



EFEITO PURCELL NA EMISSÃO ESPONTÂNEA DE DOIS FÓTONS

1

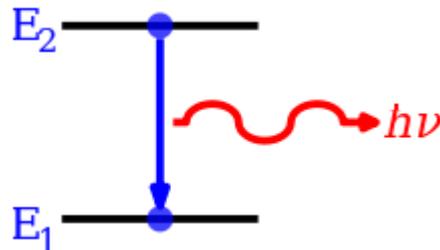
Por: Yuri Muniz de Souza

Colaboradores: D. Szilard, W.J.M. Kort-Kamp, F.S.S. Rosa, C. Farina.

24 de Outubro de 2018

EMISSÃO ESPONTÂNEA (EE)

- Átomo excitado, mesmo que isolado de todos os corpos no universo, acaba decaindo para o estado fundamental.



- Razão: Um átomo, mesmo no vácuo, jamais deixa de ser afetado pelas flutuações quânticas do campo.
- Não pode ser entendido somente com mecânica quântica usual, pois nesse contexto o estado excitado é estacionário.
- Porém, na eletrodinâmica quântica (EDQ), um átomo excitado + zero fóton não é um estado estacionário do hamiltoniano do sistema átomo-campo

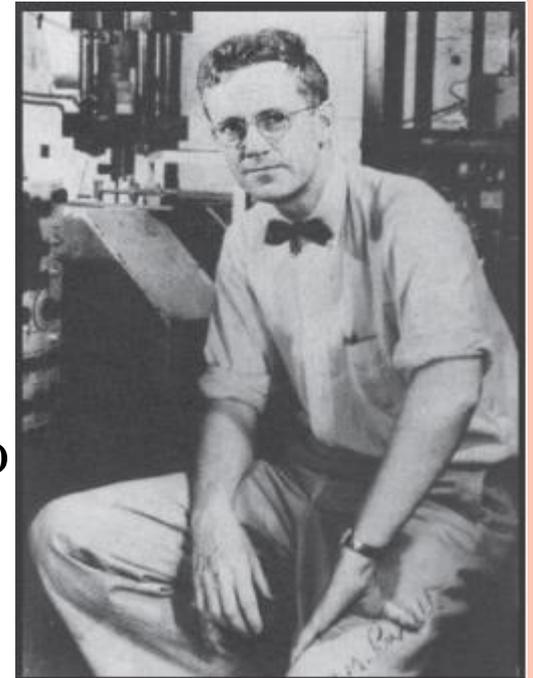
EE

- O fenômeno é muito presente em nossas vidas. Praticamente toda a luz que vemos é proveniente de emissão espontânea!



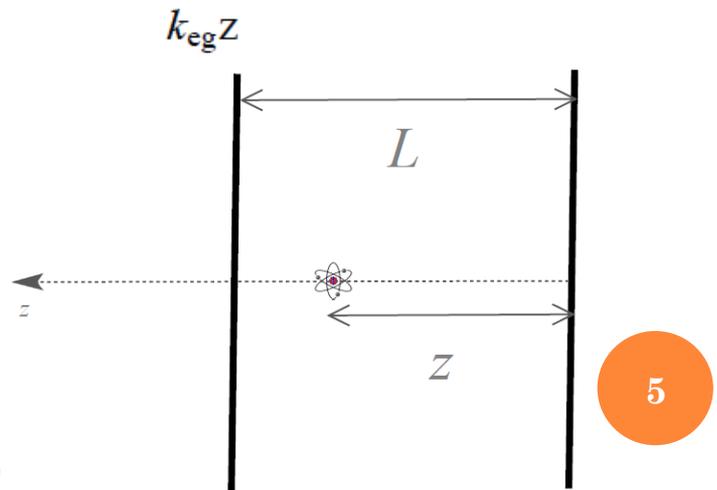
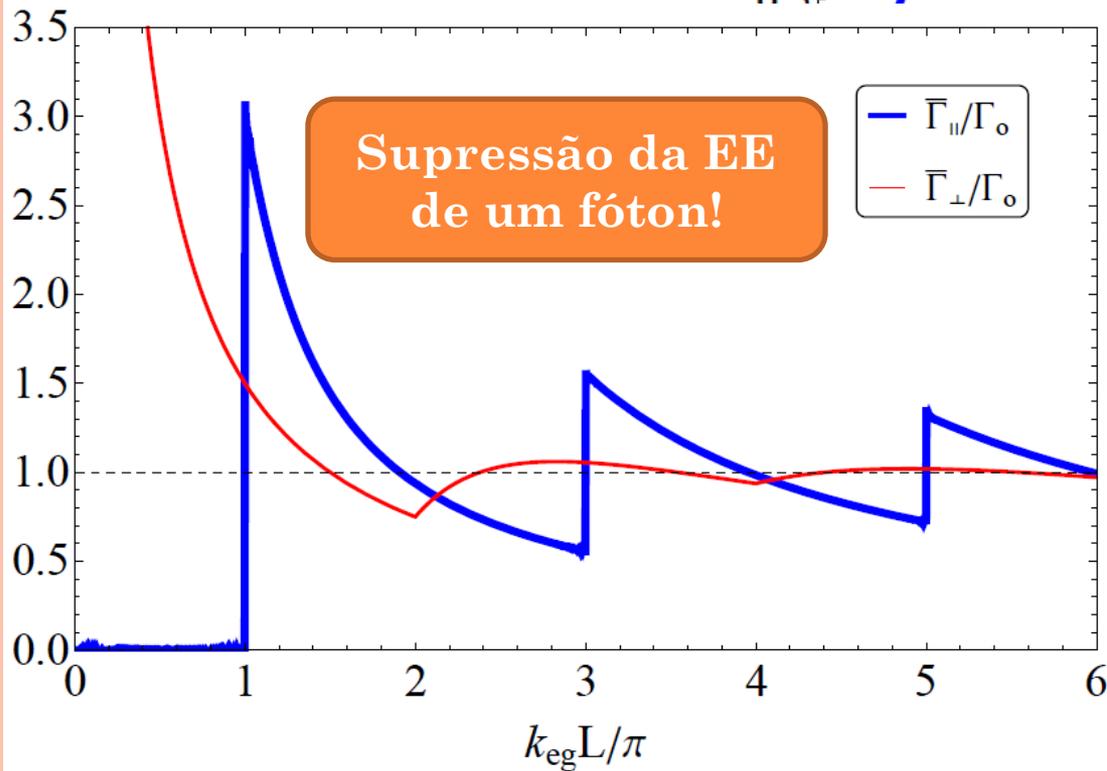
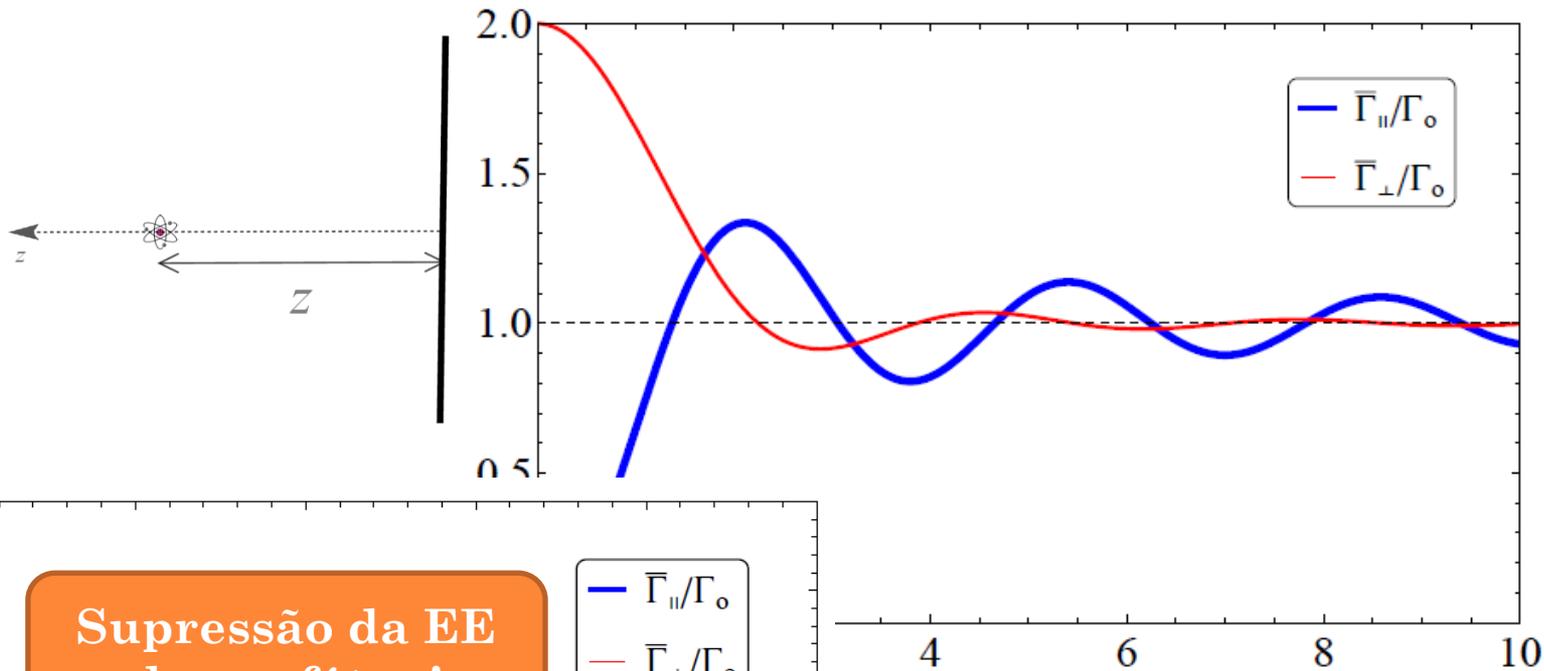
O EFEITO PURCELL

- Edward Mills **Purcell** (1946) descobre que objetos na vizinhança de sistemas atômicos alteram a taxa de EE
- Razão: a presença de objetos altera as condições de contorno (CC) sobre o campo eletromagnético e, conseqüentemente, o acoplamento átomo-campo.



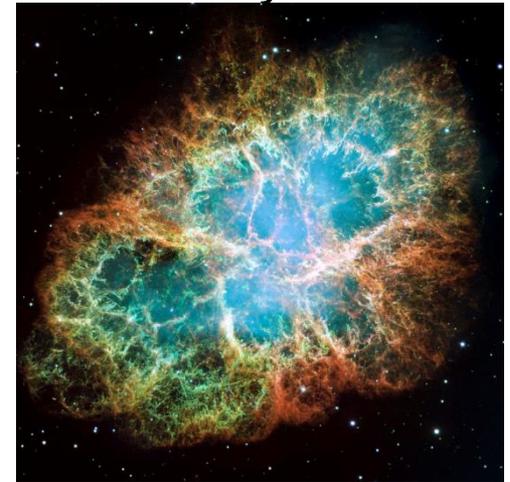
$$\Gamma(\mathbf{R}) = \frac{\pi}{\epsilon_0 \hbar} \sum_{\mathbf{k}p} \omega_k \underline{|\mathbf{d}_{eg} \cdot \mathbf{A}_{\mathbf{k}p}(\mathbf{R})|^2} \delta(\omega_k - \omega_{eg}).$$

EFEITO PURCELL NA EE DE UM FÓTON



EMISSÃO ESPONTÂNEA DE DOIS FÓTONS (EEDF)

- Processo de **segunda ordem**, portanto, muito menos provável que a EE de um fóton.
- É um processo relevante quando a EE de um fóton não é possível, por exemplo, devido às regras de seleção.
- Ex: transição $2s - 1s$ no átomo de H.
- Espectro de emissão de **banda larga**.
- Explica o espectro de emissão de nebulosas planetárias.



EFEITO PURCELL E EEDF

- O efeito Purcell na EEDF não é um tema amplamente discutido na literatura, em parte, devido à dificuldade de se observar o fenômeno.
- No entanto, com o crescente progresso em **ótica de campo próximo, plasmônica, metamateriais** etc, o interesse no tema tem aumentado.
- **N. Rivera *et al***, “*Making two-photon processes dominate one-photon processes using mid-ir phonon polaritons*”, PNAS (2017)
- Além disso, a EEDF é um processo **mais rico** que a EE de um fóton.

TAXA DE EEDF

- A taxa de EEDF pode ser obtida utilizando a **regra de ouro de Fermi em segunda ordem**,

$$\Gamma(\mathbf{R}) = \frac{\pi}{4\epsilon_0^2 \hbar^2} \sum_{\mathbf{k}p, \mathbf{k}'p'} \omega_k \omega_{k'} |\mathbf{A}_{\mathbf{k}p}(\mathbf{R}) \cdot \mathbb{D}(\omega_k, \omega_{k'}) \cdot \mathbf{A}_{\mathbf{k}'p'}(\mathbf{R})|^2 \delta(\omega_k + \omega_{k'} - \omega_{eg}),$$

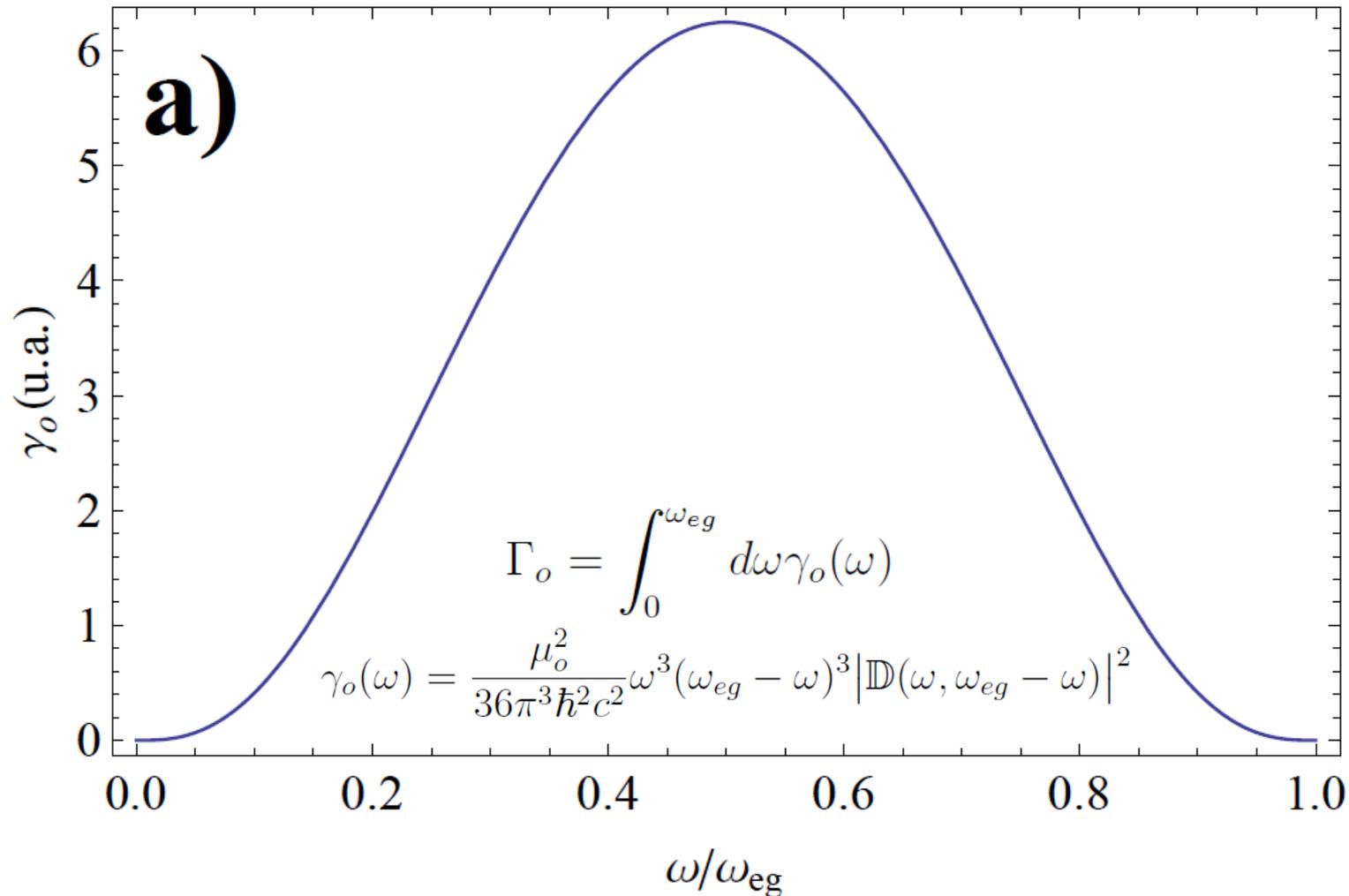
$$\mathbb{D}(\omega_k, \omega_{k'}) := \lim_{\eta \rightarrow 0^+} \sum_m \left[\frac{\mathbf{d}_{em} \mathbf{d}_{mg}}{\omega_{em} - \omega_k + i\eta} + \frac{\mathbf{d}_{mg} \mathbf{d}_{em}}{\omega_{em} - \omega_{k'} + i\eta} \right].$$

- Ou, em termos do tensor de Green da equação de **Helmholtz vetorial**,

$$\Gamma = \frac{\mu_0^2}{\pi \hbar^2} \int_0^{\omega_{eg}} d\omega \omega^2 (\omega_{eg} - \omega)^2 \text{Im} \mathbb{G}_{il}(\omega) \text{Im} \mathbb{G}_{jn}(\omega_{eg} - \omega) \mathbb{D}_{ij}(\omega, \omega_{eg} - \omega) \mathbb{D}_{ln}^*(\omega, \omega_{eg} - \omega),$$

$$\nabla \times \nabla \times \mathbb{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) - \frac{\omega^2}{c^2} \mathbb{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) = \mathbb{I} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}').$$

EEDF DE UM ÁTOMO NO ESPAÇO LIVRE



O FATOR PURCELL

- Na base que diagonaliza o diádico de Green,

$$\gamma(\omega) = \frac{\mu_0^2}{\pi \hbar^2} \omega^2 (\omega_{eg} - \omega)^2 \sum_{i,j} \text{Im} \mathbb{G}_{ii}(\omega) \text{Im} \mathbb{G}_{jj}(\omega_{eg} - \omega) |\mathbb{D}_{ij}(\omega, \omega_{eg} - \omega)|^2.$$

- Por conveniência, definimos o **fator Purcell** como

$$P_i(\mathbf{R}, \omega) := \frac{6\pi c}{\omega} \text{Im} \mathbb{G}_{ii}(\mathbf{R}, \mathbf{R}, \omega).$$

- Dessa forma,

$$\frac{\gamma(\omega)}{\gamma_0(\omega)} = \sum_{i,j} \frac{|\mathbb{D}_{ij}(\omega, \omega_{eg} - \omega)|^2}{|\mathbb{D}(\omega, \omega_{eg} - \omega)|^2} P_i(\omega) P_j(\omega_{eg} - \omega).$$

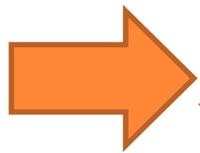
O QUE É O FATOR PURCELL?

- Lembremos que

$$\frac{\Gamma}{\Gamma_o} = \frac{6\pi c}{\omega_{eg}} \hat{\mathbf{n}}_{eg}^* \cdot [\text{Im}\mathbb{G}(\mathbf{R}, \mathbf{R}, \omega_{eg})] \cdot \hat{\mathbf{n}}_{eg}.$$



Taxas de EE
de **um fóton**



$$P_i(\mathbf{R}, \omega) := \frac{6\pi c}{\omega} \text{Im}\mathbb{G}_{ii}(\mathbf{R}, \mathbf{R}, \omega).$$

- Sabendo **as taxas** de EE de um fóton de um átomo próximo a uma superfície, obtemos imediatamente a densidade espectral de EEDF!

EFEITO PURCELL NA EEDF

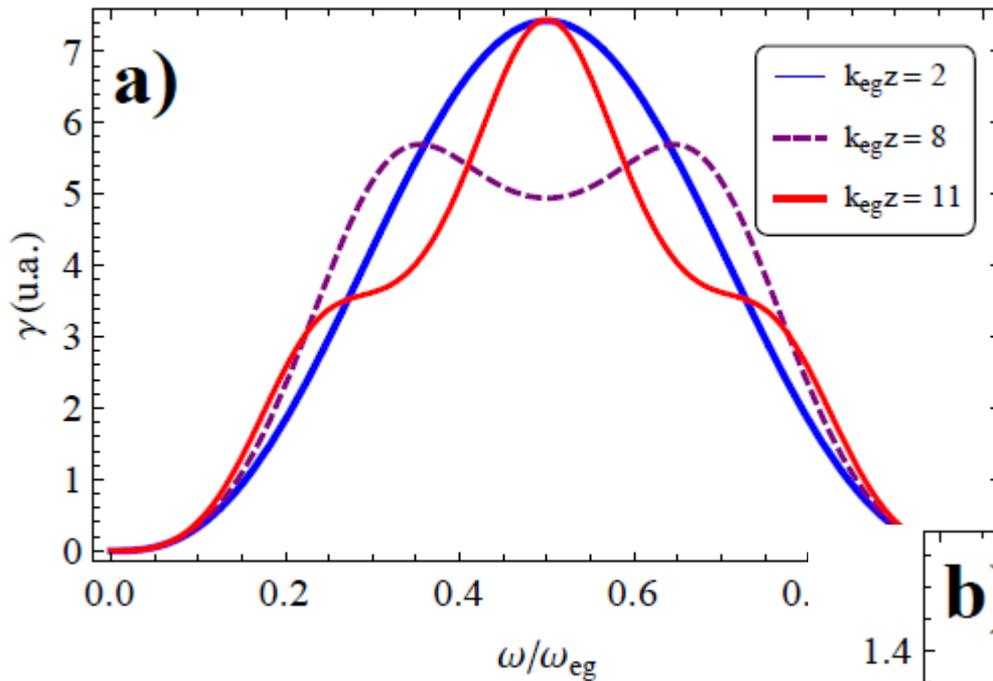
- Consideraremos dois casos: um átomo próximo a **uma placa** condutora e entre **duas placas** condutoras.
- Por simetria, em ambos os casos o **diádico de Green** é **diagonal** na **base cartesiana**.

$$\begin{aligned} P_1(\omega) = P_2(\omega) = P_{\parallel}(\omega) &:= \frac{\bar{\Gamma}_{\parallel}}{\Gamma_o} \\ P_3(\omega) = P_{\perp}(\omega) &:= \frac{\bar{\Gamma}_{\perp}}{\Gamma_o} \end{aligned}$$

- Consideraremos apenas uma transição entre estados esfericamente simétricos (do tipo s), de forma que

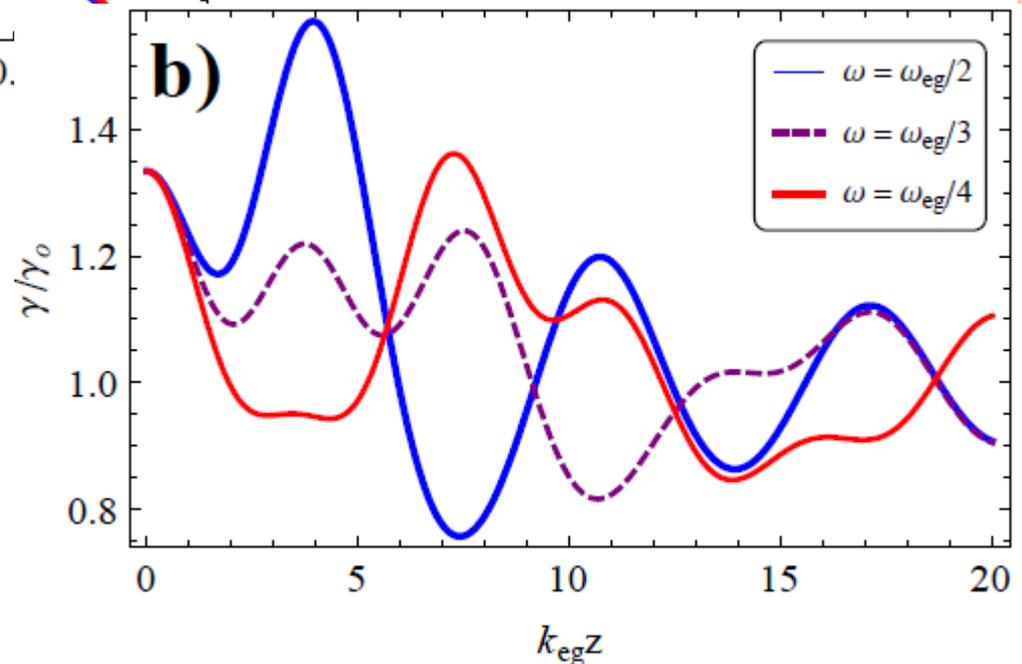
$$\mathbb{D}(\omega_k, \omega_{k'}) = \lim_{\eta \rightarrow 0^+} \sum_n d_{en} d_{ng} \left[\frac{1}{\omega_{en} - \omega_k + i\eta} + \frac{1}{\omega_{en} - \omega_{k'} + i\eta} \right] \mathbb{I} =: D(\omega_k, \omega_{k'}) \mathbb{I}.$$

ÁTOMO PRÓXIMO A UMA PLACA CONDUTORA

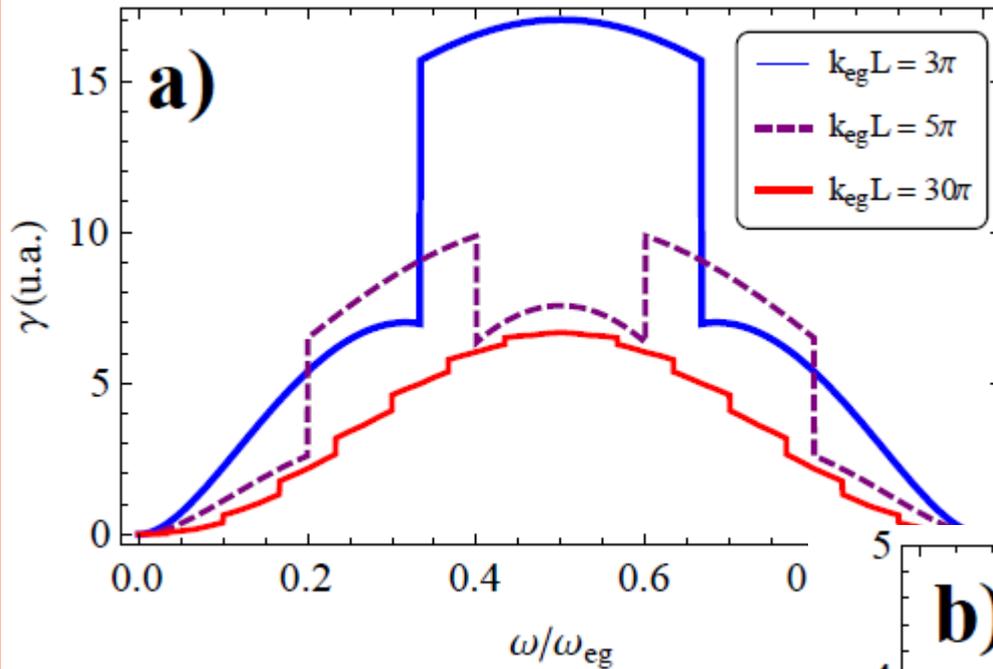


Oscilações anarmônicas para frequências que não sejam iguais à metade da frequência da transição.

É possível alterar não somente a taxa de emissão, como também o espectro.

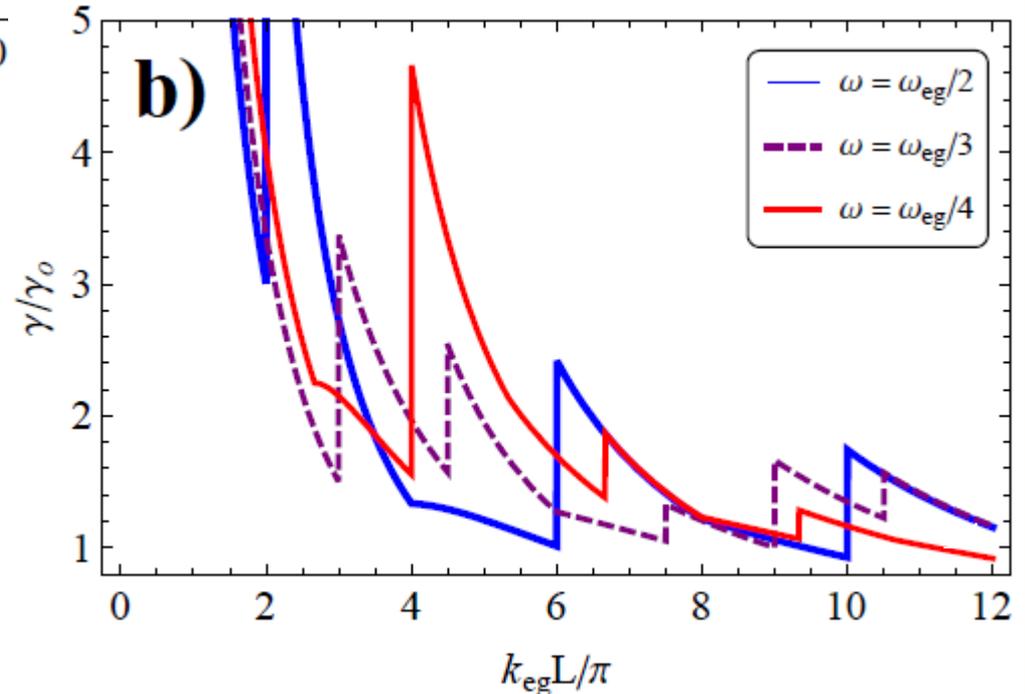


ÁTOMO ENTRE DUAS PLACAS CONDUTORAS



A EEDF não é suprimida nessa situação! É possível suprimir a EE de um fóton e não suprimir a EEDF.

Como reflexo das descontinuidades na densidade de estados, o espectro de emissão também apresenta mudanças abruptas.



COMENTÁRIOS FINAIS

- Fizemos um **estudo de base** do efeito Purcell na **EEDF** dentro do contexto da **EDQ com CC**.
- Recuperamos alguns **resultados conhecidos** com um **formalismo mais simples** e avançamos no entendimento **conceitual** do fenômeno
- Mostramos uma maneira muito **simples** de obter o **espectro de EEDF a partir de resultados conhecidos** para a taxa de EE de um fóton.
- Vimos que as influências de um corpo nas taxas de EE de um e dois fótons são, em geral, **diferentes**.

PERSPECTIVAS

- Investigar aspectos da EE e do efeito Purcell em outros sistemas (**moléculas, semicondutores, pontos quânticos, ...**).
- Outros aspectos da EEDF: **distribuição angular** dos fótons, **emaranhamento, canais de decaimento**.
- Considerar a influência de meios materiais **plasmônicos, metamateriais** ou materiais **bidimensionais** sobre a EE.
- **Controlar** a EE através do efeito Purcell: materiais com propriedades **sintonizáveis** por meio de **agentes externos**.

OBRIGADO!

Material suplementar

EE DE UM ÁTOMO PRÓXIMO A UM MEIO DIELÉTRICO SEMI-INFINITO

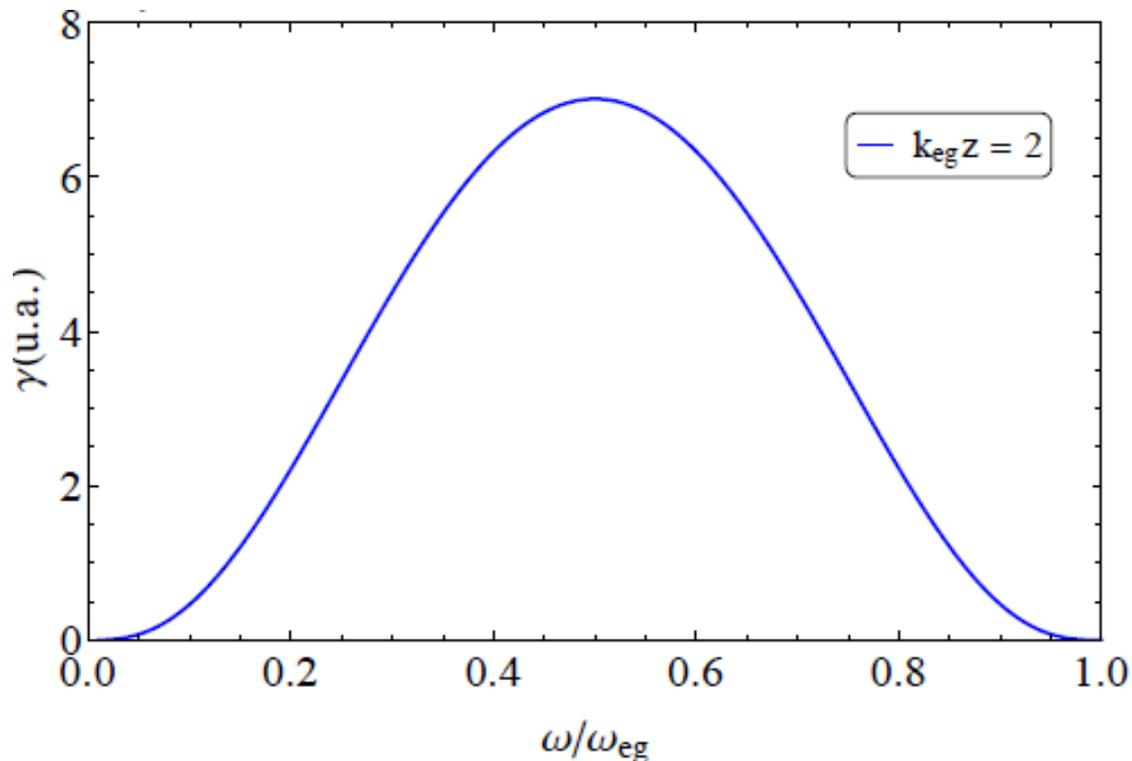
- O problema da reflexão de uma onda EM por um meio homogêneo e semi-infinito é conhecido e leva às conhecidas **equações de Fresnel**.
- Por simplicidade, usamos o **modelo de Lorentz** para o meio material,

$$\frac{\epsilon(\omega)}{\epsilon_0} = 1 + \sum_j \frac{\omega_{pj}^2}{\omega_{Rj}^2 - \omega^2 - i\omega/\tau_j}.$$

- Como função da distância, a taxa de EE possui dois regimes: campo próximo e campo distante.
- O regime de **campo próximo** é caracterizado por um grande aumento da taxa de decaimento, que se dá majoritariamente pela emissão de ondas evanescentes.
- Veremos a seguir gráficos da taxa de EE apenas no regime de **campo distante**.

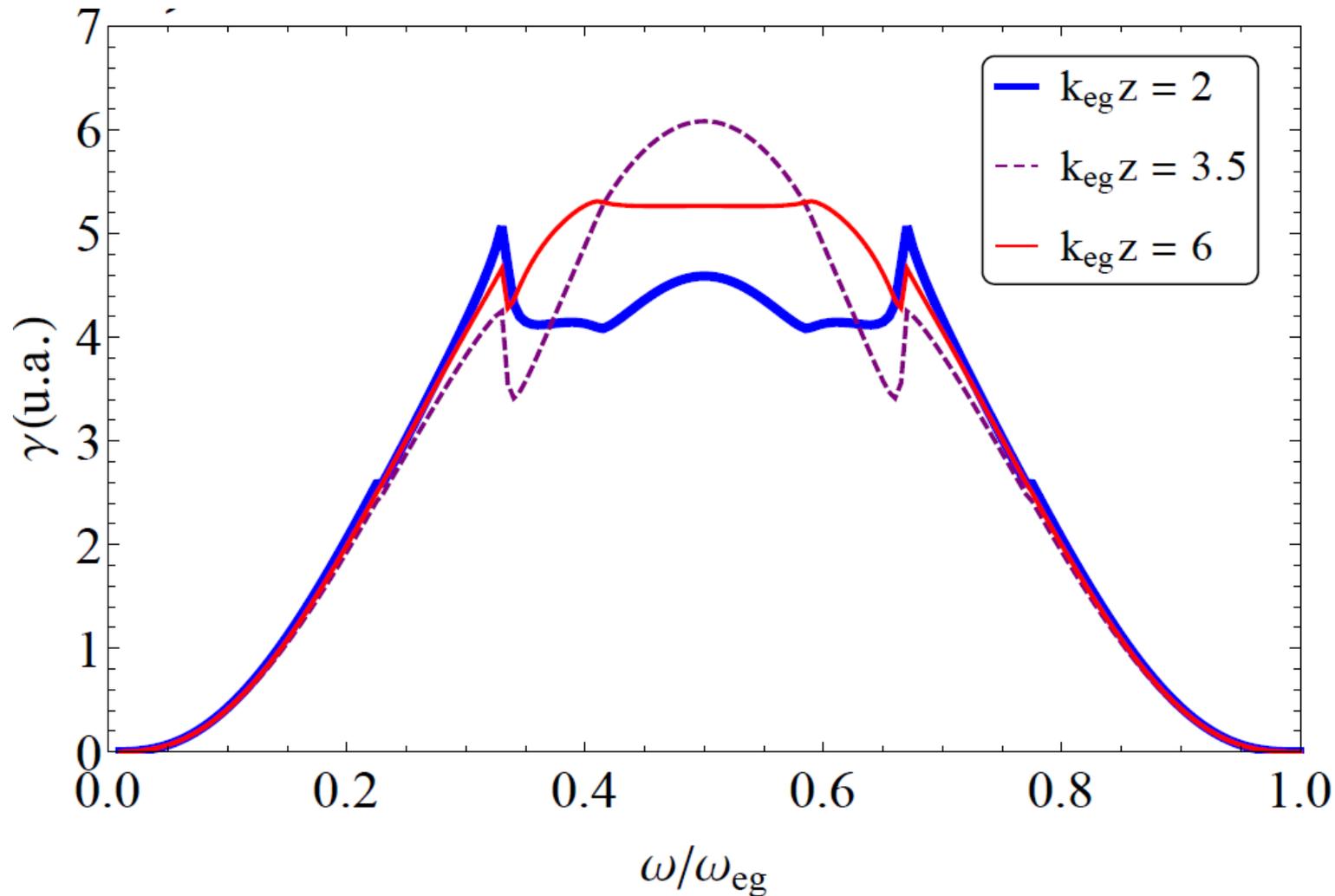
ÁTOMO PRÓXIMO A UM MEIO DIELETRICO

- Existem duas possibilidades: $\omega_{eg} < \omega_R$ e $\omega_{eg} > \omega_R$.
- No **primeiro caso**, no regime de **campo distante** o espectro de emissão não varia muito.



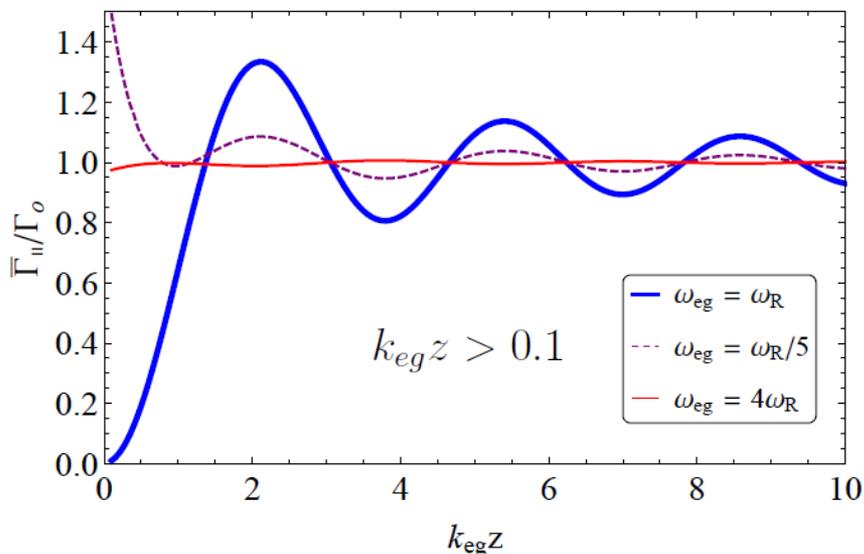
ÁTOMO PRÓXIMO A UM MEIO DIELÉTRICO

- No segundo caso, a ressonância se reflete no espectro de emissão.

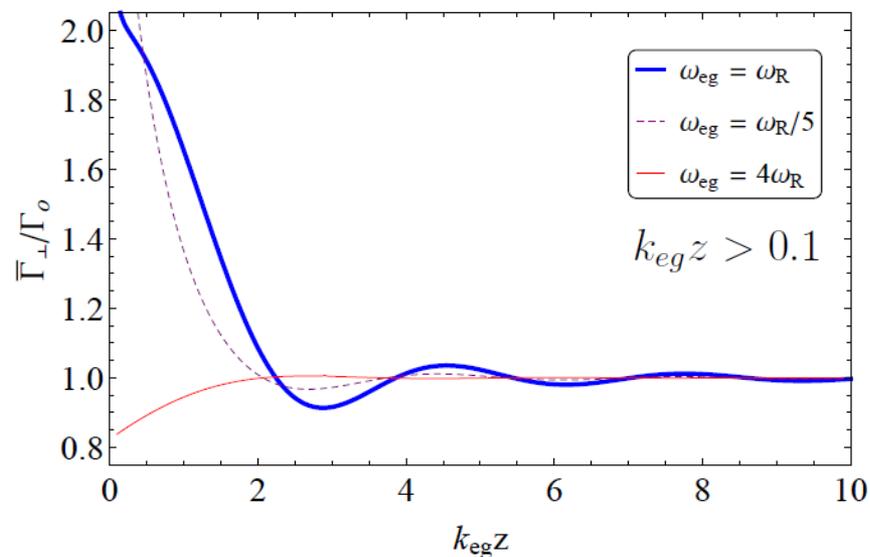


EE DE UM ÁTOMO PRÓXIMO A UM MEIO DIELÉTRICO

a)



b)



- Pequena influência do dielétrico na taxa de EE, exceto quando a frequência da transição é próxima à frequência de ressonância do material.

Átomo próximo a um condutor perfeito:

