

TEOREMA DE KOHN APLICADO AO GRAFENO

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: pathy_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, Teorema de Kohn, Grafeno.

INTRODUÇÃO

Dentre os vários métodos experimentais que foram desenvolvidos para determinação de uma superfície de Fermi (magnetorresistência, efeito peculiar anômalo, ressonância de ciclotron, efeitos geométricos magnetoacústicos e efeito Shubnikow-de Haas), o efeito de Haas-van Alphen se mostrou o mais eficaz. 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 formam no plano perpendicular ao campo (no espaço recíproco), 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 certa periodicidade. O mesmo ocorrendo para a energia total dos elétrons e para o momento magnético. A esta oscilação do momento magnético dá-se o nome de Efeito de Haas-van Alphen [KITTEL, 2006].

Essa oscilação tem sua origem fundamentalmente na quantização dos níveis de Landau, logo sua frequência (ou período) não deve ser alterada pela presença da interação entre elétrons. Dessa forma, surge o Teorema de Kohn que irá garantir exatamente a robustez dessa frequência em sistemas bidimensionais contínuos [KOHN, 1961]. É importante destacar que esse teorema nada diz a respeito da amplitude ou forma da oscilação.

A pesquisa consistiu em investigar o Teorema de Kohn para um gás de elétrons fracamente interagentes, utilizando para isso o artigo do próprio Kohn – *Cyclotron Resonance and de Haas-van Alphen Oscillations of an Interacting Electron Gas, 1961*.

No entanto, para a compreensão do teorema foi de suma importância o conhecimento básico de Teoria de Perturbações. Este conteúdo foi desenvolvido com o auxílio das notas de aula do professor Henrique Fleming. Além disso, fez-se uma revisão dos métodos analíticos semi-clássicos de Onsager e Lifschitz, obtidos em *Lecture note on Solid State Physics de Haas-van Alphen effect*, escrito por Masatsugu Suzuki e Itsuko S. Suzuki.

Já a aplicação do Teorema de Kohn ao sistema cristalino do grafeno e o levantamento do seu espectro de energia se deu com o auxílio do artigo *Quantum oscillations in graphene in the presence of disorder and interactions, 2008*, de P. Goswami, X. Jia e S. Chakravarty.

Alguns livros-texto também foram utilizados, como *Introdução à Física do Estado Sólido* de Charles Kittel e *Introduction to Quantum Mechanics* de David J. Griffiths, para as revisões aqui apresentadas do Efeito de Haas van Alphen e da fase de Berry, respectivamente.

METODOLOGIA

Os estudos foram iniciados com a compreensão de alguns aspectos da mecânica quântica: propriedades matemáticas, evolução temporal de um operador, relações de comutação e operadores comutantes com o hamiltoniano.

Com essa base, foi introduzido o teorema de Kohn para um gás de elétrons fracamente interagentes bidimensional, e, em seguida, a aplicação deste teorema ao grafeno na ausência de defeitos topológicos. Além disso, foi levantado o espectro de energia desse sistema cristalino.

Durante a execução do projeto, utilizaram-se sites de busca, portais de acesso a periódicos internacionais, além de livros-texto oferecidos tanto pelo grupo de pesquisa, quanto pela biblioteca da UEFS. Também foram importantes as reuniões com o orientador e com o grupo para discussão do trabalho e progresso da pesquisa.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O Efeito de Haas-van Alphen está fundamentalmente relacionado à quantização dos níveis de Landau, logo sua frequência não deve ser alterada pela presença da interação elétron-elétron de curto alcance. Com isso, Walter Kohn propõe um teorema que, utilizando a Teoria da Perturbação, garante que o período dHvA permaneça inalterado para um gás de elétrons bi-dimensional fracamente interagente.

Nosso objetivo foi exatamente estudar esse teorema e posteriormente aplicá-lo ao sistema do grafeno. Com isso, mostrou-se que o Teorema de Kohn pode ser aplicado ao grafeno através de um tratamento dos férmions de Dirac, com isso levantando seu espectro de energia.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse resultado torna-se muito interessante, pois mostra que um sistema interagente (mais próximo do sistema real) se comporta semelhante a um sistema onde é desconsiderada a interação entre os elétrons. Lidar com sistemas próximos dos reais é sempre fundamental, já que as aplicações exigem uma teoria que satisfaça os eventos observados.

Aplicar o Teorema de Kohn no sistema cristalino do grafeno surgiu exatamente do fato deste material ser muito promissor e de elevado interesse, principalmente na eletrônica. Logo, conhecer ao máximo suas propriedades, reações a campos diversos e comportamentos em geral, corrobora no desenvolvimento da tecnologia que envolve esse material.

Portanto, o estudo realizado não se tratou de apenas verificar a invariância da frequência dHvA num sistema interagente, mas também de aplicá-lo ao sistema do grafeno, afim de melhor conhecer seu comportamento quando submetido a campo magnético, contribuindo na sua aplicabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHCROFT, N. W.; MERNIN, N. D.. *Solid State Physics*. (Saunders College Publishing: New York), 1976;
- BERRY, M. V., Proceedings of Royal Society of London A, v.392, p. 45, 1984;
- DE JUAN, F., CORTIJO, A. , VOZMEDIANO, M. H. A. , Nuclear Physics B, v. 828, p. 625, (2010);
- EISBERG, Robert Martin; RESNICK, Robert. *Física quântica: átomos; moléculas; sólidos; núcleos e partículas*. 4ª. Ed., Rio de Janeiro: Campus, 1986.
- FLEMING, H., *Teoria das Perturbações*, 2003, disponível em <http://efisica.if.usp.br/moderna/mq/pertubacao/>.
- GOSWAMI, P., JIA X. & CHAKRAVARTY S. *Quantum oscillations in graphene in the presence of disorder and interactions*. Physical Review B 78, 245406, 2008;
- GRIFFITHS, David J. *Introduction to Quantum Mechanics*. 2ªEd. Pearson Prentice Hall, 1995.
- KATSNELSON, MIKHAIL., *Graphene: Carbons in two dimensions*, Materials Today, vol.10, No. 1-2 (2007).
- KITTEL, Charles. *Introdução à física do estado sólido*, Charles Kittel; tradução Ronaldo Sérgio Biasi. - Rio de Janeiro: LTC, 2006;
- KOHN, W. *Cyclotron Resonance de Haas-van Alphen Oscillations of an Interacting Electron Gas*. Physical Review, vol. 123, nº 4, p. 1242, 1961.
- M.-C. Chang & Q. Niu, Physical Review B 53, 7010, 1996.
- MASATSUGU, S. & TSUKO, S. S. *Lecture note on Solid State Physics de Haas-van Alphen effect*.
http://physics.binghamton.edu/Sei_Suzuki/pdffiles/Note_dHvA.pdf