

## Física Teórica 3 – 1er. cuatrimestre de 2019

### Guía 3: Ensamblés

1. Un oscilador armónico unidimensional tiene niveles de energía  $E_n = (n+1/2)\hbar\omega$ , donde  $\omega$  es la frecuencia del oscilador y  $n = 0, 1, 2, \dots$ . El oscilador está en contacto con foco a temperatura  $T$ .
  - a) Hallar la energía media del oscilador en función de  $T$ .
  - b) Encontrar la razón entre la probabilidad de estar en el primer estado excitado y la correspondiente al fundamental. *Idem* para el segundo estado excitado.
  - c) Suponiendo que únicamente el fundamental y el primer excitado están permitidos, hallar la energía media del oscilador en función de  $T$ . Graficar y comparar con el resultado obtenido en (a). ¿Cuándo comienzan a diferir apreciablemente?
2. Hay  $N$  osciladores distinguibles de frecuencia  $\omega$ , con niveles de energía  $(n_i + 1/2)\hbar\omega$ .
  - a) Hallar la función de partición en el ensamble canónico, calcular  $U(\beta)$  y el calor específico. Graficar.
  - b) Escribir  $S$ , primero como función de  $\beta$  y luego como función de la energía.

En el ensamble microcanónico, la energía del sistema siempre puede escribirse del siguiente modo

$$E = \frac{1}{2}N\hbar\omega + M_0\hbar\omega.$$

- c) Demostrar que el número de configuraciones está dado por

$$\Omega(M_0) = \frac{(N + M_0 - 1)!}{M_0!(N - 1)!}.$$

- d) Calcular  $S$ , primero como función de la energía y luego como función de  $\beta$ . Comparar estas expresiones con las obtenidas en el ensamble canónico.

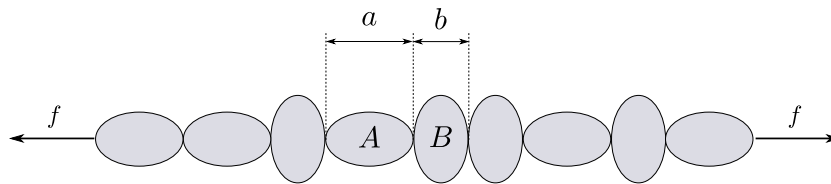
3. Sea un sistema de elementos distinguibles y no interactuantes, cada uno de los cuales puede tener **dos** valores de energía,  $0$  y  $\epsilon$ .
  - a) Si el sistema está aislado y consiste de  $N$  elementos con una energía total  $E$ , calcule la función de partición microcanónica,  $Z_{\mu C}$ , y la entropía, asumiendo que tanto  $N$  como las ocupaciones de cada nivel son mucho mayores que uno.
  - b) Si el sistema es cerrado, consiste de  $N$  elementos y está en contacto con un foco a temperatura  $T$ :
    - i) Calcule la función de partición canónica  $Z_C$  (al menos de dos maneras distintas) y la energía libre de Helmholtz. (Es útil definir la cantidad  $x = e^{-\beta\epsilon}$ ).

- ii) Calcule la energía media  $\langle E \rangle$  como función de  $T$ . Interprete en términos de la energía media de cada elemento.
- iii) Demuestre que, en general, la fluctuación en la energía está dada por

$$\sigma_E^2 = \langle E^2 \rangle - \langle E \rangle^2 = -\frac{\partial \langle E \rangle}{\partial \beta}.$$

- iv) Calcule la fluctuación relativa,  $\sigma_E / \langle E \rangle$ , para este sistema. La equivalencia con el ensamble microcanónico requiere que  $\sigma_E / |\langle E \rangle| \ll 1$ . ¿Se cumple o no?
- v) Calcule la entropía y compare con la calculada en (a).

4. Un sistema está compuesto por  $N$  elementos distinguibles y no interactuantes, cada uno de los cuales puede tener tres valores de energía,  $-\epsilon$ ,  $0$  y  $\epsilon$ . Encuentre  $S(T)$  y  $U(T)$  por dos caminos alternativos: i) usando el ensamble microcanónico (¡dolor!), ii) usando el ensamble canónico.
5. Una cadena lineal está compuesta por  $N$  unidades, formando una molécula elástica. Cada unidad puede estar en dos estados,  $A$  o  $B$ . La longitud del estado  $A$  es  $a$  y la del  $B$  es  $b$ , y las energías son respectivamente  $E_A$  y  $E_B$ .



- a) ¿Cuál es la forma que toma el primer principio para este sistema? Notar que la energía y la longitud no pueden variarse independientemente.
- b) Encontrar los valores medios de la energía y de la longitud en función de la temperatura y de la tensión sobre la cadena: i) en el ensamble microcanónico, ii) en el ensamble canónico, iii) en el ensamble isobárico. Además, calcular la constante elástica; es decir, la constante de proporcionalidad entre la tensión y la deformación para pequeñas deformaciones.
6. Una red cristalina perfecta está formada por  $N$  átomos de la misma especie. Si se extraen  $n$  átomos de sus lugares en la red (con  $1 \ll n \ll N$ ) y se los coloca en posiciones intersticiales, se obtienen  $n$  defectos de tipo Frenkel. El número  $N'$  de posiciones intersticiales en la red es del orden de magnitud de  $N$ . Sea  $W$  la energía necesaria para producir un defecto. Halle el valor de  $\langle n \rangle = W \langle n \rangle$  y de allí muestre que

$$\langle n \rangle \approx \sqrt{NN'} e^{-\beta W/2}.$$

Grafique cualitativamente  $\Omega(n)e^{-\beta nW}$  en función de  $n$ . Resuelva este problema tanto en el ensamble microcanónico como en el canónico.

7. Un fluido de partículas que interactúan con un potencial repulsivo puede ser modelado como un “gas reticular”. Considere un recipiente dividido en  $N$  celdas, cada una de volumen  $v$ , comparable al volumen de una partícula. Una celda desocupada o una ocupada por una sola partícula tienen energía cero. Una celda ocupada por 2 partículas tiene energía  $\epsilon$ , y ninguna celda puede estar ocupada por más de 2 partículas. En el ensamble gran canónico encuentre la energía media por celda, la concentración de partículas  $c$  (número de partículas dividido por  $N$ ) y la presión  $p$  en términos de la temperatura y del potencial químico. En términos de  $T$  y  $c$ , encuentre expresiones aproximadas para la energía media por celda y para la presión en los límites en que  $c$  es muy pequeña o muy cercana a su máximo valor.

Ahora resuelva el problema en el ensamble canónico y compare los resultados.

**8. Gas ideal para todos y todas**

a) Resolver el gas ideal en el ensamble microcanónico calculando el volumen de la región acotada por la superficie de energía  $\mathcal{E}$ ,

$$S(\mathcal{E}, V, N) = k \log \Omega(\mathcal{E}, V, N), \quad \text{donde} \quad \Omega(\mathcal{E}, V, N) = \int_{\sum p_i^2 \leq 2m\mathcal{E}} \frac{d^{3N}r d^{3N}p}{h^{3N} N!}.$$

b) Encuentre la función de partición  $Z_C(\beta, V, N)$  del gas ideal en el ensamble canónico. Calcule  $F$ ,  $U$ ,  $S$ ,  $p$  y  $\mu$  como funciones de  $T$ ,  $V$  y  $N$ . Compare con los resultados del ensamble microcanónico.

c) Encuentren la función de partición  $Z_{GC}(\beta, V, z)$  del gas ideal en el ensamble gran canónico. Calculen  $S(T, V, N)$  y comparen con los resultados de los otros ensambles. Obtengan la ecuación de estado.

d) Hallad la función de partición del gas ideal en el ensamble isotérmico–isobárico. Escribid  $G(T, p, N)$ , la ecuación de estado  $V(T, p, N)$  y el potencial químico  $\mu(T, p, N)$ . Comparad con los otros ensambles.

e) Resuelve el gas ideal en los tres ensambles ( $\mu C$ ,  $C$  y  $GC$ ) para el caso 2D: funciones de partición,  $c_V$ ,  $S(T, V, N)$ ,  $U(T, V, N)$ ,  $p(T, V, N)$  y  $\mu(T, V, N)$ .

f) Resolvamos el gas ideal tridimensional en los ensambles canónico y gran canónico si ahora las partículas son ultrarrelativistas,  $\epsilon(p) = cp$ . (Opcional: resolvámoslo usando el microcanónico.)

9. Considere un gas unidimensional formado por  $N$  partículas de masa  $m$ . Las partículas están sometidas a un potencial armónico de frecuencia angular  $\omega$ , y también al campo gravitatorio terrestre (el sistema está orientado verticalmente). La aceleración de la gravedad es  $g$ . El hamiltoniano del sistema es

$$H(q, p) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{p_i^2}{2m} + \frac{m\omega^2}{2} q_i^2 + mgq_i \right),$$

- a) Calcule el número de microestados  $\bar{\Omega}(E)$  con energía menor o igual que  $E$ .
- b) Calcule el número de microestados  $\Omega(E)$  con energía entre  $E - \Delta E$  y  $E$ , donde  $\Delta E$  es la precisión con la que medimos la energía. Evalúe el resultado al orden más bajo en  $\Delta E$  en el límite en que  $N$  es muy grande, y de ahí obtenga la entropía  $S(E)$ .
- c) Obtenga  $E(T)$  y la energía libre de Helmholtz  $F(T)$ .
10. Un gas ideal está en una caja cúbica de volumen  $2V$ . Una mitad de la caja está a potencial cero y la otra a potencial  $W = \epsilon$ . Se pide encontrar, en función de la temperatura, del volumen y del número total de partículas: i) el potencial químico, ii) la densidad de partículas en cada mitad de la caja, iii) la energía total. Generalice para una caja dividida en  $n$  compartimientos de volumen  $V$ , cada uno con energía potencial  $\epsilon_i$ , con  $i = 1, 2, \dots, n$ . ¿Cuál es la relación entre las densidades de cada par de compartimientos?
11. Considere una superficie adsorbente que tiene  $N$  lugares, cada uno de los cuales puede adsorber una molécula. La superficie se halla en contacto con un gas ideal monoatómico. La energía de una molécula adsorbida vale  $-E_0$ .
- a) Halle el número medio de moléculas adsorbidas,  $\langle n \rangle$ , conocidos  $T$  y el potencial químico del gas.
- b) Recordando que para el gas  $\mu = kT \log(\beta p) + \frac{3}{2}kT \log(h^2 \beta / 2\pi m)$ , muestre que

$$\frac{\langle n \rangle}{N} = \frac{p}{p + p_0(T)},$$

donde  $p$  es la presión del gas y

$$p_0(T) = \left( \frac{2\pi m}{\beta h^2} \right)^{3/2} kT e^{-\beta E_0}.$$

12. Un gas ideal diatómico consiste de  $N$  moléculas de momento dipolar eléctrico  $\mu$ . Muestre que la polarización eléctrica  $\mathbf{P}$  está dada por:

$$\mathbf{P} = \frac{N}{V} \mu \left[ \coth \left( \frac{\mu \mathcal{E}}{kT} \right) - \frac{kT}{\mu \mathcal{E}} \right] \hat{n},$$

siendo  $V$  el volumen del gas y  $\mathbf{E} = \mathcal{E} \hat{n}$  el campo eléctrico externo. Pruebe que si  $|\mu \mathcal{E}| \ll kT$ , entonces la constante dieléctrica del gas vale

$$\epsilon = 1 + 4\pi \frac{N}{V} \frac{\mu^2}{3kT}.$$

Despreciar la polarización inducida de las moléculas, y asumir que el campo eléctrico actuante sobre cada molécula es simplemente  $\mathbf{E}$ . Recordar que  $\mathbf{D} = \mathbf{E} + 4\pi \mathbf{P} = \epsilon \mathbf{E}$ .

13. **Modelo cuántico para una sustancia paramagnética.** Suponga que un momento magnético puede tomar cualquiera de los valores discretos  $g\mu_B m$  para su proyección sobre la dirección del campo magnético  $\mathbf{H}$ , siendo  $m$  el número cuántico magnético, que puede

tomar los valores  $j, j - 1, \dots, -j + 1, -j$ ;  $g$  el factor de Landé, y  $\mu_B$  el magnetón de Bohr. Calcule la magnetización  $M$  de un cuerpo que contiene  $n$  de tales momentos magnéticos por unidad de volumen. Evalúe la susceptibilidad magnética para un campo débil a alta temperatura ( $g\mu_B j H \ll kT$ ) y compare este resultado con la ley de Curie. Suponga que la interacción entre momentos magnéticos es despreciable. (Pathria §3.9).

14. **Modelo clásico de Langevin para una sustancia paramagnética.** Antes del surgimiento de la mecánica cuántica, Langevin explicó el paramagnetismo suponiendo que cada ion paramagnético posee un momento magnético permanente  $\boldsymbol{\mu}$ , libre de orientarse en todas direcciones (de módulo fijo) y que, sometido a un campo  $\mathbf{H}$ , posee una energía  $E = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{H}$ . Calcule la magnetización y la susceptibilidad en este modelo y verifique que se obtienen los resultados del problema 13 en el límite  $j \rightarrow \infty$ , identificando  $|\boldsymbol{\mu}| = \mu_B g j$ .
15. **Ausencia de magnetismo en mecánica clásica.** Muestre que la susceptibilidad magnética de un sistema que obedece a la mecánica y a la estadística clásica es estrictamente nula (*Teorema de Bohr–van Leeuwen*). **Ayuda:** el Hamiltoniano para un sistema de partículas cargadas en un campo magnético es

$$H = \sum_{j=1}^N \frac{1}{2m_j} \left[ \mathbf{p}_j - \frac{e_j}{c} \mathbf{A}(\mathbf{r}_j) \right]^2 + U(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N).$$

siendo  $\mathbf{A}$  el potencial vectorial del cual se deriva el campo magnético. ¿Existe alguna contradicción entre este problema y el resultado de los problemas anteriores? (Balian, vol. 1, pág. 176, *Absence of Magnetism in Classical Mechanics*).