

Título em Português: Introdução à física de sistemas desordenados em matéria condensada

Título em Inglês: introduction to the physics of disordered systems in condensed matter

Autor: Jadyr Henrique Fonte Boa Nunes Pereira

Instituição: Universidade de São Paulo

Unidade: Instituto de Física de São Carlos

Orientador: José Abel Hoyos Neto

Área de Pesquisa /
Física da Matéria Condensada

SubÁrea:

Agência Financiadora: FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

INTRODUÇÃO À FÍSICA DE SISTEMAS DESORDENADOS EM MATÉRIA CONDENSADA

Aluno: Jadyr Henrique Fonte Boa Nunes Pereira

Orientador: José Abel Hoyos Neto

USP - IFSC

jadyr_henrique@usp.br

Objetivos

Este projeto visa estudar os efeitos de inhomogeneidades em sistemas fortemente interagentes. Mais precisamente, o intuito é estudar os fenômenos de localização de Anderson [1-4] e singularidades de Griffiths [5-8].

Como primeiro passo, estudaremos o fenômeno de localização de Anderson em um sistema unidimensional. Este é um efeito de interferência destrutiva (advinda das inhomogeneidades) de uma única partícula que impede o transporte de carga. O próximo passo é estudar os efeitos de desordem em uma transição de fase quântica com o objetivo de quantificar as singularidades de Griffiths na cercanía da transição.

Métodos e Procedimentos

Para estudar localização de Anderson, utilizaremos o modelo de Kronig-Penney (uma partícula num potencial do tipo barreiras retangulares) em uma dimensão espacial com o intuito de verificar como as bandas e gaps de energia são modificadas na presença das inhomogeneidades. Aqui, faz-se necessário o uso de métodos computacionais para diagonalizar exatamente o modelo e calcular quantidades-chaves como transmitância, e comprimento de localização.

Para estudar transições de fase, utilizaremos o modelo de Aubry-André [9], para estudar a transição metal—isolante de Anderson, e o modelo XX de uma cadeia quântica de spins-1/2 interagentes. O primeiro modelo pode ser analisado por métodos análogos ao modelo de Kronig-Penney, e o segundo deve ser mapeado no modelo de tight-binding através da transformação de Wigner-Jordan [10]. A partir disso, métodos de férmiões livres podem ser empregados.

Resultados

Diagonalizando analiticamente o modelo de Kronig-Penney cristalino, verificamos a existência de bandas e gaps de energia onde a resistência elétrica é, respectivamente, nula e infinita.

Introduzindo uma componente aleatória no modelo para emular as inhomogeneidades, verificamos que a resistência diverge exponencialmente como o tamanho do sistema. Muito diferente da lei de Ohm. Esse comportamento acontece para todas as energias, indicando que todos os estados são localizados. Este é o fenômeno da localização de Anderson. Calculamos ainda o comprimento de localização (através do “inverse participation ratio” (IPR)) desses estados e comprovamos esta localização.

Em seguida, estudamos o modelo de Aubry-André que é aperiódico (mas não aleatório). Neste caso, verificamos que o modelo suporta

duas fases: uma em que todos os estados são estendidos, e outra em que todos eles são localizados. Verificamos que a fase de estados estendidas possui bandas e gaps de energia distribuídos de maneira fractal. Por fim, verificamos que a transição de fase é dirigida pela magnitude da aperiodicidade do modelo.

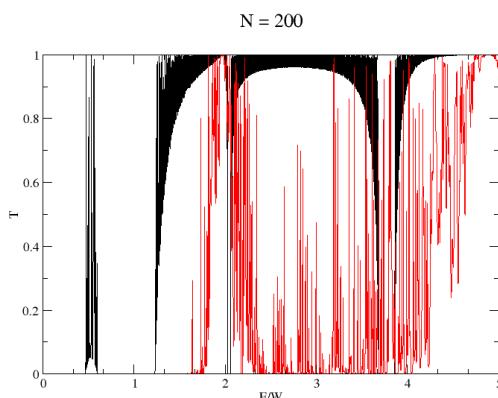


Figura 1: Gráfico da transmitância em função da energia do estado.

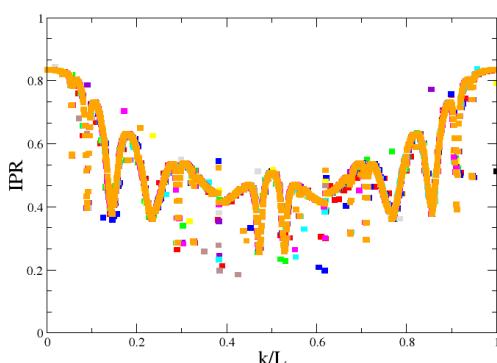


Figura 2: Gráfico do IPR para cada estado do sistema, para diferentes comprimentos.

Conclusões

Utilizando o do modelo Kronig-Penney cristalino, verificamos a existência de bandas de gaps de energia. Este é um conceito importante para o entendimento de diversos metais e isolantes na natureza. No caso inhomogêneo aleatório, verificamos a localização dos estados estendidos evidenciando uma dramática mudança no comportamento da função de onda do elétron. Esse efeito de interferência destrutiva é muito forte em dimensões 1 e 2.

Estudando ainda o modelo de Aubry-André que é inhomogêneo mas não-aleatório, verificamos uma transição de fase metal—isolante de Anderson ao se aumentar a magnitude da aperiodicidade. Além disso, verificamos o espectro fractal das bandas de energia. Este é um aspecto comum em sistemas quasicristalinos.

O estudo sobre o modelo magnético de spins-1/2 ainda está em andamento e suas conclusões serão apresentadas em outra ocasião oportunamente.

Agradecimentos

Agradecemos o apoio financeiro da FAPESP através do projeto nr. 2023/13457-0.

Referências

- [1] P. W. Anderson, Phys. Rev. 109, 1492 (1958).
- [2] E. Abrahams, P. W. Anderson, D. C. Licciardello, and T. V. Ramakrishnan, Phys. Rev. Lett. 42, 673 (1979).
- [3] P. W. Anderson, D. J. Thouless, E. Abrahams, and D. S. Fisher, Phys. Rev. B22, 3519 (1980).
- [4] E. Abrahams, ed., 50 Years of Anderson Localization (World Scientific, Singapore, 2010).
- [5] E. Miranda and V. Dobrosavljević, Rep. Prog. Phys. 68, 2337 (2005).
- [6] T. Vojta, J. Phys. A: Math. Gen. 39, R143 (2006).

- [7] M. J. Thill and D. A. Huse, Physica A 214, 321 (1995).
- [8] T. Vojta and J. A. Hoyos, Phys. Rev. Lett. 112, 075702 (2014).
- [9] Domínguez-Castro, Gustavo & Paredes, Rosario. (2018). The Aubry-André model as the hobbyhorse for understanding localization phenomenon.
- [10] E. Lieb, T. Schultz, and D. Mattis, Ann. Phys. 16, 407 (1961).

INTRODUCTION TO THE PHYSICS OF DISORDERED SYSTEMS IN CONDENSED MATTER

Student: Jadyr Henrique Fonte Boa Nunes Pereira

Supervisor: José Abel Hoyos Neto

USP - IFSC

jadyr_henrique@usp.br

Objectives

This project aims to study the effects of inhomogeneities in strongly interacting systems. More specifically, the goal is to investigate the phenomena of Anderson localization [1-4] and Griffiths singularities [5-8]. As a first step, we will study the phenomenon of Anderson localization in a one-dimensional system. This is a destructive interference effect (arising from inhomogeneities) of a single particle that prevents charge transport. The next step is to study the effects of disorder in a quantum phase transition to quantify the Griffiths singularities near the transition.

Materials and Methods

To study Anderson localization, we will use the Kronig-Penney model (a particle in a potential of rectangular barriers) in one spatial dimension to examine how energy bands and gaps are modified in the presence of inhomogeneities. Here, it is necessary to use computational methods to exactly diagonalize the model and calculate key quantities such as transmittance and localization length. To study phase transitions, we will use the Aubry-André model [9] to investigate the Anderson metal-insulator transition and the XX model of a quantum chain of interacting spin-1/2 particles. The first model can be analyzed using methods analogous to the Kronig-Penney

model, while the second should be mapped to the tight-binding model using the Jordan-Wigner transformation [10]. From this, free fermion methods can be employed.

Results

By analytically diagonalizing the crystalline Kronig-Penney model, we verify the existence of energy bands and gaps where the electrical resistance is, respectively, zero and infinite. By introducing a random component into the model to emulate inhomogeneities, we observe that the resistance diverges exponentially with the system size, which is very different from Ohm's law. This behavior occurs for all energies, indicating that all states are localized. This is the phenomenon of Anderson localization. We also calculate the localization length (using the "inverse participation ratio" (IPR)) of these states and confirm this localization.

Next, we study the Aubry-André model, which is aperiodic (but not random). In this case, we find that the model supports two phases: one where all states are extended, and another where all states are localized. We observe that the phase with extended states has energy bands and gaps distributed in a fractal manner. Finally, we verify that the phase transition is driven by the magnitude of the model's aperiodicity.

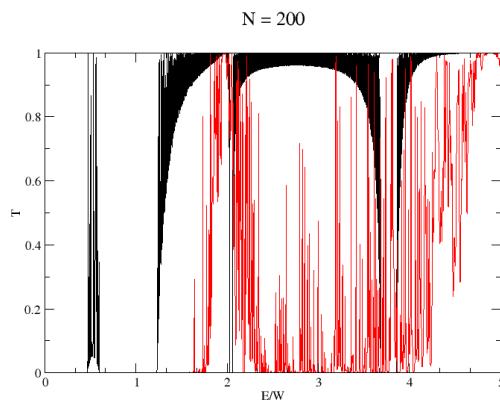


Figure 1: Graph of transmittance as a function of state energy.

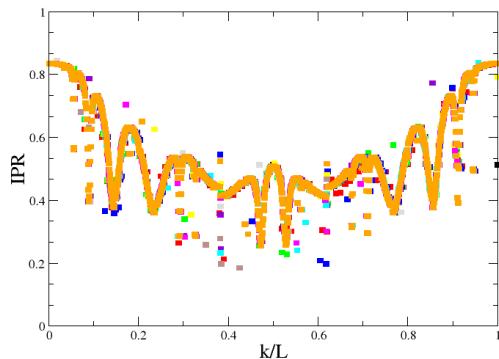


Figure 2: Graph of the IPR for each state of the system, for different lengths.

Conclusions

Using the crystalline Kronig-Penney model, we observe the existence of energy bands and gaps. This is an important concept for understanding various metals and insulators in nature. In the case of a random

inhomogeneous system, we observe the localization of extended states, highlighting a dramatic change in the behavior of the electron's wave function. This destructive interference effect is very strong in 1D and 2D. In studying the Aubry-André model, which is inhomogeneous but not random, we observe an Anderson metal-insulator phase transition as the magnitude of the aperiodicity increases. Additionally, we note the fractal spectrum of energy bands, a common feature in quasicrystalline systems. The study of the magnetic model of spin-1/2 particles is still ongoing, and its conclusions will be presented at another appropriate time.

Acknowledgements

We thank FAPESP for their financial support through project no. 2023/13457-0.

References

- [1] P. W. Anderson, Phys. Rev. 109, 1492 (1958).
- [2] E. Abrahams, P. W. Anderson, D. C. Licciardello, and T. V. Ramakrishnan, Phys. Rev. Lett. 42, 673 (1979).
- [3] P. W. Anderson, D. J. Thouless, E. Abrahams, and D. S. Fisher, Phys. Rev. B22, 3519 (1980).
- [4] E. Abrahams, ed., 50 Years of Anderson Localization (World Scientific, Singapore, 2010).
- [5] E. Miranda and V. Dobrosavljević, Rep. Prog. Phys. 68, 2337 (2005).
- [6] T. Vojta, J. Phys. A: Math. Gen. 39, R143 (2006).
- [7] M. J. Thill and D. A. Huse, Physica A 214, 321 (1995).
- [8] T. Vojta and J. A. Hoyos, Phys. Rev. Lett. 112, 075702 (2014).
- [9] Domínguez-Castro, Gustavo & Paredes, Rosario. (2018). The Aubry-André model as the hobbyhorse for understanding localization phenomenon.
- [10] E. Lieb, T. Schultz, and D. Mattis, Ann. Phys. 16, 407 (1961).