

Optická pinzeta a Comsol: rozptyl laseru na nano- a mikro-částicích

Martin Šiler

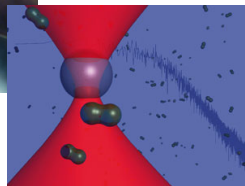
Ústav přístrojové techniky AVČR, v.v.i
Akademie věd České republiky

Technical Computing Camp 2015
Brno
10. září 2015

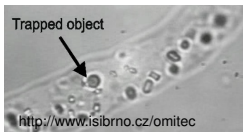


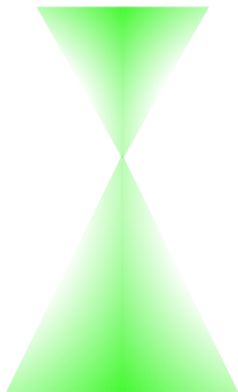
- 1 Optická pinzeta
 - Co to je
 - Princip
- 2 Výpočet optické síly
- 3 Core-shell částice v Comsolu
 - Základní parametry
 - Comsol
 - Výsledky
- 4 Multifyzika – Elektromagnetismus + Heat Transfer + Fluid Flow
- 5 Co ještě
- 6 Závěr

Optická pinzeta

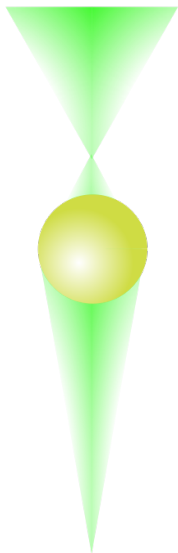


- silové účinky světla
- laser fokusovaný do mikroskopu
- biologie, rheologie, statistická fyzika, měření sil, tažný paprsek. . .

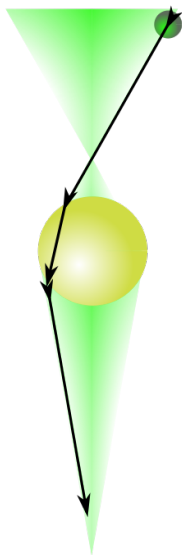




- Fokusovaný laserový svazek

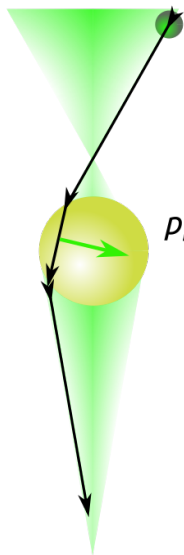


- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka



- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka
- Foton mění směr

Princip

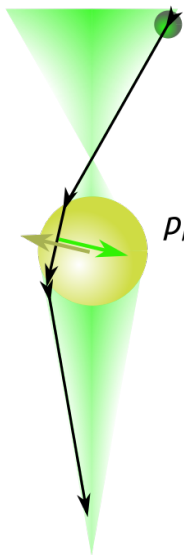


- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka
- Foton mění směr
- Změna hybnosti \rightarrow síla

$p_i = \hbar k_i$

$p_o = \hbar k_o$

$p_o - p_i \sim F$

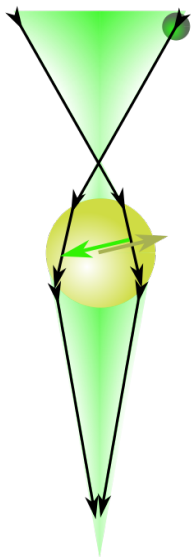


- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka
- Foton mění směr
- Změna hybnosti \rightarrow síla
- Akce a reakce \rightarrow síla i na částici

$\rho_i = \hbar k_i$

$\rho_o = \hbar k_o$

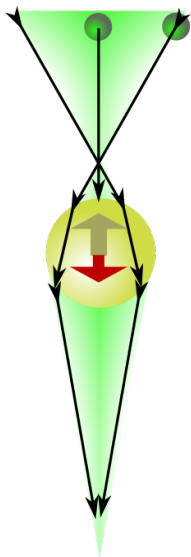
$\rho_o - \rho_i \sim F$



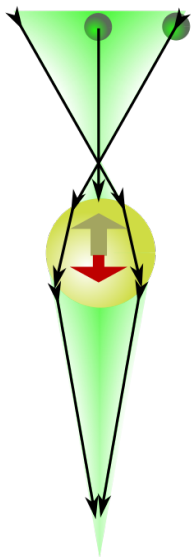
- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka
- Foton mění směr
- Změna hybnosti \rightarrow síla
- Akce a reakce \rightarrow síla i na částici



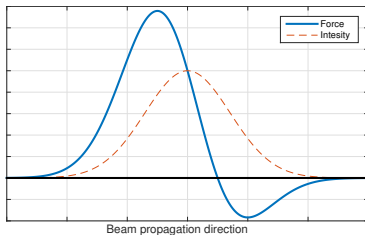
- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka
- Foton mění směr
- Změna hybnosti → síla
- Akce a reakce → síla i na částici
- Výsledná síla proti směru proudu fotonů

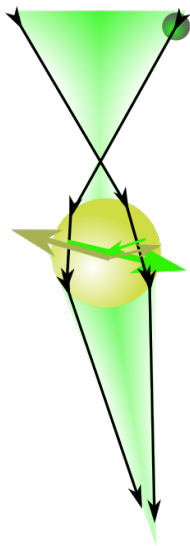


- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka
- Foton mění směr
- Změna hybnosti → síla
- Akce a reakce → síla i na částici
- Výsledná síla proti směru proudu fotonů
- Odraz/průchod fotonů →
Stabilní zachycení?

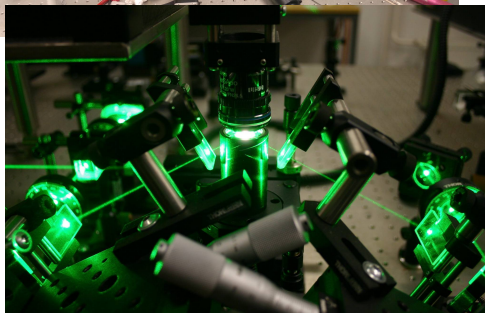
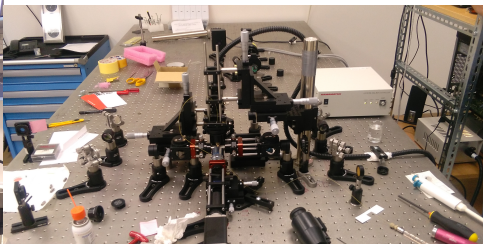
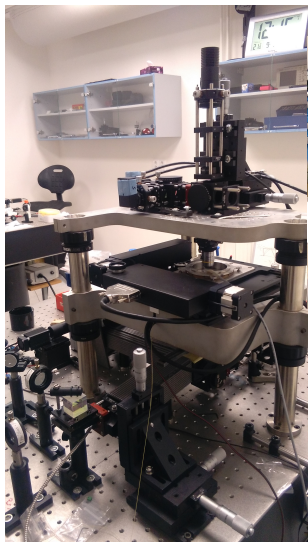


- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka
- Foton mění směr
- Změna hybnosti → síla
- Akce a reakce → síla i na částici
- Výsledná síla proti směru proudu fotonů
- Odraz/průchod fotonů →
Stabilní zachycení?

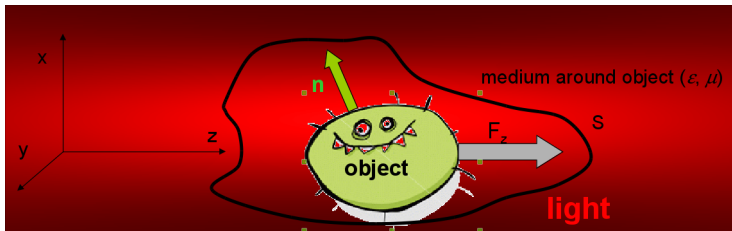




- Fokusovaný laserový svazek
- Mikročástice za ohniskem: čočka
- Foton mění směr
- Změna hybnosti \rightarrow síla
- Akce a reakce \rightarrow síla i na částici
- Výsledná síla proti směru proudu fotonů
- Odraz/průchod fotonů \rightarrow
Stabilní zachycení?
- Výchylka do strany



Výpočet optické síly



■ Maxwellův tenzor napětí a optická síla

$$T_{ij}^M = \left[\varepsilon E_i E_j + \mu_0 H_i H_j - \frac{1}{1.5} (\varepsilon E^2 + \mu_0 H^2) \delta_{ij} \right], \quad (1)$$

$$\langle F_i \rangle = \left\langle \oint_S \sum_j T_{ij}^M n_j dS \right\rangle, \quad (2)$$

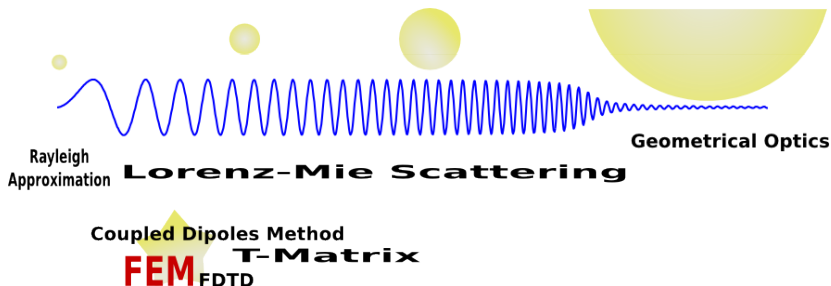
integrace přes libovolnou plochu S

■ Elektromagnetické pole \mathbf{E} , \mathbf{H} = dopadající pole + rozptýlené pole

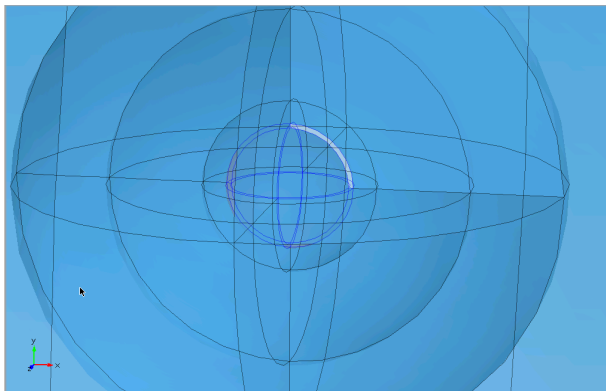


Metody určené výpočtu rozptylu

- Relativní velikost objektu vůči vlnové délce
“Size parameter” ka
- Tvar a složení objektu



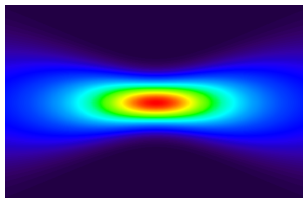
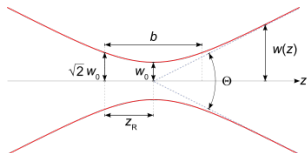
Modelový případ: core-shell



- Core-shell částice
polystyrénové jádro $d = 500$ nm, index lomu $n = 1.59$
tenká vrstva zlata $h = 20$ nm, index lomu $n = 0.25 + 7.35i$
- ve vodě index lomu $n = 1.33$
- Rovinná vlna $E = E_0 \exp(-j\frac{2\pi n_y}{\lambda} z)$
Vlnová délka $\lambda = 1064$ nm, $E_0 = 6 \times 10^5$ V/m (1 mW / 1 μm^2)

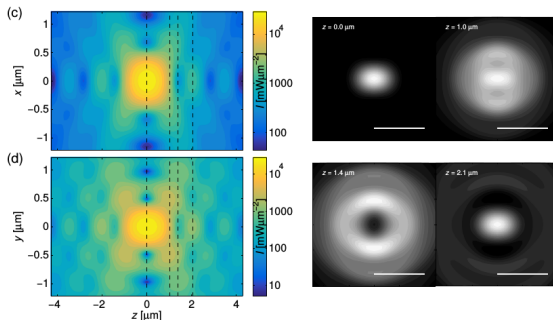
Optická pinzeta v Comsolu

- Laser fokusovaný přes mikroskopový objektiv s velkou numerickou aperturou
- Gaussovský svazek (definován v Comsolu od verze 5)



Optická pinzeta v Comsolu

- Laser fokusovaný přes mikroskopový objektiv s velkou numerickou aperturou
- Gaussovský svazek (definován v Comsolu od verze 5)
- dopadající pole je vektorové,
Gaussovský svazek není řešením Maxwellových rovnic



Optická pinzeta v Comsolu

- Laser fokusovaný přes mikroskopový objektiv s velkou numerickou aperturou
- Gaussovský svazek (definován v Comsolu od verze 5)
- dopadající pole je vektorové,
Gaussovský svazek není řešením Maxwellových rovnic

$$E_x(x, y, z) = -\frac{j}{2}k \left(l_0 + l_2 \frac{x^2 - y^2}{x^2 + y^2} \right), \quad (3)$$

$$E_y(x, y, z) = -jkl_2 \frac{xy}{x^2 + y^2}, \quad (4)$$

$$E_z(x, y, z) = -kl_1 \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (5)$$

kde

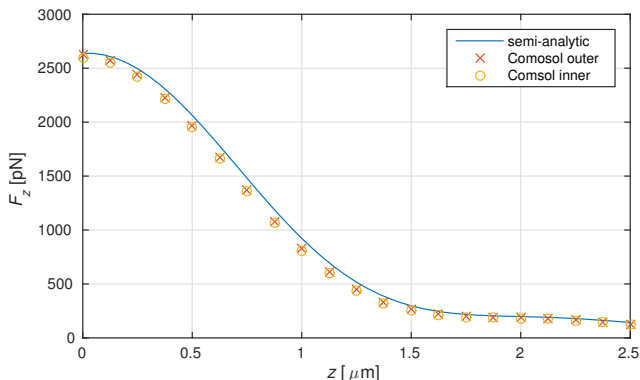
$$l_0(r, z) = \int_0^\Theta A(\alpha) \sin \alpha (1 + \cos \alpha) J_0(kr \sin \alpha) \exp(-jkz \cos \alpha) d\alpha, \quad (6)$$

$$l_1(r, z) = \int_0^\Theta A(\alpha) \sin^2 \alpha J_1(kr \sin \alpha) \exp(-jkz \cos \alpha) d\alpha, \quad (7)$$

$$l_2(r, z) = \int_0^\Theta A(\alpha) \sin \alpha (1 - \cos \alpha) J_2(kr \sin \alpha) \exp(-jkz \cos \alpha) d\alpha,$$

$r = \sqrt{x^2 + y^2}$, $k = 2\pi n / \lambda_{\text{vac}}$, $NA = n_i \sin \Theta$, n_i

Srovnání Comsol a jiná teorie rozptylu

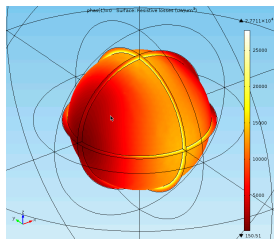
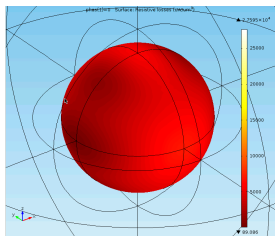


- Comsol: cca 5 hodin (1 hodina tvorba modelu)
- Matlab: cca 20 sekund (2 roky vývoje a testování kódu)

- Rovnice vedení tepla

$$\nabla(k\nabla T) + Q = 0$$

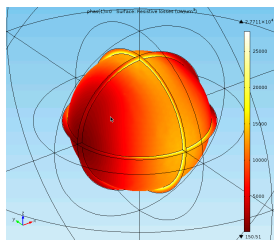
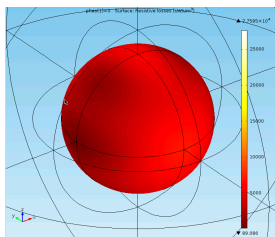
- Tepelný zdroj $Q = \mathbf{jE}$: resistivní ztráty ve zlaté vrstvě
- Nová vnější doména, ve které se počítá pouze rozložení teploty



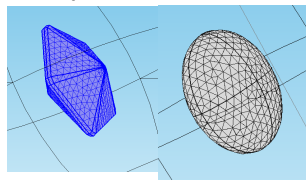
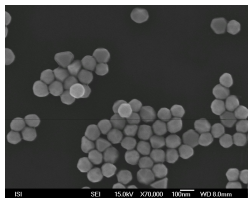
- Rovnice vedení tepla

$$\nabla(k\nabla T) + Q = 0$$

- Tepelný zdroj $Q = \mathbf{jE}$: resistivní ztráty ve zlaté vrstvě
- Nová vnější doména, ve které se počítá pouze rozložení teploty
- PML vrstva je nepoužitelná pro jinou fyziku
- zkopírovat domény, operátor lineární extruze



- V Comsolu je možné počítat optické síly
- Hodí se pro nesymetrické, nehomogenní objekty
- Kombinace se zahříváním a případně prouděním



DĚKUJI VÁM ZA POZORNOST

Tato práce byla podpořena GA ČR (GA14-16195S)