

Módulo 1: Introducción a la Teoría Cuántica de Campos

· Módulo obligatorio en la especialidad de Física de Partículas, de 10 créditos ECTS, de carácter presencial, y duración semestral, que se desarrollará en el primer semestre.

· Este módulo tiene como finalidad dar al estudiante los conocimientos básicos necesarios para tratar los problemas más simples de la Electrodinámica Cuántica (QED). En este módulo se sentarán las bases de la formulación de la Teoría Cuántica de Campos, que es el lenguaje matemático con el que actualmente se entienden las interacciones fundamentales de la naturaleza contenidas en el Modelo Estándar, exceptuando la gravedad.

· El detalle del programa del módulo (que no se subdivide en asignaturas o materias) es el siguiente:

1. El campo de Klein-Gordon (KG).
 - 1.1 Elementos de teoría clásica de campos (Lagrangiano, Hamiltoniano, Teorema de Noether)
 - 1.2 El campo de KG como osciladores armónicos
 - 1.3 El campo de KG en el espacio-tiempo.
2. El campo de Dirac.
 - 2.1 La ecuación de Dirac
 - 2.2 Soluciones de partículas libres de la ecuación de Dirac
 - 2.3 Las matrices de Dirac
 - 2.4 Cuantización del campo de Dirac
 - 2.5 Simetrías discretas de la Teoría de Dirac: Paridad, Conjugación de Carga.
3. Campos en Interacción y diagramas de Feynman.
 - 3.1 Teoría de perturbaciones
 - 3.2 Teorema de Wick
 - 3.3 Diagramas de Feynman
 - 3.4 Secciones eficaces y la matriz S
 - 3.5 Reglas de Feynman para fermiones.
 - 3.6 Reglas de Feynman de QED.
4. Procesos elementales de QED
 - 4.1 $e^+e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$ (introducción y helicidad)
 - 4.2 Simetría de cruzamiento
 - 4.3 Colisión Compton
5. Correcciones Radiativas: Introducción
 - 5.1 Bremsstrahlung
 - 5.2 La función electrón-vértice: estructura, cálculo y divergencias infrarrojas.
6. Correcciones Radiativas: Desarrollos formales
 - 6.1 La autoenergía del electrón
 - 6.2 Fórmula de reducción LSZ
 - 6.3 El teorema óptico
 - 6.4 Las identidades de Ward-Takahashi
 - 6.5 Renormalización de la carga eléctrica
 - 6.6 Regularización dimensional.

· La evaluación se realizara principalmente a través de un examen escrito, pero los alumnos deberán también realizar trabajo personal encaminado a la resolución de problemas y ejercicios.

· Bibliografía

M. E. Peskin y D. V. Schroeder, *An Introduction to Quantum Field Theory*, Perseus Books, 1995

F. Halzen y A. D. Martin, *Quarks and Leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics*, John Wiley & Sons, 1984

Módulo 2: Teoría Cuántica de Campos Avanzada

· Módulo optativo de 10 créditos ECTS, de carácter presencial, y duración semestral, que se desarrollará en el segundo semestre.

· Este módulo es la continuación del correspondiente a la Introducción a la Teoría Cuántica de Campos del primer semestre. Sus contenidos profundizan en los conceptos introductorios y tienen un carácter marcadamente teórico y más especializado. Por lo tanto se considerará que es prerrequisito que el alumno haya superado el módulo de Introducción a la Teoría Cuántica de Campos para poder cursar éste.

· El detalle del programa del módulo (que no se subdivide en asignaturas o materias) es el siguiente:

I. Integrales de camino

1. Integrales de camino en Mecánica Cuántica.
2. Integrales de camino en Teoría Cuántica de Campos: bosones y fermiones.
3. Funciones de correlación, reglas de Feynman, derivadas funcionales y el funcional generador.
4. Cuantización del campo electromagnético con integrales de camino.
5. Simetrías. Identidades de Ward-Takahashi.

II. Renormalización

1. Divergencias ultravioletas.
2. Teoría de perturbaciones renormalizada.
3. Renormalización de QED.

III Simetría y Renormalización

1. Rotura Espontánea de una simetría. El modelo sigma lineal y no lineal.
2. Teorema de Goldstone.
3. La acción efectiva.
4. Cuantización de teorías gauge con rotura espontánea.
5. La anomalía quiral.

IV El grupo de renormalización

1. Método de Wilson del grupo de renormalización.
2. Ecuación de Callan-Symanzik. Evolución de las constantes de acoplo y masas.
3. Renormalización de operadores compuestos. Expansión en producto de operadores.

V Cuantización de Teorías No-Abelianas

1. Interacciones en teorías no-abelianas. Reglas de Feynman.
2. Método de Fadeev-Popov. Fantasmas y unitariedad. Simetría BRST e identidades de Slavnov-Taylor.
3. Teorías no abelianas a un bucle. La función beta.
4. QCD y libertad asintótica. Aplicaciones.

· La evaluación se realizará mediante un examen escrito, complementado por trabajo individual del alumno consistente en resolver problemas y ejercicios.

· Bibliografía

M. E. Peskin y D. V. Schroeder, *An Introduction to Quantum Field Theory*, Perseus Books, 1995

T.-P. Cheng y L.-F. Li, *Gauge Theory of Elementary Particle Physics*, Oxford University Press, 1984

S. Weinberg, *The Quantum Theory of Fields, Vol. I: Foundations, and Vol. II: Modern Applications*, Cambridge Uni. Press, 2000

Módulo 3: Fundamentos del Modelo Estándar

· Módulo optativo de 10 créditos ECTS, de carácter presencial, y duración semestral, que se desarrollará en el primer semestre.

· El objetivo del programa es presentar al alumno una introducción completa a las teorías gauge no-abelianas, las cuales constituyen el fundamento teórico del Modelo Estándar de las interacciones fundamentales. Esta introducción debe proporcionarle los conocimientos necesarios y suficientes que le sirvan de base para iniciar una carrera investigadora en el ámbito de la Física de Partículas Elementales, la Astrofísica o la Cosmología.

· El detalle del programa del módulo (que no se subdivide en asignaturas o materias) es el siguiente:

1) Teorías gauge no-abelianas

Invariancia gauge
Lagrangiano de Yang-Mills
Teoría de grupos: recordatorio
Interacciones de bosones gauge no-abelianos
Libertad asintótica: explicación cualitativa

2) Cromodinámica Cuántica

El modelo de partones de la estructura hadrónica
De los quarks a la Cromodinámica Cuántica
Aniquilación e^+e^- en hadrones
Dispersión profundamente inelástica
Procesos de dispersión fuerte en colisiones hadrónicas
Evolución partónica
Mediciones de α_s

3) Teorías gauge con rotura espontánea de la simetría

Mecanismo de Higgs
Rotura espontánea de la simetría
Teorema de Goldstone
Teoría de Glashow-Weinberg-Salam de las interacciones débiles
Simetrías de la teoría de quarks y leptones
Fenomenología del bosón de Higgs y de los bosones gauge W y Z

· La evaluación de basará en la resolución de problemas a lo largo del curso.

· Bibliografía

- T.-P. Cheng y L.-F. Li, *Gauge Theory of Elementary Particle Physics*, Oxford University Press, 1984
J. F. Donoghue, E. Golowich y B. R. Holstein, *Dynamics of the Standard Model*, Cambridge University Press, 1994
H. Georgi, *Weak Interactions and Modern Particle Theory*, Dover Publications, 2009
F. Halzen y A. D. Martin, *Quarks and Leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics*, John Wiley & Sons, 1984
M. E. Peskin y D. V. Schroeder, *An Introduction to Quantum Field Theory*, Perseus Books, 1995
C. Quigg, *Gauge Theories of the Strong, Weak, and Electromagnetic Interactions*, Perseus Books, 1999

Módulo 4: Fenomenología del Modelo Estándar

· Módulo optativo de 10 créditos ECTS, de carácter presencial, y duración semestral, que se desarrollará en el segundo semestre.

· El módulo tiene como finalidad dar al alumno los conocimientos necesarios que le permitan entender el estado del conocimiento humano de la estructura más íntima de la materia y sus interacciones en el Universo desde el punto de vista más fenomenológico. El programa además pondrá especial énfasis en aquellos aspectos más relevantes para una mejor preparación del estudiante de cara a tareas de investigación en la nueva generación de experimentos.

· Como requisito previo, el estudiante debe haber superado con anterioridad el módulo Introducción a la Teoría Cuántica de Campos. Se supone un conocimiento previo de Mecánica Cuántica y Mecánica Clásica Relativista, así como de Física Nuclear y Partículas elemental.

· El detalle del programa del módulo (que no se subdivide en asignaturas o materias) es el siguiente:

- Desintegraciones y secciones eficaces de dispersión, resonancias
- Interacciones electrón-positrón y electrón-protón (LEP & HERA)
- Interacciones débiles: Mecanismo GIM, la matriz CKM
- Violación de CP y oscilaciones
- Física de neutrinos
- Fenomenología de las interacciones protón-protón (incluye Tevatron)
- El Modelo Estándar en el LHC (QCD-jets, DY, top, dibosons, SM Higgs)
- Nueva Física en el LHC (Z' , SUSY, MSSM Higgs, Extra Dimensions, etc.)
- Conexión Cosmológica (incluye búsqueda de materia oscura y SUSY)
- Introducción a programas Monte Carlo (*Event Generators*)
- Introducción a la toma y análisis de datos en física de altas energía (5 h) (lecciones prácticas en alguno de los grupos de física de partículas de IFAE.

· La evaluación de los conocimientos del alumno se llevará a cabo mayoritariamente mediante un examen escrito. Además, se dará al alumno la posibilidad de obtener una fracción de la nota mediante trabajos de investigación en alguno de los grupos de investigación en Física de Partículas del IFAE. Las calificaciones serán las que permite la legislación vigente.

· Bibliografía

Francis Halzen & Alan D. Martin, *Quarks and Leptons: An introductory Course in Modern Particle Physics*, John Wiley & Sons, 1984

Donald H. Perkins, *Introduction to High Energy Physics (4th Edition)*, Cambridge University Press, 2000.

R. K. Ellis, W. J. Stirling & B. R. Webber, *QCD and Collider Physics*, Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology, 1996.

Módulo 5: Técnicas Experimentales en Física de Partículas

· Módulo optativo de 10 créditos ECTS, de carácter presencial, y duración semestral, que se desarrollará en el segundo semestre.

· Por la parte teórica, los objetivos del módulo son dos, interrelacionados entre sí:
a) proporcionar al estudiante unos conocimientos básicos sobre los detectores modernos de partículas, sea en un contexto "clásico" de altas energías (aceleradores y colisionadores) que en los campos de experimentos de partículas sin aceleradores (procesos raros de física más allá del Modelo Estándar) que se han hecho importantes en la última década.
b) introducir los conceptos que determinan la arquitectura de los aparatos experimentales, a partir de los procesos físicos que se quieren observar, para aplicarlos al diseño de varias clases de experimentos.
De este modo, el estudiante podrá entender tanto el funcionamiento cuanto el proceso intelectual que produce el diseño de los complejos experimentos de Física de Partículas.

Por la parte práctica, se pretende desarrollar una serie de experimentos que sirvan como ejemplo tanto del proceso intelectual como de las técnicas que se utilizan en Física de Partículas.

· Se suponen unos conocimientos básicos de Mecánica Cuántica y de Mecánica Relativista, así como conocimientos fenomenológicos de Física de partículas, al nivel de los primeros capítulos de textos introductorios como los de Griffiths o de Perkins.

· El detalle del programa del módulo (que no se subdivide en asignaturas o materias) es el siguiente:

1. Interacciones de partículas con la materia

1.0 Consideraciones generales

1.1 Ionización y excitación atómica

1.2 Difusión múltiple a pequeños ángulos

1.3 Interacciones de fotones con la materia

1.4 Cascadas electromagnéticas

1.5 Interacciones de muones de alta energía

1.6 Radiación Cherenkov y radiación de transición

2. Revisión de circuitos electrónicos y otros aspectos técnicos

2.1 Circuitos con elementos reactivos

2.2 Propagación de señales eléctricas en cables

3. Técnicas de detección

3.0 Aspectos generales

3.1 Detectores de fotones

3.2 Centelleadores

3.3 Detectores de radiación Cherenkov

3.4 Detectores de radiación de transición

3.5 Cámaras de hilos

3.6 Microdetectores gaseosos

3.7 Cámaras de placas resistivas

3.8 Cámaras de proyección temporal

3.9 Detectores de semiconductores

4. Diseño de aparatos experimentales

4.0 El contexto : experimentos con blanco fijo, en el centro de masa, o sin haces

- 4.1 Medidas de posición, tiempo, cuádrimomentos; identificación de partículas
- 4.2 Detectores de trazas y de vértice
- 4.3 Calorímetros
- 4.4 Espectrómetros de muones
- 4.5 Haces en blanco fijo: diseño de experimentos
- 4.6 Haces en colisión: diseño de experimentos
- 4.7 Experimentos con neutrinos
- 4.8 Búsqueda de la desintegración del protón
- 4.9 Otras búsquedas: materia oscura, desintegración doble beta

5. Práctica experimental directa

Se prepararán unos experimentos (desintegración de muones cósmicos, difusión Compton, contador proporcional) en los cuales el estudiante utilizando los conocimientos proporcionados anteriormente podrá prever los resultados y verificar sus expectativas.

· La evaluación de los conocimientos del alumno se llevará a cabo mediante un examen escrito y un ensayo sobre un tema por concordar con cada alumno. Una parte imprescindible de la asignatura son las prácticas, como se ejemplifica más arriba.

· Bibliografía

The Particle Data Group: W.M.Yao *et al.*, *Review of Particle Physics*, Journal of Physics **G 33**, 1 (2006) and <http://pdg.lbl.gov>
William R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-to Approach*, Second revised edition, Springer-Verlag.

y ocasionalmente:

L. Rossi *et al.*, *Pixel Detectors: From Fundamentals to Applications*, Springer.
W. Blum, L. Rolandi, *particle detection with drift chambers*, Springer-Verlag, 1994.

Se proporcionará una lista con material adicional proveniente de Proceedings en Workshops y artículos en revistas.

Módulo 6: La Frontera de la Física de Partículas

· Módulo optativo de 10 créditos ECTS, de carácter presencial, y duración semestral, que se desarrollará en el tercer semestre.

· Este módulo es de nivel claramente avanzado y, en algunos casos, hasta especulativo. En él se tratarán temas importantes que son la puerta de entrada a la investigación actual en Física de Partículas. Por lo tanto, es de esperar que sus contenidos puedan ir evolucionando mas deprisa que los de otros módulos, adaptándose a los nuevos avances que se vayan produciendo.

· Se realizará en el segundo semestre, y se requiere que los alumnos hayan cursado satisfactoriamente los módulos del Modelo Estándar tanto de fundamentos como de fenomenología. También se requiere la Introducción a la Teoría Cuántica de Campos y se aconseja la Teoría Cuántica de Campos Avanzada.

· El detalle del programa del módulo (que no se subdivide en asignaturas o materias) es el siguiente:

1. Teorías Efectivas.

El Lagrangiano de Fermi.
Teoría efectiva de quarks pesados.
Teoría quiral.

2. Física de Partículas Elementales más allá del Modelo Estándar

Gran unificación.
Supersimetría y Supergravedad.
Dimensiones extras.
Introducción a las Teorías de Cuerdas.

3. Física de Astropartículas y Cosmología. Inflación.

· La evaluación de realizará mediante un examen escrito y la resolución de problemas y ejercicios a lo largo del curso.

· Bibliografía

T.-P. Cheng y L.-F. Li, *Gauge Theory of Elementary Particle Physics*, Oxford University Press, 1984

J. F. Donoghue, E. Golowich y B. R. Holstein, *Dynamics of the Standard Model*, Cambridge University Press, 1994

H. Georgi, *Weak Interactions and Modern Particle Theory*, Dover Publications, 2009

S. Weinberg, *The Quantum Theory of Fields, Vol. III: Supersymmetry*, Cambridge Uni. Press, 2000

Módulo 7: Estadística y Análisis de Datos

- Módulo obligatorio de 10 créditos ECTS, de carácter presencial, y duración semestral, que se desarrollará en el primer semestre.

- El objetivo principal es que el alumno conozca y domine los conceptos básicos de la probabilidad, la estadística y los métodos numéricos, de utilidad en el análisis de datos experimentales, y en especial aquéllos que son de relevancia en la Física de Altas Energías, la Física de Astropartículas, la Astronomía y la Cosmología. El programa persigue una comprensión tanto a nivel formal/teórico, como su aplicación práctica. Por ello, el módulo se divide en tres partes. En la primera de ellas se expondrán los conceptos teóricos básicos de la probabilidad y la estadística. En un segundo, se estudiarán las aplicaciones prácticas más comunes en el análisis y la interpretación de datos experimentales. En la tercera, se realizarán ejercicios prácticos tutelado, extraídos de situaciones experimentales reales. Al finalizar el módulo, el alumno debería tener la capacidad de, dada una serie de datos experimentales, obtener la información científica relevante mediante su análisis e interpretación.

- El detalle del programa del módulo (que no se subdivide en asignaturas o materias) es el siguiente:

1) Probabilidad

- Axiomas de probabilidad
- Teorema de Bayes
- Variables aleatorias
- Funciones de densidad de probabilidad
- Distribuciones de probabilidad comunes
- Función característica

2) Estadística

- Estimación de parámetros
- Matriz de error
- Tests de hipótesis
- Intervalos de confianza
- Errores sistemáticos
- Técnicas Monte Carlo
- Análisis multivariados (redes neuronales, árboles de decisión...)
- Series temporales

3) Sesiones de ejercicios con ordenador

- Sistema de evaluación: prueba escrita + resolución de problema(s) durante la duración del curso, en parejas o pequeños grupos.

- Bibliografía

Louis Lyons, *Statistics for Particle and Nuclear Physicists* Cambridge University Press, 1986, ISBN 0521379342

Glen Cowan, *Statistical Data Analysis*, Oxford Univ. Press, 1998, ISBN 0198501552

B. P. Roe, *Probability and Statistics in Experimental Physics*, Springer, 1992, ISBN 0387978496

A.G. Frodesen, et al., *Probability and statistics in particle physics*, Columbia University Press, 1979, ISBN 8200019063

Frederick James, *Statistical Methods in Experimental Physics*, 2nd ed, World Scientific, 2007, ISBN 9789812705273

D. Sivia and J. Skilling, *Data Analysis, A Bayesian Tutorial*, 2nd ed.,
Oxford University Press, 2006, ISBN 9780198568322
A. Gelman, *Bayesian Data Analysis*, CRC Press, 1995, ISBN 0412039915
R. J. Barlow, *Statistics*, J. Wiley, 1989, ISBN 0471922951

Módulo 8: Astrofísica estelar y planetaria

· Módulo obligatorio para la especialidad de Astrofísica y Cosmología, de 10 créditos ECTS, de carácter presencial y duración semestral, que se desarrollará en el primer semestre.

· El módulo tiene como finalidad impartir los conocimientos básicos en dos de las materias básicas de la investigación moderna en astrofísica: estructura y evolución estelar, por un lado, y estructura y evolución de los planetas y sistemas planetarios por el otro. Otras materias importantes de la Astrofísica se enseñarán en otros módulos. Los contenidos propuestos son equivalentes a los que se imparten en la mayoría de las universidades internacionales.

· Se supone un conocimiento previo y básico de Mecánica, tanto clásica como cuántica, Termodinámica y Mecánica Estadística y Física Atómica y Nuclear. Ciertos aspectos, como teoría del transporte radiativo por poner un ejemplo, se introducirán a lo largo del curso.

· El detalle del programa del módulo (que no se subdivide en asignaturas o materias) es el siguiente:

- Propiedades fundamentales de las estrellas:
 - Flujo, luminosidad, sistema de magnitudes. Espectros estelares, clasificación espectral
 - El diagrama de Hertzsprung-Russell, poblaciones estelares
 - Sistemas estelares dobles y parámetros estelares
- Atmósferas estelares
 - Campo de radiación
 - Opacidades estelares
 - Formación de líneas espectrales
- Interiores estelares
 - Equilibrio hidrostático, ecuación de estado y teorema del virial.
 - Conservación de la energía. Reacciones nucleares y emisión de neutrinos.
 - Transporte de energía. Opacidad y conductividad
 - Construcción de modelos estelares
- Medio interestelar y formación de estrellas
 - Gas y polvo interestelares
 - Formación de protoestrellas
 - Evolución previa a la secuencia principal
- Evolución estelar
 - Secuencia principal
 - Evolución de estrellas masivas: Supernovas y GRBs

- Evolución de estrellas de masa intermedia. Nebulosas planetarias
- Estrellas degeneradas: enanas blancas, estrellas de neutrones.
- Agujeros negros
- Evolución de sistemas binarios compactos:
 - Discos de acreción
 - Novas y supernovas
 - Binarias de rayos X.
- Estrellas pulsantes
 - Física de las pulsaciones estelares
 - Modelos de pulsación
 - Pulsaciones no radiales
 - Asteroseismología
- El Sol
 - El interior del Sol
 - La atmósfera solar
 - Heliosismología
 - El ciclo solar
- El Sistema Solar
 - Procesos físicos en el Sistema Solar
 - Planetas terrestres: Mercurio, Venus, Tierra, Marte
 - Planetas Gigantes: Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno
 - Objetos menores: Plutinos, cinturón de Kuiper, cometas, asteroides
 - Meteoritos
- Sistemas planetarios externos al Sistema Solar
 - Características de los sistemas planetarios externos
 - Formación de sistemas planetarios y su evolución
- La evaluación de realizará mediante un examen escrito y la resolución de problemas y ejercicios a lo largo del curso.
- Bibliografía:
 - An introduction to Modern Astrophysics. B.W. Carroll y D.A. Ostlie. Pearson Addison Wesley 2007
 - Stellar Structure and Evolution. R. Kippenhahn & A. Weigert, Springer Verlag 1990

- Stellar Interiors. Physical principles, structure and Evolution. C.J. Hansen & S.D. Kawaler Springer Verlag 1994
- Evolution of stars and stellar population. M. Salaris & S. Cassisi . Wiley 2005
- Nuclear Physics of stars. C. Iliadis. Wiley-VCH 2007
- Planet formation. Ed. H. Klahr & W. Brandner Cambridge University Press 2006

También se proporcionará una lista extensiva de artículos de revisión para el aprendizaje de los conocimientos astronómicos más actualizados.

Módulo 9: Galaxias y Astrofísica extragaláctica

· Módulo optativo de 10 créditos ECTS, de carácter presencial y duración semestral, que se desarrollará en el segundo semestre.

· El módulo tiene como finalidad impartir los conocimientos básicos en una de las materias básicas de la investigación moderna en Astrofísica: estructura y evolución de las galaxias y, en particular de la galaxia de la Vía Láctea. Este módulo se apoyará en el módulo sobre Astrofísica Estelar y estará fuertemente relacionado con el módulo dedicado a Cosmología. Los contenidos propuestos son equivalentes a los que se imparten en la mayoría de las universidades internacionales.

· Se supone un conocimiento previo y básico de Mecánica, tanto clásica como cuántica, Termodinámica y Mecánica Estadística y Física Atómica y Nuclear así como de Astrofísica estelar y planetaria

· El detalle del programa del módulo (que no se subdivide en asignaturas o materias) es el siguiente:

- La galaxia de la Vía Láctea
 - Medidas de distancia, extinción y recuento de estrellas
 - Morfología de la Galaxia, cúmulos y poblaciones estelares
 - Cinemática galáctica
 - El centro galáctico
 - Materia oscura
 - El Grupo Local
- Evolución de la Vía Láctea
 - Flujos de gas e interacción con las galaxias vecinas
 - Formación y evolución de sus estructuras
 - Poblaciones fósiles
 - Evolución química de la Galaxia
- Naturaleza de las galaxias
 - Secuencia de Hubble
 - Galaxias espirales e irregulares
 - Estructura espiral
 - Galaxias elípticas
 - Galaxias interactivas
- Galaxias activas
 - El zoo de las galaxias activas
 - El modelo unificado de los núcleos galácticos activos

- Chorros
- Cuantificación de las propiedades de las galaxias
 - Métodos de determinación de distancias. Energía oscura
 - Distribución de tamaños, masas y luminosidades
 - Materia oscura
 - Correlaciones entre estas propiedades
- Evolución de las galaxias
 - Condiciones iniciales
 - Modelos monolíticos y jerárquicos de colapso de evolución
 - Formación de subestructuras
 - Interacción de galaxias
- Cúmulos de galaxias

· La evaluación de realizará mediante un examen escrito y la resolución de problemas y ejercicios a lo largo del curso.

· Bibliografía:

- An introduction to Modern Astrophysics. B.W. Carroll y D.A. Ostlie. Pearson Addison Wesley 2007
- Galactic Astronomy. Binney J. & Merrifield, M. Princeton University Press
- Galactic Dynamics. Binney, J. & Tremaine, S. Princeton University Press
- The chemical evolution of the Galaxy. F. Matteucci. Kluwer. 2003
- Cosmological Physics. J.A. Peacock. Cambridge University Press. 1999

También se proporcionará una lista extensiva de artículos de revisión para el aprendizaje de los conocimientos astronómicos más actualizados.

Módulo 10: Astrofísica de Altas Energías

- Módulo optativo de 10 créditos ECTS, de carácter presencial, y duración semestral, que se desarrollará en el segundo semestre.

- Objetivos: Se espera que el alumno se familiarice con los fundamentos de la Astrofísica de Altas Energías, tanto por lo que respecta a las fuentes y procesos astrofísicos que producen rayos gamma, rayos cósmicos y neutrinos en nuestro universo, como por lo que respecta a los instrumentos con los que se detectan estas astropartículas. El programa se divide en tres bloques. En el primero se introducen los procesos y sistemas astrofísicos. En el segundo se describen los detectores actualmente operativos y en fase de construcción y diseño. En el último se presentan la fenomenología de las observaciones que se han realizado hasta la fecha en rayos gamma, rayos cósmicos y neutrinos.

- El detalle del programa del módulo (que no se subdivide en asignaturas o materias) es el siguiente:

1) Teoría

- Procesos físicos que generan y absorben rayos gamma, rayos cósmicos y neutrinos.

2) Detectores

- Detectores de rayos gamma: GLAST, telescopios Cherenkov, MILAGRO
- Detectores de rayos cósmicos: AUGER, KASKADE.
- Detectores de neutrinos: AMANDA, ICECUBE, Antares, KM3

3) El cielo de muy alta energía

- SNR, pulsares y PWN
- Sistemas binarios emisores de rayos X
- Cúmulos estelares
- Materia oscura
- Galaxias cercanas
- Active Galactic Nuclei
- Starburst galaxies
- Cúmulos de galaxias
- Gamma Ray Bursts

- Sistema de evaluación: prueba escrita

- Bibliografía

Longair M. S. 1994, "High Energy Astrophysics, Vol.1: Particles, Photons and their Detection", Cambridge University Press,

Longair M. S. 1994, "High Energy Astrophysics, Vol.2: Stars, the Galaxy and the Interstellar Medium", Cambridge University Press.

Aharonian F. A. 2006, Very high energy cosmic gamma-radiation, World Scientific

Schlickeiser R. 2002, Cosmic-ray Astrophysics, Springer

Perkins D. 2003, "Particle Astrophysics", Oxford University Press

Ginzburg V. L. & Syrovatskii S. I. 1964, "The origin of cosmic rays", Pergamon Press, Oxford, England.

Módulo 11: Relatividad General y Cosmología

· Módulo optativo de 10 créditos ECTS, de carácter presencial, y duración semestral, que se desarrollará en el segundo semestre.

· El módulo tiene como finalidad dar al alumno los conocimientos necesarios que le permitan entender el estado actual del conocimiento en Cosmología: la evolución del Universo y la formación de estructuras desde el punto de vista teórico y observacional. El programa además pondrá especial énfasis en aquellos aspectos más relevantes para una mejor preparación del estudiante de cara a tareas de investigación en la nueva generación de experimentos.

· No hay requisitos previos.

· El detalle del programa del módulo (que no se subdivide en asignaturas o materias) es el siguiente:

- Introducción a la relatividad especial y general. Métricas y ecuaciones de campo. Teoría de perturbaciones y ecuación de Boltzman. Ondas gravitacionales.
- Introducción a la cosmología: el Big Bang, ley de Hubble, nucleosíntesis. Radiación cósmica de fondo.
- Expansión cósmica: modelos, factor de escalas, redshift, mediciones de H .
- Ecuaciones cosmológicas: ecuación de continuidad y estado, ecuación de Friedmann, aceleración, parámetros cosmológicos, energía y materia oscuras.
- Medidas en el espacio-tiempo: distancias cósmicas, horizontes, edad y volumen.
- Problemas del Big Bang: bariogénesis, inflación, materia oscura, origen de estructuras.
- Formación de estructuras: Colapso gravitatorio, inestabilidad jerárquica, espectro de potencias, oscilaciones acústicas, formación de galaxias, simulaciones numéricas, modelos de halo.

· La evaluación de los conocimientos del alumno se llevará a cabo mayoritariamente mediante una colección de problemas y un examen escrito. Además, se dará al alumno la posibilidad de obtener una fracción de la nota mediante trabajos de investigación en alguno de los grupos de investigación en Cosmología del Institut de Ciències de l'Espai (CSIC) del IFAE. Las calificaciones serán las que permite la legislación vigente.

· Bibliografía

Gravitation and Cosmology, S. Weinberg, Wiley and Sons (1972).

Cosmological Physics, J.A. Peacock, 1999, Cambridge Univ. Press

The Early Universe. E. Kolb, M. Turner. Frontiers in Physics, Lectures Notes Series.

Addison Wesley. (1990)

Principles of Physical Cosmology. P.J.E. Peebles. Princeton Series in Physics. Princeton Univ. Press (1993)

Structure Formation in the Universe, T. Padmanabhan, Cambridge University Press,

University of Cambridge (1993)

Módulo 12: Técnicas Observacionales

· Módulo optativo de 10 créditos ECTS, de carácter presencial, y duración semestral, que se desarrollará en el primer semestre.

· El módulo tiene como finalidad familiarizar al alumno con las técnicas observacionales en astronomía. Se quiere que el alumno comprenda los conceptos básicos, la nomenclatura y los sistemas de unidades empleados en astronomía. Se estudiarán las técnicas de detección y los instrumentos utilizados. Además se cubrirán las técnicas de tratamiento y análisis de datos. La idea es que el alumno sea capaz de entender y analizar observaciones astronómicas para poder realizar investigación en este campo.

· El módulo no necesita el haber cursado otras materias con anterioridad aunque si que es deseable ciertos conocimientos de astronomía y de física general.

· El detalle del programa del módulo (que no se subdivide en materias o asignaturas) es el siguiente:

- Conceptos básicos de astronomía
- Astronomía óptica e infrarroja
 - conceptos básicos de óptica
 - telescopios
 - instrumentación
 - observaciones
 - reducción de datos
- Radioastronomía
 - conceptos básicos
 - radiotelescopios
 - interferometría
- Astronomía de altas energías
 - conceptos básicos
 - detectores
- Detecciones de neutrinos
- Ondas gravitacionales

· La evaluación de los conocimientos del alumno se llevará a cabo mayoritariamente mediante un examen escrito. Además, se realizarán prácticas que también contarán en la calificación. Las calificaciones serán las que permite la legislación vigente.

· Bibliografía

Christopher R Kitchin, *Astrophysical Techniques*, Taylor & Francis Group, 2003 (Fourth edition)

Módulo 13: Temas avanzados de Astrofísica y Cosmología

· Módulo optativo de 10 créditos ECTS, de carácter presencial y duración semestral, que se desarrollará en el tercer semestre.

· Este módulo tiene como objetivo plantear de una forma estructurada los temas actuales de investigación, mostrando claramente las lagunas y las incertidumbres que existen. La profundidad con la que deben presentarse debe acercarse lo más posible a la del trabajo de investigación a los que se presenta.. El programa detallado podrá variar de un año a otro en función de la disponibilidad, interna o externa de los investigadores. La asistencia a este módulo estará abierta a los estudiantes que ya hayan obtenido los créditos necesarios para empezar su tesis doctoral. Cada uno de los temas deberá aportar un mínimo de 0,5 ECT y un máximo de 2 ECT.

· Se supone un conocimiento previo y básico de Mecánica, tanto clásica como cuántica, Termodinámica y Mecánica Estadística y Física Atómica y Nuclear así como de Astrofísica estelar y planetaria y Astrofísica galáctica y extragaláctica.

· El detalle del programa del módulo (que no se subdivide en asignaturas o materias) es el siguiente:

- Astronomía de ondas gravitacionales
- Física de las explosiones estelares
- Detectores de radiación X y gamma
- Nucleosíntesis primordial
- Física de las primeras estrellas
- Distribución de galaxias
- Influencia de la actividad estelar en la evolución de las atmósferas estelares
- ...

El programa puede variar de un año al siguiente.

· La evaluación se realizará mediante un examen escrito y la resolución de problemas y ejercicios a lo largo del curso.

· Bibliografía:

Se proporcionará una lista extensiva de artículos de revisión para el aprendizaje de los conocimientos astronómicos más actualizados así como monografías especializadas.

Módulo 14: Iniciación a la investigación y trabajo fin de máster

- Módulo obligatorio de 20 créditos ECTS, de carácter presencial y duración semestral, que se desarrollará en el tercer semestre.
- Este módulo tiene como objetivo iniciar al estudiante en las labores de investigación. Consiste en un trabajo de investigación original, enmarcado en uno de los grupos de trabajo existentes en el IFAE o el Institut de Ciències de l'Espai (CSIC). En él se desarrollará la capacidad para enfrentarse a un problema de investigación punta en Física de Partículas, Astrofísica y Cosmología de principio a fin, desde la planificación conceptual hasta la comunicación oral y por escrito de los resultados obtenidos.