

Fyzikální vlastnosti materiálů

FX001

Ondřej Caha

1. Vazba v pevné látce, elastické a tepelné vlastnosti materiálů
2. Elektrické vlastnosti materiálů
3. Optické vlastnosti materiálů
4. Magnetické vlastnosti materiálů
5. Supravodiče a grafen

Fyzikální vlastnosti materiálů

1. Vazba v pevné látce, elastické a tepelné vlastnosti materiálů

- a) Druhy vazeb, kohezní energie
- b) Izotropní a neizotropní elastické vlastnosti
- c) Měrná tepla, teplotní roztažnost, tepelná vodivost
- d) Fázové přechody

2. Elektrické vlastnosti materiálů

- a) Elektrická vodivost kovů, polovodičů a izolátorů
- b) Polarizovatelnost, feroelektrika, piezoelektrika

3. Optické vlastnosti materiálů

- c) Optická odezva materiálů
- d) Elektromagnetická vlna v materiálu a na rozhraní
- e) Kramersovy-Kronigovy relace
- f) Absorpce mřížky
- g) Optická odezva volných a vázaných elektronů

Fyzikální vlastnosti materiálů

4. Magnetické vlastnosti materiálů

- a) Diamagnetika
- b) Paramagnetika
- c) Interakce magnetických momentů
- d) Feromagnetika, antiferomagnetika, ferity

5. Supravodiče a grafen

- e) Supravodivost
- f) Materiály s lineární disperzí – grafen

Fyzikální vlastnosti materiálů

Literatura

Obecná:

- N. W. Ashcroft, N. D. Mermin, Solid state physics, Thomson Learning 1975.
- J. I. Gersten, F. W. Smith, The physics and chemistry of materials, Wiley 2001.
- Ch. Kittel: Úvod do fyziky pevných látek, Academia Praha 1985, (Introduction to solid state physics, Wiley NJ, 8th edition 2005).
- J. Singleton, Band theory and electronic properties of solids, Oxford University Press 2001.

Optické vlastnosti:

- A. M. Fox, Optical properties of solids, Oxford University Press 2002.
- E. Schmidt et al., Optické vlastnosti pevných látek, SPN Praha 1986.
- E. D. Palik, ed., Handbook of optical constants of solids, Academic Press Orlando 1985.

Magnetismus:

- S. J. Blundell, Magnetism in condensed matter, Oxford University Press 2001.

Fyzikální vlastnosti materiálů

FX001

1. Vazba v pevné látce, elastické a tepelné vlastnosti materiálů
2. Elektrické vlastnosti materiálů
3. Optické vlastnosti materiálů
4. Magnetické vlastnosti materiálů
5. Supravodiče a grafen

Fyzikální vlastnosti materiálů

- 1) Vazba v pevné látce, elastické a tepelné vlastnosti materiálů
 - a) Druhy vazeb, kohezní energie – klasifikace typu vazeb, periodická soustava prvků, charakteristické vlastnosti a příklady
 - b) Izotropní a neizotropní elastické vlastnosti – stlačitelnost, elastické konstanty a jejich souvislosti, symetrie a anizotropie
 - c) Měrná tepla, teplotní roztažnost, tepelná vodivost
 - d) Fázové přechody – fáze a skupenství, fázové diagramy a přechody, amorfní materiály, kapalně krystalové materiály

Periodická tabulka prvků

Periodic Table of the Elements © www.elementsdatabase.com

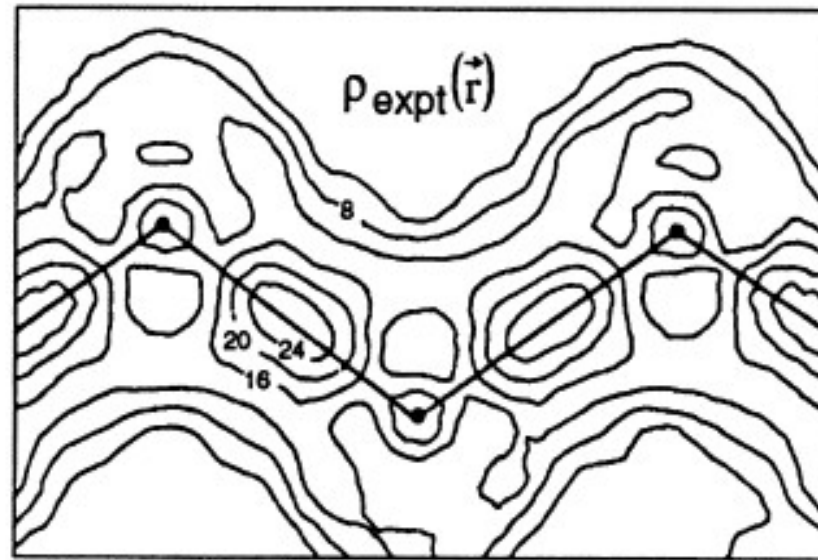
1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Unq	105 Unp	106 Unh	107 Uns	108 Uno	109 Une	110 Unn								

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Vazba – klasifikace

Druh	příklad	Vazebná energie Kcal/mol	Vazebná energie eV/molekula	charakteristika
Iontová	NaCl LiF	180 240	7.8 10.4	<ul style="list-style-type: none"> • Nesměrová, velké koordinační číslo • Malá elektrická vodivost, velká za vysokých teplot – iontová • Velká IR absorpce
Kovalentní	C diamant SiC Si	170 283 107	7.4 12.3 4.6	<ul style="list-style-type: none"> • Směrová, malé koordinační číslo • Malá elektrická vodivost (čisté krystaly) • Vysoká tvrdost
Kovová	Na Fe	26 94	1.1 4.1	<ul style="list-style-type: none"> • Nesměrová, velké koordinační číslo • Velká elektrická vodivost • Tažnost, kujnost
Molekulární	Ar CH ₄	1.8 2.4	0.08 0.10	<ul style="list-style-type: none"> • Nízké body tání a varu • Málo modifikovány vlastnosti molekul
Vodíková	H ₂ O led HF	12 7	0.5 0.3	<ul style="list-style-type: none"> • Silnější než molekulární vazba

Elektronová hustota v krystalech



Kovalentní vazba

experimentální a
vypočtené rozložení
valenčních elektronů
v křemíku

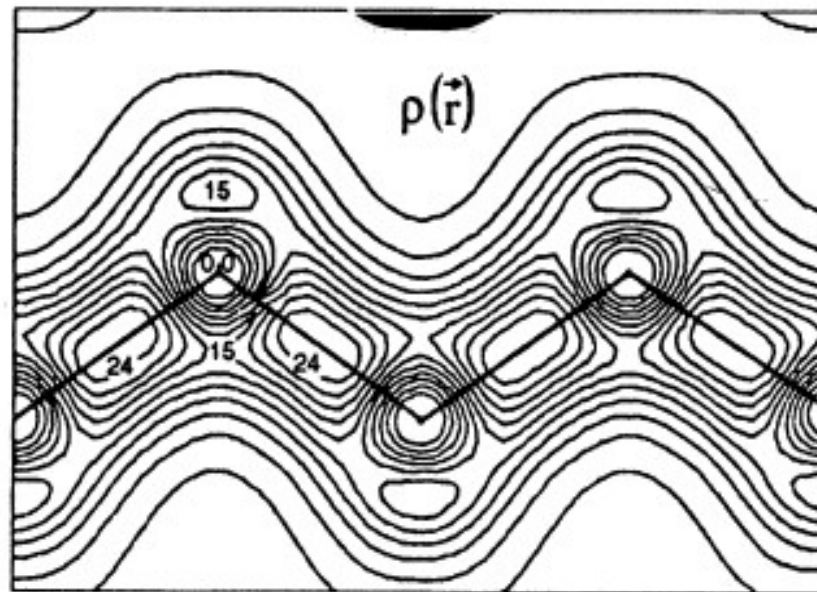


FIGURE 2.1. Experimental and calculated valence charge density in the (110) plane of Si (in units of electrons per cell) (Zunger, 1980).

Elektronová hustota v krystalech

Přechod od kovalentní k iontové vazbě

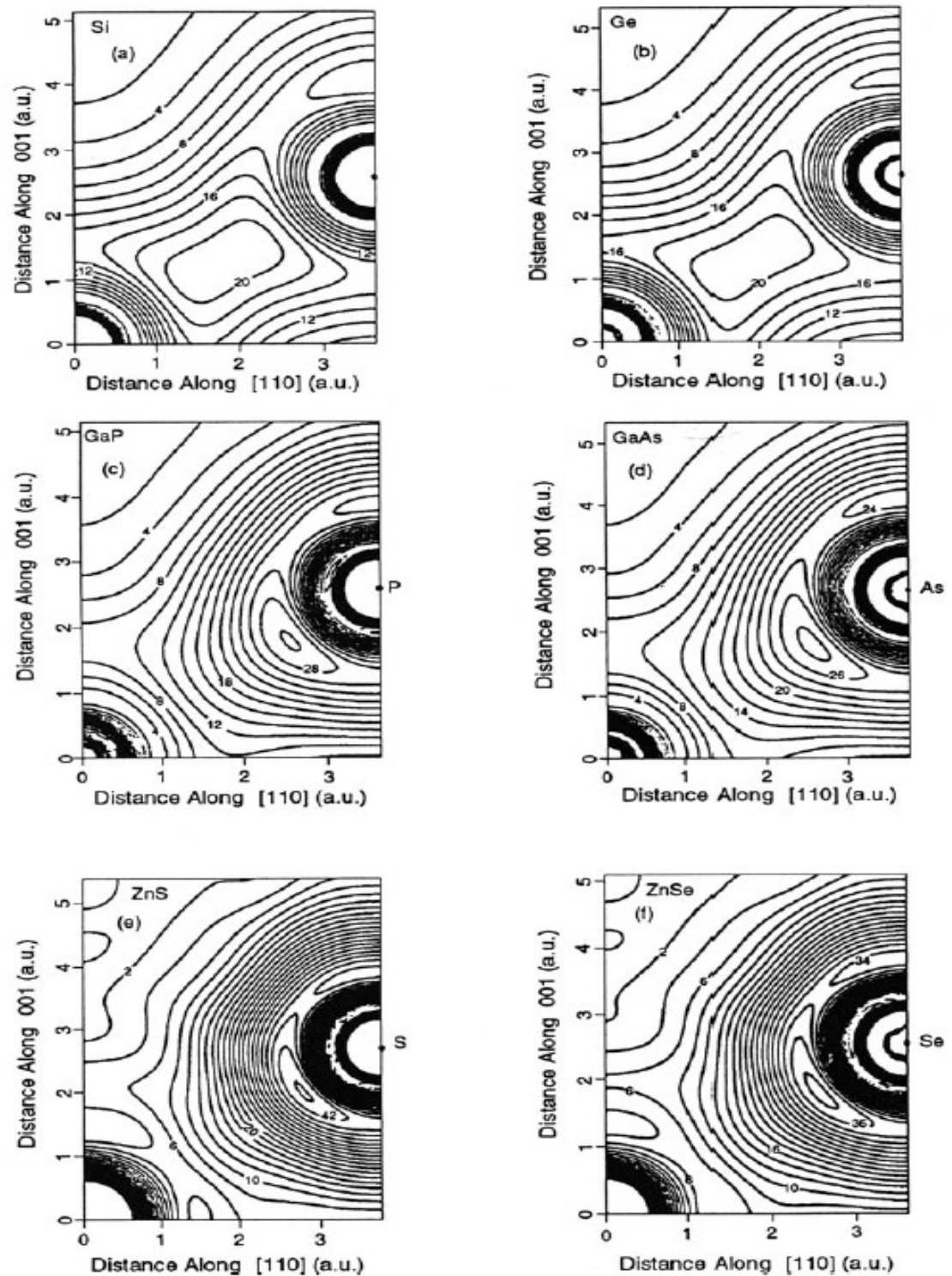
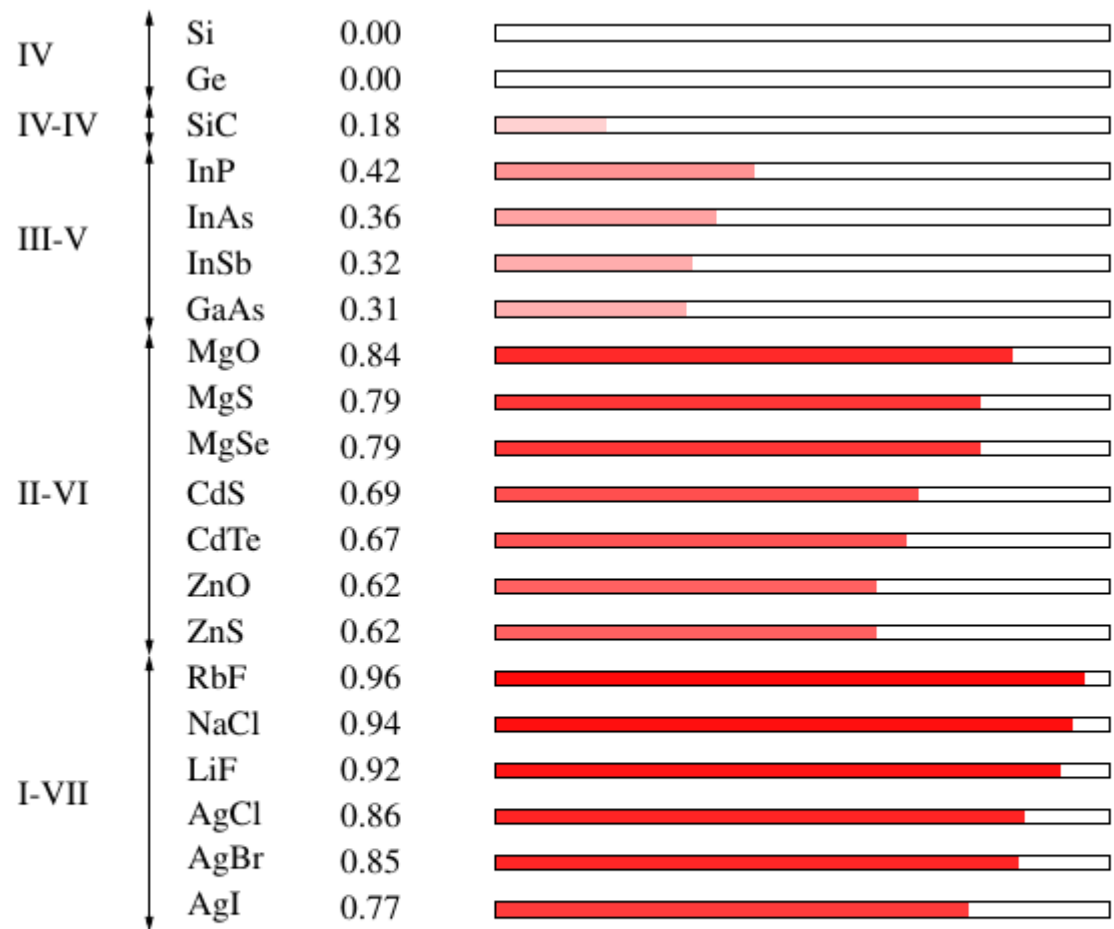


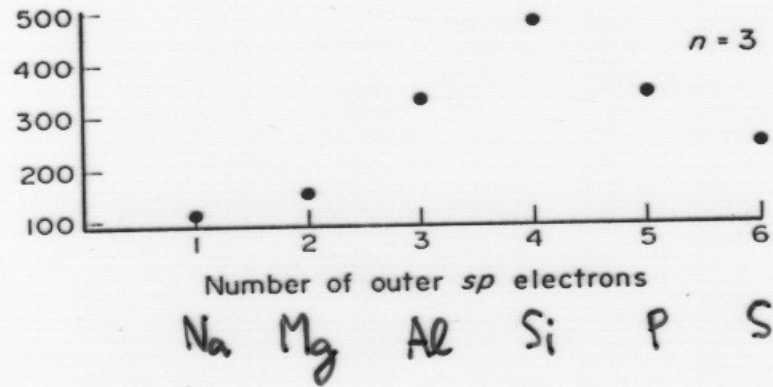
FIGURE 2.2. Comparison between the valence charge densities of diamond and zinc blende semiconductors in the (110) plane calculated from the SCDFT (Wang and Klein, 1981).



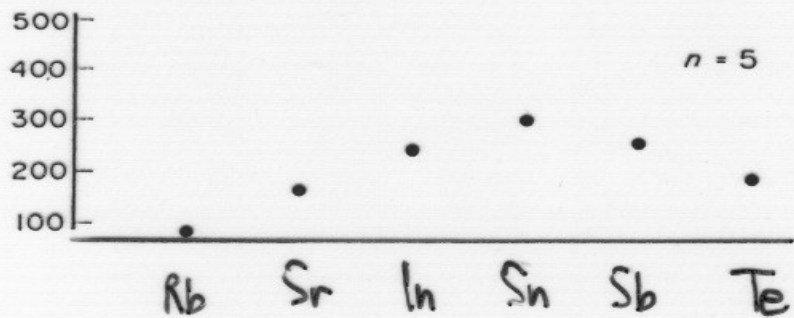
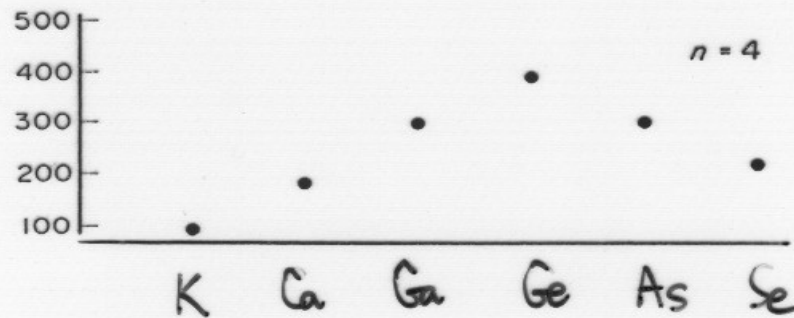
Podíl iontové a kovalentní vazby

Soubusta: Fyzika pevných látek

Vazebná energie prvků v řádcích periodické tabulky



Cohesive energy (kJ mol⁻¹)



Vazba – vzácné plyny, Madelungova konstanta

Table 4 Properties of inert gas crystals

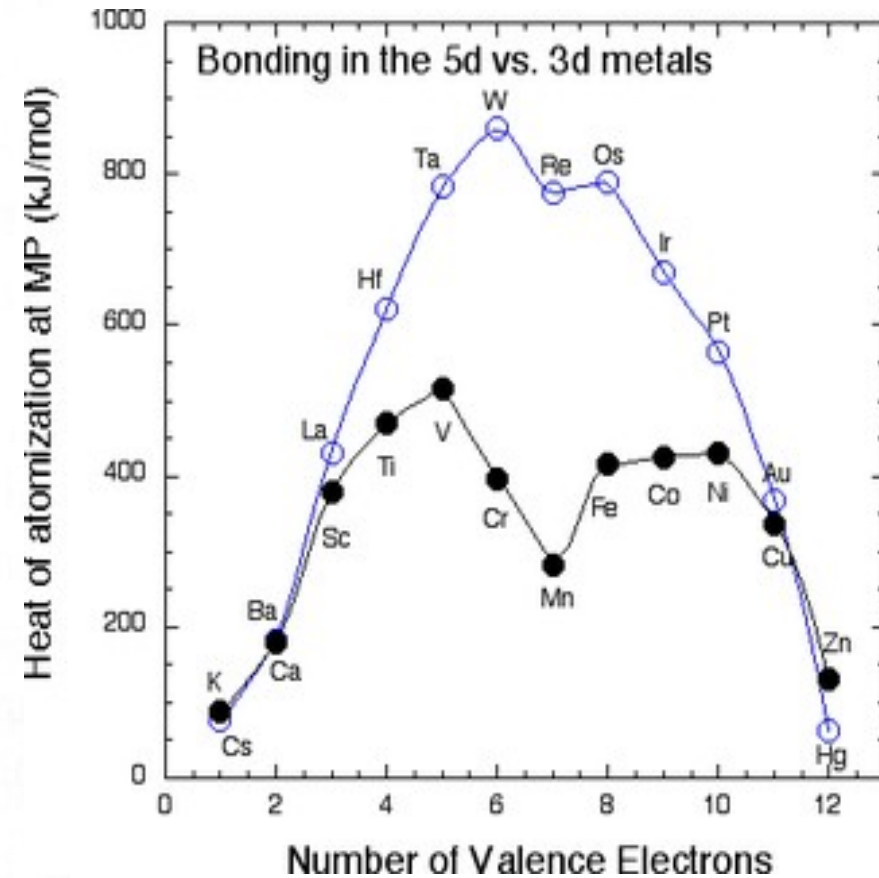
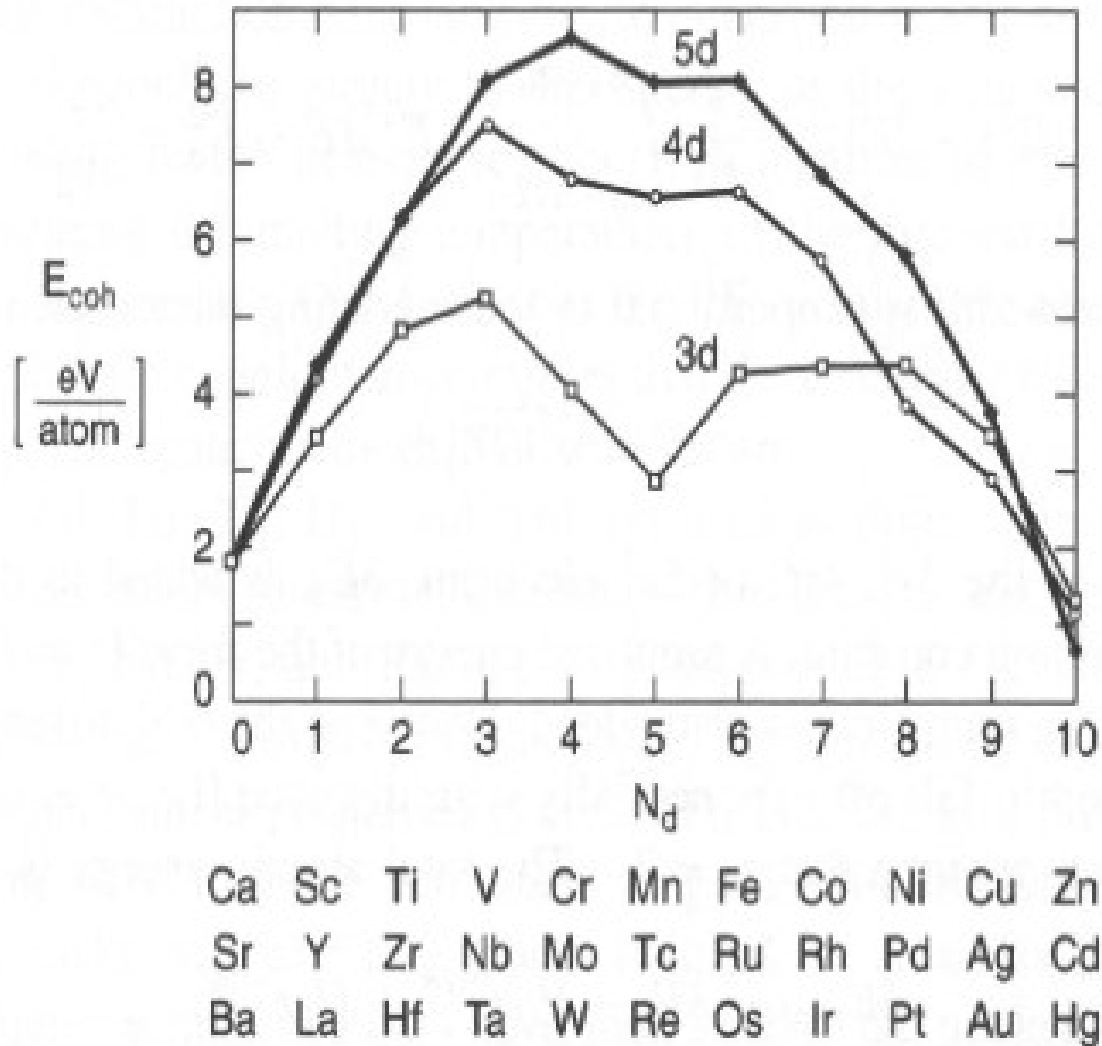
(Extrapolated to 0 K and zero pressure)

	Nearest-neighbor distance, in Å	Experimental cohesive energy		Melting point, K	Ionization potential of free atom, eV	Parameters in Lennard-Jones potential, Eq. 10	
		kJ/mol	eV/atom			ϵ , in 10^{-16} erg	σ , in Å
He	(liquid at zero pressure)				24.58	14	2.56
Ne	3.13	1.88	0.02	24	21.56	50	2.74
Ar	3.76	7.74	0.080	84	15.76	167	3.40
Kr	4.01	11.2	0.116	117	14.00	225	3.65
Xe	4.35	16.0	0.17	161	12.13	320	3.98

Struktura	Madelungova konstanta
NaCl	1.747565
CsCl	1.762675
ZnS	1.6381

Vazebná energie přechodových kovů

3d kovy jsou magnetické -- magnetické uspořádání má vliv na vazebnou energii

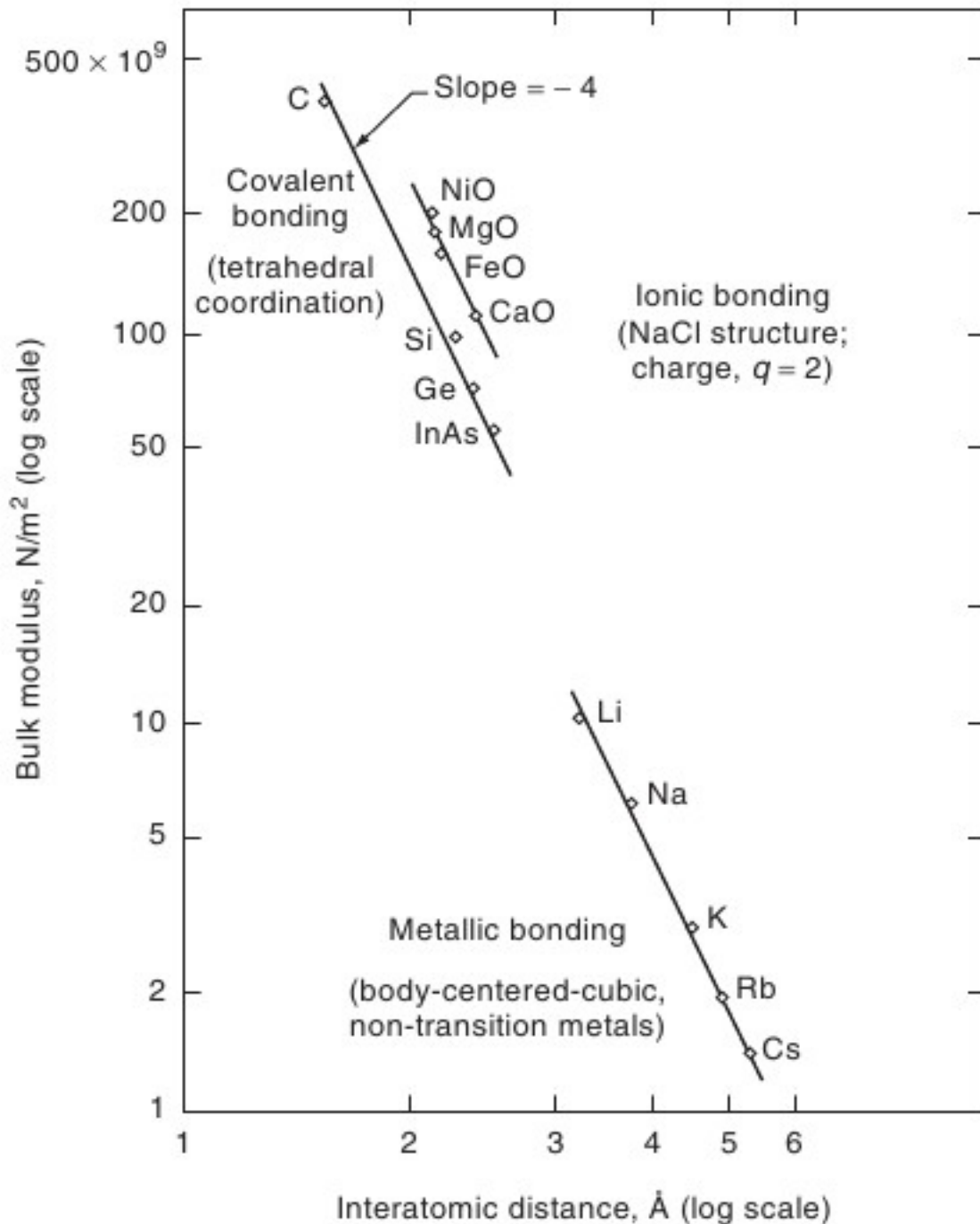


Stlačiteľnosť

	Na	Mg	Al	Si	P	S		
	16	2.9	1.4	1.01	3.3	5.6		
	K	Ca	Ga	Ge	As	Se		
	31	6.6	1.8	1.3	2.5	11		
Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu
2.3	0.95	0.62	0.53	1.7	0.59	0.52	0.54	0.73

Jednotky 10^{-6} bar

Stlačitelnost iontových sloučenin



elektrostatické
odpuzování nábojů ve
vzdálenosti d

$$F \approx q^2 / 4\pi\epsilon d^2$$

Elastické napětí

$$E \approx F / d^2$$

stlačitelnost

$$B \approx q^2 / 4\pi\epsilon d^4$$

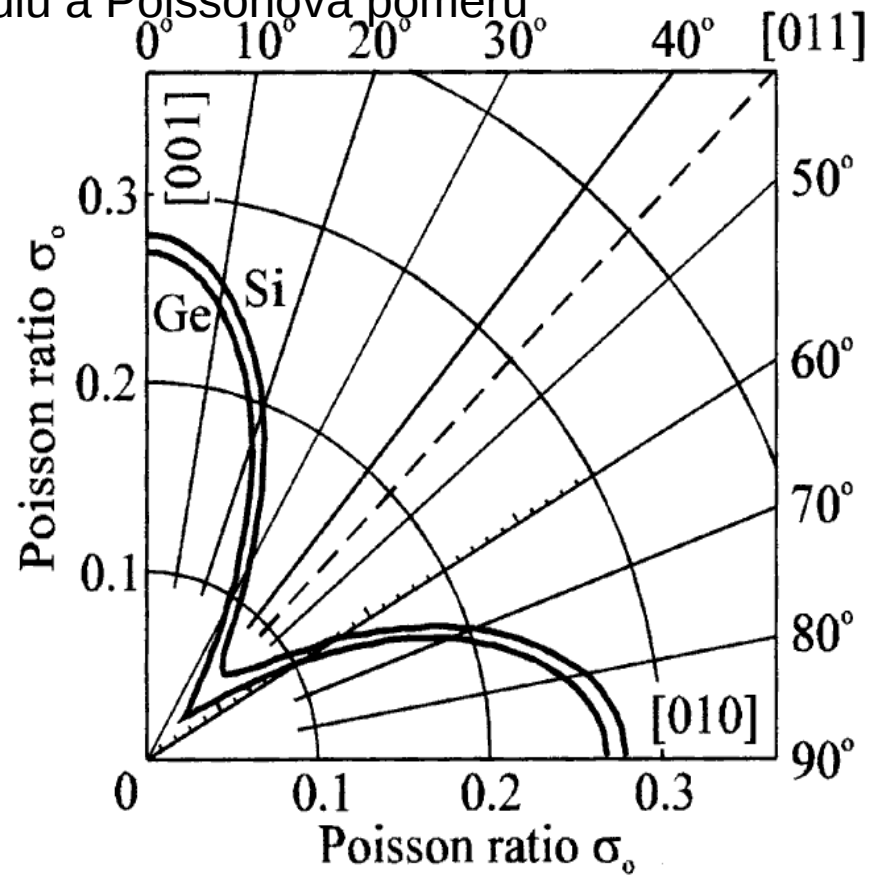
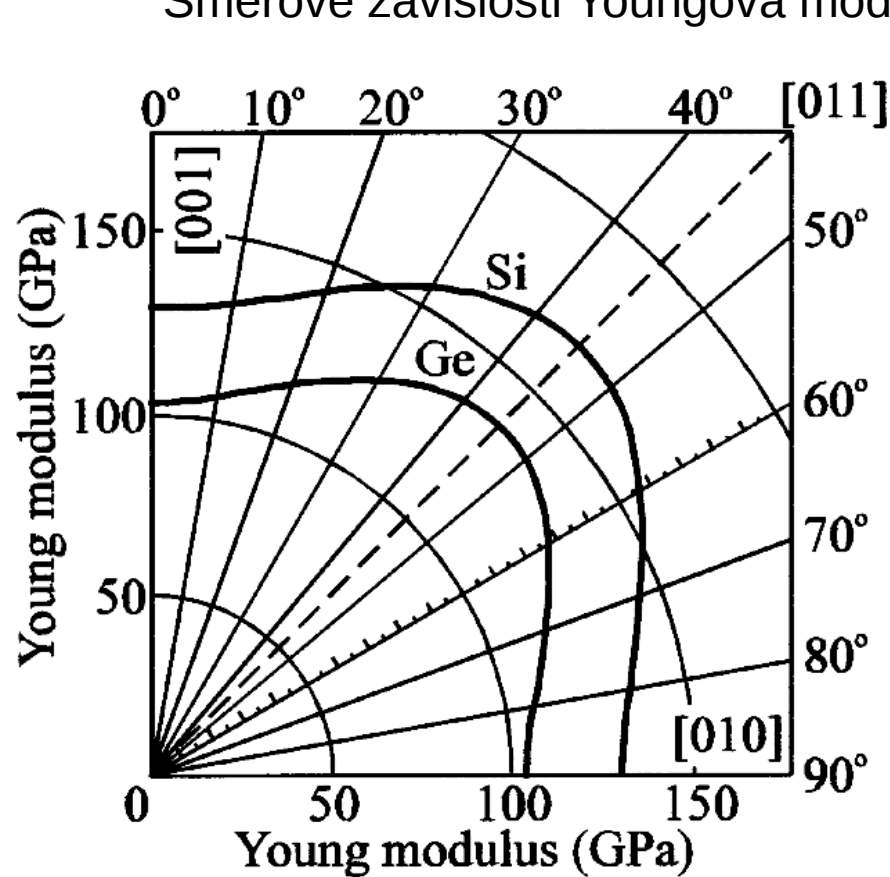
Mechanické vlastnosti

	C_{11}	C_{12}	C_{44}	$(C_{12}+2C_{44})/C_{11}$
Fe (BCC)	2.37	1.41	1.16	1.57
Al (FCC)	1.08	0.62	0.28	1.09
C (diamant)	10.764	1.252	5.774	1.19
Si (diamant)	1.6577	0.6393	0.7962	1.34
GaAs (ZnS)	1.19	0.538	0.595	1.08

Jednotky 10^{12} dyn/cm²= 10^7 ncm⁻²= 10^{11} Nm⁻²= 10^2 GPa

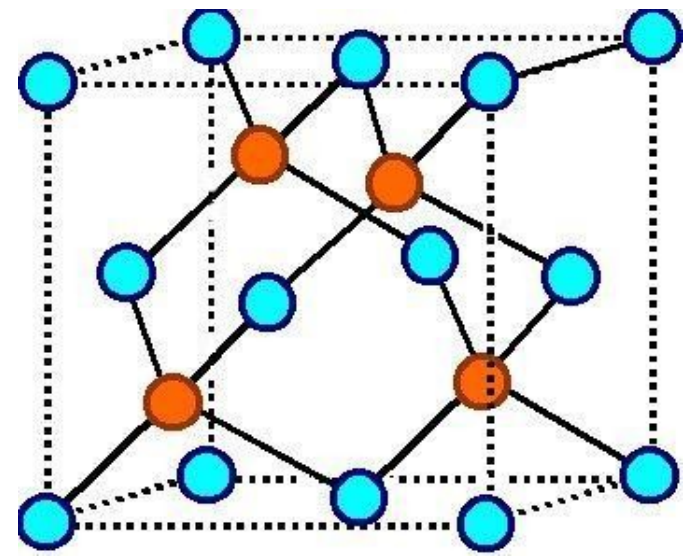
Mechanické vlastnosti křemíku

Směrové závislosti Youngova modulu a Poissonova poměru



Wortman, J.J., R.A. Evans, J. Appl. Phys. 36, 1965, 153.

Deformace ve směru [100] je mnohem snazší než [110].



Mechanické vlastnosti železo

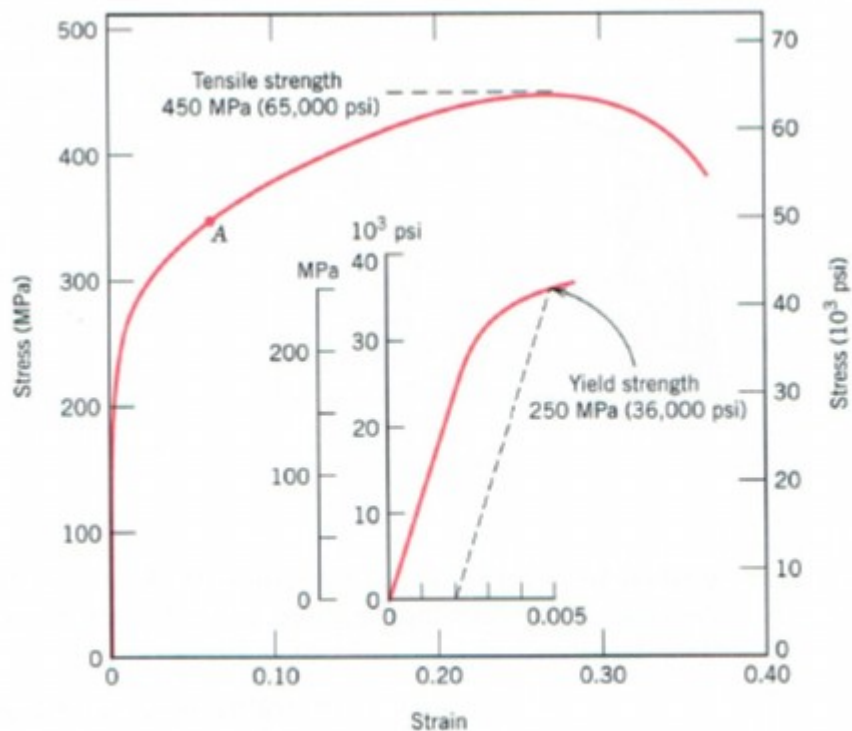
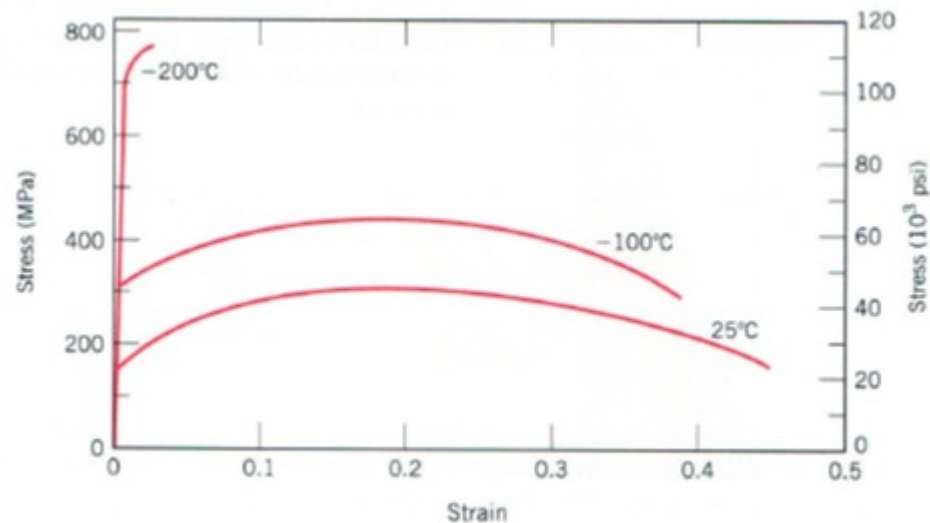
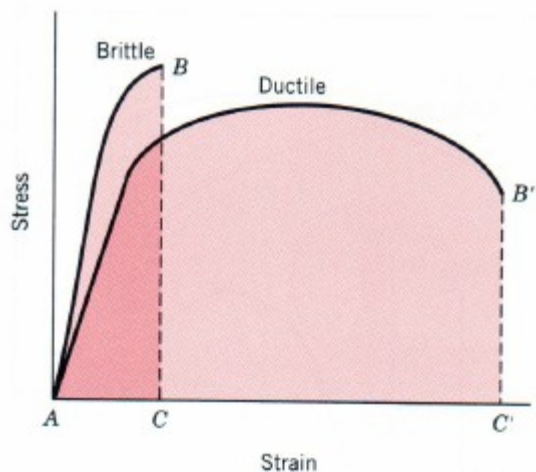
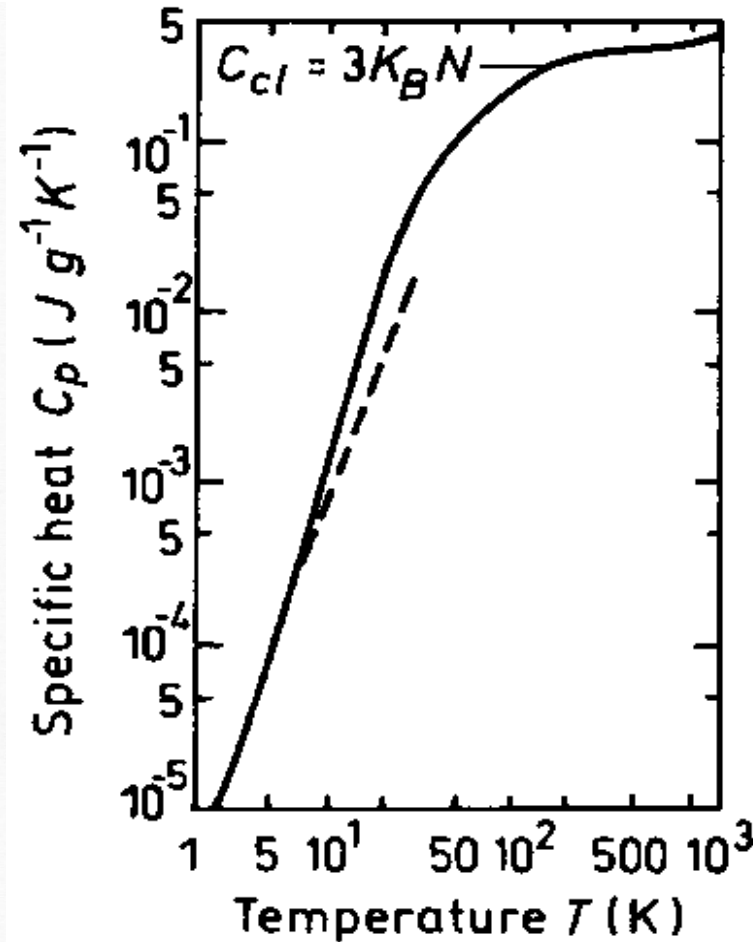


Table 6.2 Typical Mechanical Properties of Several Metals and Alloys in an Annealed State

<i>Metal Alloy</i>	<i>Yield Strength MPa (ksi)</i>	<i>Tensile Strength MPa (ksi)</i>	<i>Ductility, %EL [in 50 mm (2 in.)]</i>
Aluminum	35 (5)	90 (13)	40
Copper	69 (10)	200 (29)	45
Brass (70Cu–30Zn)	75 (11)	300 (44)	68
Iron	130 (19)	262 (38)	45
Nickel	138 (20)	480 (70)	40
Steel (1020)	180 (26)	380 (55)	25
Titanium	450 (65)	520 (75)	25
Molybdenum	565 (82)	655 (95)	35

FIGURE 6.12 The stress–strain behavior for the brass specimen discussed in Example Problem 6.3.

Tepelná kapacita GaAs a Grüneisenova konstanta



Blakemore, J. S.,
J. Appl. Phys. **53**,
R123-R181 (1982).

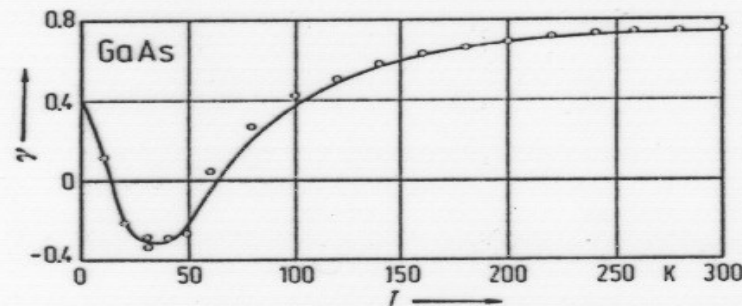
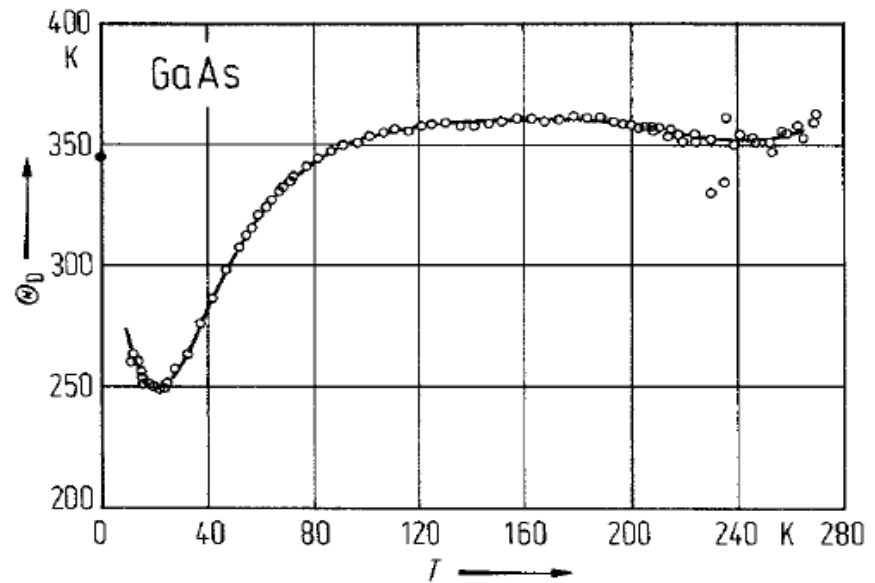
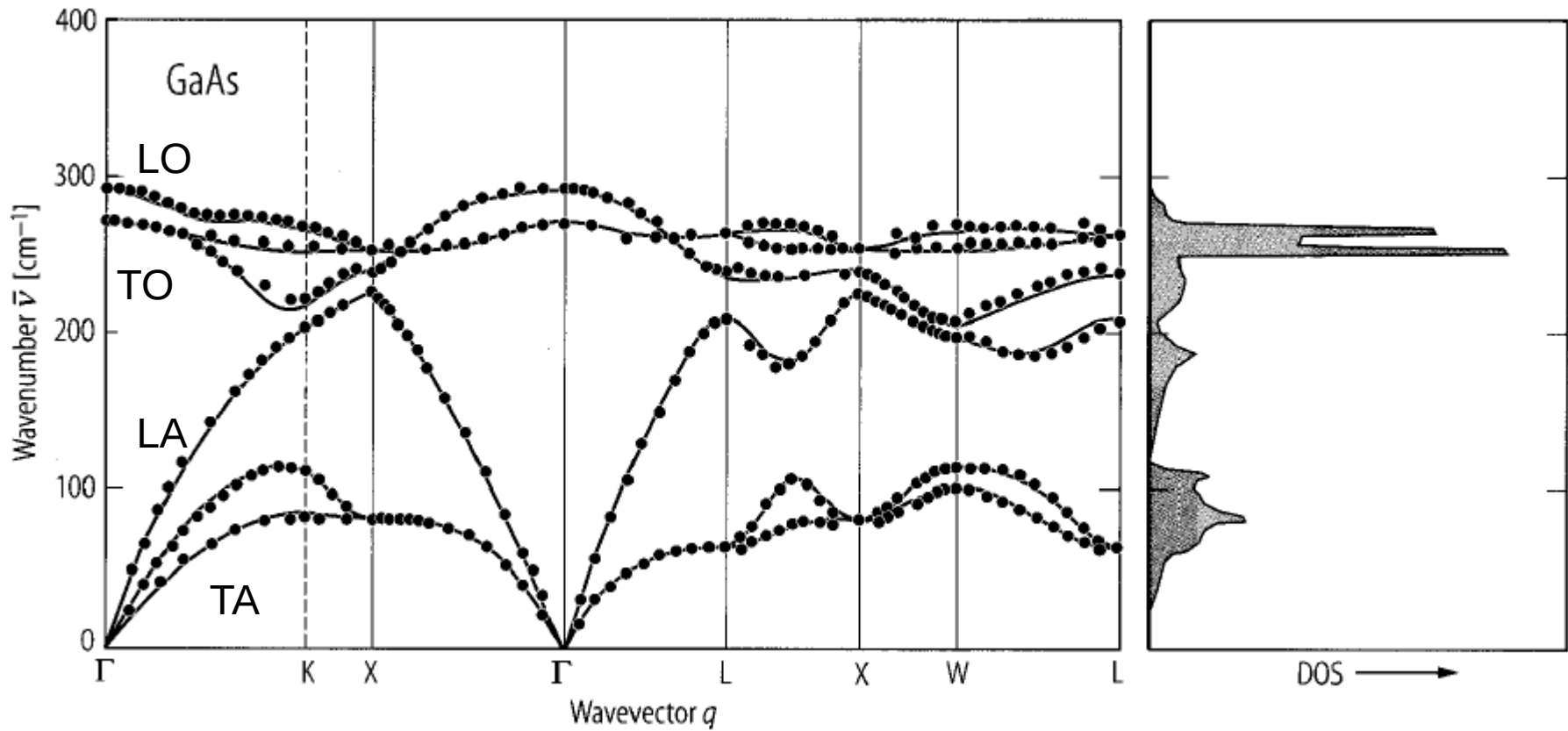


Fig. 14. GaAs. Grüneisen constant vs. temperature. Solid curve theoretical. Points obtained from experimental linear expansion coefficient and heat capacities [82S1].

Fononová disperzní relace GaAs, hustota stavů, Debyeova teplota



1 eV = 8065.5 cm⁻¹

100 cm⁻¹ = 12.4 meV

Landolt, Bornstein:

Springer material database

Energie v závislosti na objemu GaAs, teplotní roztažnost

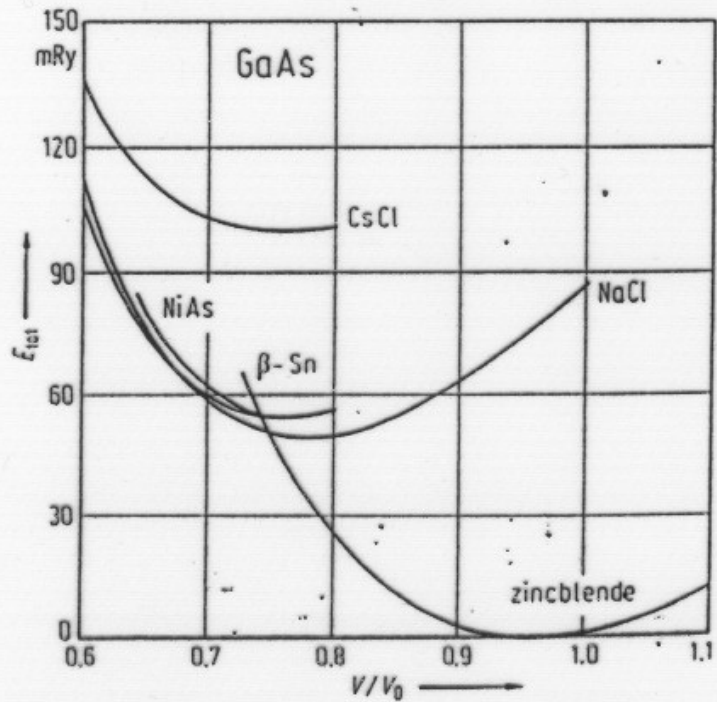
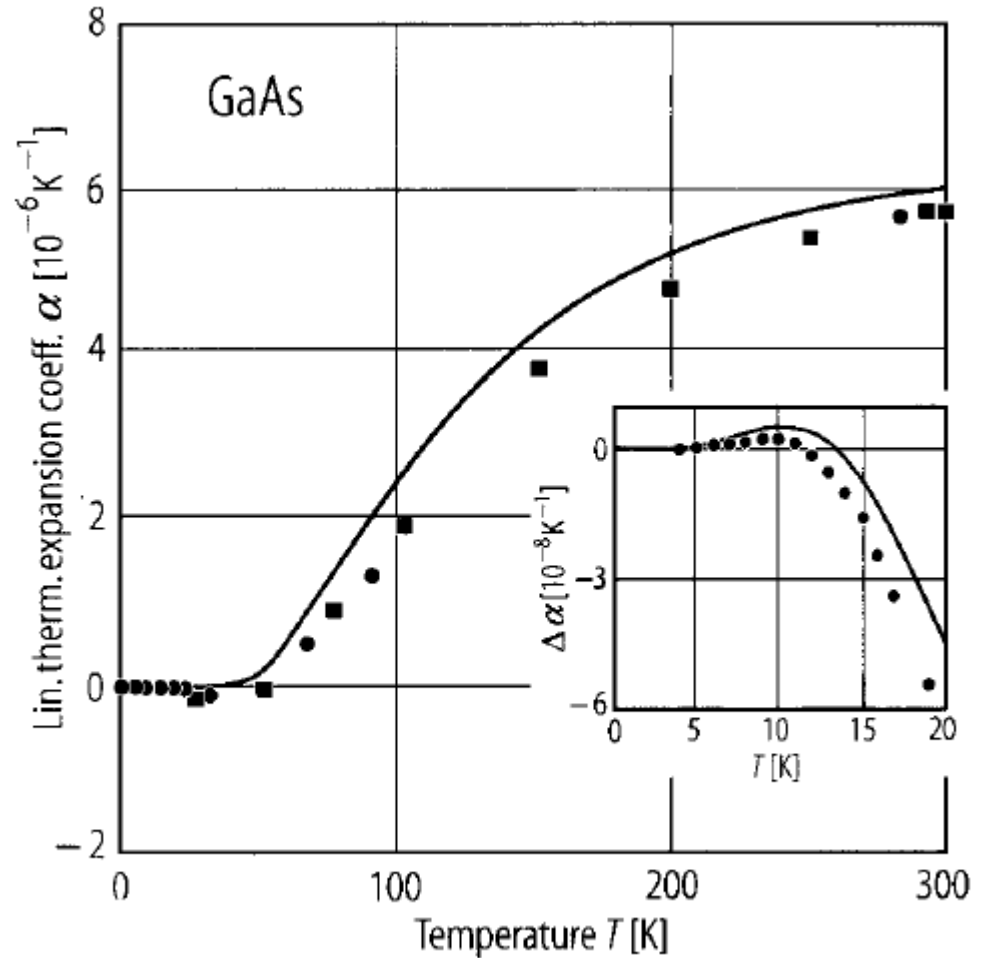
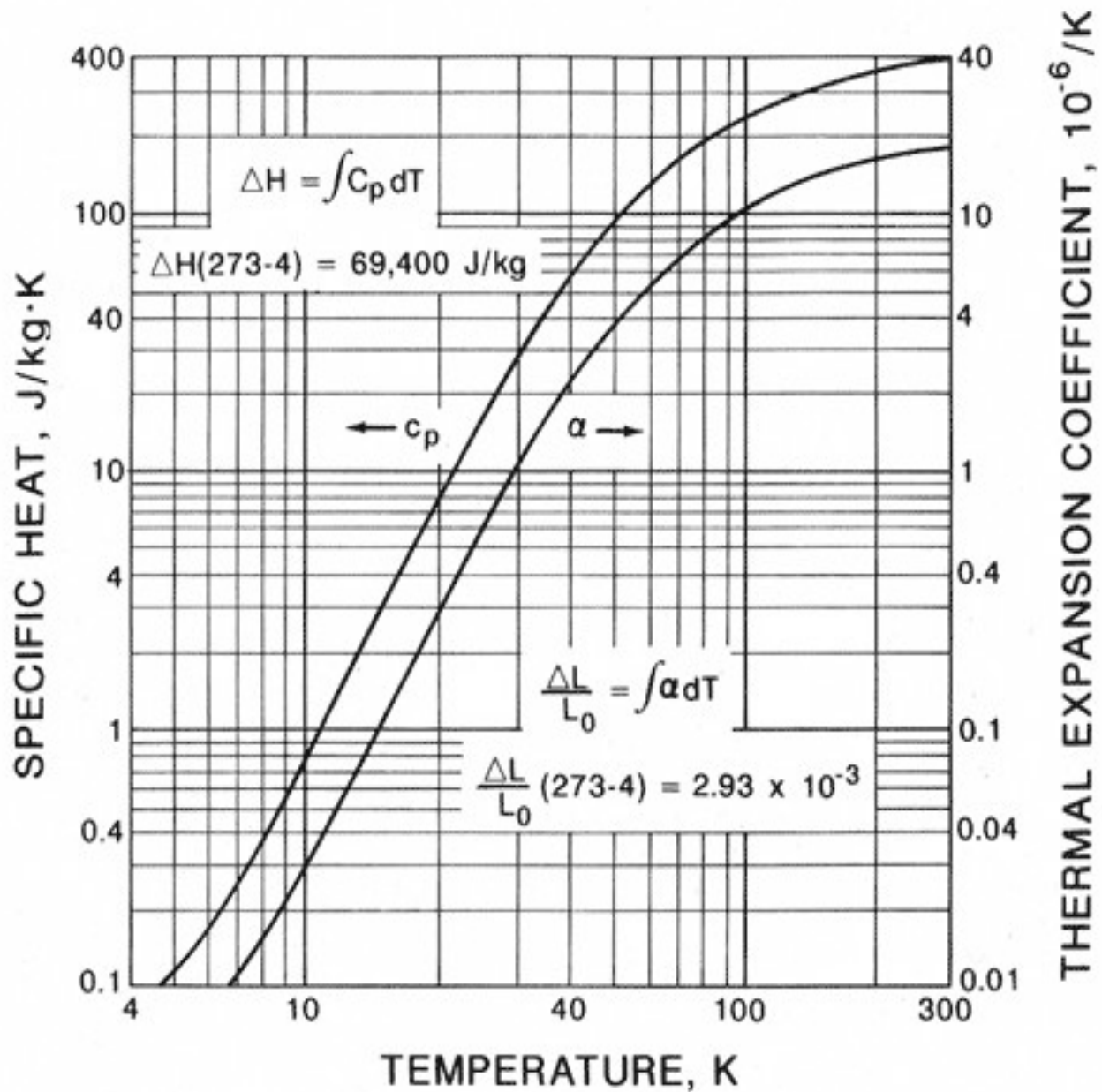


Fig. 9. GaAs. Calculated total energy per molecule vs. reduced volume (volume relative to experimental equilibrium volume) for five possible structures [83F].



Landolt, Bornstein:
Springer material
database

Tepelná kapacita a teplotní roztažnost mědi



Měrná tepelná kapacita

	C_p (J mol ⁻¹ K ⁻¹)	C_p (J g ⁻¹ K ⁻¹)
Al	24.35	0.903
Fe	25.02	0.448
Pb	26.44	0.128
C (diamant)	6.12	
Si	19.3	
Ge	23.4	
Sn (alfa)	25.77	

Tepelná roztažnost

	α (deg ⁻¹)	I
Al	25.5×10^{-6}	
Fe	12.1×10^{-6}	
64%Fe + 36% Ni	$(0.1 - 20) \times 10^{-6}$	0 – 100 °C
80% Pt + 20 % Ir	8×10^{-6}	málo závislé na teplotě
80% Pt + 20 % Rh	9×10^{-6}	málo závislé na teplotě
GaAs	5.5×10^{-6}	
Si	2.33×10^{-6}	
SiC	4×10^{-6}	
C (diamant)	1.2×10^{-6}	

Tepelná roztažnost

	α (deg ⁻¹)	
kaučuk	66×10^{-6}	
polyetylen	230×10^{-6}	
teflon	$(6 - 220) \times 10^{-6}$	
celuloid	130×10^{-6}	
epoxy	115×10^{-6}	
Sklo křemenné	0.42×10^{-6}	
Corning 790	0.8×10^{-6}	
Corning 774	3.2×10^{-6}	
Corning 8800	6.1×10^{-6}	

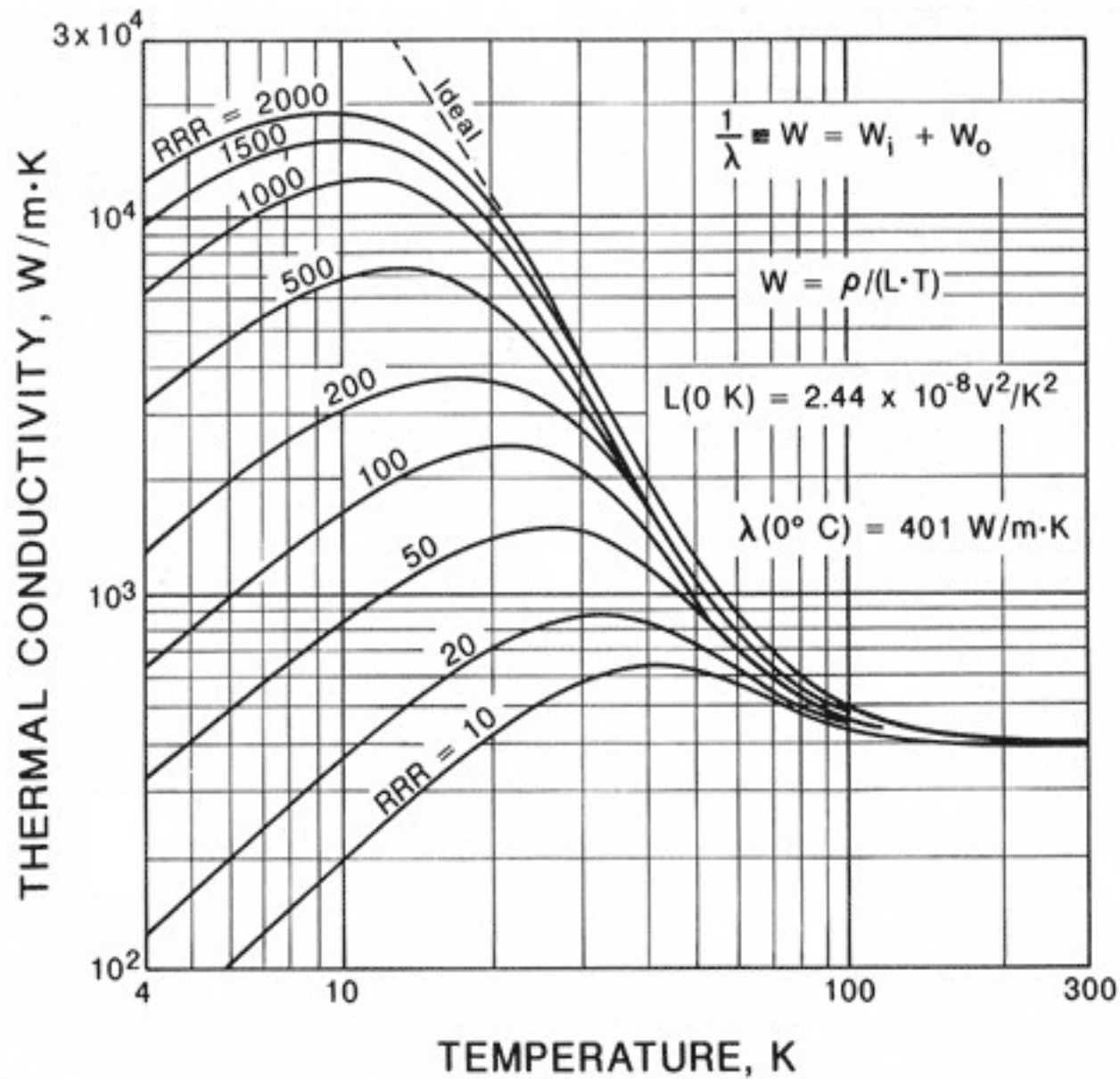
Tepelná vodivost, 0 °C, 1 bar

	λ (W m ⁻¹ deg ⁻¹)	
He	0.143	
Ne	0.0464	
Ar	0.0162	
Kr	0.00875	
vzduch	0.0242	
Freon 21 (ChCl ₂ F)	0.0090	
Hg	8.4	

Tepelná vodivost, 0 °C, 1 bar

	λ (W m ⁻¹ deg ⁻¹)	
Al	210	
Cu	285	
Ag	423	
Au	293	
C	628	
Si	167	
Ge	60.3	
A-SiO ₂ (sklo)	1.34	
c-SiO ₂	13	

Tepelná vodivost mědi – teplotní závislost



Periodická tabulka prvků – teplota tání

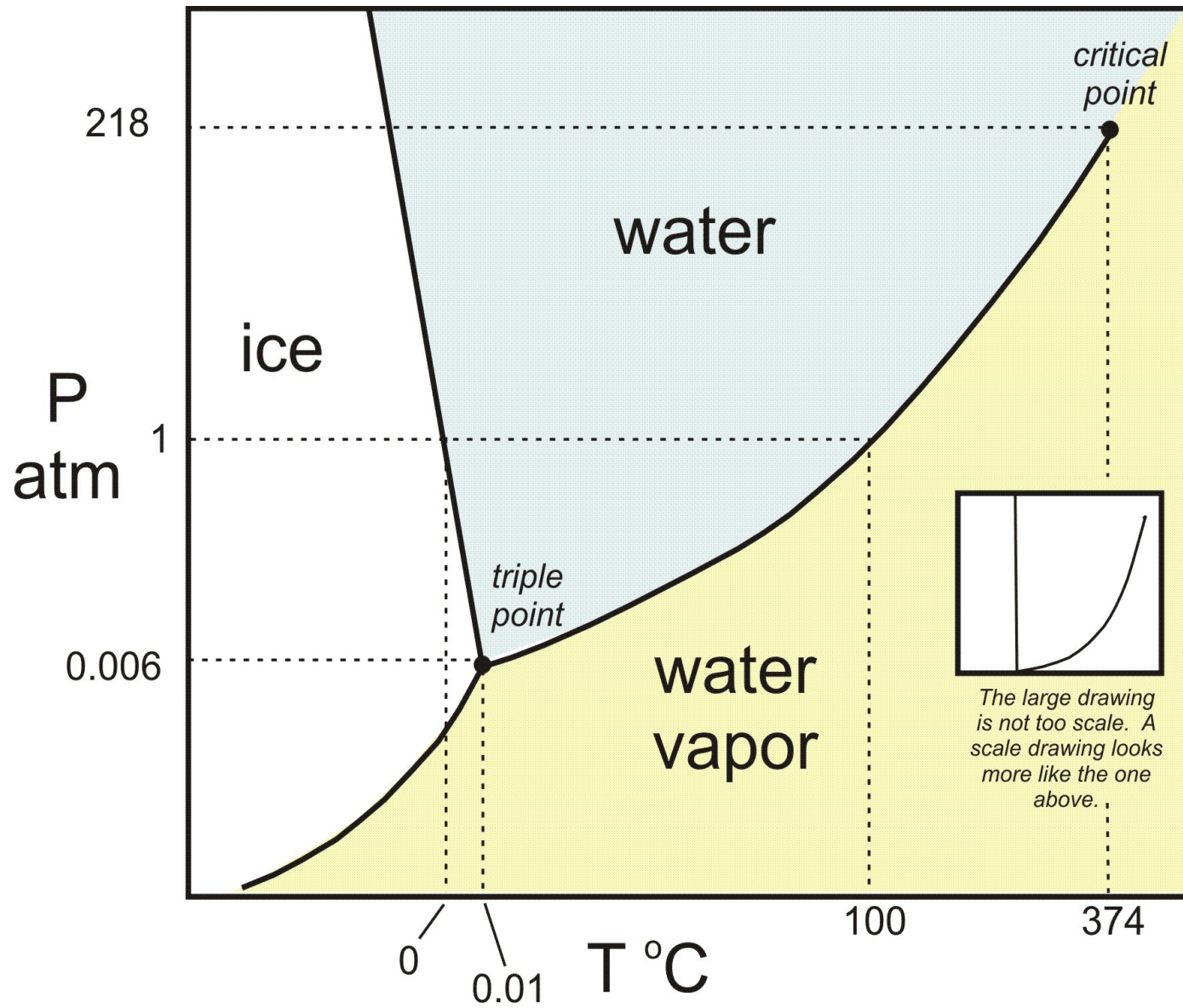
Table 2 Melting points, in K.
(After R. H. Lamoreaux, LBL Report 4995)

Li 453.7	Be 1562											B 2365	C	N 63.15	O 54.36	F 53.48	Ne 24.56																												
Na 371.0	Mg 922											Al 933.5	Si 1687	P w 317 r 863	S 388.4	Cl 172.2	Ar 83.81																												
K 336.3	Ca 1113	Sc 1814	Ti 1946	V 2202	Cr 2133	Mn 1520	Fe 1811	Co 1770	Ni 1728	Cu 1358	Zn 692.7	Ga 302.9	Ge 1211	As 1089	Se 494	Br 265.9	Kr 115.8																												
Rb 312.6	Sr 1042	Y 1801	Zr 2128	Nb 2750	Mo 2895	Tc 2477	Ru 2527	Rh 2236	Pd 1827	Ag 1235	Cd 594.3	In 429.8	Sn 505.1	Sb 903.9	Te 722.7	I 386.7	Xe 161.4																												
Cs 301.6	Ba 1002	La 1194	Hf 2504	Ta 3293	W 3695	Re 3459	Os 3306	Ir 2720	Pt 2045	Au 1338	Hg 234.3	Tl 577	Pb 600.7	Bi 544.6	Po 527	At	Rn																												
Fr	Ra 973	Ac 1324	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr> <td>Ce 1072</td> <td>Pr 1205</td> <td>Nd 1290</td> <td>Pm</td> <td>Sm 1346</td> <td>Eu 1091</td> <td>Gd 1587</td> <td>Tb 1632</td> <td>Dy 1684</td> <td>Ho 1745</td> <td>Er 1797</td> <td>Tm 1820</td> <td>Yb 1098</td> <td>Lu 1938</td> </tr> <tr> <td>Th 2031</td> <td>Pa 1848</td> <td>U 1406</td> <td>Np 910</td> <td>Pu 913</td> <td>Am 1449</td> <td>Cm 1613</td> <td>Bk 1562</td> <td>Cf</td> <td>Es</td> <td>Fm</td> <td>Md</td> <td>No</td> <td>Lw</td> </tr> </tbody> </table>															Ce 1072	Pr 1205	Nd 1290	Pm	Sm 1346	Eu 1091	Gd 1587	Tb 1632	Dy 1684	Ho 1745	Er 1797	Tm 1820	Yb 1098	Lu 1938	Th 2031	Pa 1848	U 1406	Np 910	Pu 913	Am 1449	Cm 1613	Bk 1562	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw
Ce 1072	Pr 1205	Nd 1290	Pm	Sm 1346	Eu 1091	Gd 1587	Tb 1632	Dy 1684	Ho 1745	Er 1797	Tm 1820	Yb 1098	Lu 1938																																
Th 2031	Pa 1848	U 1406	Np 910	Pu 913	Am 1449	Cm 1613	Bk 1562	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw																																

Fázové přechody, 1 bar

	tání (°C)	var (°C)
Hg	-38.86	356.73
Al	660	2447
Fe	1535	2800
Pt	1769	4310
W	3380	6000
Si	1423	2355
Ge	937	2830
SiO ₂	1610	

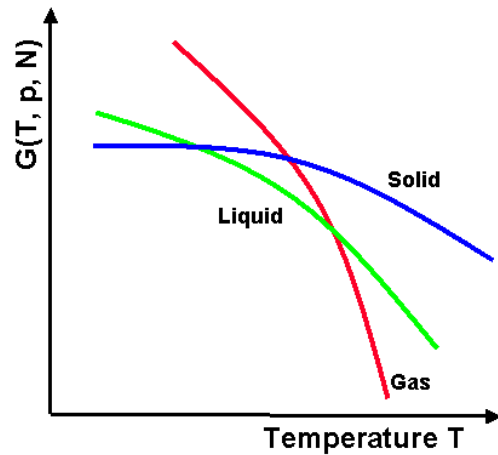
Fázový diagram H₂O



The large drawing is not too scale. A scale drawing looks more like the one above.

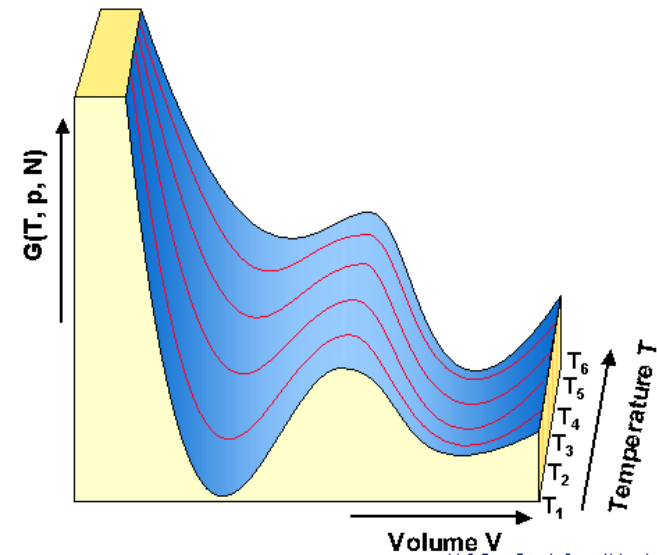
Fázové přechody 1. a 2. druhu

Minima of the Gibbs potential as a function of temperature



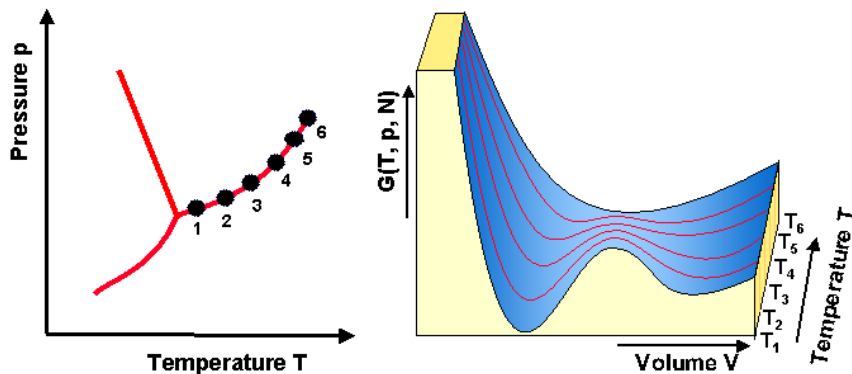
(c) C. Rose-Patrick, Brown University, 7-Jan-99, Chem 201 #1

Volume dependence of Gibbs free energy at various temperatures



(c) C. Rose-Patrick, Brown University, 7-Jan-99, Chem 201 #1

Second order phase transition



(c) C. Rose-Patrick, Brown University, 7-Jan-99, Chem 201 #1

Higher-order phase transitions

	Discontinuity appears in:		
	Differential of G		Corresponding experim. quantities
First	S	V	S V
Second	$\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_p$	$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$	C_p β κ
	$\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T$	$\left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T$	
Third	$\left(\frac{\partial^2 S}{\partial T^2}\right)_p$	$\left(\frac{\partial^2 V}{\partial T^2}\right)_p$	$\left(\frac{\partial C_p}{\partial T}\right)_p$ $\left(\frac{\partial \beta}{\partial T}\right)_p$ $\left(\frac{\partial \kappa}{\partial T}\right)_p$
	$\frac{\partial^2 S}{\partial p \partial T}$	$\frac{\partial^2 V}{\partial p \partial T}$	$\left(\frac{\partial C_p}{\partial p}\right)_T$ $\left(\frac{\partial \beta}{\partial p}\right)_T$ $\left(\frac{\partial \kappa}{\partial p}\right)_T$
	$\left(\frac{\partial^2 S}{\partial p^2}\right)_T$	$\left(\frac{\partial^2 V}{\partial p^2}\right)_T$	

(c) C. Rose-Patrick, Brown University, 7-Jan-99, Chem 201 #1

Fázové přechody 1. a 2. druhu

Order parameter

Table 4-1. Order parameters for phase transitions in various systems.

System	Transition	Order parameter
Liquid–gas	Condensation/evaporation	Density difference $\Delta\rho = \rho_l - \rho_g$
Binary liquid mixture	Unmixing	Composition difference $\Delta c = c_{\text{coex}}^{(2)} - c_{\text{coex}}^{(1)}$
Nematic liquid	Orientational ordering	$\frac{1}{2} \langle 3 (\cos^2 \theta) - 1 \rangle$
Quantum liquid	Normal fluid \rightleftharpoons suprafluid	$\langle \psi \rangle$ (ψ : wavefunction)
Liquid–solid	Melting/crystallization	$\rho_{\mathbf{G}}$ (\mathbf{G} = reciprocal lattice vector)
Magnetic solid	Ferromagnetic (T_C)	Spontaneous magnetization \mathbf{M}
	Antiferromagnetic (T_N)	Sublattice magnetization \mathbf{M}_s
Solid binary mixture	Unmixing	$\Delta c = c_{\text{coex}}^{(2)} - c_{\text{coex}}^{(1)}$
AB	Sublattice ordering	$\psi = (\Delta c^{\text{II}} - \Delta c^{\text{I}})/2$
Dielectric solid	Ferroelectric (T_C)	Polarization \mathbf{P}
	Antiferroelectric (T_N)	Sublattice polarization \mathbf{P}_s
Molecular crystal	Orientational ordering	$Y_{lm}(\vartheta, \varphi)$

Fázové přechody – Kritické exponenty

$\tau = (T - T_c)/T_c$	redukovaná teplota
C	tepelná kapacita
Ψ	order parameter
J	vnější pole (tlak, magnetické pole, elektrické pole,...)
χ	susceptibilita, stlačitelnost – reakce uspořádacího parametru na vnější pole
ξ	korelační délka – velikost “uspořádaných klastrů”
d	dimenze systému

Kritické exponenty pro $\tau > 0$ (neuspořádaná fáze)

exponent	relace	
α	$C \propto \tau^{-\alpha}$	měrné teplo
γ	$\chi \propto \tau^{-\gamma}$	susceptibilita, kompresibilita, apod.
ν	$\xi \propto \tau^{-\nu}$	korelační délka

Kritické exponenty pro $\tau < 0$ (uspořádaná fáze)

α'	$C \propto (-\tau)^{-\alpha'}$	
β	$\Psi \propto (-\tau)^\beta$	order parameter
γ'	$\chi \propto (-\tau)^{-\gamma'}$	
ν'	$\xi \propto (-\tau)^{-\nu'}$	

Kritické exponenty pro $\tau = 0$ (při teplotě přechodu)

δ	$J \propto \Psi^\delta$	pole (tlak, magnetické pole, apod.)
η	$\langle \psi(0) \psi(r) \rangle \propto r^{-d+2-\eta}$	korelační funkce, d dimenze systému

Fázové přechody 1. a 2. druhu

Kritické exponenty

Kritické exponenty pro $\tau > 0$ (neuspořádaná fáze)

exponent	relace	
α	$C \propto \tau^{-\alpha}$	měrné teplo
γ	$\chi \propto \tau^{-\gamma}$	susceptibilita, kompresibilita, apod.
ν	$\xi \propto \tau^{-\nu}$	korelační délka

Kritické exponenty pro $\tau < 0$ (uspořádaná fáze)

α'	$C \propto (-\tau)^{-\alpha'}$	
β	$\Psi \propto (-\tau)^\beta$	order parameter
γ'	$\chi \propto (-\tau)^{-\gamma'}$	
ν'	$\xi \propto (-\tau)^{-\nu'}$	

Kritické exponenty pro $\tau = 0$

δ	$J \propto \Psi^\delta$	pole (tlak, magnetické pole, apod.)
η	$\langle \psi(0) \psi(r) \rangle \propto r^{-d+2-\eta}$	korelační funkce, d dimenze systému

Škálovací relace:

$$\nu d = 2 - \alpha = 2\beta + \gamma = \beta(\delta + 1) = \gamma \frac{\delta + 1}{\delta - 1}$$

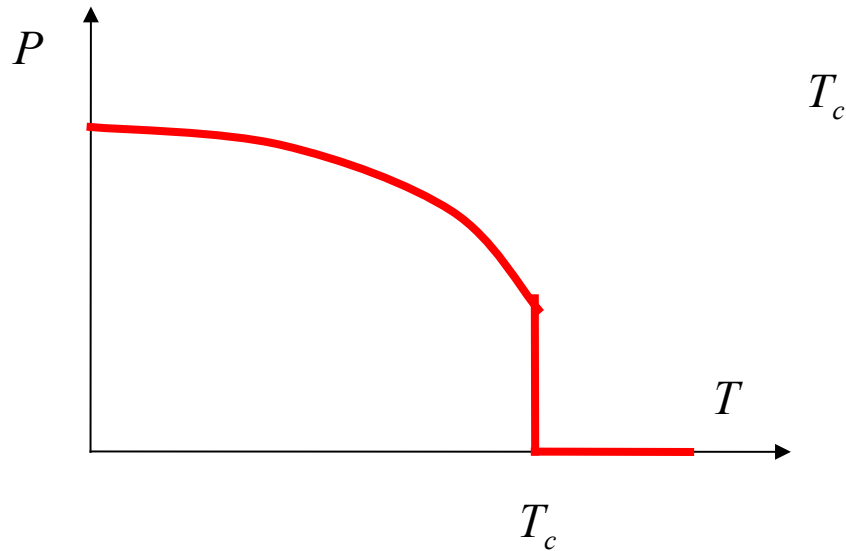
dvě nezávislé veličiny

$$2 - \eta = \frac{\gamma}{\nu} = d \frac{\delta - 1}{\delta + 1}$$

Example: ferroelectric phase transition

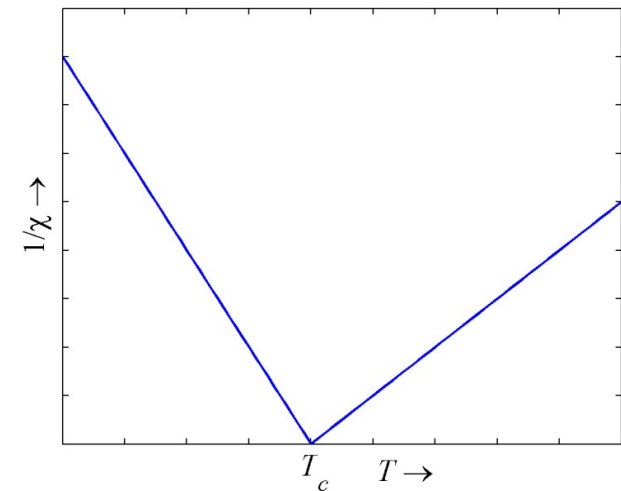
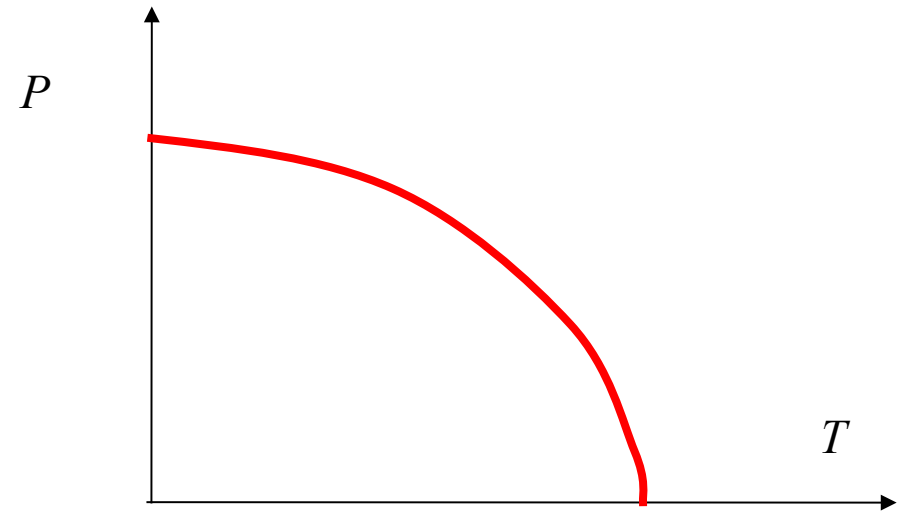
Variables: P (polarization) – order parameter, T

Phase transition of the 1st order

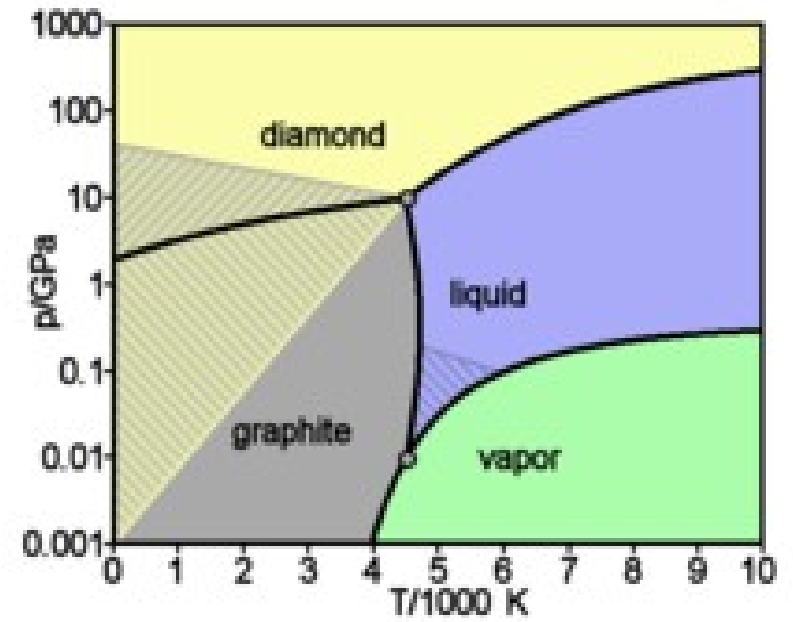
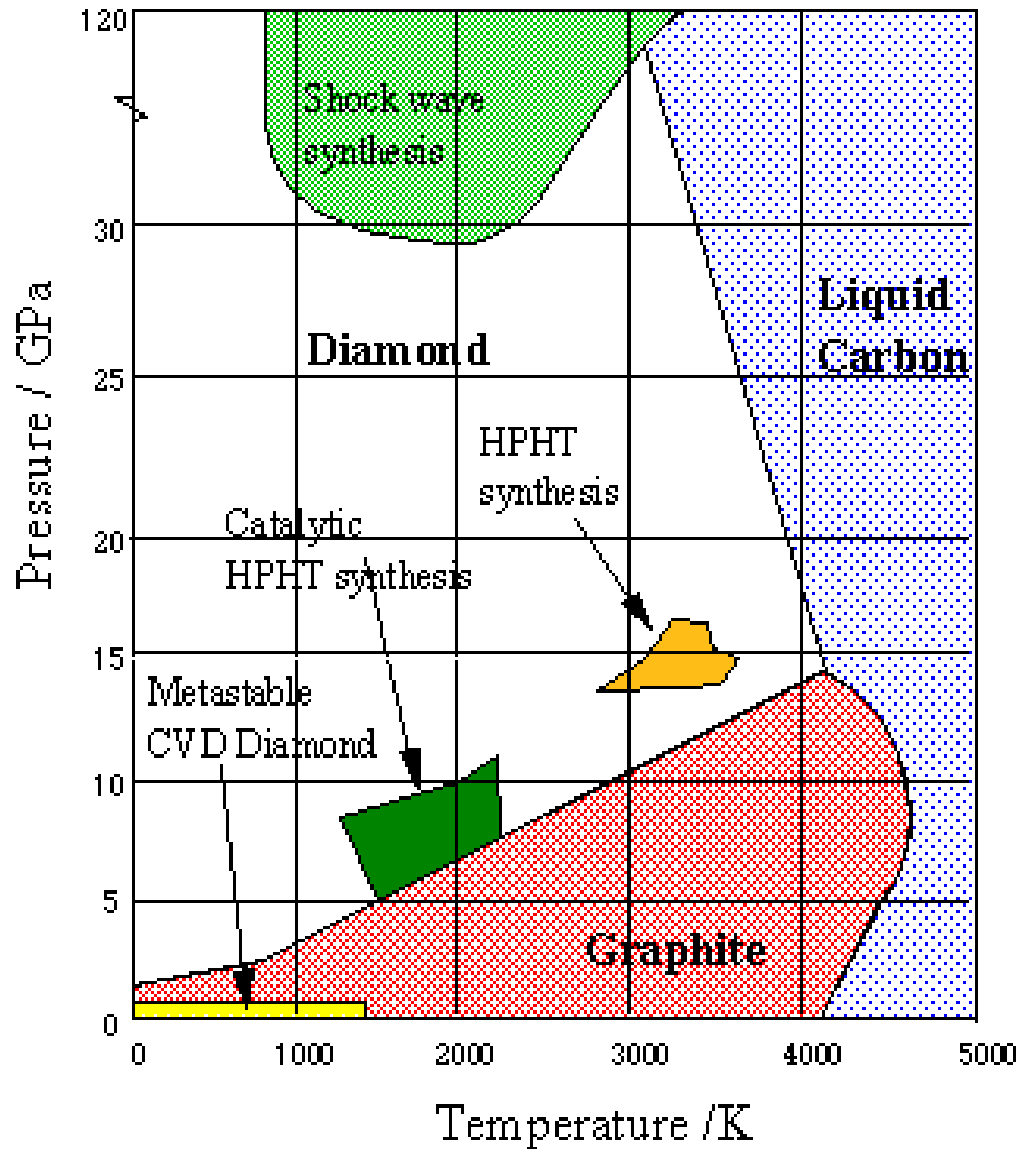


χ does not diverge at T_c

Phase transition of the 2nd order

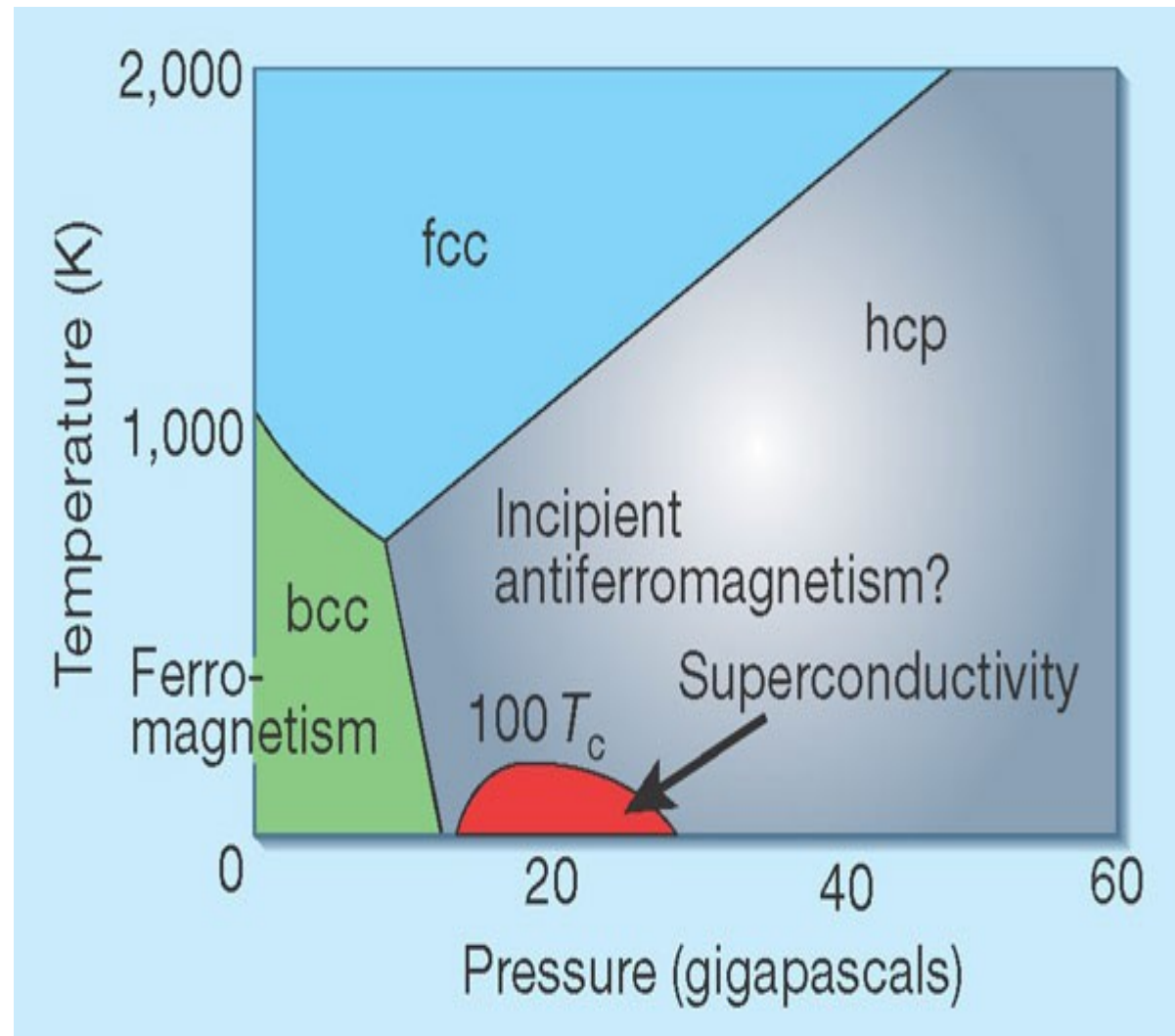
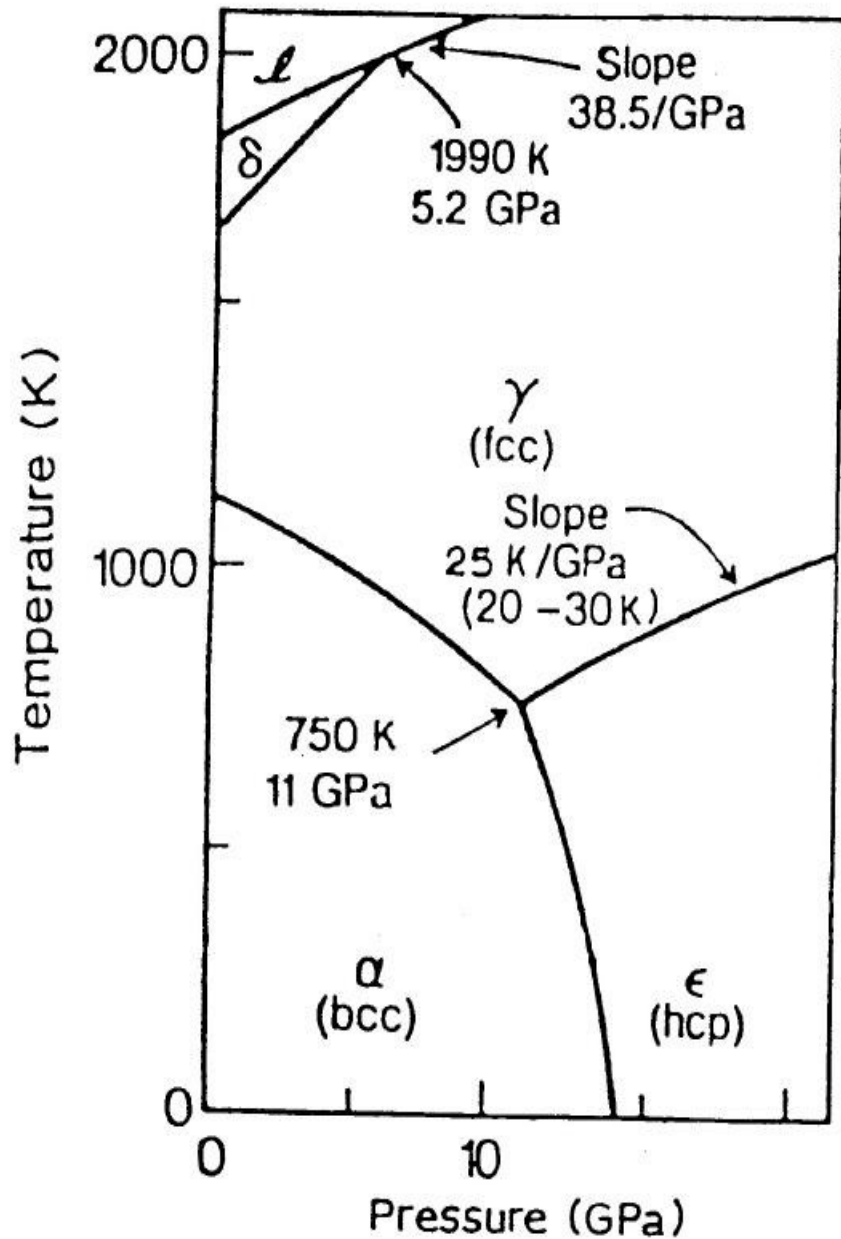


Fázové diagramy uhlíku



J. Geophys. Res. 85 (B12) (1980)
6930.

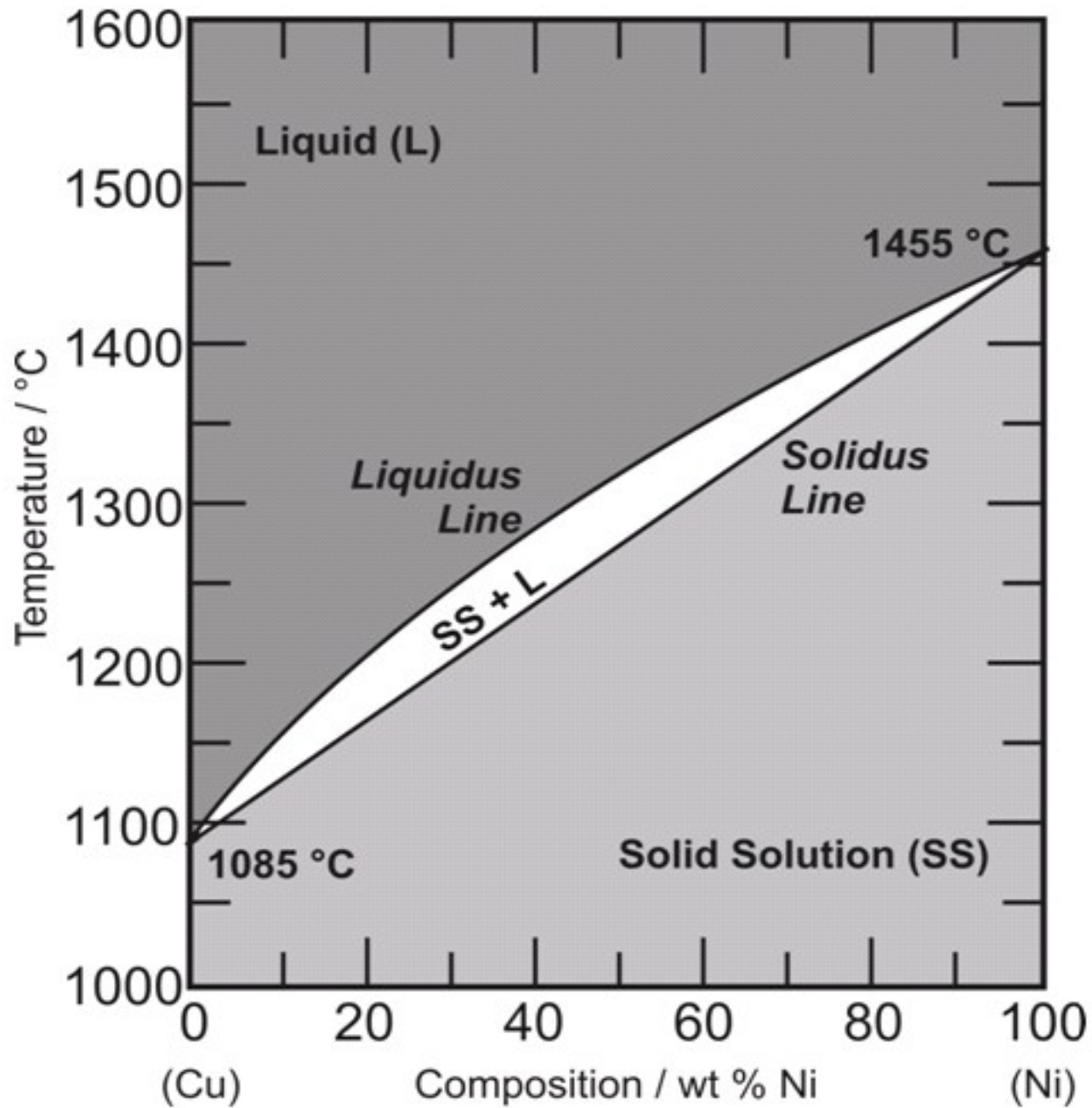
Fázový diagram Fe



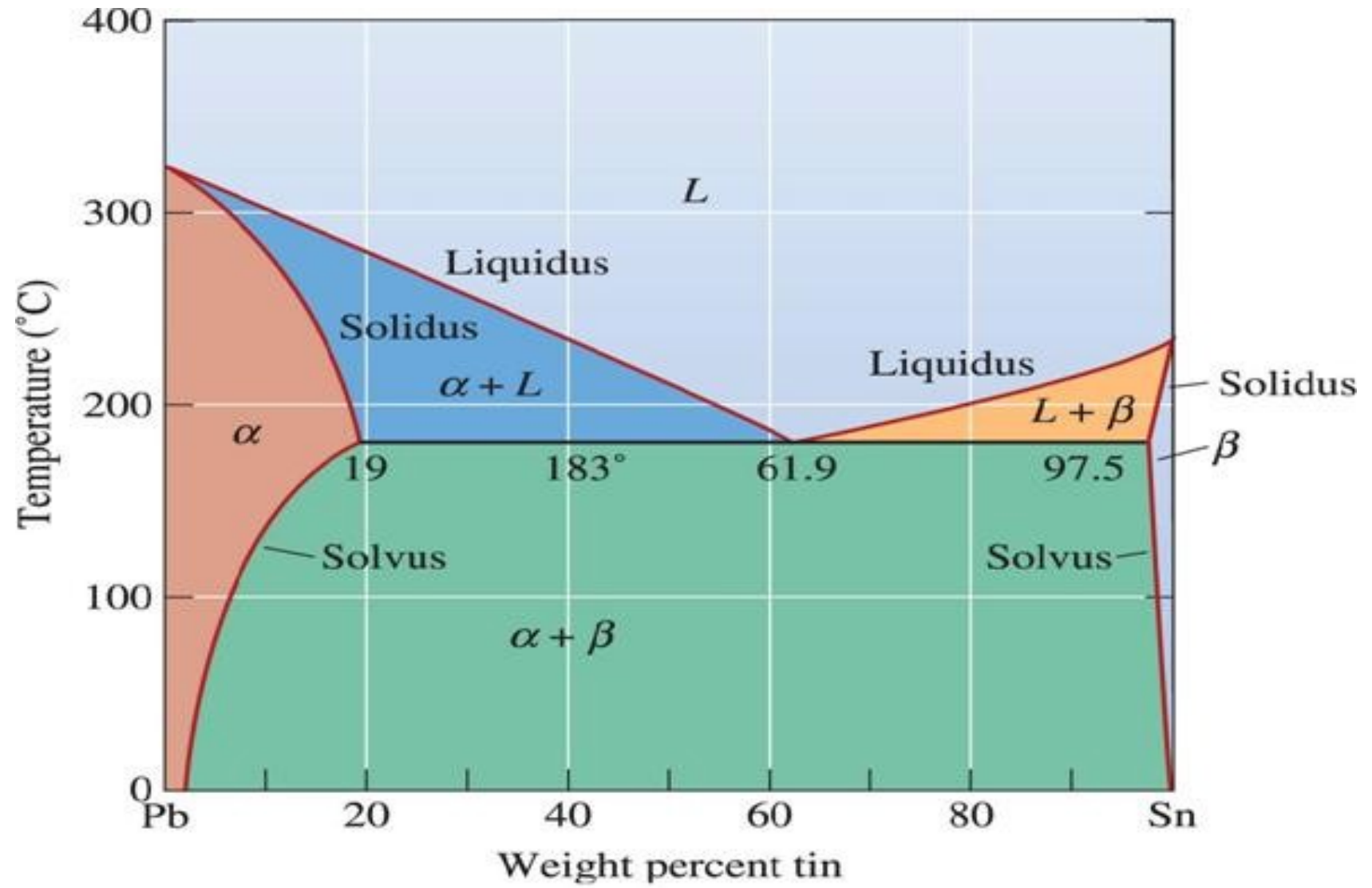
Superconductivity: Iron cast in exotic role

S. S. Saxena and Peter B. Littlewood
Nature 412, 290-291(19 July 2001)

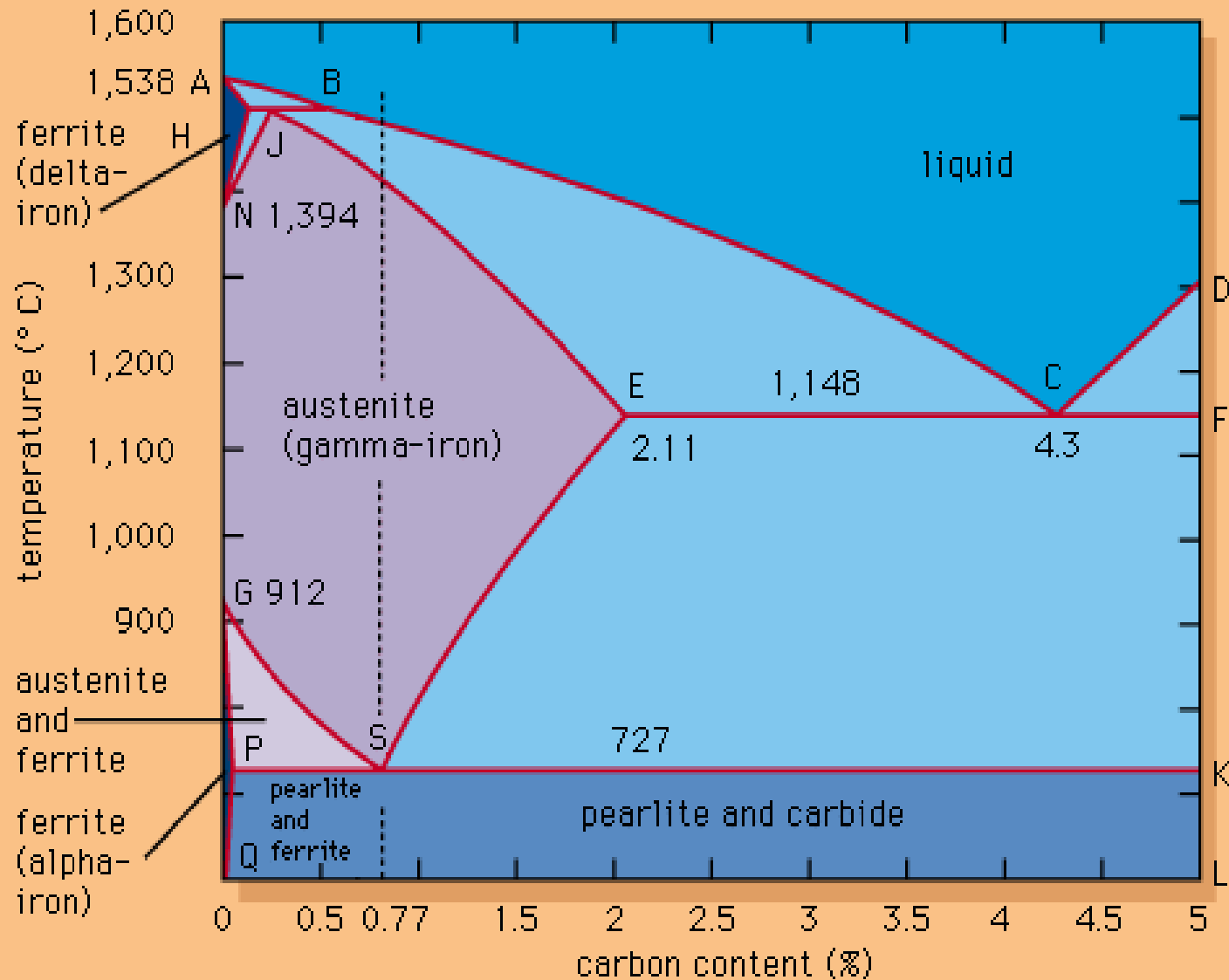
Fázový diagram systému Cu-Ni



Fázový diagram systému Pb-Sn

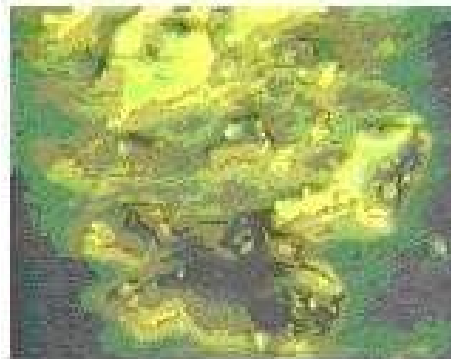
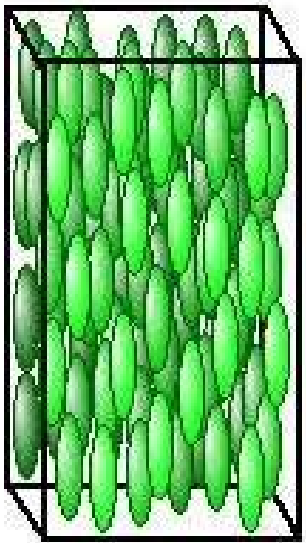


Fázový diagram systému Fe-C



Kapalné krystaly

Nematic



A schematic representation of the nematic phase (left) and a photo of a nematic liquid crystal (above).

Photo courtesy Dr. Mary Neubert LCI-KSU

Smectic

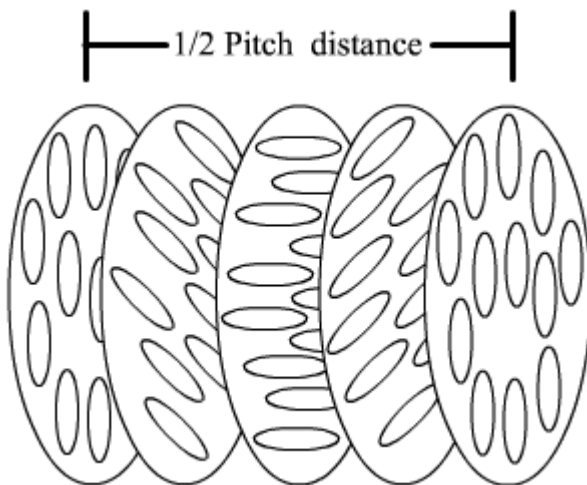


A phase

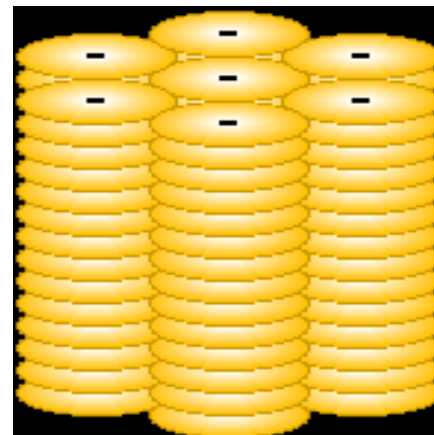


C phase

Cholestric (chiral nematic)



Columnar



Kapalné krystaly

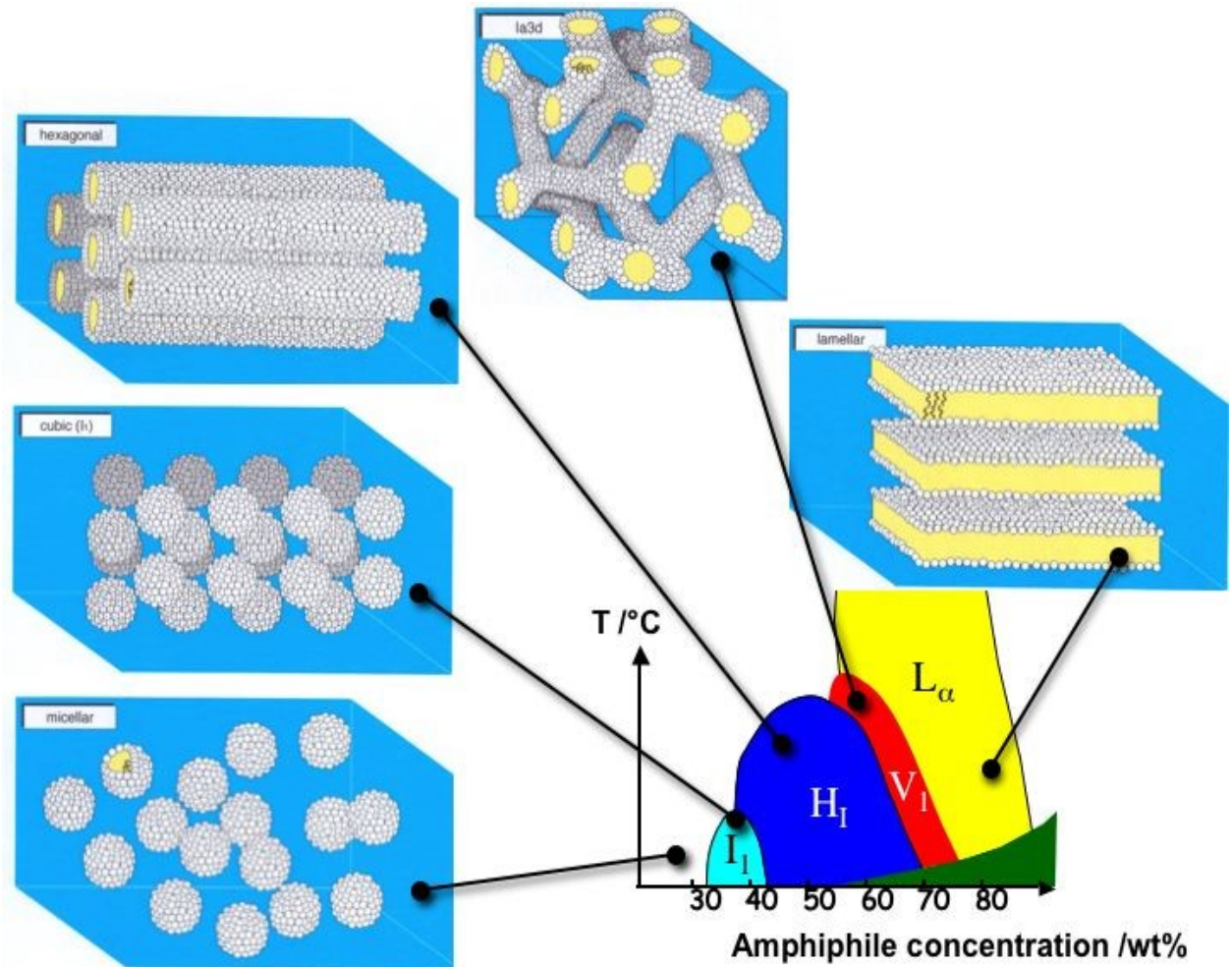
Termotropické

Fázový přechod mezi uspořádanou a neuspořádanou fází s teplotou

Lyotropické

Fázový přechod je řízen nejen teplotou ale i koncentrací molekul a rozpouštědla

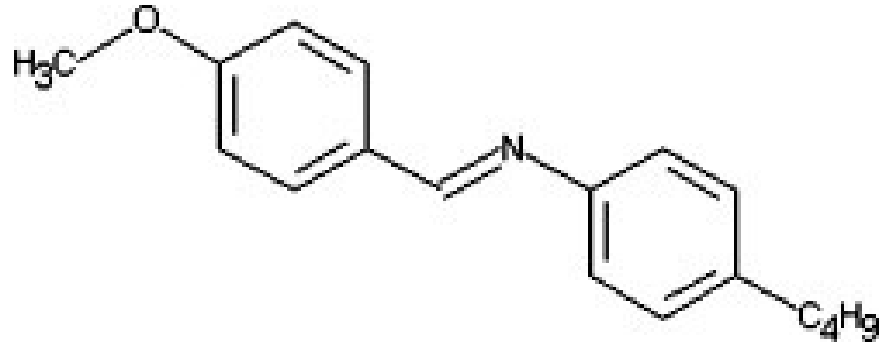
Biologické membrány



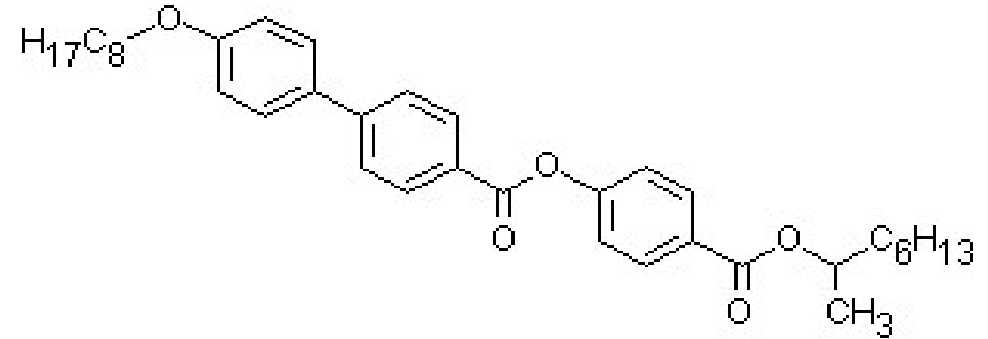
Kapalné krystaly

MBBA

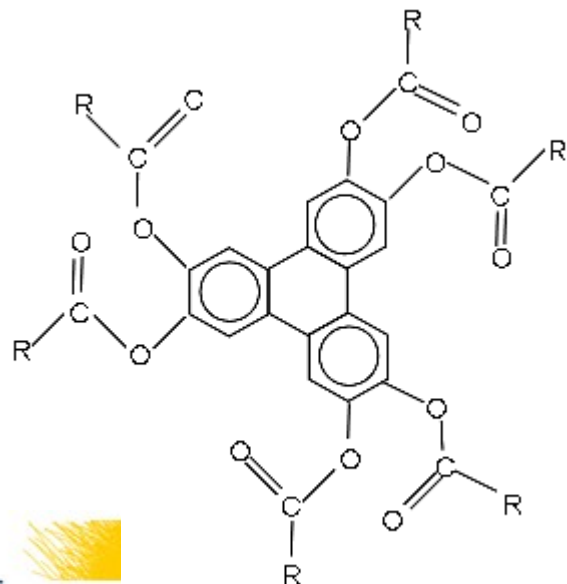
N-(4-Methoxybenzylidene)-4butylaniline



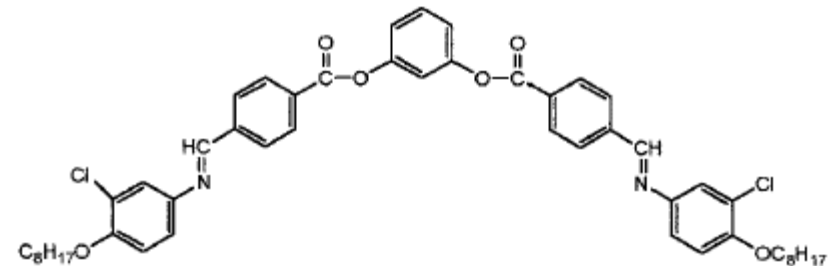
MHPOBC



Discotic shape



Banana shape



Kapalné krystaly

No field



Electric field



Necessary thickness approx. 100 – 500 nm only

