

TERMODINÁMICA y FÍSICA ESTADÍSTICA I

Tema 11 - ESTABILIDAD Y TRANSICIONES DE FASE. LAS TRANSICIONES DE FASE EN SISTEMAS SUPERCONDUCTORES Y MAGNÉTICOS

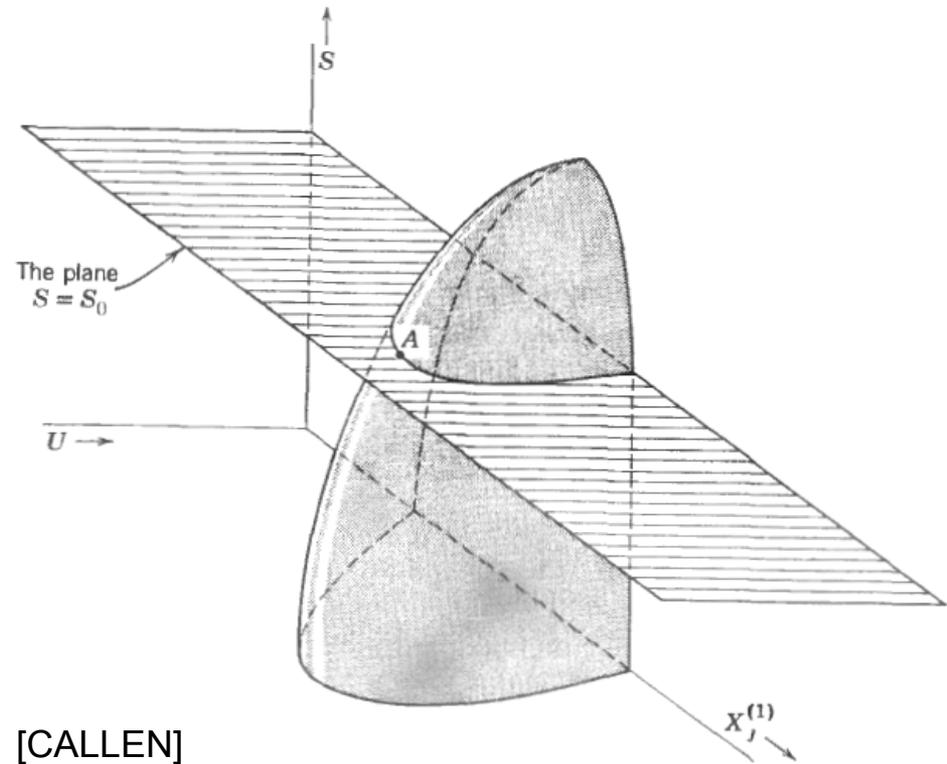
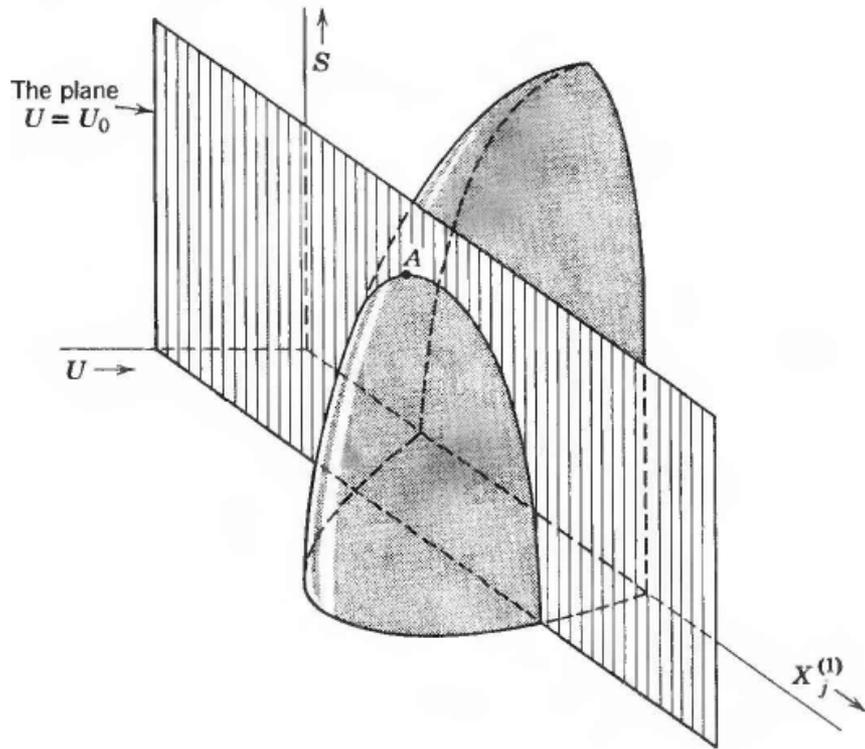
Estabilidad de los sistemas termodinámicos. Los principios de Le Châtelier y de Le Châtelier-Braun. Transiciones de fase de 1^{er} orden. Discontinuidad del volumen y de la entropía. Ecuación de Clausius-Clapeyron. Regla de las fases de Gibbs. Aleaciones binarias. Mezcla de gases: Entropía de mezcla y paradoja de Gibbs. Transiciones de fase de 2^o orden: teoría de Ehrenfest. Líquidos sobrenfriados y transición vítrea. Transición superconductor. Fenómenos críticos: transiciones de fase de orden superior. Transiciones lambda en ⁴He. Helio líquido y sólido. Transición ferromagnética.

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA:

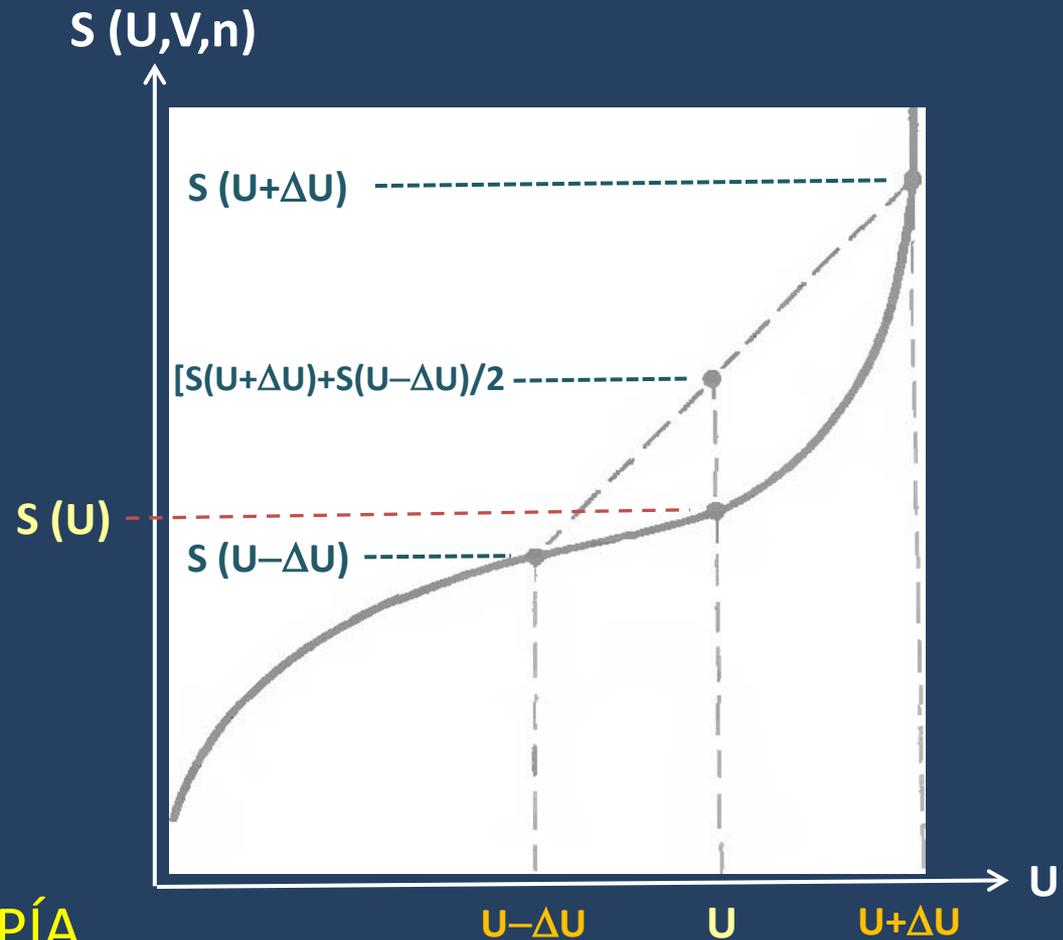
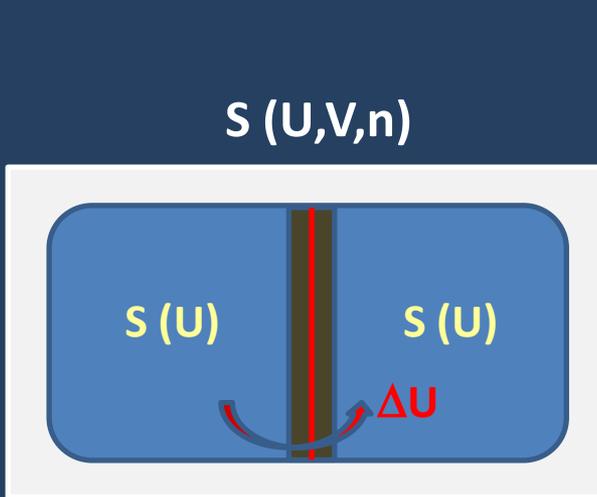
- Callen, Capítulos 8 y 9 ; [2nd ed.: Capítulos 8, 9 y 10]
- Aguilar, Capítulos 12 y 13
- Zemansky (6^a ed.), Caps. 10, 13, 14 y 16 ; [7th ed.: Caps. 11, 14, 15 y 17]

Resumen de la formulación axiomática de la termodinámica [Callen]

Principios extremales de entropía máxima y energía mínima



Estabilidad de los sistemas termodinámicos



Condición de estabilidad:
CONCAVIDAD de la ENTROPÍA

$$S(U+\Delta U, V, n) + S(U-\Delta U, V, n) \leq 2 S(U, V, n)$$

Estabilidad de los sistemas termodinámicos

Condición de estabilidad: CONCAVIDAD de la ENTROPÍA

$$S(U+\Delta U, V, n) + S(U-\Delta U, V, n) \leq 2 S(U, V, n)$$

Para $\Delta U \rightarrow 0$

$$\left(\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} \right)_{V,n} \leq 0$$

Análogamente,

$$S(U, V+\Delta V, n) + S(U, V-\Delta V, n) \leq 2 S(U, V, n)$$

Para $\Delta V \rightarrow 0$

$$\left(\frac{\partial^2 S}{\partial V^2} \right)_{U,n} \leq 0$$

Estabilidad de los sistemas termodinámicos

Condición de estabilidad:

CONVEXIDAD de la ENERGÍA INTERNA

$$U(S+\Delta S, V+\Delta V, n) + U(S-\Delta S, V-\Delta V, n) \geq 2 U(S, V, n)$$

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial S^2} \right)_{V,n} = \frac{\partial T}{\partial S} \geq 0$$

Para $\Delta S, \Delta V \rightarrow 0$

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial V^2} \right)_{S,n} = -\frac{\partial P}{\partial V} \geq 0$$

Análogamente,

$$\left(\frac{\partial^2 H}{\partial S^2} \right)_{P,n} \geq 0$$

$$\left(\frac{\partial^2 F}{\partial T^2} \right)_{V,n} \leq 0$$

$$\left(\frac{\partial^2 G}{\partial T^2} \right)_{P,n} \leq 0$$

$$\left(\frac{\partial^2 H}{\partial P^2} \right)_{S,n} \leq 0$$

$$\left(\frac{\partial^2 F}{\partial V^2} \right)_{T,n} \geq 0$$

$$\left(\frac{\partial^2 G}{\partial P^2} \right)_{T,n} \leq 0$$

Estabilidad de los sistemas termodinámicos: consecuencias físicas

$$\left(\frac{\partial T}{\partial S}\right)_V = \frac{T}{C_V} > 0 \quad \Rightarrow \quad C_{v,p} > 0, (T > 0)$$

Principios extremales \Rightarrow

$$-\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T = \frac{1}{v \cdot \kappa_T} > 0 \quad -\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_S = \frac{1}{v \cdot \kappa_S} > 0$$

Utilizando

$$(c_P - c_V) = \frac{T v \beta^2}{\kappa}$$

$$\frac{\kappa}{\kappa_S} = \frac{c_P}{c_V} \equiv \gamma$$



$$C_p \geq C_v \geq 0$$

$$\kappa_T \geq \kappa_S \geq 0$$

Estabilidad de los sistemas termodinámicos: *El principio de Le Châtelier-Braun*

$$\left(\frac{\partial T}{\partial S}\right)_V = \frac{T}{C_V} > 0 \quad \Rightarrow \quad C_{v,p} > 0, (T > 0)$$

Principios extremales \Rightarrow

$$-\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T = \frac{1}{v \cdot \kappa_T} > 0 \quad \Rightarrow \quad -\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_S = \frac{1}{v \cdot \kappa_S} > 0$$

- (i) *El aporte de calor a un sistema estable siempre incrementa **T***
- (ii) *Una expansión isotérmica (adiabática) de un sistema estable siempre tiende a reducir **P***

Principio de Le Châtelier: los procesos espontáneos inducidos por una desviación del equilibrio se efectúan en la dirección de restablecer el equilibrio

Principio de Le Châtelier-Braun: Además, el proceso inducido por la perturbación que restablece el equilibrio del sistema tiende indirectamente a atenuar la perturbación aplicada

Transiciones de fase

FASE: Sistema o subsistema termodinámico de composición química y estructura física homogéneas (= variables intensivas uniformes), limitado por una superficie a través de la cual las propiedades físicas cambian bruscamente.

Los criterios de estabilidad termodinámica (relacionados con los principios extremales de la entropía y de las energías)

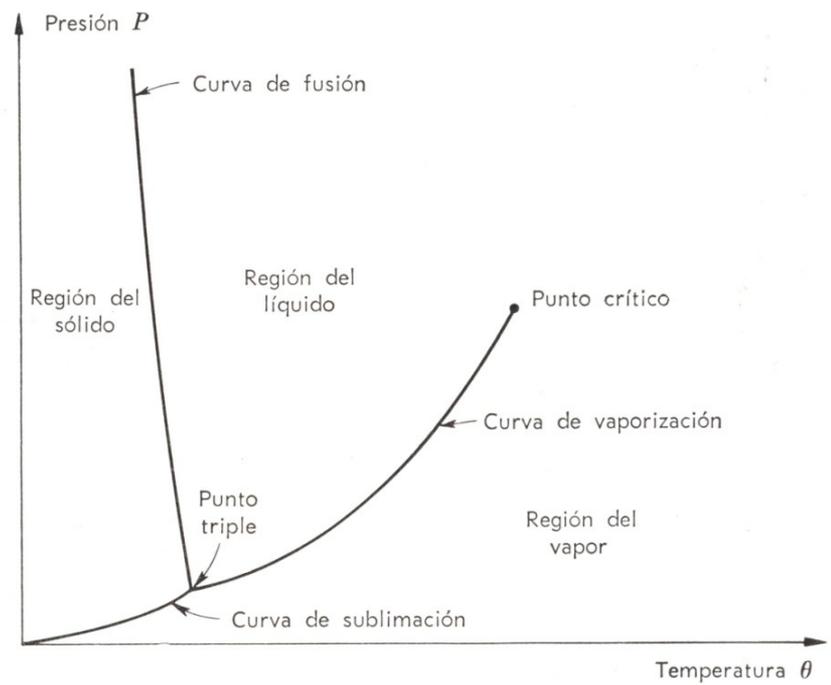
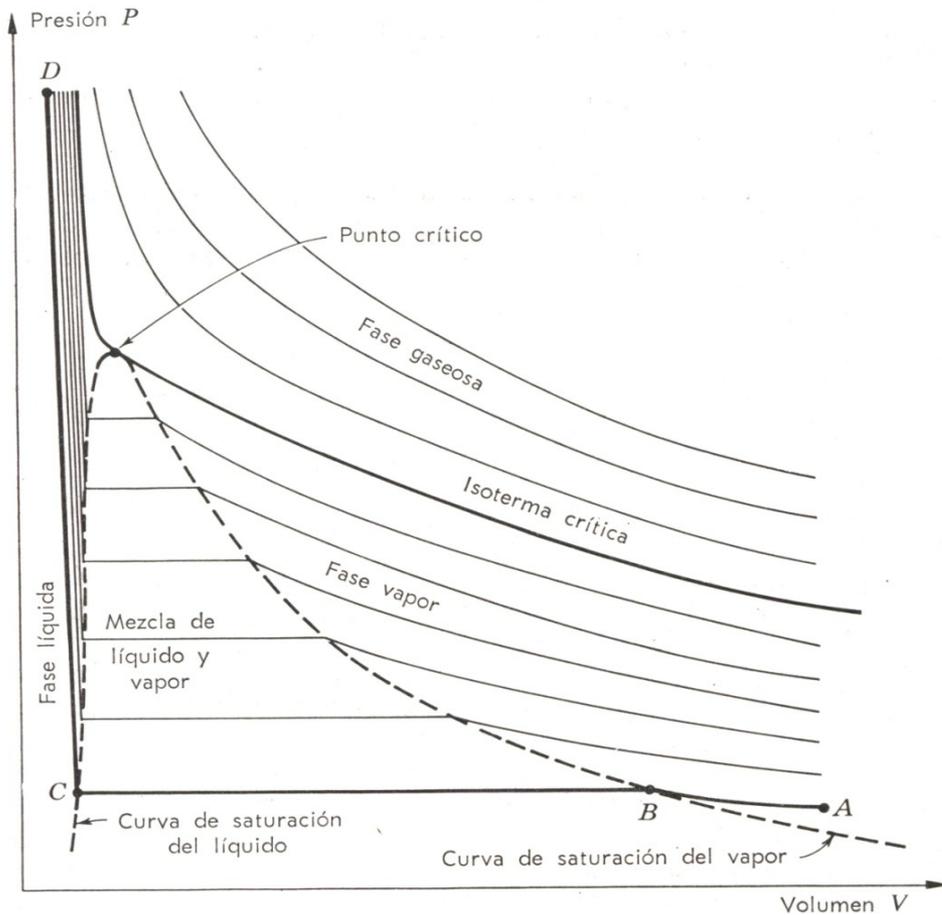
$$\left(\frac{\partial T}{\partial S}\right)_{V,P} = \frac{T}{C_{V,P}} > 0$$

$$-\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_{T,S} = \frac{1}{v \cdot \kappa_{T,S}} > 0$$

deben ser satisfechos por la ecuación fundamental de todo sistema que permanezca homogéneo y estable.

Si no se satisfacen dichos criterios, el sistema se separa en 2 ó más fases o estados \Rightarrow se produce una TRANSICIÓN DE FASE

Transiciones de fase de Primer Orden



Transiciones de fase de Primer Orden

Ecuación de van der Waals

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right) \cdot (v - b) = RT$$

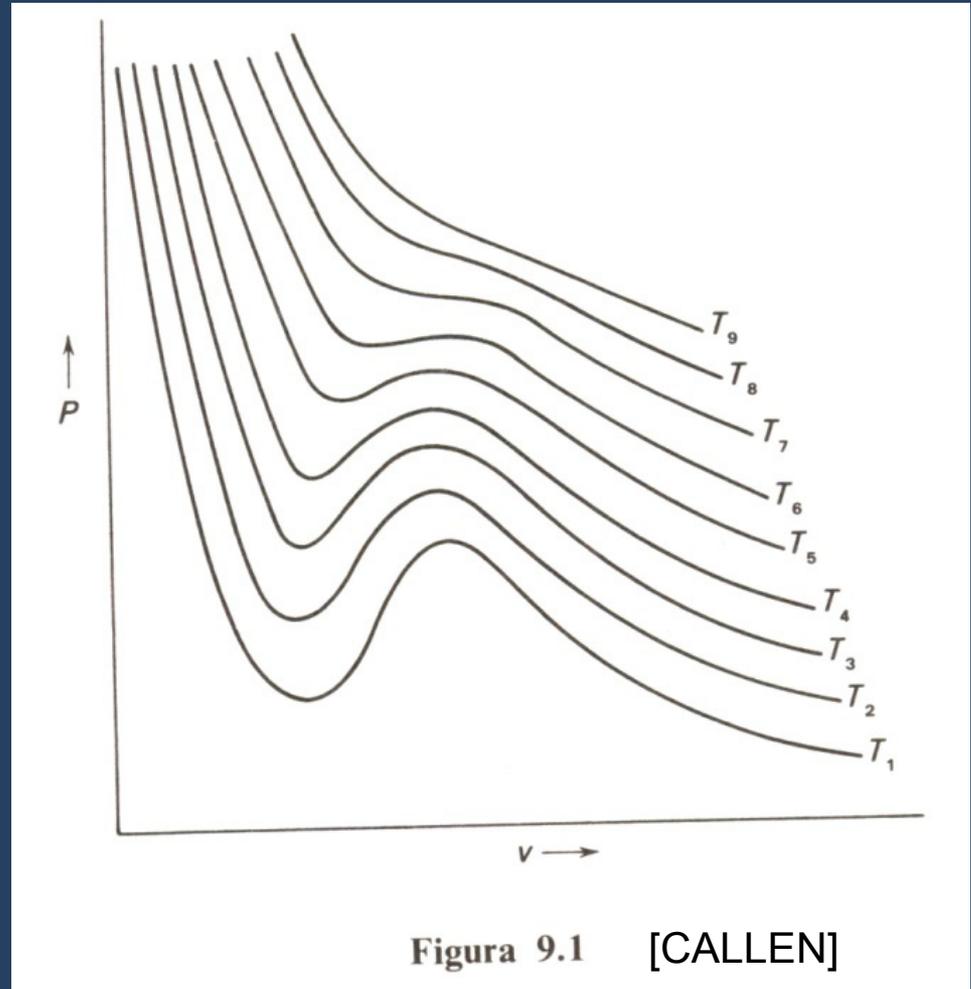
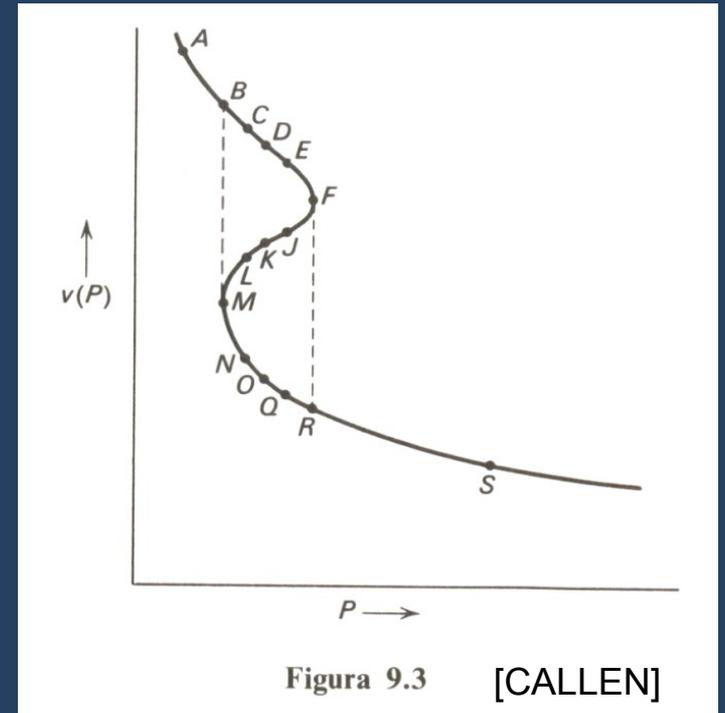
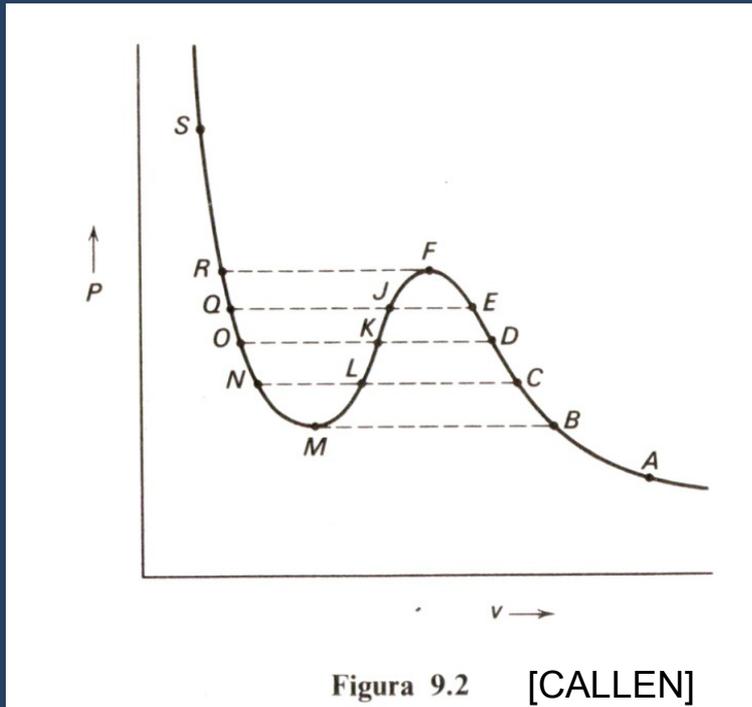


Figura 9.1 [CALLEN]

Transiciones de fase de Primer Orden



El criterio de estabilidad $\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T < 0$
se viola claramente en el tramo **FKM**

Ecuación de Gibbs-Duhem:

$$0 = S \cdot dT - V \cdot dP + n \cdot d\mu$$



$$d\mu = -s \cdot dT + v \cdot dP$$

Transiciones de fase de Primer Orden

$$d\mu = -s \cdot dT + v \cdot dP$$



$$\mu = \int v \cdot dP + C(T)$$

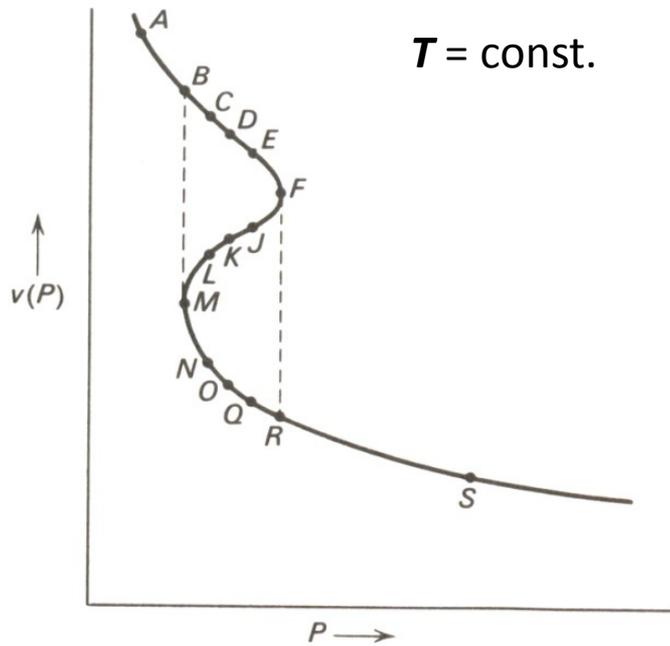


Figura 9.3

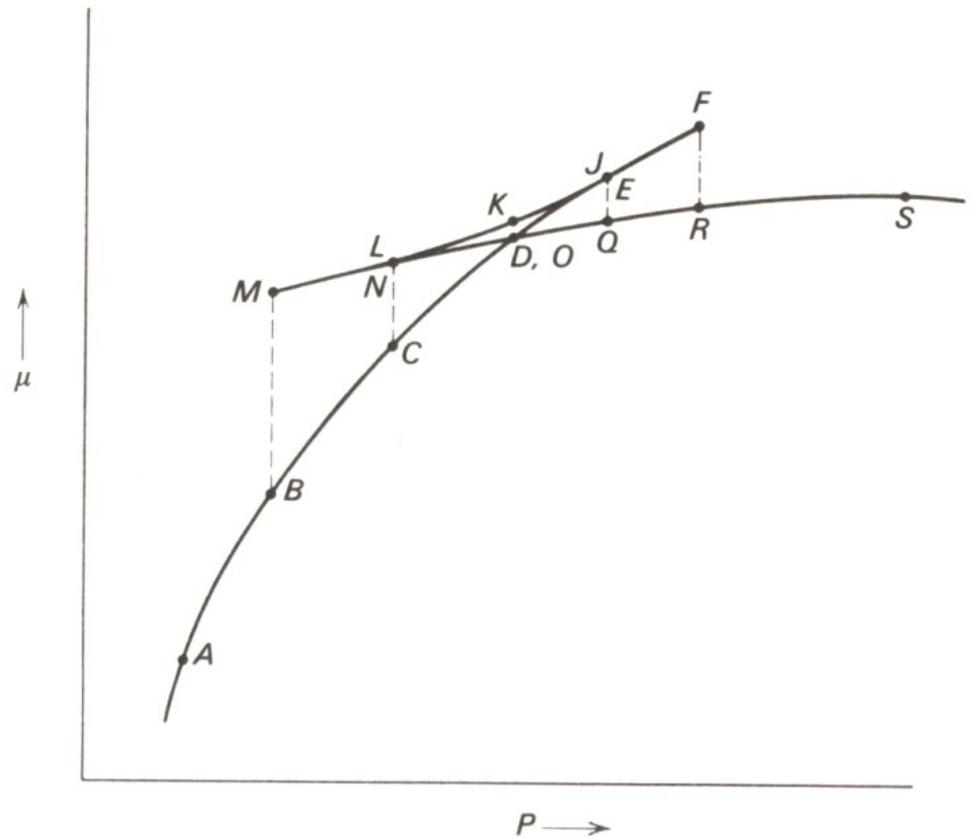
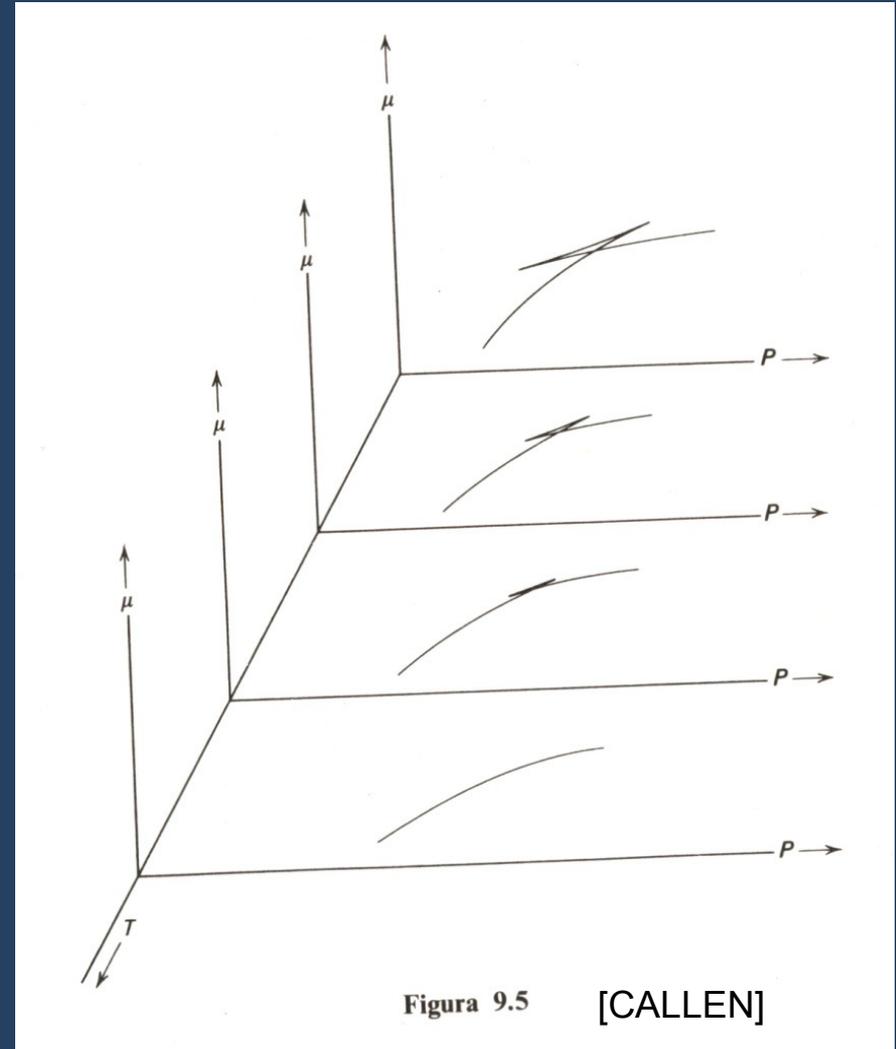
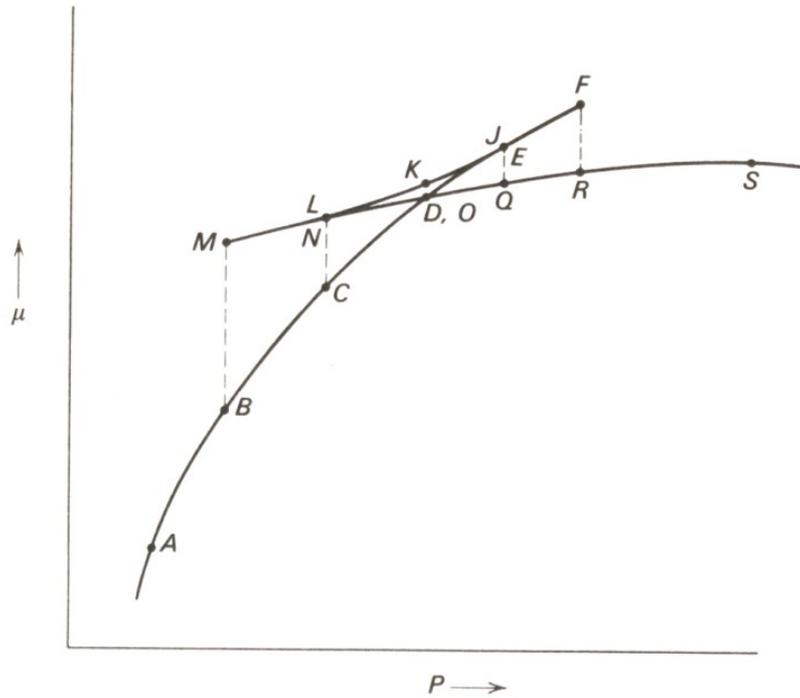
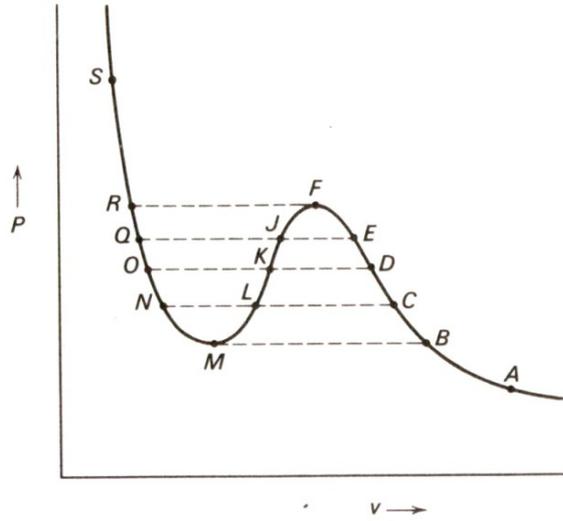
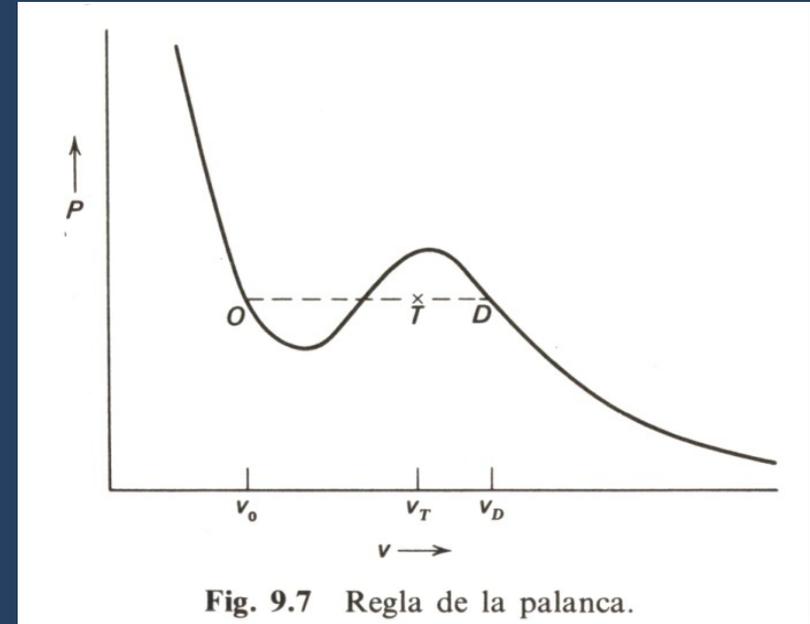
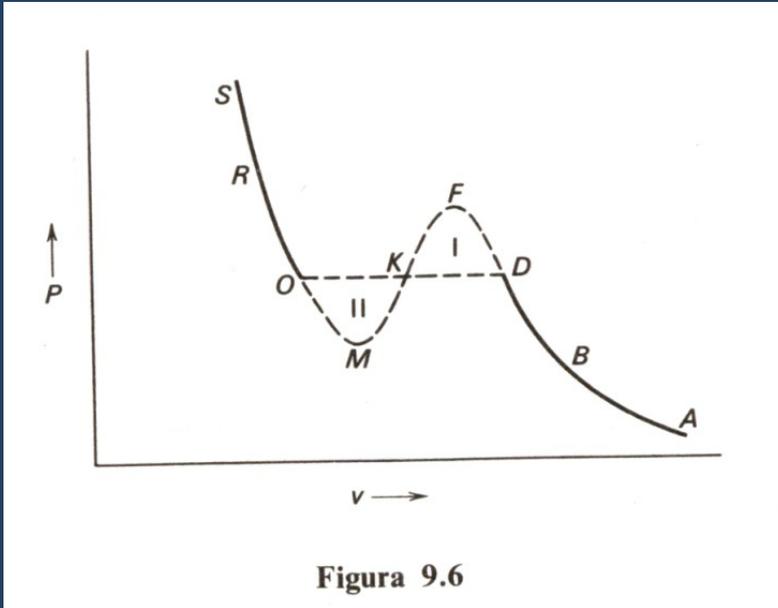


Figura 9.4

Transiciones de fase de Primer Orden



Transiciones de fase de Primer Orden: Discontinuidad del volumen (Regla de la palanca)



$$\mu_D = \mu_O \Rightarrow \int_D^O v(P) \cdot dP = 0$$

$$x_O + x_D = 1 \quad v_T = x_O v_O + x_D v_D$$

$$\int_D^F v \cdot dP + \int_F^K v \cdot dP + \int_K^M v \cdot dP + \int_M^O v \cdot dP = 0$$

$$\Rightarrow \frac{x_O}{x_D} = \frac{v_D - v_T}{v_T - v_O}$$

\Rightarrow área I = área II

(Regla de la palanca)

Transiciones de fase de Primer Orden: Discontinuidad de la entropía (*calor latente*)

$$dS = \left(\frac{\partial S}{\partial v} \right)_T dv + \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right) dT$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V$$

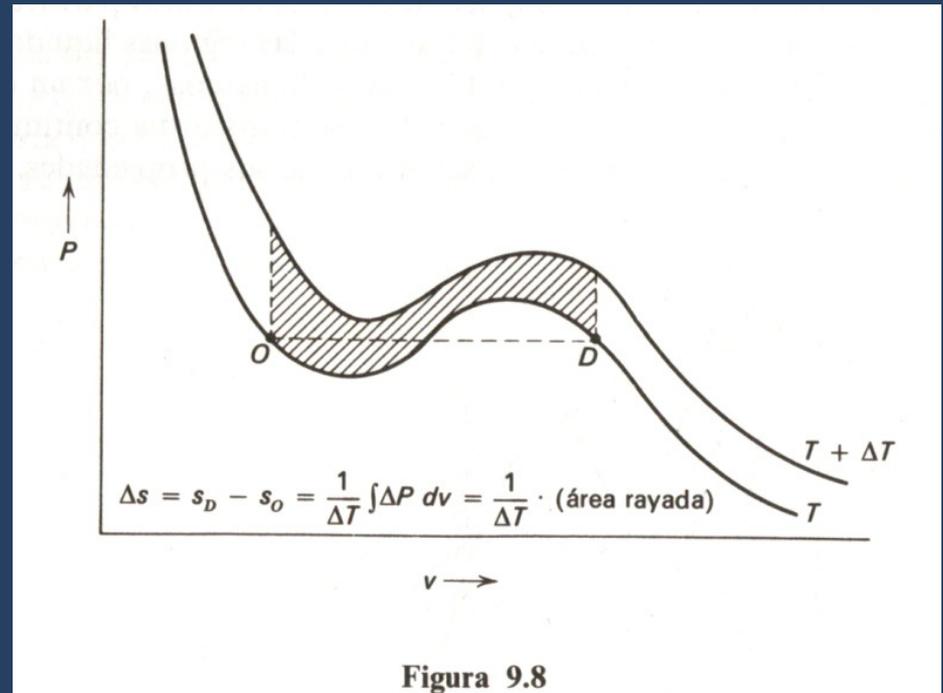
[3ª relación de Maxwell]

$$s_D - s_O = \int_{OMKFD} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v dv \neq 0$$

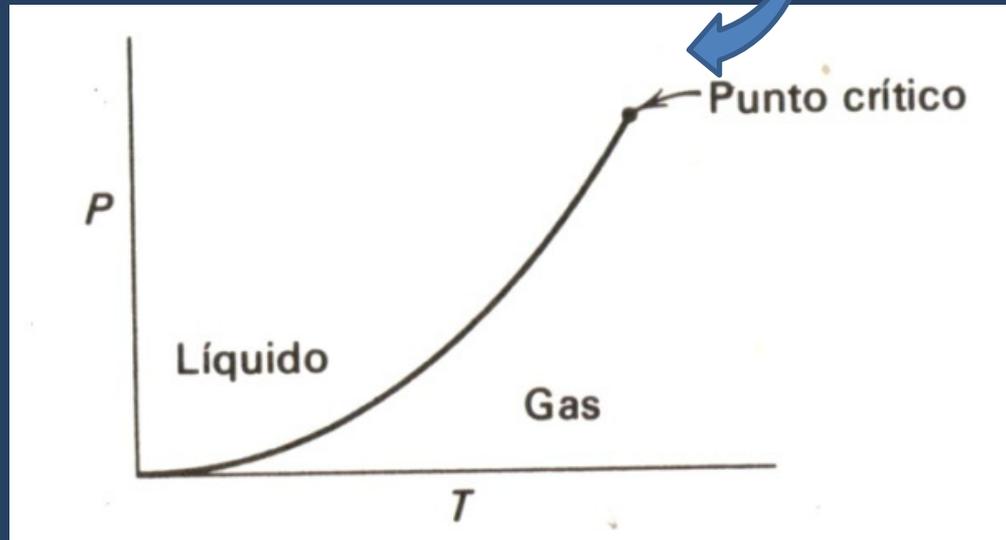
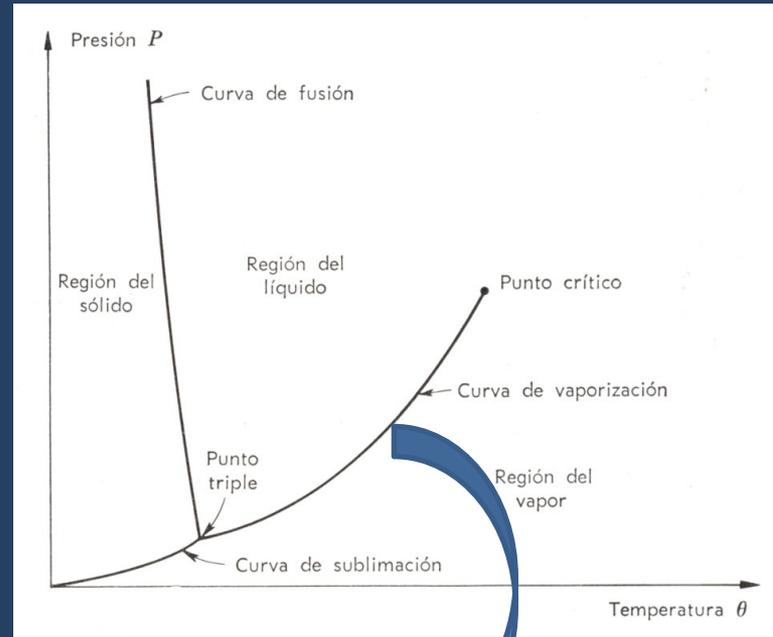
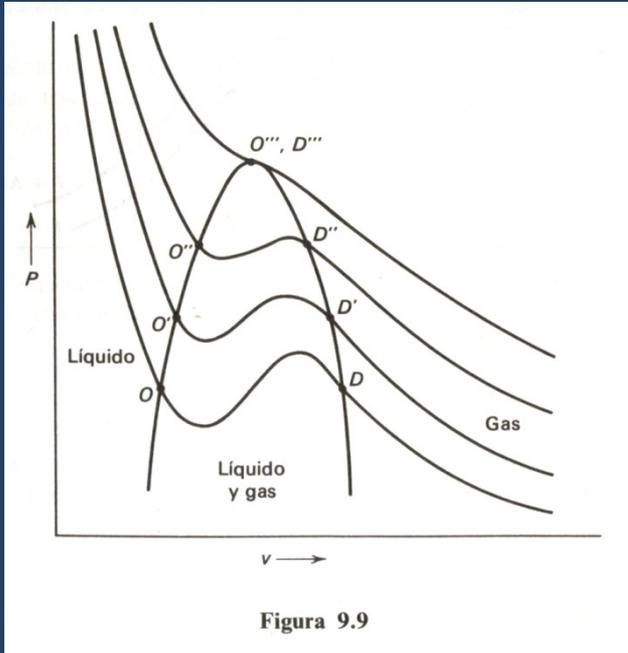
calor latente:

$$l_{DO} = T(s_D - s_O)$$

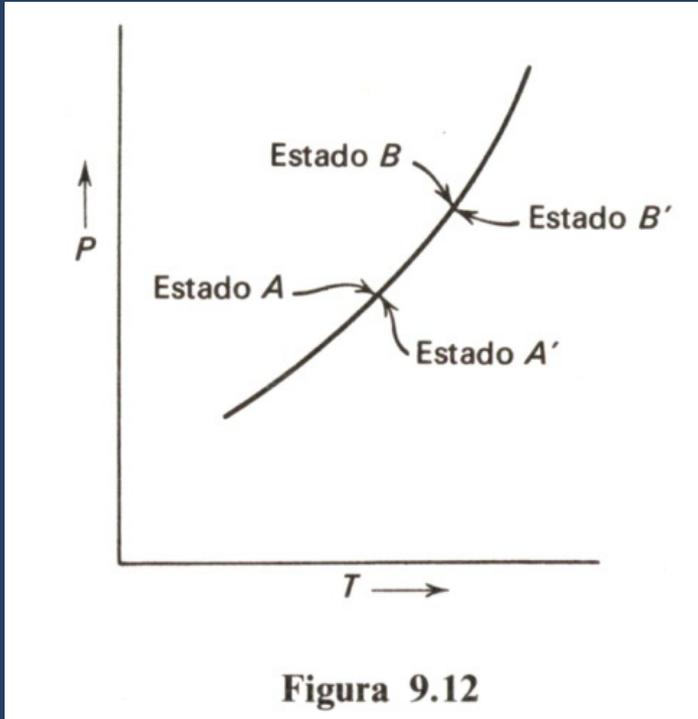
$$l = T \cdot \Delta s$$



Transiciones de fase de Primer Orden



Transiciones de fase de Primer Orden: Ecuación de Clausius-Clapeyron



$$(P_B - P_A) = (P_{B'} - P_{A'}) = dP$$

$$(T_B - T_A) = (T_{B'} - T_{A'}) = dT$$

$$\mu_A = \mu_{A'}$$

$$\mu_B = \mu_{B'}$$

$$(\mu_B - \mu_A) = (\mu_{B'} - \mu_{A'})$$

Ecuación de Gibbs-Duhem:

$$(\mu_B - \mu_A) = d\mu = -s \cdot dT + v \cdot dP$$

$$(\mu_{B'} - \mu_{A'}) = d\mu' = -s' \cdot dT + v' \cdot dP$$

Ecuación de Clausius-Clapeyron

$$\Rightarrow \frac{dP}{dT} = \frac{s' - s}{v' - v} = \frac{\Delta s}{\Delta v}$$



$$\frac{dP}{dT} = \frac{l}{T \cdot \Delta v}$$

Transiciones de fase de 1° y 2° orden (clasificación de Ehrenfest)

Transiciones de fase de primero y segundo orden

Orden de la transición	La discontinuidad aparece en las	
	derivadas de g	magnitudes experimentales
Primero	$\left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_p = -s$ $\left(\frac{\partial g}{\partial p}\right)_T = v$	Entropía específica. Calor de cambio de fase. Volumen específico. Densidad.
Segundo	$\left(\frac{\partial^2 g}{\partial T \partial p}\right)_{p,T}$ $\left(\frac{\partial^2 g}{\partial p^2}\right)_T$ $\left(\frac{\partial^2 g}{\partial T^2}\right)_p$	$\alpha = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial^2 g}{\partial T \partial p}\right)_{p,T}$ $k = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial^2 g}{\partial p^2}\right)_T$ $C_p = T \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_p = -T \left(\frac{\partial^2 g}{\partial T^2}\right)_p$

Ec. Clausius-Clapeyron

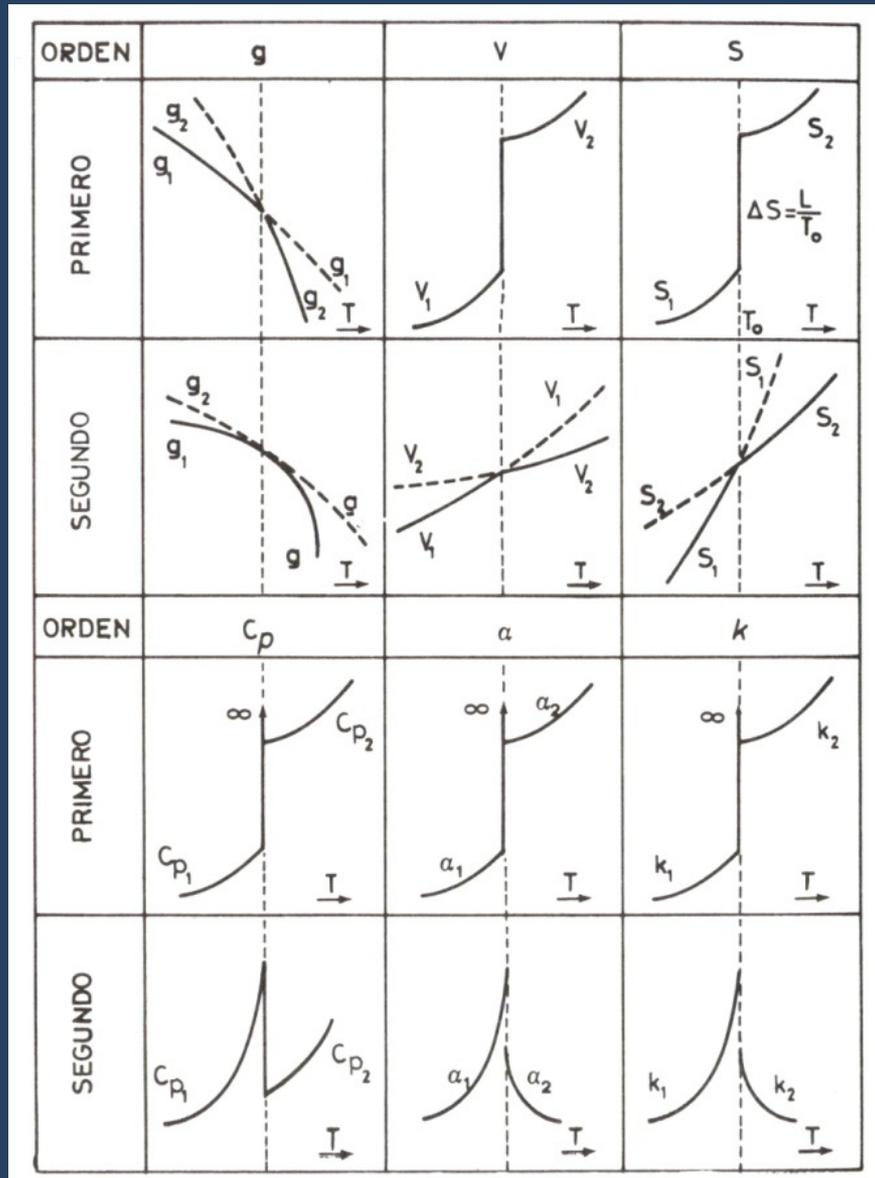
$$\frac{dP}{dT} = \frac{l}{T \cdot \Delta v}$$

Ecs. Ehrenfest

$$\frac{dP}{dT} = \frac{1}{vT} \frac{\Delta C_P}{\Delta \alpha}$$

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta \kappa_T}$$

Transiciones de fase de 1° y 2° orden (clasificación de Ehrenfest)



Sistemas con más de 1 componente: $G = G(T, P, n_1, n_2, \dots, n_c)$

Regla de las fases de Gibbs

Ejemplo → 2 fases: sólida (I) y líquida (II); 2 componentes: $i=1,2$

Condición equilibrio entre las fases de la componente 1:

$$\mu_1^I(T, P, x_1^I) = \mu_1^{II}(T, P, x_1^{II})$$

Condición equilibrio entre las fases de la componente 2:

$$\mu_2^I(T, P, x_2^I) = \mu_2^{II}(T, P, x_2^{II})$$

Ejemplo → 3 fases: I, II, III (punto triple); 2 componentes: $i=1,2$

Condición equilibrio entre las fases de la componente 1:

Condición equilibrio entre las fases de la componente 2:

$$\mu_2^I(T, P, x_2^I) = \mu_2^{II}(T, P, x_2^{II}) = \mu_2^{III}(T, P, x_2^{III})$$

$$\mu_1^I(T, P, x_1^I) = \mu_1^{II}(T, P, x_1^{II}) = \mu_1^{III}(T, P, x_1^{III})$$

*¿Cuántas variables (de las 8) podemos seleccionar de forma independiente?

1 ligadura para cada fase de las fracciones molares →

$$x_1^F + x_2^F = 1$$

⇒ 3 ligaduras

2 ligaduras por cada componente de las condiciones de equilibrio →

$$\mu_i^F = \mu_i^{F'}$$

⇒ 4 ligaduras

⇒ $(8-7) = 1$ sola variable independiente o "grado de libertad" !

Sistemas con más de 1 componente: Regla de las fases de Gibbs

En general \rightarrow M fases ; c componentes

Nº variables: $T, P; \{x_1^I, x_2^I, \dots, x_{c-1}^I\}, \{x_1^{II}, x_2^{II}, \dots, x_{c-1}^{II}\} \dots \{x_1^M, x_2^M, \dots, x_{c-1}^M\}$



$$2 + M(c - 1)$$

Nº ecuaciones de equilibrio de μ_i : $(M - 1) \times c$

Nº de grados de libertad f = Nº de variables – Nº de ligaduras :

$$f = [2 + M(c - 1)] - c(M - 1) = 2 + cM - M - cM + c = c - M + 2$$

Regla de las fases de Gibbs

$$f = c - M + 2$$

(Nº de grados de libertad = Nº de componentes – Nº de fases + 2)

Sistemas con más de 1 componente: Diagramas de fases para sistemas binarios

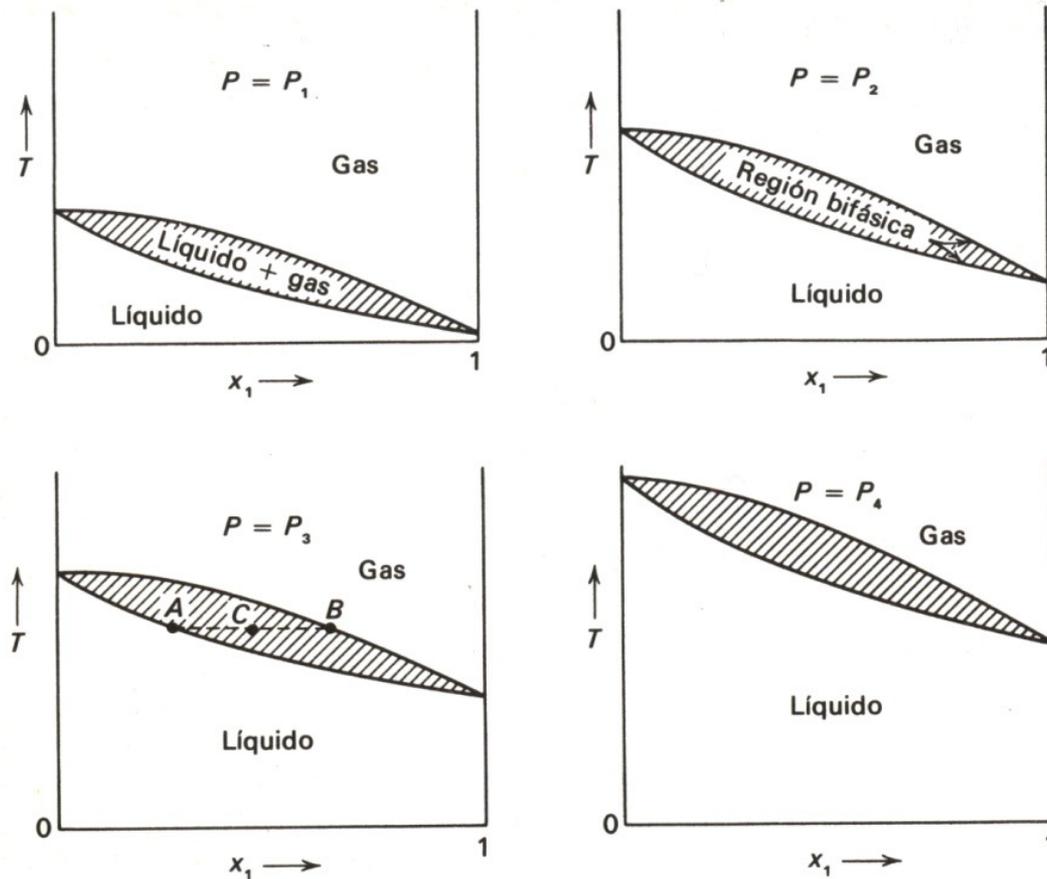


Fig. 9.14 Diagrama de fases tridimensional de un sistema binario típico gas-líquido. Las secciones bidimensionales son planos de presión constante, con $P_1 < P_2 < P_3 < P_4$.

Sistemas con más de 1 componente: Diagramas de fases para sistemas binarios

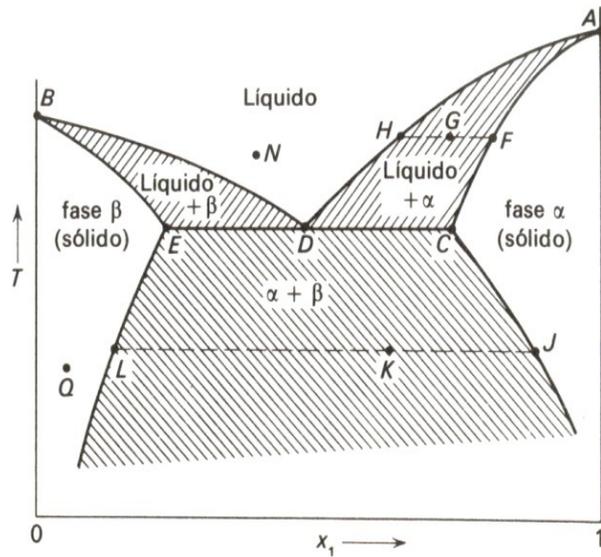


Fig. 9.15 Diagrama de fases típico para un sistema binario a presión constante.

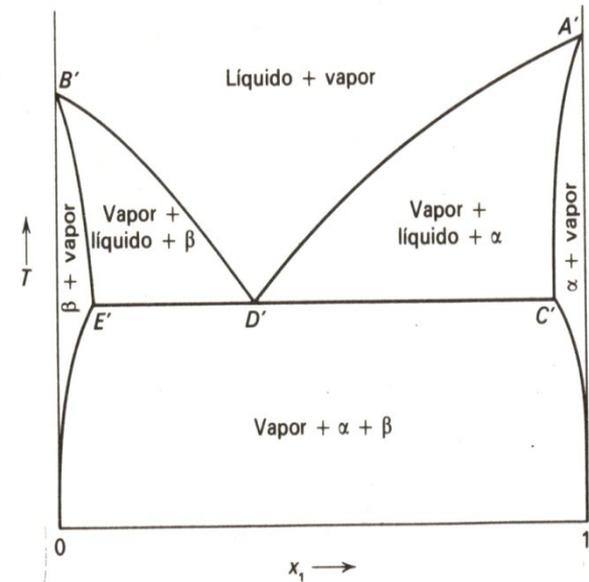


Fig. 9.16 Diagrama de fases para un sistema binario en equilibrio con su fase vapor.

Mezcla de gases (homogéneos e inertes): Ley de Dalton

$$PV = (n_1 + n_2 + n_3 + \dots n_c) = \frac{n_1 RT}{V} + \frac{n_2 RT}{V} + \frac{n_3 RT}{V} + \dots + \frac{n_c RT}{V}$$

Presiones parciales:

$$p_k \equiv \frac{n_k RT}{V}$$

⇒ **LEY de DALTON:**

$$P = (p_1 + p_2 + p_3 + \dots p_c) = \sum_k p_k$$

Es decir,

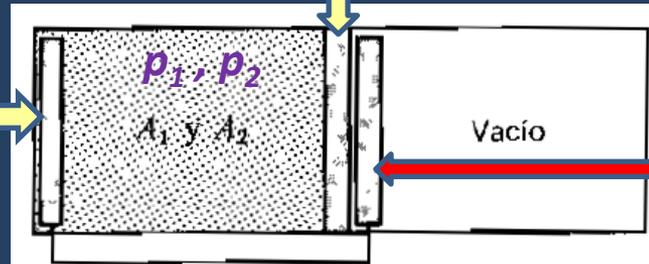
$$p_k = \frac{n_k}{\sum_k n_k} P = x_k \cdot P$$

Mezcla de gases (homogéneos e inertes): ENTROPÍA - Teorema de Gibbs

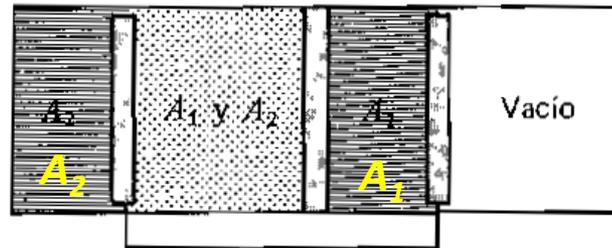
Membrana (rígida) semipermeable al gas A_1

Membrana (móvil) semipermeable al gas A_2

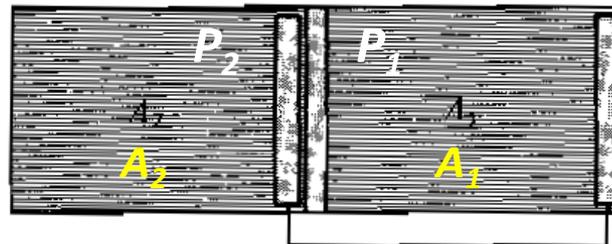
Membrana (móvil) impermeable a todo



(i) Estado inicial de equilibrio



(k) Estado intermedio de equilibrio



(f) Estado final de equilibrio

CONDICIONES:

- ♣ Cuasiestático
- ♣ Sin rozamiento
- ♣ $T = \text{constante}$

$$\leftarrow (p_1 + p_2) \times \text{área} + 0$$

$$\rightarrow (P_1 + P_2) \times \text{área}$$

Equilibrio de membrana:

$$p_1 = P_1, p_2 = P_2$$

$$\Rightarrow W = 0$$

$$\Delta U = 0 \Rightarrow T(S_f - S_i) = 0$$

$$\Rightarrow S_f = S_i$$

Separación isotérmica reversible de 2 gases ideales inertes

Mezcla de gases (homogéneos e inertes): ENTROPÍA - Teorema de Gibbs

$$S_f = S_i$$

⇒ S_f (suma de las entropías de los gases) = S_i (suma de las entropías de la mezcla)

Entropía parcial de un gas: la que tendría si ocupase el V total a la misma T

Teorema de Gibbs:

La entropía de una mezcla de gases ideales es la suma de sus entropías parciales

Mezcla de gases (homogéneos e inertes): ENTROPÍA de MEZCLA y Paradoja de Gibbs

Mezcla de gases separados A_1, A_2, \dots, A_c :

$$S_k = S_{0,k} + \int c_{p,k} \frac{dT}{T} - R \ln P$$

$$\rightarrow S_i = \sum_k n_k \left(S_{0,k} + \int c_{p,k} \frac{dT}{T} - R \ln P \right) = R \sum_k n_k (\sigma_k - \ln P)$$

donde hemos definido:

$$\sigma_k \equiv \frac{S_{0,k}}{R} + \frac{1}{R} \int c_{p,k} \frac{dT}{T}$$

Tras suprimir los tabiques,
los gases se difunden y, en
virtud del Teorema de Gibbs:

$$S_f = R \sum_k n_k (\sigma_k - \ln p_k)$$

$$p_k = x_k \cdot P \Rightarrow S_f = R \sum_k n_k (\sigma_k - \ln P - \ln x_k) \Rightarrow S_f - S_i = -R \sum_k n_k \ln x_k > 0$$

ENTROPÍA de MEZCLA

Mezcla de gases (homogéneos e inertes): Energía libre de Gibbs $G(T,P,x_k)$

$$h = h_0 + \int c_p dT$$

$$s = s_0 + \int c_p \frac{dT}{T} - R \ln P$$

$$g = h - Ts = h_0 + \int c_p dT - Ts_0 - T \int c_p \frac{dT}{T} + RT \ln P$$

Integrando por partes y definiendo:

$$\phi \equiv \frac{h_0}{RT} - \frac{s_0}{R} - \frac{1}{R} \int \frac{C_p dT}{T^2}$$



$$g = RT(\phi + \ln P)$$

Mezcla de gases separados A_1, A_2, \dots, A_c :

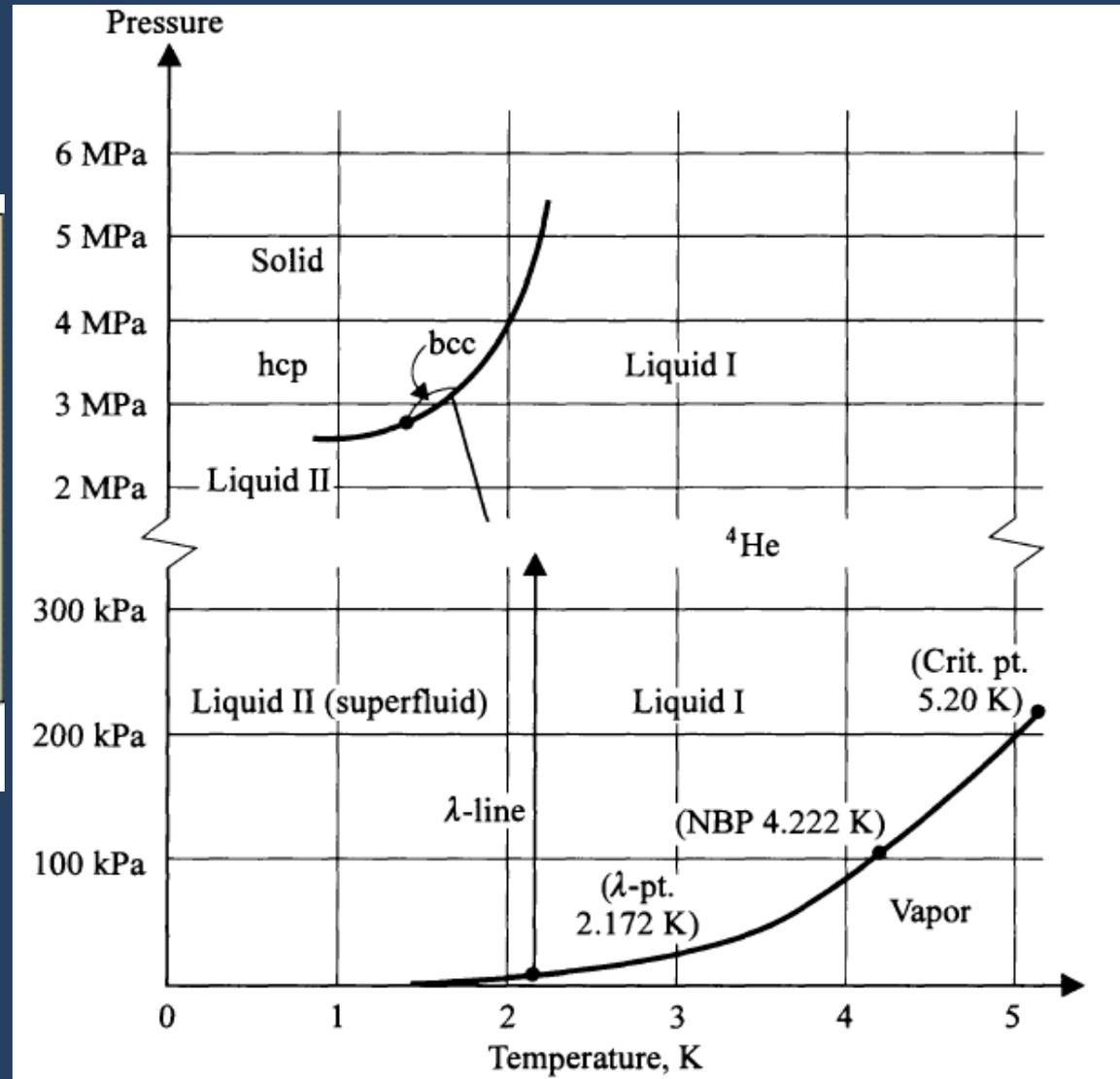
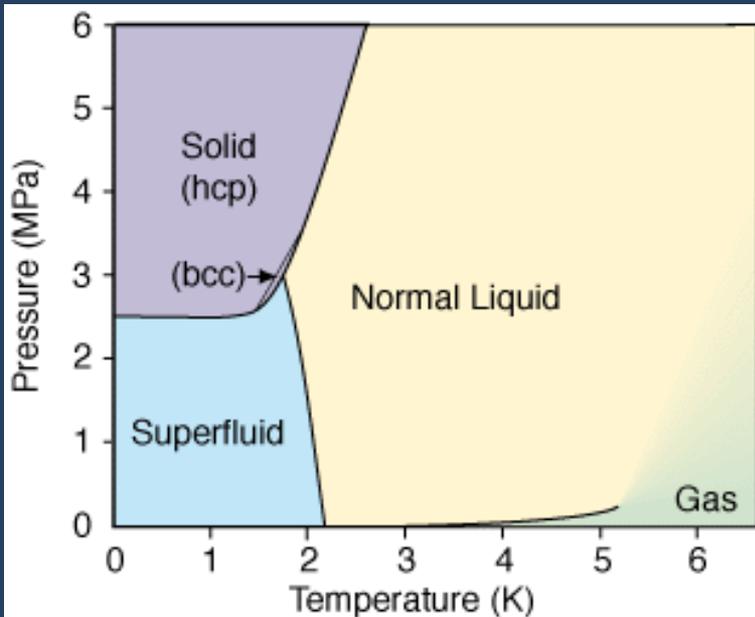
$$G_i = \sum_k n_k g_k = RT \sum_k n_k (\phi_k + \ln P)$$

$$G_f = RT \sum_k n_k (\phi_k + \ln p_k) = RT \sum_k n_k (\phi_k + \ln P + \ln x_k)$$

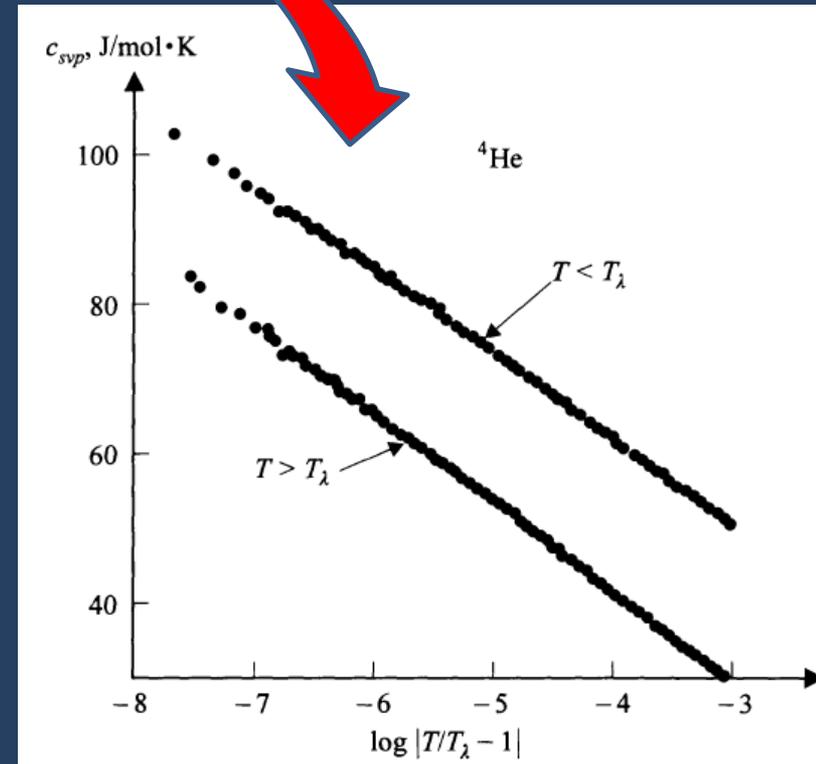
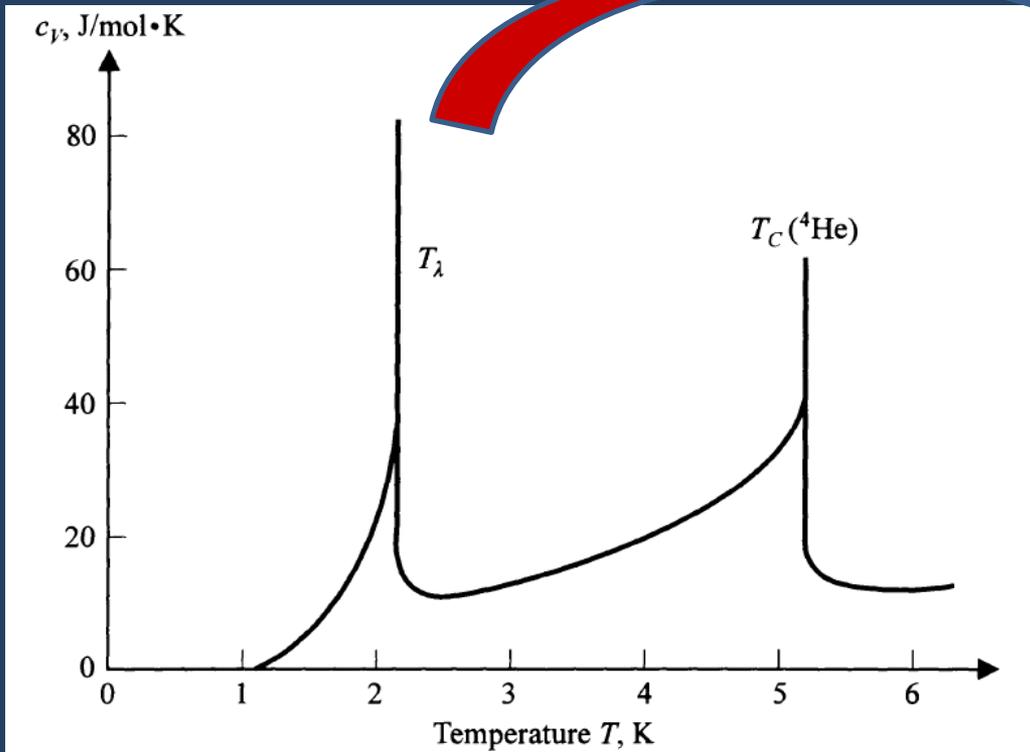


$$G_f - G_i = RT \sum_k n_k \ln x_k < 0$$

Diagrama de fases del helio (^4He)



Transiciones de fase tipo lambda



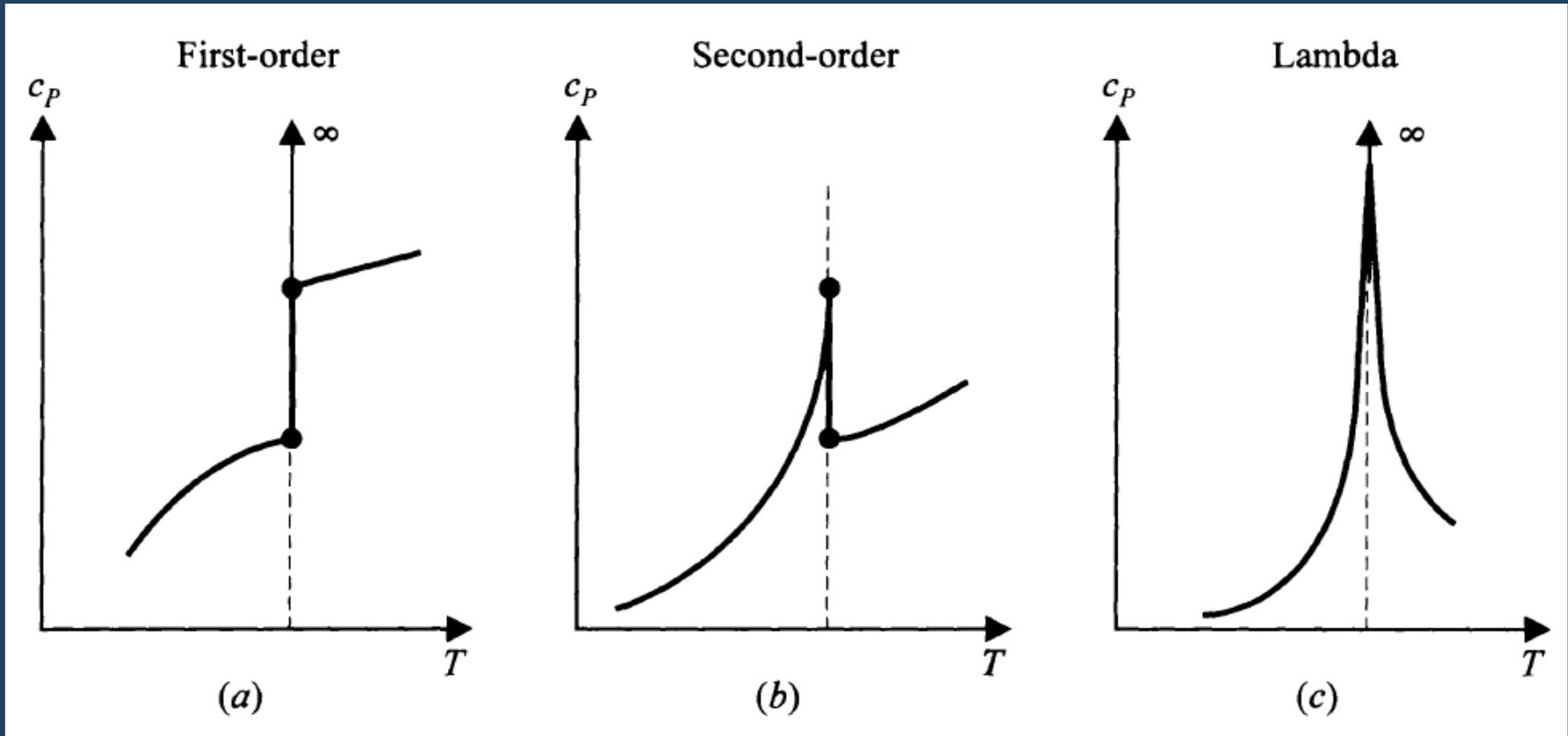
$$\varepsilon \equiv \frac{T - T_\lambda}{T_\lambda}$$

$$c_p = B + (A/\alpha)\varepsilon^{-\alpha} (1 - D\varepsilon^{1/2})$$

$$\rightarrow \alpha \approx 0.014$$

Transiciones de fase de 1°, 2° orden y tipo lambda

$$[T_1 = T_2 ; P_1 = P_2 ; g_1 = g_2]$$

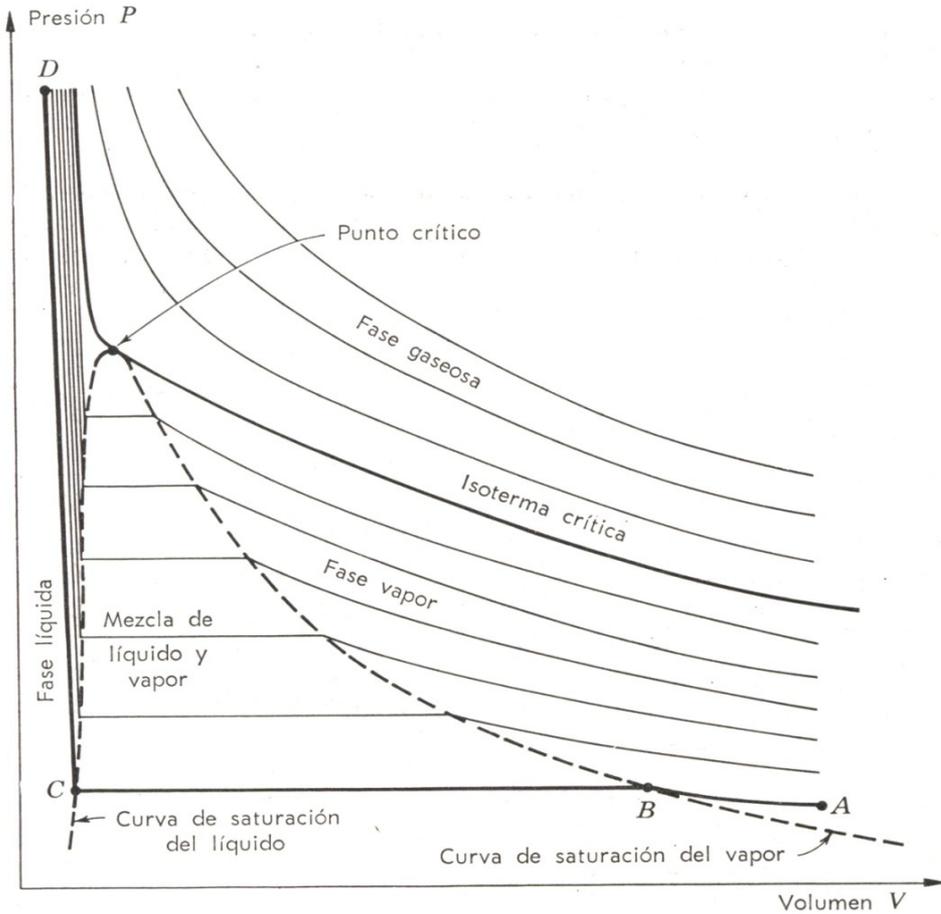


$$\begin{aligned} V_1 &\neq V_2 \\ S_1 &\neq S_2 \\ C_p, \alpha, \kappa_T &\rightarrow \infty \end{aligned}$$

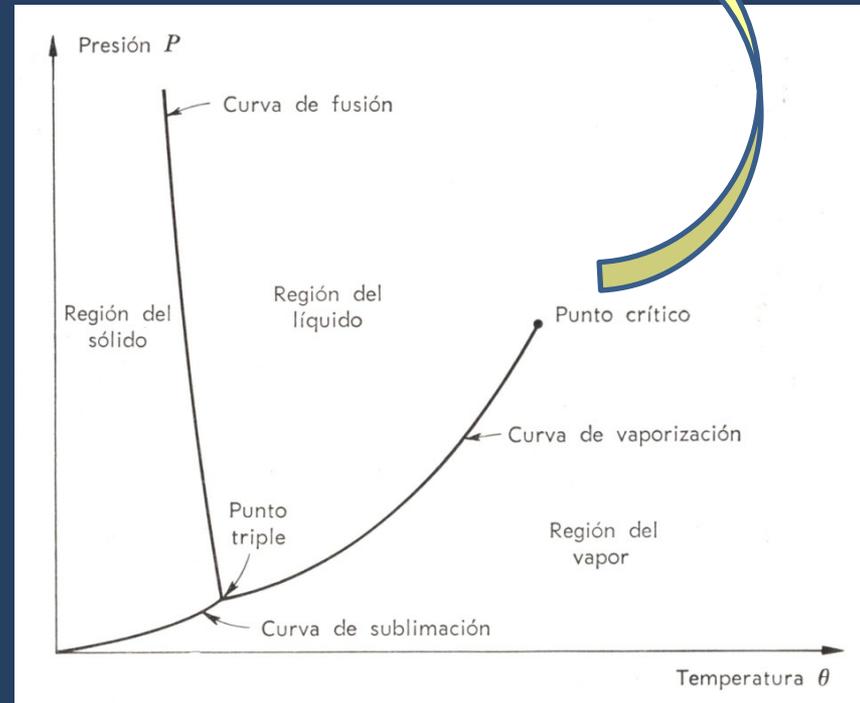
$$\begin{aligned} V_1 &= V_2 \\ S_1 &= S_2 \\ C_{p1} &\neq C_{p2} \\ \alpha_1 &\neq \alpha_2 \\ \kappa_{T1} &\neq \kappa_{T2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_1 &= V_2 \\ S_1 &= S_2 \\ C_p, \alpha, \kappa_T &\rightarrow \infty \end{aligned}$$

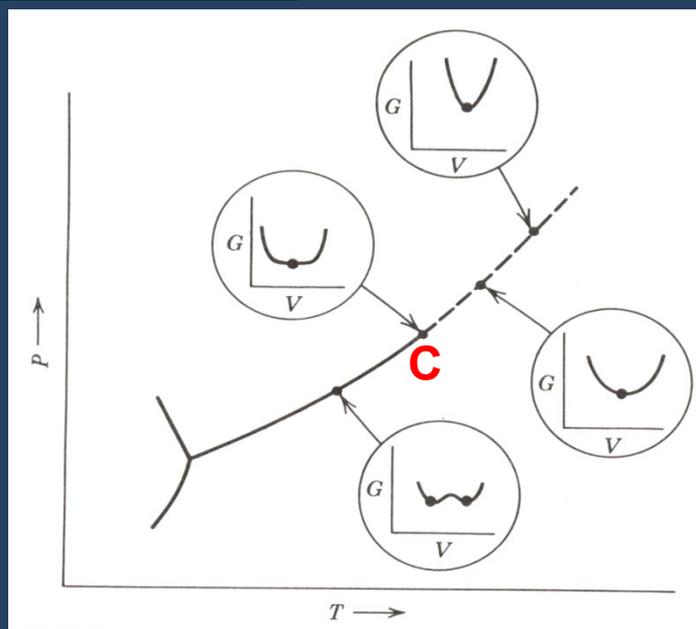
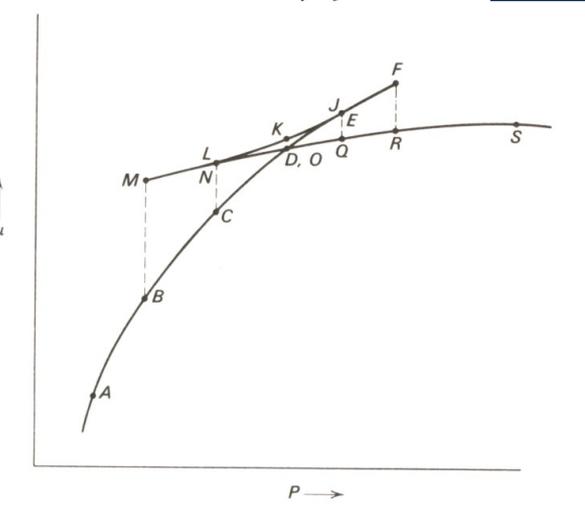
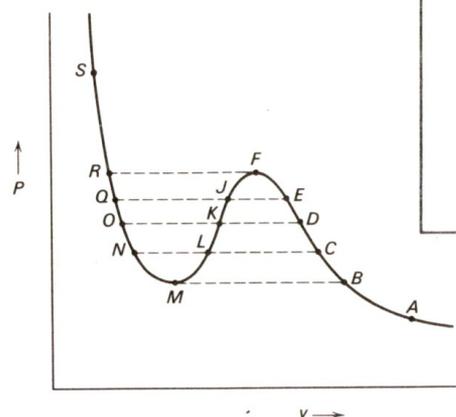
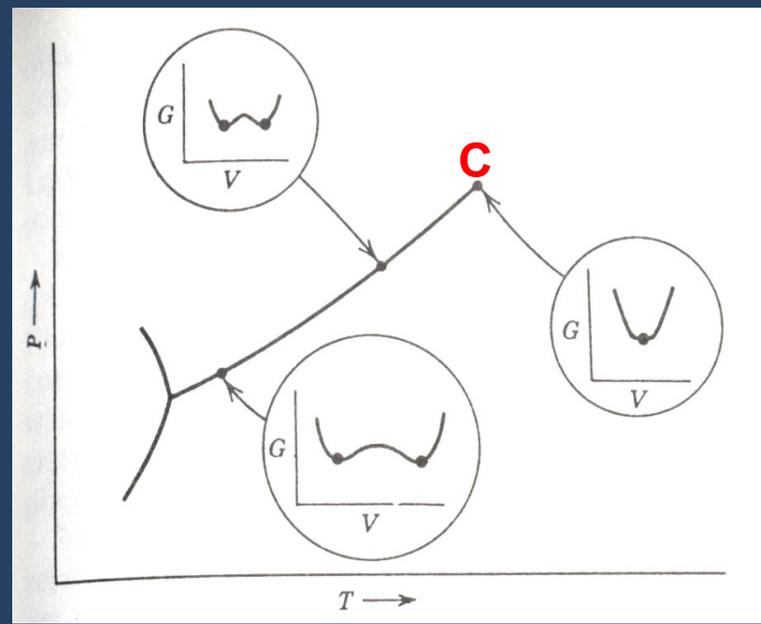
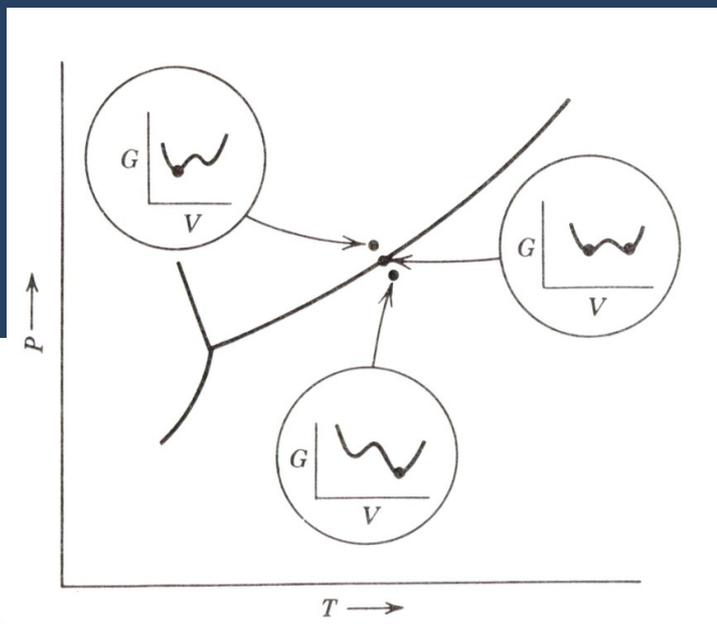
Transiciones de fase y fenómenos críticos



Opalescencia crítica



Estados termodinámicos estables, metastables e inestables



Puntos críticos y teoría de fenómenos críticos: Transición líquido-vapor

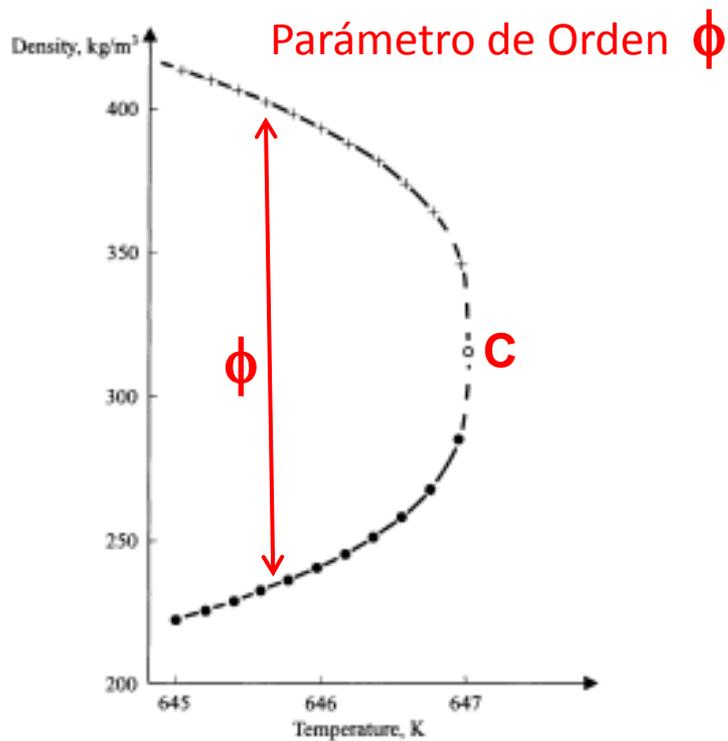
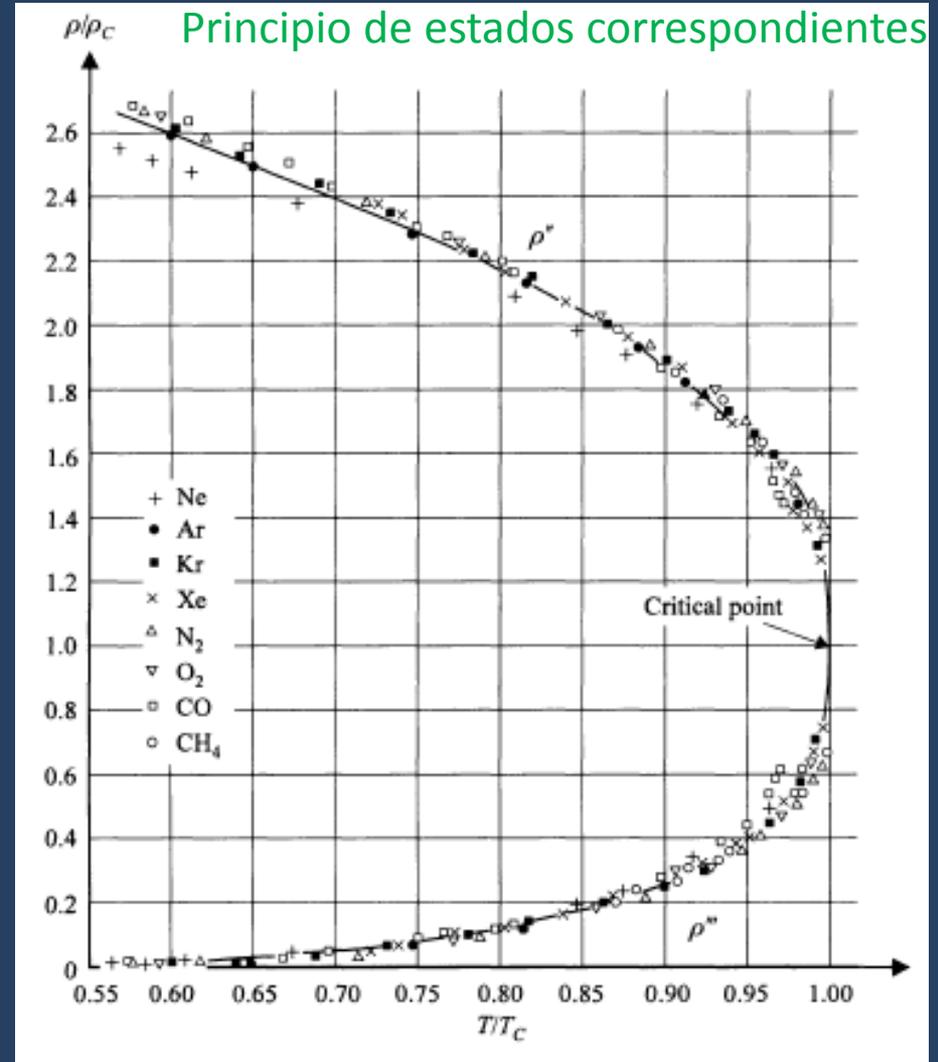
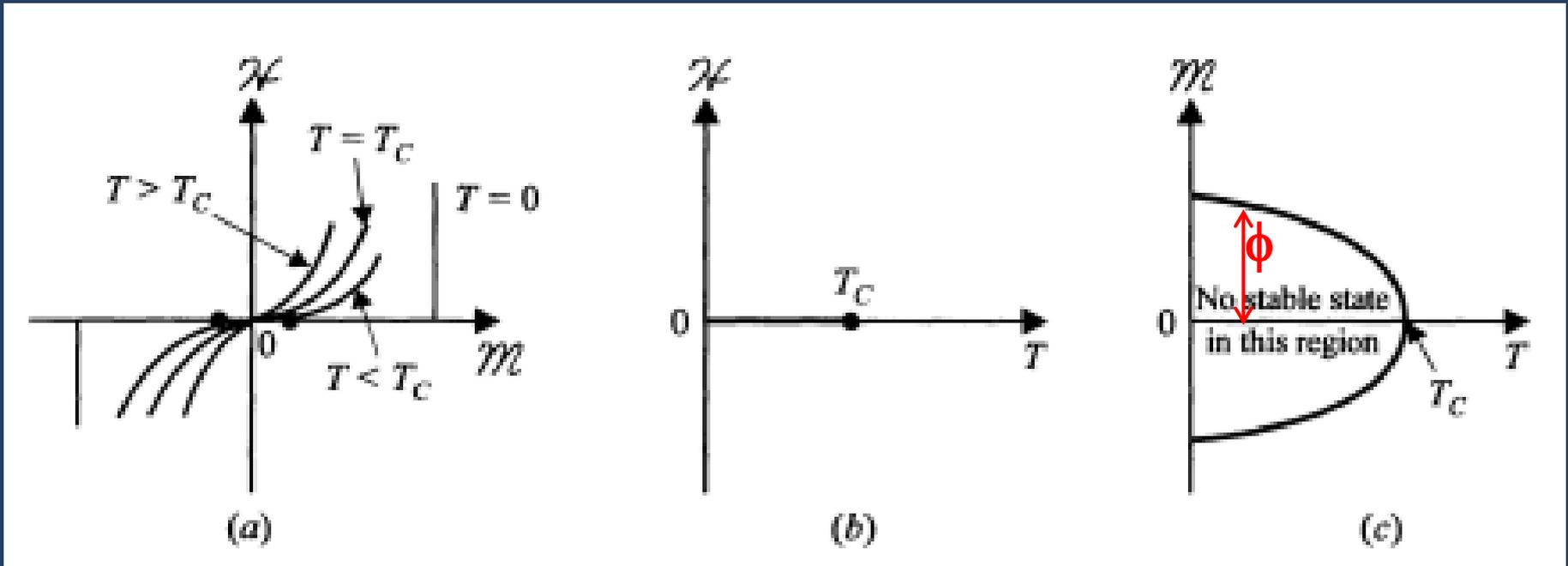


FIGURE 9-2
Density curves of liquid and vapor H_2O meet at the critical point (+, liquid; •, vapor; o, critical point).

$$\phi = (\rho_{liq} - \rho_{gas}) / \rho_c$$



Puntos críticos y teoría de fenómenos críticos: Transición ferromagnética



$$\phi = |M|$$

$\Phi \propto (T_c - T)^\beta$	$T \leq T_c$
$\Phi = 0$	$T > T_c$

Puntos críticos y teoría de fenómenos críticos

Examples of Critical Points and Their Order Parameters*

<i>Critical Point</i>	<i>Order Parameter</i>	<i>Example</i>	T_{cr} (K)
Liquid–gas	Molar volume	H ₂ O	647.05
Ferromagnetic	Magnetic moment	Fe	1044.0
Antiferromagnetic	Sublattice magnetic moment	FeF ₂	78.26
λ -line in ⁴ He	⁴ He quantum mechanical amplitude	⁴ He	1.8–2.1
Superconductivity	Electron pair amplitude	Pb	7.19
Binary fluid mixture	Fractional segregation of components	CCl ₄ –C ₇ F ₁₄	301.78
Binary alloy	Fraction of one atomic species on one sublattice	Cu–Zn	739
Ferroelectric	Electric dipole moment	Triglycine sulfate	322.5

Puntos críticos y teoría de fenómenos críticos: exponentes críticos

Calores específicos

$$C_{V,H} \propto (T - T_c)^{-\alpha}, T > T_c$$

$$C_{V,H} \propto (T_c - T)^{-\alpha'}, T < T_c$$

Parámetro de orden

$$\Phi \propto (T_c - T)^\beta, T < T_c$$

Susceptibilidades
generalizadas

$$\kappa_T, \chi_T \propto (T - T_c)^{-\gamma}, T > T_c$$

$$\kappa_T, \chi_T \propto (T_c - T)^{-\gamma'}, T < T_c$$

Isoterma crítica

$$(\rho_L - \rho_v) \propto (P - P_c)^{1/\delta}$$

$$M \propto H^{1/\delta}$$

$$T = T_c$$

Puntos críticos y teoría de fenómenos críticos: exponentes críticos

Tabla 13.2. Resumen de exponentes del punto crítico para sistemas hidrostáticos

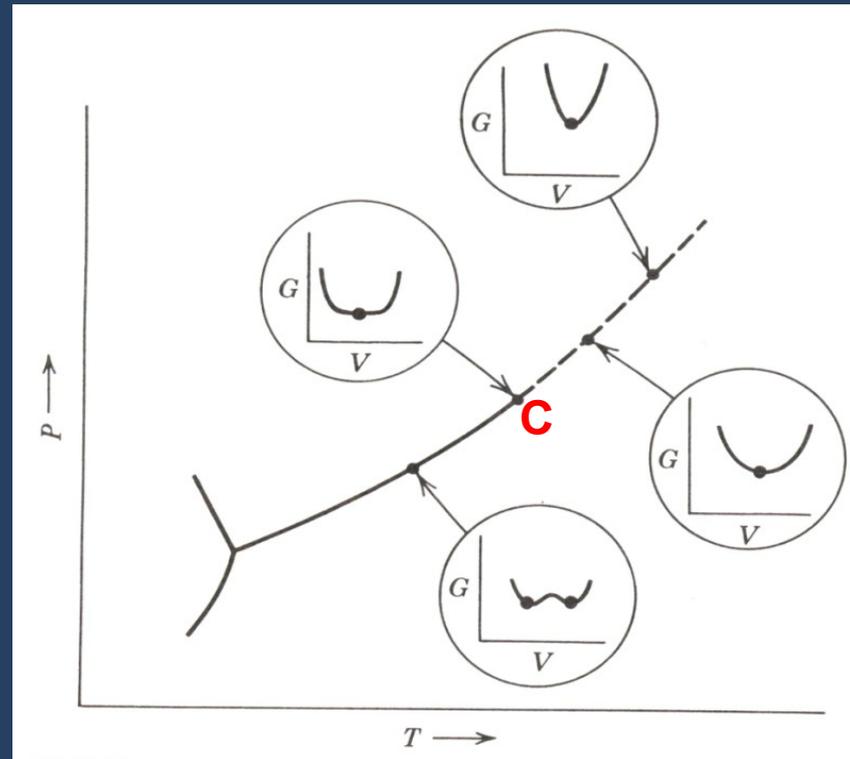
Exponente	Función	Condiciones			Ar	Xe	CO ₂	³ He	⁴ He
		ε	$P - P_C$	$\rho - \rho_C$					
α'	$c_{V=V_C} \sim (-\varepsilon)^{-\alpha'}$	< 0	0	0	< 0.25	< 0.2	0.124	0.105	0.017
α	$c_{V=V_C} \sim \varepsilon^{-\alpha}$	> 0	0	0	< 0.4	—	0.124	0.105	0.017
β	$\rho'' - \rho''' \sim (-\varepsilon)^\beta$	< 0	0	$\neq 0$	0.362	0.35	0.34	0.361	0.354
γ'	$\kappa \sim (-\varepsilon)^{-\gamma'}$	< 0	0	$\neq 0$	1.20	—	1.1	1.17	1.24
γ	$\kappa \sim \varepsilon^{-\gamma}$	> 0	0	0	1.20	1.3	1.35	1.17	1.24
δ	$P - P_C \sim \rho'' - \rho''' ^\delta$	0	$\neq 0$	$\neq 0$	—	4.4	5.0	4.21	4.0

$$\varepsilon \equiv \frac{T - T_c}{T_c}$$

Tabla 13.4. Resumen de exponentes del punto crítico para sistemas magnéticos

Exponente	Función	Condiciones			Fe	Ni	Gd	CrBr ₃
		ε	\mathcal{H}	M				
α'	$c_{\chi=0} \sim (-\varepsilon)^{-\alpha'}$	< 0	0	0	-0.12	-0.10	—	—
α	$c_{\chi=0} \sim \varepsilon^{-\alpha}$	> 0	0	0	-0.12	-0.10	—	—
β	$M \sim (-\varepsilon)^\beta$	< 0	0	$\neq 0$	0.34	0.33	—	0.365
γ'	$\chi' \sim (-\varepsilon)^{-\gamma'}$	< 0	0	$\neq 0$	1.33	1.32	1.33	—
γ	$\chi' \sim \varepsilon^{-\gamma}$	> 0	0	0	1.33	1.32	1.33	1.215
δ	$\mathcal{H} \sim M ^\delta$	0	$\neq 0$	$\neq 0$	—	4.2	4.0	4.3

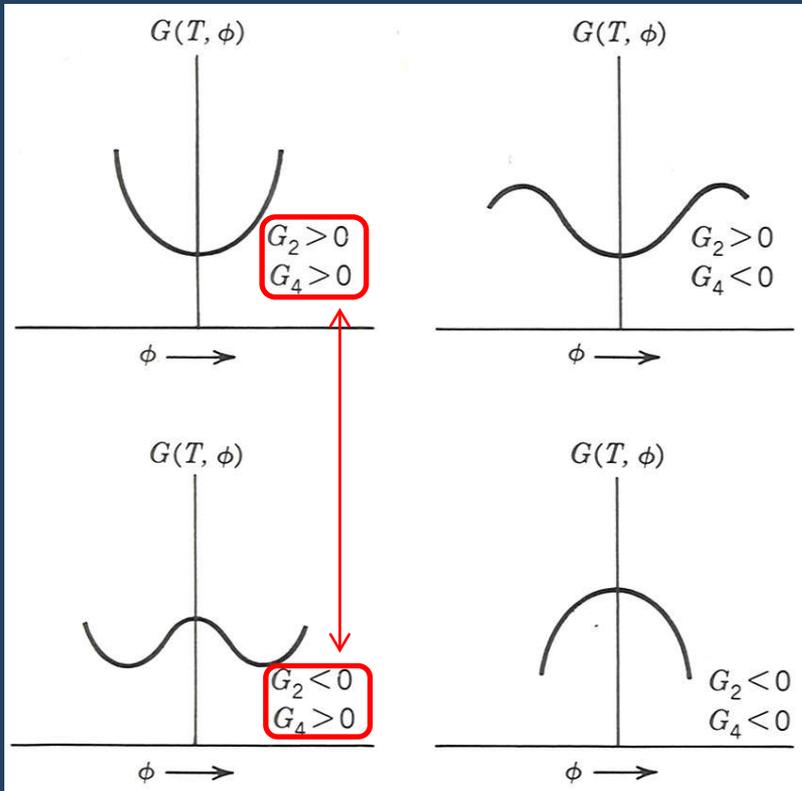
Puntos críticos y teoría de fenómenos críticos: Teoría de Landau



$$G(\Phi; T, P) = G_0 + G_2 \Phi^2 + G_4 \Phi^4 + \dots$$

Puntos críticos y teoría de fenómenos críticos: Teoría de Landau

$$G(\Phi; T, P) = G_0 + G_2 \Phi^2 + G_4 \Phi^4 + \dots$$



$$G_2 = G_2^0 \cdot (T - T_c) + \theta \cdot (T - T_c)^2 + \dots$$

$$+ \frac{\partial G}{\partial \Phi} = 0$$

$$\Rightarrow \Phi = \pm \sqrt{\frac{1}{2} \frac{G_2^0}{G_4} (T_c - T)}$$

$$(T \leq T_c)$$

$$\Phi \propto (T_c - T)^\beta, T \leq T_c$$

$$\beta = \frac{1}{2}$$

Puntos críticos y teoría de fenómenos críticos: exponentes críticos clásicos (teoría de campo medio/Landau) y experimentales

Critical Exponents; Classical Values and Approximate Range of Observed Values

<i>Exponent</i>	<i>Classical value</i>	<i>Approximate range of observed values</i>
α	0	$-0.2 < \alpha < 0.2$
α'	0	$-0.2 < \alpha' < 0.3$
β	$\frac{1}{2}$	$0.3 < \beta < 0.4$
γ	1	$1.2 < \gamma < 1.4$
γ'	1	$1 < \gamma' < 1.2$
δ	3	$4 < \delta < 5$