

Autorizada pelo



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

Decreto Federal nº 77.496 de 27/04/76

Recredenciamento pelo Decreto nº 17.228 de 25/11/2016

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

COORDENAÇÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

XXIX SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UEFS SEMANA NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA - 2025

ESTUDO DE ACOPLAMENTO ENTRE EXCITAÇÕES ELEMENTARES EM SISTEMAS PLASMÔNICOS

Ananda Guedes Santos¹ ; Antonio Vieira de Andrade Neto²

1. Ananda Guedes Santos, PIBIC/FAPESB, FÍSICA, e-mail: anandaguedes2002@hotmail.com

2. Antonio Vieira de Andrade Neto, DEPARTAMENTO DE FÍSICA, e-mail: aneto@uefs.br

PALAVRAS-CHAVE: excitações elementares; fônons; quasipartículas; sistemas plasmônicos.

INTRODUÇÃO

Sistemas compostos por um grande número de partículas interagindo entre si, conhecidos como sistemas de muitos corpos, representam um dos maiores desafios da Física da Matéria Condensada. A resolução das equações resultantes, a partir da equação de Schrödinger, é na prática, impossível. Essa situação levou a necessidade de se desenvolver novas abordagens teóricas desses conjuntos e conceitos emergentes como quasipartículas e excitações elementares são fundamentais para compreender os fenômenos coletivos que emergem desses sistemas. As quasipartículas são entidades efetivas que simplificam a descrição de sistemas complexos. Entre as mais importantes estão os fônons, que representam as vibrações coletivas da rede cristalina, e os plásmos, que correspondem às oscilações coletivas dos elétrons de condução em metais. Estes oscilam com uma frequência natural dada por

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\epsilon_0 m}}$$

onde n é a densidade de elétrons livres, e é a carga do elétron, m sua massa e ϵ_0 a permissividade do vácuo. Essa frequência, denominada frequência de plasma, caracteriza a resposta coletiva do gás eletrônico ao ser deslocado do equilíbrio. Quando essas oscilações são quantizadas, cada quantum de energia associado ao modo coletivo chamado plásmo possui energia dada por

$$E = \hbar\omega_p$$

estabelecendo um elo entre a descrição clássica e a quântica do fenômeno.

O acoplamento entre diferentes excitações elementares, como fônons, plásmos e fótons, modifica a resposta do sistema e pode originar modos híbridos com propriedades emergentes. Compreender qualitativamente esses fenômenos é fundamental para

avançar na modelagem teórica e no desenvolvimento de aplicações tecnológicas em áreas como nanotecnologia, sensoriamento óptico e fotônica.

MATERIAL E MÉTODOS OU METODOLOGIA (ou equivalente)

A pesquisa foi realizada seguindo uma abordagem teórica e qualitativa. Iniciamos os trabalhos com uma revisão bibliográfica, fazendo um levantamento a respeito de livros e artigos sobre quasipartículas, equações de Maxwell, ondas eletromagnéticas, sistemas plasmônicos e mecanismos de acoplamento. Em seguida o estudo foi conduzido de forma conceitual, analisando o papel fundamental dos fônons e plásmons em materiais sólidos e sua influência direta nas propriedades térmicas, eletrônicas e ópticas. Também foi realizada uma investigação qualitativa dos mecanismos de acoplamento entre diferentes excitações elementares, utilizando a analogia com sistemas clássicos de osciladores acoplados para facilitar a compreensão dos modos coletivos resultantes dessas interações. Por fim, foram discutidas as aplicações tecnológicas desses fenômenos, destacando seu impacto no desenvolvimento de sensores plasmônicos, dispositivos ópticos e materiais avançados.

RESULTADOS E/OU DISCUSSÃO (ou Análise e discussão dos resultados)

A análise teórica consolidou a compreensão dos conceitos de quasipartículas e excitações elementares como ferramentas indispensáveis para a descrição de sistemas de muitos corpos. Os fônons foram interpretados como quantizações das vibrações da rede cristalina, e os plásmons como oscilações coletivas dos elétrons que podem ser excitadas em metais e semicondutores dopados.

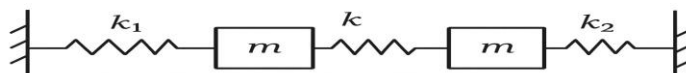
Foi possível distinguir dois tipos principais de plásmons:

Plásmons de volume, que são modos longitudinais localizados no interior do material e não acopláveis diretamente a ondas eletromagnéticas.

Plásmons de superfície, confinados na interface metal-dielétrico e capazes de interagir com luz, desempenhando papel fundamental em aplicações nanofotônicas.

O fenômeno de acoplamento foi estudado qualitativamente por meio da analogia com osciladores acoplados. Consideramos dois corpos de massas m_1 e m_2 acoplados por molas com constantes elásticas k_1 , k e k_2 (Figura 1). As equações de movimento para as duas partículas são

Figura 1 - Osciladores acoplados



$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = -(k + k_1)x_1 + kx_2$$

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -(k + k_2)x_2 + kx_1$$

que representam duas equações diferenciais lineares acopladas já que a equação para x_1 depende de x_2 e vice-versa. Por simplicidade matemática, consideramos $m_1 = m_2 = m$ e $k_1 = k_2 = k$. Para essa situação, se introduzimos as coordenadas,

$$q_1 = x_1 + x_2$$

$$q_2 = x_1 - x_2$$

as equações de movimento tornam-se desacopladas.

$$\frac{d^2 q_1}{dt^2} + \omega_0^2 q_1 = 0$$

$$\frac{d^2 q_2}{dt^2} + 3\omega_0^2 q_2 = 0$$

As coordenadas q_1 e q_2 são chamadas coordenadas normais e oscilam harmonicamente com frequências ω_0 e $3\omega_0$, respectivamente, que são as frequências dos **modos normais de vibração**. Estes resultados para dois osciladores acoplados podem ser generalizados para um número qualquer de osciladores. Para um sistema com N graus de liberdade, teremos N modos normais de vibração, cada um correspondendo a uma frequência comum a todo o sistema, portanto, um movimento coletivo. As vibrações dos íons em uma rede cristalina podem então ser descritas em termo dos modos normais de vibração. A quantização dessas vibrações dá origem ao conceito de fônon. De modo semelhante, as oscilações coletivas de um gás de elétrons podem ser quantizadas, via o conceito de plásmon.

O acoplamento entre essas diferentes excitações, dá origem aos modos híbridos com frequências e propriedades alteradas. Esses efeitos são essenciais para aplicações modernas, permitindo o controle de fenômenos ópticos e eletrônicos em nanoescala e o desenvolvimento de tecnologias como sensores ultra-sensíveis e dispositivos fotônicos avançados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS (ou Conclusão)

O estudo qualitativo dos acoplamentos entre excitações elementares em sistemas plasmônicos possibilitou uma boa compreensão dos fenômenos físicos fundamentais da matéria condensada. A investigação de conceitos fundamentais, como quasipartículas e excitações elementares, permitiu uma boa aproximação com sua base teórica. O estudo de sistemas clássicos reforçou a compreensão dos mecanismos de acoplamento e da

formação de modos híbridos, elementos essenciais para aplicações tecnológicas em nanofotônica, ciência dos materiais e óptica de síncrotron. O conhecimento adquirido servirá de base para estudos futuros, nos quais a abordagens matemáticas mais rigorosas e investigações experimentais poderão aprofundar a compreensão desses fenômenos e ampliar suas possibilidades de aplicação.

REFERÊNCIAS

S.A. Maier. *Plasmonics: Fundamentals and Applications* . Springer, 2007.

M. Dragoman, D. Dragoman. *Plasmonics: Applications to Nanoscale Terahertz and Optical Devices* . Progress in Quantum Electronics, 32, 1 (2008).

A. V. Andrade-Neto, A. Ribeiro Neto, A. Jorio. *Relação de Dispersão para os Plásmo-Polaritons de Superfície em uma Interface Plana Metal/Dielétrico* . Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 39, no. 3, e3310 (2017).

A. V. Andrade-Neto, M. S. Brandão. *Maxwell Equations in Fourier Space and Coupling Between Elementary Excitations in Solids*. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 45, e202300764 (2023).

A. V. Andrade-Neto. *Dielectric Function for Free Electron Gas: Comparison Between Drude and Lindhard Models*. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 39, no. 2, e2304 (2017).

GRIFFITHS, D. J. *Introdução à Eletrodinâmica* . 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2018.