

GUÍA DOCENTE

ELECTRODINÁMICA CLÁSICA

Grado en Física

Cuarto Curso

I.- DATOS INICIALES DE IDENTIFICACIÓN

Nombre de la asignatura:	ELECTRODINÁMICA CLÁSICA
Nombre de la materia:	AMPLIACIÓN DE FÍSICA
Carácter:	OBLIGATORIA
Titulación:	GRADUADO/A EN FÍSICA
Profesores:	Benito Gimeno y Alberto García

II.- INTRODUCCIÓN A LA ASIGNATURA

La Electrodinámica Clásica estudia la interacción de los campos electromagnéticos con las cargas en movimiento, así como la radiación de las mismas, representando una continuación de la materia de tercer curso Electromagnetismo y de la materia de segundo curso Mecánica. Para cursar esta asignatura es también fundamental el haber superado todas las asignaturas de Matemáticas. El contenido de la Electrodinámica es fundamental para cursar otras asignaturas relacionadas con la física de partículas, astrofísica, física atómica y mecánica cuántica.

La asignatura tiene 4,5 créditos ECTS asignados, y su docencia está prevista en el primer cuatrimestre de cuarto curso.

La asignatura comienza con la definición de los potenciales escalar y vector para el caso de variación temporal arbitraria, y las transformaciones de contraste o *gauge*, detallando los contrastes de Coulomb y Lorenz. La solución de las ecuaciones diferenciales de los potenciales bajo la transformación de Lorentz nos permiten encontrar los potenciales retardados y los campos de radiación (ecuaciones de Jefimenko). Finalmente estudiaremos el desarrollo multipolar de una distribución de cargas y corrientes en el caso armónico, obteniendo los términos dipolar eléctrico, dipolar magnético y cuadrupolar eléctrico, así como dando una breve introducción a la teoría de antenas.

Seguiremos con el estudio de las transformaciones relativistas de los campos electromagnéticos, comenzando por situaciones sencillas como la carga puntual y otras distribuciones electrostáticas (condensador, por ejemplo). De esta forma es posible explicar – en ciertos casos particulares - el magnetismo como un fenómeno relativista. Esto debe ser descrito en el seno de una formulación covariante para que sea coherente con la teoría de la relatividad especial. Se formularán las ecuaciones de Maxwell previa definición del tensor campo electromagnético.

A continuación la Electrodinámica Clásica estudiará el movimiento de partículas cargadas en el seno de un campo electromagnético. Comenzando por la deducción del lagrangiano de una carga relativista en un campo electromagnético; estudiaremos algunos casos de movimiento de cargas en el seno de campos eléctricos y magnéticos: campo eléctrico estático, campo magnético estático (ciclotrón y lente magnética), campos eléctrico y magnético estáticos (magnetrón), y campo magnético dependiente del tiempo (betatrón). La formulación del lagrangiano del campo electromagnético y del tensor energía-momento y sus propiedades terminarán este apartado.

Finalmente se estudiará el fenómeno de la radiación electromagnética de cargas puntuales. Comenzando por la obtención de los potenciales de una carga en movimiento (potenciales de Liénard-Wiechert), se obtendrán las expresiones de los campos electromagnéticos radiados por una

carga puntual en movimiento arbitrario. Seguidamente estudiaremos la radiación electromagnética de una carga que se mueve lentamente y relativistamente, encontrando las expresiones de la fórmula de Larmor para las dos situaciones. Como ejemplos de aplicación abordaremos el análisis de un acelerador lineal, un acelerador circular (radiación sincrotrón), el fenómeno de la radiación de frenado o *bremsstrahlung*, la radiación Cherenkov y la fuerza de Abraham-Lorentz.

III.- VOLUMEN DE TRABAJO

TIPO DE ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	HORAS
Asistencia a clases teóricas	Magistrales teórico-prácticas: 2 horas/semana x 15 semanas	30 h
Asistencia a clases de prácticas	Clases de problemas participativas 0,5 horas/semana x 15 semanas	7.5 h
Sesiones de tutorías grupales o trabajos tutelados	Clases prácticas en grupos reducidos para que el estudiante haga problemas, ejercicios, los exponga, los discuta, etc. 0.5 horas/semana x 15 semanas	7.5 h
Preparación de trabajos Horas de trabajo del estudiante sometidas a evaluación	Resolución de tareas y ejercicios propuestos para hacer en casa 1.3 h/sesión tutelada x 1 h/sem. X 7.5 semanas	10 h
Estudio-preparación contenidos teórico-prácticos	Teoría: $1.2 \times 2 \text{ h/sem} \times 15 \text{ semanas} = 36 \text{ h}$ Problemas: $1.2 \times 1 \text{ h/sem} \times 7.5 \text{ semanas} = 9 \text{ h}$	45 h
Estudio para preparación de exámenes	8 h/examen x 1 examen	8 h
Realización de exámenes	3 h/examen x 1 examen	3 h
Actividades complementarias	Conferencia del ciclo de la Facultad de Física, asistencia y resumen argumentado	1.5 h
TOTAL VOLUMEN DE TRABAJO		112.5 h

IV.- OBJETIVOS GENERALES

- Presentar una visión amplia y unitaria de la interacción entre los campos electromagnéticos y las cargas en el esquema de una teoría de campo formulada en la formulación covariante.
- Lograr que el alumno adquiera una terminología básica relativa a la Electrodinámica Clásica, que sepa expresarse con la precisión requerida en el ámbito de la Ciencia, formulando ideas, conceptos y sus relaciones con los demás campos de la Física, siendo capaz de razonar en términos científicos.
- Dotar de la capacidad operativa para aplicar y relacionar leyes y conceptos de la Electrodinámica Clásica, así como dominar los distintos procedimientos para la resolución de problemas, incluyendo las habilidades matemáticas necesarias.
- Hacer que el alumno sea capaz de estudiar y planificar sus actividades de cara al aprendizaje, ya sea individualmente o en grupo, buscando, seleccionando y sintetizando información en las distintas fuentes bibliográficas.

V.- CONTENIDOS MÍNIMOS

Tema 1: Radiación electromagnética de fuentes extensas

Este primer tema del curso pretende ser un tema de transición entre la materia Electromagnetismo de tercer curso y la Electrodinámica Clásica, y podría estar ubicado en tercer curso. Comenzaremos por formular las ecuaciones de Maxwell en una región con cargas y corrientes, y generalizaremos la definición de los potenciales escalar eléctrico y vector magnético al caso de variación temporal arbitraria. Seguidamente estudiaremos las transformaciones de contraste o *gauge*, detallando los contrastes de Coulomb y Lorenz con todas sus propiedades. Seguidamente resolveremos la ecuación diferencial de ondas con fuentes bajo el contraste de Lorenz, encontrando las expresiones de los potenciales retardados, cuya derivación nos permitirá encontrar los campos eléctrico y magnético de radiación (ecuaciones de Jefimenko). Finalmente estudiaremos el desarrollo multipolar de una distribución de cargas y corrientes en el caso armónico, obteniendo los términos dipolar eléctrico, dipolar magnético y cuadrupolar eléctrico, así como dando una breve introducción a la teoría de antenas.

Tema 2: Formulación covariante del campo electromagnético

Este segundo tema está orientado al estudio de las transformaciones relativistas aplicadas a los campos electromagnéticos. Después de recordar las transformaciones de Lorentz (y la cinemática y dinámica relativistas), comenzaremos por aplicarlas a situaciones sencillas como la carga puntual y otras distribuciones electrostáticas (condensador, hilo de carga, etc.). De esta forma es posible explicar el magnetismo como un fenómeno relativista. Las transformaciones de los campos nos permiten definir de forma natural el tensor campo electromagnético, lo que debe hacerse en el seno de una formulación covariante. Se formularán las ecuaciones de Maxwell en notación covariante, junto con los potenciales escalar y vector, explicando todas las propiedades y haciendo cuestiones y problemas.

Tema 3: Dinámica de partículas relativistas en campos electromagnéticos

En el tercer tema la Electrodinámica estudiará el movimiento de partículas cargadas en el seno de un campo electromagnético. Comenzando por la deducción del lagrangiano y del hamiltoniano de una carga relativista en un campo electromagnético, estudiaremos algunos casos particulares de movimiento de cargas en el seno de campos eléctricos y magnéticos, destacando las aplicaciones más relevantes: campo eléctrico estático, campo magnético estático (ciclotrón y lente magnética), campos eléctrico y magnético estáticos (magnetrón), y campo magnético dependiente del tiempo (betatrón). La formulación del lagrangiano del campo electromagnético y del tensor energía-

momento y sus propiedades terminarán este tema, junto con la realización de cuestiones y problemas.

Tema 4: Radiación electromagnética emitida por partículas cargadas

En el último tema se estudiará el fenómeno de la radiación electromagnética de cargas puntuales. Comenzando por la obtención de los potenciales de una carga en movimiento (potenciales de Liénard-Wiechert), se obtendrán las expresiones de los campos electromagnéticos radiados por una carga puntual en movimiento arbitrario. Seguidamente estudiaremos la radiación electromagnética de una carga que se mueve lentamente y relativistamente, encontrando las expresiones de la fórmula de Larmor para las dos situaciones. Como ejemplos de aplicación abordaremos el análisis de un acelerador lineal, un acelerador circular (radiación sincrotrón), el fenómeno de la radiación de frenado o *bremsstrahlung*, la radiación Cherenkov y la fuerza de Abraham-Lorentz. El tema terminará con una colección de cuestiones y problemas.

VI.- DESTREZAS QUE ADQUIRIR

- Desarrollar la intuición en el estudio y desarrollo de la Física.
- Manejar esquemas conceptuales básicos que surgen en la Electrodinámica, entendida como una asignatura donde se combinan las materias Mecánica y Electromagnetismo dentro de un entorno relativista: contratos de Coulomb y Lorenz, potenciales retardados, campos de radiación, desarrollo multipolar, formulación covariante, tensor campo electromagnético, movimiento de una partícula en un campo electromagnético, lagrangiano relativista de interacción, tensor energía-momento, potenciales de Liénard-Wiechert, fórmula de Larmor, radiación sincrotrón, radiación de frenado o *bremsstrahlung*, radiación de Cherenkov, fuerza de Abraham-Lorentz.
- Entender el fenómeno de la radiación electromagnética desde dos puntos de vista diferentes: la radiación de distribuciones continuas de cargas y corrientes (antenas), y la radiación de partículas aceleradas. Comprender que ambas visiones responden a la misma realidad física.
- Estudiar el magnetismo como un fenómeno relativista. Comprender las transformaciones de los campos electromagnéticos en el contexto de la relatividad especial y dominar el uso de la formulación covariante.
- Estudiar el movimiento de una partícula relativista cargada en el seno de un campo electromagnético con formulación lagrangiana, analizando aplicaciones prácticas como el betatrón, el ciclotrón, las lentes magnéticas, etc.
- Estudiar fenómenos asociados con la radiación de una carga acelerada. Resolver casos particulares de interés práctico para el mundo de la física de aceleradores, astrofísica, etc.

VII.- HABILIDADES SOCIALES O TRANSVERSALES

- Desarrollar la capacidad de identificar problemas e idear estrategias para su resolución.
- Desarrollar la capacidad de planificar y organizar el propio aprendizaje, basándose en el trabajo individual a partir de la bibliografía y otras fuentes de información.
- Evaluar la importancia relativa de las diferentes causas que intervienen en un fenómeno físico.
- Identificar los elementos esenciales de una situación compleja, realizar las aproximaciones necesarias para construir modelos simplificados que lo describan y poder así entender su comportamiento en otras situaciones.
- Ser capaz de efectuar una puesta al día de la información existente sobre un problema concreto, ordenarla y analizarla críticamente.
- Fomentar la capacidad para trabajar en grupo.

VIII.- TEMARIO Y PLANIFICACIÓN TEMPORAL

La planificación que se muestra a continuación es lógicamente orientativa ya que, dependiendo del ritmo de adquisición de competencias de los alumnos y del grado de madurez de sus conocimientos previos, puede resultar conveniente (o necesario) reajustar el cronograma siguiente.

Tema 1: Radiación electromagnética de fuentes extensas

- 1.1 Introducción
- 1.2 Los potenciales electromagnéticos
 - 1.2.1 Definición general de potenciales electromagnéticos
 - 1.2.2 Las transformaciones de contraste
 - 1.2.3 Ecuaciones diferenciales de los potenciales electromagnéticos
 - 1.2.4 El contraste de Coulomb y el contraste de Lorenz
- 1.3 Los potenciales retardados
- 1.4 Los campos de radiación: las ecuaciones de Jefimenko
- 1.5 Radiación de distribuciones continuas de carga para el caso armónico
 - 1.5.1 Formulación del problema
 - 1.5.2 Desarrollo multipolar de los potenciales retardados: dipolo eléctrico, dipolo magnético, cuadrupolo eléctrico
 - 1.5.3 Antenas de hilo

Tema 2: Formulación covariante del campo electromagnético

- 2.1 Introducción
- 2.2 Las transformaciones de Lorentz. Cinemática y dinámica relativistas
- 2.3 Las transformaciones de los campos electromagnéticos
- 2.4 El tensor campo electromagnético. Formulación covariante y potenciales relativistas

Tema 3: Dinámica de partículas relativistas en campos electromagnéticos

- 3.1 Introducción
- 3.2 Lagrangiano y Hamiltoniano de una partícula relativista en un campo electromagnético
- 3.3 Movimiento de una partícula relativista en un campo electromagnético
 - 3.3.1 Campo eléctrico estático
 - 3.3.2 Campo magnético estático: ciclotrón y lente magnética
 - 3.3.3 Campo eléctrico y magnético estáticos: magnetrón
 - 3.3.4 Campo magnético dependiente del tiempo: betatrón
- 3.4 Lagrangiano del campo electromagnético
- 3.5 El tensor energía-momento

Tema 4: Radiación electromagnética emitida por partículas cargadas

- 4.1 Introducción
- 4.2 Los potenciales de Liénard-Wiechert
- 4.3 Los campos radiados por una carga en movimiento
- 4.4 Radiación emitida por cargas aceleradas: la fórmula de Larmor
 - 4.4.1 Acelerador lineal
 - 4.4.2 Acelerador circular: radiación sincrotrón
- 4.5 La radiación de frenado o *bremsstrahlung*
- 4.6 La radiación Cherenkov
- 4.7 La fuerza de Abraham-Lorentz
 - 4.7.1 Caso no relativista
 - 4.7.2 Caso relativista

La planificación temporal de este temario se resume a continuación:

Tema 1	Radiación electromagnética de fuentes extensas	3 semanas
Tema 2	Formulación covariante del campo electromagnético	4 semanas
Tema 3	Dinámica de partículas relativistas en campos electromagnéticos	4 semanas
Tema 4	Radiación electromagnética emitida por partículas cargadas	4 semanas

IX.- BIBLIOGRAFIA DE REFERENCIA

(a) Bibliografía básica

- Classical Electrodynamics, J. D. Jackson, Third edition, John Wiley & Sons, Inc., 1998
- Classical Electromagnetic theory, J. Vanderlinde, John Wiley & Sons, Inc., 1993
- The Classical Theory of Fields, 4th revised English edition, Course of Theoretical Physics vol. 2, L. D. Landau and E. M. Lifshitz, Elsevier, 2005
- Electrodynamics of continuous media, 2nd edition, Landau and Lifshitz Course of Theoretical Physics vol. 8, 1999
- Introduction to Electrodynamics, D. J. Griffiths, Ed. Pearson, Third Edition, 2008
- Interacción electromagnética. Teoría clásica, J. Costa Quintana, F. López Aguilar, Ed. Reverté, 2007

Con formato: Numeración y viñetas

(b) Bibliografía complementaria

- Problemas de Electrodinámica Clásica, J. I. Íñiguez de la Torre, A. García Flores, J. M. Muñoz Muñoz, C. De Francisco Garrido, Ed. Universidad de Salamanca, 2002

X.- CONOCIMIENTOS PREVIOS

Para cursar esta asignatura es conveniente que los estudiantes hayan cursado previamente las siguientes materias: Física General, Mecánica, Electromagnetismo, Matemáticas, Métodos Matemáticos.

XI.- METODOLOGÍA

La asignatura constará de tres tipos de clases con metodología diferenciada:

(a) Clases teóricas (2 horas/semana): En estas clases se impartirán los contenidos teóricos básicos de la asignatura, así como ejemplos prácticos y cuestiones que mejor los ilustren. Para incrementar la relación presentación/asimilación se podrán utilizar herramientas gráficas de presentación de contenidos, a través de transparencias de PowerPoint, incluyendo gráficas, dibujos, videos y animaciones, en combinación con discusiones/presentaciones en pizarra. Dichas transparencias se pondrán a disposición de los estudiantes directamente en papel, en la página web el profesor o en el aula virtual.

(b) Clases prácticas de pizarra (1 hora/semana): En estas clases se impartirán las clases de problemas. Para esta parte se proporcionará a los estudiantes (a principio de curso) un boletín

completo con problemas de todos los temas. El profesor resolverá en la pizarra algunos problemas tipo por semana.

XII.- EVALUACIÓN DEL APRENDIZAJE

1) Exámenes escritos: una parte evaluará la comprensión de los aspectos teórico-conceptuales y el formalismo de la materia, tanto mediante preguntas teóricas como a través de cuestiones conceptuales y numéricas o casos particulares sencillos. Otra parte valorará la capacidad de aplicación del formalismo, mediante la resolución de problemas, así como la capacidad crítica respecto a los resultados obtenidos. En ambas partes se valorarán una correcta argumentación y una adecuada justificación.

2) Evaluación continua: valoración de trabajos y problemas presentados por los estudiantes, cuestiones propuestas y discutidas en el aula, presentación oral de problemas resueltos o cualquier otro método que suponga una interacción entre docentes y estudiantes.