

'Excitations élémentaires'

A. Broniatowski

Centre de Spectrométrie Nucléaire et de Spectrométrie de Masse,
IN2P3-CNRS
91405-Orsay (France)

- **Caractères généraux des excitations élémentaires dans les solides**
- **Interaction électron-phonon :**
 - *potentiel de déformation et scattering des porteurs*
 - *dépendance en température des conductivités électrique et thermique des métaux*
- **Interaction phonon-phonon et thermalisation de l'énergie dans les bolomètres**
- **Interaction électrons-électrons : plasmons**
- **Un exemple : thermalisation de l'énergie déposée par les photons dans un semiconducteur**

1) Vibrations des solides : phonons

approximation harmonique : modes normaux de vibration, chaleur spécifique

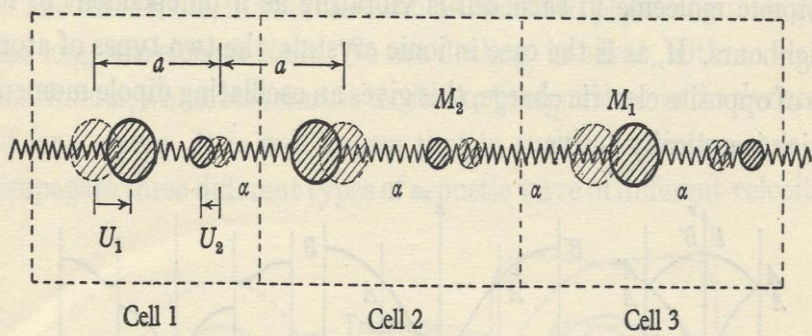


Fig. 17. Diatomic linear chain.

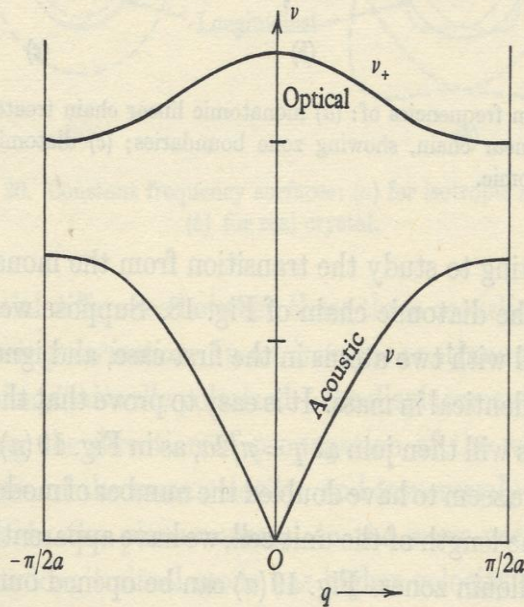


Fig. 18. Vibration frequencies of diatomic chain.

Ziman 1969

- Analyse en ondes progressives :

$$U = U_0 \operatorname{Re}(e^{i(2\pi\nu t - qx)})$$

- Modes **acoustiques** et **optiques**

- Relation de dispersion

$$\nu = \nu(q), \quad q = 2\pi/\lambda = \text{vecteur d'onde}$$

- Quantum d'énergie vibrationnelle = **phonon**

$$E = h\nu(q)$$

- Application aux propriétés thermiques des solides : *chaleur spécifique des isolants à basse température, modèle de Debye*

$$C_V = (12\pi^4 N k_B / 5) (T / \Theta_D)^3$$

(N = nbre d'atomes, k_B = cte de Boltzmann, Θ_D = température de Debye)

- Ordre de grandeur (Ge) : $\Theta_D = 360 \text{ K}$

$$C_V \approx 1 \text{ nJ/mole/K à } 30 \text{ mK, varie en } T^3$$

2) Caractères généraux des excitations élémentaires dans les solides

- **Caractère collectif**

- **Relation de dispersion** fréquence \leftrightarrow vecteur d'onde : $\nu = \nu(\mathbf{q})$

- **Dualité onde-corpuscule** \rightarrow notion de 'quasi-particule' :

$$(\nu, \mathbf{q}) \leftrightarrow (E, \mathbf{p})$$

avec $E = h\nu$ (quantum d'énergie) et $\mathbf{p} = (h/2\pi)\mathbf{q}$ (impulsion)

- **Règles de conservation** de l'impulsion et de l'énergie dans les interactions entre quasi-particules

- **Quelques exemples :**

- **Interaction électron-phonon** \rightarrow effet de la température sur la conductivité électrique et thermique des métaux; supraconductivité; transport à champ élevé et porteurs chauds dans les semiconducteurs

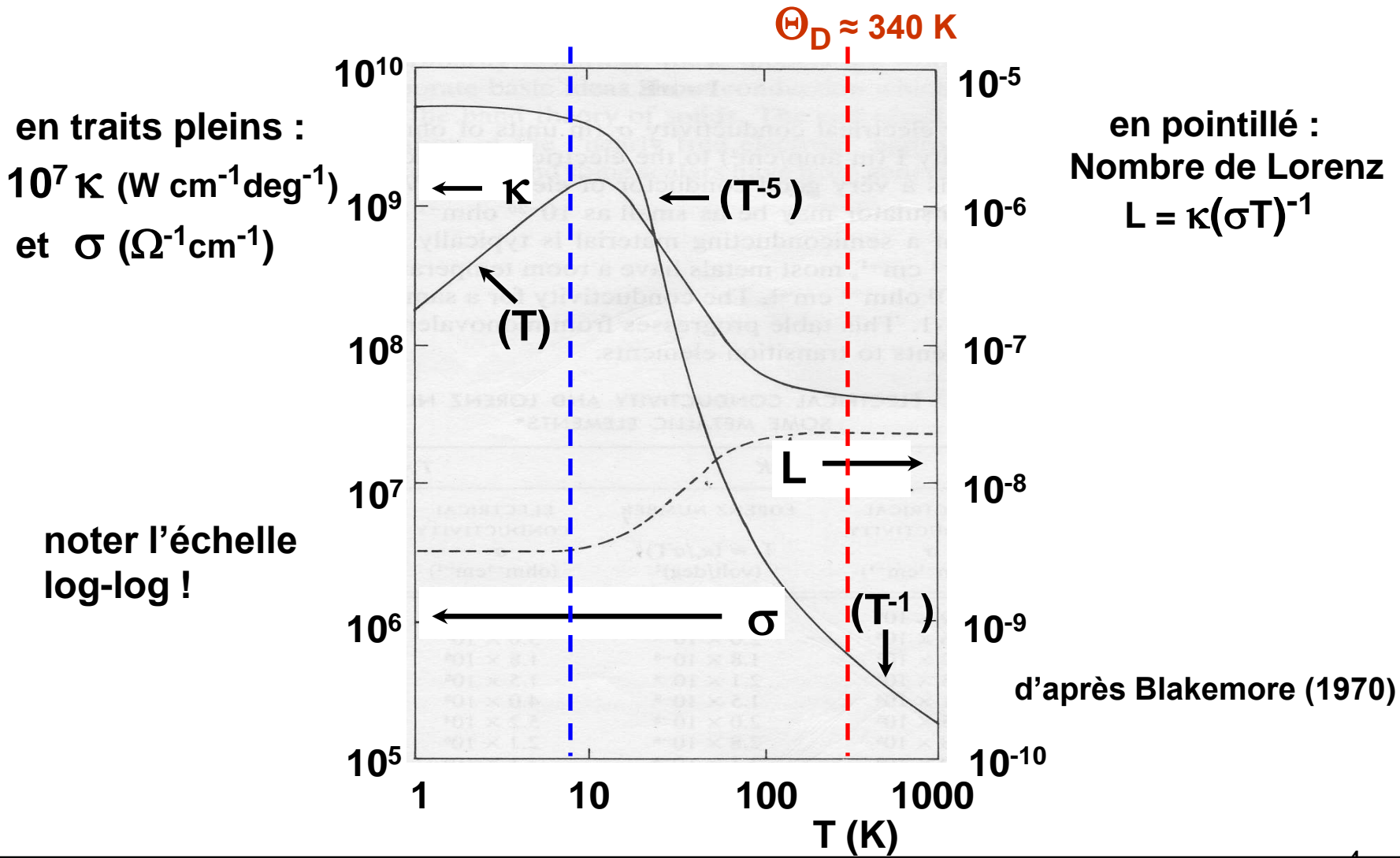
- **Interaction phonon-phonon** \rightarrow diffusion de la chaleur dans les isolants

- **Interaction électron-électron** \rightarrow structure de bande; excitons, électrons et trous dans les semiconducteurs; plasmons et pertes d'énergie des électrons rapides

- **Interaction photon-phonon** \rightarrow diffusion inélastique de la lumière (effets Raman et Brillouin); diffusion des rayons X (facteur de Debye-Waller)

3) Interaction électron-phonon dans les métaux : données expérimentales

Variations en fonction de la température de la conductivité électrique (σ) et de la conductivité thermique (κ) dans le cuivre de haute pureté



Interaction électron-phonon : potentiel de déformation

L'idée de base : vibration du milieu = modulation périodique de sa densité, donc de la concentration électronique locale
 → potentiel de déformation → scattering des porteurs

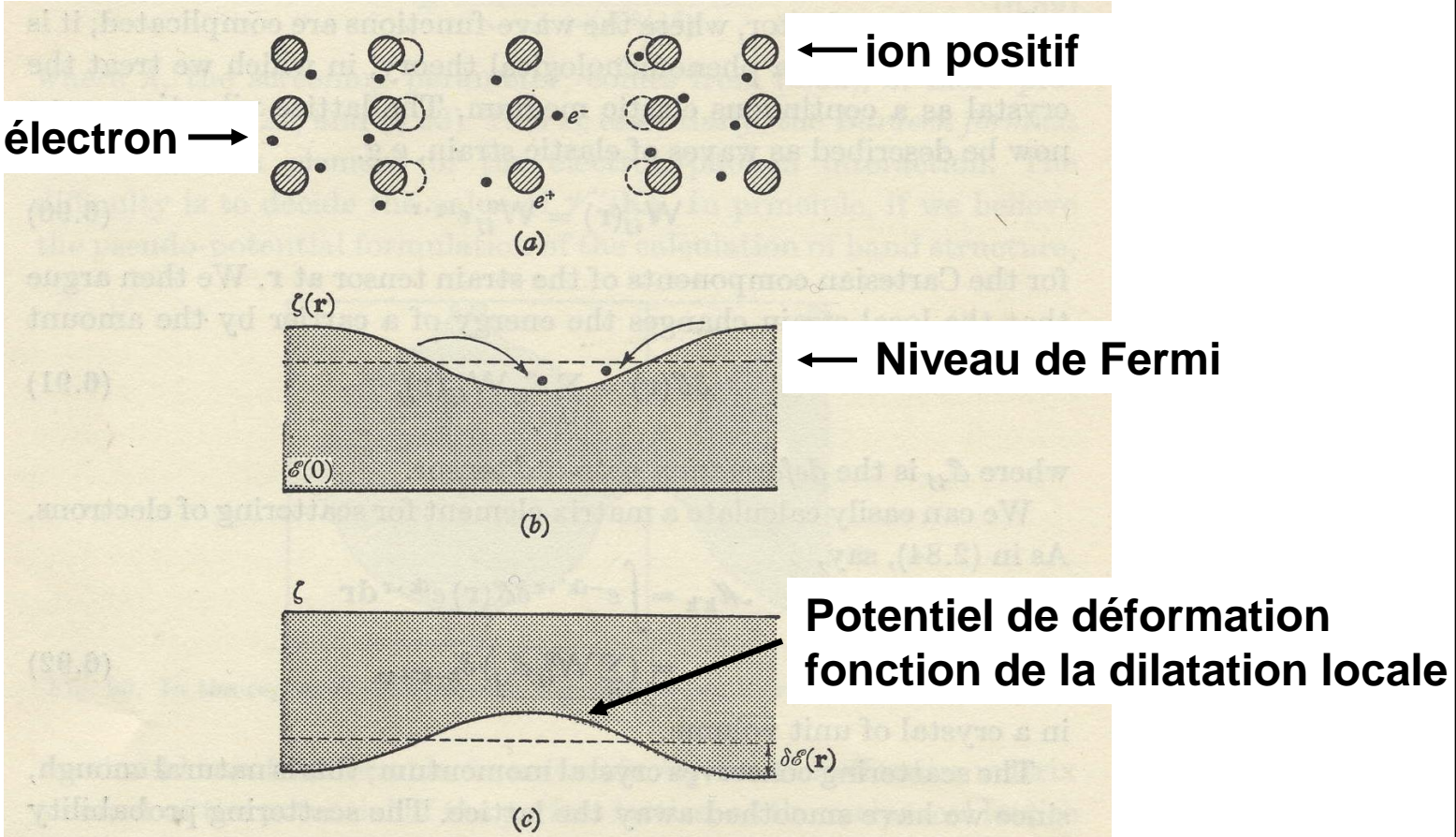
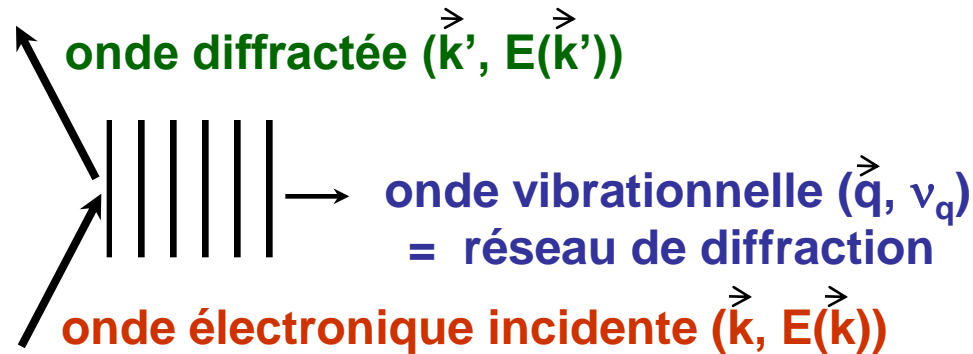


Fig. 96. (a) Density waves in the lattice cause electron density to vary. (b) Fermi level is raised or lowered. (c) Electrons flow to keep Fermi level constant, giving rise to deformation potential.

Ziman 1969

Interaction électron-phonon : scattering des porteurs



- 1) Conservation de l'impulsion et de l'énergie pour l'**absorption** (+) et pour l'**émission** (-) de phonons :

$$\vec{k}' = \vec{k} \pm \vec{q} \quad \& \quad E(\vec{k}') = E(\vec{k}) \pm h\nu_q$$

- 2) Règle d'or de Fermi \rightarrow probabilité par u. de temps de la transition $\vec{k} \rightarrow \vec{k}'$

- 3) Bilan des transitions sur les différents modes vibrationnels \rightarrow dépendance en température des conductivités électrique et thermique

N.B. : aux très basses températures, rôle dominant du scattering par les défauts et impuretés (matériaux massifs) ou par les surfaces (films minces).

4) Thermalisation des phonons : couplage anharmonique entre modes vibrationnels

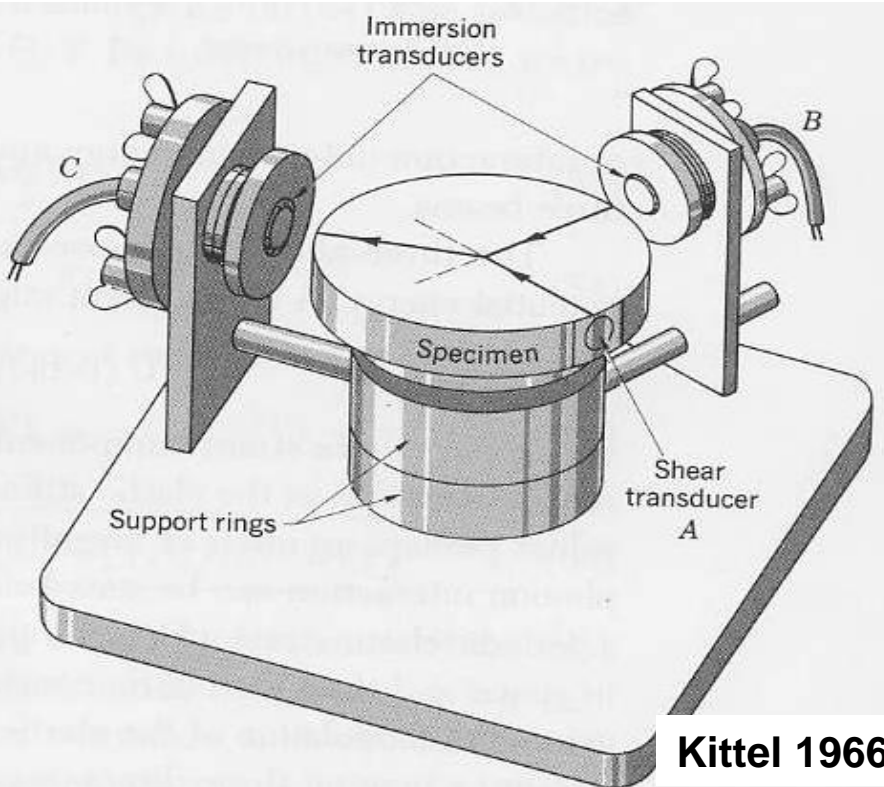
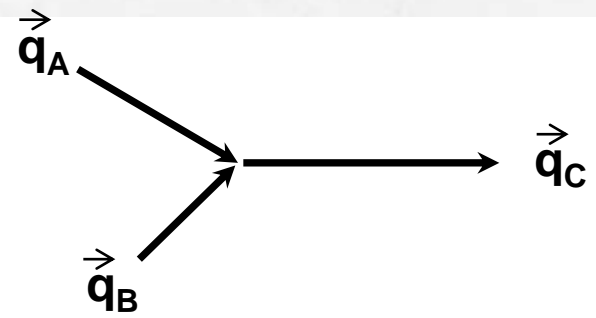


Figure 16 Ultrasonic experiment on three-phonon interactions. In a typical experiment the transducer A generates a 10-Mc shear wave which interacts near the center of the disc-shaped specimen with a 15-Mc longitudinal wave generated by B, to produce by their interaction a 25-Mc longitudinal wave detected by the transducer C: $L(15) + T(10) \rightarrow L(25)$. The wavevectors satisfy $\mathbf{K}_{15} + \mathbf{K}_{10} = \mathbf{K}_{25}$. The angle φ is easily calculated from this equation and the wave velocities. The whole apparatus is immersed in a suitable fluid to provide coupling between the immersion transducers and the specimen. (After Rollins, Taylor, and Todd.)

Règles de conservation
vecteurs d'onde : $\vec{q}_C = \vec{q}_A + \vec{q}_B$
énergie : $h\nu_{q_C} = h\nu_{q_A} + h\nu_{q_B}$



Temps de vie des phonons : dépendance en fréquence et cascade de désintégration

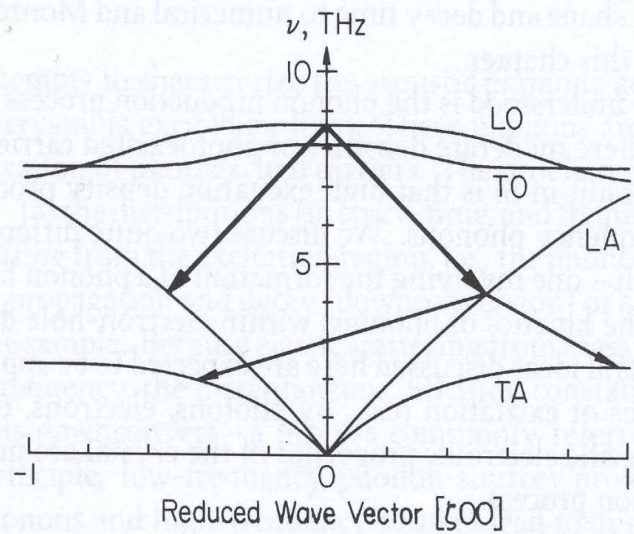


Table 1. Frequency downconversion of a 7.5-THz longitudinal phonon in Si

Frequency ν (THz)	Lifetime τ_a (ns)	Number of elastic scatterings τ_a/τ_e	Mean free path $V\tau_e$ (μm)	Diffusion length $(V^2\tau_e\tau_a/3)^{1/2}$ (μm)
7.5	0.0006	4	1.1	1.4
3.75	0.018	8-9	18	30
1.88	0.58	17-18	280	680
0.94	19	35	4400	15,000

15 GHz
($\approx 1\text{K}$)

20s

Wolfe 1986

Temps de vie, libre-parcours moyen et longueur de diffusion des phonons en fonction de la fréquence (Si) :

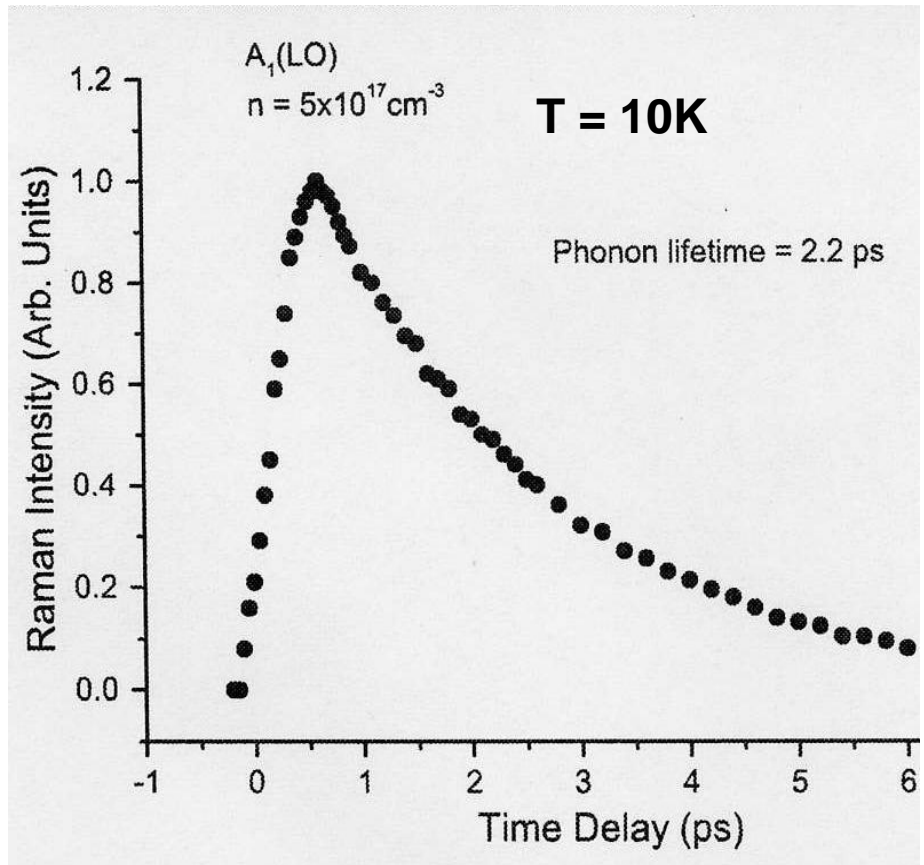
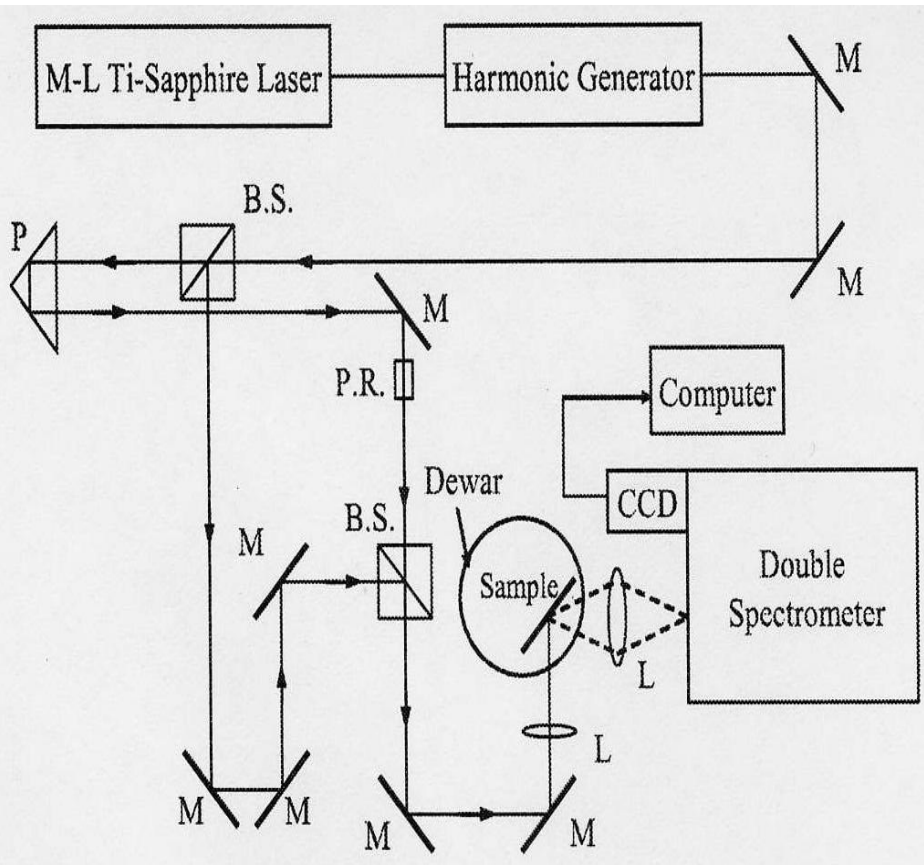
- le temps de vie varie en ν^{-5}
- noter l'accroissement du libre-parcours moyen aux basses fréquences

Le cas des très basses températures :

- lenteur de l'établissement de l'équilibre thermique
- transport balistique de la chaleur ('gaz de phonons')

Cascade de désintégration d'un phonon optique longitudinal en phonons acoustiques de plus basse fréquence (GaAs)

Temps de vie des phonons : mesure directe par excitation laser ultra-rapide

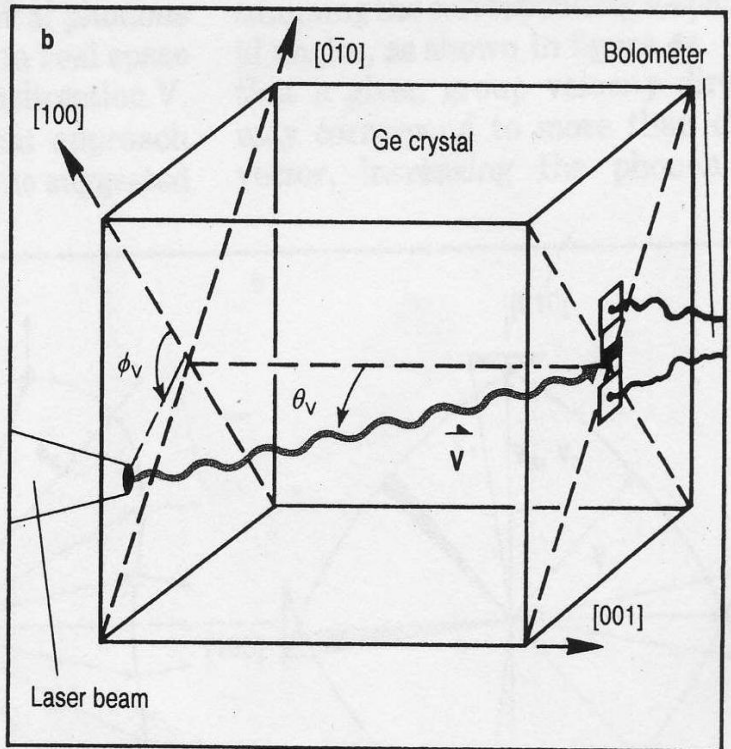
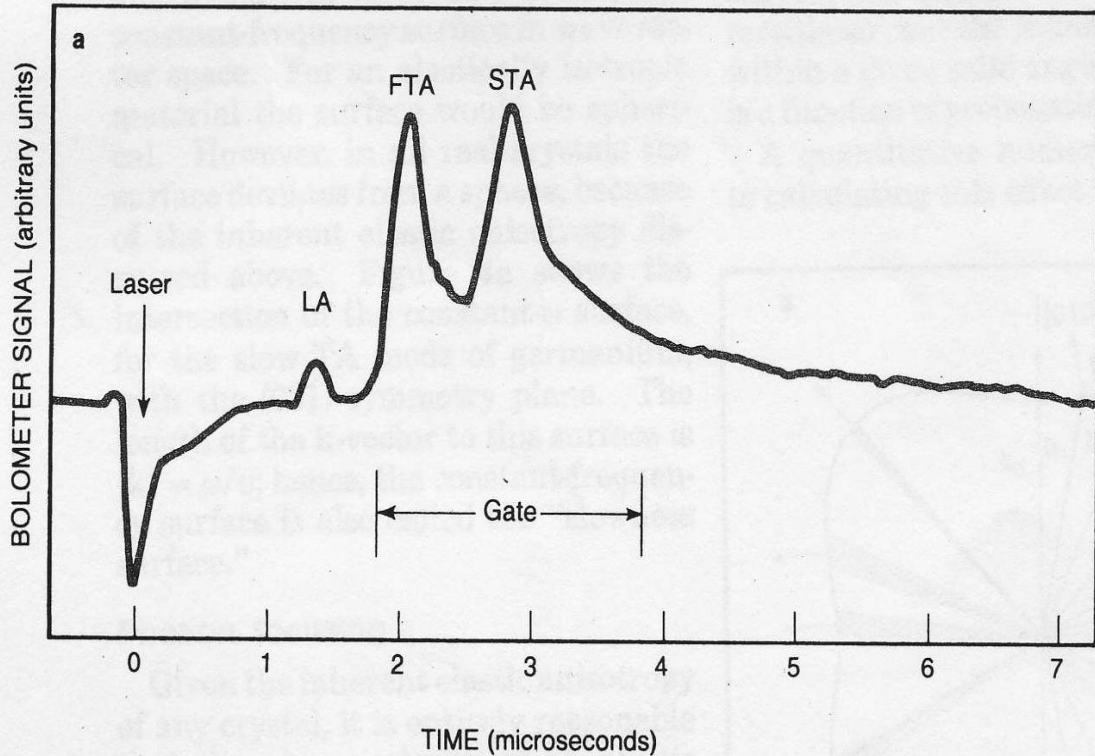


↑
**Montage
expérimental**

Figure 4. Integrated Raman intensity of the $A_1(LO)$ phonon as a function of the delay time for an InN sample, with photoexcited electron-hole pair density of $n \approx 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. The deduced lifetime of the LO phonon is found to be $(2.2 \pm 0.2) \text{ ps}$.

Mesure par effet Raman résolu en temps du temps de vie des phonons optiques dans InN (Tsen et al. 2007)

Phonons balistiques et transport de la chaleur aux très basses températures



Heat-pulse experiment. The schematic view (right) shows heat generated at the left surface of the crystal producing phonons radiating in all directions. Those with propagation direction (θ_v, ϕ_v) impinge on the detector. Phonon pulses in germanium (left) are detected by sensing the resistance of the bolometer, biased near its

superconducting transition. The longitudinal, fast transverse and slow transverse acoustic phonons, generated by a 200-nanosec laser pulse, are resolved by their differing times-of-flight across the crystal. The negative signal at $t=0$ is due to photoexcited carriers. (From reference 10).
Figure 2

Détection bolométrique des phonons balistiques dans le germanium (Wolfe 1980)

5) Interaction électrons-électrons : pertes d'énergie des électrons rapides, plasmons

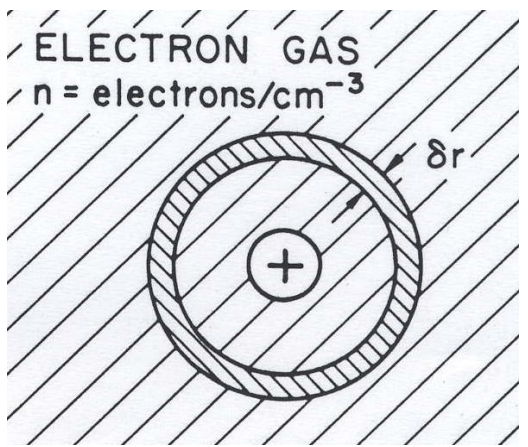


Figure 6.8 Electron gas with $\frac{4}{3} \pi r^3 n$ electrons around a positive core and undergoing a radical contraction δr .

Oscillations propres du gaz d'électrons et fréquence-plasmon :

$$\omega_p = \left(\frac{4\pi e^2 n}{m} \right)^{1/2}$$

ordre de grandeur :
10 à 20 eV = 1 à 3×10^{16} Hz

Relation de dispersion :

$$\omega \cong \omega_p \left(1 + \frac{3k^2 v_F^2}{10\omega_p^2} + \dots \right)$$

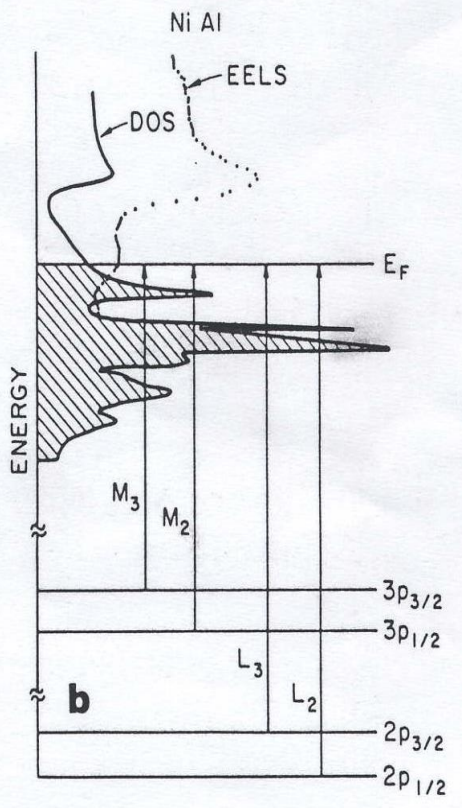
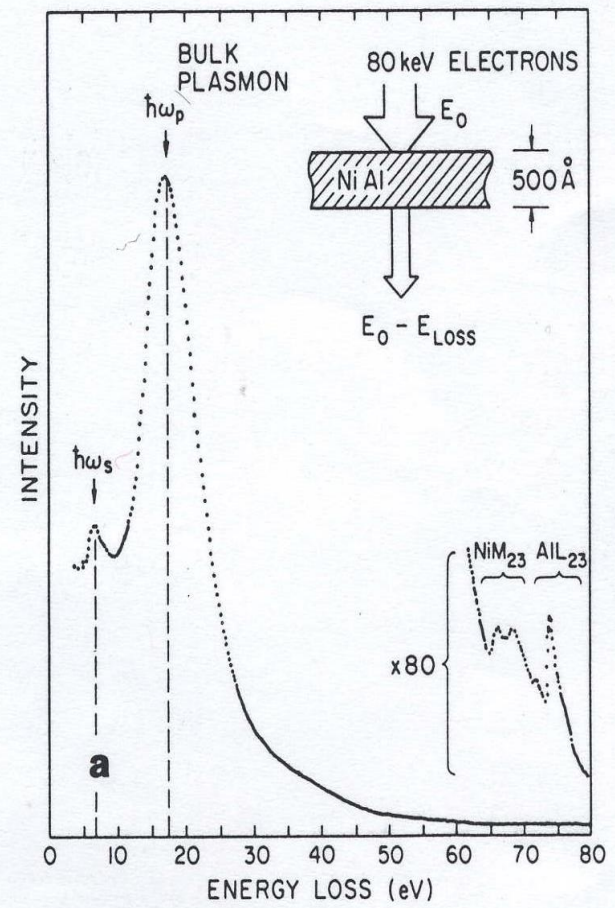
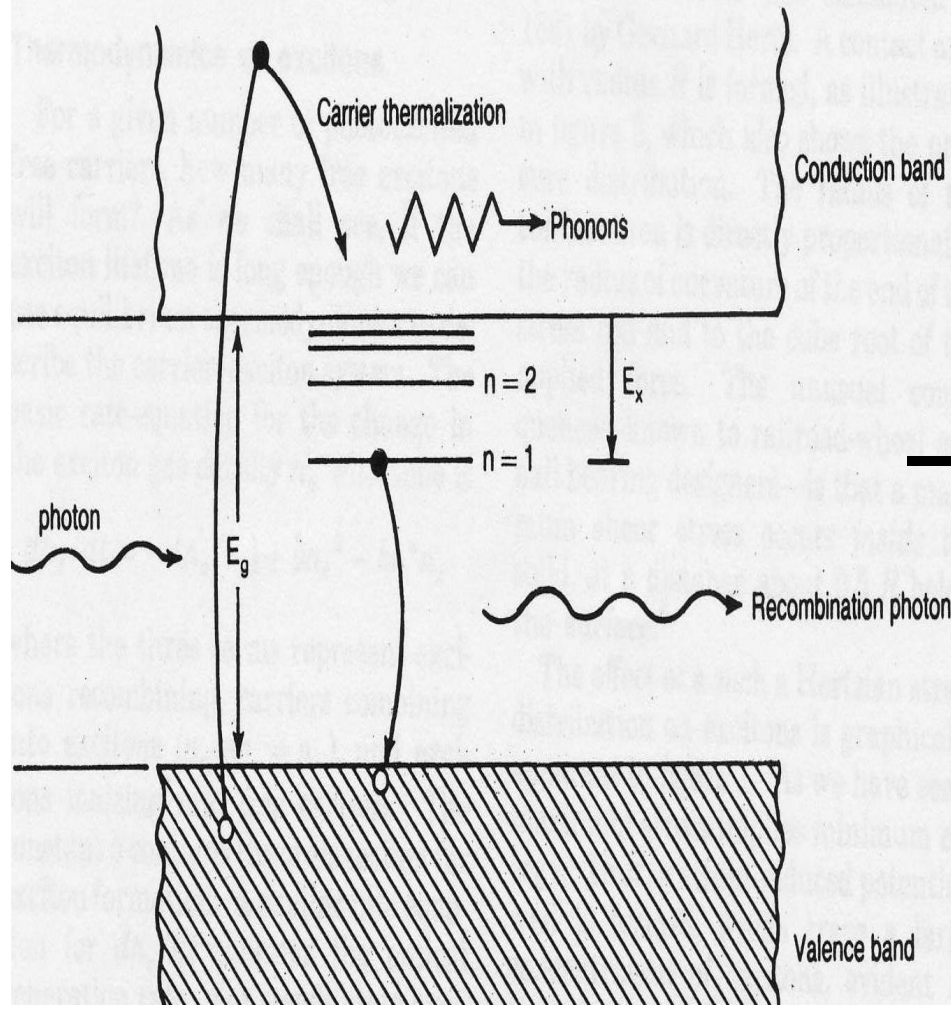


Figure 6.10 (a) Electron energy loss spectrum for 80 keV electrons transmitted through a 500 Å NiAl film. The dominant peak in the loss spectrum is the single plasmon loss at $\hbar\omega_p \sim 17.8$. The surface plasmon ($\hbar\omega_s = 7.1$ eV) and core excitation (Ni M_{23} and Al L_{23}) are indicated. (b) The calculated density of states (DOS) for NiAl (solid line) and Al L_{23} core excitation (data points) from EELS spectra similar to that shown in (a). Core level threshold transitions are shown by arrows. [From Grunes, Barbour, Hung, Mayer and Ritsko, *J. Appl. Phys.* 56, 168 (1984).]

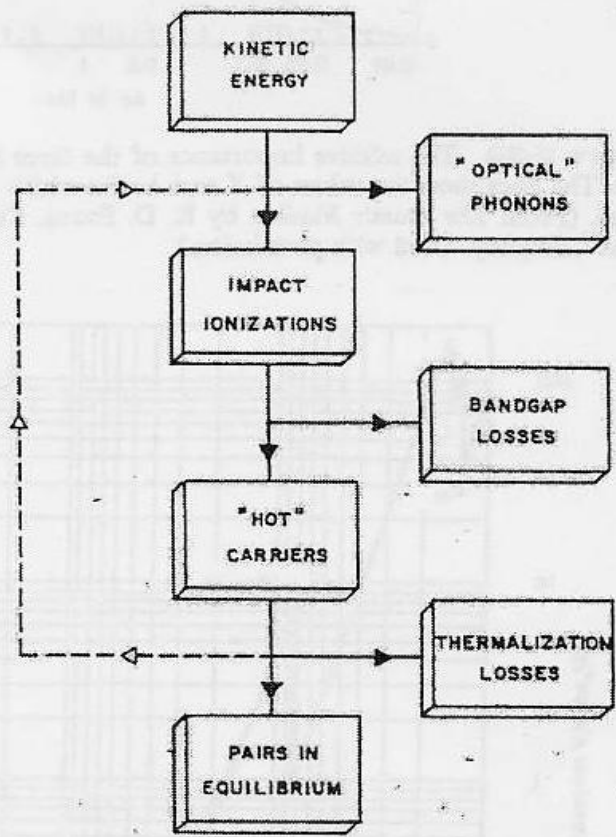
Feldman et Mayer 1986

6) Un exemple : thermalisation de l'énergie déposée par les photons dans un semiconducteur



Wolfe 1982

Création d'excitations élémentaires (électrons, trous, excitons, phonons)



Block diagram of events following radiation-energy deposition in a semiconductor. The kinetic energy of internally generated carriers goes into the production of electron-hole pairs and/or the excitation of lattice vibrational modes. These modes include "optical" phonons associated with pair generation and multiplication in addition to phonons originating from the thermalization of "hot" carriers that have fallen below the threshold for impact ionization.

Klein 1968

Dégradation de l'énergie en chaleur

Bibliographie

Exposés présentés aux Ecoles du CNRS sur la Détection des Rayonnements aux Très basses Températures

(documents sur le site web <http://www-ecole-drtbt.grenoble.cnrs.fr>)

Livres :

C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, Wiley (1966)

J.S. Blakemore, Solid State Physics, Saunders (1970)

J. Ziman, Principles of the Theory of Solids, Cambridge (1969)

J.P. Wolfe, Imaging Phonons, Cambridge (1998)

L.C. Feldman et J.W. Mayer, Fundamentals of Surface and Thin Film Analysis, North Holland (1986) (applications à la science des matériaux)

Articles :

J.C. Slater, Interaction of Waves in Crystals, Revs. Mod. Phys. 30, 197 (1958)

J.P. Wolfe, Ballistic heat pulses in crystals, Physics Today 33, 44 (1980)

J.P. Wolfe, Thermodynamics of Excitons in Semiconductors, Physics Today 35, 46 (1982)

K.T. Tsen et al., Electron-density dependence of longitudinal-optical phonon lifetime in InN studied by subpicosecond time-resolved Raman spectroscopy, J. Phys.: Condens. Matter 19, 236219 (2007)

C.A. Klein, Bandgap dependence and related features of radiation ionization energies in semiconductors, J. Appl. Phys. 39, 2029 (1968)

T.C. Choy et A.M. Stoneham, Plasmon effects in solid state radiation detectors, Europhys. Lett. 23, 99 (1993)