



© Los significados del campo electromagnético y sus transformaciones históricas
2ª Edición
© Enrique Larrea Bellod

ISBN papel 978-84-684-0169-6
Editado por Bubok Publishing S.L.
www.enriquelarrea.es

A mi mujer Margarita,
y a mis hijas Esther y Natalia

Índice

Prólogo a la primera edición	XIX
Prólogo a la segunda edición	XXI
Preámbulo y agradecimientos	XXV
Introducción a la primera edición	XXXI
Introducción a la segunda edición	XXXVII

00. Definiciones y principios unificadores	001
Definiciones	001
Principios unificadores	002
01. Teorías históricas del campo electromagnético	007
Breve historia de los fundamentos del electromagnetismo	001
Interpretaciones históricas del campo electromagnético	027
02. Teorías geométricas de la naturaleza	037
Principios geométricos de la física	037
Espacio de la geometría euclídea	037

Rotación	038
Traslación espacial	038
Inversión y Paridad	039
Traslación temporal	040
Inversión temporal	040
Conjugación de la carga $\mathcal{C}$	041
Isometría 7-paramétrica de las 5 $\mathcal{E}$ -transformaciones euclídeas	041
Campos euclídeos	041
Transformaciones infinitesimales euclídeas	042
$\mathcal{G}$ –Transformaciones galileanas	047
Tiempo y simultaneidad galileana	049
Isometría 10-paramétrica de las 6 $\mathcal{G}$ -transformaciones galileanas y los principios de conservación	050
Principio de inercia de Galileo y mecánica de Newton	053
Principio de la covarianza galileana y simultaneidad en el tiempo	056
Principio de inercia de y mecánica de analítica de Leibniz	057
Transformaciones activas y pasivas en la dinámica	059
$\mathcal{L}$ -Transformaciones de Lorentz, $\mathcal{P}$ -Transformaciones de Poincaré y el principio de causalidad	059
Espacio de Minkowski	062
Transformaciones covariantes y principio de la covarianza	064
Transformaciones de Lorentz infinitesimales y sus generadores	066
Isometría 10-paramétrica de las $\mathcal{P}$ -transformaciones de Poincaré	069
Tensor de tensiones y de energía momento y principios de conservación	073

03. Teorías vectoriales del campo electromagnético	077
Concepto de campo	078
Ecuaciones vectoriales de Maxwell	079
Ley experimental de Coulomb	083
Ley experimental de Faraday	084
Ley experimental de Ampère	085
Ley experimental de la fuerza de Lorentz	089
Ley de ausencia de polos magnéticos	089
Potenciales electromagnéticos	091
Propiedades de los potenciales en condiciones estacionarias	097
Ecuaciones de Maxwell en medios materiales	101
Discontinuidades entre medios	106
Principios de conservación	109
Energía y fuerzas	114
Simetrías en las ecuaciones de Maxwell	117
Unicidad y complitud de las soluciones de las ecuaciones de Maxwell	118
Teorema de Helmholtz	
Componentes longitudinales y transversales de un campo vectorial	121
Teorema de Poisson	125
Potenciales dependientes del tiempo	125
Componentes longitudinales y transversales de las ecuaciones vectoriales de Maxwell	127
Componentes longitudinales y transversales del campo electromagnético en las relaciones de conservación	132
Ondas electromagnéticas	136
Radiación electromagnética. Antenas	138

04. Teorías espectrales del campo electromagnético	145
Espacios de representación	145
Espacio de Fourier	147
Operaciones entre componentes espectrales y promedios	150
Funciones de Green	151
Teorema Poisson dependiente del tiempo	156
Teorema Helmholtz dependiente del tiempo	157
Componentes T,L del espectro de frecuencias del campo E.M.	
Campos retardados y efecto electrocinético	160
Campo de radiación transversal	163
Componentes T,L del espectro Fourier del campo E.M.	165
Desarrollo en multipolos. Representación armónica	170
Desarrollo espectral de las funciones de Green	173
05. Teorías variacionales del campo electromagnético	175
Ecuaciones variacionales de Euler-Lagrange	178
Lagrangiana del campo electromagnético y la materia	182
Principio variacional de las Ecuaciones de Maxwell	185
Principios variacionales del tensor electromagnético	192
06. Teorías dinámicas del campo electromagnético	195
Relaciones estructurales de las ecuaciones cinemáticas de Maxwell	196
Restricciones estructurales de las ecuaciones dinámicas de Maxwell como consecuencia de las ecuaciones cinemáticas	197
Restricciones estructurales de las ecuaciones dinámicas de Maxwell como consecuencia de los principio de conservación	200
Relaciones estructurales internas de las ecuaciones de Maxwell	204

Los significados del campo electromagnético

Restricciones estructurales de la fuerza de Lorentz. y de las ecuaciones cinemáticas de Maxwell como consecuencia de los principios geométricos de la dinámica clásica	208
Relaciones estructurales y fuerza generalizada electromagnética de Helmholtz	210
Relaciones estructurales debidas a fuerzas generalizadas conservativas de Lipschitz	213
Relaciones estructurales matriciales de las ecuaciones de Maxwell	215
Relaciones estructurales por formas diferenciales externas	217
Representaciones duales de las ecuaciones cinemáticas	222

07. Teorías en sistemas móviles del campo electromagnético 225

Teoría fenomenológica del movimiento de materiales a bajas velocidades	226
Propagación de la luz en dieléctricos móviles	229
Efecto Fizeau	230
Teoría de Minkowsky del campo electromagnético	232
Ecuaciones de Maxwell en medios materiales estacionarios	239
Potenciales de Hertz y campos de radiación dipolar eléctrica y magnética	241
Tensor de energía impulso de Minkowski	245
Ecuaciones de Maxwell en medios materiales móviles	
Relaciones de constitución de Minkowski	248
Corrientes inducidas por materiales móviles y disipación de energía en sistemas abiertos	253
Ecuaciones del electromagnetismo a bajas velocidades	255
Campos aparentes efectivos en materiales móviles	256
Efecto de magnetización inducida	258
Efecto relativista de polarización inducida	259
Efecto relativista de la ley de inducción de Faraday	261
Representación convectiva de las ecuaciones de Maxwell	261

08. Teorías canónicas del campo electromagnético	263
Ecuaciones canónicas para densidades de campo	264
Corchetes de Poisson de campo y representación en ondas planas	266
Ecuaciones canónicas y corchetes de Poisson del campo electromagnético	270
Ecuaciones canónicas para una partícula en un campo electromagnético	278
Ecuaciones canónicas de Hamilton y de Lagrange para partículas discretas	282
Campos geodésicos. Ecuaciones de Hamilton-Jacobi	287
Ondas materiales	290
Representación del campo electromagnético en ondas planas	293
Corchetes de Poisson para el campo electromagnético	298
Ondas planas electromagnéticas	300
09. Teorías escalares del campo electromagnético	303
Componentes TM y TE. Guías de onda	304
Propagación de la luz en medios estacionarios	307
Dispersión de las ondas electromagnéticas	311
Rayos de luz y óptica geométrica. Eikonal óptica	314
Principios variacionales de Fermat y de Jacobi	318
Función característica de Hamilton	319
Principio de Huygens, Fresnel y Kirchhoff	320
Difracción en sistemas ópticos	322
Propagación en medios dieléctricos no homogéneos.	
Función de transmisión óptica	330
10. Teorías de los invariantes del campo electromagnético	333
Simetrías y principios de conservación en sistemas discretos	334
Teorema de Noether para sistemas discretos.	

Los significados del campo electromagnético

Simetrías, invarianzas y magnitudes conservativas	340
Teorema de Noether para campos continuos.	
Simetrías, invarianzas y magnitudes conservativas	343
Corrientes y cargas de Noether conservativas	348
Simetrías del tensor de energía momento del campo	352
Simetrías y principios de conservación del campo electromagnético	356
Conservación de la energía, momento, y momento angular en las interacciones electromagnéticas	363
Invariantes del campo electromagnético	366
Conjugación de la carga $\mathcal{C}$	367
Inversión temporal $\mathcal{T}$	367
Conservación de la carga	368

XIV

11. Teorías gauge del campo electromagnético 369

Simetrías, principios de conservación y campos gauge	367
Simetrías internas y principio gauge	372
Simetrías gauge como origen de las ecuaciones de Maxwell	374
Principio de la simetría local	376
Principio general de simetría	377
Simetrías gauge local y potenciales del campo electromagnético	378
Simetrías gauge de fase local de la mecánica cuántica relativista como origen de las ecuaciones de Maxwell	380
Interacción del campo electromagnético con la materia	381
Conservación local de la carga	383
Simetrías gauge de la mecánica cuántica clásica como origen de las ecuaciones de Maxwell	385
Principio de los observables	389

Simetrías gauge de la mecánica clásica como origen de las ecuaciones de Maxwell	
Principio de la invarianza de la forma de la lagrangiana	390
Interrelación de las simetrías de la mecánica clásica y cuántica en el origen de las ecuaciones de Maxwell. Integrales de camino de Feynman	395
Simetrías gauge de la formulación hamiltoniana como origen de las ecuaciones de Maxwell	397
El problema de la separación de energías en las interacciones electromagnéticas	400
Invarianza gauge de las componentes longitudinales y transversales del campo electromagnético	401
Energía potencial de Coulomb y componentes longitudinales y transversales de la energía de interacción cuasiestática no relativista	404
Gauge dipolar eléctrico	407
Transformaciones canónicas como origen de las ecuaciones de Maxwell	408
Gauge de Lorentz y de Coulomb	410
Gauge cinemático	412
Gauge de Hamilton y de radiación	413
Ecuaciones longitudinales y transversales sin libertad gauge del campo electromagnético	415
12. Teorías de la causalidad del campo electromagnético	419
Principio de la causalidad	420
¿Porqué la las ecuaciones de Maxwell no son causales?	420
Causalidad del campo electromagnético. Ecuaciones de Jefimenko	421
Conservación de la carga como origen de la causalidad del campo electromagnético	429
Potenciales retardados	434
Ecuaciones de Lienàrd-Wiecherd	437

Los significados del campo electromagnético

Postulado de los retos	438
Campo electromagnético generado por una carga con movimiento arbitrario	
Ecuaciones de Novozhilov y Yappa	440
Ecuaciones de Becker	441
Ecuaciones de Feynman	447
Ecuaciones de Panofsky y Philips	449
Radiación dipolar y cuadripolar eléctrica y magnética	450
Fuerzas y energías de interacción electromagnética entre cargas en movimiento	452

13. Teorías covariantes del campo electromagnético 457

Postulados de la relatividad restringida	458
Transformaciones de Lorentz y de Poincaré	459
Transformaciones covariantes y principio de la covarianza	467
Tiempo propio	469
Postulado de los relojes o de la cronometría	470
Geometría del espacio de Minkowski	471
Principio de la extensión covariante	473
Cinemática relativista	474
Dinámica relativista	477
Origen relativista de la fuerza de Lorentz	479
Equivalencia entre energía y momento	480
Postulado universal de la energía	482
Equivalencia entre momento angular y conservación del centro de energía	485
Ondas y energía	488
Covarianza del campo electromagnético	493
Acoplamiento mínimo	495
Covarianza del tensor de energía momento	498

Covarianza en medios materiales	503
Covarianza de las interacciones en sistemas disipativos abiertos	505
Covarianza en las interacciones de sistemas cerrados	508
Covarianza de las simetrías gauge de la mecánica cuántica como origen de las ecuaciones de Maxwell	510
Covarianza de las simetrías gauge de la mecánica clásica como origen de las ecuaciones de Maxwell	511
Covarianza del campo electromagnético generado de cargas en movimiento	512
Funciones de Green covariantes	513
Masa electromagnética	517
Modificaciones de las ecuaciones de Maxwell	523
14. Teorías de la radiación del campo electromagnético	525
Fluctuaciones de energía de la radiación electromagnética	526
Teoría fenomenológica de la radiación electromagnética	531
Teoría cuasiclásica de la radiación electromagnética	539
Efecto Faraday.	
Rotación del plano de polarización de la luz en un campo magnético	546
Teoría clásica de la dispersión electromagnética	548
Osciladores electromagnéticos del campo de radiación	551
Teoría cuántica clásica de la radiación electromagnética	554
Principios de incertidumbre en el campo electromagnético	568
Límite de validez de ecuaciones de Maxwell	570
Bases de la electrodinámica cuántica	572
15. Teorías métricas del campo electromagnético	575
Campo gravitatorio clásico	576
Potenciales escalares estáticos covariantes	577

Geodésicas y fuerzas inerciales	583
Movimiento relativista en un campo escalar débil	589
Precesión orbital en campo gravitatorio débil estático	592
Relatividad en el tiempo en un campo gravitatorio débil	594
Propagación de la luz en un campo gravitatorio débil estático	596
Principio de equivalencia	598
Teoría general de la relatividad. Ecuaciones de Einstein	598
Campo gravitatorio producido por la energía del campo electromagnético	604
Campo electromagnético en un campo gravitatorio	604
Principio general de la covarianza	606
Relaciones de transformación covariantes	607
Sistemas no inerciales en rotación	610
Ecuaciones de Maxwell en sistema no inerciales	621
Ecuaciones de Maxwell en un sistema en rotación. Efecto Wilson	626
Fotón masivo	631
Geometrización del campo electromagnético	633

16. Epílogo **635**

Diálogo apócrifo entre Einstein y Poincaré sobre la eterna distinción entre la matemática y la física	635
--	-----

17. Referencias consultadas **637**