

La Plata, 11 de abril de 2011

VISTO

- la decisión del Consejo Departamental de 2009 de convocar una comisión asesora *ad-hoc* para estudiar los problemas relacionados con el dictado de las asignaturas optativas de la Licenciatura en Física y recomendar medidas para su solución,
- la decisión del Consejo Departamental de 2009 de limitar la oferta de asignaturas optativas, con el objetivo de mejorar la organización de las actividades docentes,
- el documento producido en 2010 por dicha comisión *ad-hoc*,
- los despachos de las comisiones específicas que este Consejo Departamental convocó para analizar los programas y correlatividades de las materias optativas a ofrecer por el Departamento,

y CONSIDERANDO

- que si bien la solución a muchos de los inconvenientes que presenta el actual Plan de Estudios requerirá la elaboración de un nuevo plan de estudios, tal elaboración llevará aún varios años y es necesario en cualquier caso garantizar que el plan actual se desarrolle de la mejor manera posible,
- que es necesario organizar de mejor manera la oferta académica a los alumnos así como la distribución del personal docente del Departamento,
- que luego de dos décadas de aplicación del presente esquema de materias optativas, se detectaron los siguientes problemas:
 1. Ha faltado información o guía por parte del Departamento hacia los alumnos, en cuanto a las potencialidades del Plan de Estudios y su implementación.
 2. No ha existido un cronograma regular de inscripción a materias optativas. Los alumnos solían elegir estas asignaturas en una etapa temprana de la carrera, en la que desconocían el contenido de las mismas y la implicancia de sus preferencias. Estas opciones eran generalmente olvidadas y reformuladas a medida que la carrera progresaba.
 3. Desde la puesta en marcha del plan actual, no hubo una regulación planificada sobre la creación de nuevas materias. Muchas veces la voluntad de un profesor de dictar una materia optativa implicó la creación de una nueva materia, aún cuando asignaturas con contenidos similares ya existieran en oferta. Exceptuando algunas de las materias más tradicionales, el título de una asignatura terminó asociándose isomórficamente al nombre de un profesor. El procedimiento generalmente seguido por el alumno para armar su plan de materias consistió en seleccionar las asignaturas de una lista que terminó incluyendo más de 70 materias, aprobadas por sugerencia de la Comisión Asesora de Enseñanza del Departamento.
 4. Este aparente grado enorme de posibilidades tiene como contraparte el número limitado de recursos docentes. Aunque este número se ha incrementado con el tiempo, los recursos también han ido comprometiéndose gradualmente con la creación de nuevas carreras y/o planes de estudio. La planta docente de Física

debe actualmente atender los cursos obligatorios de la Licenciatura en Física y Física Médica, materias de correlación, la maestría, y cursos de posgrado para el Doctorado, además de un número no definido de antemano de materias optativas.

5. Como consecuencia de lo anterior, se alcanzó una situación en la que los alumnos no podían conocer con antelación las materias cuyo dictado podía ser garantizado por Departamento. Esto dificultaba:
 - o Al alumno, planear adecuadamente un plan de materias particular.
 - o Al Departamento, distribuir eficientemente y a tiempo la planta docente.
 6. Rigió a veces excesiva informalidad en la inscripción a las materias, de modo que no siempre existió un cuidado de las correlatividades necesarias para cursar una dada asignatura.
 7. La especialización de algunas de las materias llevó a que solamente un número muy reducido de docentes pudiera dictar las clases teóricas, prácticas o de laboratorio de esas asignaturas. Esto condiciona aún más la distribución de docentes en las diversas materias.
- que no es conveniente que la oferta de materias optativas se determine por la sola demanda del alumnado, debido a que:
 - o la vasta opción de materias, los distintos grados de dificultad, longitud y formas de evaluación, la curiosidad sobre los contenidos, entre muchas otras razones, son factores que hacen que la intención de cursar del alumnado pueda ser muy distinta del número real de alumnos que realmente cursan una dada asignatura,
 - o esta forma de determinar las materias a ofrecer implica enormes dificultades para distribuir a los docentes, ya que no es posible saber con anticipación cuántos alumnos curarán cuáles materias,
 - o la oferta no regulada de materias lleva a veces a malgastar recursos docentes, debido a superposición de contenidos entre distintas materias optativas o entre ellas y cursos de posgrado (muchas de las materias optativas repiten sus contenidos, o incluso los comparten con cursos de posgrado),
 - o en un plan de estudios largo y arduo, las asignaturas más breves y menos demandantes pueden ser una opción preferible a otras materias más largas o difíciles, de modo que el conjunto de materias optativas finalmente elegido por un estudiante queda finalmente determinado por factores en los que no prima el criterio de buscar la mejor formación posible.
 - que la Comisión de Materias Optativas se expidió sobre los requisitos indispensables para una materia de grado (en documento aprobado por el CD el 6/9/2010 e incluido en el acta no. 14),
 - que dicha Comisión hizo una propuesta sobre el conjunto de asignaturas optativas a ofrecer por el Departamento, y que el conjunto propuesto cubre un espectro amplio, general, moderno y evita superposiciones de contenidos. La propuesta implica la creación de algunas materias, y la fusión de otras existentes, de modo de encauzar los contenidos en materias de mayor

generalidad, pero reteniendo el espíritu de varias asignaturas que captaban o podían captar la atención del.

- que este Consejo Departamental convocó a comisiones específicas para analizar los programas y correlatividades de las materias optativas, quienes ya se han pronunciado,
- que las materias optativas no deben ser recipientes estancos, sino que deben estar integradas al plan base, debiéndose cuidar posibles superposiciones y huecos en los contenidos de todo el conjunto de las mismas,
- que durante el año 2010 se enviaron comunicaciones al alumnado y a la planta docente sobre la intención de formalizar la inscripción a las materias, y también el estado de los trabajos prácticos de asignaturas que pudieran haber sido cursados y aprobados por alumnos, pero cuya aprobación no se hubiera aún efectivizado, y que con el objetivo de terminar con la situación informal que pudiera existir a fines de 2010 se abrió a comienzos de 2011 un período de inscripción excepcional a materias optativas.

Por ello, el Consejo Departamental de Física, en su reunión del 11 de abril de 2011 y por unanimidad (6 votos) DISPONE:

1. Establecer la nómina de materias optativas ofrecidas por el Departamento para el bienio 2011-2012 según la tabla del Anexo I, que pasa a ser parte de la presente disposición. Para las materias no incluidas en la tabla del Anexo I, ya sea que se dicten dentro o fuera del Departamento, se establece que:
 - El Departamento no les asigna personal docente.
 - La decisión de admitir o no admitir la inscripción de un estudiante en estas materias se tomara caso por caso (esto es, alumno por alumno).
2. Aprobar los programas de las materias optativas de acuerdo a las recomendaciones de las comisiones *ad-hoc* oportunamente convocadas, según el Anexo II de la presente.
3. Fijar un cronograma bianual de llamado a inscripción a materias optativas, durante los meses de septiembre (para las materias del primer cuatrimestre del año siguiente) y abril (para las del segundo cuatrimestre del mismo año).
4. Encomendar a la Comisión de Materias Optativas que organice periódicamente charlas con el alumnado para explicar sobre el espíritu y los objetivos del Plan de Estudios, el contenido de las materias ofrecidas en los años siguientes, fechas importantes, disposiciones y reglamentaciones.
5. Encomendar a la Comisión de Materias Optativas que reciba en su reunión semanal a los alumnos que tengan dudas sobre las opciones o procedimientos.
6. Establecer que el Consejo Departamental resolverá sobre las solicitudes de inscripción a materias optativas, previa consulta a la Comisión, teniendo en cuenta:
 - o las correlatividades con las materias cursadas y/o aprobadas,
 - o la pertinencia de la materia solicitada,
 - o la coherencia del plan de optativas propuesto.

7. Aclarar que a partir del cierre de la inscripción excepcional mencionado más arriba, este Consejo entiende que no existen motivos para aceptar situaciones irregulares en el estado de las cursadas.
8. Publicar esta resolución así como toda la información concerniente a trámites e inscripciones a materias optativas en las carteleras y en la página web del Departamento.

ANEXO I

| Materias Optativas a dictarse en el Departamento de Física | | | |
|--|----------------------|---|----------------------|
| 2° Cuatrimestre 2011 | 1° Cuatrimestre 2012 | 2° Cuatrimestre 2012 | 1° Cuatrimestre 2013 |
| Termodinámica | Álgebra lineal | Termodinámica | Álgebra lineal |
| Métodos de la física matemática | Electromagnetismo II | Métodos de la física matemática | Electromagnetismo II |
| Mecánica estadística II | Electrónica | Mecánica estadística II | Electrónica |
| Simulaciones computacionales | | Simulaciones computacionales | |
| Seminario de física del estado sólido | | Seminario de física del estado sólido | |
| Seminario de física de partículas | | Seminario de física de partículas | |
| Seminario de física nuclear | | Seminario de física nuclear | |
| Relatividad general | | Relatividad general | |
| Tópicos de materia condensada | | Tópicos de materia condensada | |
| Seminario de óptica | | Elementos de la teoría cuántica de campos | |
| Seminario de mecánica cuántica | | Mecánica II | |
| | | | |

Referencias:

| | |
|--|--|
| | Materia que se ofrece todos los años |
| | Materia de la Licenciatura en Física Médica que se ofrece todos los años |
| | Materia que se ofrece cada dos años |

ANEXO II

Programas de las asignaturas optativas ofrecidas por el departamento

Las materias ofrecidas (según el cronograma del Anexo I) son:

- Álgebra lineal: aplicaciones físicas
- Elementos de la teoría cuántica de campos
- Electromagnetismo II
- Electrónica
- Tópicos de materia condensada
- Mecánica II
- Mecánica Estadística II
- Métodos de la física matemática
- Seminario de física nuclear
- Seminario de física de partículas y campos
- Seminario de física del estado sólido
- Seminario de óptica
- Seminario de mecánica cuántica
- Simulaciones computacionales
- Introducción a la Relatividad general
- Termodinámica

Álgebra Lineal: Aplicaciones Físicas

Correlativas: Álgebra y Análisis matemático

Programa

I - Introducción

Sistemas algebraicos abstractos. Propiedades de operaciones binarias. Grupo. Anillo. Cuerpo. Funciones. Morfismos entre sistemas algebraicos.

II – Espacios vectoriales

Motivación geométrica. Definición. Propiedades. Combinación lineal de vectores. Dependencia e independencia lineal. Bases. Bases ordenadas y coordenadas. Dimensión de un espacio vectorial. Espacios finito- e infinito-dimensionales. Subespacios. Operaciones con subespacios. Variedades lineales. Generadores.

III – Funciones lineales de argumento vectorial

Formas lineales de primera y segunda especies. Transformaciones lineales. Representación de transformaciones lineales mediante matrices. Operaciones con transformaciones lineales. Imagen y espacio nulo. Rango y nulidad. Inversas a izquierda y derecha. Operadores lineales. Potencias y funciones de operadores lineales. Inversas de operadores y matrices.

IV – Subespacios invariantes y diagonalización

Subespacios invariantes. Matriz de un operador lineal con subespacios invariantes. Autovectores y autovalores. Espacios característicos. Determinación de autovalores y autovectores en dimensión finita: ecuación característica. Transformaciones de coordenadas. Matriz asociada con un cambio de base. Transformación de las componentes de un vector, de los coeficientes de una forma lineal y de la matriz de un operador lineal. Similitud o semejanza. Diagonalización.

V – Teorema de Jordan

Álgebra de polinomios. Teorema de Jordan. Demostración y ejemplos de aplicación. Teorema de Cayley-Hamilton.

VI – Formas bilineales y cuadráticas

Formas bilineales. Representación general en dimensión finita. Transformación de la matriz asociada frente a cambios de base. Formas cuadráticas. Reducción a la forma canónica. Base canónica de una forma bilineal. Construcción de la base canónica por el método de Jacobi. Operadores lineales adjuntos con respecto a una forma bilineal simétrica. Isomorfismo entre espacios vectoriales. Isomorfismo entre espacios equipados con formas bilineales. Formas bilineales y cuadráticas en espacios reales: teorema de inercia. Formas multilineales.

VII – Espacios euclídeos y pseudo-euclídeos

Definición. Producto escalar en espacios reales. Conceptos métricos. Ortogonalidad. Teorema de Pitágoras y desigualdades triangulares. Isomorfismo euclídeo. Bases ortogonales. Operadores adjuntos en espacios euclídeos. Isometrías. Espacios pseudo-euclídeos y transformaciones de Lorentz: el espacio de Minkowski.

VIII – Espacios unitarios

Formas hermíticas. Formas cuadráticas hermíticas. Vectores conjugados y bases canónicas. Operadores lineales adjuntos. Producto escalar en espacios complejos. Espacios unitarios. Conceptos métricos. Desigualdad de Schwartz. Bases ortonormales en espacios unitarios de dimensión finita. Operadores adjuntos en espacios unitarios. Transformaciones unitarias. Propiedades de operadores autoadjuntos y normales.

IX - Tensores

Espacio dual. Bases duales. Intercambiabilidad de un espacio y su dual. Doble dual. Transformaciones de coordenadas en un espacio y en su dual. Duales de espacios euclídeos. Formas multilineales y tensores. Transformaciones de los coeficientes de las formas multilineales frente a cambios de coordenadas. Tensores. Grado, contra- y covarianza. Propiedades de tensores. Operaciones con tensores. Tensores simétricos y antisimétricos. Tensores en espacios euclídeos. Tensores y pseudotensores cartesianos. Campos tensoriales. Derivación de tensores. Tensores más generales. Cambios de coordenadas generales. Cálculo tensorial en coordenadas polares. Tensor métrico. Derivada covariante. Símbolos de Christoffel.

Bibliografía

G. E. Shilov – Linear Algebra – Ed. Dover

K. Hoffman y R. Kunze – Álgebra Lineal – Ed. Prentice-Hall Latinoamericana

I. M. Gelfand – Lectures on Linear Algebra – Ed. Dover

L. A. Santaló – Vectores y Tensores con sus Aplicaciones – Ed. EUDEBA

B. F. Schutz – A First Course in General Relativity – Ed. Cambridge University Press

Electromagnetismo II

Correlativas: Mecánica analítica, Matemáticas Especiales 2, Electromagnetismo y Experimentos electromagnéticos.

Los Trabajos Prácticos se aprueban con un parcial al final de la cursada. La asignatura se aprueba con un examen final.

Programa

1 El principio de Relatividad

Sistemas de referencia inerciales. El principio de relatividad. Coordenadas de los eventos. Invariancia del intervalo. Diagramas espacio-temporales. Transformaciones de Lorentz. Contracción de Lorentz. Dilatación del tiempo. Transformación de velocidades.

2 Cinemática Relativista

Espacio de Minkowski. Interpretación geométrica. Covarianza de Lorentz. El grupo de Lorentz. Subgrupos continuos y discretos. Tensores en el espacio de Minkowski.

3 Dinámica Relativista

Impulso y energía relativistas. Fuerzas. Ejemplos de movimientos relativistas. Equivalencia entre masa y energía. Formulación lagrangiana. Momento angular.

4 Formulación covariante de la Electrodinámica

El tetravector corriente. El tetravector potencial. Invarianza de gauge. El tensor de campo electromagnético. Invariantes. Fuerza de Lorentz. Formulación Lagrangiana. Simetrías y leyes de conservación. Tensor de energía-impulso.

5 Radiación de Cargas en Movimiento

Solución de la ecuación de onda en forma covariante. Función de Green. Potenciales de Lienard-Wiechert. Cálculo de los campos. Fórmula de Larmor. Distribución angular de la radiación. Amortiguamiento por radiación. Ecuación de Abraham-Lorentz. Oscilador armónico cargado.

Bibliografía

- Jackson, John D. (1998). Classical Electrodynamics (3rd ed.). New York: Wiley. ISBN 0-471-30932-X.

- L. D. Landau and E. Lifshitz, *Classical Theory of Fields*, (Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Massachusetts, 1951).
- Hermann Bondi, *Relativity and Common Sense*, (Dover Publications, New York, 1980).
- E. Taylor, J. A. Wheeler, *Spacetime Physics: Introduction to Special Relativity*, (W. H. Freeman, San Francisco 1966).
- Feynman, R.P., R.B. Leighton, and M. Sands, 1965, *The Feynman Lectures on Physics, Vol. II: the Electromagnetic Field*, Addison-Wesley, Reading, Mass.
- Panofsky, W.K., and M. Phillips, 1969, *Classical Electricity and Magnetism*, 2nd edition, Addison-Wesley, Reading, Mass.

Elementos de la teoría cuántica de campos

Correlativas: Mecánica cuántica 2 y Métodos de la física matemática.

Materia optativa para la Licenciatura en Física (Curso semestral, 64 hs. de clases teóricas más clases prácticas. Evaluación: examen final)

Contenidos:

- Grupo de Lorentz. Representaciones de dimensión finita. Grupo de Poincaré. Transformaciones de campos locales. Campos escalares, tensoriales y espinoriales. Campo de Dirac. Construcción de acciones invariantes.
- Ecuaciones de Euler - Lagrange. Simetrías. Corrientes conservadas, teorema de Noether. Cargas conservadas. Tensor de energía impulso. Tetra-impulso. Momento angular. Simetrías internas.
- Formulación Hamiltoniana. Corchetes de Poisson. Ecuaciones de movimiento. Covarianza. Simetrías internas.
- Descripción cuántica de una teoría de campos. Conmutadores a tiempos iguales. Ecuaciones de Heisenberg. Cuantización canónica.
- Cuantización del campo escalar libre. Operadores de creación y destrucción. Estado de vacío. Espacio de Fock. Orden normal de operadores. Relaciones de conmutación a tiempos distintos. Orden cronológico de operadores. Funciones de Green de la ecuación de Klein - Gordon. Propagador de Feynman. Campo escalar cargado. Conjugación de carga. Simetrías no Abelianas.
- Cuantización del campo electromagnético libre. Ecuaciones clásicas. Invarianza de gauge . Operadores de creación y destrucción. Método de Gupta - Bleuler. Propagador de Feynman. Campo vectorial masivo libre. Vínculos.
- Cuantización del campo de Dirac libre. Soluciones de la ecuación de Dirac. Operador impulso. Operadores de creación y destrucción. Espacio de Fock para fermiones. Reglas de anticonmutación a tiempos iguales. Estadística de Fermi -Dirac. Principio de exclusión. Momento angular, espín. Reglas de anticonmutación a tiempos distintos. Propagador de Feynman para el campo de Dirac. Simetrías discretas. Teorema CPT.
- Interacción con campos externos clásicos. Campo electromagnético en presencia de corrientes externas clásicas. Matriz S. Energía emitida. Probabilidad de emisión y absorción inducidas.
- Operador de evolución. Perturbaciones dependientes del tiempo. Matriz S. Teorema de Wick para campos bosónicos y fermiónicos. Fórmulas de reducción. Funcional generatriz de funciones de Green.
- Teoría de perturbaciones. Representación de interacción. Desarrollo diagramático de funciones de Green. Reglas de Feynman en el espacio de impulsos. Funciones de Green conexas, funcional generatriz.
- Cálculos al orden de un loop para un campo escalar en autointeracción. Regularización de diagramas divergentes. Renormalización de la masa y la constante de acoplamiento.
- Bibliografía:
 - Field Theory: a modern primer, P. Ramond.
 - Quantum Field Theory, C. Itzykson y J. B. Zuber.
 - Particle Physics and Introduction to Field Theory, T. D. Lee
 - The Quantum Theory of Fields, S. Weinberg

Electrónica

Correlativas: Matemáticas especiales 2

Programa

- 1- Circuitos. Resolución de circuitos lineales: Teoremas de Thevenin, Norton y Superposición. Respuesta temporal y frecuencial. Diagramas de Bode. Resolución de circuitos alineales.
- 2- Diodos. Características. Modelo aproximado lineal. Rectificación, filtros a capacitor. Recortadores y limitadores. Diodos Zener: características. Regulador de tensión.
- 3- Tiristores y Triacs. Control de potencia.
- 4- Transistores. Transistores bipolares: Características. Modelos equivalentes lineales. Polarización. Transistores por efecto de campo. Características, Modelo equivalente, polarización.
- 5- Amplificación. Parámetros característicos de un amplificador: ganancias de tensión y corriente, impedancias de entrada y salida, respuesta en frecuencia, distorsión. Etapas acopladas a R y C. Amplificador diferencial. Amplificadores de potencia.
- 6- Amplificadores operacionales. Amplificador operacional ideal. Configuraciones inversora y no inversora. Aplicaciones: suma, integración y diferenciación analógicas. Filtros. Simulación analógica de ecuaciones diferenciales. Comparadores. Generador de funciones.
- 7- Realimentación. Concepto de realimentación. Realimentación negativa, su influencia sobre los parámetros de un sistema. Estabilidad de sistemas realimentados. Reguladores y controladores. Realimentación positiva. Osciladores sinusoidales. Condiciones de oscilación. Estabilidad de frecuencia. Osciladores a cristal. Osciladores de relajación.
- 8- Circuitos especiales. Convertidores A/D y D/A.

Seminario 1: Circuitos digitales.

Álgebra de Boole. Implementación de funciones lógicas: compuertas, sumadores, decodificadores. Circuitos secuenciales. Flip-Flops, contadores, registros. circuitos de coincidencias, memorias. Microprocesadores. Estructura y aplicaciones.

Seminario 2: Aplicaciones de Física Médica.

Detección y registro de señales eléctricas de origen biológico. Transductores para la detección y registro de parámetros de interés en diagnóstico médico.

BIBLIOGRAFIA

- Electrónica. Fundamentos y aplicaciones para ingenieros y físicos. J. Millman, C. Halkias. Ed. Hispanoamericana. 1979.
- Circuitos Microelectrónicos. A. Sedra, K. Smith. Oxford University Press. 1999.
- The Art of Electronics. P. Horowitz W. Hill. Cambridge University Press. 1984.
- Integrated Electronics. J. Millman y C. Halkias. Mc. Graw Hill. 1972.
- Electrónica fundamental para científicos. J. Brophy. Reverté. 1974.
- Principios de Electrónica. P. Gray y C. Searle. Reverté. 1973.
- Circuitos en Ingeniería Eléctrica. H. H. Skilling. Ed. CECSA. 1973.

Tópicos de Materia Condensada, Ciencia de Materiales y Nanociencia

Correlativas: Seminario de física del sólido.

Programa

Se marcan con * los tópicos que no se incluyen dentro de los contenidos básicos, siendo éstos optativos a criterio del docente.

1) *Introducción a la Ciencia de Materiales:*

Tipos de materiales y problemas y fenómenos asociados. Aspectos fundamentales y propiedades.

Tipos de enlace y escalas de energía. Potencial de van der Waals, Lennard-Jones, enlaces covalentes e iónicos, repulsión de esferas rígidas, energía dipolar; interacción de intercambio y magnetismo. Fuerza de Casimir. Puentes de Hidrogeno.

Estructura cristalina. Microestructura. Fases, correlaciones espaciales, ruptura de simetría y rigidez, dislocaciones. Orden a escala atómica y nanométrica.

Síntesis y caracterización de materiales. Métodos físicos y químicos. Técnicas avanzadas de caracterización: técnicas por imágenes y técnicas espectroscópicas.

2) *Estructura y defectos en materiales:*

2.1. Estructura: líquidos y gases, sólidos cristalinos; simetría y estructura cristalina, cristales líquidos, vidrios. Estructuras no-conmensuradas, cuasi-cristales; orden magnético, orden de carga. Sistemas fractales. Sistemas nanoestructurados. Biopolímeros. Métodos experimentales para la caracterización de materiales: espectroscopías y técnicas por imágenes, difracción de rayos X, neutrones, electrones, STM, “scattering” inelástico.

2.2: Defectos en cristales y defectos topológicos. Dislocaciones, disclinaciones, vacancias, superficies, vórtices, bordes de grano, maclas. Magnones, fonones, plasmones, excitaciones fraccionarias, Skirmiones. Ejemplos y medición de excitaciones: Scattering inelástico, Raman, STS, EPR.

2.3 - Introducción a las fases líquido-cristalinas, nemático, sméctico, colestérico, etc. Transición nemático/isotrópico. Distorsiones y defectos topológicos en cristales líquidos. Transición sméctico/nemático. Propiedades de cristales líquidos. Líquidos cristalinos poliméricos.

*Transiciones de Kosterlitz-Thouless. *Fusión mediada por dislocaciones. *Sistemas ordenados de excitaciones topológicas.

3) *Dispositivos semiconductores, metales reales, y superconductores.*

3.1 - Introducción: estructuras periódicas; repaso de bandas electrónicas de energía y “gaps” electrónicos. Conducción en semiconductores intrínsecos y extrínsecos; aisladores.

3.2– Dispositivos Semiconductores. Junturas p-n con y sin sesgo. Dispositivos basados en junturas: LEDs, transistores, transistores de efecto de campo, MOSFET. MBE y heterojunturas semiconductoras. Efectos de superficie: espesor de las barreras Schottky. Micro y nanomáquinas.

3.3 - Metales reales: Propiedades de los metales y superficies de Fermi; determinación experimental de las superficies de Fermi. Efecto de las correlaciones electrónicas. Líquidos de Fermi y no-líquidos de Fermi.

3.4 - Superconductividad. Repaso de superconductividad. Coherencia macroscópica. Superconductividad convencional vs. no-convencional. Superconductores de alta temperatura crítica. Fenomenología y alternativas a BCS. Materia de vórtices. Experimentos en superconductores no-convencionales. Aplicaciones.

*Transición de Mott. *Sistemas de Fermiones pesados.*Superconductores triplete. *Junturas Josephson, aplicaciones. *Fases superfluídas en He3.

4) *Nanofísica y nanomateriales:*

4.1 - Introducción: efectos clásicos y cuánticos en la nanoescala: relaciones de escala, fuerzas viscosas, fuerzas de fricción a escala molecular.

4.2 - Física de Superficies: introducción: superficies e interfases, superficies limpias, técnicas de caracterización. Estructura de superficies: notaciones, reconstrucciones, monocapas. Termodinámica y dinámica de superficies. Propiedades mecánicas y eléctricas de superficies.

4.3 – Sistemas electrónicos de baja dimensión: efecto Hall cuántico y cuántico fraccionario en heteroestructuras. Líquidos de Luttinger. Aisladores topológicos. Fullerenos. Puntos cuánticos; alambres cuánticos. Grafeno.

*Teorema de Mermin-Wagner. *Transiciones topológicas tipo KT. *Películas de Helio superfluido.

4.4 - Física Experimental de la nanofabricación: tecnología de silicio: los modelos tecnológicos de INTEL-IBM. Moldeado y replicación de un patrón nanoestructurado, máscaras nanométricas y fotolitografía. “Etching” de silicio. Métodos físicos y químicos para la deposición de películas. Generación de superficies ordenadas en la nanoescala. Litografía óptica y por rayos-X. Litografía electrónica. Métodos de “Scanning Probe”: construcción átomo por átomo. Arreglos nanoestructurados con Microscopía por efecto túnel (STM) como prototipo de “ensamble” molecular y mediante Microscopía de Fuerza Atómica (AFM).

5) Magnetismo y Materiales Magnéticos:

Interacciones de intercambio: ferro-, ferri- y antiferro-magnetos; sistemas helicoidales. Anisotropía magnética y sistemas modelo. Sistemas magnéticos duros y blandos; aplicaciones. Interacciones dipolares y efecto demagnetizante. Dominios magnéticos. Interacciones competitivas: frustración y vidrios de spin. Magnetismo en sistemas de baja dimensionalidad. Multicapas. Sesgamiento por intercambio. Magnetoresistencia gigante. Válvulas de spin. Sistemas de nanopartículas magnéticas. Aplicaciones. Ejemplos y técnicas experimentales para la medición de sistemas magnéticos.

*Producción de campos magnéticos. *microscopio de fuerza Lorentz, *difracción de neutrones, *métodos magneto-ópticos.

6) Técnicas de caracterización:

Espectroscopías tradicionales: XPS, Raman, UV. Nanoscopías: AFM, STM, TEM, SEM. Técnicas basadas en el empleo de luz de sincrotrón: absorción, dispersión y emisión de rayos X. El laboratorio de luz sincrotrón.

* Técnicas basadas en la dispersión de rayos X: SAXS, DSXAS, GISAXS. *Técnicas basadas en la absorción y emisión de rayos X: XANES, EXAFS, DXAS, XMCD, XES, RIXS, ARPES.

Bibliografía:

Básica

- N. W. Ashcroft y N. D. Mermin, *Solid State physics*, Brooks Cole (1976).
- J. Hook y H. Hall, *Solid state physics*, Wiley (1995).
- P. Chaikin y T. Lubensky, *Principles of condensed matter physics*. Cambridge University Press (2000).
- F. Duan y J. Guojun, *Introduction to condensed matter physics*, World Scientific (2005).
- Edward L Wolf, *Nanophysics and Nanotechnology. An Introduction to Modern concepts in Nanoscience*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (2004).
- Charles P. Pool Jr. and Frank J. Owens. *Introduction to Nanotechnology*. John Wiley and Sons Inc. Publications. 2003.
- *Characterization of Nanophase Materials*. Zhong Lin Wang Ed. Wiley VCH Verlag GmbH 2000.

Específica

- R. Jones, *Soft Condensed Matter*. Oxford University Press (2002).
- S. Blundell, *Magnetism in Condensed Matter*. Oxford University Press (2001).
- J. Annett, *Superconductivity and Superfluidity*, Oxford University Press (2004).
- M. Tinkham, *An introduction to Superconductivity*, Dover (2004).
- J.M. Ramallo López and F.G. Requejo. *CHAPTER 7: X-ray absorption fine structure studies of fundamental properties of nanostructures in Recent Advances in Nanoscience*, Marcelo M. Mariscal and Sergio A. Dassie. Eds. Research Signpost, Kerala, India (2007).
- Springer Handbook of Nanotechnology*. Bharat Bhushan Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004.

Lectura Complementaria

-Encyclopedia of Condensed Matter Physics, Franco Bassani, Gerald L Liedl, Peter Wyder, Elsevier, 2005 (este libro cuesta USD 2000 pero se puede bajar de Gigapedia).

-Condensed-Matter and Materials Physics. Basic Research for Tomorrow's Technology, Committee on Condensed-Matter and Materials Physics. Board on Physics and Astronomy. Commission on Physical Sciences, Mathematics, and Applications. National Research Council, USA. NATIONAL ACADEMY PRESS, 1999.

M. I. Kaganov, Electrons, Phonons, Magnons. Mir Publishers, First published 1981.

Distribución Horaria

4 horas semanales de teoría + 4 horas semanales de práctica (problemas y experimentos).

Evaluación

Aprobación con examen final.

Mecánica II

Correlativas: Mecánica analítica

Programa:

INTRODUCCIÓN

Concepto de Fluido - Fluido como medio continuo – Partícula Fluida - Unidades - Consideraciones Termodinámicas - Viscosidad y Reología - Tensión Superficial - Presión de Vapor.

Parte I: CINEMÁTICA

DESCRIPCIÓN DEL MOVIMIENTO

Descripción Lagrangeana – Descripción Euleriana – Campo de velocidad - Aceleración en Fluidos – Derivadas locales y convectivas – Descripción de Flujos.

MATEMÁTICA

Tensores cartesianos – Definición – Fuerzas de Superficie – Operadores diferenciales – Tensores simétricos y antisimétricos – Teorema de Gauss y Teorema de Stokes.

DEFORMACIONES Y CARACTERÍSTICAS DE FLUJOS

Deformaciones longitudinales y volumétricas – Ecuación de continuidad – Deformaciones por cizalladura – Tensor de deformaciones – Vorticidad y Circulación – Movimientos relativos – Flujos vortiginosos rotacionales e irrotacionales – Función corriente.

Parte II: DINAMICA DE FLUIDOS

FUERZAS EN FLUIDOS

Fuerzas volumétricas de superficie y de línea – Tensor de esfuerzos

FLUIDOS EN REPOSO

Condiciones de equilibrio – Flotación en un fluido en reposo – Equilibrio estático de medios compresibles – Fluidos en reposo bajo gravedad externa – Fluidos autogravitantes.

LEYES DE CONSERVACIÓN Y ECUACIONES DINAMICAS

Teorema de Leibniz – Teorema de Reynolds – Volumen material y de control – Conservación de masa – Ecuación de continuidad – Conservación de impulso y ecuación de Cauchy – Conservación de impulso en un volumen de control – Conservación de impulso angular –

ECUACIONES DINAMICAS

Ecuación constitutiva en fluidos Newtonianos – Ecuación de Navier Stokes – Ecuación de Euler – Ecuación de Bernoulli - Sistemas rotantes – Dinámica de vórtices.

CONSERVACIÓN DE LA ENERGIA Y TERMODINÁMICA Conservación de energía mecánica – Energía térmica y primera ley de la termodinámica – Segunda ley de la termodinámica – Aproximación de Boussinesq

Parte III: FLUIDOS PERFECTOS FLUJOS POTENCIALES

TEOREMA DE CIRCULACIÓN DE KELVIN

FLUJOS BIDIMENSIONALES

Potencial de velocidad – Condiciones de Contorno – Potencial complejo – Fuentes sumideros y dobletes – Flujo sobre una nariz – Un cilindro en una corriente – Cilindro rotante – Arrastre y sustentación en 2 dimensiones – Teorema de Blasius - Efecto Magnus.

TEORIA DE PERFILES

Teorema de Kutta Joukowski – Transformación de Joukowski – Sustentación de un ala.

ONDAS DE SUPERFICIE

Ondas de gravedad – Relación de dispersión – Características de las ondas de gravedad – Camino de las partículas fluidas – Aguas profundas y playas – Ondas de tensión superficial – Solitones – Ecuación de Kortweg de Vries – Ondas cnoidales.

Parte IV: FLUJOS VISCOSOS

ANÁLISIS DIMENSIONAL SIMILITUD DINAMICA

Adimensionalización de la ecuación de Navier Stokes – Número de Reynolds – Número de Fraude – Matriz dimensional – Teorema Pi – Números adimensionales.

FLUJOS DE BAJO NUMERO DE REYNOLDS

Flujo de Couette – Flujo de Poiseuille – Fuerza de Stokes

FLUJOS DE ALTO NUMERO DE REYNOLDS

Teoría de capa límite – Espesor de la capa límite – Condiciones de consistencia - Capa plana – Solución de Blasius – Rotura del flujo laminar Desprendimiento de la capa límite – Cambios de régimen para crecientes números de Reynolds – Efecto Robin.

BIBLIOGRAFÍA

An Introduction to Fluid Dynamics
by G. K. Batchelor, G.K. Batchelor

Fluid Mechanics

by L.D. Landau and E.M.Lifshitz

Fluid Mechanics
by Pijush K. Kundu

Mecánica de Fluidos
By R.E. Meyer

Incompressible Flow
by Ronald L. Panton

Dinámica de los Fluidos
by M.F. Hughes

Mecánica de Fluidos.
by FM White.

Mecánica Estadística II

Correlativas: Mecánica Estadística

Programa

1. Repaso de Teoría de Conjuntos y Mecánica estadística cuántica. Gases de bosones y gases de Fermiones.
2. Repaso de segunda cuantificación. Estados cuánticos de muchas partículas idénticas. Operadores de creación y destrucción. Derivación de Hamiltoniano de electrones interactuantes en el modelo de jellium.
3. Sistema de electrones débilmente correlacionados. El apantallamiento de Thomas-Fermi. Líquidos de Fermi. Cuasipartículas. Teoría de Landau del Líquido de Fermi.
4. Modelo de Ising y transiciones orden-desorden. El Hamiltoniano de Ising para el ferromagnetismo, antiferromagnetismo, frustración magnética y vidrios de spin. Solución exacta en 1D. Solución de campo medio de Weiss. Exponentes críticos en la solución de campo medio. El Hamiltoniano de Ising con campo transversal y transiciones de fase cuánticas.
5. Modelo de Heisenberg. Naturaleza del estado fundamental y estados excitados de baja energía. Representación de Holstein-Primakoff. Magnones. Calor específico a bajas temperaturas. Comportamiento de la magnetización y discusión cualitativa del teorema de Mermin-Wagner.
6. Fenómenos críticos. Transiciones de fase de primer orden y de segundo orden. Discusión de los teoremas de Yang y Lee. Hipótesis de escala y relaciones entre exponentes críticos.
7. Teoría de Landau de las transiciones de fase. Energía libre de Landau. Transición paraferromagnética. Transiciones de fase de primer orden.
8. Superconductividad. Fenomenología. Teoría de Ginzburg-Landau. El efecto Meissner y la cuantización del flujo en la teoría de Ginzburg Landau. El Hamiltoniano de interacción electrón-fonón. La inestabilidad de Cooper. Teoría microscópica de Bardeen, Cooper, Schrieffer: Función de onda variacional y energía de condensación. Teoría de Bogoliubov, espectro de excitaciones y el comportamiento del calor específico a bajas temperaturas.
9. Superfluidez. Fenomenología del He II. Teoría de Landau- Feynman de la superfluidez. Teoría de Ginzburg-Landau de la superfluidez. Teoría microscópica y líquidos de Bose.
10. Fluctuaciones y movimiento Browniano. La ecuación de Langevin, balance energético y el teorema de fluctuación-disipación. El movimiento Browniano de una partícula acoplada a un resorte forzado en contacto con un baño térmico. La teoría de Einstein del movimiento Browniano. El teorema de Nyquist. Variables estocásticas, procesos Markovianos y la ecuación de Schmoluchovski-Chapman-Kolmogorov. La ecuación de Fokker-Planck.

Bibliografía

- From Microphysics to Macrophysics I, R. Balian
- Statistical Mechanics, R.K. Pathria
- Statistical Mechanics, 1st and 2nd editions, K. Huang
- Statistical Physics, Landau y Lifshitz
- Fundamentals of statistical and thermal physics, F. Reif
- A Modern Course in Statistical Mechanics, L. E. Reichl
- Introduction to Modern Statistical Mechanics, D. Chandler
- Lectures on Statistical Physics, R. Feynman
- Introduction to superconductivity, M. Tinkham.
- Quantum theory of solids, Kittel
- Solid State Physics, Aschcroft-Mermin
- Bose- Einstein condensation, Stringari and Pitaevski
- The Fokker-Planck equation, Risken
- Many body physics, Fetter and Walecka
- Les Houches lectures by M. Le Bellac

Métodos de la física matemática

Correlativas: Matemáticas especiales 2.

Programa:

Teoría de Grupos

Elementos básicos: Axiomas. Isomorfismos y Homomorfismos. Representación lineal de G . Subgrupo. Teorema de Lagrange. Teorema de Cayley. Cosets. Clases de elementos conjugados, interpretación física. Diagramas de Young y permutaciones. Subgrupo invariante. Grupos simples y semisimples. Grupo cociente. Teorema de homomorfismos Producto directo de grupos. Centro de un grupo.

Representaciones de grupos discretos: Representaciones equivalentes. Representación conjugada y contragradiente. Representaciones reales, pseudoreales y complejas. Suma directa y producto directo. Representaciones reducibles e irreducibles. Unitariedad. Teorema de Schur. Relaciones de ortogonalidad para representaciones irreducibles de grupos de orden finito. Funciones de clase, caracteres simples. Criterio de irreducibilidad. Tabla de caracteres. Algebra de un grupo de orden finito, representación regular. Teorema de Burnside. Proyectores. Aplicaciones físicas al cálculo del espectro de fluctuaciones y modos normales de moléculas.

Teoría de Grupos y Mecánica cuántica: Operadores sobre espacios de funciones. Definición de simetría en Mecánica cuántica, degeneración. Números cuánticos e índices de representaciones irreducibles. Teorema de Bloch. Grupos de simetría y reglas de selección para elementos de matriz.

Grupos de Lie: Variedad de grupo, dimensión de un grupo. Grupos conexos y compactos. Grupo de homotopía. Grupos simplemente conexos. Ejemplos: $O(2)$, $SL(2,R)$. Grupos clásicos de matrices.

Algebras de Lie: Elementos de geometría diferencial: planos tangentes y vectores, álgebra de Lie. Push-forward y pull-back. Mapeo exponencial. Traslaciones a izquierda y derecha en G . Campos vectoriales invariantes a izquierda y derecha. Constantes de estructura de un grupo. Generadores. Algebras de Lie de grupos de matrices. Aplicación exponencial. Problema del cubrimiento, producto de mapeos exponenciales. Geometría y representantes de cosets. Representación regular y métrica invariante de Killing-Cartan. Métrica G -invariantes y bi-invariante sobre G .

Grupo de rotaciones: Algebras de Lie de los grupos $SU(2)$ y $SO(3)$ y variedades de los grupos. Homomorfismo $SU(2) \rightarrow SO(3)$. Constantes de estructura totalmente antisimétricas, invariante cuadrático de Casimir. Medida de integración invariante y Teorema de Peter-Weyl. Representaciones unitarias irreducibles del grupo $SU(2)$. Ortogonalidad de caracteres. Producto directo de representaciones irreducibles. Descomposición de Clebsch - Gordan.

Grupo de Lorentz y Grupo de Poincaré: Métrica de Minkowski y grupos de Lorentz $SO(3,1)$ y Poincaré $ISO(3,1)$. Álgebra $so(3,1)$ y su complejización. Representaciones irreducibles. Grupo de cubrimiento $SL(2,C)$, homomorfismo $SL(2,C) \rightarrow SO(3,1)$. Grupo de Clifford, álgebra de matrices gamma. Teorema de Pauli. Espinores de Dirac, Majorana y Weyl. Grupo de Poincaré $ISO(3,1)$ y sus representaciones. Vector de Pauli-Ljubanski, helicidad.

Bibliografía

Lie Groups, Lie Algebras and Some of Their Applications, R. Gilmore; Lie Groups, Physics, and Geometry: An Introduction for Physicists, Engineers and Chemists, R. Gilmore; Group Theory, E. Wigner; Group Theory and its Applications to Physical Problems, M. Hammermesh; Notas de clase, H. Falomir; Mathematics for physics II, M. Stone; Group Theory and Quantum Mechanics, M. Tinkham; Quantum Mechanics, L. Landau; Geometrical Methods of Mathematical Physics, B. Schutz; Quantum Field Theory, Vol 1, S. Weinberg.

Análisis Funcional

Espacios de Hilbert: Espacios de funciones, definiciones y ejemplos. Distintas nociones de normas y convergencia. Secuencias de Cauchy y espacios completos. Producto interno en un espacio de funciones.

Espacio de Hilbert, definición. Espacio de funciones de cuadrado sumable $L^2(a, b)$. Desigualdad de Bessel y Teorema de Parseval. Conjuntos ortonormales, polinomios ortogonales.

Operadores sobre espacios de funciones: Operador adjunto, definición. Operador hermítico. Condiciones de contorno autoadjuntas. Ejemplos: operador impulso y operador Sturm-Liouville, c.c. de Robin. Norma de un operador. Operadores acotados. Operadores completamente continuos. Autovalores y autovectores de operadores simétricos completamente continuos. Descomposición espectral. Operador integral de Fredholm. Ecuaciones integrales inhomogéneas. Operadores con inversa simétrica completamente continua. Problema de Sturm - Liouville.

Transformación de Fourier en $L^2(\mathbb{R})$: Transformación de Fourier en $L^1(\mathbb{R})$. Subespacios densos en $L^2(\mathbb{R})$: $C_0(\mathbb{R})$. El espacio de Schwartz. Teorema de Plancherel.

Teoría de Distribuciones: Operadores lineales y distribuciones. Teorema de Riesz-Frechet. Espacio de funciones de prueba. Funciones generalizadas (o distribuciones). Distribuciones regulares y singulares. Límite de secuencias de distribuciones. Diferenciación de distribuciones. Regularización de integrales divergentes. La distribución $(x+)^{\lambda}$. Transformación de Fourier de distribuciones, continuidad. Distribuciones temperadas. Convolución de distribuciones. Soluciones fundamentales de ecuaciones diferenciales. Integración y diferenciación de orden arbitrario. Descomposición en distribuciones propias.

Bibliografía

Quantum Field Theory, Vol 1, Zeidler; Methods of Mathematical Physics, Vol. 1, R. Courant y D. Hilbert; Functional analysis, Y. Vilenkin; Notas de clase, H. Falomir; Mathematics for physics II, M. Stone; Generalized functions, Vol. I, I. Gelfand y G. Shilov; An introduction to the theory of linear spaces, G. Shilov.

Seminario de física nuclear

Correlativas: todas las materias obligatorias del plan.

Programa

Propiedades básicas del núcleo

- Masa del núcleo, número de neutrones y protones, escalas de masa
- Energía de ligadura, energía de separación, fórmula de masas

Estabilidad nuclear

- Variaciones de carga y masa
- Fisión nuclear, fisibilidad, barreras coulombianas y barreras de fisión

Propiedades promedio de las interacciones nucleares

- Gas de fermiones, energía cinética media, energía potencial media, libre camino medio del nucleón, efecto Ramsauer-Townsend nuclear, densidad media nuclear, efectos de volumen y superficie

Simetrías fundamentales y sus representaciones

- Invariancia rotacional
- Inversión temporal
- Isospin

Estructura del nucleón

- Breve introducción a QCD
- Grados de libertad de quarks y gluones
- Desde el nucleón al núcleo: Problemas abiertos

Interacción entre nucleones

- Nociones históricas (Yukawa)
- Rango de las interacciones
- Bosones mediadores
- Relación con el régimen no-perturbativo de QCD
- QCD en la red: revisión de resultados y problemas abiertos

Potencial nuclear central

- Potencial de Reid
- Potencial de Bonn
- Potencial de Argonne
- Potencial de Paris
- El deuterón

Fuerzas efectivas entre nucleones

- Núcleos de capas abiertas y cerradas, rango de validez de los potenciales
- Aproximaciones dependientes de la densidad
- Esquemas de niveles nucleares
- Núcleos de capa cerrada
- Núcleos de capa abierta

Modelo Nuclear de capas

- Efectos debidos al acoplamiento spin-órbita
- Sistemática de momentos magnéticos
- Sistemática de momentos cuadrupolares eléctricos
- Sistemática de ocupaciones de partícula independiente
- Momentos monopulares e interacciones de pares de nucleones
- Fuerzas residuales y métodos de diagonalización

Modelos nucleares colectivos

- Modelo de la gota líquida
- Vibraciones y rotaciones nucleares
- Aproximación de campo medio, método de Hartree-Fock
- Superfluidez y superconductividad nuclear, Hartree-Fock Bogoliubov.
- Interacción de apareamiento en el regimen deformado (BCS) y esferico (vibraciones de apareamiento)
- Teoría de linealización: a) Tamm-Dancoff
- Teoría de linealización: b) RPA
- Bosones interactuantes: IBA

Transiciones nucleares y modos de decaimiento

- Excitación coulombiana, transiciones inducidas y espontáneas, órdenes de magnitud para vidas medias y energías
- Transiciones electromagnéticas, operadores de transición, unidades de partícula independiente
- Decaimientos electro débiles, estabilidad β , valores de $\log - ft$ y vidas medias
- Emisión α , barreras y estados resonantes

Dispersión

- Teoría de la dispersión. Dispersión inelástica y elástica de nucleones por núcleos
- Transferencia de partículas
- Relación entre procesos de dispersión y modos de decaimiento

Aplicaciones y perspectivas

Se presentarán estos temas a elección de los estudiantes, para confeccionar con ellos un trabajo de recopilación.

- Sistemas extendidos de materia nuclear y hadrónica: formulación lagrangiana, método de Skyrme.
- Astrofísica nuclear: nucleosíntesis primordial, procesos rápidos, captura de neutrones
- Energética nuclear: principio de funcionamiento de reactores de fisión y fusión
- Fronteras con la física de partículas
- Medicina nuclear: radiaciones, microdosis y aceleradores nucleares en aplicaciones médicas

Bibliografía

- Nuclear Structure. Vol. I, Aa. Bohr y B. R. Mottelson, W. A. Benjamin, Inc.
- Nuclear Collective Models. D. Rowe, Pergamon. Press
- Modelos Nucleares y sus aplicaciones. O. Civitarese (Notas del curso)
- O. Civitarese and J. Suhonen. Electroweak interactions in nuclei. Springer (en preparación)
- Nuclear Shell Theory. A. De Shalit and I. Talmi. Academic Press
- The atomic nucleus as a relativistic system. Savushkin y Toki. Springer
- Nuclear Models. P. Ring and P. Schuck, Springer
- Introduction to particle and nuclear physics. E. Predazzi, Pergamon Press

Seminario de física de partículas y campos

Correlativas: Mecánica cuántica 2

Programa:

1. Introducción a la Teoría de Campos y Física de Partículas: quarks y leptones. Niveles de estructura: de los átomos a los quarks. Paréntesis sobre interacciones.
2. Repaso de Mecánica de un sistema finito de partículas: mecánica clásica. Cuantización. El oscilador armónico. Unidades naturales. Problemas
3. Campo spin 0: Discusión general. El campo Klein Gordon real. Desarrollo Fourier. Segunda Cuantización. Espacio de Hilbert. Propagador de Feynman. Problemas
4. Campos en interacción – Diagramas de Feynman: Representación de Heisenberg, Schroedinger e Interacción. Matriz S. Teorema de Wick. Aplicaciones. Sección Eficaz. Problemas.
5. Campo Spin1/2: Ecuación de Dirac. Segunda cuantización. Propagador Fermiónico. Teoría de dos componentes. Leyes de transformación de espinores y formas bilineales, teoremas de trazas, problemas.
6. Campo spin 1: $m \neq 0$: Campos libres. Propagador. $m=0$, fotones. Cuantización del campo electromagnético. Gauge de Lorenz. Gauge de radiación. Métrica indefinida. Cuantificación a la Gupta – Bleuler. Propagador del fotón. Problemas
7. QED: Reglas de Feynman. Nota sobre leptones. Producción de pares de leptones en colisiones e+e. Sección eficaz. Dispersión Bhabha y luminosidad de un acelerador. Cálculos y Seminarios: Dispersión Compton. Dispersión Bhabha.
8. Simetrías en física: No observables, transformaciones y leyes de conservación. Teorema de Noether. Simetrías geométricas e internas. Grupos. Grupos de Lie SU(2) y SU(3). SU(2) de isospin fuerte. Simetrías discretas. Invariancia P y C.
9. Teorías de Gauge: Invariancia de gauge global: caso abeliano. Invariancia de gauge local: el caso abeliano. Derivada covariante. Invariancia de gauge global: caso no abeliano. Teoría de gauge no abeliana para la dinámica de quarks y leptones.
10. Modelo Standard: Lagrangiano para quarks y leptones. Teoría electrodébil. Los términos U(1) y SU(2). Conexión con el experimento : corriente neutra, corriente cargada. Lagrangiano fermion-boson de gauge. Rompimiento espontáneo de simetría. Masas.

Bibliografía:

T.D. Lee: Particle Physics and Introduction to Field Theory.
Mandl & Shaw: Quantum field theory.
Halzen & Martin: Quarks and Leptons.
Aitchison & Hey: Gauge theories in Particle Physics.
Itzykson & Zuber: Quantum Field Theory.
Kane, Gordon: Modern elementary particle physics: quarks, leptons and their interactions.
DeWit & Smith: Field Theory in Particle Physics

SEMINARIO DE FÍSICA DEL SÓLIDO

Correlativas: Mecánica Estadística

PROGRAMA

- 1) Teoría de Drude de los metales.
- 2) Teoría de Sommerfeld de los metales.
- 3) Propiedades de estructuras periódicas. Redes directas y recíprocas. Celdas de Bravais y de Wigner-Seitz.
- 4) Fonones: repaso de la aproximación armónica: modos normales para una red unidimensional monoatómica, y con una base: rama acústica y óptica. Extensión a tres dimensiones. Conexión con la teoría de la elasticidad. Teoría cuántica del cristal armónico: repaso de los modelos de Einstein y Debye. Densidad de modos normales. Medida de las relaciones de dispersión. Efectos anarmónicos en cristales.
- 5) Movimiento de electrones en potenciales periódicos. Teoría de bandas. Teorema de Bloch. Zonas de Brillouin. Electrones en potenciales periódicos débiles. Aproximación de ondas planas. Difracción de electrones de valencia. Superficie de Fermi. Estructura de bandas de los niveles electrónicos en sólidos; representación en esquemas reducido, extendido y periódico. Clasificación de sólidos en conductores, semiconductores y aisladores.
- 6) Método de ligadura fuerte ('Tight binding').
- 7) Diamagnetismo y Paramagnetismo: Diamagnetismo de Larmor; reglas de Hund; paramagnetismo de Van-Vleck. Ley de Curie para átomos libres y dentro de un cristal. Repaso de Paramagnetismo de Pauli, y diamagnetismo de electrones de conducción. Interacción Magnética: origen electrostático y energía de intercambio. Quiebre de la aproximación de electron independiente. Hamiltonianos de Spin. Orden Magnético: tipos de orden y observación de la estructura magnética. Teoría de campo medio. Ferromagnetismo; interacción Spin-Órbita y anisotropía magnética; dominios e histéresis.
- 8) Dinámica de los electrones
 - a) Teoría semi-clásica de la conducción en metales.
 - b) Ecuación del movimiento en la representación de Wannier. Hamiltoniano equivalente: niveles de impurezas; semiconductores extrínsecos. Mecánica Estadística de los portadores en semiconductores. El diodo y otros dispositivos electrónicos.
- 9) Más allá de la aproximación de electrones independientes: correlación, apantallamiento. Introducción a la Teoría de líquido de Fermi.

Bibliografía

1. N. W. Ashcroft & N. D. Mermin: "Solid State Physics". Holt, Rinehart & Winston, Philadelphia (1976)
2. J. Callaway: "Quantum Theory of Solid State". Academic Press, New York (1974).
3. A. S. Davydov: "Teoría de Sólidos". Mir, Moscú (1981).
4. C. Kittel: "Introduction to Solid State Physics". John Wiley, New York, 4th Edition (1971).
5. C. Kittel: "Quantum Theory of Solids". John Wiley, New York (1963).
6. R. E. Peierls: "Quantum Theory of Solids". Clarendon Press, Oxford (1965).
7. J. M. Ziman: "Principles of the Theory of Solids". Cambridge University Press, 2nd edition (1972).
8. J. M. Ziman: "Electrons and Phonons". Clarendon Press, Oxford (1960).

Seminario de Óptica Avanzada

Correlativas: Electromagnetismo, Mecánica Cuántica I

Programa

1. *Propagación de la Luz:* Óptica geométrica. Componentes ópticos. Ondas electromagnéticas. Teoría escalar de la difracción. Aproximación de Fresnel y de Fraunhofer. Teoría vectorial y esparcimiento de ondas.
2. *Coherencia Óptica:* Campo escalar y señal espacio-temporal. Representación analítica de señales temporales. Propiedades de coherencia de un campo de radiación. Interferómetro de Michelson. Coherencia temporal. Interferómetro de Young. Función de coherencia mutua. Coherencia espacial. Luz parcialmente coherente.
3. *Procesado Óptico de la Información:* Sistemas lineales invariantes espacialmente. Difracción: Transformada de Fourier de una escena. Diferentes configuraciones. Filtrado espacial. Filtros binarios y de van der Lugt. Procesado óptico coherente. Reconocimiento de imágenes por correlación óptica. Correlador de transformada conjunta.
4. *Óptica guiada:* Guía de onda dieléctrica plana. Modos. Fibra óptica. Fibra homogénea e inhomogénea (gradiente de índices). Atenuación y dispersión.
5. *Óptica de fotones:* Energía, cantidad de movimiento y estado de polarización del fotón. Estadística del flujo de fotones. Interacción de fotones con átomos. Emisión y absorción estimulada. Fotoluminiscencia.
6. *Óptica no lineal:* Polarización no lineal. Procesos de segundo orden. Generación de segundo armónico. Mezclado de tres ondas. Conversión en frecuencia. Amplificación paramétrica. Procesos de tercer orden. Generación de tercer armónico. Mezclado de cuatro ondas y conjugación de fase. Efecto electro-óptico lineal y cuadrático. Moduladores electro-ópticos. Índice de refracción no lineal. Medios no lineales anisotrópicos y dispersivos. Autoenfoco. Solitones ópticos.
7. *Láseres:* Absorción y emisión de radiación. Probabilidades de transición. Resonadores ópticos. Densidad de modos. Amplificación de radiación láser. Inversión de población. Esquemas de bombeo de tres y cuatro niveles. Haces gaussianos. Características de salida: distribución espectral y espacial. Tipos de láseres. Medio activo: de gas, de estado líquido y estado sólido. Dinámica temporal: láseres continuos y pulsados.
8. *Metrología Óptica:* Técnicas de moiré. Medida de deformaciones. Holografía. Tipos de hologramas. Interferometría holográfica: en tiempo real, doble exposición y promedio temporal. Moteado óptico: Speckle. Tamaño del moteado. Técnicas de speckle: fotografía e interferometría speckle. DSPI. Test ópticos.
9. *Memorias holográficas:* Principios básicos de almacenamiento holográfico de datos. Componentes. Multiplexado: angular, por desplazamiento, codificación de la fase, espectral. Holografía dinámica en cristales fotorrefractivos. Efecto fotorrefractivo.

Seminario de mecánica cuántica

Correlativas: Mecánica Cuántica II, Mecánica Estadística

Programa

1. Revisión de los postulados de la Mecánica Cuántica. Matriz densidad. Medidas proyectivas. Medidas generalizadas.
2. Integrales de camino en Mecánica Cuántica. Construcción de la integral de camino. Ejemplos: partícula libre, oscilador armónico. Integral de camino y mecánica estadística. Límite clásico. El doble pozo y el instantón.
3. Sistemas cuánticos de muchos cuerpos. Traza parcial y matriz densidad reducida. Aproximaciones de campo medio en sistemas fermiónicos, bosónicos y sistemas de espines. Transformaciones de Bogoliubov. Teorema de Wick.
4. Entrelazamiento cuántico. Definición para estados puros. Descomposición de Schmidt. Entropía de entrelazamiento. Desigualdades de Bell. Definición para estados no puros. Criterios y medidas generales de entrelazamiento. Correlaciones clásicas y cuánticas. Entrelazamiento como recurso. Teleportación cuántica. Criptografía Cuántica. Teorema de la no-clonación cuántica. Destilación y dilución de entrelazamiento.
5. Sistemas cuánticos abiertos. Evolución temporal. Representación mediante operadores de Kraus. Decoherencia. Tomografía de estados y procesos cuánticos. El problema de la medición. Estados puntero.
6. Nociones de computación cuántica. Qubits. Compuertas y circuitos cuánticos. Paralelismo cuántico. Algoritmos cuánticos. Algoritmos de factorización y de búsqueda. Complejidad Computacional. Implementaciones Físicas.

Introducción a la Relatividad General

Correlativas: Electromagnetismo II– Álgebra Lineal

Es un curso introductorio a la teoría de Relatividad de Einstein, y a las técnicas matemáticas requeridas para su formulación: geometría diferencial y cálculo tensorial en variedades de Riemann.

La evaluación de los trabajos prácticos se realiza mediante un examen parcial y la final con un examen oral.

Programa.

Introducción. Relatividad Especial. Cálculo tensorial en el espacio de Minkowski. Fluidos ideales relativistas, tensor de energía-impulso. Gravitación y curvatura. Corrimiento al rojo gravitatorio. Variedades de Riemann y la geometría espacio-temporal. Principio de Equivalencia. Cálculo Tensorial. Transporte paralelo. Derivada covariante. El tensor de curvatura. Geodésicas. Física en espacios levemente curvos. Ecuación de Einstein. Campos gravitatorios débiles. Ondas gravitatorias. Espacios con simetría esférica, métrica de Schwarzschild. Solución en el interior de las estrellas. Trayectorias en la geometría de Schwarzschild, corrimiento del perihelio en órbitas planetarias y deflexión gravitatoria de la luz. Singularidades y agujeros negros. Introducción a la Cosmología relativista, la métrica de Robertson-Walker.

Bibliografía.

Libros introductorios (nivel similar al curso)

8. Bernard F. Schutz, *A first course in General Relativity*, 2nd edition. (Cambridge University Press, Cambridge, 2009).
9. Sean Carroll, *SPACETIME AND GEOMETRY. Introduction to General Relativity*. (Pearson Education, San Francisco, 2004).
10. James B. Hartle, *GRAVITY. An introduction to Einstein's General Relativity*. (Pearson Education, San Francisco, 2003).
11. M. P. Hobson, G. P. Efstathiou y A. N. Lasenby, *General Relativity. An Introduction for Physicist*, (Cambridge University Press, Cambridge, 2006).
12. Ray dolInverno, *Introducing Einstein's Relativity*, (Clarendon Press, Oxford, 1992).
13. Ta-Pei Cheng, *Relativity, Gravitation, and Cosmology. A basic Introduction*, (Oxford University Press, Oxford, 2005).

Libros clásicos (más avanzados que este curso)

- Robert M. Wald, *General Relativity*, (The University of Chicago Press, Chicago, 1984).
- L. D. Landau and E. Lifshitz, *Classical Theory of Fields*, forth edition (Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Massachusetts, 1994).
- Steven Weinberg, *Gravitation and Cosmology: Principles and applications of the General Theory of Relativity*, (John Wiley & Sons, New York, 1972).
- Charles W. Misner, Kip S. Thorne, John Archibald Wheeler, *Gravitation*, (W. H. Freeman and Company, San Francisco, 1973).
- W. Pauli, *Theory of Relativity*, (Dover Publications, New York, 1981).
- Hermann Weyl, *Space, Time, Matter*, (Dover Publications, New York, 1952).
- V. Fock, *The Theory of Space, Time, and Gravitation*, (Pergamon Press Inc., New York, 1959).

Libros avanzados

- S. W. Hawking & G. F. R. Ellis, *The large scale structure of space-time*, (Cambridge University Press, Cambridge, 1973).

- S. Chandrasekhar, *The Mathematical Theory of Black Holes*, (Clarendon Press, Oxford, 1992).
- John Stewart, *Advanced General Relativity*, (Cambridge University Press, Cambridge, 1991).
- Stephani, H., Kramer, D., Maccallum, M., Hoenselaers, C., Herlt, E.: *Exact Solutions to Einstein's Field Equations*, Second edition, Cambridge Univ. Press (2003).

Libros más elementales o de divulgación

- Hermann Bondi, *Relativity and Common Sense*, (Dover Publications, New York, 1980).
- Wolfgang Rindler, *Relativity*, (Oxford University Press, Oxford, 2001).
- Robert M. Wald, *Space, Time, and Gravity*, (The University of Chicago Press, Chicago, 1992).
- Robert Geroch, *General Relativity from A to B*, (The University of Chicago Press, Chicago, 1981).
- Erwin Schrödinger, *Space-Time Structure*, (Cambridge University Press, Cambridge, 1950).
- P. A. M. Dirac, *General Theory of Relativity*, (Princeton University Press, Princeton, 1996).
- G. 't Hooft, *Introduction to General Relativity*, Caputcollege 1998, Utrecht University.

Geometría Diferencial

- Bernard F. Schutz, *Geometrical methods of mathematical physics*, (Cambridge University Press, Cambridge, 1980).
- Barret O'Neill, *Elementary Differential Geometry*, (Academic Press Inc., New York, 1966).
- Barret O'Neill, *Semi-Riemannian Geometry*, (Academic Press, San Diego, 1983).
- Harley Flanders, *Differential Forms*, (Academic Press, New York, 1963).
- L. P. Eisenhart, *Riemannian Geometry*, (Princeton University Press, 1949).

Simulaciones Computacionales en Física

Correlativas: "Mecánica Estadística I".

Sugerencia: es conveniente tener conocimientos básicos de programación y cálculo numérico para cursar esta materia, se sugiere tomar previamente una asignatura que incluya estos contenidos como, por ejemplo, la materia "Computación" que se dicta en este departamento.

Fundamentación:

Tradicionalmente el campo de trabajo de los físicos se ha dividido en experimental y teórico. A partir de la aparición de las computadoras y de su progresiva eficiencia se fue consolidando un nuevo abordaje a los problemas físicos a partir de la simulación computacional. Este abordaje permite la resolución de modelos teóricos de gran complejidad (cuya resolución analítica no se conoce) con un nivel de precisión comparable o por debajo muchas veces del error experimental. Así, la simulación computacional, se ha convertido en un área de trabajo de gran actividad para los físicos y juega un rol importante a la hora de vincular los otros campos de trabajo en la disciplina y facilitar la interacción y cooperación. Por estas razones, consideramos de importancia la inclusión de una materia a nivel de grado donde los alumnos puedan enterarse de las posibilidades y alcances de esta área de trabajo, ya sea porque van a utilizar sus herramientas o a colaborar con expertos del campo.

Por otra parte, las simulaciones computacionales en mecánica estadística tienen un gran valor formativo a nivel de grado ya que permiten visualizar la conexión entre las leyes de la mecánica estadística y la termodinámica. Con relativa facilidad se pueden montar "experimentos" numéricos a través de los cuales explorar la conexión entre las leyes del mundo microscópico y macroscópico.

Por las razones expuestas, el siguiente programa es de contenidos generales pero pone énfasis en la mecánica estadística.

Programa de la materia

Unidad 1: Introducción a las simulaciones computacionales.

1.1 Rol que juegan las simulaciones computacionales en la investigación científica, en particular: en la investigación en física. Ejemplos.

1.2 Repaso de elementos básicos de programación y cálculo numérico (integración, interpolación, diagonalización, etc.). Aplicaciones a problemas físicos, por ejemplo: resolución de la ecuación de Schrödinger en una dimensión para un potencial arbitrario.

Unidad 2: Simulaciones Computacionales en Mecánica Estadística.

2.1 Repaso de conceptos centrales de la mecánica estadística. Visiones de Gibbs y Boltzmann. Ergodicidad. Equilibrio. Fluctuaciones.

2.2 Simulaciones de Dinámica Molecular

Introducción: Sólidos, líquidos, gases. Uso de potenciales. Objetivos de una simulación.

Algoritmos para resolver las ecuaciones de Newton. Preparación de una simulación: Condiciones iniciales y condiciones de contorno. Ensamblados NVE, NVT, NpT. Propiedades que se pueden obtener en una simulación. Variables de estado termodinámicas, propiedades estructurales, funciones de correlación estáticas: factor de estructura, función de correlación de pares, funciones de correlación temporales y coeficientes de transporte: difusividad, viscosidad. Ejemplos y aplicaciones. Transición de fase sólido-líquido.

2.3 Método de Montecarlo

Muestreo Simple. Muestreo pesado. Cadenas de Markov. Balance detallado. Algoritmo de Metrópolis. Ejemplos y aplicaciones: Simulación de un sistema de espines en una red bidimensional. Modelo de Ising. Transición de fase de 2do orden.

Unidad 3: Introducción a la simulación de la dinámica de sistemas fuera del equilibrio y procesos estocásticos.

3.1 Simulaciones estocásticas. Ecuación maestra. Algoritmos de simulación estocástica. Aplicaciones a sistemas dinámicos. Caminata aleatoria.

.

Unidad 4: La simulación computacional en la investigación en física. Esta unidad dependerá del docente a cargo.

Para ver el contenido de esta unidad en el año en curso, consultar la página WEB de la materia: www.fisica.unlp.edu.ar/materias/simulaciones

Bibliografía:

“Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing”. (Cambridge University Press, 2007)

M.E. M.P. Allen and D.J. Tildesley. “Computer Simulation of liquids”. (Oxford University Press, New York, 1987).

D.Frenkel and B. Smit. “Understanding Molecular Simulation, from Algorithms to applications”. (Academic Press, San Diego, 1996).

J. Newman and G.T. Barkema. “Montecarlo Methods in Statistical Physics”. (Oxford University Press, New York, 1999)

C. W. Gardiner. “Handbook of Stochastic Methods: For Physics, Chemistry and the Natural Sciences” (Springer, Berlín, 1985)

Termodinámica

Correlativas: materias de 1º y 2º año.

Programa

1. Formulación axiomática de la termodinámica. Grados de libertad macroscópicos y microscópicos. Principios de conservación. Variables extensivas. Equilibrio termodinámico: postulado I. Espacio de estados (de equilibrio), coordenadas termodinámicas. Trabajo. Paredes adiabáticas y determinación de la energía interna. Calor. Entropía: postulados II y III. El problema de la termodinámica.

2. Interludio matemático. Derivadas parciales y funciones diferenciables. Diferencial. Tres sentidos impropios de la palabra diferencial; diferenciales “inexactos”. Factor integrante. Sentido de la notación $(\partial f/\partial x)|_{y,z}$ para derivadas parciales. Regla de la cadena. Función implícita, diferencial de una función implícita. Funciones homogéneas. Teorema de Euler y consecuencias.

3. Parámetros intensivos y ecuaciones de estado. Relación fundamental en energía. Consecuencias de la homogeneidad de la energía: ecuaciones de Euler y Gibbs-Duhem. Euler y Gibbs-Duhem en la representación entrópica. Ejemplos de relaciones fundamentales: gas ideal, mezcla de gases ideales, fluido de van der Waals, radiación electromagnética, goma.

4. Equilibrio termodinámico. Condiciones de equilibrio a partir del principio extremal entrópico. Equilibrio térmico. Equilibrio mecánico. Equilibrio respecto de flujos de materia. Equilibrio químico. Unidades de entropía y temperatura.

5. Potenciales termodinámicos. Principio extremal para la energía. Cambio de variables: transformadas de Legendre. Potenciales termodinámicos y funciones de Massieu. Principio extremal para los potenciales. Interpretación física de los potenciales: sistemas en contacto con baños; utilidad para calcular trabajo o calor en procesos particulares. Proceso de Joule-Thomson.

6. Susceptibilidades y relaciones de Maxwell. Susceptibilidades. Susceptibilidades “canónicas”. Relaciones de Maxwell. Relaciones básicas entre derivadas primeras. Jacobiano y propiedades. Uso del Jacobiano para resumir las relaciones básicas. compresión adiabática, compresión isotérmica, expansión libre, calor específico a volumen constante. Mezcla de gases ideales.

7. Procesos termodinámicos. Procesos reversibles e irreversibles. Procesos cuasiestáticos y procesos reversibles. Procesos adiabáticos. Baño térmico e intercambio general de calor ($dQ \leq TdS$). Baño de presión. Teorema del trabajo máximo. Máquinas con dos fuentes térmicas. Eficiencia de motores y

heladeras. Ciclo de Carnot. Ciclos Otto y Diesel. Motor endoreversible. Segunda ley de la termodinámica: enunciados de Clausius y Thomson-Kelvin a partir del postulado de máxima entropía.

8. Estabilidad termodinámica. Requisitos de convexidad debidos al principio extremal para entropía y energía. Estabilidad local y estabilidad global. Condiciones para las derivadas segundas. Consecuencias matemáticas del requisito de estabilidad en potenciales y susceptibilidades. Principios de LeChatelier y de LeChatelier-Braun.

9. Fluctuaciones. Subsistemas independientes y teorema central del límite. Interpretación microscópica de la entropía: entropía de Boltzmann. Probabilidad de una fluctuación: fórmula de Einstein. Relación con las susceptibilidades. Expresión para las fluctuaciones de un sistema con baño térmico y de presión.

10. Transiciones de fase. Transición de fase como consecuencia de inestabilidad: análisis en términos de U , F y G . Estudio a P y T fijas: casos de minimización del potencial del Gibbs. Clasificaciones de las transiciones de fase: clasificación de Ehrenfest, continuas y discontinuas. Diagramas de fase en el plano P , T y en V , T . Coexistencia de dos y tres fases, regla de la palanca. Transiciones de primer orden: calor latente y ecuación de Clausius-Clapeyron. Transición de fase a partir de una ecuación de estado con inestabilidades: ejemplo tipo van der Waals. Regla de las fases de Gibbs.

11. Sistemas binarios. Soluciones diluidas, forma de la energía libre. Presión osmótica, ley de Raoult, cambio del punto de fusión. Diagramas de fase: sistemas parcialmente miscibles, sistemas miscibles con distinta temperatura de transición de fase, eutéctico.

12. Transiciones de fase continuas. Parámetro de orden. Divergencias y estabilidad. Singularidades y exponentes críticos. Teoría de Landau para transiciones de primer y segundo orden. Hipótesis de escala. Universalidad.

13. Superficies. Interfases y superficie de Gibbs. Tensión superficial y fórmula de Laplace. Equivalente mecánico y superficie de tensión. Términos de superficie en los potenciales. Efectos de curvatura. Adsorción y mojado.

14. Metaestabilidad. Teoría clásica de nucleación. Metaestabilidad. Metaestabilidad y espinodal en campo medio. Metaestabilidad en sistemas binarios (binodal y espinodal). Límite de metaestabilidad y (pseudo)espinodal en sistemas reales.

15. Fenómenos magnéticos. Momento dipolar magnético y magnetización. Energía magnética. Teorema de Poynting. Trabajo magnético. Energía magnética en termodinámica: campo aplicado y magnetización como variables naturales. Susceptibilidad magnética y relaciones constitutivas (diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, antiferromagnetismo). Paramagneto aislado. Factor demagnetizante. Demagnetización adiabática.

16. Termodinámica de procesos irreversibles. Producción de entropía global y local. Hipótesis de equilibrio local: corriente de entropía, corrientes y afinidades. Ejemplos. Sistemas Markovianos y aproximación lineal. Teorema de Onsager. Efectos termoeléctricos. Conductividad térmica y eléctrica. Efecto Seebeck. Efecto Peltier. Efecto Thomson. Susceptibilidad no Markoviana (respuesta dinámica). Trabajo y producción de entropía. Susceptibilidad dinámica. Susceptibilidad dependiente de la frecuencia. Susceptibilidad imaginaria: desfase y disipación. Relajación de Debye. Relaciones de Kramers-Kronig.

17. Reacciones químicas. Reacción química: ley de las proporciones definidas, grado de avance. Conservación de la masa y ecuación estequiométrica. Velocidad de reacción. Ecuación de equilibrio de la reacción. Grado de reacción. Producción de entropía durante una reacción química, afinidad química. Reacciones en gases ideales: constante de equilibrio y ley de acción de masas. Calor de reacción. Cambio de volumen.

18. Postulado IV. Tercera ley (ley de Nernst) y principio de Thomsen-Berthelot. Enunciado de Planck de la tercera ley (cuarto postulado). Consecuencias.