

PROGRAMA DE CURSO

Código	Nombre			
FI6034	Introducción a la Física de la Materia Condensada			
Nombre en Inglés				
Introduction to Condensed Matter Physics				
créditos	Unidades Docentes	Horas de Cátedra	Horas Docencia Auxiliar	Horas de Trabajo Personal
6	10	3	0	7
Requisitos			Carácter del Curso	
FI4001			Electivo licenciatura	
Resultados de Aprendizaje				
<p>Tópicos principales del curso: estructura, excitaciones elementales, estados topológicos y fraccionalización.</p> <p>Audiencia objetivo: recomendado principalmente para estudiantes de postgrado principiantes. También puede ser útil para estudiantes de pregrado avanzados.</p> <p>Requisitos: Mucha mecánica cuántica. Los contenidos de mecánica estadística y física del sólido, son esenciales, pero serán cubiertos en el mismo curso.</p>				

Metodología Docente	Evaluación General
Curso de postgrado. Cubre los aspectos principales de la fenomenología y teoría del comportamiento cuántico de la materia. 6 créditos.	Tareas semanales. Examen en forma de presentación oral de un paper escogido de acuerdo de los intereses comunes entre alumn@ y el profesor.

Unidades Temáticas

Número	Nombre de la Unidad	Duración en Semanas
1	Materia condensada: objetivo de estudio, alcance y posición dentro de las ciencias físicas.	1
Contenidos		Resultados de Aprendizajes de la Unidad
Aspectos generales, ordenes de magnitud y posición dentro de la física		Ordenes de magnitud de un sistema en materia condensada
		Referencias a la Bibliografía

	Nombre de la Unidad	Duración en Semanas
2	Estructura	
Contenidos	Resultados de Aprendizajes de la Unidad	Referencias a la Bibliografía
1) Difracción y scattering de "insert wave here" 2) Cristales y Quasicristales 3) Teorema de Bloch, la red recíproca y la zona de Brillouin	1) Difracción y scattering de "insert wave here" En esta sección revisaremos experimentos de difracción de diversas señales ondulatorias (?) cuando pasan a través de la materia. Hay un ejercicio matemático básico, consistente en relacionar la señal difractada con la transformada de Fourier de la "estructura" de la materia. Pongo comillas, pues dicha estructura no es algo dado a priori, sino muchas veces no es otra cosa que la imagen que nos formamos a través de estos mismos experimentos. Junto a este ejercicio, hay variadas sutilezas físicas que han ayudado a completar la imagen que tenemos de dicha estructura. En cierto sentido, que precisaremos en clases y en las tareas, hemos aprendido a ver aquello invisible a simple vista. Las señales principales a estudiar son rayos X, electrones y neutrones, de variada energía. 2) Cristales y Quasicristales Una de las principales conclusiones de los experimentos de difracción es que un gran número de sólidos admiten una clasificación como cristales. Esto es patrones periódicos, que repiten, en una o más direcciones, una unidad básica. Un ladrillo fundamental. La noción de cristales es previa a la teoría moderna de la materia, y su formulación matemática no requiere de ella. En esta unidad	

	<p>fundamentaremos los principios básicos de dicha teoría. A través de ejemplos veremos como dicha teoría es de gran utilidad en la descripción de sólidos. Finalmente veremos un ejemplo que viola los preceptos matemáticos de cristalinidad, los quasicristales. Dichos conceptos son de gran importancia en estudios modernos de "twistronics" en materiales de baja dimensionalidad.</p> <p>3) Teorema de Bloch, la red recíproca y la zona de Brillouin</p> <p>En esta sección profundizaremos el estudio de fenomenos ondulatorios propagándose por un cristal. Enunciaremos y demostraremos de varias formas el teorema de Bloch. Construiremos el concepto de red recíproca y de zona de Brillouin, concepto extremadamente simple, que es esencial para toda discusión que mezcle ondas y cristales en la misma idea. Es la puerta de entrada a nociones topológicas inesperadas.</p>	
--	---	--

Número	Nombre de la Unidad	Duración en Semanas
3	Excitaciones Elementales	
Contenidos	Resultados de Aprendizajes de la Unidad	Referencias a la Bibliografía
1)Electron/agujero 2)Spin 3)Fonones	<p>1) Electron/agujero</p> <p>El concepto de electrón-agujero se refiere a una excitación que se comporta como un par de partículas de carga opuesta en un sólido.</p> <p>Un agujero se crea cuando un electrón se excita desde su estado de equilibrio a una órbita más alta, dejando una "ausencia" de electrón en su posición original. Esta ausencia se comporta como una partícula cargada positivamente y se llama agujero.</p> <p>En un semiconductor los electrones se mueven entre los átomos. Cuando un electrón se excita, dejando un agujero, tanto el electrón como el agujero pueden moverse a través del material. El movimiento de los electrones y los agujeros puede ser controlado mediante campos electromagnéticos. Los electrones y los agujeros juegan un papel crucial en los dispositivos semiconductores, como los diodos y los transistores. Estos ultimos son los pilares básicos en los que se basa nuestra tecnología digital. Por ejemplo, en un diodo de</p>	

	<p>unión pn, los electrones y los agujeros se recombinan en la región de unión, liberando energía en forma de luz o calor. En un transistor de efecto de campo, el control del flujo de electrones y agujeros a través de una región conductora permite amplificar y controlar una señal eléctrica.</p> <p>En esta unidad estudiaremos el mecanismo de formación de pares electron-agujero, una teoría consistente y completa, su respuesta cuántica a campos externos y los efectos que dichas excitaciones tienen sobre las propiedades generales de los sólidos. Introduciremos el formalismo de segunda cuantización, mediante campos fermiónicos, para dar cuenta de estas excitaciones en forma conveniente y expedita.</p> <p>2) Spin</p> <p>Las excitaciones de spin son los cambios en el estado cuántico del spin de los electrones que componen el material. El spin es una propiedad intrínseca de (en este caso) los electrones, que está asociada con un momento angular intrínseco. Tiene una magnitud cuantizada.</p> <p>Las excitaciones de spin pueden ocurrir cuando los electrones cambian su estado de spin dentro de una banda de energía determinada. Esto puede suceder debido a diferentes interacciones entre los electrones: interacciones de intercambio, interacciones con un campo magnético externo o interacciones de spin-orbita.</p> <p>Un ejemplo común de excitaciones de spin son los magnones. Los magnones son cuasipartículas que corresponden a las excitaciones colectivas de spin en un sólido.</p> <p>Estas excitaciones tienen una relación muy íntima con inestabilidades magnéticas, como ferromagnetismo o antiferromagnetismo. Nuestro interés en ellas tiene un origen en dos orígenes: (1) nos servirán de vehículo para introducir las funciones de respuesta lineal, herramienta teórica de gran importancia para la descripción de experimentos, (2) serán esenciales en la última parte del curso cuando veamos fraccionalización.</p> <p>3) Fonones</p> <p>Los fonones son cuasipartículas asociadas a las excitaciones colectivas de vibración en un sólido. Estas excitaciones se propagan a través del material como ondas.</p> <p>Nuestro estudio se enfocará en los efectos de los fonones. Los fonones juegan un papel fundamental en la física de la materia condensada, ya que influyen en</p>	
--	--	--

	<p>las propiedades térmicas, mecánicas, ópticas y eléctricas de los materiales. La conductividad térmica de un material está relacionada con la velocidad de propagación de los fonones. Las propiedades superconductoras de diversos materiales dependen de sus capacidades para albergar y transmitir fonones, etc. Las propiedades de los fonones serán descritas mediante la introducción de segunda cuantización de campos bosónicos.</p>	
--	--	--

Número	Nombre de la Unidad	Duración en Semanas
4	Estados topológicos	
Contenidos	Resultados de Aprendizajes de la Unidad	Referencias a la Bibliografía
1) Solitones en poliacetileno 2) Efecto Hall Entero 3) Efecto Hall de Spin Cuántico	<p>1) Solitones en poliacetileno</p> <p>Los solitones en el poliacetileno son defectos topológicos que ocurren en una cadena polimérica de poliacetileno. Estos solitones se caracterizan por ser ondas estables y localizadas que se propagan a lo largo de la cadena polimérica sin dispersarse.</p> <p>El poliacetileno es un polímero formado por una secuencia repetitiva de unidades de acetileno (-C=C-), que están conjugadas electrónicamente. Esto quiere decir que los electrones en la cadena polimérica pueden moverse de manera más libre y delocalizada, lo que le confiere al poliacetileno propiedades semiconductoras que son efectivamente unidimensionales.</p> <p>Los solitones en el poliacetileno surgen debido a las distorsiones en la estructura de la cadena polimérica. Los solitones kinks son regiones de la cadena polimérica donde hay una torsión o deformación en el enlace carbono-carbono (-C-C-). Estas deformaciones crean una perturbación en la conjugación electrónica, lo que resulta en una localización de la carga a lo largo de la cadena. Por otro lado, los solitones antikinks son regiones donde se produce una deslocalización de la carga. Una característica interesante de los solitones en el poliacetileno es que se comportan como partículas con carga, spin y masa efectivos, y pueden interactuar entre sí. Estas interacciones pueden dar lugar a fenómenos complejos, como la aniquilación o la creación de nuevos solitones. Los solitones en el poliacetileno han sido objeto de estudio en la física de polímeros y la física de materia condensada. Su presencia y su</p>	

	<p>comportamiento afectan las propiedades eléctricas y ópticas del poliacetileno, y pueden tener aplicaciones en dispositivos electrónicos y optoelectrónicos, como transistores orgánicos y celdas solares.</p> <p>En 1979 Su-Schrieffer-Heeger[5] propusieron un modelo teórico simplificado para describir las propiedades de estos polímeros. Con el tiempo, este sería reconocido como el primer ejemplo, en materia condensada, de un modelo topológico. En esta unidad, revisaremos las principales ideas y en las tareas, aprovechando la simplicidad otorgada por la estructura unidimensional, reproduciremos los principales resultados tras este paper fundamental.</p> <p>2) Efecto Hall entero</p> <p>El efecto Hall cuántico entero es un fenómeno físico que ocurre cuando un gas de electrones en 2D se somete a un campo magnético perpendicular a su plano. Fue descubierto por Klaus von Klitzing en 1980[6] y le valió el Premio Nobel de Física en 1985.</p> <p>En el efecto Hall cuántico entero, se observa una serie de mesetas en la resistencia Hall medida en función de la densidad de corriente y el campo magnético aplicado. Estas mesetas corresponden a valores discretos de la resistencia Hall que son múltiplos fraccionarios de una constante fundamental, conocida como constante de von Klitzing (RK).</p> <p>El efecto Hall cuántico entero tiene importantes implicaciones en la metrología y la definición precisa de las unidades eléctricas. Se utiliza como estándar para la calibración de resistencias y ha permitido mediciones extremadamente precisas en sistemas de cuantización de Hall.</p> <p>Una verdadera revolución en los fundamentos de la física de la materia condensada teórica se gestó con la explicación del efecto Hall cuántico por parte de TKNN.</p> <p>TKNN se refiere a D. J. Thouless, M. Kohmoto, M. P. Nightingale y M. den Nijs en 1982[7]. El trabajo TKNN estableció una conexión entre la teoría de bandas y la topología, y proporcionó una descripción de los estados cuánticos de Hall entero.</p> <p>En su trabajo, TKNN introdujeron un número entero conocido como número de Chern (o invariante TKNN), que caracteriza la topología de los estados cuánticos en sistemas</p>	
--	--	--

	<p>bidimensionales. Este número de Chern está relacionado con la conductividad cuántica Hall entera y juega un papel fundamental en la descripción de los estados topológicos.</p> <p>El número de Chern se calcula a través de la integral de la curvatura de Berry, que es una cantidad geométrica que describe la fase adquirida por una función de onda en un ciclo cerrado en el espacio de momentos. La topología de los estados cuánticos se manifiesta en la cuantización del número de Chern, lo que implica la existencia de estados robustos y protegidos contra perturbaciones locales.</p> <p>El trabajo de TKNN fue un hito importante en el campo de la física de la materia condensada y la teoría cuántica de campos. Estableció las bases teóricas para entender los efectos topológicos en sistemas cuánticos, como el efecto Hall cuántico entero, y ha sido fundamental para el desarrollo de la física de la materia topológica. Hoy en día, la teoría TKNN sigue siendo ampliamente utilizada y ha influido en una amplia gama de áreas de investigación, incluyendo la física de materiales topológicos, la espintrónica y la computación cuántica.</p> <p>En esta unidad revisaremos la fenomenología del efecto Hall cuántico entero y la explicación de TKNN. Cubriremos y usaremos conceptos tales como mariposa de Hofstadter[8], localización de Anderson[9] y curvatura de Berry[10].</p> <p>3) Efecto Hall de Spin Cúantico</p> <p>El efecto Hall de spin cuántico (QSHE, por sus siglas en inglés) es un fenómeno que describe la existencia de estados de borde con transporte cuántico polarizado de spin en aislantes topológicos bidimensionales[11, 12, 13].</p> <p>En un aislante topológico 2D, el volumen del material es aislante, mientras que aparecen estados de borde conductores debido a la topología no trivial de las bandas. Estos estados de borde están polarizados en spin, lo que significa que los electrones de espines opuestos se propagan en direcciones opuestas a lo largo de los bordes del material.</p> <p>El QSHE está protegido por la simetría de inversión temporal, lo que garantiza que los estados de borde sean robustos ante impurezas no magnéticas y perturbaciones locales. Este mecanismo de protección se basa en los efectos</p>	
--	---	--

	<p>combinados del acoplamiento espín-órbita y la topología de bandas.</p> <p>El descubrimiento del QSHE abrió nuevas posibilidades para la espintrónica y el procesamiento de información cuántica. Los estados de borde polarizados en espín pueden ser utilizados para crear y manipular corrientes de espín, que son esenciales para dispositivos basados en espín, como transistores de espín, filtros de espín y bits cuánticos (qubits) basados en espín.</p> <p>El QSHE se ha observado experimentalmente en varios materiales, incluyendo pozos cuánticos de HgTe/CdTe. Los esfuerzos teóricos y experimentales continúan explorando nuevos materiales y sistemas donde se pueda lograr el QSHE y descubriendo sus posibles aplicaciones en la electrónica y tecnologías cuánticas de próxima generación.</p> <p>En esta unidad reproduciremos los resultados más importantes de la teoría de aislantes topológicos, el invariante asociado al QSHE y los estados de borde. Desde el punto de vista técnico, desarrollaremos la teoría $\vec{k} \cdot \vec{p}$ que es la base para la descripción de un gran número de semiconductores.</p>	
--	--	--

Número	Nombre de la Unidad	Duración en Semanas
<p>1)Efecto Hall Cuantico Fraccionario 2) Teoría Efectiva de Chern-Simmons 3)Liquidos de Spin Cuánticos</p>	<p>Resultados de Aprendizajes de la Unidad</p> <p>1) Efecto Hall Cuántico Fraccionario El efecto Hall cuántico fraccionario (FQHE, por sus siglas en inglés) es un fenómeno fascinante que se observa en sistemas 2D expuestos a campos magnéticos intensos y bajas temperaturas[14]. Fue descubierto por los físicos Horst Störmer y Daniel Tsui en 1982[15], y explicado por Robert Laughlin en 1983[16]. Este descubrimiento fue reconocido con el Premio Nobel de Física en 1998.</p> <p>A diferencia del efecto Hall cuántico entero, donde se observan mesetas en la resistencia Hall a valores enteros de la constante de von Klitzing, en el FQHE se encuentran mesetas a valores fraccionarios de la conductividad de Hall. Esto implica que la</p>	<p>Referencias a la Bibliografía</p>

	<p>conductancia cuántica Hall se fracciona en múltiplos de una fracción racional de la constante de von Klitzing.</p> <p>El FQHE ocurre en sistemas 2D de electrones fuertemente correlacionados que se encuentran confinados en capas delgadas, como los pozos cuánticos. Bajo campos magnéticos intensos, los electrones se organizan en estructuras que forman una especie de estado colectivo altamente ordenado en la forma de un estado incompresible. La naturaleza del FQHE está relacionada con las fuertes interacciones entre los electrones y la emergencia de excitaciones de carga fraccionaria.</p> <p>El descubrimiento del FQHE abrió nuevas perspectivas en la física de la materia condensada y la teoría de la materia cuántica. El FQHE ha sido estudiado en una variedad de sistemas, incluidos pozos cuánticos semiconductores y grafeno. Además de su interés fundamental, el FQHE también tiene aplicaciones potenciales en la computación cuántica (topological quantum computing) y la realización de estados cuánticos topológicos.</p> <p>2) Teoría efectiva de Chern-Simons</p> <p>La teoría efectiva de Chern-Simons es un enfoque teórico utilizado para describir fenómenos físicos en sistemas con propiedades topológicas. En la teoría de Chern-Simons, se considera un campo gauge acoplado a una teoría de fermiones. El término clave es el término de Chern-Simons, que es un término de interacción que tiene una forma invariante bajo transformaciones de gauge.</p> <p>El término de Chern-Simons es topológico y no depende de la métrica espacial. Esto significa que la teoría no se puede derivar de un lagrangiano local. En cambio, el término de Chern-Simons introduce una dependencia topológica entre las configuraciones de campo y proporciona información sobre las propiedades topológicas del sistema.</p> <p>La teoría efectiva de Chern-Simons es especialmente relevante en la descripción de sistemas con estados cuánticos topológicos, como el efecto Hall cuántico fraccionario[17]. El enfoque de Chern-Simons permite describir estas propiedades topológicas de manera efectiva y capturar la física esencial de los sistemas en estudio.</p>	
--	--	--

	<p>La teoría efectiva de Chern-Simons ha sido ampliamente utilizada en la física de la materia condensada. Ha proporcionado herramientas valiosas para entender y clasificar los estados topológicos y ha abierto nuevas perspectivas en la investigación de la materia cuántica y la física de la materia exótica.</p> <p>3) Líquidos de Spin Cuánticos</p> <p>En contraste con los sólidos magnéticos, en los que los spines se ordenan, los líquidos de spin cuánticos son dominados por las fluctuaciones cuánticas y son caracterizados por la ausencia de orden magnético a bajas temperaturas. A pesar del imperante desorden, los spines están altamente correlacionados y exhiben complejos comportamientos colectivos emergentes. Debido a esto, los líquidos de spin pueden mostrar propiedades exóticas, como entrelazamiento cuántico macroscópico o como la existencia de excitaciones elementales con una fracción de spin, estas excitaciones se conocen como spinones.</p> <p>Los líquidos de spin han sido estudiados principalmente en sistemas bidimensionales y, mucho menos, en sistemas tridimensionales, como ciertos materiales magnéticos frustrados. Se ha encontrado evidencia experimental de la presencia de líquidos de spin cuánticos en sistemas de electrones fuertemente correlacionados, como los compuestos basados en materiales de cobre llamados cupratos superconductores de alta temperatura crítica. Estos sistemas presentan desafíos teóricos y experimentales significativos, y su estudio es relevante tanto para comprender la física fundamental de la materia cuántica. Asimismo, se tienen grandes expectativas para explorar posibles aplicaciones en el campo de la computación y la información cuántica. Los líquidos de spin cuánticos son un tema activo de investigación en materia condensada y prometen revelar nuevos fenómenos y propiedades intrigantes en el futuro.</p>	
--	--	--

Bibliografía General

[1] Steven M Girvin and Kun Yang. Modern Condensed Matter Physics. Cambridge University

Press, Cambridge, England, February 2019.

5

- [2] Subir Sachdev. Quantum Phase Transitions. Cambridge University Press, April 2011.
3. [3] Subir Sachdev. Quantum Phases of Matter. Cambridge University Press, March 2023.
 4. [4] Roderich Moessner and Joel E Moore. Topological phases of matter. Cambridge University Press, Cambridge, England, April 2021.
 5. [5] W. P. Su, J. R. Schrieffer, and A. J. Heeger. Solitons in polyacetylene. *Phys. Rev. Lett.*, 42:1698–1701, Jun 1979.
 6. [6] K. v. Klitzing, G. Dorda, and M. Pepper. New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized hall resistance. *Physical Review Letters*, 45(6):494–497, August 1980.
 7. [7] D. J. Thouless, M. Kohmoto, M. P. Nightingale, and M. den Nijs. Quantized hall conductance in a two-dimensional periodic potential. *Phys. Rev. Lett.*, 49:405–408, Aug 1982.
 8. [8] Douglas R. Hofstadter. Energy levels and wave functions of bloch electrons in rational and irrational magnetic fields. *Phys. Rev. B*, 14:2239–2249, Sep 1976.
 9. [9] P. W. Anderson. Absence of diffusion in certain random lattices. *Phys. Rev.*, 109:1492–1505, Mar 1958.
 10. [10] Di Xiao, Ming-Che Chang, and Qian Niu. Berry phase effects on electronic properties. *Rev. Mod. Phys.*, 82:1959–2007, Jul 2010.
 11. [11] C. L. Kane and E. J. Mele. Quantum spin hall effect in graphene. *Phys. Rev. Lett.*, 95:226801, Nov 2005.
 12. [12] B. Andrei Bernevig, Taylor L. Hughes, and Shou-Cheng Zhang. Quantum spin hall effect and topological phase transition in HgTe quantum wells. *Science*, 314(5806):1757–1761, December 2006.
 13. [13] Markus König, Steffen Wiedmann, Christoph Brune, Andreas Roth, Hartmut Buhmann, Lorenz W. Molenkamp, Xiao-Liang Qi, and Shou-Cheng Zhang. Quantum spin hall insulator state in HgTe quantum wells. *Science*, 318(5851):766–770, November 2007.
 14. [14] Horst L. Stormer, Daniel C. Tsui, and Arthur C. Gossard. The fractional quantum hall effect. *Rev. Mod. Phys.*, 71:S298–S305, Mar 1999.
 15. [15] D. C. Tsui, H. L. Stormer, and A. C. Gossard. Two-dimensional magnetotransport in the extreme quantum limit. *Phys. Rev. Lett.*, 48:1559–1562, May 1982.
 16. [16] R. B. Laughlin. Anomalous quantum hall effect: An incompressible quantum fluid with fractionally charged excitations. *Phys. Rev. Lett.*, 50:1395–1398, May 1983.
 17. [17] Shou-Cheng Zhang. The Chern–Simons–Landau–Ginzburg theory of the fractional quantum hall effect. *International Journal of Modern Physics B*, 06(01):25–58, January 1992.

•

Vigencia desde:	2023
Elaborado por:	ASN
Revisado por:	ASN