Materia Condensada y Sistemas Complejos.

Programa 2013 – R. A. Borzi

1- *Fases, diagramas de fases, transiciones, y simetrías.* Fases estructurales usuales: gas, líquido y sólido. El diagrama de fases y su conexión con las simetrías; el concepto de parámetro de orden. Ruptura de simetría y difracción de Bragg. Transiciones de fases de primer y segundo orden.

Más de tres estados de la materia: cristales líquidos; múltiples fases cristalinas y líquidas; vidrios. Generalización del concepto de fase. Fases no estructurales: conductores, aislantes y superconductores; ferromagnetos, paramagnetos, antiferromagnetos; ferroeléctricos. Método: estudio del estado fundamental, sus defectos y excitaciones.

2- *Clasificación de los materiales de acuerdo a sus interacciones.* Cristales moleculares y la interacción de Van der Waals. Sólidos iónicos. Sólidos covalentes. Metales.

*El estado fundamental: cómo describir la estructura cristalina.* Distintas fases dentro de la fase sólida. Alótropos. Descripción de una estructura: red y base; celda unidad y celda primitiva. Clasificación en 2 y 3 dimensiones. Estructuras más conocidas: ejemplos. Coordinación. Índices de Miller.

3- *Ondas en cristales: rayos x, electrones, neutrones.* Factor de dispersión atómico y factor de estructura. Dispersión elástica. Condiciones de difracción de Laue y ley de Bragg. Red recíproca: utilidad de este concepto. Extinciones; difracción de neutrones y antiferromagnetismo. Condición de Bragg y formación de ondas estacionarias: su efecto en la relación de dispersión de los electrones (formación de bandas) y de otras excitaciones del sistema.

4- *Dinámica de la red cristalina como ejemplo de excitaciones colectivas.* Propagación del sonido. Aproximación armónica. Cadena unidimensional de N átomos idénticos. Modos normales y la descripción clásica de las vibraciones de la red. El impulso cristalino; conteo del número de modos normales. Relación de dispersión. Paquetes de ondas, dispersión y velocidad de grupo; formación de ondas estacionarias. Cadena unidimensional con dos tipos de átomos. Modos acústicos y modos ópticos. Generalización de los resultados a 3 dimensiones e interacciones de mayor alcance.

*Tratamiento cuántico de las excitaciones: fonones.* Teorema de equipartición de la energía y el calor específico de un sólido. El modelo de Einstein: aciertos y limitaciones. El concepto de densidad de modos normales. Las excitaciones de la red como un gas de bosones libres no conservados. La interpolación entre el comportamiento de baja y alta temperatura: el modelo de Debye. Comparación con la radiación de un cuerpo negro. Dispersión inelástica de neutrones y la medida de la relación de dispersión de las excitaciones de un cristal. Efectos anarmónicos. Ley de Gruneisen.

5- *Anarmonicidad y transformaciones de fase displacivas*. Conección con la ferroelectricidad. Dieléctricos, ferroeléctricos, piroeléctricos, piezoeléctricos y electretes. Ley de Curie-Weiss para un dieléctrico: un primer ejemplo de criticalidad. Exponentes críticos.

6- *Inestabilidad del estado fundamental frente a fluctuaciones: orden y el Teorema de Mermin y Wagner.* Fusión de un cristal: fluctuación media cuadrática y criterio de Lindemann. Inestabilidad del cristal frente a fluctuaciones cuánticas: el caso del He. Estabilidad de los cristales para 1, 2 y 3 dimensiones; temperatura cero y temperatura finita. Su generalización: enunciado del teorema de Mermin y Wagner (MW). La inestabilidad de los cristales en 2 dimensiones; el caso del grafeno. Conexión entre MW, las excitaciones de más baja energía, y la ruptura de una simetría continua. El enunciado del teorema de Goldstone, su conexión con la multiplicidad de estados fundamentales.

7- *Los grados de libertad electrónicos en un sólido.* Gas de electrones, energía y temperatura de Fermi. Bandas de energía, acercamiento desde dos puntos de vista contrarios: electrones en un potencial periódico, y método de ligadura fuerte. Conductores, aislantes y semiconductores. Electrones y huecos como excitaciones en un semiconductor; masa efectiva de las cuasipartículas. Orbitales, bandas anchas y angostas, y la densidad de estados electrónicos de un metal.

8- Los grados de libertad m*agnéticos.* Origen electrostático de la interacción entre espines. Ferromagnetismo y antiferromagnetismo en sistemas aisladores. Magnetización y susceptibilidad magnética. El caso isotrópico: el hamiltoniano de Heisenberg. Teoría de campo medio; el campo molecular de Weiss.

Aciertos y flaquezas de la teoría de campo medio. Fenómenos críticos: exponentes críticos; vínculo con el tratamiento de la ferroelectricidad. Ondas de spin: tratamiento clásico en una cadena de spines y la relación de dispersión. Tratamiento cuántico: los magnones como cuasipartículas.

Magnetismo en metales. Paramagnetismo de Pauli. Ferromagnetismo de electrones ambulantes: el criterio de Stoner y los metales 3d. Antiferromagnetismo en metales y onda de densidad de spin: la inestabilidad de Peierls en un cristal unidimensional.

Anisotropía magnética. Modelo XY; parámetro de orden y vínculo con la transición de Bose-Einstein. Modelo de Ising. Teorema de Mermin y Wagner y orden magnético.

Paralelismo entre el orden magnético y el estructural. Resumen: estado fundamental, parámetro de orden y simetrías. Formación de dominios. Excitaciones colectivas y defectos.

9- *Breve introducción a la superfluidez.* Vínculo entre la transición superfluida y la transición de Bose-Einstein; el calor específico en la transición lambda. Aplicación del teorema MW: ausencia de transición en 2 dimensiones. Imposibilidad de superfluidez en un gas ideal de bosones: el criterio de Landau. El espectro de excitaciones para el 4He. Superfluidez debajo de la transición lambda. Conductividad térmica perfecta. Modelo de dos fluidos: el efecto fuente.

**Bibliografía.**

\* J. R. Hook and H. E. Hall (1991), *Solid State Physics, 2nd Edition,* John Wiley & Sons, New York.

***\* Ashcroft and Mermin (1976), Solid State Physics, Saunders College Publishing, London.***

***\* R. A. L. Jones (2004), Soft Condensed Matter, Oxford University Press, New York.***

***\* J. P. Sethna (2008), Entropy, Order Parameters, and Complexity, Clarendon Press, Oxford.***

***\* D. R. Tilley & J. Tilley (2003), Superfluidity and Superconductivity, 3rd Edition, Institute of Physics Publishing, Bristol.***

***\* D. I. Khomskii (2010), Basic Aspects of the Quantum Theory of Solids, Cambridge University Press, Cambridge.***