Plasmônica em nanoestruturas (quase-)2D

Yuri Muniz

Plasmônica

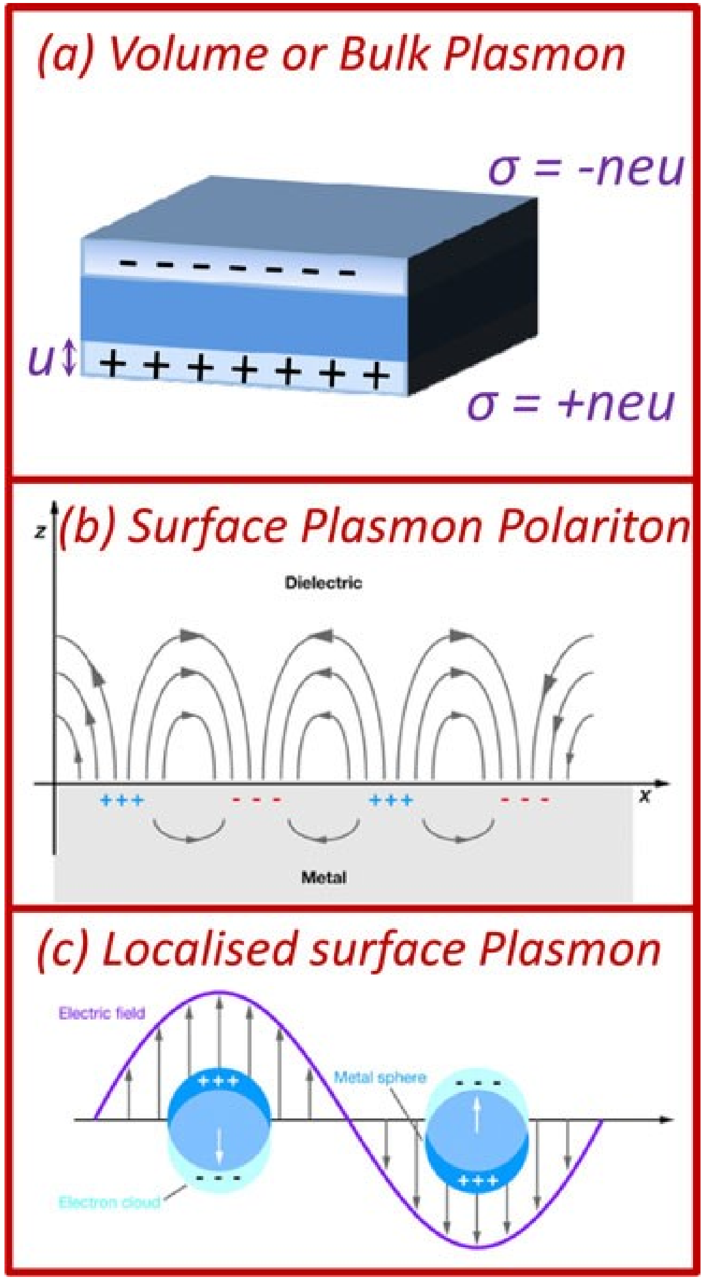
- O que é um plasmon?

Plasmônica

- O que é um plasmon?

PLASMÔNICA

- O que é um plasmon?



Plasmônica

- O que é plasmônica?

"You just have Maxwell's equations, some material properties and some boundary conditions, all classical stuff - what's new about that?"

Prefácio do livro *Plasmonics: fundamentals and applications*.

PLASMÔNICA

- O que é plasmônica?

"You just have Maxwell's equations, some material properties and some boundary conditions, all classical stuff - what's new about that?"

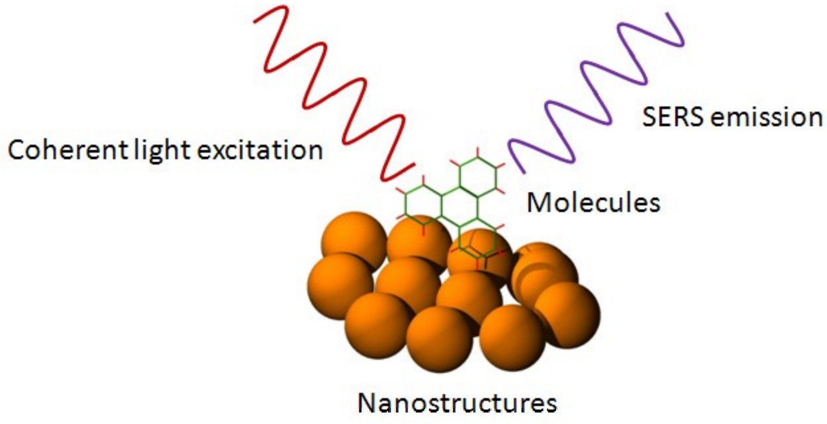
Prefácio do livro *Plasmonics: fundamentals and applications*.

Física!

- Confinamento da luz em volumes menores que seu comprimento de onda (Para além do limite de difração!)
- Extremo aumento da intensidade do campo (Terreno fértil para o estudo de física de superfícies e ótica não-linear!)

Plasmônica – Algumas __possíveis__ aplicações

- *Surface-Enhanced Raman Scattering* (SERS)

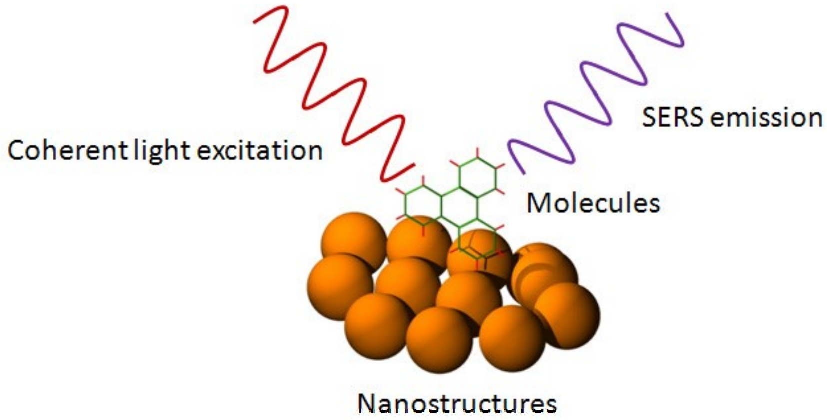


•Espectroscopia;
•*(Bio)sensing;*
•Física forense(?);
•Tratamento de câncer(?).

Phys. Chem. Chem. Phys., 2011, **13, 11551–11567**

Plasmônica – Algumas **possíveis** aplicações

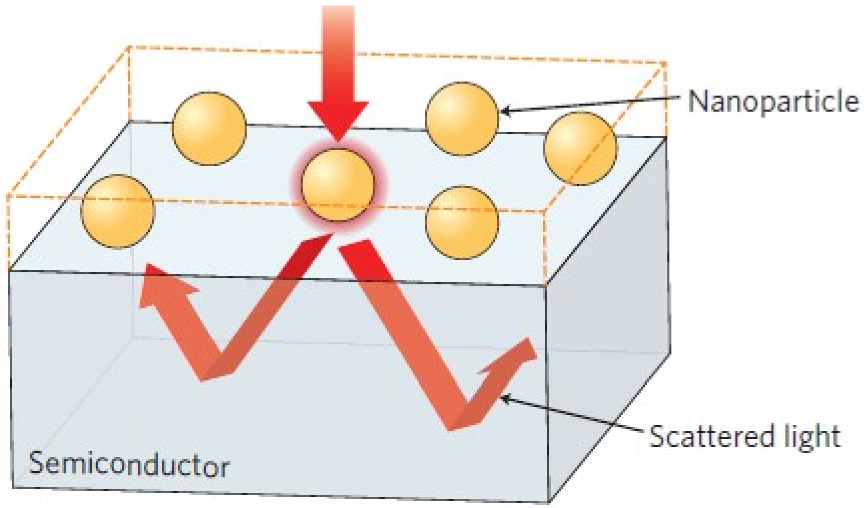
- *Surface-Enhanced Raman Scattering* (SERS)



•Espectroscopia;
•*(Bio)sensing;*
•Física forense(?);
•Tratamento de câncer(?).

Phys. Chem. Chem. Phys., 2011, **13, 11551–11567**

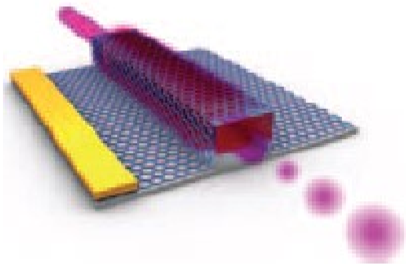
- Células solares plasmônicas

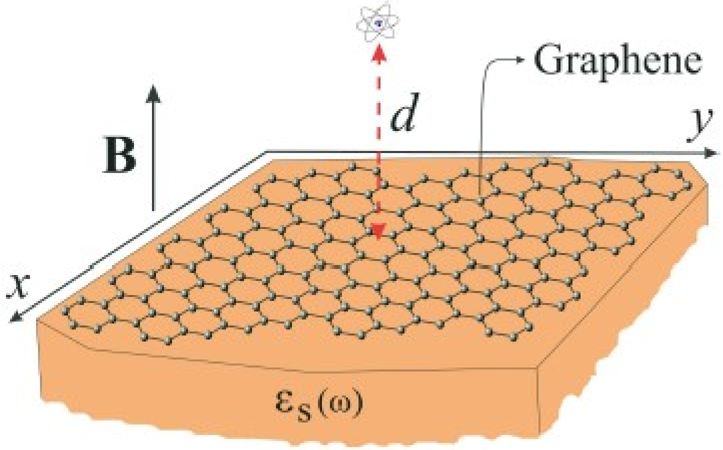


Nature photonics**, 6**, 130–132(2012)

PLASMÔNICA EM SISTEMAS 2D - GRAFENO

- Propriedades plasmônicas ajustáveis

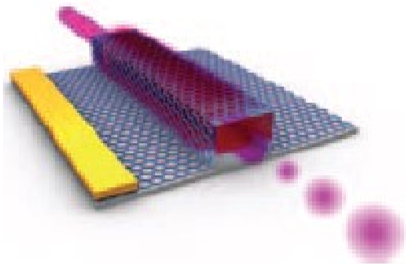


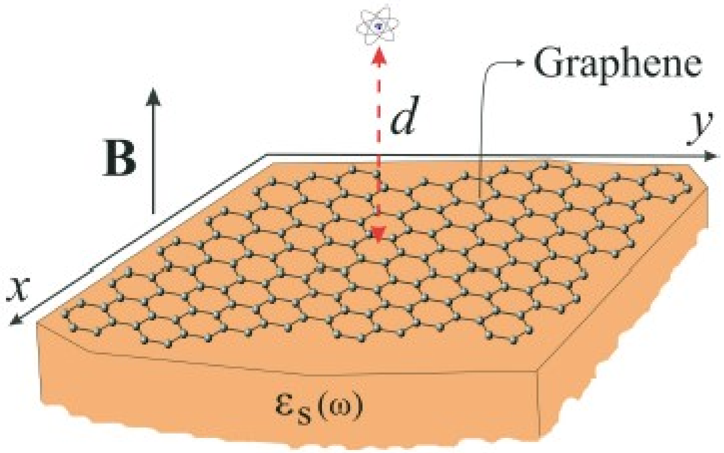


- Nature photonics, **6**, 749–758(2012)
- Phys. Rev. B **92**, 205415 (2015)
- Phys. Rev. A **90** 052511(2014)

PLASMÔNICA EM SISTEMAS 2D - GRAFENO

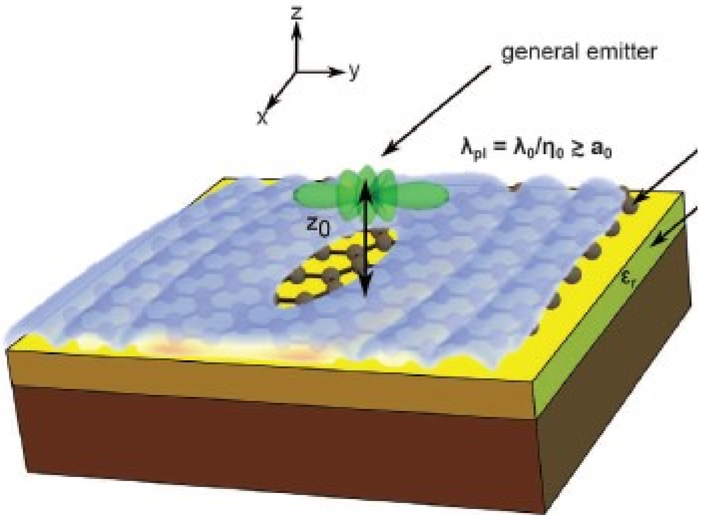
- Propriedades plasmônicas ajustáveis





•Nature photonics**,** **6**, 749–758(2012)
•Phys. Rev. B **92**, 205415 (2015)
•Phys. Rev. A **90** 052511(2014)

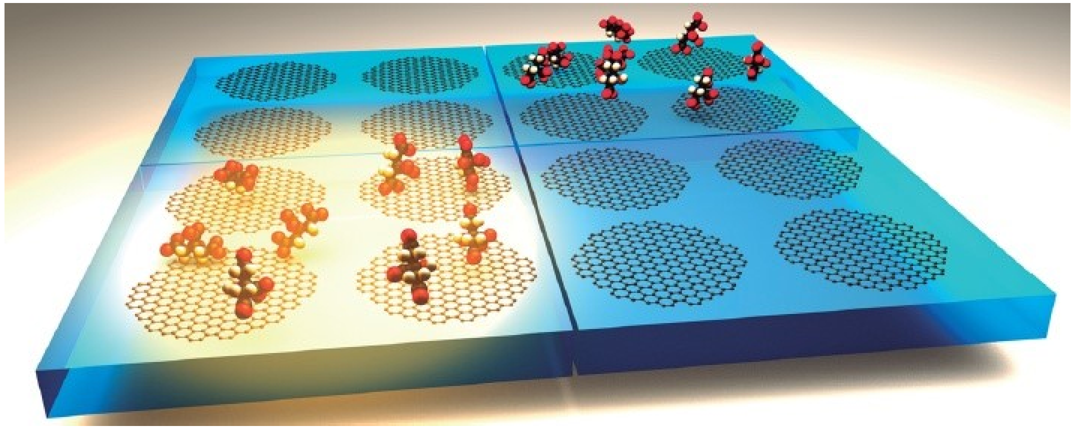
- Processos em EDQ muito fracos podem ser alcançados



Science 2016**,** **353**, 6296, 263-269

Plasmônica em sistemas 2D - grafeno

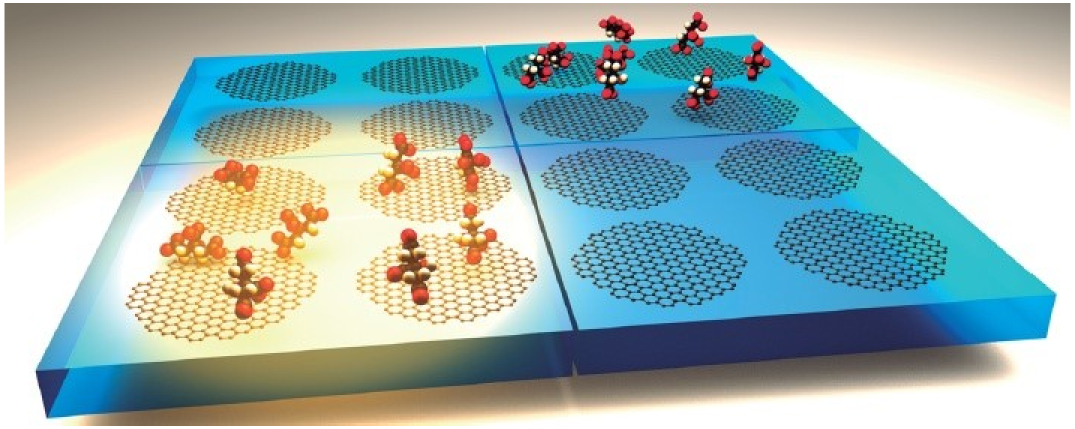
- Aumento e controle da interação radiação-matéria



•ACS Photonics 2017, 4, 1831−1838
•*ACS Photonics* 2018, 5, 8, 3282-3290

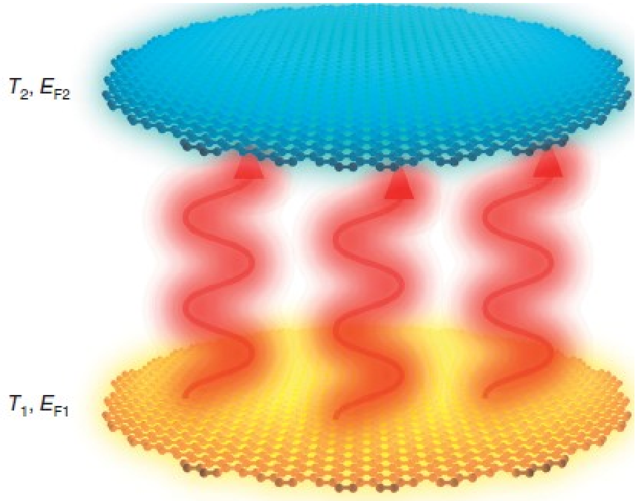
PLASMÔNICA EM SISTEMAS 2D - GRAFENO

- Aumento e controle da interação radiação-matéria



•ACS Photonics 2017, 4, 1831−1838
•*ACS Photonics* 2018, 5, 8, 3282-3290

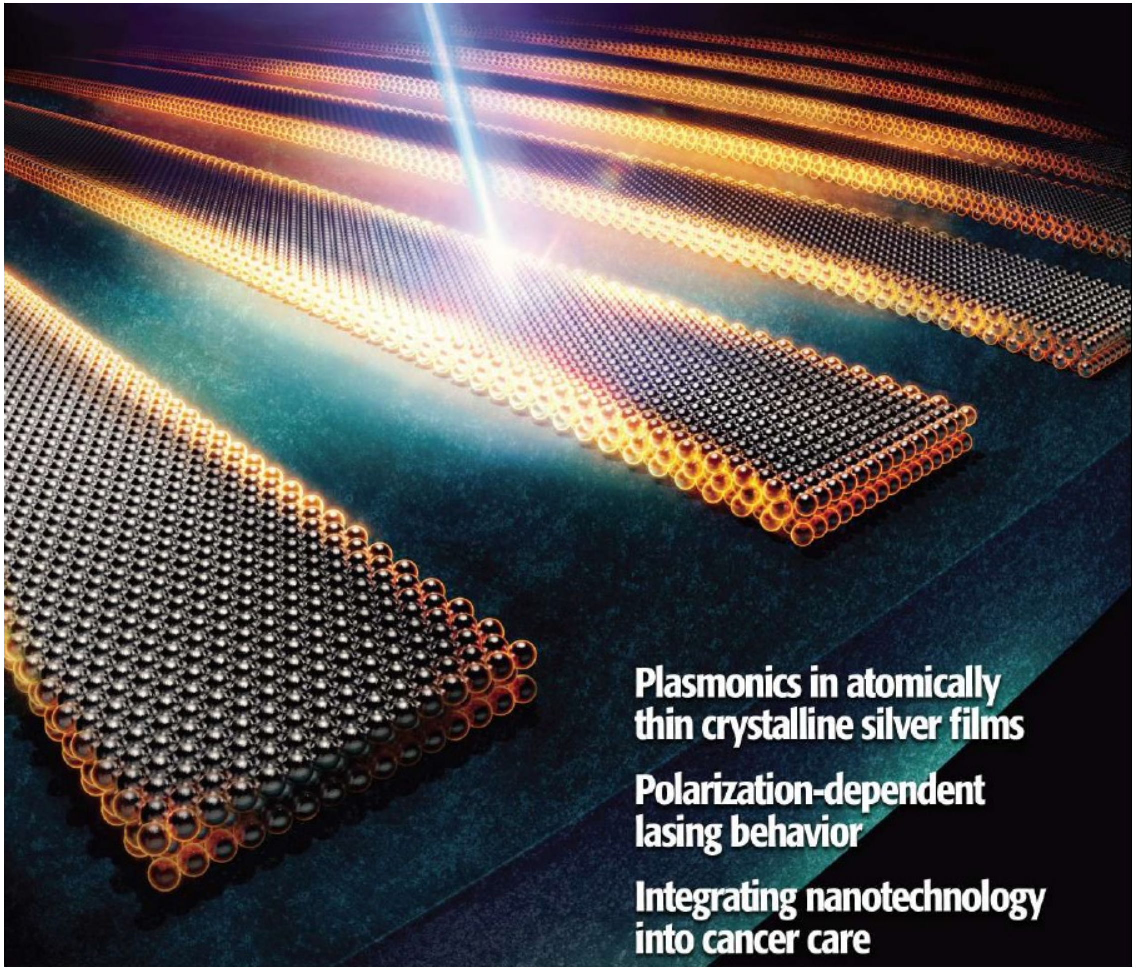
- Transferência de calor por radiação



Nature Communications**,** **8**, 2 (2017)

Plasmônica em sistemas 2D – metais nobres

- Plasmons em uma variedade maior de frequências;
- Regime de validade da descrição clássica;
- O que há de diferente em relação ao grafeno?



- ACS NANO, **13**, 7 (2019)
- Nature Photonics, **8**, 328-333 (2019)

Objetivos da apresentação

- Revisar plasmons (volumétricos) em metais;
- Entender algumas características de plasmons de superfície;
- Entender um pouco sobre plasmons em nanopartículas;
- **Objetivo final:** aprender uma descrição analítica da resposta plasmônica de nanoestruturas 2D.
- **Requisitos:** ~~Física 3~~ Eletromagnetismo 2

Plasmons volumétricos

- Modelo de Drude para metais: $m\ddot{\mathbf{x}} + m\gamma\dot{\mathbf{x}} = -e\mathbf{E}$

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}. \qquad \omega_p^2 = \frac{ne^2}{\varepsilon_0 m}$$

Stefan Maier, *Plasmonics: fundamentals and applications.*

PLASMONS VOLUMÉTRICOS

- Modelo de Drude para metais: $m\ddot{\mathbf{x}} + m\gamma\dot{\mathbf{x}} = -e\mathbf{E}$

$$\Rightarrow \quad \varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}. \qquad \omega_p^2 = \frac{ne^2}{\varepsilon_0 m}$$

- Relação de dispersão para modos TE: $K^2 = \varepsilon(\mathbf{K}, \omega)\frac{\omega^2}{c^2}.$

Stefan Maier, *Plasmonics: fundamentals and applications.*

Plasmons volumétricos

- Modelo de Drude para metais: $m\ddot{\mathbf{x}} + m\gamma\dot{\mathbf{x}} = -e\mathbf{E}$

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}. \qquad \omega_p^2 = \frac{ne^2}{\varepsilon_0 m}$$

- Relação de dispersão para modos TE: $K^2 = \varepsilon(\mathbf{K}, \omega)\frac{\omega^2}{c^2}.$

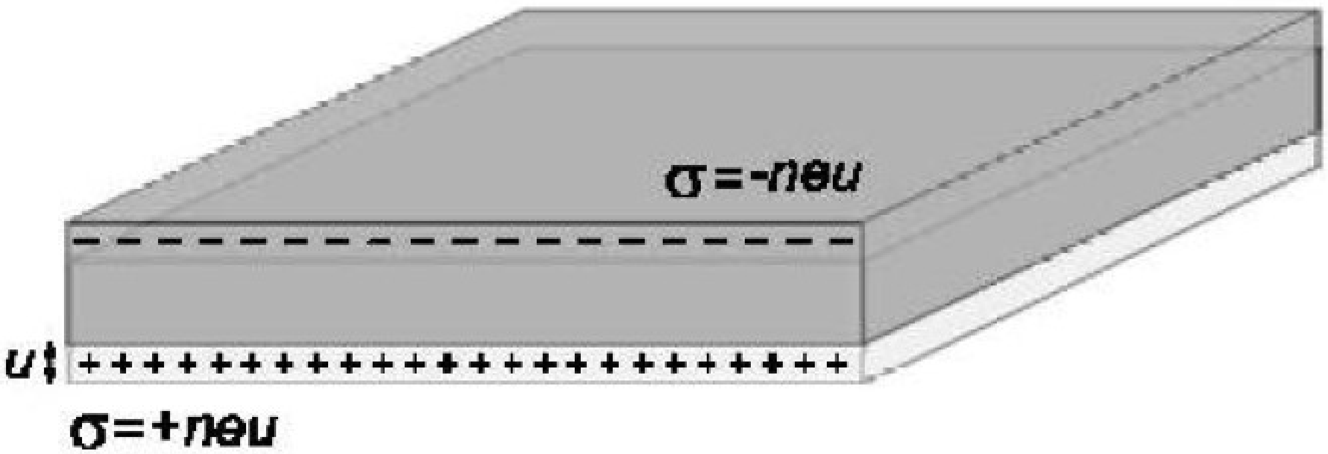
- No entanto, em meios materiais existem modos longitudinais, que satisfazem $\varepsilon(\mathbf{K}, \omega) = 0,$

$$\begin{cases} \omega = \omega_p \rightarrow \text{Modelo de Drude sem dissipação} \\ \omega^2 = \omega_p^2 + \dfrac{6E_F K^2}{5m} \rightarrow \text{FMC} \end{cases}$$

Stefan Maier, *Plasmonics: fundamentals and applications*.

PLASMONS VOLUMÉTRICOS

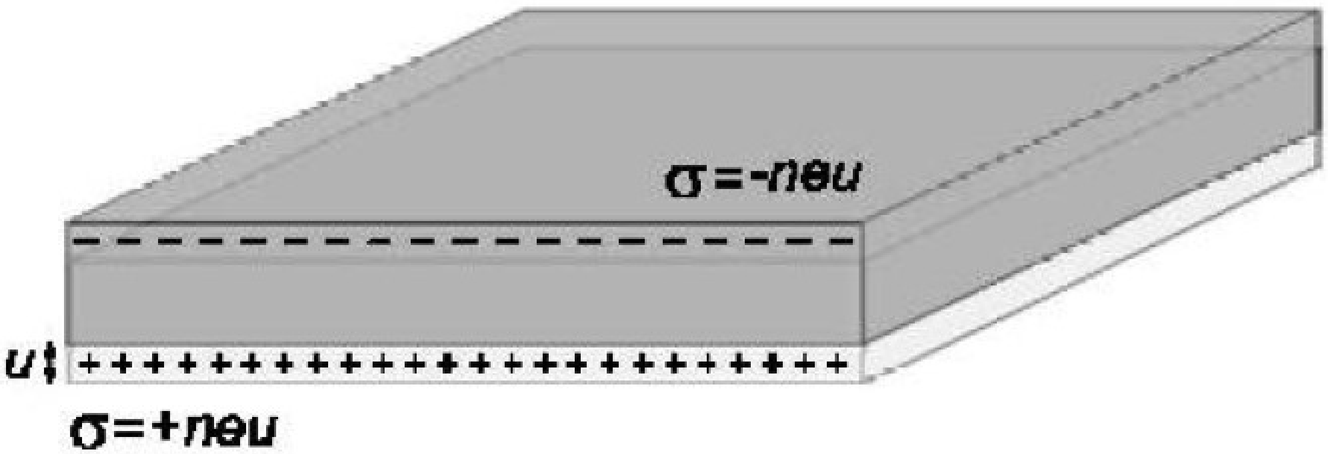
- Modelo de oscilações longitudinais do gás de elétrons



Stefan Maier, *Plasmonics: fundamentals and applications*.

Plasmons volumétricos

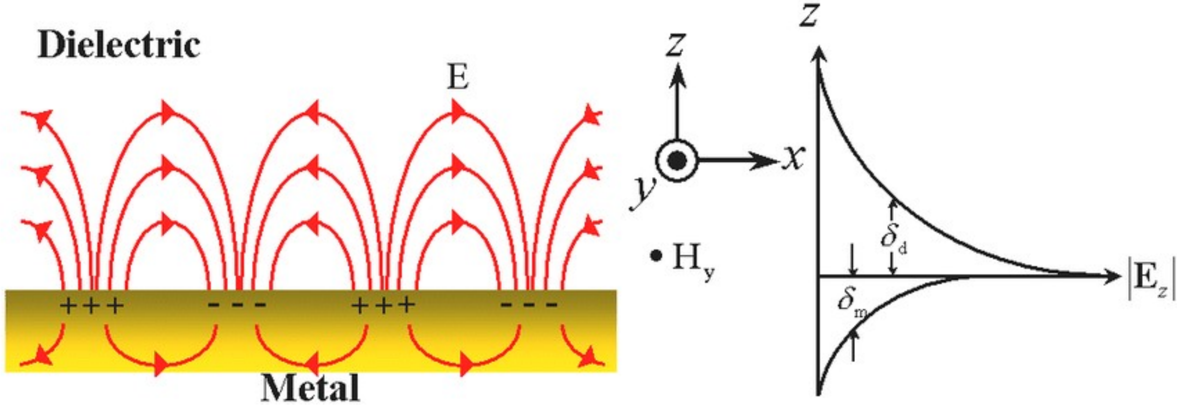
- Modelo de oscilações longitudinais do gás de elétrons



$$\begin{cases} nm\ddot{u} = -ne\mathbf{E} \\ \mathbf{E} = \frac{neu}{\varepsilon_0} \end{cases} \Rightarrow \ddot{u} + \omega_p^2 u = 0.$$

Stefan Maier, *Plasmonics: fundamentals and applications*.

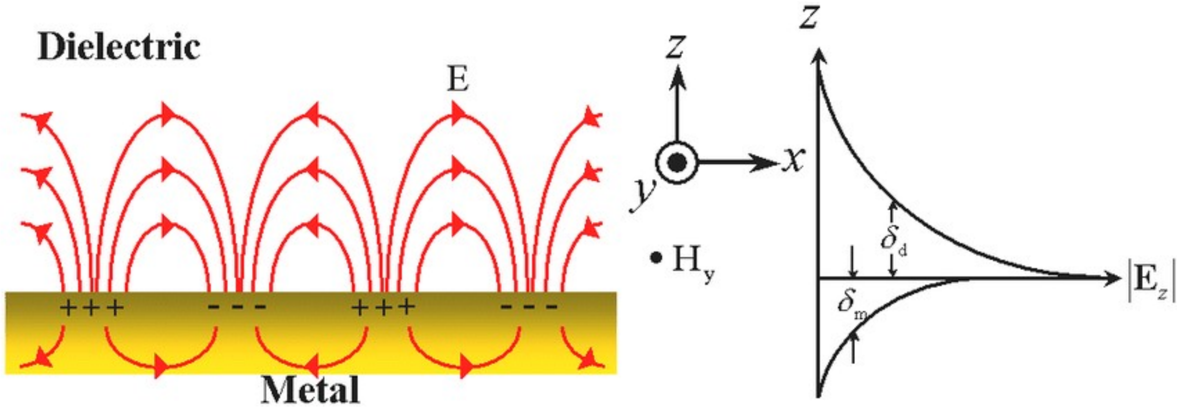
Plasmons de superfície



$$\nabla^2 \mathbf{E} + k_0^2 \varepsilon \mathbf{E} = 0$$ **+ equações de Maxwell + C.C. na interface**

Stefan Maier, *Plasmonics: fundamentals and applications.*

PLASMONS DE SUPERFÍCIE



$$\nabla^2 \mathbf{E} + k_0^2 \varepsilon \mathbf{E} = 0$$ **+ equações de Maxwell + C.C. na interface**

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \mathbf{E}(z) e^{i\beta x}$$

$$\mathbf{E}(z) \sim \begin{cases} e^{-k_2 z}, & z > 0 \\ e^{k_1 z}, & z < 0 \end{cases}$$

APENAS MODOS TM

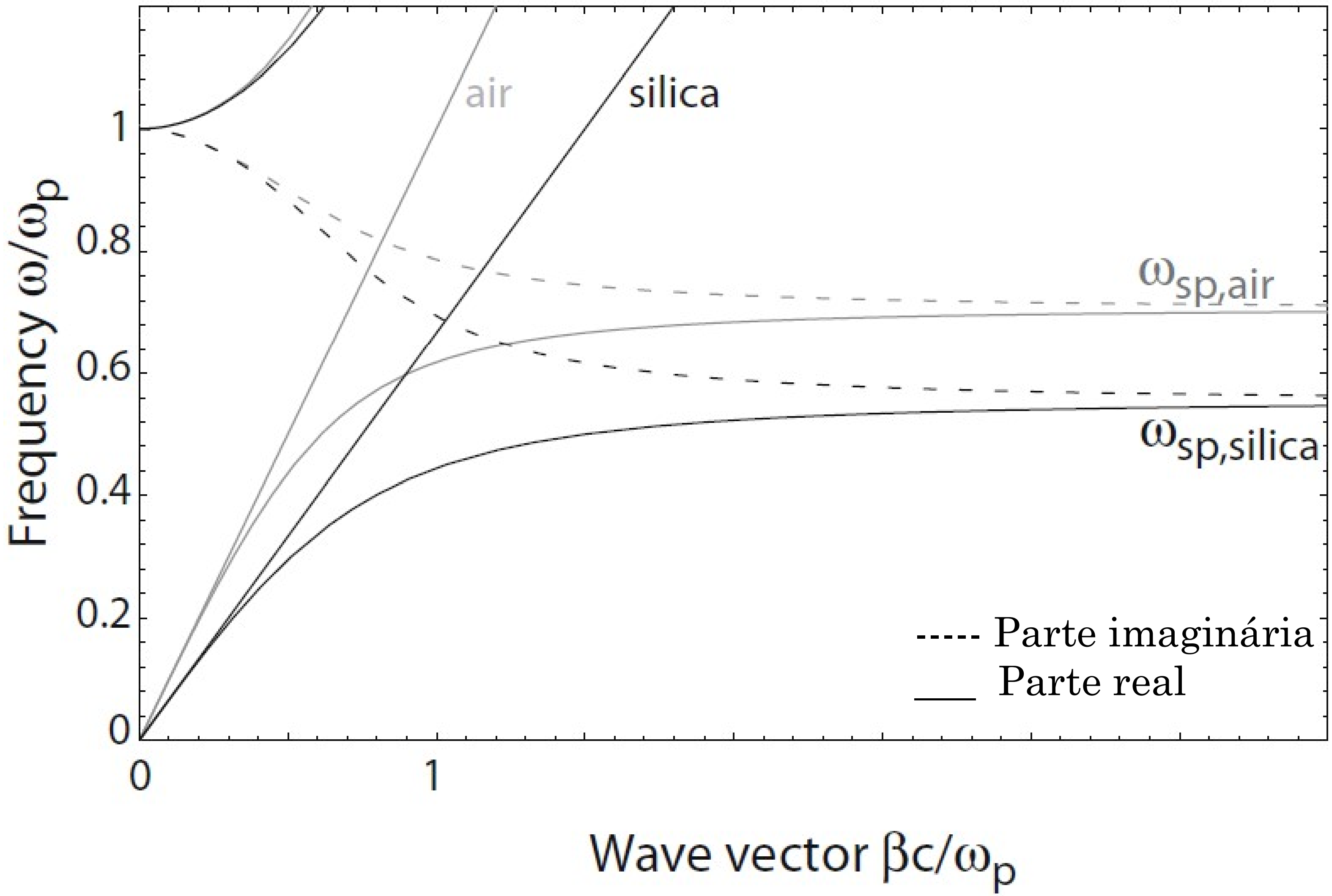
$$\frac{k_2}{k_1} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}. \qquad \begin{aligned} k_1^2 &= \beta^2 - k_0^2 \varepsilon_1 \\ k_2^2 &= \beta^2 - k_0^2 \varepsilon_2. \end{aligned}$$

$$\beta = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}}.$$

Stefan Maier, *Plasmonics: fundamentals and applications.*

Plasmons de superfície

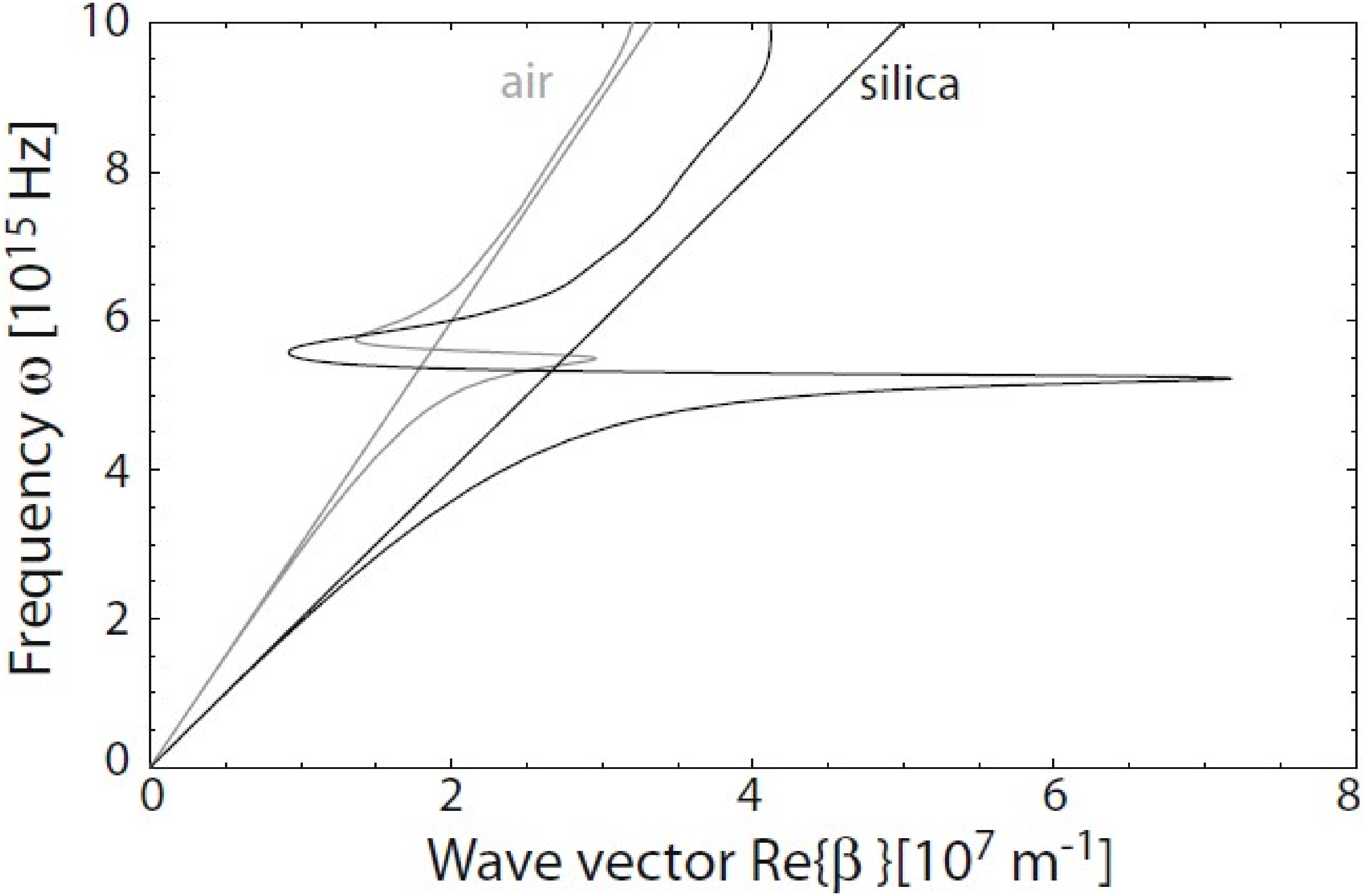
- Para um metal descrito por Drude sem dissipação,



Stefan Maier, *Plasmonics: fundamentals and applications.*

Plasmons de superfície

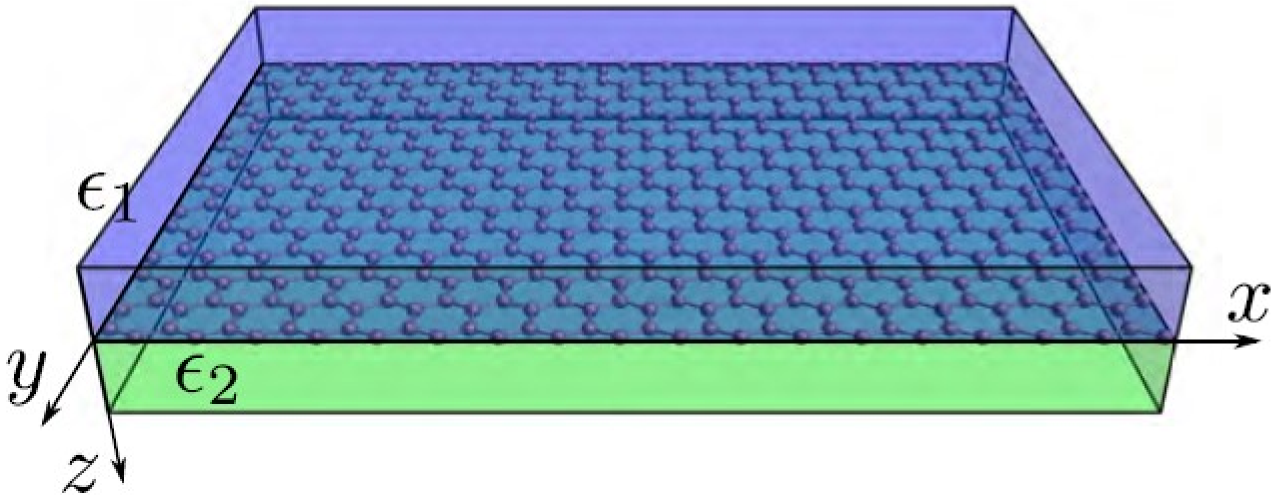
- Para prata com dissipação,



Stefan Maier, *Plasmonics: fundamentals and applications*.

Plasmons de superfície - grafeno

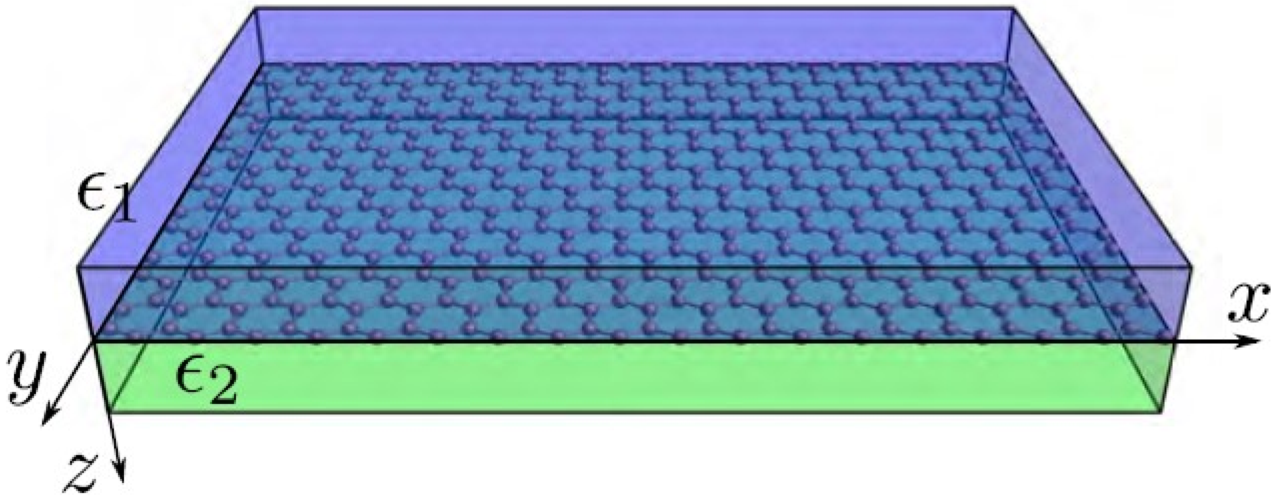
- Eqs de Maxwell + C.C. (diferente do caso metal-dielétrico).



P.A.D. Gonçalves and N.M.R. Peres, *An introduction to graphene plasmonics*

Plasmons de superfície - grafeno

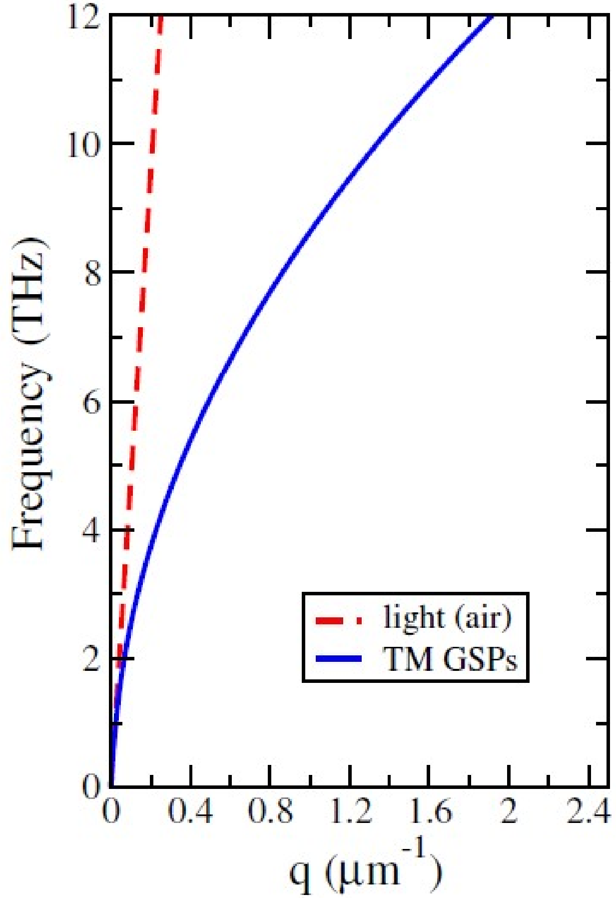
- Eqs de Maxwell + C.C. (diferente do caso metal-dielétrico).

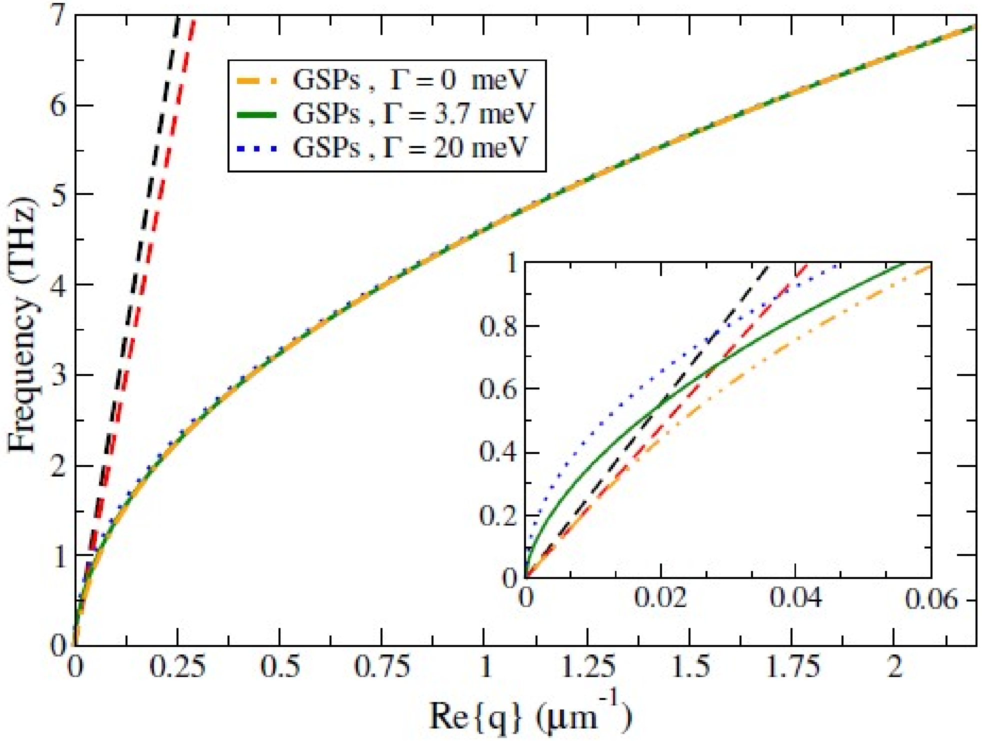


- Modos TE são possíveis!

•P.A.D. Gonçalves and N.M.R. Peres, *An introduction to graphene plasmonics*
•Phys. Rev. Lett. 99, 016803 (2007)

PLASMONS DE SUPERFÍCIE - GRAFENO





P.A.D. Gonçalves and N.M.R. Peres, *An introduction to graphene plasmonics*

PLASMONS CONFINADOS

- Modos plasmônicos presentes em frequências bem definidas.

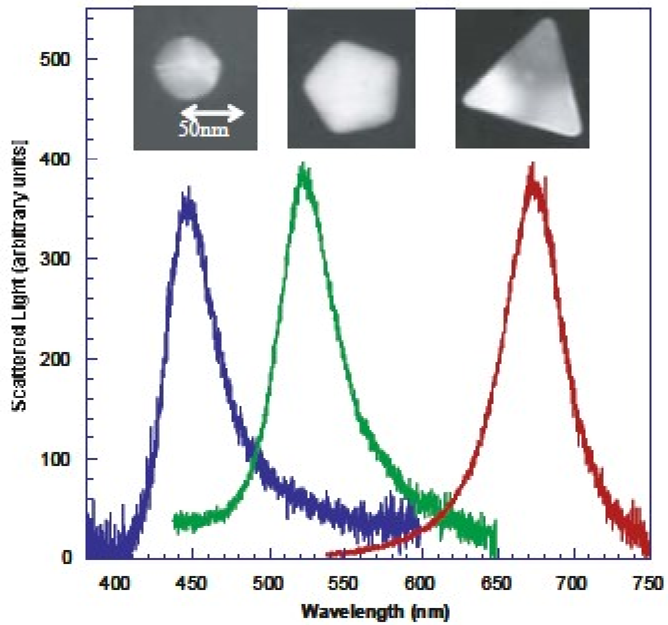
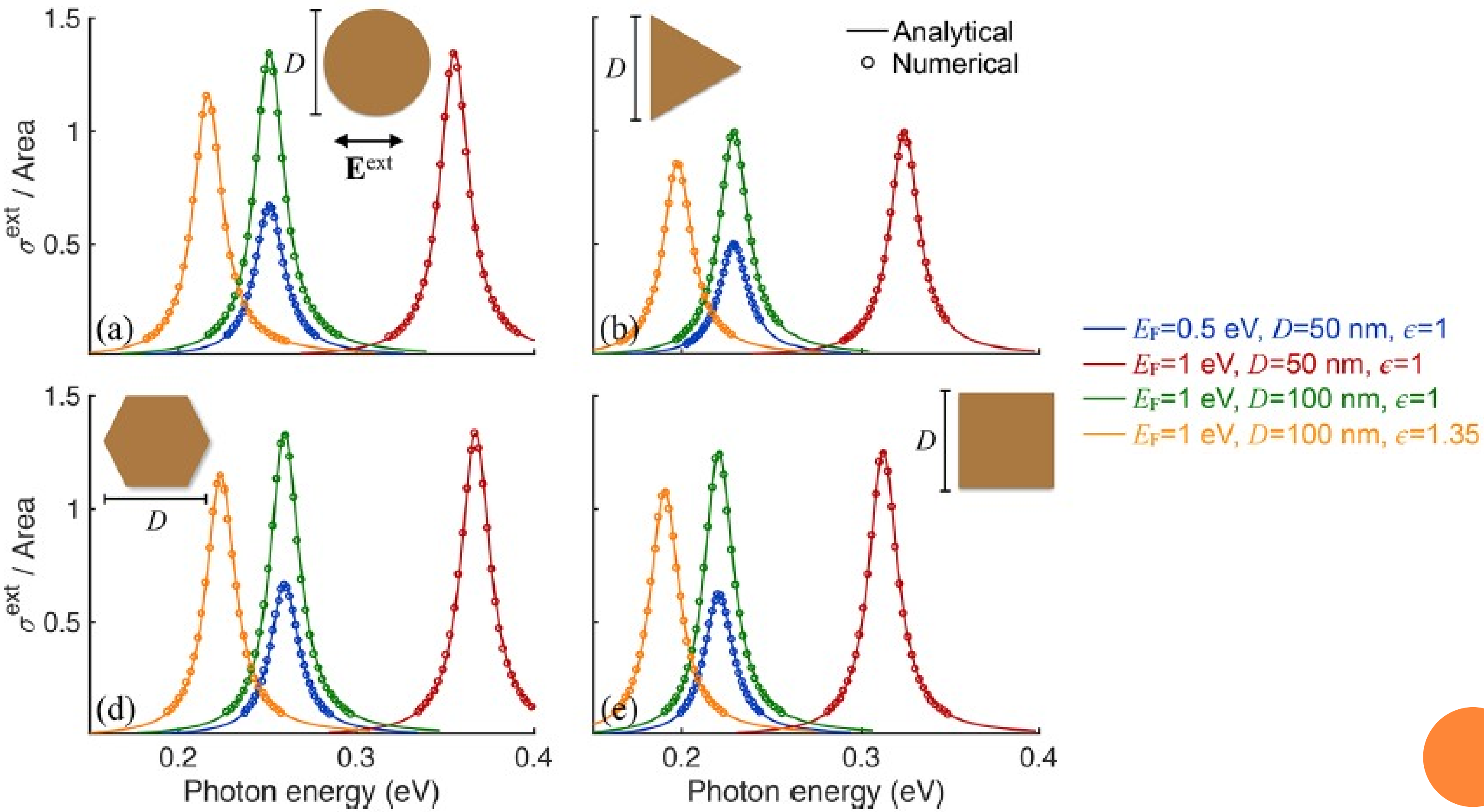


Figure 5.7. Scattering spectra of single silver nanoparticles of different shapes obtained in dark-field configuration. Reprinted with permission from [Mock et al., 2002a]. Copyright 2002, American Institute of Physics.

Stefan Maier, *Plasmonics: fundamentals and applications*.

Plasmons em nanoestruturas 2D

- Modelo analítico para qualquer metal



- ACS Photonics 2017, 4, 3106−3114
- *Faraday Discussions* 2015, 178, 87-107

Plasmons em nanoestruturas 2D

- Objetivo: descrever os modos plasmônicos (distribuição de cargas, freq. de ressonância, largura).

•ACS Photonics 2017, 4, 3106−3114
•*Faraday Discussions* 2015, 178, 87-107

Plasmons em nanoestruturas 2D

- Objetivo: descrever os modos plasmônicos (distribuição de cargas, freq. de ressonância, largura).

- Ponto de partida: equação integro-diferencial,

$$\mathbf{E}_{\|}(\mathbf{r},\omega) = \mathbf{E}_{\|}^{ext}(\mathbf{r},\omega) + \frac{i\sigma(\omega)}{4\pi\epsilon_0\omega}\nabla_{\mathbf{r}}\int \frac{d^2\mathbf{r}'}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}\nabla_{\mathbf{r}'}\cdot f(\mathbf{r}')\mathbf{E}_{\|}(\mathbf{r}',\omega).$$

$$\begin{cases} \mathbf{K}(\mathbf{r},\omega) = \sigma(\omega) f(\mathbf{r})\mathbf{E}_{\|}(\mathbf{r},\omega) & \rightarrow \text{Lei de Ohm} \\ i\omega\rho_{2D}(\mathbf{r},\omega) = \nabla_{\mathbf{r}}\cdot\mathbf{K}(\mathbf{r},\omega) & \rightarrow \text{Equação da continuidade} \end{cases}$$

- Formalismo eletrostático, válido para λ >> D.

•ACS Photonics 2017, 4, 3106−3114
•*Faraday Discussions* 2015, 178, 87-107

PLASMONS EM NANOESTRUTURAS 2D

- Mudança de variáveis:

$$\mathbf{u} = \mathbf{r}/D \quad \text{e} \quad \boldsymbol{\mathcal{E}}(\mathbf{u},\omega) = D\sqrt{f(D\mathbf{u})}\mathbf{E}_{\parallel}(D\mathbf{u},\omega)$$

•ACS Photonics 2017, 4, 3106−3114
•*Faraday Discussions* 2015, 178, 87-107

PLASMONS EM NANOESTRUTURAS 2D

- Mudança de variáveis:

$$\mathbf{u} = \mathbf{r}/D \quad \text{e} \quad \boldsymbol{\mathcal{E}}(\mathbf{u},\omega) = D\sqrt{f(D\mathbf{u})}\mathbf{E}_{\parallel}(D\mathbf{u},\omega)$$

$$\Rightarrow \quad \boldsymbol{\mathcal{E}}(\mathbf{u},\omega) = \boldsymbol{\mathcal{E}}^{ext}(\mathbf{u},\omega) + \eta(\omega)\int d^2\mathbf{u}'\,\mathbb{M}(\mathbf{u},\mathbf{u}')\cdot\boldsymbol{\mathcal{E}}(\mathbf{u}',\omega)$$

onde

$$\eta(\omega) = i\sigma(\omega)/4\pi\epsilon_0\omega D \ \text{e}\ \mathbb{M}(\mathbf{u},\mathbf{u}') = \sqrt{f(\mathbf{u})f(\mathbf{u}')}\nabla_{\mathbf{u}}\nabla_{\mathbf{u}'}|\mathbf{u}-\mathbf{u}'|^{-1}$$

•ACS Photonics 2017, 4, 3106−3114
•*Faraday Discussions* 2015, 178, 87-107

Plasmons em nanoestruturas 2D

- Mudança de variáveis:

$$\mathbf{u} = \mathbf{r}/D \quad \text{e} \quad \boldsymbol{\mathcal{E}}(\mathbf{u},\omega) = D\sqrt{f(D\mathbf{u})}\mathbf{E}_{\parallel}(D\mathbf{u},\omega)$$

$$\boldsymbol{\mathcal{E}}(\mathbf{u},\omega) = \boldsymbol{\mathcal{E}}^{ext}(\mathbf{u},\omega) + \eta(\omega)\int d^2\mathbf{u}'\,\mathbb{M}(\mathbf{u},\mathbf{u}')\cdot\boldsymbol{\mathcal{E}}(\mathbf{u}',\omega)$$

onde

$$\eta(\omega) = i\sigma(\omega)/4\pi\epsilon_0\omega D \text{ e } \mathbb{M}(\mathbf{u},\mathbf{u}') = \sqrt{f(\mathbf{u})f(\mathbf{u}')}\nabla_{\mathbf{u}}\nabla_{\mathbf{u}'}|\mathbf{u}-\mathbf{u}'|^{-1}$$

- Equação de autovalores:

$$\int d^2\mathbf{u}'\,\mathbb{M}(\mathbf{u},\mathbf{u}')\cdot\mathbf{V}_j(\mathbf{u}') = \frac{1}{\eta_j}\mathbf{V}_j(\mathbf{u})\,.$$

- Soluções na ausência de um campo externo!

•ACS Photonics 2017, 4, 3106−3114
•*Faraday Discussions* 2015, 178, 87-107

PLASMONS EM NANOESTRUTURAS 2D

- Relações de completeza e ortogonalidade:

$$\sum_j \mathbf{V}_j^*(\mathbf{u}) \otimes \mathbf{V}_j(\mathbf{u}') = \delta(\mathbf{u}-\mathbf{u}')\mathbb{I}_2 \quad \text{e} \quad \int d^2\mathbf{u}\, \mathbf{V}_j^*(\mathbf{u}) \cdot \mathbf{V}_{j'}(\mathbf{u}) = \delta_{jj'}$$

•ACS Photonics 2017, 4, 3106−3114
•*Faraday Discussions* 2015, 178, 87-107

Plasmons em nanoestruturas 2D

- Relações de completeza e ortogonalidade:

$$\sum_j \mathbf{V}_j^*(\mathbf{u}) \otimes \mathbf{V}_j(\mathbf{u}') = \delta(\mathbf{u}-\mathbf{u}')\mathbb{I}_2 \quad \text{e} \quad \int d^2\mathbf{u}\, \mathbf{V}_j^*(\mathbf{u}) \cdot \mathbf{V}_{j'}(\mathbf{u}) = \delta_{jj'}$$

- Por hora, ignoraremos o problema de obtenção dos modos.

•ACS Photonics 2017, 4, 3106−3114
•*Faraday Discussions* 2015, 178, 87-107

Plasmons em nanoestruturas 2D

- Relações de completeza e ortogonalidade:

$$\sum_j \mathbf{V}_j^*(\mathbf{u}) \otimes \mathbf{V}_j(\mathbf{u}') = \delta(\mathbf{u}-\mathbf{u}')\mathbb{I}_2 \quad \text{e} \quad \int d^2\mathbf{u}\, \mathbf{V}_j^*(\mathbf{u}) \cdot \mathbf{V}_{j'}(\mathbf{u}) = \delta_{jj'}$$

- Por hora, ignoraremos o problema de obtenção dos modos.

- Campo elétrico sobre a superfície da nanoestrutura:

$$\boldsymbol{\mathcal{E}}(\mathbf{u},\omega) = \sum_j \frac{c_j}{1-\eta(\omega)/\eta_j} \mathbf{V}_j(\mathbf{u}),\ c_j = \int d^2\mathbf{u}\, \mathbf{V}_j^*(\mathbf{u}) \cdot \boldsymbol{\mathcal{E}}^{ext}(\mathbf{u},\omega)\,.$$

- Frequências de ressonância dadas pela solução de

$$\mathrm{Re}[1/\eta_j - 1/\eta(\omega_j)] = 0$$

•ACS Photonics 2017, 4, 3106−3114
•*Faraday Discussions* 2015, 178, 87-107

Plasmons em nanoestruturas 2D

- Lei de Ohm + Equação da continuidade resulta em

$$\rho_{2D}(\mathbf{r},\omega) = \frac{4\pi\epsilon_0}{D}\sum_j \frac{c_j}{1/\eta_j - 1/\eta(\omega)} v_j(\mathbf{u}),$$

$v_j(\mathbf{u}) = \nabla_{\mathbf{u}} \cdot \sqrt{f(\mathbf{u})}\mathbf{V}_j(\mathbf{u})$ → *Plasmon Wave Functions* (**PWF**).

•ACS Photonics 2017, 4, 3106−3114
•*Faraday Discussions* 2015, 178, 87-107

PLASMONS EM NANOESTRUTURAS 2D

- Lei de Ohm + Equação da continuidade resulta em

$$\rho_{2D}(\mathbf{r},\omega) = \frac{4\pi\epsilon_0}{D}\sum_j \frac{c_j}{1/\eta_j - 1/\eta(\omega)} v_j(\mathbf{u}),$$

$v_j(\mathbf{u}) = \nabla_{\mathbf{u}} \cdot \sqrt{f(\mathbf{u})}\mathbf{V}_j(\mathbf{u})$ → *Plasmon Wave Functions* (**PWF**).

- As PWFs são as densidades de carga (normalizadas) dos modos plasmônicos. De fato,

$$\mathbf{V}_j(\mathbf{u}) = \sqrt{f(\mathbf{u})}\eta_j \int d^2\mathbf{u}' \frac{v_j(\mathbf{u}')(\mathbf{u}-\mathbf{u}')}{|\mathbf{u}-\mathbf{u}'|^3}.$$

•ACS Photonics 2017, 4, 3106−3114
•*Faraday Discussions* 2015, 178, 87-107

Plasmons em nanoestruturas 2D

- De posse da densidade de cargas induzida, podemos obter tudo que desejarmos.

•ACS Photonics 2017, 4, 3106−3114
•*Faraday Discussions* 2015, 178, 87-107

PLASMONS EM NANOESTRUTURAS 2D

- De posse da densidade de cargas induzida, podemos obter tudo que desejarmos.

- Polarizabilidade da nanoestrutura:

$$\alpha(\omega) = \epsilon D^3 \sum_j \frac{\vec{\zeta}_j \otimes \vec{\zeta}_j}{1/\eta(\omega) - 1/\eta_j} \qquad \zeta_j = \int d^2\mathbf{u}\,\mathbf{u}\,v_j(\mathbf{u})$$

•ACS Photonics 2017, 4, 3106−3114
•*Faraday Discussions* 2015, 178, 87-107

PLASMONS EM NANOESTRUTURAS 2D

- De posse da densidade de cargas induzida, podemos obter tudo que desejarmos.

- Polarizabilidade da nanoestrutura:

$$\alpha(\omega) = \epsilon D^3 \sum_j \frac{\vec{\zeta}_j \otimes \vec{\zeta}_j}{1/\eta(\omega) - 1/\eta_j} \qquad \zeta_j = \int d^2\mathbf{u}\,\mathbf{u}\,v_j(\mathbf{u})$$

- Função de Green estática:

$$\mathbb{G}^{sca}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) = -\frac{c^2}{4\pi D^3 \omega^2} \sum_j \frac{\mathbf{F}_j(\mathbf{r})\mathbf{F}_j^*(\mathbf{r}')}{1/\eta_j - 1/\eta(\omega)},$$

$$\mathbf{F}_j(\mathbf{R}_0) = \int d^2\mathbf{u}' \frac{v_j(\mathbf{u}')(\mathbf{R}_0/D - \mathbf{u}')}{|\mathbf{R}_0/D - \mathbf{u}'|^3}$$

...

•ACS Photonics 2017, 4, 3106−3114

•*Faraday Discussions* 2015, 178, 87-107

Plasmons em nanoestruturas 2D

- Mas como obter as PWFs?

Plasmons em nanoestruturas 2D

- Mas como obter as PWFs?

$$\int d^2\mathbf{u}'\,\mathbb{M}(\mathbf{u},\mathbf{u}')\cdot\mathbf{V}_j(\mathbf{u}') = \frac{1}{\eta_j}\mathbf{V}_j(\mathbf{u})\,.$$

Meio homogêneo!

$$\nabla^2_{\mathbf{u}}\int d^2\mathbf{u}'\,\frac{v_j(\mathbf{u}')}{|\mathbf{u}-\mathbf{u}'|} = \frac{1}{\eta_j}v_j(\mathbf{u})\,.$$

PLASMONS EM NANOESTRUTURAS 2D

- Mas como obter as PWFs?

$$\int d^2\mathbf{u}' \, \mathbb{M}(\mathbf{u}, \mathbf{u}') \cdot \mathbf{V}_j(\mathbf{u}') = \frac{1}{\eta_j} \mathbf{V}_j(\mathbf{u}) \, .$$

Meio homogêneo!

$$\nabla^2_{\mathbf{u}} \int d^2\mathbf{u}' \, \frac{v_j(\mathbf{u}')}{|\mathbf{u} - \mathbf{u}'|} = \frac{1}{\eta_j} v_j(\mathbf{u}) \, .$$

Eq. de Poisson sobre a nanoestrutura

Eq. de Laplace + C.C. sobre a nanoestrutura

PLASMONS EM NANOESTRUTURAS 2D

- Mas como obter as PWFs?

$$\int d^2\mathbf{u}'\,\mathbb{M}(\mathbf{u},\mathbf{u}')\cdot\mathbf{V}_j(\mathbf{u}') = \frac{1}{\eta_j}\mathbf{V}_j(\mathbf{u})\,.$$

Meio homogêneo!

$$\nabla^2_{\mathbf{u}}\int d^2\mathbf{u}'\,\frac{v_j(\mathbf{u}')}{|\mathbf{u}-\mathbf{u}'|} = \frac{1}{\eta_j}v_j(\mathbf{u})\,.$$

Eq. de Poisson sobre a nanoestrutura

Eq. de Laplace + C.C. sobre a nanoestrutura

- Ou métodos numéricos.

PLASMONS EM UM NANODISCO

- Solução (semi-)analítica!

PWFs = $R_{ln}(u)e^{il\phi}$. $\quad R_{ln}(u) = (2u)^{|l|} \sum_{m'} a_{m'}^{ln} P_{m'}^{(|l|,0)}(1-8u^2)$

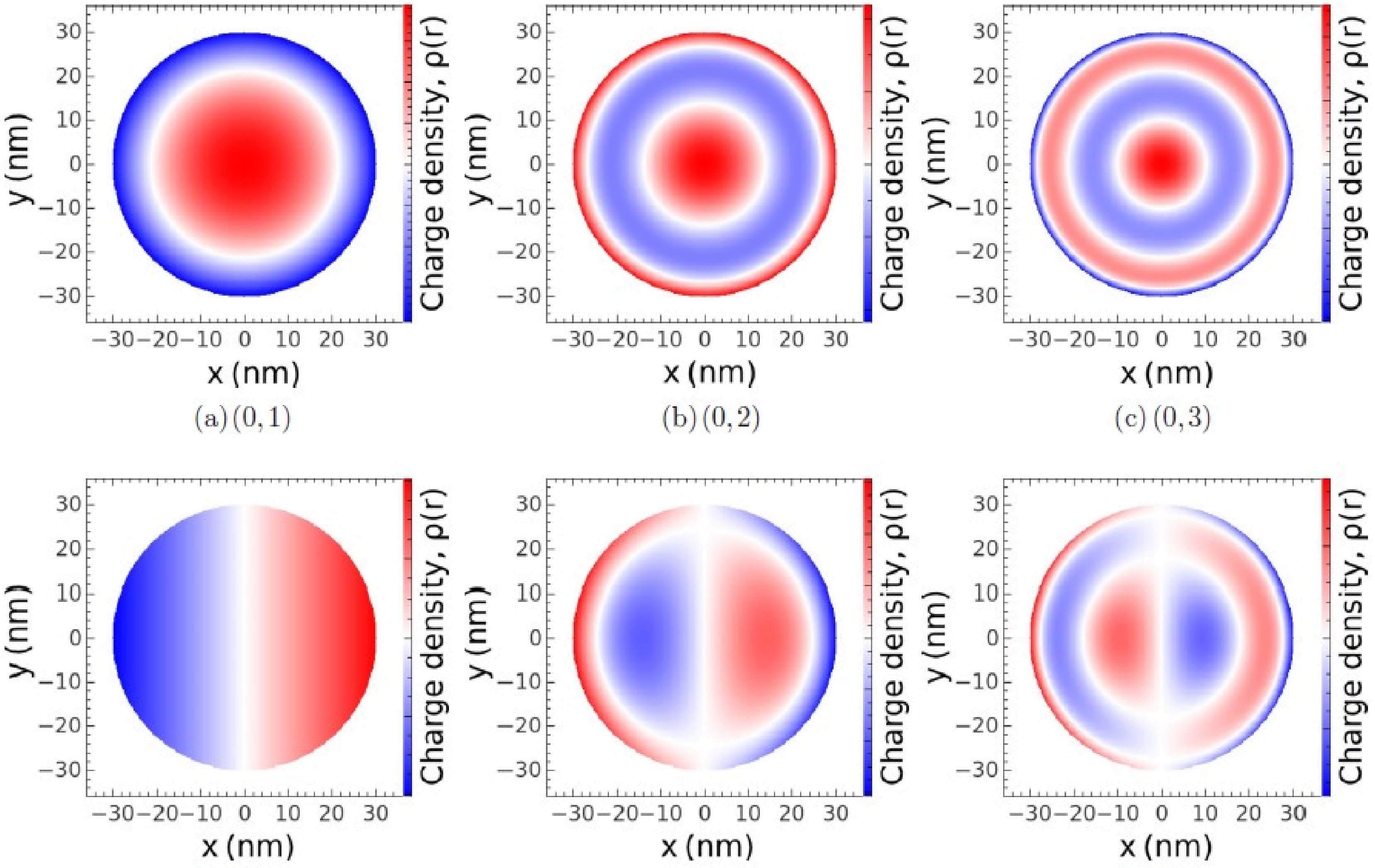
$$\mathbb{G}^l \mathbf{a}^{ln} = -4\pi\eta_{ln}\mathbb{K}^l\mathbf{a}^{ln},$$

$$\mathbb{K}^l_{mm'} = \frac{(-1)^{m-m'+1}}{\pi[4(m-m')^2-1](|l|+m+m'+1/2)(|l|+m+m'+3/2)}, \quad m, m' = 0, 1, 2, 3...$$

$$\mathbb{G}^l_{mm'} = \frac{\delta_{m0}\delta_{m'0}}{8|l|(|l|+1)^2} + \frac{\delta_{mm'}}{4(|l|+2m')(|l|+2m'+1)(|l|+2m'+2)} + \frac{\delta_{m+1,m'}}{8(|l|+2m+1)(|l|+2m+2)(|l|+2m+3)} + \frac{\delta_{m,m'+1}}{8(|l|+2m'+1)(|l|+2m'+2)(|l|+2m'+3)}, \quad m, m' = 0, 1, 2, 3...$$

•PRB 2016, **93,** 035426
•P.A.D. Gonçalves and N.M.R. Peres, *An introduction to graphene plasmonics.*

Plasmons em um nanodisco



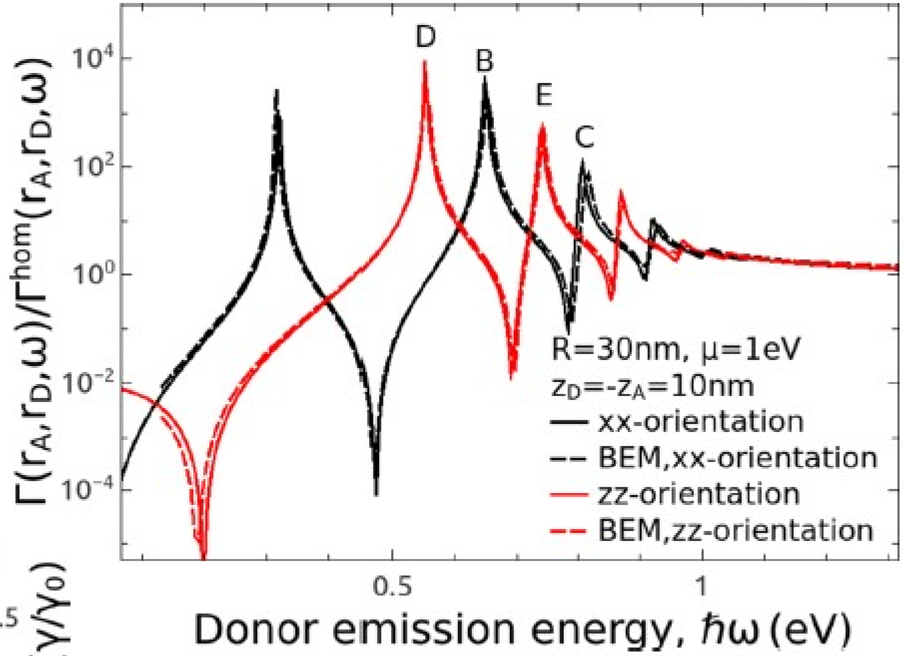
(a) (0,1) (b) (0,2) (c) (0,3)

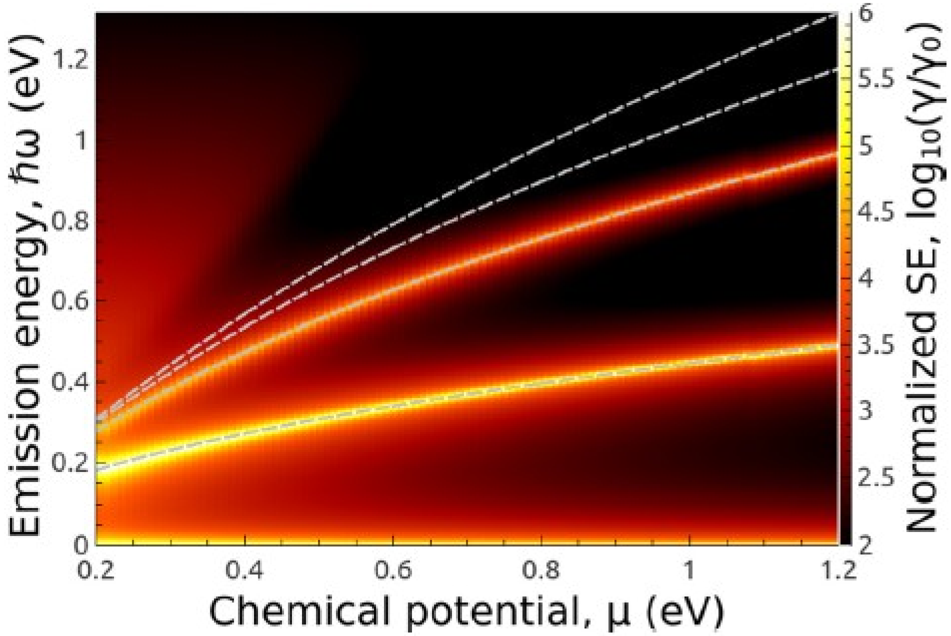
(d) (1,0) (e) (1,1) (f) (1,2)

•PRB 2016, **93,** 035426
•P.A.D. Gonçalves and N.M.R. Peres, *An introduction to graphene plasmonics.*

PLASMONS EM UM NANODISCO

- FRET e EE de um fóton próximo a um nanodisco de grafeno!

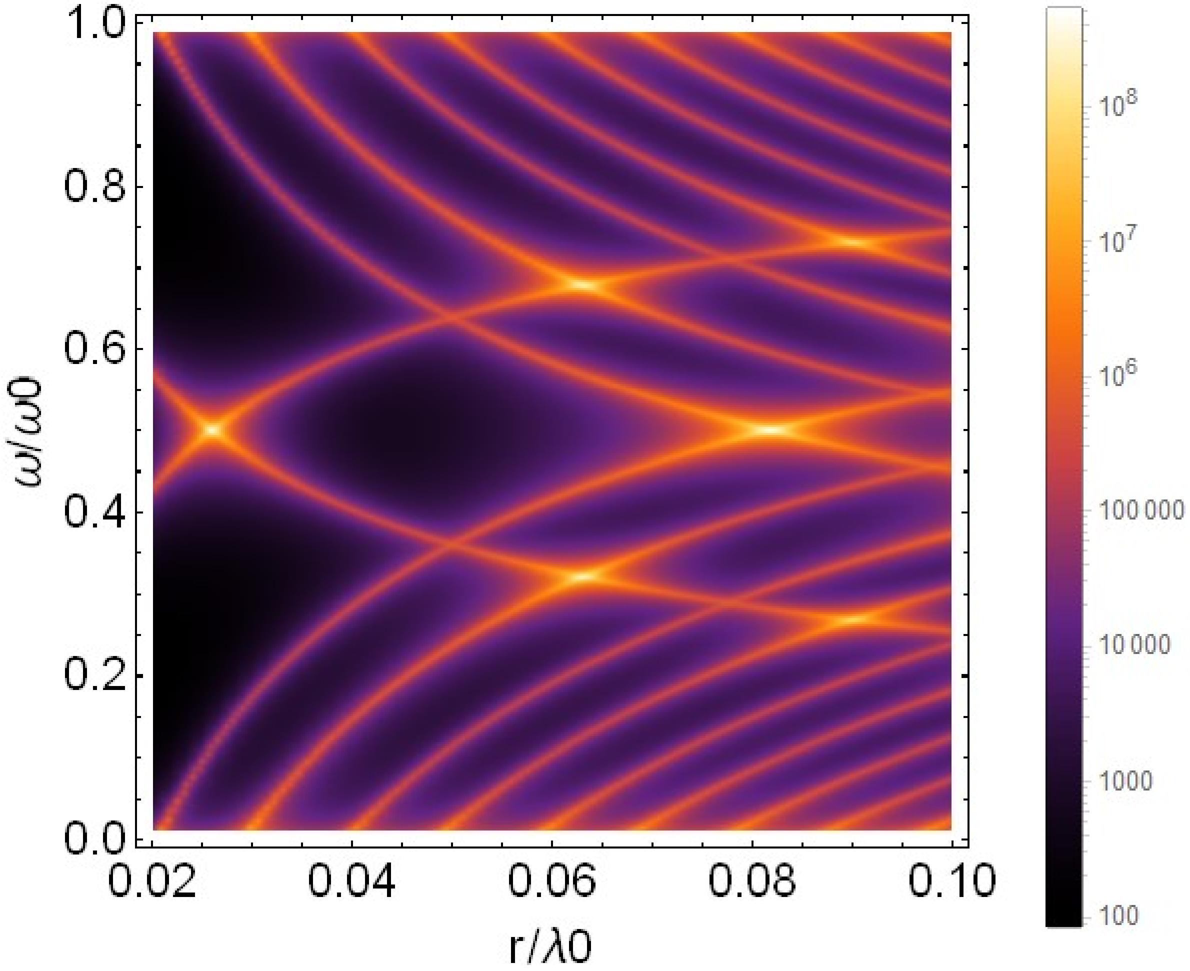




•PRB 2016, **93,** 035426.

PLASMONS EM UM NANODISCO

- EE de dois fótons próximo a um nanodisco!



•PRB 2016, **93,** 035426
•P.A.D. Gonçalves and N.M.R. Peres, *An introduction to graphene plasmonics.*

Plasmons em outras nanoestruturas

- Pergunta: é possível obter soluções analíticas para outras geometrias?
- Fita (sistema comum em experimento), anel (topologia), ...

Plasmons em outras nanoestruturas

- Pergunta: é possível obter soluções analíticas para outras geometrias?
- Fita (sistema comum em experimento), anel (topologia), ...
- Seria isto um "novo Eberlein"?

Plasmons em outras nanoestruturas

- Pergunta: é possível obter soluções analíticas para outras geometrias?
- Fita (sistema comum em experimento), anel (topologia), ...
- Seria isto um “novo Eberlein”?
- Pergunta: é possível generalizar esse tratamento para sistemas anisotrópicos (e.g. grafeno na presença de um campo magnético externo)?

VALEU!