

Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Exactas

Nanosistemas Magnéticos

Profesor: Francisco Sánchez
Departamento de Física - FCE - UNLP

Programa tentativo

1. Introducción

Brevísima historia de los materiales magnéticos. ¿Cómo es un material magnético? Cantidades Magnéticas de interés práctico. Relaciones fundamentales entre magnitudes magnéticas. Unidades. Interacciones Magnéticas. Dominios. Partículas pequeñas. Materiales magnéticos blandos y ultra-blandos.

2. Diamagnetismo y paramagnetismo.

Enfoques clásico y cuántico. Momentos de átomos e iones, reglas de Hund. Momentos de iones 3d y 4f. Efecto del campo cristalino, complejos octaedrales, tetraedrales y planos, alto y bajo spin. Tratamiento estadístico del paramagnetismo, función de Brillouin. Susceptibilidad de un paramagneto, ley de Curie. Límite clásico, función de Langevin, ejemplos simples de superparamagnetismo. Paramagnetismo de Pauli, susceptibilidad independiente de la temperatura. Modelo simple, gas de electrones libres, aproximación de 1er orden.

3. Intercambio y orden magnético.

Overlap entre átomos hidrogenoides vecinos, asimetría de los estados cuánticos electrónicos. Evaluación de la interacción electrostática, intercambio directo. Hamiltonianos de Heisenberg y de Ising. Teoría del campo molecular. Ferromagnetismo, ley de Curie-Weiss, dependencia de la magnetización con la temperatura. Antiferromagnetismo, casos de dos y cuatro subredes (bcc y fcc). Temperaturas características, ejemplos. Ferrimagnetismo, óxidos de metales de transición. Puntos de compensación. Garnets de metales de transición y tierras raras. Expresiones empíricas para $M(T)$. Comparación de la energía de intercambio con la interacción dipolar.

4. Ondas de spin.

Conceptos básicos, ejemplo unidimensional, falla del modelo de campo medio a bajas temperaturas. Teoría de ondas de spin, Hamiltoniano de spin bajo campo externo, operadores s_x, s_y, s_z, s_+, s_- , número, "creación" y "aniquilación". Estados fundamental y excitados. Transformación de Fourier, autovalores del Hamiltoniano. Función de partición, obtención de $M(T)$. Ley de Bloch, ejemplo: Fe bcc. Predicciones para diferentes dimensiones. Extensión de la ley de Bloch. Comparación de las predicciones de las teorías de ondas de spin y de campo medio. Tratamiento semiclásico, obtención de las autofunciones. Caso de la red bcc. Ejemplos. 4. Puntos críticos. Breve descripción de la teoría de Landau. Magnetización espontánea e inducida. Exponentes críticos. Diagramas de Arrot.

5. Otros "intercambios" Orbitales atómicos y moleculares. Estados ligantes y antiligantes. Superintercambio, ejemplos: MnO, Fe₃O₄. Espinelas $M^{2+}Fe_2O_4$ (M = Cu, Ni, Co, Fe, Mn). Doble intercambio, manganitas. Intercambio en metales, electrones itinerantes. Curva de Slater-Pauling. Bandas y sub-bandas. Criterio de Stoner. Elementos de transición con diferente llenado de la banda 3d. Curva de Bethe-Slater. Modelo de bandas rígidas.

Ferromagnetos débiles y fuertes. Intercambio indirecto en metales: RKKY. Caso de las tierras raras. Caso de átomos magnéticos diluidos. Oscilaciones de Friedel y acoplamiento RKKY. Vidrios de spin, vidrios de clusters de spin, acoplamientos en multicapas. Frustración.

6. Anisotropía magnetocristalina.

Efectos de los acoplamientos spin-órbita y con el campo cristalino. Diferentes simetrías: cúbica, tetragonal, exagonal, ortorrómbica, etc. Expresiones fenomenológicas. Curvas de energía constante. Ejemplos: Fe, Co, Ni, magnetita. Medidas en monocristales. Ejes fáciles y duros. Campo de anisotropía. Anisotropías de superficie e interfaz. Extensión del límite superparamagnético por influencia de la anisotropía superficial en nanopartículas.

Anisotropía de intercambio. Concepto de válvula de spin, breve discusión del fenómeno de magneto-resistencia gigante en multicapas nanoscópicas.

Funcionamiento de lectoras magnéticas de válvula de spin.

7. Partículas pequeñas monodominio.

Partícula anisotrópica en presencia de un campo externo a $T \gg 0$, modelo de Stoner- Wohlfarth. Análisis para diferentes direcciones relativas campo-eje fácil e intensidades de campo. Rol del campo de anisotropía. Comportamientos histerético y reversible. Efectos dinámicos a T finita. Frecuencia de salto y tiempo de relajación. Contribución superficial a la anisotropía de partículas nanométricas. Viscosidad magnética de un sistema de partículas. Regímenes bloqueado y superparamagnético para diferentes técnicas de observación. Ejemplos: estudio Mössbauer del comportamiento de sistemas de partículas de hematita; comportamiento superparamagnético de un aerogel SiO_2 /magnetita observado por magnetometría.

8. Energía magnetostática EM. Dominios.

Introducción. Determinación de EM a partir de la distribución de magnetización en un cuerpo. Solución de las ecuaciones de Maxwell, aplicación a casos sencillos: esfera, cilindro, elipsoide. Dependencia de EM con el número de dominios.

Extensión a cuerpos con superficies no cuadráticas. Campo y factor demagnetizantes, campo efectivo, ejemplos. Anisotropía de forma. Paredes de dominio, energía de pared. Ancho de pared de equilibrio. Número de dominios en equilibrio y tamaño característico.

Técnicas de observación de dominios: Bitter, efecto Kerr (microscopía y MOKE), dispositivos de almacenamiento magneto-óptico de datos. Observación de dominios por efecto Faraday, microscopía TEM - Lorentz, microscopía SEM, y SEM con análisis de polarización (SEMPA), microscopía de fuerza magnética, topografía por difracción de RX y neutrones. Comparación de escalas de medición de los diferentes métodos.

9. Magnetostricción y energía magnetoelástica.

Introducción y definiciones. Expresiones fenomenológicas de la magnetostricción para diferentes simetrías. Dependencia de la magnetostricción con la magnetización. Efectos mecánicos sobre la magnetización, energía magnetoelástica. Definición general de anisotropía: magnetocristalina, magnetostática o de forma, magnetoelástica, etc. Sensores magnetoelásticos microcompuestos bi y tricapa basados en aleaciones amorfas. Aplicaciones.

10. Breve descripción de mecanismos de magnetización. Rotación de spines y desplazamiento de paredes de dominio. Anclaje. Ecuación de movimiento de una pared de dominio. Soluciones. Coercitividad estática y dinámica. Aplicación a microhilos superblandos.

11. Técnicas 1

Efecto Mössbauer.

Espectroscopía. Introducción y definiciones de cantidades de interés.

Desdoblamiento de los niveles nucleares en presencia de campos externos.

Espectro Mössbauer, intensidades de líneas. Dispositivo experimental, variación de la energía de los fotones mediante el efecto Doppler. Factor de Mössbauer - Lamb.

Ejemplos de espectros de materiales magnéticos: hematita, magnetita, FeSn₂, Fe₃Si, Fe₃Ge, Finemet. Evolución térmica de materiales magnéticos metaestables, nanocrystalización. Estudio de aerogeles nanocompuestos y de sensores de temperatura magnetoelásticos microcompuestos.

Barridos a energías Doppler fijas. Breve historia. Desarrollo actual. Medición de temperaturas críticas. Determinación de la dependencia del campo magnético hiperfino con la temperatura en sitios específicos. Evolución térmica de ferromagnetos amorfos y nanocrystalinos (finemet). Cinéticas de nanocrystalización. Estudio de transiciones de fase y relajaciones. Dinámica magnética, barridos isotérmicos bajo campos aplicados ac.

Ejemplos: bcc-Fe y nanocompuesto "Nanoperm".

12. Técnicas 2.

Uso de bobinas y solenoides, bobinas Helmholtz y toroides. Susceptibilidad ac.

Definiciones y aplicaciones. Dispositivo experimental. Medición en fase y en cuadratura, expresión compleja de la susceptibilidad. Tiempo de relajación.

Influencia del campo demagnetizante. Dependencias con la frecuencia y la temperatura. Susceptibilidad isotérmica y adiabática. Magnetometría VSM.

Dispositivo experimental, principios de la medición, sensibilidad. Magnetometría SQUID (Superconducting Quantum Interference Device). Termo-balanza magnética, principios de funcionamiento.

13. Materiales amorfos y nanocompuestos magnéticamente ultrablandos, Finemet y Nanoperm. Métodos de preparación y caracterización. Prestaciones comparativas. Dependencia de la respuesta magnética del tamaño cristalino. Modelo de la anisotropía aleatoria para amorfos y nanocompuestos.

14. Observación de sistemas de nanopartículas y vidrios de spin. Comportamiento dinámico, temperaturas características y su dependencia de la frecuencia. $M(T)$ después de enfriado con y sin campo aplicado. Regímenes bloqueado y superparamagnético.

Influencia de la distribución de barreras de energía. Influencia de las interacciones magnéticas entre partículas. Comportamiento de "partícula independiente" y comportamiento colectivo. Métodos de análisis de la susceptibilidad ac y la relajación de la magnetización (Cole-Cole, Jonsson, Dormann, etc.).

Bibliografía:

Introduction to Magnetic Materials B.D. Cullity, (Massachusetts, Addison-Wesley, 1972).

Introduction to the Theory of Ferromagnetism, Amikam Aharoni, Oxford Science Publications, 1998.

Modern Magnetic Materials. Principles and Applications. Robert C. O'Handley. John Wiley & Sons, Inc. New York, 2000.

Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, David Jiles, Chapman & Hall 1996.

Magnetic Domains (The analysis of Magnetic Microstructures), Alex Hubert y Rudolf Schäfer, Springer 1998.

J.L. Dormann, D. Fiorani y E. Tronc, Magnetic relaxation in fine particle systems.

Advances in Chemical Physics, Volume XCVIII, Ed. I. Prigogine and S.A. Rice, pages. 283-492.

Consultas:

Prosecretaría de Posgrado de la UNLP
Tel: 54-221-4236309
Mail: posgradounlp@presi.unlp.edu.ar
Página Web de la Facultad: www.exactas.unlp.edu.ar