

Anais do XIV Seminário de Iniciação Científica da Universidade Estadual de Feira de Santana, UEFS, Feira de Santana, 18 a 22 de outubro de 2010

EFEITO DE HAAS-VAN ALPHEN: UM ESTUDO INTRODUTÓRIO

Patrícia Pereira dos Santos¹ e Carlos Alberto de Lima Ribeiro²

1. Bolsista PIBIC/CNPq, Graduanda do Bacharelado de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: paty_pereira@yahoo.com.br
2. Orientador, Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: calr@uefs.br

PALAVRAS-CHAVES: Efeito de Haas-van Alphen, Métodos semiclássicos, Superfície de Fermi.

INTRODUÇÃO

A superfície de Fermi é a superfície de energia constante que separa os orbitais vazios dos preenchidos no zero absoluto. Através de sua forma e volume são determinadas as propriedades elétricas de um metal.

Dentre os vários métodos experimentais que foram desenvolvidos para determinação de uma superfície de Fermi, o efeito de Haas-van Alphen se mostrou o mais poderoso. Este fenômeno, observado pela primeira vez em 1930, foi responsável por muito do que se conhece hoje sobre as superfícies de Fermi de um grande número de metais.

Na presença de um campo magnético, os orbitais de elétrons livres formam no plano perpendicular ao campo, circunferências concêntricas, chamadas níveis magnéticos ou níveis de Landau. Se o campo for aumentado, começa então uma transferência de elétrons para um nível de menor energia, causando uma variação no nível de Fermi. A partir de então, quando analisamos a relação entre número de elétrons em níveis totalmente ocupados e o inverso do campo magnético, obtemos uma periodicidade. O mesmo ocorrendo para a energia total dos elétrons e para o momento magnético. A esta oscilação do momento dá-se o nome de Efeito de Haas-van Alphen (KITTEL, 2006).

A partir de medições do intervalo de oscilação, é possível deduzir as áreas extremas correspondentes e dessa maneira conhecer a forma e o tamanho de uma superfície de Fermi, o que faz do efeito uma excelente técnica para a descrição das superfícies de Fermi.

Em geral, o efeito é mais bem observado em amostras puras (onde as oscilações são mais visíveis, devido aos níveis de energia estarem bem definidos), submetidas a campos magnéticos elevados e baixas temperaturas.

A pesquisa consistiu em investigar o Efeito de Haas-van Alphen, adquirindo primeiramente o conhecimento da física básica necessária. Em Física Quântica, foram estudadas a Teoria de Bohr e as regras de quantização de Sommerfeld (EISBERG & RESNICK, 2006), em Física do Estado Sólido, estrutura dos cristais, bandas de energia e propriedades de transporte (KITTEL, 2006), e, por fim, os métodos analíticos semiclássicos de Onsager e Lifschitz (MASATSUGU & TSUKO, 2006), que exigiram o conhecimento das Teorias Lagrangeana e Hamiltoniana (MARION & THORNTON, 1995). Além dos conteúdos de Física básica, foram pesquisados artigos que tratavam do efeito de Haas-van Alphen de forma direta ou indiretamente.

Todos os trabalhos citados foram indispensáveis para a descrição do comportamento de uma partícula carregada em presença de uma indução magnética uniforme e, conseqüentemente, no estudo introdutório do Efeito de Haas-van Alphen, principal objetivo deste trabalho.

METODOLOGIA

Anais do XIV Seminário de Iniciação Científica da Universidade Estadual de Feira de Santana, UEFS, Feira de Santana, 18 a 22 de outubro de 2010

Os estudos foram iniciados com uma introdução à Mecânica Quântica, com a Teoria de Bohr, o postulado de de Broglie, as regras de quantização de Wilson-Sommerfeld e a Mecânica quântica de Schrödinger. Também adentramos um pouco em Mecânica Analítica, ao estudarmos as teorias Lagrangeana e Hamiltoniana.

Foi de suma importância conhecer os principais aspectos da Teoria dos Sólidos, como o comportamento dos elétrons em um cristal e a formação das bandas de energia, com suas consequências para a caracterização de um material condutor, semicondutor ou isolante.

Com isso, foi introduzido o efeito de Haas-van Alphen e o estudo das superfícies de Fermi, exigindo para tal a compreensão dos métodos semiclassicos de Onsager e Lifshitz na quantização das órbitas de elétrons livres na presença de um campo magnético e a formação de fases geométricas, esta última no Efeito Aharonov-Bohm.

Utilizamos freqüentemente sites de busca, portais de acesso a periódicos internacionais, além de livros-textos oferecidos tanto pelo grupo de pesquisa, quanto pela biblioteca da UEFS. Além disso, foram realizadas as reuniões com o orientador e com o grupo para discussão do trabalho e progresso da pesquisa.

Nesse ínterim, o trabalho, ainda em fase de desenvolvimento, foi apresentado no Colóquio do Departamento de Física e na Semana de Iniciação Científica (SEMIC).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O trabalho começou com a apresentação ao postulado de de Broglie, que relaciona as chamadas ondas de matéria (de comprimento de onda λ) com o momento de uma partícula (p), através da relação $\lambda = h/p$, onde h é a constante de Planck. Logo depois, veio a descoberta do princípio da Incerteza de Heisenberg, que afirma que não se pode conhecer simultaneamente, como na física clássica, a posição e o momento (ou energia e tempo) de uma partícula.

Essa base foi fundamental no estudo da Teoria de Bohr e seus postulados que mesclavam física clássica e quantização. O primeiro postulado afirma que o elétron, em sua órbita circular, obedece às leis da Mecânica Clássica. O segundo, no entanto, insere a idéia de quantização ao afirmar que o elétron só pode se mover em uma órbita na qual seu momento angular orbital é um múltiplo da constante de Planck dividida por 2π . Outra contradição com a Mecânica Clássica está no terceiro postulado que afirma que, apesar de acelerado, o elétron não emite radiação eletromagnética, o que evita o colapso do átomo. Por fim, o quarto postulado nos diz que a frequência da radiação emitida por um elétron quando este muda de órbita é igual a variação de energia sofrida dividida por h .

Posteriormente, introduzimos as regras de quantização de Wilson-Sommerfeld. Essas regras, também chamadas de regras de Bohr-Sommerfeld, são aplicadas apenas a sistemas em que as coordenadas são funções periódicas do tempo, podendo, portanto, trazer a quantização de Bohr como um caso particular.

As ondas de matéria de de Broglie retornam agora, na Mecânica Quântica de Schroedinger, com o nome de funções de onda. A equação postulada por Schroedinger fornece as leis do movimento ondulatório que as partículas de um sistema qualquer obedecem, além de especificar a equação que controla o comportamento da função de onda em cada sistema.

Compreender esse comportamento das funções de onda foi o primeiro passo para entender como os elétrons se comportam em um sólido cristalino. Dessa forma, com o conhecimento dos conteúdos citados introduzimos as bandas de energia, que são faixas quase contínuas de energia formadas quando os níveis de energia de cada átomo são perturbados na

Anais do XIV Seminário de Iniciação Científica da Universidade Estadual de Feira de Santana, UEFS, Feira de Santana, 18 a 22 de outubro de 2010

formação de um sólido cristalino. Entre bandas de energia adjacentes existe a chamada banda proibida ou gap de energia, estes são fundamentais na caracterização de um material quanto a sua condutividade elétrica. Quando o gap de energia é grande, os elétrons não conseguem atingir a banda de condução com facilidade, o que faz do material um isolante. Do contrário, o material é um condutor. Quando um isolante tem um gap pequeno, da ordem de 1eV, ele apresenta uma condutividade significativa, sendo chamado semiconductor.

No entanto, para a investigação do efeito de Haas-van Alphen, que se trata de um efeito magnetooscilatório, ainda era necessário entender como acontecia a quantização das órbitas de elétrons livres em presença de um campo magnético. Isso exigiu estudos do método semiclassico de Onsager-Lifshitz, que está baseado em um tratamento semiclassico, usando as Teorias Lagrangeana e Hamiltoniana juntamente com a condição de Bohr-Sommerfeld para quantizar. Dessa maneira, acrescentou-se a pesquisa a mecânica clássica necessária para o desenvolvimento do projeto.

Com isso, chegou-se ao Efeito de Haas-van Alphen propriamente dito. Este efeito trata-se de a oscilação (em $1/B$) do momento magnético em um metal, quando submetido a campos magnéticos elevados e baixas temperaturas. Isso ocorre por que, ao se variar o campo, começa a ocorrer uma variação no nível de Fermi e uma oscilação no número, na energia total e no momento dos elétrons.

Concluído esse estudo sobre efeito de Haas-van Alphen, iniciou-se a investigação sobre fases geométricas. O efeito Aharonov-Bohm (AB) foi escolhido para essa análise por ser um dos precursores da fase geométrica, além de se tratar de um processo cíclico semelhante ao efeito de Haas-van Alphen. Basicamente, o efeito se trata de uma experiência teórica na qual um feixe de elétrons é espalhado por um solenóide muito longo de tal forma que o campo magnético no seu trajeto é nulo. No final o feixe é reconstruído, podendo assim os elétrons interferir entre si. Se eles adquirirem fases diferentes será formada uma figura de interferência no alvo e a fase será detectada. Para o cálculo dessa fase, utilizaram-se as fases geométricas através do formalismo desenvolvido por M. V. Berry, em 1984.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa foi uma introdução a um efeito magnetooscilatório chamado Efeito de Haas-van Alphen. Nesse estudo, observou-se que quando submetidos a campos magnéticos, as propriedades dos metais apresentam claramente uma periodicidade em $1/B$. No caso do Efeito de Haas-van Alphen é o momento magnético que apresenta essa oscilação. Juntamente com essa investigação, foram adquiridos conhecimentos básicos nas áreas já citadas (Mecânica Quântica, Física do Estado Sólido e Mecânica Clássica), em fases geométricas, além do estudo do tratamento semiclassico de Onsager-Lifshitz para a quantização das órbitas de elétrons livres em materiais submetidos a campos magnéticos.

Será realizado na continuidade deste trabalho um estudo dirigido sobre o efeito de Haas-van Alphen e fases geométricas, aplicado ao um sistema físico de baixa dimensionalidade como o do grafeno. Nosso objetivo é estudar a presença de um defeito topológico nesse material e buscar evidências de como a fase geométrica poderá ser utilizada para caracterização do mesmo.

REFERÊNCIAS

Anais do XIV Seminário de Iniciação Científica da Universidade Estadual de Feira de Santana, UEFS, Feira de Santana, 18 a 22 de outubro de 2010

- DE FARIA, C.C.; et al.. 2000. *Estudo de Materiais pela técnica de suscetibilidade magnética*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 22, nº 03, 416p.
- EISBERG, Robert Martin; RESNICK, Robert. 1986. *Física quântica: átomos; moléculas; sólidos; núcleos e partículas*. 4ª. Ed., Rio de Janeiro: Campus, 928p.
- GOSWAMI, P., *Quantum oscillations in graphene in the presence of disorder and interactions*. Physical Review B.
- Griffiths, David J. 1995. *Introduction to Quantum Mechanics*. 2ªEd. Pearson Prentice Hall, 468p.
- LIN, D-H. 2004. *Topological phase in the de Haas-van Alphen effect induced by the non-local quantum interference*, Physics Letters A, v. 331, nº3-4, 269p.
- KITTEL, Charles. 2006. *Introdução à física do estado sólido*, Charles Kittel; tradução Ronaldo Sérgio Biasi. - Rio de Janeiro: LTC, 572p.
- MARION, Jerry B; THORNTON, Stephen T. 1995. *Classical dynamics of particles and systems*. 4ª.ed., Saunders College, 638p.
- MASATSUGU, S. & TSUKO, S. S. 2006 [online]. *Lecture note on Solid State Physics de Haas-van Alphen effect*. Homepage: http://physics.binghamton.edu/Sei_Suzuki/pdffiles/Note_dHvA.pdf 2006
- REZENDE, Sergio M. 2004. *Materiais e dispositivos eletrônicos*, 2ª Ed., São Paulo: Livraria da Física, 541p.
- ROMÃO, J. C. [online], *Sobre fases em Mecânica Quântica*, Homepage: <http://porthos.ist.utl.pt/~romao/ensino/MQ/ano0910/problemas/BerryPhases.pdf>.
- SMRCKA, L; GONCHARUK, NA. 2009. *Phase of magneto-oscillations in graphite*. Physical Review B, v. 80, nº 07, p. 073403.