

# UNA MIRADA A LA MECÁNICA ESTADÍSTICA

## **Sobre la Mecánica Estadística:**

La Física emplea un tratamiento de tipo estadístico cuando se trata de analizar sistemas que están compuestos por un número grande de elementos minúsculos, de componentes atómicos, por ejemplo. Es entonces cuando abandona la posibilidad de estudiar sistemáticamente las trayectorias o los estados cuánticos, produciéndose el paso hacia lo que conocemos como Mecánica Estadística, que es, simplemente, la aplicación de la estadística para el tratamiento de grandes poblaciones en el campo de la Mecánica en lo que concierne al movimiento de partículas u objetos cualesquiera sometidos a interacciones.

Este avance en el tratamiento de estos sistemas compuestos se produce ya en la segunda mitad del siglo XIX, prevaleciendo ya en esos años los conceptos mecánicos basados en probabilidades. Fue James Clerk Maxwell el primero en usar el nombre de Mecánica Estadística en el año 1879, el mismo año de su muerte.

La probabilidad sustituye, pues, al determinismo absoluto de la Física Newtoniana de su tiempo, y, a pesar de todo ello, y sobre todo debido al enorme número de elementos sobre el que se aplica la probabilidad, los resultados estadísticos que se obtienen son de una gran confiabilidad y exactitud. Suministra, por tanto, una base de relación de las propiedades microscópicas de los átomos y moléculas individuales con las propiedades macroscópicas de los cuerpos.

Permite no solo la especificación de los estados microscópicos del sistema, sino el tratamiento de conjuntos de sistemas repetidos y el enunciar el postulado básico de la igualdad de la probabilidad de los microestados de un sistema que se encuentre totalmente aislado, así como el desarrollo de técnicas de cálculo de probabilidades y promedios de las variables dinámicas.

Todo ello permite conseguir, por ejemplo, una explicación de toda la termodinámica clásica a partir de la Teoría Atómica, pudiéndose determinar tanto los potenciales termodinámicos como las propiedades termodinámicas básicas. En particular, la Mecánica Estadística puede ser usada para calcular las propiedades termodinámicas de los cuerpos a partir de los datos espectroscópicos de las moléculas individuales.

## **La Mecánica Estadística en la Universidad:**

Hoy día, la Mecánica Estadística es materia de Estudio en las Facultades de Física mediante currículos y programas de trabajo, estudio e investigación que se desarrollan y renuevan sin cesar, desde enfoques muy diversos en las distintas universidades.

Existen Departamentos de Física Estadística, dedicados a la docencia e investigación en el campo, en múltiples Facultades de Física, de Química, o en Centros de Ingeniería, siendo diferentes en las distintas universidades tanto los

niveles de información a los estudiantes como los sesgos o direcciones de las pautas de investigación en Física Estadística.

Sin nos preguntamos que ¿dónde se aprende o se desarrolla mejor la Física Estadística?, habría, naturalmente, que contestar mediante un análisis de las programaciones curriculares de los distintos centros universitarios en donde se imparten las correspondientes enseñanzas. Mostramos, a modo de ejemplo, algunas programaciones sobre Mecánica Estadística en diferentes universidades de habla hispana.

#### **Universidad Federico Santa María, de Chile:**

(<http://www.fis.utfsm.cl/fis330.htm>)

- 1 Conjuntos estadísticos (ensembles) y funciones de partición.
- 2 Gases clásicos ideales e imperfectos.
- 3 Ecuación de Van der Waals y transición de fase líquido-gas.
- 4 Gases cuánticos ideales; gases degenerados y correcciones de baja temperatura.
- 5 Magnetismo y teoría de Landau.
- 6 Grupo de renormalización y exponentes críticos.

Bibliografía Recomendada:

- E. Reichl, *A Modern Course in Statistical Physics*, 2nd. Ed. (J. Wiley & Sons)  
K. Huang, *Statistical MEchanics*, 2nd. Ed (J. Wiley & Sons)  
L. D. Landau and E.M. Lifshitz, *Statistical Physics*, 3rd. Ed. (Pergamon)

#### **Universidad de San Carlos de Guatemala:**

(<http://fisica.usac.edu.gt/pensum/pensum/node98.html>)

Sistemas y Ensembles.  
Teorema de Liouville.  
Ensemble microcanónico.  
Ensemble canónico.  
Ensemble gran canónico.  
Entropía y mecánica estadística.  
Condiciones de equilibrio.  
Conexión entre la estadística y la termodinámica.  
La entropía para un gas ideal.  
Consideraciones mecánico cuánticas.  
Funciones termodinámicas.  
Distribución de velocidades de Maxwell y la equiparación de la energía.  
Potencial químico en campos externos.  
Propiedades termodinámica de las moléculas diatómicas.  
Termodinámica y mecánica estadística de la magnetización.  
Distribución de Boltzmann.  
Distribución de Fermi-Dirac.  
Distribución de Bose-Einstein.  
Radiación de cuerpo negro.

Bibliografía recomendada:

- Kittel, C., *Elementary Statistical Physics*, John Willey & Son, (1,960).  
Kerson, H., *Statistical Physics Third edition*, Jon Willey & Son, (1,963).  
Mands, F., *Statistical Physics*, Addison Wesley international, Second Edition, (1,990).

**Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), España:**  
(<http://www.fisfun.uned.es/~est/fisest.htm>)

Descripción estadística de los sistemas macroscópicos  
Conexión entre la Mecánica Estadística y la Termodinámica  
Colectividad canónica  
Sistemas ideales en Mecánica Estadística clásica  
Gases reales en Mecánica Estadística clásica  
Colectividad canónica generalizada (gran canónica)  
Fundamentos de la Mecánica Estadística Cuántica  
Gases de Fermi-Dirac y Bose-Einstein degenerados  
Estudio estadístico del magnetismo  
Radiación electromagnética y sólidos  
Introducción a la Teoría Cinética

**Bibliografía Recomendada:**

REIF, F. *Fundamentos de Física Estadística y Térmica*. Editorial del Castillo (Madrid). Este libro, considerado ya como un clásico, podría perfectamente usarse como libro de texto, pues cubre los mismos temas que el libro base recomendado y está escrito de forma muy pedagógica. Sin embargo se encuentra agotado, por lo que su adquisición es prácticamente imposible. Se menciona aquí por si en la biblioteca que tenga a su alcance lo encuentra, y, en ese caso, le recomendamos que lo consulte como segundo libro de texto. Hay que indicar que la versión original americana puede adquirirse sin problemas y a un precio bastante asequible (F. Reif, *Fundamentals of Statistical and Thermal Physics*, McGraw-Hill).

ORTÍN, J. y SANCHO, J. M. *Curso de Física Estadística*. Edicions de la Universitat de Barcelona, colección UB-manuals nº 50 (Barcelona). Un libro muy recomendable, conciso y escrito con claridad y originalidad en muchos de los temas. Diferencia claramente entre los fundamentos de la teoría y las aplicaciones. El nivel de exposición es adecuado para este curso y trata todos los temas del programa, con la excepción de la Teoría Cinética.

FERNÁNDEZ TEJERO, C. y BAUS, M. *Física Estadística del equilibrio*. Editorial Aula Documental de Investigación (Madrid). Este es un libro muy reciente, que cubre la mayor parte de los temas de esta asignatura (con excepción de la Teoría Cinética), escrito con claridad y a un nivel parecido al del libro de texto recomendado.

WANNIER, G. H. *Statistical Physics*. Dover (New York). Este es un libro clásico excelente reeditado a un precio muy asequible (alrededor de las 2000 pts., al cambio). Muy recomendable por la claridad y profundidad en la exposición de los temas.

MANDL, F. *Física Estadística*. Editorial Limusa (México). Este es un libro muy bien escrito que presenta los fundamentos de la Mecánica Estadística de forma clara. Es recomendable, aunque tiene el gran inconveniente de que no trata algunos temas del programa (particularmente la parte de teoría cinética). Existe una segunda edición -no traducida- *Statistical Physics* (John Wiley, 1988) que es más recomendable para quien pueda leer en inglés.

KITTEL, C. *Física Térmica*. Editorial Reverté (Barcelona). Un libro original por el tratamiento de los temas. Demasiado escueto en el desarrollo de la teoría, lo que lo hace más adecuado como libro de consulta puntual que como libro de texto.

ZEMANSKY, M. y DITTMAN, R. *Calor y Termodinámica* (6ª Edición). Editorial Mc.Graw-Hill (Madrid). Un libro excelente por el valor didáctico de la exposición de los temas. Más enfocado hacia la Termodinámica -magnífico en ese aspecto-, aunque los capítulos sobre Mecánica Estadística están expuestos de forma muy clara. No se consideran las estadísticas cuánticas. Recomendable sólo como libro de consulta.

SEARS, F. W. y SALINGER, G. L. *Termodinámica, Teoría Cinética y Termodinámica Estadística* (2ª Edición). Editorial Reverté (Barcelona). Un libro de nivel elemental,

bien escrito, en el que más de la mitad de su contenido está dedicado a la Termodinámica. La parte de Teoría Cinética presenta los conceptos fundamentales con gran claridad, aunque el nivel es menor que el requerido para este curso. Algo parecido se puede decir del tratamiento que se da a las estadísticas cuánticas. Recomendable como libro de consulta.

LANDAU, L.D. y LIFSHITZ, E.M. *Física Estadística*. Volumen 5 del Curso de Física Teórica. Editorial Reverté (Barcelona). Un libro clásico que trata todos los temas - excepto la Teoría Cinética - con gran detalle y profundidad. El nivel es elevado y difícil en muchos casos, lo que lo hace poco apropiado como libro de texto, pero el esfuerzo necesario para leerlo -y comprenderlo- merece la pena. Muy recomendable como libro de consulta para ampliar los conocimientos.

HILL, T.L. *Introducción a la Termodinámica Estadística*. Editorial Paraninfo (Madrid). Libro de nivel elevado, lo que lo hace de difícil lectura, en el que es de destacar la completa y detallada presentación del tema de los gases reales.

KAUZMANN, W. *Teoría Cinética de los Gases*. Editorial Reverté (Barcelona). De nivel elemental, los fundamentos de la Teoría Cinética se presentan de forma muy cuidada.

DUDERSTADT, J. J. y MARTIN, W. R. *Teoría de Transporte*. Editorial CECSA (México). Un libro enteramente dedicado a todos los fenómenos relacionados con el transporte. De nivel elevado, resulta excelente para profundizar en el tema de la Teoría Cinética.

Como libro complementario de problemas resueltos se recomienda el siguiente:

FERNÁNDEZ TEJERO, C. y RODRÍGUEZ PARRONDO, J. M. *100 Problemas de Física Estadística*. Alianza Editorial (Madrid, 1996).

### **Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM):**

[http://www.fciencias.unam.mx/Docencia/Licenciatura/Fisica/Proyecto\\_Plan/OBLIGATORIAS/FisEstadistica.html](http://www.fciencias.unam.mx/Docencia/Licenciatura/Fisica/Proyecto_Plan/OBLIGATORIAS/FisEstadistica.html)

#### 1. INTRODUCCIÓN 2 hrs

1.1 El enfoque microscópico.

1.2 Relación entre los enfoques micro y macroscópico.

#### 2. PROBABILIDAD EN FÍSICA ESTADÍSTICA 10 hrs

2.1 Camino aleatorio y distribución binomial: conceptos estadísticos elementales y ejemplos; el problema del camino aleatorio en una sola dimensión; estudio general de los valores medios; cálculo de los valores medios en el problema del camino aleatorio, distribución de la probabilidad para valores de N grandes; distribución de probabilidad de Gauss.

2.2 Estudio general del problema del camino aleatorio: distribución de probabilidad con varias variables; distribuciones continuas de probabilidad; cálculo general de los valores medios para el camino aleatorio; cálculo de la distribución de probabilidad; distribución de probabilidad para N grandes.

2.3 Aplicaciones: difusión y distribución de velocidades de Maxwell (como aplicación del caminante al azar en el espacio de velocidades).

#### 3. MECÁNICA ESTADÍSTICA A LA GIBBS 18 hrs

3.1 Sistemas aislados: espacio fase; conjunto microcanónico de Gibbs; postulado de probabilidades a priori iguales; volumen fase accesible al sistema; función de partición microcanónica; el gas ideal; interpretación estadística de la entropía.

3.2 Sistemas en contacto térmico: conjunto canónico; función de partición canónica; valor medio y dispersión de la energía; aplicación al gas ideal; paradoja de Gibbs; compatibilidad entre la termodinámica y la mecánica estadística, interpretación estadística del trabajo, la energía interna y el calor; propiedades termodinámicas; potenciales

termodinámicos; distribución de Maxwell-Boltzmann, teorema de la equipartición de la energía.

3.3 Sistemas con número variable de partículas: conjunto gran canónico, trabajo y potencial químico.

3.4 Otras derivaciones de las funciones de distribución sujetas a constricciones (por multiplicadores de Lagrange).

4. MECÁNICA ESTADÍSTICA CUÁNTICA 12 hrs

4.1 Determinación de estados cuánticos; sistemas de muchas partículas; partículas indistinguibles de Fermi-Dirac y Bose-Einstein.

4.2 Conjunto gran canónico; límite clásico no degenerado; casos degenerados de Fermi y Bose.

4.3 Fermiones: número de población; nivel de Fermi; capacidades térmicas; aplicaciones.

4.4 Bosones: condensación de Bose; temperatura crítica en el gas de Bose ideal; capacidades térmicas.

5. UNA APLICACIÓN BÁSICA: LA RADIACIÓN DEL CUERPO NEGRO 3 hrs

5.1 Termodinámica de la radiación del cuerpo negro.

5.2 Estadística de la radiación del cuerpo negro.

6. SISTEMAS DE PARTÍCULAS INTERACTUANTES, TRANSICIONES DE FASE Y PUNTOS CRÍTICOS 18 hrs

6.1 Sólidos: vibraciones de la red y modos normales; aproximación de Debye.

6.2 Gases clásicos no ideales: función de partición configuracional; aproximación a bajas densidades; ecuación de estado y coeficientes del virial; deducciones de la ecuación de van der Waals.

6.3 Ferromagnetismo; interacción entre espines; introducción al modelo de Ising.

6.4 Sistemas dieléctricos.

6.4 Magnetismo y bajas temperaturas: trabajo magnético; refrigeración magnética; medición de temperaturas muy bajas; superconductividad.

7. FLUCTUACIONES 12 hrs

7.1 Fluctuaciones: tendencia al equilibrio; solución de problemas con ruido; teorema de Nyquist; solución con funciones de correlación.

7.2 Movimiento browniano: funciones de correlación y autocorrelación; difusión y la ecuación de Fokker-Planck

7.3 Procesos irreversibles: relaciones recíprocas de Onsager.

8. FUNDAMENTOS DE TEORÍA CINÉTICA 12 hrs

8.1 Ecuación de Boltzmann.

8.2 Teoría del transporte, ecuaciones de la hidrodinámica.

9. ALGUNAS APLICACIONES MODERNAS DE LA FÍSICA ESTADÍSTICA 12 hrs

Ecuaciones de estado. Dispersión de luz. Fenómenos críticos. Modelo de Ising, etc.

Bibliografía Recomendada:

Bibliografía básica

Reif, F., 1968, Fundamentos de física estadística y térmica, Editorial del Castillo, Madrid, España.

Kittel, C., Kroemer, H., 1980, Thermal physics, second edition, W.H. Freeman & Co., San Francisco, USA.

García Colín, L., 1995, Termodinámica estadística, Universidad Autónoma Metropolitana-Ixtapalapa, México, D.F.

Bibliografía complementaria

Andrews, F.C., 1975, Equilibrium statistical mechanics, second edition, John Wiley & Sons, New York, USA.

Mandl, F., 1979, Física estadística, Editorial LIMUSA, México.

Kubo, R., 1974, Statistical mechanics, fourth edition, North-Holland Publishing Co., New York.

Universidad de Navarra, España:

(Asignatura de Termodinámica y Estadística Aplicada)

([http://departamento.fisica.unav.es/Lquimica/termodinamica/pagina\\_2.html](http://departamento.fisica.unav.es/Lquimica/termodinamica/pagina_2.html))

1. Preámbulo: Nociones de matemática y mecánica cuántica
2. Fundamentos de mecánica estadística del equilibrio
  1. Estadística de Maxwell-Boltzmann.
  2. La función de partición clásica.
  3. Estadísticas cuánticas. Estadística de Bose-Einstein y de Fermi-Dirac.
  3. Aplicaciones
  3. El gas ideal.
  4. Sistema de osciladores armónicos.
  5. Cálculo de funciones termodinámicas.
  6. Propiedades magnéticas de los sólidos. Paramagnetismo.
  7. Espectro de radiación del cuerpo negro.
  8. Vibraciones reticulares en los sólidos: calor específico.
  9. Condensación de Bose.
  10. Gas de electrones.
  11. Tópicos avanzados
  12. El camino al azar.
  13. Fenómenos de difusión.
  14. Estadística de polímeros.
  15. Percolación.
  16. Crecimiento de interfases.

Bibliografía Recomendada:

- \* J. Goodisman, *Statistical Mechanics for Chemists*, Ed. John Wiley & Sons (1997).
- \* D. Chandler, *Introduction to Modern Statistical Mechanics*, Oxford University Press (1987).
- \* R. K. Pathria, *Statistical Mechanics*, Pergamon Press (1985).
- \* T. Tsang, *Statistical Mechanics*, Rinton Press (2002).

Universidad Autónoma de Madrid:

([http://www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/jgr/mecest0405/Prog-MEI-04\\_05.pdf](http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/jgr/mecest0405/Prog-MEI-04_05.pdf))

Tema 1 – INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA ESTADÍSTICA Y REPASO DE TERMODINÁMICA

Introducción: conceptos básicos de la termodinámica y la mecánica estadística.

Postulados de la mecánica estadística. El espacio de las fases molecular.

Distribución

de velocidades moleculares de Maxwell-Boltzmann. Las tres leyes de la termodinámica. Los potenciales termodinámicos y las relaciones de Maxwell. La ecuación de Gibbs-Duhem. Criterios de estabilidad termodinámica.

Tema 2 – TRANSICIONES DE FASE Y FENÓMENOS CRÍTICOS

Transiciones de fase de primer orden. Transiciones de fase de orden superior y fenómenos críticos. Teoría de Landau y parámetro de orden. Exponentes críticos y leyes de escala.

Tema 3 - TEORÍA CINÉTICA DE UN GAS DILUIDO Y FENÓMENOS DE TRANSPORTE

Velocidad de efusión por una abertura. Colisiones binarias. Recorrido libre medio.

Fenómenos de transporte de los gases: viscosidad y conductividad térmica.

Ecuación

de transporte de Boltzmann. El Teorema H de Boltzmann. El problema del camino aleatorio y el movimiento browniano.

Tema 4 - FUNDAMENTOS DE LA MECÁNICA ESTADÍSTICA CLÁSICA

Conceptos estadísticos elementales. Mecánica estadística de sistemas microscópicos.

Los colectivos microcanónico, canónico y grancanónico. La función de partición y las funciones termodinámicas. El gas ideal y la paradoja de Gibbs. Valores medios y fluctuaciones.

Tema 5 - MECÁNICA ESTADÍSTICA CUÁNTICA DE GASES IDEALES

Estadística de Fermi-Dirac y estadística de Bose-Einstein. El límite clásico. Gas ideal de Fermi: electrones en metales. Gas ideal de Bose: fotones y  $^4\text{He}$  líquido. Condensación de Bose-Einstein.

Tema 6 - SISTEMAS DE PARTÍCULAS INTERACTIVAS

Magnetismo. El modelo de Ising. Aproximación del campo molecular de Weiss y aproximación de Bragg-Williams. Fonones en sólidos. Gases clásicos no ideales.

Bibliografía Recomendada:

K. Huang, *Statistical Mechanics* (Wiley).

H. B. Callen, *Thermodynamics and an introduction to Thermostatistics* (Wiley).

F. Reif, *Fundamentos de física estadística y térmica* (Ediciones del Castillo).

T. L. Hill, *Introducción a la Termodinámica Estadística* (Paraninfo).

R. Kubo, *Statistical Mechanics* (North-Holland).

D. Chandler, *Introduction to Modern Statistical Mechanics* (Oxford University Press).

J. M. Yeomans, *Statistical Mechanics of Phase Transitions* (Oxford Science).

J. Aguilar Peris, *Curso de Termodinámica* (Alhambra).