

Vendredi 8 Janvier 2010

Tous documents autorisés

$$N=6.02 \cdot 10^{23}, k_B=1.38 \cdot 10^{-23} \text{ (J/K)}, m_e=9.11 \cdot 10^{-31} \text{ (kg)}, e=1.6 \cdot 10^{-19} \text{ (C)}, h=6.6 \cdot 10^{-34} \text{ (Js)}$$

A- Modèle de Drude

Trois ans après la découverte de l'électron par J.J.Thomson, Drude construisit sa théorie pour la conductivité électrique des métaux. Les hypothèses fondamentales de cette théorie étaient les suivantes :

- 1. Drude applique la *théorie cinétique des gaz* au métal vu comme un gaz d'électrons (la vitesse moyenne de l'électron est alors proportionnelle à $T^{1/2}$),
- 2. Il suppose que les *ions¹ positifs sont lourds et immobiles*,
- 3. Entre deux collisions l'interaction d'un électron avec les ions et les autres électrons est *négligeable* (l'électron se déplace alors « librement » entre deux collisions),
- 4. La résistance électrique résulte du « *rebond* » des *électrons sur le cœur* impénétrable des ions. La probabilité de subir une collision pendant un temps dt est dt/τ (ou τ est appelé temps de relaxation ou temps de libre parcours moyen).

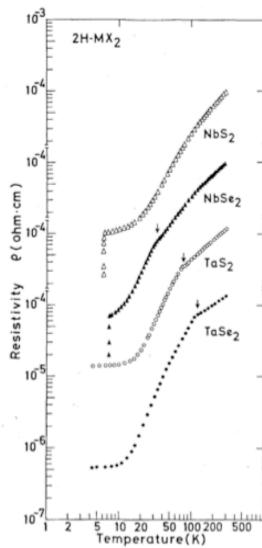
Commentez (brièvement) ces différentes hypothèses, lorsque l'hypothèse est fausse on précisera notamment la bonne formulation qui devrait remplacer l'hypothèse erroné.

B- Propriétés électroniques des dichalcogénures

Les dichalcogénures sont des alliages de la forme MX_2 où M est un métal de transition ($M=Ti, Ta, Nb \dots$) et X est un chalcogène ($X= Se, S \dots$). Ils ont une structure lamellaire constituée de sandwiches X-M-X dans lequel le métal peut prendre différentes coordinations : trigonale (notée H), ou octaédrique (notée T) par exemple. *Bien qu'importantes, ces différences structurales seront ignorées dans la suite.*

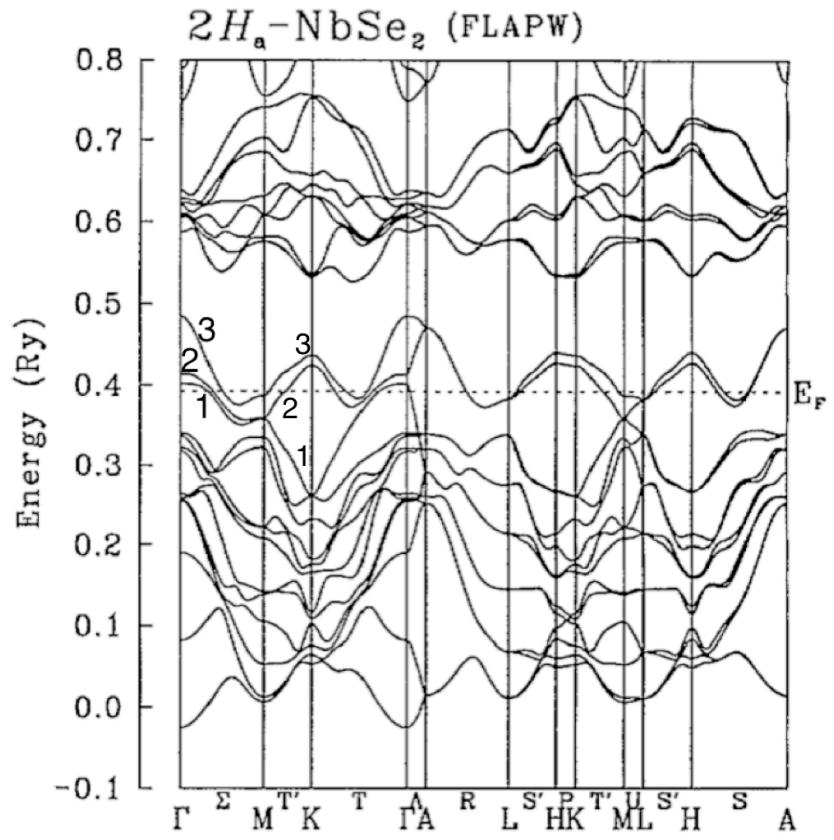
¹ Il n'existe pas à cette époque de notion précise sur la nature de ces « particules » lourdes qui devaient assurer la neutralité électrique du métal

1. La figure ci-dessous représente la dépendance en température de la résistance électrique pour différents alliages. Pour TaSe_2 et TaS_2 la résistance électrique présente une anomalie (rupture de pente) vers 50-100K (représentée par la flèche). Si cette anomalie n'existe plus dans NbS_2 ce système présente lui une transition supraconductrice (la résistance tombe à zéro) en dessous de 6K. NbSe_2 a enfin la particularité de présenter à la fois une transition supraconductrice vers 7K et l'anomalie « haute température » (ici vers 33K).



Cette anomalie « haute température » est associée à la formation d'une onde de densité de charges. *On supposera ici que la formation de cette onde de densité de charges peut être décrite par le modèle de la transition de Peierls observée dans les systèmes unidimensionnels.* **Rappelez l'origine de la transition de Peierls dans ces systèmes 1D. On expliquera notamment l'origine de l'ouverture d'un gap dans la structure électronique.** Comment varie alors la résistivité dans ces systèmes 1D, en quoi la situation est-elle différente/identique dans le cas des dichalcogénures ? A quoi est due cette différence/similitude ?

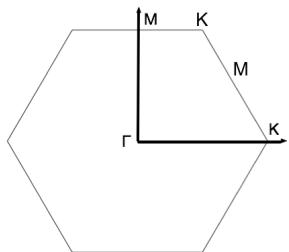
2. La relation de dispersion de NbSe_2 est représentée sur la figure ci-contre. **Rappeler (brièvement) l'origine de bande dans les relations de dispersion.** Trois bandes sont proches du niveau de Fermi (voir ci-dessous (3a) pour la définition des différentes orientations). Pour chacune de ces bandes indiquer ci elle participe ou non à la conduction le long de (a) ΓM et (b) le long de ΓA .



Préciser la nature (électrons ou trous) des porteurs dans chaque cas.

3. La surface de Fermi de 2 de ces bandes est donnée par la figure ci-contre. L'hexagone représenté en trait gras correspond à la 1^{re} zone de Brillouin. Que peut-on en conclure quant à la structure cristallographique de NbSe₂. Rappeler la définition de la surface de Fermi et de l'espace réciproque. A quelle bande (1, 2 ou 3) correspond chacune de ces deux surfaces de Fermi (justifier votre réponse).

4. Pour la 3^{eme} bande, reporter (grossièrement) les points d'intersection de la relation de dispersion



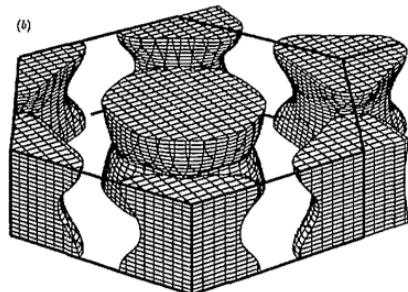
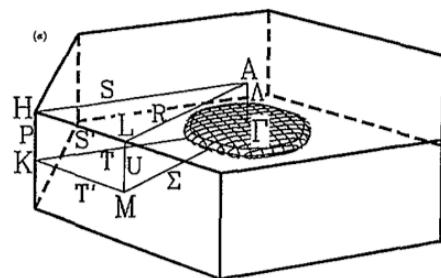
avec E_F sur la « vue de dessus » (i.e. dans le plan hexagonal ci contre) à partir de la relation de dispersion donnée en B2 (directions ΓM, ΓK et MK). En déduire l'allure de la surface de Fermi correspondante (comme pour les figures ci-dessus hachurer les états occupés).

5. Des mesures de masse effective conduisent à deux valeurs distinctes pour la surface 3a (« galette ») : 0.46m_e et 2.27m_e. A quelles directions ($\Gamma M=Ox$, $\Gamma K=Oy$ ou $\Gamma A=Oz$) correspondent ces masses. Comment peut-on alors écrire la relation de dispersion pour cette bande (on admettra que cette bande peut-être décrite par un modèle de type « électrons presque libres »).

6. En déduire que le nombre d'électron N(E) dont l'énergie est inférieure à E (pour la « galette » 3a) est alors égale à :

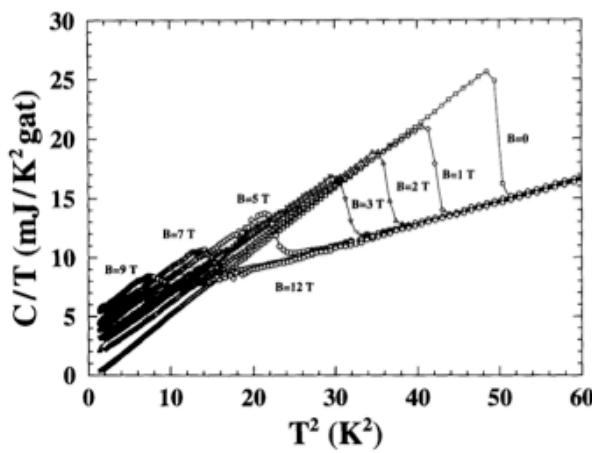
$$N(E) = 2 \times 2 \frac{L^3}{(2\pi)^3} \int_0^{k_{max}} \pi \left(\frac{2m_1 E}{\hbar^2} - \frac{m_1}{m_2} k_z^2 \right) dk_z$$

Préciser les valeurs de m₁, m₂ et k_{max} en l'origine du coefficient « 2x2 ». En déduire la valeur de la densité d'états au niveau de Fermi pour E=E_F (expression littérale et application numérique).



7. quelle serait la dépendance en énergie de la densité d'états associée à la bande 3b si on négligeait les « ondulations » de la surface de Fermi le long de z (en supposant donc que cette surface de Fermi soit constituée de cylindres parfaits d'axe Oz)

C- Supraconductivité



1. Certains dichalcogénures (voir A1) présentent une transition supraconductrice à basse température. Cette transition se caractérise donc par une chute brutale de la résistance électrique à zéro mais également par un saut de chaleur spécifique (voir figure ci-contre pour NbSe_2). **Pourquoi a-t-on choisi de tracer C/T en fonction de T^2 .**

Le « gat » (gram-atom) est la masse (en g) d'une mole d'atomes, la densité de NbSe_2 est de 6.2 g/cm^3 . **Déduire de la figure ci-dessus la valeur de la densité d'états au niveau de Fermi et de la température de Debye de ce composé (on rappellera la définition de cette température de Debye).**

2. Comme le montre la figure ci-dessus, le saut de chaleur spécifique se décale progressivement vers les plus basses températures en présence d'un champ magnétique. Ce système est un supraconducteur dit de type II, il est donc caractérisé par deux champs critiques. **Rappeler la signification de chacun de ces deux champs, lequel de ces deux champs la courbe ci-dessus permet-elle de mesurer. On suppose que ce système peut être décrit par la théorie BCS, comment peut-on déduire la valeur de la vitesse de Fermi à partir de cette courbe, donner la valeur numérique correspondante.**