

Titre : Conduction électrique dans les solides

Présentée par : Timothé Poulain

Rapport écrit par : Theo Le Bret

Correcteur : G. Feve

Date : 13/12/2019

Bibliographie de la leçon :			
Titre	Auteurs	Éditeur	Année
Physique des solides	Ashcroft et Mermin		
Physique du solide	Kittel		

Plan détaillé

Intro Les propriétés physiques des solides sont très variées (conducteurs/isolants thermiques et électriques, rigidité mécanique plus ou moins élevée...) Comment peut-on comprendre cette diversité ?

1) Modèle de l'électron libre

a) Modèle de Drude

Hypothèses : approche classique, gaz parfait d'électrons libres et indépendants, ions fixes, équilibre thermique assuré par les collisions (statistique de Maxwell-Boltzmann pour les vitesses des e^-). On retrouve ainsi la loi d'Ohm locale.

Manip : Mesure de la conductivité électrique d'une barre de cuivre en fonction de la température, vérification de la loi de Matthiessen. Remarque : la loi de Matthiessen est en désaccord avec le modèle de Drude, car en réalité la dépendance de la conductivité en T est due à la présence d'impuretés et de phonons

$t = 20 \text{ min}$

Transition : Toutefois, Drude n'explique pas l'existence d'isolants et de conducteurs, et implique un libre parcours moyen à basse température en contradiction avec l'expérience : nécessité d'un modèle quantique ?

b) Modèle de Sommerfeld

Hypothèses : gaz quantique de fermions (e^-) indépendants et libres, ions fixes (approx. de Born-Oppenheimer), et champ moyen (approx. de Hartree-Fock)

$t = 35 \text{ min}$

On écrit l'équation de Schrödinger pour ce gaz, vérifiant des conditions aux limites périodiques de période L , taille de la « boîte », pour obtenir l'énergie de Fermi du gaz d' e^- . On remarque que E_F est très grand devant l'énergie thermique des e^- (qui occupent donc tous leur niveau fondamental).

On en déduit un libre parcours moyen de l'ordre de 100 Å, mieux que Drude, mais on n'explique toujours pas la différence entre matériaux conducteurs et isolants : nécessite un modèle de bandes.

$t = 40 \text{ min}$

2) Structure de bande

On rajoute au modèle la condition de périodicité de la maille cristalline, qui doit donc se retrouver dans une invariance du hamiltonien par translation selon les vecteurs décrivant la maille \rightarrow « états de Bloch »

Cette invariance a pour conséquence l'apparition d'une structure de bande avec des régions « interdites », les gaps. On a alors une explication de la différence entre matériaux conducteurs et isolants et semi-conducteurs (bande de valence remplie ou non, bande de conduction accessible à des énergies de l'ordre de l'eV ou non).

Plus de temps...

Questions posées par l'enseignant

Dans le modèle du gaz d'e- libres, qu'est-ce qui cause les collisions ?

→ Dans le modèle de Drude, on pourrait penser aux ions, mais en fait se sont les défauts dans la maille cristalline et les phonons qui donnent l'échelle des collisions

Autres questions possibles :

-quelle est la dépendance en température de la conductivité d'un métal, d'un semiconducteur (attention dans le cas du semi-conducteur, cela dépend du régime de température cf ...). Quelle est l'origine de cette dépendance en température (phonons dans un métal, variation du nombre de porteurs dans un semi-conducteur en régime intrinsèque).

-qu'est ce que la mobilité ? Comment peut on la mesurer ? Comment mesurer la densité de porteurs dans un conducteur ?

-qu'est ce que le dopage ?

-quelle est la valeur du gap du Silicium ?

-qu'est ce qu'un trou dans un semi-conducteur ?

Commentaires donnés par l'enseignant

Avant de parler de Drude, faire une sous-partie « description locale du transport »

Mettre un schéma de la manip, passer plus de temps pour l'exploiter/l'expliquer.

Pas important de redémontrer le théorème de Bloch, en rester à une description phénoménologique.

Donner des ordres de grandeur des énergies de gaps

Donner une définition d'un métal en termes de leur énergie de Fermi (schéma explicatif de la distribution de Fermi-Dirac) → seuls les e^- ayant $E \sim E_f$ participent à la conduction

Partie réservée au correcteur

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.)

Le plan de la leçon convenait mais le contenu n'était pas adapté à la durée de la leçon de physique. Le contenu était beaucoup trop détaillé sur la partie du traitement quantique : théorème de Bloch, structure de bande.... Il n'est pas possible dans le temps de la leçon de faire un exposé détaillé de ces notions qui occupent plusieurs heures d'un cours de physique des solides.

Je conserverais un plan en deux parties avec une première partie sur une approche classique suivant Drude. Avant de décrire le modèle de Drude, il est important d'introduire la notion de conductivité qui permet de décrire le transport localement à la différence de la loi d'Ohm $U=RI$ qui décrit le conducteur globalement.

En ce qui concerne la partie Drude, deux solutions sont possibles. Dans l'approche de Drude lui-même, ce sont les collisions avec les atomes du solide qui sont à l'origine de la résistivité des conducteurs. L'ordre de grandeur en considérant la vitesse moyenne d'un gaz parfait classique d'électrons et les temps caractéristiques de collisions est compatible avec la distance interatomique. Le traitement quantique montre en fait que les électrons ne subissent pas de collisions dans cristal périodique parfait. Les collisions proviennent des impuretés et des défauts du réseau ainsi que des vibrations des atomes (phonons). Le libre parcours moyen est en fait plus grand que celui obtenu par Drude car le gaz d'électrons n'est pas un gaz parfait classique mais un gaz de Fermions dégénéré (régime $T \ll T_F$ la température de Fermi). La vitesse des électrons (vitesse de Fermi) est donc plus élevée que le résultat du gaz parfait classique et le libre parcours moyen plus grand pour un temps de collision donné. Je suggère de faire une présentation qui suit le cheminement historique c'est-à-dire en présentant dans la partie 1 ce que Drude croyait correct. Puis de présenter le modèle quantique et de revenir sur Drude en en donnant la compréhension moderne (collisions avec impuretés, défauts et phonons) d'électrons se déplaçant à la vitesse de Fermi.

Pour la partie quantique, il faut privilégier des explications et une présentation sans calculs et sans faire un cours de physique des solides (pas le temps). On peut commencer par parler de théorie quantique pour décrire la structure électronique des atomes. Comment les niveaux d'énergie sont remplis par les électrons en appliquant le principe d'exclusion de Pauli. Puis passer à la description de la théorie quantique des solides par Bloch vers 1930. Les niveaux d'énergie d'un solide forment des bandes, leur remplissage obéit aux mêmes règles que pour un atome. Plusieurs solutions sont possibles, soit le dernier niveau occupé est dans une bande à demi-remplie et on a un métal (les électrons peuvent être mis en mouvement par une excitation aussi faible que l'on souhaite), soit on n'a que des bandes complètement remplies ou vides et on a un isolant ou un semiconducteur. Parler ensuite de distribution de Fermi, d'énergie de Fermi et de surface/ sphère de Fermi. Expliquer que dans un champ électrique nul, la vitesse moyenne du gaz d'électrons est nulle, en présence d'un champ électrique, on a un déplacement de la surface de Fermi entraînant une vitesse moyenne non-nulle (cf page 141 Kittel par exemple). Parler également de semi-conducteurs et donner des variations de résistivité/conductivité des métaux/semi-conducteurs en fonction de la température.

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates

Notions fondamentales :

-approche locale du transport électrique : notion de conductivité, résistivité et lien avec un modèle microscopique : temps de collision, mobilité.

-bandes d'énergie dans un solide, différence entre métal, isolant et semi-conducteur. Donner des ordres de grandeurs de gap pour différents matériaux (comme Silicium, diamant).

-Un métal peut être décrit comme un gaz parfait de fermions dégénéré. Montrer la distribution de Fermi Dirac, donner des ordres de grandeur de la température de Fermi et de la vitesse de Fermi.

-Qu'est ce qui limite le transport dans un métal : les collisions avec les impuretés et les défauts ainsi qu'avec les phonons. La dépendance de la résistivité avec la température est reliée aux collisions avec les phonons. Montrer des courbes de variation de résistivité/conductivité en fonction de la température (p 148 Kittel pour les métaux, p 127,128 129 Alloul, p565 Ashcroft et Mermin pour les semi-conducteurs).

-Dans un semiconducteur intrinsèque, la variation de la résistivité ou conductivité avec la température est reliée à la variation de la densité de porteur dans la bande de conduction et dans la bande de valence avec la température (variation exponentielle).

Notion secondaire :

-dopage des semi-conducteurs : la variation exponentielle du nombre de porteurs dans un semi-conducteur est obtenue dans le régime intrinsèque (pas de dopage par des impuretés ou par une électrode/grille électrostatique). En pratique, on peut contrôler le nombre de porteurs par dopage (impuretés= atomes donneurs ou accepteurs d'électrons ou bien avec des tensions appliquées à des électrodes). Ce phénomène est essentiel à l'électronique moderne.

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)

L'expérience présentée convient. Bien la discuter, présenter le schéma de l'expérience sur transparent. Expliquer brièvement pourquoi on fait une mesure 4 points.

Bibliographie conseillée

Kittel, Ashcroft et Mermin ou encore Physique des électrons dans les solides de Henri Alloul.