodésica. El movimiento de una partícula*
- Pág. [18]: ¿Cuál es el significado del concepto de «línea recta» en un espacio curvo? ¿Cómo se mueve una partícula bajo la influencia de la gravedad? 73
- Pág. [19]: ¿Cuál es el significado físico y geométrico de los «símbolos de Christoffel»? 75
- Pág. [19]: ¿Cuál fue el «funesto prejuicio» de Einstein en su primera identificación de las componentes del campo gravitatorio? 75
- §10. *La formación de tensores por diferenciación*
- Pág. [20]: La geodésica vista como la línea con la mayor «rectitud posible» y su relación con el concepto de «conexión afin» 77
- Pág. [21]: ¿Cómo cambian los tensores al pasar de un punto a otro o cómo obtener nuevos tensores a partir de otros mediante diferenciación? 79
- Pág. [22]: ¿Cuál es el contexto geométrico de la formulación matemática de Einstein de la relatividad general? 81
- §11. *Algunos casos de especial relevancia*
- Pág. [23]: La Teoría Entwurf como un paso intermedio hacia la teoría de la relatividad general 83
- Pág. [24]: ¿Qué es la divergencia de un campo vectorial? ¿Cuáles son los otros conceptos de campo vectorial? 85

ÍNDICE

- Pág. [25]: ¿Cuál es la formulación matemática de la conservación de energía-momento en relatividad general? 87
- §12. *El tensor de Riemann-Christoffel*
- Pág. [26]: ¿Cuál es el significado geométrico del tensor de Riemann-Christoffel? 89
- Pág. [27]: ¿Qué era el «supuesto tensor gravitatorio» y por qué fue abandonado? 91
- La teoría del campo gravitatorio*
- §13. *Ecuaciones del movimiento de un punto material en el campo gravitatorio. Expresión para las componentes del campo gravitatorio*
- Pág. [28]: ¿Cuándo dejó de creer Einstein en la Teoría *Entwurf*? 93
- Pág. [28]: ¿Cómo se mueve una partícula en un campo gravitatorio? 93
- §14. *Ecuaciones del campo gravitatorio en ausencia de materia*
- Pág. [29]: ¿Cuál fue el mayor desafío de Einstein? 95
- §15. *La función hamiltoniana para el campo gravitatorio. Leyes del momento y de la energía*
- Pág. [30]: ¿Qué es el formalismo lagrangiano y cuál fue su papel en la génesis de la relatividad general? 97
- Pág. [31]: ¿Qué sucede con el principio de conservación de la energía-momento en ausencia de materia? ¿Puede el campo gravitatorio actuar como fuente de sí mismo? 99
- Pág. [31]: ¿Quién era el principal competidor de Einstein? 99
- Pág. [32]: ¿Cómo se puede generalizar la ecuación de campo sin materia para que incluya materia? 101
- §16. *La forma general de las ecuaciones del campo gravitatorio*
- Pág. [33]: ¡Por fin, la ecuación del campo gravitatorio! 103
- §17. *Las leyes de conservación en el caso general*
- Pág. [34]: ¿Cómo se satisface el principio de conservación en una manera no imaginada por Einstein en las etapas iniciales del desarrollo de su teoría? 105
- §18. *Las leyes del momento y de la energía para la materia como consecuencia de las ecuaciones de campo*
- Pág. [35]: ¿Es posible obtener las leyes físicas de conservación a partir de simetrías de la naturaleza? 107
- D. *Fenómenos materiales*
- §19. *Ecuaciones de Euler para un fluido adiabático sin fricción*
- Pág. [36]: ¿Cómo encajan las teorías físicas establecidas, como la hidrodinámica y el electromagnetismo, en la nueva teoría de la gravitación? 109
- §20. *Ecuaciones del campo electromagnético de Maxwell para el espacio vacío*
- Pág. [37]: ¿Qué ecuaciones matemáticas utilizó Maxwell para describir las leyes del electromagnetismo y cómo afecta la gravitación a estas ecuaciones? 111
- Pág. [38]: ¿Cuál era el papel del «éter» en la física prerrelativista y por qué en un determinado momento Einstein pensó que el espacio sin éter es inconcebible? 113
- Pág. [39]: ¿Cuál fue el papel crucial que desempeñó Von Laue? 115

E.	
§21. <i>La teoría de Newton como primera aproximación</i>	
Pág. [40]: ¿Cómo se comprueba experimentalmente la validez de la teoría?	117
Pág. [40a]: ¿Qué pretendía aclarar y subrayar Einstein a posteriori?	119
Pág. [41]: ¿Qué forma adopta el tensor métrico en la aproximación newtoniana?	121
Pág. [41]: ¿Cuál fue la grata sorpresa que recibió Einstein?	121
Pág. [42]: ¿Cómo podían los astrónomos ayudar a confirmar ciertas predicciones de la teoría?	123
§22. <i>Comportamiento de varillas y relojes en el campo gravitatorio estático. Curvatura de los rayos de luz. El avance del perihelio de una órbita planetaria</i>	
Pág. [43]: ¿Cómo se miden las longitudes de las varillas y el ritmo de los relojes en un campo gravitatorio?	125
Pág. [43]: ¿Existe una alternativa viable a la teoría de la relatividad general?	125
Pág. [44]: ¿Qué observación hizo a Einstein mundialmente famoso?	127
Pág. [45]: Explicación del avance del perihelio de Mercurio: de la decepción al triunfo	129
<i>Apéndice: formulación de la teoría a partir de un principio variacional</i>	
§1. <i>Las ecuaciones de campo de la gravitación y la materia</i>	
Pág. [A1]: ¿Por qué decidió Einstein no incluir este «Apéndice» en la versión impresa del manuscrito «El fundamento de la teoría de la relatividad general»?	131
Pág. [A1]: Einstein utiliza una formulación hamiltoniana (lagrangiana) diferente de la de Hilbert y también diferente de la suya propia anterior	131
Pág. [A2]: ¿Por qué finalmente Einstein decidió publicar una versión modificada de este «Apéndice»? ¿Qué papel desempeñaron Lorentz y Hilbert?	133
§2. <i>Consecuencias formales de la imposición de la covariancia general</i>	
Pág. [A3]: ¿Se satisface el principio de conservación sin restricciones?	135
§3. <i>Propiedades de la función G de Hamilton</i>	
Pág. [A3]: 1916: un año de trabajo intenso y de nuevos comienzos	135
Pág. [A4]: Einstein y su papel de misionero de la ciencia	137
Pág. [A5]: La creatividad científica en medio de las tribulaciones personales y del desastre nacional	139
NOTAS A LAS PÁGINAS COMENTADAS	141
EPÍLOGO: EL DRAMA CONTINÚA . . .	149
<i>Cronología de la génesis de la relatividad general y de sus años de gestación</i>	159
<i>Físicos, matemáticos y filósofos relevantes para el pensamiento de Einstein</i>	165
<i>Lecturas complementarias</i>	179
<i>Traducción de «El fundamento de la teoría de la relatividad general»</i>	183
<i>Traducción de «El principio de Hamilton y la teoría de la relatividad general»</i>	227
<i>Índice onomástico y analítico</i>	233