

Universidade de São Paulo (USP)
Instituto de Física de São Carlos (IFSC)
Prof. Dr. Philippe Wilhelm Courteille

Modelo de Drude

Willer Frank de Sousa Oliveira

Conteúdos

- Introdução;
- Teoria de Drude;
- Efeito Hall;
- Limitações do modelo de Drude;
- Conclusão.

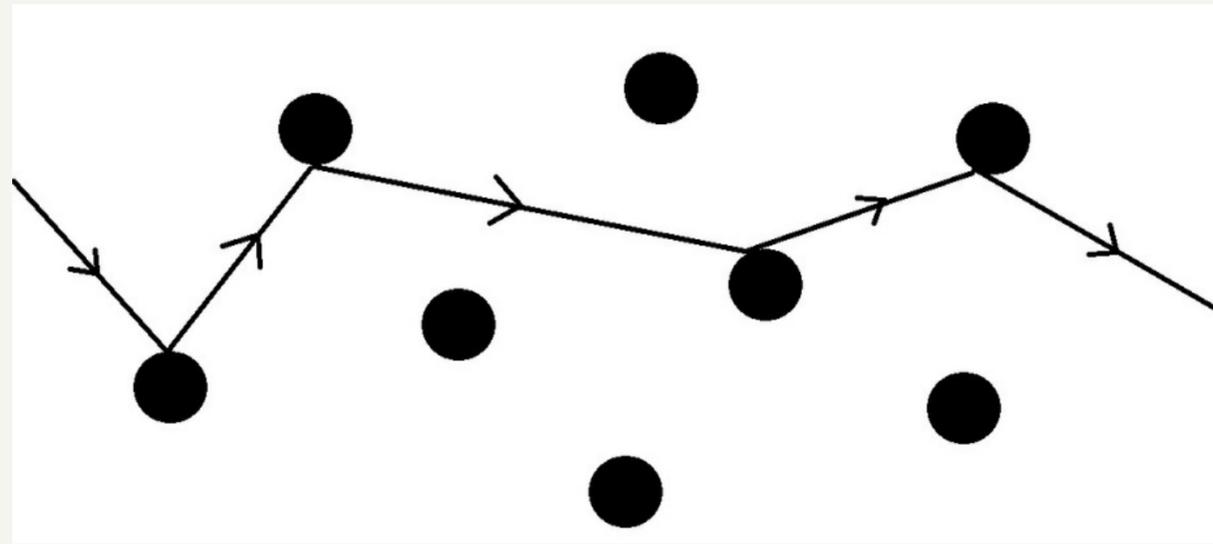
Introdução



wiki: Paul Drude (1863 - 1906)

Paul Karl Ludwig Drude, um físico alemão do início do século XX. Seu modelo de elétrons livres forneceu uma explicação clássica para a condutividade metálica, considerando elétrons como partículas livres em movimento aleatório.

Teoria de Drude



Ashcroft, N.W. and Mermin, N.D.

- Elétrons Livres
- Colisões com Íons
- Campo Elétrico Externo
- Absorção Óptica
- Ausência de Efeitos Quânticos

$$\tau = \frac{m}{\gamma}$$

tempo livre médio entre as colisões iônicas

Teoria de Drude

$$m \frac{dv}{dt} + m\Gamma_d v = -eE$$

A equação de movimento

$$-eE = -eE_0 e^{i\omega t}$$

$$v = v_0 e^{i\omega t} = -\frac{e}{m} \frac{E_0}{i\omega + \Gamma_d} e^{i\omega t}$$

$$j_c = -nev = \frac{ne^2}{m(\Gamma_d + i\omega)} E$$

$$j_c = \frac{\partial D}{\partial t} = i\omega \epsilon_0 E$$

Teoria de Drude

$$j(\omega) = j_c(\omega) + j_d(\omega) = \left[\frac{ne^2}{m(\Gamma_d + i\omega)} + i\omega\epsilon_0 \right] E$$

$$j(\omega) = \frac{\partial D_{tot}}{\partial t} = i\omega\epsilon E$$

$$\left[\frac{ne^2}{m(\Gamma_d + i\omega)} + i\omega\epsilon_0 \right] E = i\omega\epsilon(\omega) E$$

Teoria de Drude

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{i\omega\Gamma_d - \omega^2}$$

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

frequência de plasma

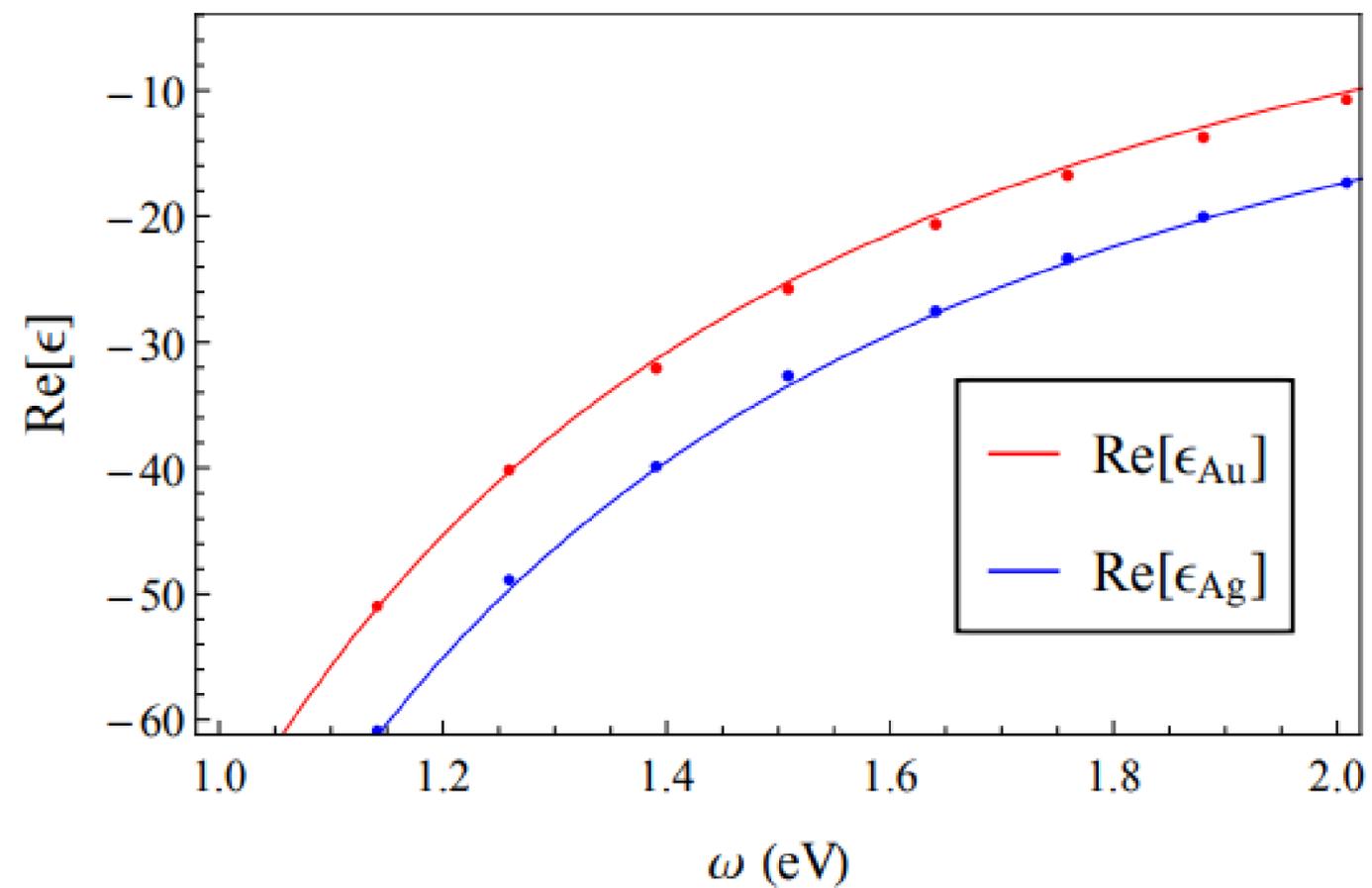
$$\epsilon'(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\Gamma_d^2 - \omega^2}$$

$$\epsilon''(\omega) = \frac{\omega_p^2\Gamma_d}{\omega(\Gamma_d^2 - \omega^2)}$$

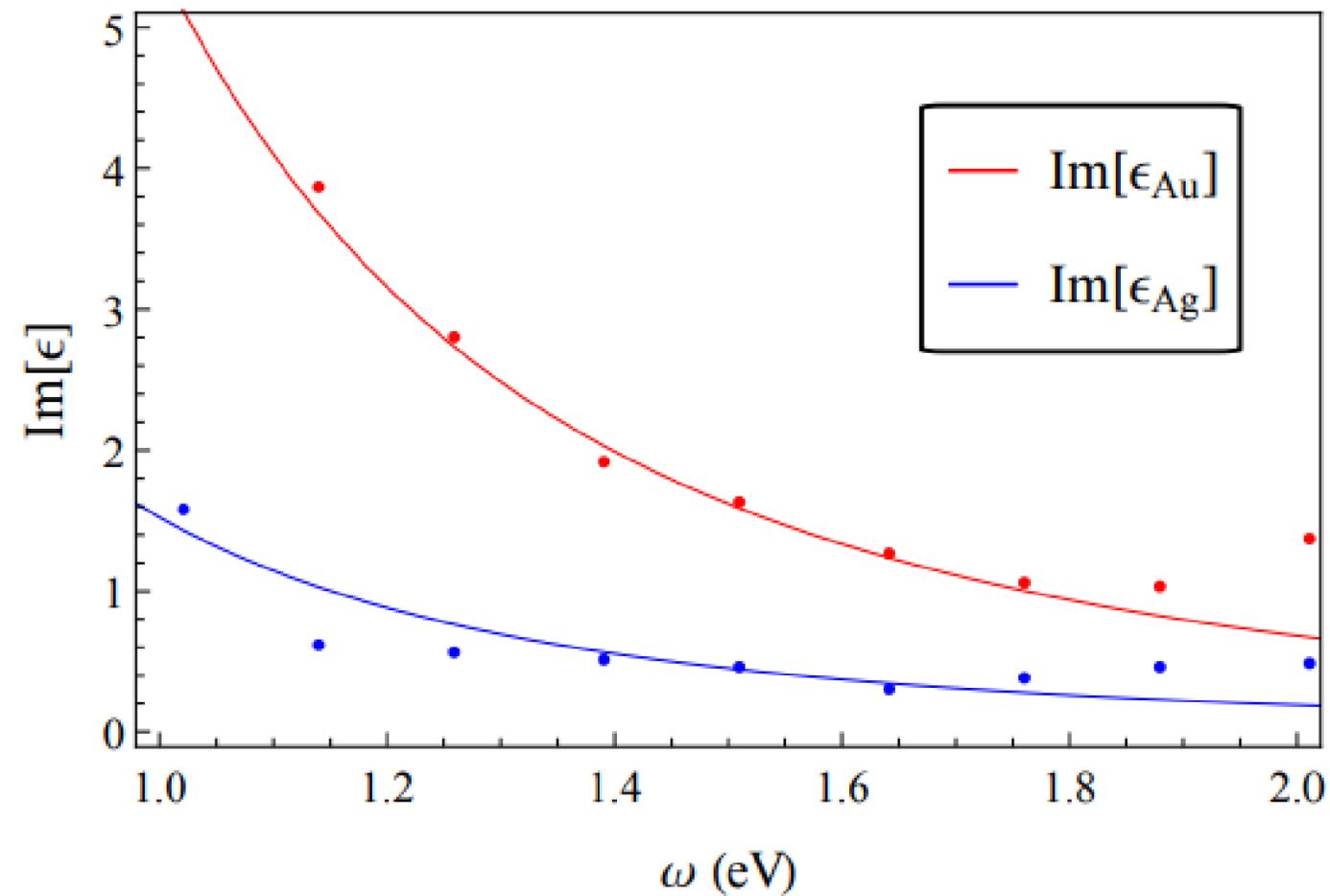
Teoria de Drude

Quando $\omega < \omega_p$ e Γ_d é pequeno, a parte real ϵ' é negativa. Isso implica que nenhum campo elétrico consegue penetrar no metal, tornando-o completamente refletor. Quando $\omega = \omega_p$, a parte real ϵ'' é zero. Isso significa que os elétrons oscilam em fase com o campo ao longo da distância de propagação no metal. À medida que ω aumenta significativamente em relação a ω_p , a parte imaginária (absortiva) ϵ'' desaparece em altas frequências.

Teoria de Drude



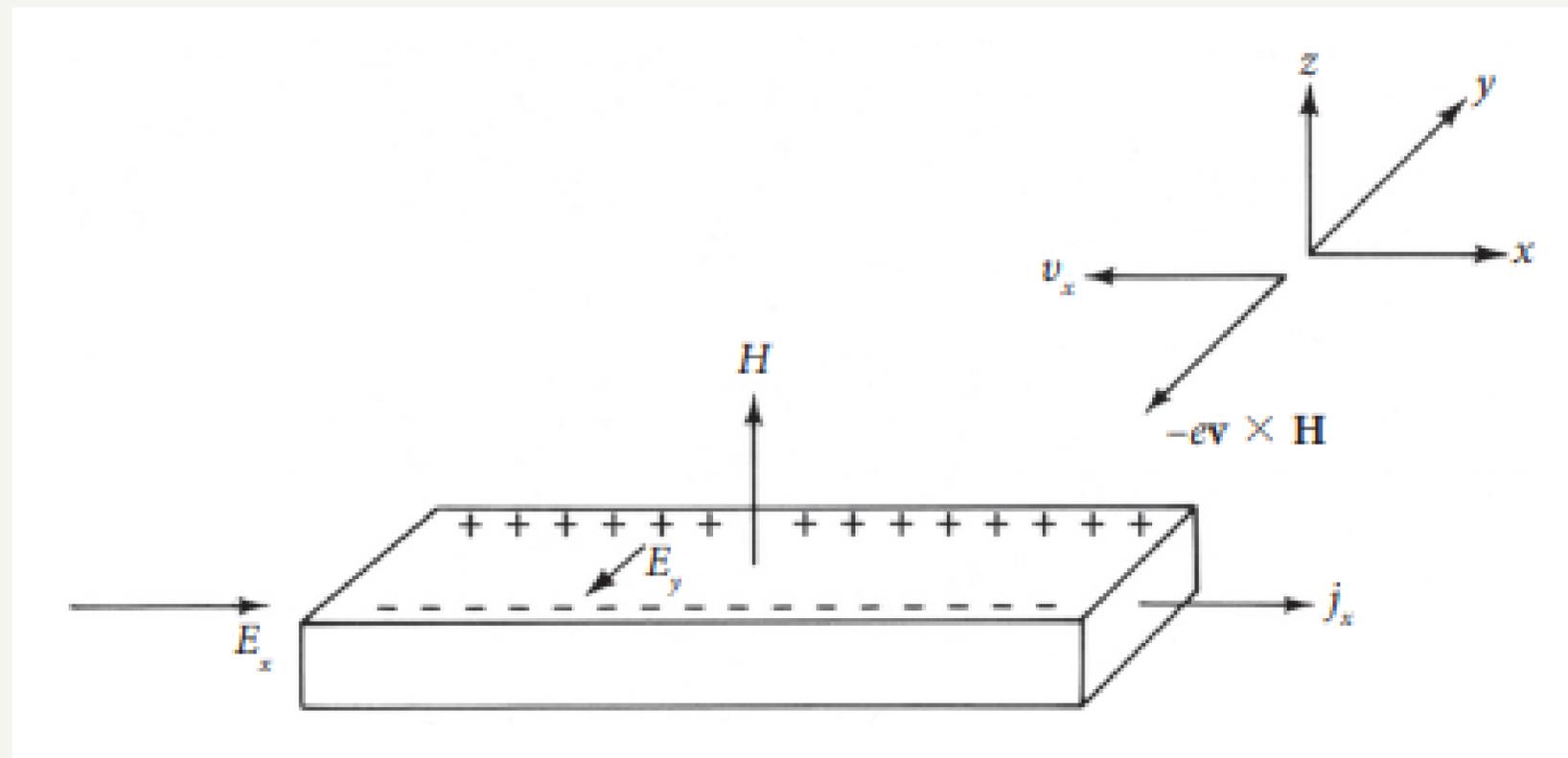
(a) Parte Real de ϵ_{metal}



(b) Parte Imaginária de ϵ_{metal}

Efeito Hall

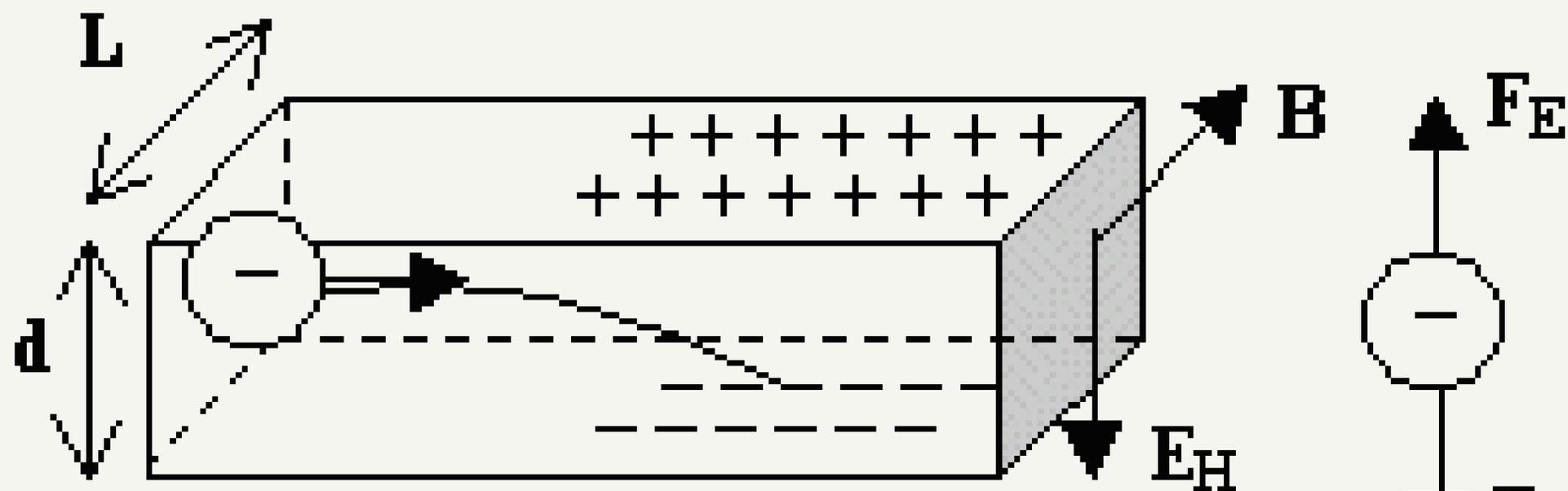
Um fenômeno importante que surge quando uma corrente elétrica flui através de um condutor sob a influência de um campo magnético externo.



Ashcroft, N.W. and Mermin, N.D.

$$F_H = -ev_a \times H$$

Efeito Hall



$$V_H = \frac{-IB}{nqd}$$

Potencial de Hall

$$R_H = \frac{\mathbf{E}_y}{\mathbf{Bj}_x} = \frac{dV_H}{IB} = \frac{-1}{nq}$$

Coeficiente de Hall

Limitações do modelo de Drude

Embora o modelo de Drude seja valioso em muitos contextos, ele possui limitações significativas.

- O modelo não consegue explicar a disparidade entre as capacidades caloríficas dos metais em comparação com a dos materiais isolantes.
- O modelo de Drude também falha em explicar a existência de portadores de carga aparentemente positivos como demonstra o efeito Hall.

Modelo Drude-Lorentz

O modelo foi estendido em 1905 por Hendrik Antoon Lorentz (e, portanto, também é conhecido como o modelo Drude-Lorentz) Para dar a relação entre a condutividade térmica e a condutividade elétrica dos metais, e é um modelo clássico. Mais tarde, foi complementado com os resultados da teoria quântica em 1933 por Arnold Sommerfeld e Hans Bethe, levando ao modelo Drude-Sommerfeld.

Modelo Drude-Lorentz

A equação de movimento para um elétron clássico harmonicamente vinculado interagindo com um campo elétrico é dada pela equação de Drude-Lorentz, onde ω é a frequência natural do oscilador e γ é a constante de amortecimento.

$$m(\ddot{r} + \gamma\dot{r} + \omega_0^2 r) = -eE(r, t)$$

Conclusão

Em síntese, embora o modelo de Drude tenha estabelecido um alicerce para a compreensão preliminar da condutividade metálica, a complexidade dos materiais demanda abordagens mais avançadas. Apesar de suas limitações em termos de precisão quantitativa, o modelo demonstra uma descrição qualitativa consistente e valiosa.

Obrigado!

Referências

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. Física III: eletromagnetismo. São Paulo: Person Education do Brasil, 2009.

WIKIPEDIA. Paul Drude. 2023. \url{https://pt.wikipedia.org/wiki/Paul_Drude}, Acessado em: 20/11/2023.

ASHCROFT, N. W.; MERMIN, N. D. Solid state physics. [S.l.]: World Book Publishing Company, 1976.

PÉREZ, C. A. S. O modelo do elétron livre de drude completa 100 anos. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 17, n. 3, p. 348–359, 2000.

OLIVEIRA, N. A. d. Eletromagnetismo: teoria e aplicações. [S.l.]: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2019.

WALKER, J.; RESNICK, R.; HALLIDAY, D. Fundamentos de Física 3—Eletromagnetismo. [S.l.: s.n.], 2009.

JOHNSON, P.B.;CHRISTY, R. W. Optical constants of the noble metals. Physical Review B. v. 6, n. 12, p. 4370-4379, Dec. 1972.