

## Capítulo 1

---

### Gas de Fermi

La cosa comienza pasando al límite continuo, donde la  $\sum_e \rightarrow V/h^3 \int d^3p$  siendo la energía  $e = p^2/(2m)$

Luego, el gas ideal de Fermi sale de estas dos expresiones

$$\begin{aligned}\frac{P}{kT} &= \frac{4\pi}{h^3} \int_0^\infty dp p^2 \log(1 + z e^{-\beta p^2/(2m)}) = \frac{1}{\lambda^3} f_{5/2}(z) \\ \frac{1}{V/N} &= \frac{4\pi}{h^3} \int_0^\infty dp p^2 \frac{1}{z^{-1} e^{-\beta p^2/(2m)} + 1} = \frac{1}{\lambda^3} f_{3/2}(z)\end{aligned}\quad (1)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda térmica (que es similar al ancho del paquete de onda de la partícula) Aquí en cada una de esas expresiones, en el RHS, podríamos incorporar un factor  $g$  que serían los grados de libertad internos  $\deg(e)$  que no están asociados al momento  $\mathbf{p}$ . La ecuación (1) nos relaciona  $z$  con la densidad y de allí se extrae  $\mu(V, T, N)$ .

*v nos da idea de qué tan separadas están las partículas.*

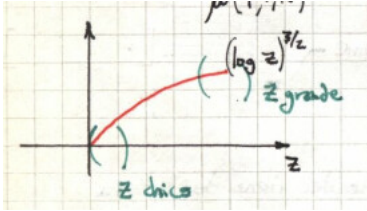
$$\begin{aligned}\lambda &= \sqrt{\frac{2\pi\hbar^2}{mkT}} & \lambda &\sim \frac{1}{T^{1/2}} \\ f_{5/2}(z) &= \frac{4}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty dx x^2 \log(1 + z e^{-x^2}) = \sum_\ell^\infty (-1)^{\ell+1} \frac{z^\ell}{\ell^{5/2}} \\ f_{3/2}(z) &= z \frac{\partial}{\partial z} f_{5/2}(z) = \sum_\ell^\infty (-1)^{\ell+1} \frac{z^\ell}{\ell^{3/2}}\end{aligned}$$

En general será

$$f_\nu(z) = \frac{1}{\Gamma(\nu)} \int_0^\infty \frac{x^{\nu-1} dx}{z^{-1} e^x + 1} = \sum_\ell^\infty (-1)^{\ell+1} \frac{z^\ell}{\ell^\nu}$$

que cumple

$$z \frac{dF_\nu(z)}{dz} = \frac{df_\nu(z)}{d\log(z)} = f_{\nu-1}(z).$$



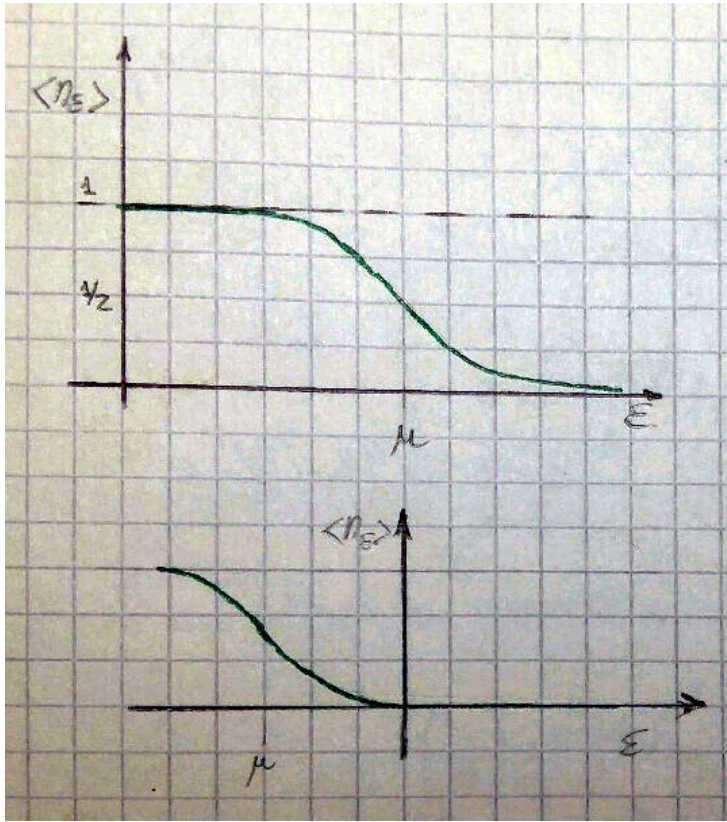
La física del problema dependerá de (a) la dimensión del sistema (b) la relación  $e(p)$ . Notemos que por ejemplo en 2D no hay condensación de Bose.

Sabíamos que

$$U(z, V, T) = -\frac{\partial}{\partial \beta} \log Q(z, V, T)$$

$$U = \frac{3}{2} \frac{kT}{\lambda^3} f_{5/2}(z) = \frac{3}{2} PV$$

y esto es válido para bosones, fermiones y boltzmanniones.



$$\langle n_e \rangle = \frac{1}{z^{-1} e^{\beta e} + 1} = \frac{1}{e^{\beta(\mu - e)} + 1}$$

Si  $\mu < 0$  como  $e > 0$  siempre, ni aún en el estado de más baja energía se llega a ocupar el nivel (restan muchos niveles vacíos).

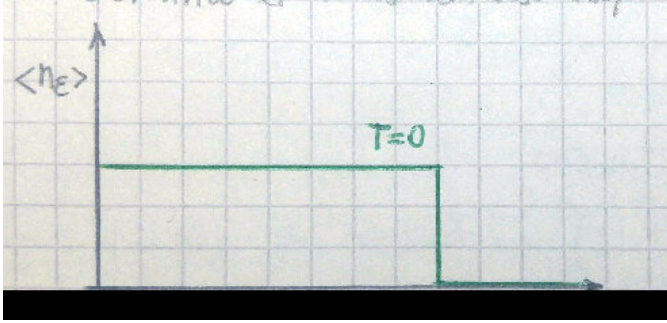
Sea que  $T \rightarrow \infty$  entonces  $\beta \rightarrow 0$  y se sigue que

$$e^{\beta(e-\mu)} \rightarrow \infty \quad e > \mu$$

$$e^{\beta(e-\mu)} \rightarrow 0 \quad e < \mu$$

$$e^{\beta(e-\mu)} \rightarrow 1 \quad e = \mu$$

Luego, con  $T = 0$  es Fermi un escalón. El valor de  $\mu$  que determina el último estado ocupado se llama  $e_F$



$$f_{3/2}(z) = \frac{\lambda^3}{v} = \int_0^{\xi=\beta\mu} \frac{x^{1/2}}{\Gamma(3/2)3/2} dx = \frac{4}{3} \frac{1}{\pi^{1/2}} (\beta\mu)^{3/2} = \frac{4}{3} \frac{1}{\pi^{1/2}} (\beta e_F)^{3/2}$$

Pathria 132 cuentas de  
GC. Pathria 138 gases  
simples.

### 1.0.1 Análisis del gas ideal de Fermi

La primera aproximación consiste en

- Caso no degenerado :  $\lambda^3/v \ll 1$  que lleva a  $T$  alta y  $v$  alto por ende  $N/V$  chico (densidad baja). Es un gas diluído, el límite debería ir a Boltzmann (gas ideal clásico)

$$z \ll 1 \quad f_\nu(z) \approx z \quad \frac{\lambda^3}{v} \approx z$$

Si vale la condición entonces

$$\frac{\lambda^3}{v} = \sum_{l=1}^{\infty} \frac{(-1)^{l+1} z^l}{l^{3/2}} \sim z - \frac{z^2}{2^{3/2}} \ll 1 \quad z \ll 1$$

y vemos que se puede invertir para conseguir la expresión de  $z$ ,

$$z \sim \frac{\lambda^3}{V} + \frac{1}{2^{3/2}} \left( \frac{\lambda^3}{V} \right)^2 \sim \frac{\lambda^3}{V} \ll 1$$

y se tiene  $e^{\beta\mu} \ll 1$  y por ende  $\mu \ll 0$ . En el límite clásico  $\mu \rightarrow -\infty$ .

$$\beta p V = \frac{v}{\lambda^3} \left( z - \frac{z^2}{2^{3/2}} + \dots \right) \approx 1 + \frac{\lambda^3}{2^{5/2} v} \quad U = \frac{3}{2} \frac{N}{\beta} \left( 1 + \frac{\lambda^3}{2^{5/2} v} \right)$$

- $\frac{\lambda^3}{v} < 1$  entonces  $z < 1$  y hay que expandir el virial,

$$\beta p V = \sum_{l=1}^{\infty} (-1)^{l-1} a_l \left( \frac{\lambda^3}{v} \right)^{l-1}$$

que igualando coeficientes se hace (¿?)

$\lambda^3/v$  a orden 1 hay efectos cuánticos

$$f_{5/2}(z) = f_{3/2}(z) \cdot \sum_{l=1}^{\infty} (-1)^{l-1} a_l \left( \frac{\lambda^3}{v} \right)^{l-1}$$

- $\frac{\lambda^3}{v} \approx 1$  Cálculo numérico
- Caso altamente degenerado :  $\lambda^3/v \gg 1$  (bajas temperaturas y altas densidades), se tiene  $z \gg 1$ . Se puede expandir  $f_{\nu}(z)$  en función de  $(\log)^{-1}$  mediante lema de Sommerfeld

$z \gg 1$  entonces  $\log z \gg 1$   
 $(\log z)^{-1} \ll 1$   $\log z = \beta \mu$

$$f_{5/2}(z) = \frac{8}{15\pi^{1/2}} (\log z)^{5/2} \left[ 1 + \frac{5\pi^2}{8} (\log z)^{-2} + \dots \right]$$

$$f_{3/2}(z) = \frac{4}{3\pi^{1/2}} (\log z)^{3/2} \left[ 1 + \frac{\pi^2}{8} (\log z)^{-2} + \dots \right]$$

y entonces, tomando la más burda,

$$\frac{\lambda^3}{v} = \frac{4}{3\pi^{1/2}} (\log z)^{3/2} \quad \text{a orden 0}$$

$$\frac{h^3}{(2\pi m k T)^{3/2}} \frac{N}{V} \frac{3\pi^{1/2}}{4} (kT)^{3/2} = \mu^{3/2}$$

$$\frac{h^3}{\pi} \frac{N}{V} \frac{3}{(2m)^{3/2} 4} = \mu^{3/2} = e_F^{3/2}$$

$$\frac{\lambda^3}{v} \frac{3\pi^{1/2}}{4} (kT)^{3/2} = \mu^{3/2} \left[ 1 + \frac{\pi^2}{8} (\log z)^{-2} + \dots \right]$$

$$\frac{h^3}{\pi} \frac{N}{V} \frac{3}{(2m)^{3/2} 4} = e_F^{3/2} \approx \mu^{3/2} \left[ 1 + \frac{\pi^2}{8} (\log z)^{-2} \right]$$

$$e_F \approx \mu \left[ 1 + \frac{\pi^2}{8} \left( \frac{\mu}{kT} \right)^{-2} \right]^{2/3} \approx \mu \left[ 1 + \frac{\pi^2}{12} \left( \frac{kT}{\mu} \right)^2 \right]$$

**Anoté investigar este pasaje.**

Entonces si se tiene  $0 < T \ll T_F$  resulta (realmente en la carpeta está al revés  $\mu = e_F$ ], así que probablemente hay un cambio de signo y aproximaciones en el medio) )

$$e_F \approx \mu \left[ 1 - \frac{\pi^2}{12} \left( \frac{kT}{e_F} \right)^2 \right]$$

y consideramos

$$\frac{1}{\mu^2} \approx \frac{1}{e_F^2}$$

pués  $\mu$  es muy grande.

$$\beta p v = \frac{f_{5/2}(z)}{f_{3/2}(z)} \approx \frac{2\beta\mu}{5} \left[ 1 + \frac{5\pi^2}{8} \left( \frac{kT}{\mu} \right)^2 \right] \left[ 1 - \frac{\pi^2}{8} \left( \frac{kT}{\mu} \right)^2 \right]$$

Hasta orden dos en  $T$  resulta

$$p v \approx \frac{2\mu}{5} \left[ 1 + \frac{\pi^2}{2} \left( \frac{kT}{\mu} \right)^2 \right] = \frac{2e_F}{5} \left[ 1 - \frac{\pi}{12} \left( \frac{kT}{e_F} \right)^2 \right] \left[ 1 + \frac{\pi^2}{2} \left( \frac{kT}{e_F} \right)^2 \right]$$

$$p v \approx \frac{2e_F}{5} \left[ 1 + \frac{5\pi^2}{12} \left( \frac{kT}{e_F} \right)^2 \right]$$

$$U = \frac{3}{2} p v \approx \frac{3}{5} N e_F \left[ 1 + \frac{5\pi^2}{12} \left( \frac{kT}{e_F} \right)^2 \right]$$

$$C_V = \frac{\partial U}{\partial T} \approx \frac{N \pi^2 k^2 T}{2 e_F} \quad C_V \propto T$$

$$C_V \approx \frac{\pi^2}{2} N k \left( \frac{T}{T_F} \right)$$

DIBUJO  $T_F$  siempre estará en general en la zona clásica donde no vale la aproximación degenerada.

Calor específico Fermi ( $i?$ ) se anula con  $T = 0$

Tomé notas de una evaluación más

$$f_{11/2}(z) \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}} (\log z)^{1/2} \left[ 1 - \frac{\pi^2}{24} (\log z)^{-2} + \dots \right]$$

que harían llegar a una corrección (notar que arriba fui hasta orden cero nomás)

$$\frac{\lambda^3}{V} \sim \frac{4}{3\sqrt{\pi}} (\log z)^{3/2} \left[ 1 - \frac{\pi}{8} (\log z) \right]$$

Otra cosa es la integral

$$N = \int_0^\infty g(e) n_e de \rightarrow \int_0^\infty \frac{g(e)}{e^{\beta(e-\mu)+1}} de$$

y vemos que la dimensionalidad entra en  $g(e)$  mientras el denominador va al escalón con temperatura nula. En este último caso la integral es  $\int^{e_F} g(e) de$ . Pero para  $T \sim 0$  la integral es más complicada y el lema de Sommerfeld ayuda,

$$\int_0^\infty \frac{\phi(x)}{e^{x-\xi} + 1} dx = \int_0^\xi \phi(x) dx + \frac{\pi^2}{6} \left. \frac{d\phi}{dx} \right|_{x=\xi} + \frac{7\pi^4}{360} \left. \frac{d^3\phi}{dx^3} \right|_{x=\xi} + \frac{31\pi^5}{15120} \left. \frac{d^5\phi}{dx^5} \right|_{x=\xi}$$

- Caso totalmente degenerado :  $\frac{\lambda^3}{v} \rightarrow \infty$  ( $T \rightarrow 0$ )  $z \rightarrow \infty$

La distribución de estados es escalón,

$$\langle N \rangle = \frac{4\pi V}{h^3} \int_0^{p_F} p^2 \left( \frac{1}{z^{-1} e^{\beta p^2/2m} + 1} \right) dp$$

$$z = e^{\beta\mu} \text{ y } z(T \rightarrow 0) = e^{\beta e_F} \rightarrow \infty$$

$$\langle N \rangle = \frac{4\pi V}{h^3} \int_0^{p_F} p^2 dp$$

**Teniendo el límite sale la cuenta**

Notemos que

$$pV = \frac{4\pi V}{h^3} \int_0^{p_F} p^2 kT \log(1 + e^{-1/kT(p^2/2m - \mu_0)}) dp$$

tiene un comportamiento no trivial con  $T \rightarrow 0$ . Si  $kT \rightarrow 0$  entonces si  $e > \mu_0$  el  $\log \rightarrow 0$  y si  $e < \mu_0$  el  $\log \rightarrow \infty$ . Parecería que con  $T \rightarrow 0$  es

$$pV = \frac{4\pi V}{h^3} \int_0^{p_F} p^2 \left( \frac{p^2}{2m} - \mu_0 \right) dp$$

y haciendo el cambio de variables de acuerdo a  $p^2/2m = e$ , que lleva a  $pdp = mde$ , se tiene

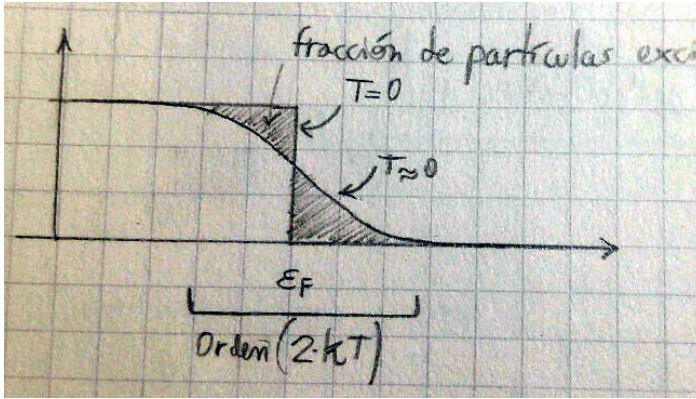
$$pV = \frac{4\pi V}{h^3} \int_0^{e_F} \sqrt{2em}^{3/2} (e - \mu_0) de$$

$$pV = \frac{4\pi V}{h^3} 2^{1/2} m^{3/2} \left( \frac{e_F^{5/2}}{5/2} - \mu_0 \frac{e_F^{5/2}}{3/2} \right) = \frac{4\pi V}{h^3} 2^{1/2} m^{3/2} e_F^{5/2} \frac{4}{15}$$

$$U = \frac{3}{2} pV = \frac{4\pi V}{h^3} 2^{1/2} m^{3/2} e_F^{5/2} \frac{2}{5}$$

$$p = \frac{2}{5} e_F \frac{\langle N \rangle}{V} \quad U = \frac{3}{5} e_F \langle N \rangle$$

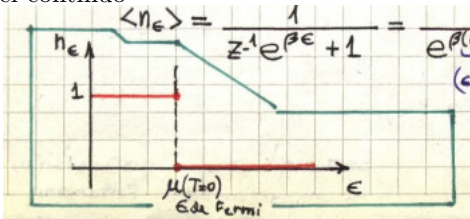
A  $T = 0$  tenemos presión y energía no nulas; las partículas no se acomodan todas en un único nivel energético (exclusión de Pauli). Para  $T \approx 0$  ( $T$  bajas) el escalón en estados apenas se desdibuja



En relación a esto último tenía el límite  $T \rightarrow 0$  para la densidad de estados,

$$\langle n_e \rangle = \frac{1}{z^{-1} e^{\beta e} + 1} = \frac{1}{e^{\beta(e-\mu)} + 1} \quad T \rightarrow 0 \quad \begin{cases} 1 & e < \mu(T=0) \\ 0 & e > \mu(T=0) \end{cases}$$

y vemos que la cosa depende del signo de  $(e - \mu)$  y  $\sum_e \langle n_e \rangle = N$ , pero en el continuo



$$\sum_e \langle n_e \rangle = N \quad \longrightarrow \quad \int_0^\infty g(e) n_e de = N$$



pero si tenemos el valor de la energía de Fermi basta integrar hasta allí,

$$\int_0^{e_F} g(e) n_e de = N$$

donde  $de g(e)$  dependerá de la relación entre  $E$  y  $p$  y la dimensión del problema.

Podemos definir una presión y energía de Fermi así

$$e_F = \frac{p_f^2}{2m} \quad e_F = kT_F$$

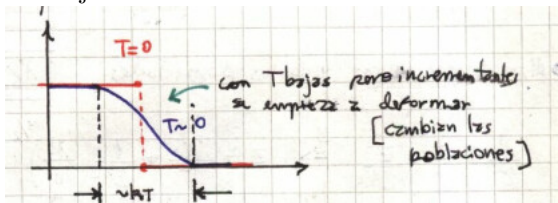
con un gas que tiene  $T < T_F$  es un gas altamente degenerado y será

$$e_F = \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{6\pi^2}{v} \right)^{3/2}$$

Ahora bien, si las partículas tienen spin entonces es  $g = 2$  de modo que

$$\int_0^{e_F} degg(e) = N$$

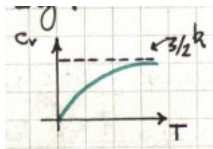
en este caso será más chica la energía de Fermi. Veamos qué pasa a temperaturas bajas con  $C_V$  y  $U$ . Para los números de ocupación se tiene el gráfico bajo estas líneas



Luego será

$$U = \sum_e e n_e = \frac{3}{5} N e_F \left[ 1 + \frac{5\pi^2}{12} \left( \frac{kT}{e_F} \right)^2 + \dots \right]$$

y entonces tendremos



Para la presión es  $P(T = 0) = 2/3 U(T = 0)/V$  pero como  $U = 3/5 N e_F$ , hay presión porque al ser fermiones igualmente hay cierta repulsión: la visión clásica de  $T = 0$  con partículas quietas no es apropiada.

El número de partículas excitados puede venir de  $\sim N kT/e_F$  entonces estando relacionado con al análogo del  $kT$ . El Pathria comenta esto en pag. 199.

#### EJEMPLO 0.1 Problema 4

Gas de electrones 2D. Altamente degenerado, entonces la temperatura está en  $0 < T \ll T_C$ . Se puede partir desde

$$\langle E \rangle = P A$$

y vemos que vale en general para  $D$  dimensiones

$$P L^D = \frac{2}{D} \langle E \rangle$$

y luego

$$\frac{P A}{kT} = \log Z_{GC} = 2 \sum_p \log(1 + z e^{-\beta e_P})$$

donde el primer dos está asociado al spin. En el paso al continuo resulta

$$\frac{P A}{kT} = \frac{2A}{h^3} \int 2\pi dp \log(1 + z e^{-\beta e_P})$$

o bien

$$\frac{4\pi A m}{h^2} \left( e \log(1 + z e^{-\beta e_P}) \Big|_0^\infty + \beta \int \frac{e de}{e^{\beta(e-\mu)} + 1} \right)$$

donde se ve que el primer término desaparece y entonces si es  $T = 0$  basta integrar hasta la energía de Fermi y con  $T \sim 0$  hay que usar el lema de Sommerfeld, en cuyo caso tenemos

$$\frac{4\pi A m}{h^2} \left( \frac{\beta \mu^2}{2} + \frac{\pi^2}{6\beta} \right)$$

de manera que finalmente

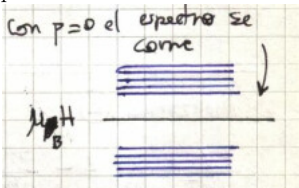
$$\langle E \rangle = \frac{4\pi A m \mu^2}{2h^2} \left( 1 + \frac{\pi^2}{3\mu^2} (kT)^2 \right).$$

#### EJEMPLO 0.2 Problema 5

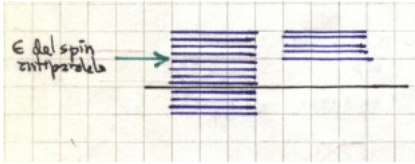
Tenemos electrones en presencia de un campo  $\mathbf{H}$ . El spin interactuará con el campo y será

$$\frac{p^2}{2m} + s \mu_B H$$

donde  $s = -1$  implica que el spin está paralelo al campo y  $s = +1$  implica que está antiparalelo



A una temperatura  $T = 0$  el estado minimiza  $F = U - TS$  de manera que  $F = U$  pero para  $T \sim 0$  el estado minimizará con un compromiso entre  $U$  y  $S$  por las combinaciones posibles



La  $e_F = \mu_B H$  para que todos se hallen paralelos al campo. De aquí surge una relación entre la densidad y la energía. Entonces

$$n_+ = \frac{1}{e^{\beta(p^2/(2m) + s\mu_B H - \mu)} + 1} \quad n_- = \frac{1}{e^{\beta(p^2/(2m) - s\mu_B H - \mu)} + 1}$$

e integrando llevo a  $N_+ + N_- = N$ . Serán  $M = \mu_B(N_+ - N_-)$  y luego será

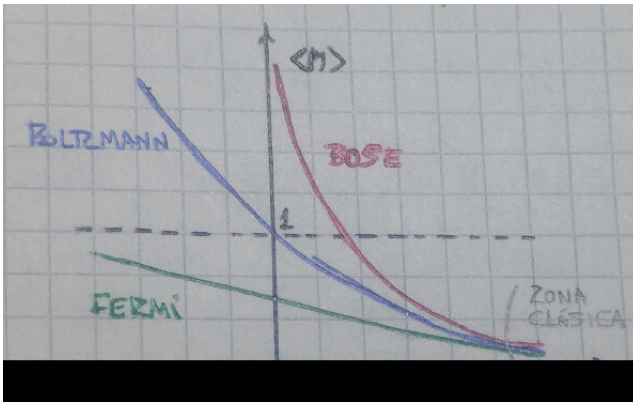
$$\chi = \lim_{H \rightarrow 0} \left( \frac{M}{H} \right)$$

si este límite es positivo tendremos paramagnetismo, magnetización proveniente del acople entre el campo y el spin mientras que si es negativo tendremos diamagnetismo, magnetización proveniente del acople del momento angular orbital con el campo.

**Comentario suelto:** metal se puede pensar como un sólido elástico más un gas de electrones. Un fonon es una excitación en la red.

## 1.1 Cuánticos III –reubicar–

### 1.1.1 Los números de ocupación



Se ve que para Bose  $\mu < 0$  siempre pero  $\langle n \rangle \rightarrow \infty$  si  $\mu \rightarrow 0^+$ . El gráfico es para  $T$  alta. Con  $T$  bajas todo tiende a suceder más pegado al eje  $\beta(e - \mu) = 0$

### 1.1.2 Comportamiento de $f_{3/2}(z)$

$$f_{3/2}(z) = \sum_{j=1}^{\infty} (-1)^{j+1} \frac{z^j}{j^{3/2}} \approx z - \frac{z^2}{2^{3/2}} \quad z \text{ chico}$$

$$f_{3/2}(z) = \frac{1}{\Gamma(3/2)} \int_0^{\infty} \frac{x^{1/2}}{z^{-1} e^x + 1} dx \approx \frac{1}{\Gamma(3/2)} \int_0^{\log z = \beta\mu} x^{1/2} dx$$

Notemos que con  $\beta\mu$  grande el integrando es 1 o 0 (DIBUJO); en realidad es un escalón en el límite en que  $\xi \equiv \beta\mu \rightarrow \infty$

**Definimos  $\log z \equiv \xi$  para no especular con temperaturas.**

$$f_{3/2}(z) = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} (\log z)^{3/2} \quad z \text{ muy alto}$$

$$f_{3/2}(z) = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \left[ (\log z)^{3/2} + \frac{\pi^2}{8} (\log z)^{-1/2} + \dots \right]$$

El valor  $\lambda^3/v$  determina relación entre  $T, V, N$  que son los parámetros macroscópicos que uno fija.

### 1.1.3 Casos

- Comportamiento clásico:  $\frac{\lambda^3}{v} \ll 1$  Altas  $T$  y bajas  $n \equiv \frac{N}{V}$

$$\frac{\lambda^3}{v} = f_{3/2}(z) \approx z - \frac{z^2}{2^{3/2}}$$

y por inversión de la serie

$$z = \frac{\lambda^3}{v} + \left( \frac{\lambda^3}{v} \right)^2 2^{-3/2}$$

y entonces si  $\frac{\lambda^3}{v} \ll 1$  se tiene que  $z \ll 1$

**Sabemos que en Boltzmann es  $\frac{\lambda^3}{v} = z$**

$$\frac{pv}{kT} = \frac{v}{\lambda^3} f_{5/2}(z) \quad \frac{\lambda^3}{v} = f_{3/2}(z)$$

$$\frac{pv}{kT} = \frac{f_{5/2}(z)}{f_{3/2}(z)} \approx \frac{z - z^2/2^{5/2}}{z - z^2/2^{3/2}} \approx 1 + \frac{1}{2^{3/2}} \left( \frac{\lambda^3}{v} \right)$$

siendo el último término una corrección cuántica.

- Comportamiento cuántico :  $\frac{\lambda^3}{v} \gg 1$  Bajas  $T$  y altas  $n \equiv \frac{N}{V}$

A  $T = 0$  determinamos la  $e_F$  como (con el límite de  $T \rightarrow 0$ )

$$\frac{\lambda^3}{v} = \frac{1}{\Gamma(3/2)} \int_0^{\log z = \beta\mu} x^{1/2} dx = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} (\log z)^{3/2}$$

$$\left( \frac{3\lambda^3 \sqrt{\pi}}{4v} \right)^{2/3} = \left( \frac{3h^3 \sqrt{\pi}}{4(2\pi m k T)^{3/2} v} \right)^{2/3} = \log z = \beta e_F$$

$$\frac{h^2}{2m} \left( \frac{3}{4\pi v} \right)^{2/3} = e_F = \frac{\hbar}{2m} \left( \frac{6\pi^2}{v} \right)^{2/3}$$

A  $T = 0$  la ocupación por nivel es un escalón ( $e_F = \mu(T = 0)$ )

$$\langle n_e \rangle = \begin{cases} 1 & e < e_F \\ 0 & e > e_F \end{cases}$$

Estoy ya lo grafiqué antes. Hay que consolidar todo este material.

### 1.1.4 Funciones termodinámicas con $T$ baja y $n$ alta

Usamos Sommerfeld

$$\frac{\lambda^3}{v} = f_{3/2}(z) \quad \mu = e_F$$

orden 1

$$\frac{\lambda^3}{v} = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} (\log z)^{3/2} \left[ 1 + \frac{\pi^2}{8} (\log z)^{-2} \right]$$

$$\frac{\lambda^3}{v} \frac{3\sqrt{\pi}}{4} \left[ 1 + \frac{\pi^2}{8} (\log z)^{-2} \right]^{-1} \approx (\log z)^{3/2}$$

$$e_F \left( 1 - \frac{\pi^2}{12} \left( \frac{T}{T_F} \right)^2 \right) \approx \mu(T) \text{ cumple } \mu(T = 0) = e_F$$

Puede verse que con  $\frac{\lambda^3}{v} \gg 1$  ( $T$  baja y  $n$  alta) es

$$C_V \approx \frac{N\pi^2 k^2 T}{2e_F}$$

DIBUJO

Aún a  $T = 0$  hay presión no nula pero  $S \rightarrow 0$  con  $T \rightarrow 0$  respetando la tercera ley. Existe una relación de recurrencia

$$z \frac{\partial}{\partial z} f_\nu(z) = z \frac{\partial}{\partial z} \sum_{l=1}^{\infty} (-1)^{l+1} \frac{z^l}{l^\nu} = \sum_{l=1}^{\infty} (-1)^{l+1} \frac{l z^{l-1} z}{l^\nu} = \sum_{l=1}^{\infty} (-1)^{l+1} \frac{z^l}{l^{\nu-1}} = f_{\nu-1}(z)$$

$$f_\nu(z) = \int \frac{1}{z} f_{\nu-1}(z) dz$$

$$f_{3/2}(z) \approx \frac{4}{3\sqrt{\pi}} (\log z)^{5/2}$$

entonces

$$f_{5/2}(z) = \int dz \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \frac{(\log z)^{3/2}}{z} = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \int dz \frac{2}{5} \frac{\partial}{\partial z} (\log z)^{5/2} = \frac{8}{15\sqrt{\pi}} (\log z)^{5/2}$$

Usamos

$$d(\log z)^n = n(\log z)^{n-1} / z$$

### 1.1.5 Sobre la aproximación de gas de Fermi para el núcleo

En lo que sigue una deducción más detallada del cálculo. Considero una caja de lados  $L$

$$\mathbf{k} = \frac{2\pi}{L} \mathbf{n} \quad \hbar \mathbf{k} = \mathbf{p} = \frac{h}{L} \mathbf{n}$$

Tomo en el origen de coordenadas  $n_i = \pm 1, \pm 2, \dots$  y así voy de  $-L/2$  a  $L/2 <$ .

$$E = \frac{(\hbar |\mathbf{k}|)^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{m} \frac{2\pi^2}{L^2} (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2) \quad n_i \in \mathbb{Z}$$

Quiero saber qué densidad de estados energéticos tengo. Para ello, en esféricas

$$E = \frac{\hbar^2}{m} \frac{2\pi^2}{L^2} r^2$$

donde  $r$  vive en la esfera (no es necesario tomar el octante y dividir sobre 8)

$$g(E) dE = N(r) dr = 4\pi r^2 dr$$

siendo  $g(E) dE$  el número de puntos entre  $E$  y  $E + dE$ ,

$$dE = \frac{(\hbar\pi)^2}{L^2 m} 4r dr$$

$$g(E) dE = \frac{L^3 m^{3/2} E^{1/2}}{\hbar^{3/2} \pi^2 \sqrt{2}} dE$$

$$N = g \int_0^{e_F} g(E) dE = \sqrt{2} \frac{Vm^{3/2}}{\hbar^3 \pi^2} \int_0^{e_F} e^{1/2} dE$$

$$N = \frac{Vm^{3/2}}{\hbar^3 \pi^2} \frac{2^{3/2}}{3} e_F^{3/2}$$

$$\frac{1}{v} = \frac{m^{3/2}}{\hbar^3 \pi^2} \frac{2^{3/2}}{3} e_F^{3/2}$$

y entonces deducimos de aquí que

$$e_F = \frac{\hbar}{2m} \left( \frac{3\pi^2}{v} \right)^{2/3}$$

que coincide con la expresión para  $e_F$  con degeneración  $g = 2$

¿Y estas cuentas sueltas?

$$n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = r^2 \quad V = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad dV = 4\pi r^2 dr$$

$$E = \frac{(\hbar\pi)^2}{2ma^2} r^2 \quad dE = \frac{(\hbar\pi)^2}{ma^2} r dr$$

$$N(r)dr = \frac{\pi}{2} r^2 dr$$

será lo mismo que el incremento en niveles energéticos

$$N(e)de = \frac{m^2 a^3}{\pi^2 \hbar^3} \left( \frac{E}{2} \right)^{1/2} dE$$

Pensamos un conjunto de nucleones como un gas de Fermi. Claramente

**Recordemos que a  $T = 0$  era  $pV = 2/5 Ne_F$  y  $U = 3/5 Ne_F$**

$$N = 2 \int_0^{e_F} N(e) de$$

porque tenemos la ocupación en función de la energía

$$e_F \propto \left( \frac{N}{V} \right)^{2/3} \text{ según la definición de } e_F$$

Al aplicar este modelo (del gas de Fermi) al núcleo hacemos algunas consideraciones

$$R = a_0 A^{1/3} \quad V \propto A$$

siendo  $A$  el número de nucleones.

Para un núcleo se tienen  $N=A-Z$  neutrones, siendo  $Z$  protones y  $A$  nucleones.

$$E = \frac{3}{5} N_T e_F \text{ (a } T = 0)$$

y tenemos un  $e_F$  de protones y de neutrones, que son

$$e_{Fp} \propto \left(\frac{Z}{A}\right)^{2/3} \quad e_{Fn} \propto \left(\frac{A-Z}{A}\right)^{2/3}$$

$$E = \frac{3}{5} \left[ Z \left(\frac{Z}{V}\right)^{2/3} + (A-Z) \left(\frac{A-Z}{V}\right)^{2/3} \right] = \frac{3}{5} \left( \frac{Z^{5/3} + (A-Z)^{5/3}}{A^{2/3}} \right)$$

donde hemos supuesto ambos pozos iguales. Si los pozos no fueran iguales cambia la  $e_F$ .

Se minimiza  $E$  con  $Z = N = A/2$  (simetría)

$$f_4 \propto E - E_0 = \frac{3}{5A^{2/3}} [Z^{5/3} + (A-Z)^{5/3} - 2(A/2)^{5/3}]$$

que se puede reescribir en función de  $D = (N - Z)/2 = (A - 2Z)/2 = A/2 - Z$  (que será chico) y de esta manera

$$Z = \frac{A}{2} - D \quad A - Z = \frac{A}{2} + D$$

$$f_4 \propto \frac{3}{5} \left( \frac{[A/2 - D]^{5/3} + [A/2 + D]^{5/3} - 2[A/2]^{5/3}}{A^{2/3}} \right)$$

y que con un Taylor en  $D \approx 0$  resulta

$$f_4 \propto \frac{(A/2 - Z)^2}{A} \propto D^2 \text{ término de simetría}$$

### 1.1.6 Cuánticos 3 – más material para reubicar–

Un esquema de temas: comportamiento de los números de ocupación gas de Fermi : comportamiento de  $f_\nu(z)$  con  $\nu = 3/2$  gas de Fermi con condiciones extremas

$$\lambda^3/v \ggg 1 \quad \lambda^3/v \lll 1$$

$e_F$  con degeneración  $g$  funciones termodinámicas con  $\lambda^3/v \ggg 1$   $S \rightarrow 0$  con  $T \rightarrow 0$  Aproximación de gas de Fermi para núcleo densidad de estados  $g(e)$

La expresión para  $\mu(T)$  con  $T \geq 0$  sale de

$$\frac{\lambda^3}{v} = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} (\log z)^{3/2} \left[ 1 + \frac{\pi^2}{8} (\log z)^{-2} \right]$$



$$(\log z)^{3/2} = \frac{3\sqrt{\pi}h^3}{(2\pi m)^{3/2}(kT)^{3/2}4v} \frac{1}{\left[1 + \frac{\pi^2}{8}(\log z)^{-2}\right]}$$

$$\mu = \left(\frac{3\sqrt{\pi}}{4v}\right)^{2/3} \frac{h^2}{2\pi m} \left(1 + \frac{\pi^2}{8\log^2 z}\right)^{-2/3}$$

$$\mu = e_F \left[1 - \frac{\pi^2}{12} \left(\frac{kT}{e_F}\right)^2\right]$$

y con  $T$  baja podemos escribir todo en función de la  $e_F$ .

$$E = \frac{3}{5}N e_F \quad \text{con } T = 0$$

Lo importante de tener  $f_{3/2}(z)$  en función de  $\lambda^3/v$ , desde

$$\lambda^3/v = f_{3/2}(z)$$

#### DIBUJO

es que vemos que  $z$  chico lleva a  $\lambda^3/v$  grande y consecuentemente  $z$  grande lleva a  $\lambda^3/v$  grande.

Luego,

clásico  $z \ll 1$

$$\frac{\lambda^3}{v} \ll 1 \text{ independientemente}$$

cuántico  $z \gg 1$

$$\frac{\lambda^3}{v} \gg 1 \text{ independientemente}$$

Con  $T = 0$  es  $\mu(T = 0) = e_F$  DIBUJO escalón

Cuántico (límite máximo) entonces

$$z \rightarrow \infty \Rightarrow \frac{\lambda^3}{v} = \frac{4(\log z)^{3/2}}{3\sqrt{\pi}}$$

$$\frac{\lambda^3}{v} = \frac{4}{2\sqrt{\pi}}(\beta e_F)^{3/2} \text{ con } z = e^{\beta e_F}$$

Entonces  $e_F$  es el nivel tal que debajo de él hay  $N$  estados. En el espacio de momentos las partículas ocupan una esfera de radio  $p_F$ .

**Hay un yeite en la deducción que refiere a que abajo es lo mismo usar orden 1 que orden dos y reemplazo  $(\beta\mu)^{-2}$  por  $(\beta e_F)^{-2}$**

### 1.1.7 Estadísticas –otra cosa para reubicar–

Esta sección es un sketchi

$$\langle n \rangle_i = \frac{1}{e^{\beta(e_i - \mu)} + a} \quad \begin{cases} a = 0 & \text{MB} \\ a = -1 & \text{BE} \\ a = 1 & \text{FD} \end{cases}$$

DIBUJO

Graficamos  $1/(e^x + a)$  En la zona clásica coinciden las tres y es

$$e^{\beta(e_i - \mu)} \gg 1 \forall e_i \text{ de interés}$$

$$z^{-1} e^{\beta e_i} \gg 1 \quad \beta(e_i - \mu) \gg 0$$

$$e^{\beta e_i} \gg z \quad e_i \gg \mu$$

de (2) se deduce que como  $e_i$  pueden ser  $\approx 0$  entonces  $0 \gg \mu$  y por lo tanto  $e^{\beta\mu} \equiv z \ll 1$  de (1)

$$1 \gg e^{\beta\mu} \quad 0 \gg \beta\mu$$

Clásicamente  $e^{\beta\mu}$  domina sobre  $z$

$$\mu < 0 \text{ y } |\mu| \gg 1$$

Bose  $\mu < \text{todo } e$

Fermi  $\mu$  sin restricción

Para  $z \gg 1$  conviene definir  $\xi = \log z$  y entonces

$$f_\nu(z) = \frac{1}{\Gamma(\nu)} \int_0^\infty \frac{x^{\nu-1}}{e^{x-\xi} + 1} dx$$

Siendo  $\xi$  grande se tendrá que

$$F = \frac{1}{e^{x-\xi} + 1} = \begin{cases} 1 & x < \xi \\ 1/2 & x = \xi \\ 0 & x > \xi \end{cases}$$

En este supuesto  $\xi \gg 1$  podemos integrar

$$f_\nu(z) \approx \frac{1}{\Gamma(\nu)} \int_0^\infty x^{\nu-1} dx$$

donde suponemos  $T \gtrsim 0$  con lo cual  $\beta\mu \rightarrow \infty, \xi \rightarrow \infty$  y  $z^{-1} \rightarrow 0, e^{-\xi} \rightarrow 0$

$$f_\nu(z) \approx \frac{\xi^\nu}{\Gamma(\nu)\nu}$$

Con  $\nu = 3/2$  resulta

$$f_{3/2}(z) \approx \frac{(\log z)^{3/2}}{\Gamma(3/2)3/2}$$

$$\frac{\lambda^3}{v} = \frac{4}{3} \frac{1}{\pi^{1/2}} (\beta\mu)^{3/2} \rightarrow \left( f_{3/2}(z) \frac{3\sqrt{\pi}}{4} \right)^{2/3} \frac{1}{\beta} = e_F$$

$$\frac{h^2}{2m} \left( \frac{3}{4v\pi} \right)^{2/3} = \mu = e_F(\mu \text{ a } T = 0)$$

La  $e_F(\mu \text{ a } T = 0)$  es la energía hasta la cual se hallan ocupados los niveles energéticos. Con  $T \gtrsim 0$  la ocupación es un escalón

DIBUJO

La  $e_F$  es el valor de  $\mu(T = 0)$

La energía  $U$  es

$$U = \frac{3}{2}pV = \frac{3V}{2\beta\lambda^3} f_{3/2}(z) = \frac{3N}{2\beta} \frac{f_{5/2}(z)}{f_{3/2}(z)}$$

Tenemos una aproximación de Sommerfeld para  $z$  grande

$$f_{3/2}(z) = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} (\log z)^{3/2} \left[ 1 + \frac{\pi^2}{8} (\log z)^{-2} + \dots \right]$$

$$f_{5/2}(z) = \frac{8}{15\sqrt{\pi}} (\log z)^{5/2} \left[ 1 + \frac{5\pi^2}{8} (\log z)^{-2} + \dots \right]$$

$$U = \frac{3N}{5\beta} (\log z) \left[ 1 + \frac{5\pi^2}{8} (\log z)^{-2} + \dots \right] \left[ 1 + \frac{\pi^2}{8} (\log z)^{-2} + \dots \right]^{-1}$$

$$U = \frac{3\mu}{5} \left[ 1 + \frac{5\pi^2}{8} (\log z)^{-2} + \dots \right] = \frac{3\mu}{5} + \frac{15\pi^2\mu}{60} \left( \frac{1}{\beta\mu} \right)^2 + \dots$$

$$C_v \equiv \frac{\partial}{\partial T} U/N \cong \frac{\pi^2}{2} \frac{k^2 T}{\mu}$$

entonces con  $T \gtrsim 0$  es  $C_v \propto T$  y con  $T = 0$  es

$$\frac{U}{N} = \frac{3}{5} e_F$$

$$\frac{U}{N} = \frac{3}{5}e_F \left( 1 + \frac{5\pi^2}{12} \left( \underbrace{\frac{T}{e_F/k}}_{\equiv T_F} \right)^2 + \dots \right)$$

Para  $z \approx 1$  se debe expandir en el virial

$$\frac{pV}{NkT} = \sum_{l=1}^{\infty} a_l \left( \frac{\lambda^3}{gv} \right)^{l-1} (-1)^{l-1}$$

Sabemos que

$$\frac{p}{kT} = \frac{f_{5/2}(z)}{\lambda^3}$$

y entonces con las expresiones de  $f_\nu$ ,

$$\frac{pV}{NkT} = \frac{\sum_{j=1}^{\infty} (-1)^{j+1} z^j / j^{5/2}}{\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k+1} z^k / k^{3/2}}$$

Debemos usar toda la serie

$$\left[ \sum_{l=1}^{\infty} a_l \left( \frac{\lambda^3}{gv} \right)^{l-1} (-1)^{l-1} \right] \left[ \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k+1} z^k / k^{3/2} \right] = \sum_{j=1}^{\infty} (-1)^{j+1} z^j / j^{5/2}$$

Resultan

$$\begin{cases} a_1 = 1 \\ a_2 = -0.17678 \\ a_3 = -0.00330 \end{cases}$$

$$\frac{pV}{NkT} = 1 + 0.17678 \underbrace{\left( \frac{\lambda^3}{gv} \right)}_{\propto T^{-3/2}} - 0.00330 \left( \frac{\lambda^3}{gv} \right)^2$$

Usando

$$U = 3/2 pV$$

$$\frac{U}{N} \cong 3/2 kT \left( 1 + 0.17678 \left( \frac{\lambda^3}{gv} \right) \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial T} \frac{U}{N} = C_v = 3/2 kT \left( 1 + 0.17678 \left( \frac{\lambda^3}{gv} \right) \right) + \frac{3}{2} kT 0.17678 \frac{h^3}{gv(2\pi mk)^{3/2} 2/3 T^{5/2}}$$

y se puede despejar

$$c_v = \frac{3}{2} k \left[ 1 - 0.08839 \left( \frac{\lambda^3}{gv} \right) \right]$$

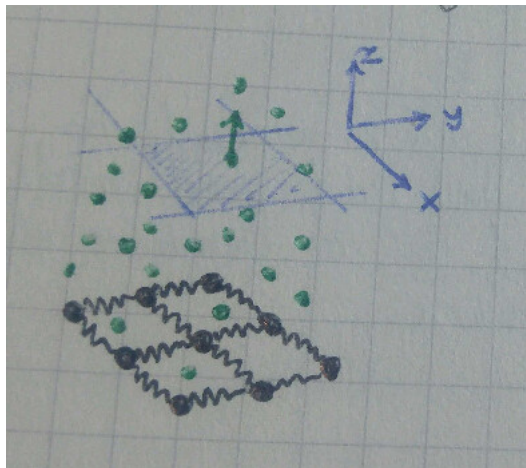
## 1.2 Estudio de un metal – título tentativo –

### 1.2.1 Estudio de un metal

Modelamos un metal como una red de átomos que pueden oscilar y un gas de electrones

$$(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N) \quad N \text{ átomos}$$

$$(\mathbf{x}_1^0, \dots, \mathbf{x}_N^0) \quad \text{Equilibrio fundamental}$$



Los desplazamientos del equilibrio serán

$$\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_i^0 = \vec{\xi}_i$$

Planteo de un potencial de pequeñas oscilaciones

$$K = \sum_i \frac{m}{2} |\vec{\xi}_i|^2 \quad \text{cinética}$$

$$V = V(\{\mathbf{x}_i^0\}) + \underbrace{\sum_i \frac{\partial V}{\partial \mathbf{x}_i} \bigg|_{\mathbf{x}_i^0}}_{=0} (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_i^0) + \sum_{i,j} \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial \mathbf{x}_i \partial \mathbf{x}_j} (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_i^0)(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_j^0)$$

Es cero porque está evaluado en el mínimo.

$$V = V_0 + \sum_{i,j} \frac{1}{2} k_{ij} \vec{\xi}_i \cdot \vec{\xi}_j \quad \text{potencial}$$

siendo las constantes de fuerza  $k_{ij}$  las que controlan la interacción

$$H = V_0 + \frac{m}{2} |\vec{\xi}_i|^2 + \sum_{i,j} \frac{1}{2} k_{ij} \vec{\xi}_i \cdot \vec{\xi}_j$$

Este hamiltoniano se puede pasar a modos normales diagonalizando la matriz de fuerzas

$$H = V_0 + \frac{m}{2} \sum_i^{3N} (\dot{q}_i^2 + \omega_i^2 q_i^2)$$

y  $\omega_i$  son las frecuencias de los  $3N$  modos normales del sistema de  $N$  grados de libertad en 3D. En modos normales el hamiltoniano del sistema es el de  $3N$  osciladores armónicos independientes (no acoplados. Puede resolverse mediante los operadores de bajada y de subida (cuántica) resultando en

$$E = \sum_i^{3N} \left( n_i + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_i$$

donde  $n_i$  es el número de fonones (ocupación) del modo normal  $i$ -ésimo.

Estos fonones, cuasipartículas, son bosones porque pueden ser

$$n_i = 0, 1, 2, \dots, \infty$$

y su número total no está fijo ( $\mu = 0$  pues la energía no depende del número de fonones)

$$n_i = \frac{1}{e^{\beta \hbar \omega_i} - 1}$$

pues  $\hbar \omega_i$  es la energía del estado  $i$ -ésimo

$$n_i = \frac{1}{e^{\hbar \omega_i / kT} - 1}$$

$$E = V_0 + \frac{1}{2} \sum_i^{3N} \hbar \omega_i + \sum_i^{3N} n_i \hbar \omega_i$$

La función de partición canónica será

$$Q = \sum_E e^{-\beta E} = \sum_E e^{-\beta(\frac{1}{2} \sum \hbar \omega_i + \sum n_i \hbar \omega_i)}$$

$$Q = \sum_{n_1=0}^{\infty} \sum_{n_2=0}^{\infty} \dots \sum_{n_N=0}^{\infty} e^{-\beta \sum (\hbar \omega_i / 2 + n_i \hbar \omega_i)}$$

$$Q = \sum_{n_1} e^{-\beta(\hbar \omega_1 / 2 + n_1 \hbar \omega_1)} \sum_{n_2} e^{-\beta(\hbar \omega_2 / 2 + n_2 \hbar \omega_2)} \dots$$

$$Q = \prod_i^{3N} \left( \sum_{n_i=0} e^{-\beta(\hbar \omega_i / 2 + n_i \hbar \omega_i)} \right) = \prod_i^{3N} \left( \sum_{n_i=0} e^{-\beta n_i \hbar \omega_i} \right) e^{-\beta \hbar \omega_i / 2}$$

$$Q = \prod_i^{3N} \left( \frac{1}{1 - e^{-\beta\hbar\omega_i}} \right) e^{-\beta\hbar\omega_i/2} = \prod_i^{3N} \left( \frac{1}{e^{\beta\hbar\omega_i} - e^{-\beta\hbar\omega_i}} \right)$$

$$\log Q = \sum_i^{3N} \log \left( \frac{1}{e^{\beta\hbar\omega_i} - e^{-\beta\hbar\omega_i}} \right) = \sum_i^{3N} -\log (e^{\beta\hbar\omega_i} - e^{-\beta\hbar\omega_i})$$

$$\log Q = \sum_i^{3N} -\log \left( 2 \sinh \left( \frac{\hbar\omega_i}{2kT} \right) \right)$$

Si quisiéramos pasar al continuo resultaría (con  $N \rightarrow \infty$ )

$$\log Q = - \int_0^\infty d\omega g(\omega) \log \left[ 2 \sinh \left( \frac{\beta\hbar\omega}{2} \right) \right]$$

donde  $g(\omega)$  es la densidad de estados y

$d\omega g(\omega) = \#$  de modos normales con frecuencia entre  $\omega$  y  $\omega + d\omega$

Tenemos dos métodos de cálculo de energía

$$E = \sum_i^{3N} (n_i + 1/2) \hbar\omega_i \quad \left| \quad -\frac{\partial \log Q}{\partial \beta} = \sum_i^{3N} \frac{1}{e^\square - e^{-\square}} (e^\square + e^{-\square}) \frac{\hbar\omega_i}{2} \right.$$

$$\sum_i^{3N} \hbar\omega_i \left( \frac{1/2 e^{\beta\hbar\omega_i} + 1/2}{e^{\beta\hbar\omega_i} - 1} \right) \quad \left| \quad -\frac{\partial \log Q}{\partial \beta} = \sum_i^{3N} \left( \frac{e^\square + e^{-\square}}{e^\square - e^{-\square}} \right) \frac{\hbar\omega_i}{2} \right.$$

$$\sum_i^{3N} \frac{\hbar\omega_i}{2} \left( \frac{e^{\beta\hbar\omega_i} + 1}{e^{\beta\hbar\omega_i} - 1} \right) \quad \left| \quad = \sum_i^{3N} \left( \frac{e^{2\square} + 1}{e^{2\square} - 1} \right) \frac{\hbar\omega_i}{2} \right.$$

Por supuesto ambas coinciden. Observemos que

$$\# \text{ de fonones} = \sum_i^{3N} n_i$$

es una cantidad que no es fija (se crean y se destruyen). Por ello podemos evaluar fácilmente el  $Q$ .

Desde  $E$  se puede evaluar el  $C_v$

$$\frac{\partial E}{\partial T} = \sum_i^{3N} \frac{\hbar\omega_i}{2} \frac{\partial}{\partial T} \left( \frac{\cosh \square}{\sinh \square} \right)$$

$$C_v = \sum_i^{3N} \frac{\hbar\omega_i}{2} \left[ \frac{\sinh \square}{\sinh \square} \frac{\partial \square}{\partial T} - \frac{\cosh^2 \square}{\sinh^2 \square} \frac{\partial \square}{\partial T} \right]$$

$$C_v = \sum_i^{3N} \frac{\hbar\omega_i}{2} \frac{\hbar\omega_i}{2k} \left( \frac{-1}{T^2} \right) \left( \frac{-1}{\sinh^2 \square} \right)$$

Tenemos el modelo de Einstein, que usa  $\omega_i = \omega_E \forall i$  y entonces

$$C_v = 3Nk \left( \frac{\hbar\omega_E}{kT} \right)^2 \frac{1}{[e^{\hbar\omega_E/kT} - e^{-\hbar\omega_E/kT}]^2}$$

$$C_v = 3Nk \left[ \left( \frac{1}{t} \right)^2 \left( \frac{1}{e^{1/(2t)} - e^{-1/(2t)}} \right)^2 \right]$$

Con  $T \gg 1$  es [...]  $\rightarrow 1$  y  $C_V = 3Nk$  (clásico). Con  $T < 1$  se comporta exponencialmente.

Dibujo

$C_v \rightarrow 3Nk$  con  $T \gg 1$ ,  $C_v \rightarrow 0$  con  $T \rightarrow 0$  Tiende a cero muy rápidamente

### 1.2.2 Modelo de Debye

Las frecuencias se distribuyen continuamente de modo que hay

$$\int_0^{\omega_D} g(\omega) d\omega = 3N$$

modos normales; es decir que se integra hasta una frecuencia de corte  $\omega_D$ .  $g(\omega)$  la extraemos de considerar frecuencias permitidas de una onda plana de sonido en un sólido de lados  $L$ .

$$\mathbf{p} = \frac{h}{L} \mathbf{n} = \frac{h}{2\pi} \mathbf{k} \quad \rightarrow \quad \mathbf{k} = \frac{2\pi}{L} \mathbf{n} \quad \delta|\mathbf{k}| = \frac{(2\pi)^3}{V}$$

$$c_s = \frac{\omega}{|\mathbf{k}|} \quad \rightarrow \quad 4\pi k^2 \frac{V}{(2\pi)^3} dk = 1 \text{ esféricas}$$

$$d|\mathbf{k}| = \frac{d\omega}{c_s}$$

y será

$$\frac{V}{2\pi^2} k^2 dk = \frac{V}{2\pi^2} \frac{\omega^2}{c^3} d\omega$$

$$g(\omega) d\omega = g(k) dk \quad \rightarrow \quad g(\omega) = \frac{V\omega^2}{2\pi^2 c^3}$$



$$\int_0^{\omega_D} \frac{V\omega^2}{2\pi^2 c^3} d\omega = \frac{V\omega_D^3}{6\pi^2 c^3} = 3N$$

$$\omega_D = c \left( \frac{18\pi^2}{v} \right)^{1/3}$$

En realidad hay que considerar los tres modos: uno longitudinal y dos transversales,

$$\int_0^{\omega_D} \frac{V\omega^2}{2\pi^2} \left( \frac{1}{c_L^3} + \frac{2}{c_T^3} \right) d\omega = \frac{V\omega_D^3}{6\pi^2} \left( \frac{1}{c_L^3} + \frac{2}{c_T^3} \right) = 3N$$

$$\omega_D = \left( \frac{1}{c_L^3} + \frac{2}{c_T^3} \right)^{-1/3} \left( \frac{18\pi^2}{v} \right)^{1/3}$$

$$\frac{V}{2\pi^2 c^3} = \frac{9N}{\omega_D^3} \quad \rightarrow \quad g(\omega) = \frac{9N}{\omega_D^3} \omega^2$$

$$C_v = \sum_i^{3N} k_B \left( \frac{\hbar\omega_i}{k_B T} \right)^2 \frac{e^{-\left(\frac{\hbar\omega_i}{k_B T}\right)}}{(1 - e^{-\left(\frac{\hbar\omega_i}{k_B T}\right)})^2}$$

**Había unas cuentitas de los diferenciales discretos que se pueden referir nomás.**

La suma en los  $3N$  modos normales (estados de fonones) puede pasarse a integral

$$C_v = \int_0^{\omega_D} g(\omega) k_B \left( \frac{\hbar\omega}{k_B T} \right)^2 \frac{e^{-\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right)}}{(1 - e^{-\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right)})^2} d\omega$$

Usando la aproximación de Debye es  
DIBUJO

$$g(\omega) = \frac{9N}{\omega_D^3} \omega^2$$

$$C_v = \int_0^{\omega_D} \frac{9N}{\omega_D^3} \omega^2 k_B \left( \frac{\hbar\omega}{k_B T} \right)^2 \frac{e^{-\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right)}}{(1 - e^{-\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right)})^2} d\omega$$

reemplazamos

$$x = \frac{\hbar\omega}{k_B T} \quad dx = \frac{\hbar}{k_B T} d\omega$$

$$k_B \int_0^{\hbar\omega_D/(k_B T)} \frac{9N}{\omega_D^3} \left( \frac{k_B T}{\hbar} \right)^3 x^4 \frac{e^{-x}}{(1 - e^{-x})^2} dx$$

$$C_v = 3Nk_B \left( \int_0^{\beta\hbar\omega_D \equiv x_D} \frac{3x^4 e^{-x}}{x_D^3 (1 - e^{-x})^2} dx \right)$$

$$D(x_D) \equiv \frac{3}{x_D^3} \int_0^{x_D} \frac{x^4 e^{-x}}{(1 - e^{-x})^2} dx = \frac{3}{x_D^3} \int_0^{x_D} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx$$

El caso límite  $T \rightarrow \infty$  (clásico) resulta en  $D(x_D) = 1$  pues el integrando es como  $x^2$  y entonces

$$C_v = 3Nk_b$$

DIBUJITO bosquejo

Trabajando sobre  $D(x_D)$  se tiene

$$\frac{3}{x_D^3} = \left[ \int_0^{x_D} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx \right]$$

e integrando por partes ( $u = x^4$  y  $dv = e^x / (e^x - 1)^2 dx$ ) se arriba a

$$\frac{3x_D}{1 - e^{x_D}} + \frac{12}{x_D^3} \int_0^{x_D} \frac{x^3}{e^x - 1} dx$$

Con  $x \ll 1$  es

$$e^x - 1 = x \left( 1 + \frac{x}{2} + \frac{x^2}{6} \right)$$

$$\frac{1}{e^x - 1} = \frac{1}{x} \left( 1 + \frac{x}{2} + \frac{x^2}{6} \right)^{-1} \approx \frac{1}{x} \left( 1 - \left[ \frac{x}{2} + \frac{x^2}{6} \right] + \left[ \frac{x}{2} + \frac{x^2}{6} \right]^2 \right)$$

y quedándonos a orden 2

$$\frac{1}{e^x - 1} \approx \frac{1}{x} \left( 1 - \frac{x}{2} + \frac{x^2}{12} \right) = \frac{1}{x} - \frac{1}{2} + \frac{x}{12}$$

$$3x_D \left( -\frac{1}{x_D} + \frac{1}{2} - \frac{x_D}{12} \right) + \frac{12}{x_D^3} \int_0^{x_D} \left( x^2 - \frac{x^3}{2} + \frac{x^4}{12} \right) dx = 1 - \frac{x_D^2}{20}$$

llegamos a

$$C_v = 3Nk_b \left[ 1 - \frac{x_D^2}{20} \right] = 3Nk_b \left[ 1 - \frac{(\hbar\omega_D)^2}{20(kT)^2} \right]$$

Con  $x_D \ll 1$  ( $T \gg 1$ ) tiende al valor clásico (Pettit & Dulong)

Con  $x_D \gg 1$

$$D(x_D) = \frac{3x_D}{1 - e^{x_D}} + \frac{12}{x_D^3} \int_0^{x_D} \frac{x^3}{e^x - 1} dx$$

y como podemos integrar entre 0 e  $\infty$  con lo cual

$$\int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \frac{\pi^4}{15}$$

DIBUJO

$$D(x_D) = \frac{4}{5} \frac{\pi^4}{x_D^3} = \frac{4\pi^4}{5} \left( \frac{kT}{\hbar\omega_D} \right)^3$$

DIBUJO Ley de Dulong y Pettit

$$C_v = 3Nk_B \left( \frac{4\pi^4}{5} \right) \left( \frac{k}{\hbar\omega_D} \right) T^3$$

Con  $x_D \gg 1$  ( $T \ll 1$ ) tiende a 0 como resulta experimentalmente.

### 1.2.3 Gas de electrones en metales

Consideramos bajas temperaturas y altas densidades

$$\frac{\lambda^3}{v} \gg 1 \quad \text{CASO DEGENERADO}$$

$$\frac{\lambda^3}{v} = f_{3/2}(z) \quad \text{con } z \gg 1 (T = 0)$$

Usamos aproximación de Sommerfeld (1928)

$$\frac{\lambda^3}{v} = \frac{4}{3\pi^{1/2}} [\log(x)]^{3/2} \quad \text{a orden cero}$$

$$\frac{h^3}{v(2\pi mkT)^{3/2}} = \frac{4}{3\pi^{1/2}} \left( \frac{e_F}{kT} \right)^{3/2}$$

$$e_F = \frac{h^2 3^{2/3}}{2m(4\pi v)^{2/3}}$$

$$e_F = \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{32^3 \pi^2}{4v} \right)^{2/3} = \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{6\pi^2}{v} \right)^{2/3}$$

$$z = e^{\beta\mu(T=0)} = e^{\beta e_F}$$

Veamos que la  $e_F$  disminuye con el aumento de  $v$  y  $m$ . Para la distribución de Fermi teníamos

DIBUJO

$$\frac{1}{e^{\frac{e-\mu(T)}{kT}} + 1}$$

Sea un  $\delta e$

$$n_e = \frac{1}{e^{(e_F + \delta e - e_F + (\pi^2/12)(T'/T_F)^2 e_F)/(kT')} + 1} = \frac{1}{e^{\frac{\delta e}{kT'} + (\pi^2/12)(T'/T_F)} + 1}$$

Usamos que

$$\mu = e_F \left( 1 - \frac{\pi^2}{12} \left( \frac{T}{T_F} \right)^2 \right)$$

y como  $\pi^2/12 \sim 1$  se tiene  $e^{\delta e/(kT') + kT'/(kT_F)}$

Si  $kT' \ll kT_F$  entonces se tiene

$$\frac{1}{e^{\delta e/(kT')} + 1}$$

lo cual dice que con  $\delta e = 2kT'$  es  $n_e \sim 0.11$  y es  $2kT'$  justamente el apartamiento del caso degenerado.

Si, como sucede con  $T_{\text{AMB}}$  en un gas de electrones por ejemplo,

$$T_{\text{AMB}} \ll T_F$$

se tiene

$$T_F = e_F/k_B$$

DIBUJO

La  $T_F$  es una propiedad de las partículas del gas que mide la sensibilidad ante cambios en la temperatura.

Para saber si me hallo muy lejos del comportamiento tipo escalón ( $T = 0$ ) evalúo  $T_F$ . Si resulta  $T < T_F$  entonces la variación  $2kT$  es aproximadamente el  $e$  tal que  $n_e = 0.11$ .

Asimismo para el  $C_v$  se tenía

$$C_v = \frac{\pi^2}{2} Nk \left( \frac{T}{T_F} \right) \quad \text{Gas de Fermi}$$

Modelando un sólido como

gas de Fermi (electrones) + gas de fonones (átomos centrales)

se tienen

$$C_v = \alpha T + \beta T^3$$

y vemos que a  $T_{\text{AMB}}$  (alta) domina el término de fonones y a muy baja  $T$  ( $T \lesssim 1$ ) el de electrones.

\* idea

Dibujito

Evaluando la desigualdad  $T < T_F$  podemos ver si la distribución tiene pinta de escalón o de rampa.

### 1.2.4 Emisión termoiónica

Modelaremos un gas de electrones confinado en un potencial  $W$  creado por una red de iones positivos.

DIBUJO

Veamos emisión en  $\hat{z}$ . Necesitaremos

$$K > W \quad \frac{p_z^2}{2m} > W \quad p_z > (2mW)^{1/2}$$

y sea  $n\mathbf{v} \cdot \mathbf{A}$  flujo de electrones a través del área  $A$  en la unidad de tiempo,  $R$  el número de electrones en la unidad de tiempo y de área  $nv_z$ , i.e.

$$R = n \frac{p_z}{m} = \frac{N p_z}{V m}$$

$$R = \sum_{e_i} \frac{n_i p_z}{V m} \quad \frac{V \delta[\mathbf{p}]}{h^3} = 1$$

$$R = \int_{(2mW)^{1/2}}^{\infty} dp_z \int_0^{\infty} dp_x \int_0^{\infty} dp_y \frac{1}{e^{[p_z^2/(2m) - \mu]/(kT)} + 1} \left(\frac{p_z}{m}\right) \frac{1}{h^3}$$

Pasamos  $dp_x dp_y = p' 2\pi dp'$  (polares)

$$\frac{2\pi}{h^3} \int_{(2mW)^{1/2}}^{\infty} dp_z \left(\frac{p_z}{m}\right) \int_0^{\infty} \frac{p'}{e^{[p_z^2/(2m) + p'^2/(2m) - \mu]/(kT)} + 1} dp'$$

y con un cambio de variables  $\xi = p'^2/(2mkT)$

$$\frac{2\pi}{h^3} \int_{(2mW)^{1/2}}^{\infty} dp_z 2p_z \int_0^{\infty} \frac{kT}{e^{p_z^2/(2mkT)} e^{\xi} e^{-\mu/(kT)} + 1} d\xi$$

$$\frac{4\pi kT}{h^3} \int_{(2mW)^{1/2}}^{\infty} dp_z p_z \log(1 + e^{[-p_z^2/(2m) + \mu]/(kT)})$$

a  $T$  altas resulta

$$R = \frac{4\pi kT}{h^3} \int_{(2mW)^{1/2}}^{\infty} dp_z p_z e^{[-p_z^2/(2m) + \mu]/(kT)}$$

y con otro cambio de variables  $p_z^2/(2mkT) = e$

$$R = kT \int_{W/(kT)}^{\infty} 2md e e^{-e} e^{\mu/(kT)}$$

$$R = \frac{4\pi kT}{h^3} 2mkT e^{\mu/(kT)} e^{-W/(kT)} = \frac{8\pi m(kT)^2}{h^3} e^{(\mu-W)/kT}$$

a  $T$  bajas también es

$$\log(1 + e^{(\mu - p_z^2/sm)/kT}) \approx e^{[\mu - p_z^2/2m]/(kT)}$$

con lo cual la integral da lo mismo

$$R = \frac{8\pi m(kT)^2}{h^3} e^{(\mu-W)/kT} e^{-W/(kT)}$$

pero aquí

$$\frac{\lambda^3}{v} \approx z = e^{\mu/(kT)} \quad \rightarrow \quad \frac{h^3}{v(2\pi mkT)^{3/2}} = z$$

$$R = \frac{4(kT)^{1/2}}{v(2\pi m)^{1/2}} e^{-W/(kT)}$$