

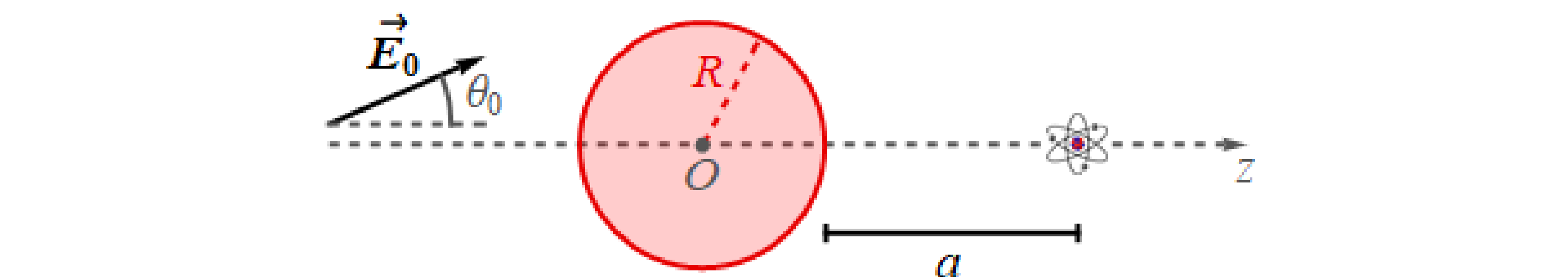
# Controle eletrostático da interação entre um átomo e uma esfera condutora

Victor P. M. de Oliveira, Patrícia P. Abrantes, Reinaldo de Melo e Souza, Carlos Farina

## Introdução

A existência de forças intermoleculares foi aceita há mais de 200 anos, uma vez que moléculas de gases reais interagem o suficiente para que haja liquefação e solidificação, por exemplo. Tais forças receberam o nome genérico de *forças de van der Waals*, primeiramente propostas pelo físico holandês Johannes Diderik van der Waals, em sua dissertação de 1873, e podem ser divididas em três diferentes tipos: orientação, indução e dispersão. A primeira nos diz como ocorre a interação entre moléculas polares. A segunda nos explica como se dá a interação entre uma molécula apolar mas polarizável, e outra polar. Já a terceira, que será de nosso interesse, explica como moléculas apolares, mas polarizáveis, conseguem interagir devido às suas flutuações de carga e corrente, que geram dipolos elétricos instantâneos. Uma explicação mais detalhada de cada uma delas pode ser encontrada em [1], bem como em suas referências.

## Interação átomo-esfera condutora



Queremos ver se é possível controlar o caráter (repulsivo/atrativo) da força entre uma esfera condutora, neutra e isolada e um átomo neutro no estado fundamental, ao submetemos tal sistema a um campo eletrostático uniforme  $\mathbf{E}_0$ . É um resultado conhecido que, devido à ação desse campo externo o átomo se polariza, adquirindo um dipolo induzido e, na superfície da esfera, surge uma distribuição de cargas. Mais especificamente, o campo eletrostático que polariza o átomo é a soma do campo externo  $E_0$  com o campo criado pelas cargas induzidas na superfície da esfera. No entanto, no regime de distâncias a ser considerado nesse trabalho, pode-se mostrar que o campo eletrostático criado pelo dipolo induzido no átomo em pontos da superfície da esfera é desprezível comparado com  $E_0$ . Dessa forma, não é difícil mostrar que a componente z da força eletrostática resultadnte exercida pela esfera sobre o átomo é dada por:

$$F_z^{(el)} = \frac{3E_0^2 \alpha_a R^3}{a^4} \left\{ 1 - \frac{R^3}{a^3} - 3 \cos^2 \theta_0 \left( 1 + \frac{R^3}{a^3} \right) \right\} \quad (1)$$

Já a força dispersiva exercida pela esfera sobre o átomo é extremamente complicada. No entanto, se supusermos que o raio da esfera seja bem menor do que a distância do átomo à esfera, a energia potencial dispersiva entre o átomo e a esfera, embora ainda complicada, assume uma forma mais simples, a saber:

$$U(r) = -\frac{\hbar}{4\pi\epsilon_0^2} \frac{R^3}{r^6} \int_0^\infty \alpha(i\xi) \exp\left(-\frac{2\xi r}{c}\right) \left[ 3 + 6\left(\frac{\xi r}{c}\right) + 5\left(\frac{\xi r}{c}\right)^2 + 2\left(\frac{\xi r}{c}\right)^3 + \left(\frac{\xi r}{c}\right)^4 \right] d\xi, \quad (2)$$

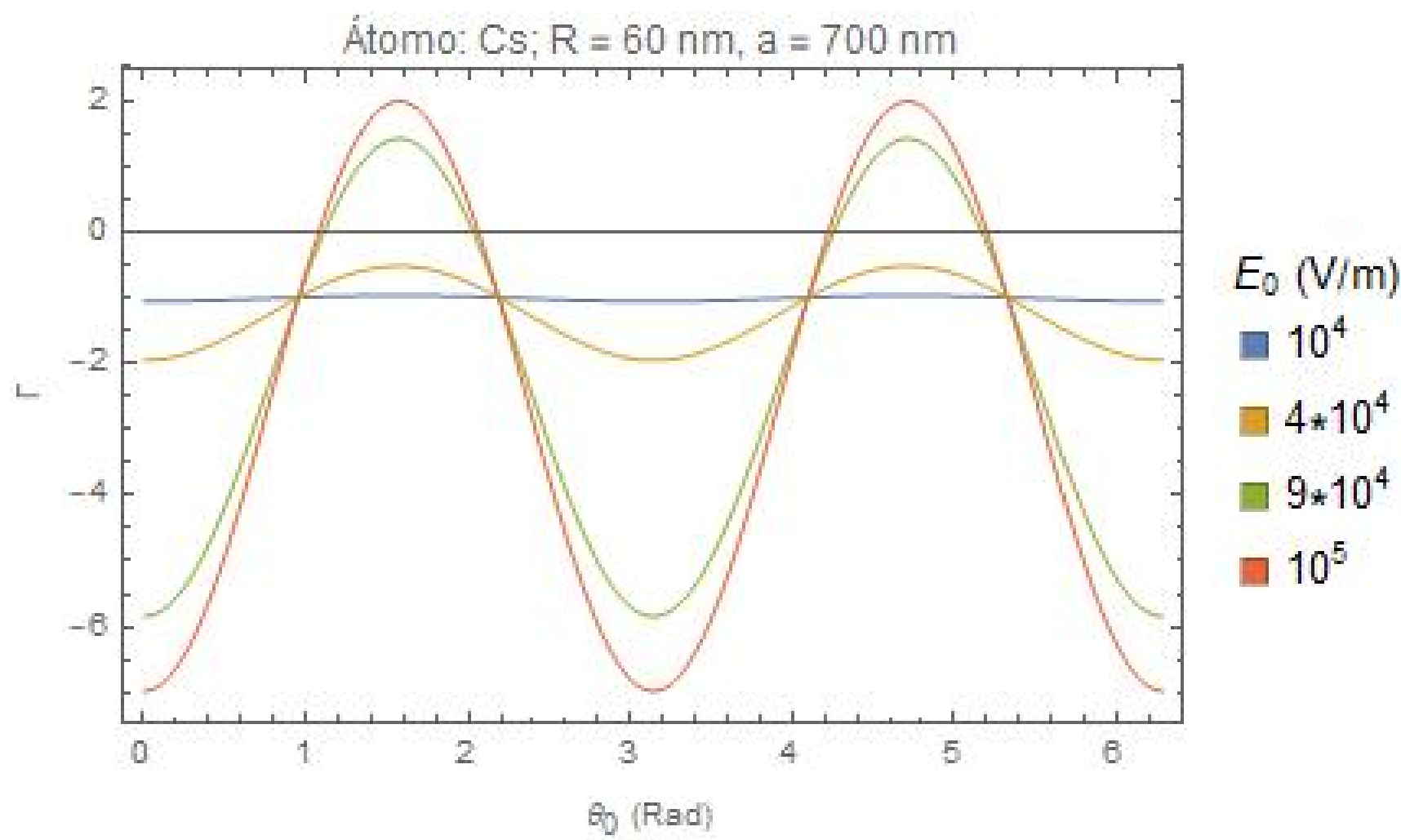
onde  $r = R + a$  e enfatizamos que essa fórmula só é válida para  $r \gg R$ . A força dispersiva exercida pela esfera condutora sobre o átomo (que tem apenas componente em z) é obtida simplesmente calculando  $F_d(r) = -\frac{\partial U(r)}{\partial r}$ . Pode-se mostrar que a influência do campo externo na polarizabilidade do átomo para os valores de campo a serem considerados é desprezível, de modo que, com ótima aproximação, a força dispersiva sobre o átomo é igual àquela exercida pela esfera na ausência de campo elétrico. Temos contudo que a fórmula só será válida para distâncias  $r$  tais que  $r \gg R$ . Não obstante, podemos definir a força resultante sobre o átomo como sendo  $F_{res} = F_z^{(el)} + F_s$ , e dela consideramos a razão:

$$\Gamma = \frac{F_{res}}{|F_d|} \quad (3)$$

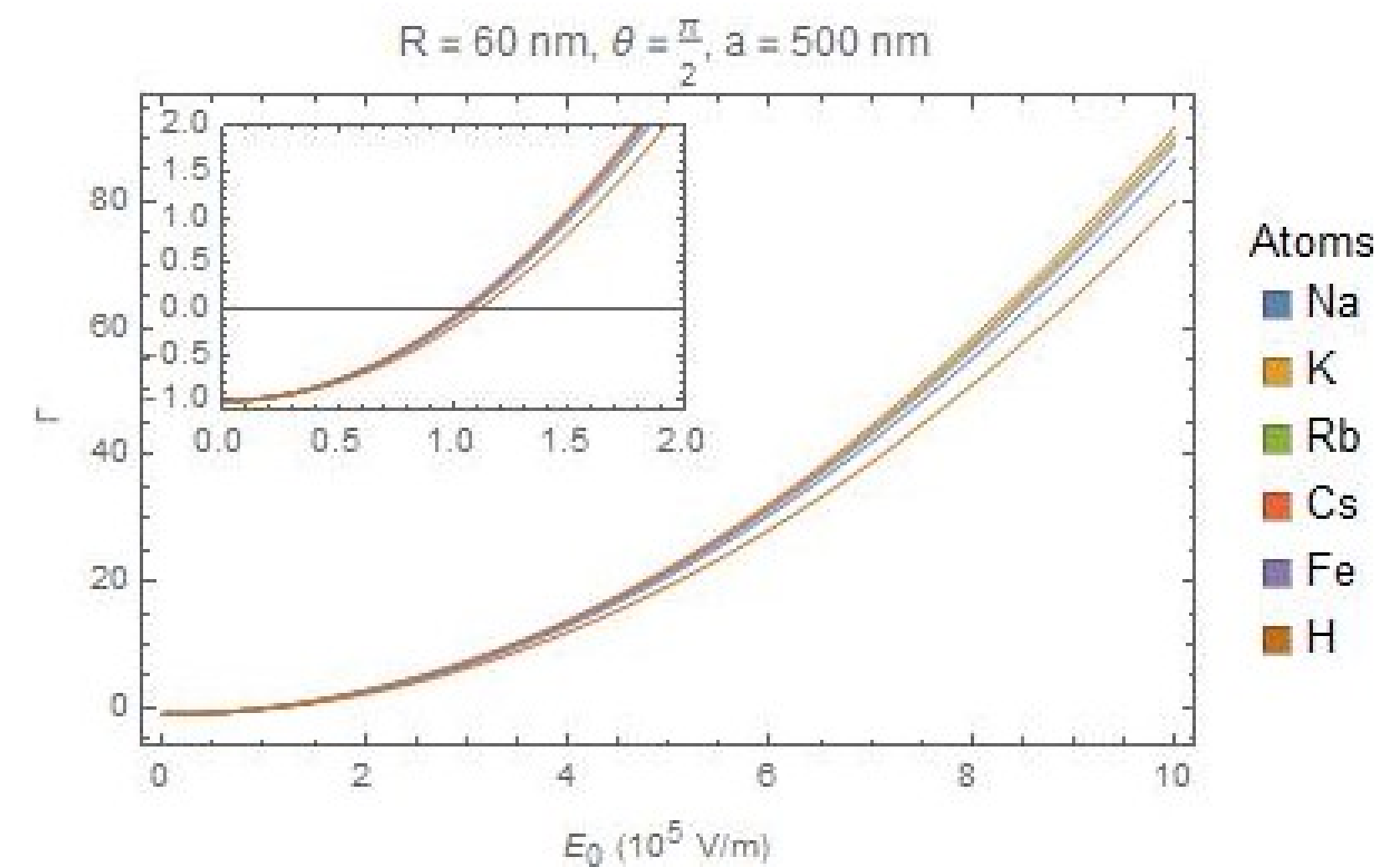
Nosso objetivo consiste em analisar em que situações teremos  $\Gamma > 0$ .

## Resultados

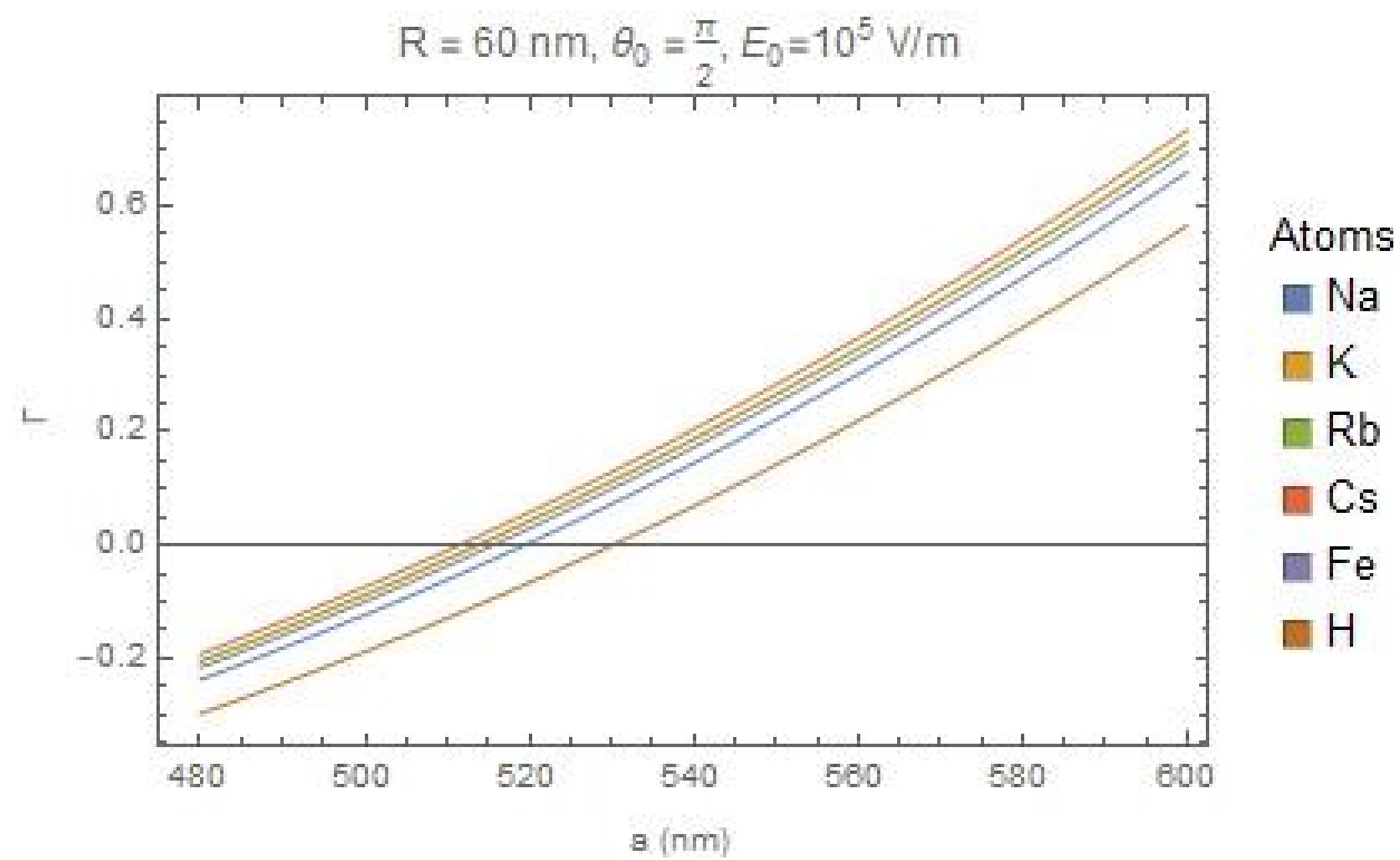
Inicialmente, investigaremos como a componente z da força eletrostática sobre o átomo varia quando variamos a orientação do campo externo  $\mathbf{E}_0$ .



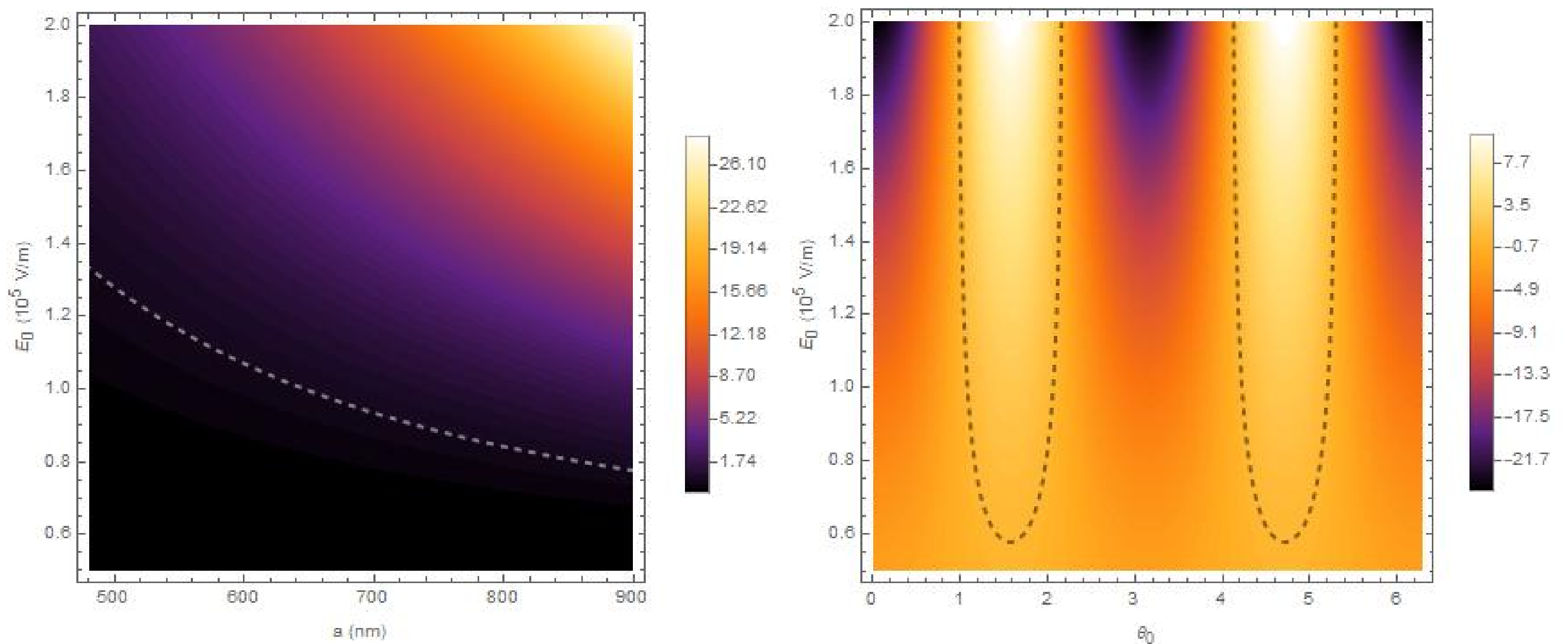
Concluímos que o ângulo que faz a força resultante assumir seu valor positivo máximo, independentemente da magnitude de  $\mathbf{E}_0$  é  $\theta_0 = \pi/2$ . Naturalmente também nos interessa estudar o comportamento de  $\Gamma$  ao variarmos  $\mathbf{E}_0$  e, em particular, gostaríamos de ver se é possível alterar o sinal de  $\Gamma$  para campos com valores atingíveis em laboratório. A figura a seguir mostra como a razão  $\Gamma$  varia com  $E_0$ :



A escolha de átomos foi feita a partir dos dados de [3]. Sendo assim existem de fato campos atingíveis em laboratório para os quais é possível controlar a força entre a esfera e um dos átomos estudados. De fato nota-se que com  $E_0 = 0.8 \sim 1.2 \times 10^5 \text{ V/m}$ , a força resultante sobre o átomo já consegue trocar de sinal. Podemos ainda estar interessados em ver como se altera  $\Gamma$  ao variarmos a distância  $a$  dados  $R$  e  $E_0$  fixos. Assim:



E, novamente, apenas variando a distância também é possível vermos uma alteração no caráter da força de interação, passando de atrativa para repulsiva. Podemos ainda variar os parâmetros simultaneamente e observar o comportamento de  $\Gamma$  nos seguintes gráficos de contorno. Em ambos os gráficos no eixo vertical estão os valores de  $E_0$  ao passo que no eixo horizontal do gráfico à esquerda temos a distância do átomo à esfera e no da direita temos o ângulo  $\theta_0$



Estes gráficos de contorno foram feitos para o átomo de célio. As linhas pontilhadas correspondem ao valor de força resultante nula e, portanto, separam as regiões de força atrativa e repulsiva.

## Conclusão

Vimos então que ao consideramos o sistema átomo-esfera submetido a um campo eletrostático externo  $\mathbf{E}_0$ , a força eletrostática entre tais objetos consegue superar a força dispersiva, que no sistema átomo-esfera possui caráter sempre atrativo. Desse modo, conseguimos controlar o sinal da força resultante através da variação de parâmetros do sistema, como  $E_0$ ,  $\theta_0$  e  $a$ . Como perspectiva, queremos ainda explorar a possibilidade de controle do sinal da força resultante mas, no lugar de uma esfera condutora perfeita, considerando esferas metálicas e dielétricas.

## Referências

- [1] Reinaldo de Melo e Souza, W. J. M. Kort-Kamp, C. Sigaud, and C. Farina, Image method in the calculation of the van der Waals force between an atom and a conducting surface, *Am. J. Phys.* **81**, 366 (2013)
- [2] Joshua L. Hemmerich et al., Impact of Casimir-Polder interaction on Poisson-spot diffraction at a dielectric sphere, *Phys. Rev. A* **94**, 023621 (2016)
- [3] Nail Khusnutdinov, Rashid Kashapov, and Lilia M. Woods, Casimir-Polder effect for a stack of conductive planes, *Phys. Rev. A* **94**, 012513 (2016)