Atomok és fény kölcsönhatása a femto- és attoszekundumos időskálán

LIMIT: Light-Matter Interaction Theory Group

Szegedi Tudományegyetem Elméleti Fizikai Tanszék

Benedict Mihály
Czirják Attila
Földi Péter
Dömötör Piroska
Majorosi Szilárd
Szabó Lóránt
Szaszkó-Bogár Viktor
Gombkötő Ákos, Hack Szabolcs, Jenei Máté, Lupsics Balázs, Magashegyi István
(Ayadi Viktor, Almási Alex)

Hungarian Scientific Research Fund „OTKA” Contract No. T81364,

Support by the European Union and the European Regional Development Fund

TAMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0060,

TAMOP-4.2.2.C-11/1/KONV-2012-0010,

HUNGARY'S RENEWAL

The projects are supported by the European Union and co-financed by the European Social Fund.

NEW SZÉCHENYI PLAN

FOTON / ELEKTRON	Mező, klasszikus térmennyiségek [Maxwell-elmélet]	Kvantált térmennyiségek [Diszkrét módusenergia, “Foton-kép”]
Pálya, áramok [Pont, “töltött por” Mechanika, hidrodinamika]	Klasszikus elektron, klasszikus retardált terek, sugárzás	Klasszikus áram, Poisson foton
Mező, térmennyiségek Átmeneti áramok [Hullámmechanika, Kvantummechanika]	Szemiklasszikus leírás [Schrödinger-, Dirac-egyenlet és Maxwell-terek]	Kvantum átmeneti áram, Általános foton, nemklasszikus állapotok
Kvantált elektrontér [Elektron – Pozitron tér]	Párkeltés külső elektromos és mágneses telekben [Kvantum elektrodinamika]	Kvantum Elektrodinamika [QED , “kritikus terek”, párkeltés, etc…]

1) A csoport kutatási témái alapvető fizikai kérdésekhez kapcsolódnak:

- Atomok és e.m. mező kvantumelmélete
- A nemrelativisztikus és relativisztikus kvantumelmélet kérdései
- A kvantumos összefonódás jelensége
- Spintronika félvezetőkben

2) A témák kapcsolódnak az ELI ALPS kutatási profiljához

- Optikai alagutazás, alagutazási idő, kvantumos és klasszikus modellek, fázistér
- Kvantumos összefonódás megjelenése erős lézertérbeli ionizáció és újraszóródás esetén
- Elektron szórás nanorészecskéken lézertér jelenlétében
- Nemlineáris Thomson-szórás, relativisztikus elektron és intenzív lézerimpulzus kölcsönhatása
- Elektromos töltésszétválasztás szigetelőkben intenzív néhány ciklusú lézerimpulzusokkal
- Relativisztikus elektrontranszport oszcilláló potenciálgáton
- Fényszórás fém nanorészecskéken

A fény pályamenti impulzusmomentuma

- A térben terjedő elektromágneses hullám impulzusmomentumot hordozhat

  Ez lehet a hullám polarizációjával kapcsolatos spin: fotononként +ħ vagy –ħ

  De lehet a hullám fázisának térbeli eloszlásához kötődő pályamenti impulzusmomentum is.
- Az exp[$il\theta$] szögfüggésű nyalábok l pályamenti impulzusmomentumot hordoznak.
- Az ilyen hullámok az un. Laguerre-Gauss nyalábok.

  Csavart fázisfelületük van: z irányba haladó hullám esetén :

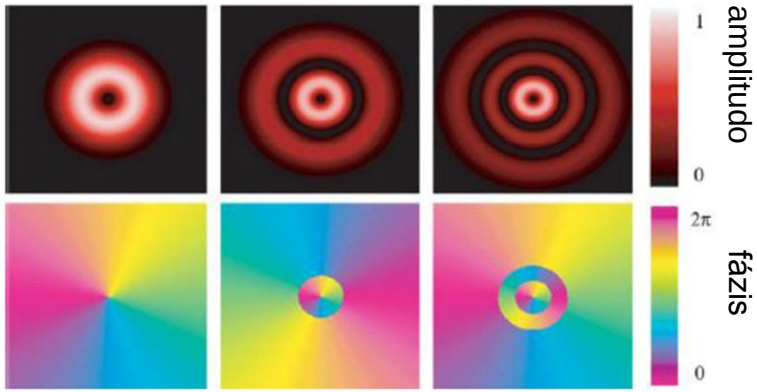
$$u_{lp} = \frac{C_{lp}}{w(z)}\left[\frac{r\sqrt{2}}{w(z)}\right]^{|l|} \exp\left[\frac{-r^2}{w^2(z)}\right] \exp\left[\frac{ikr^2 z}{2(z^2+z_R^2)}\right] \exp[il\theta] *$$

$$* \exp\left[-i(2p+|l|+1)\tan^{-1}\left(\frac{z}{z_R}\right)\right] L_p^{|l|}\left(\frac{2r^2}{w^2(z)}\right),$$

Két kvantumszám: l és p

$l=1$

$p=0$ $p=1$ $p=2$



Animáció

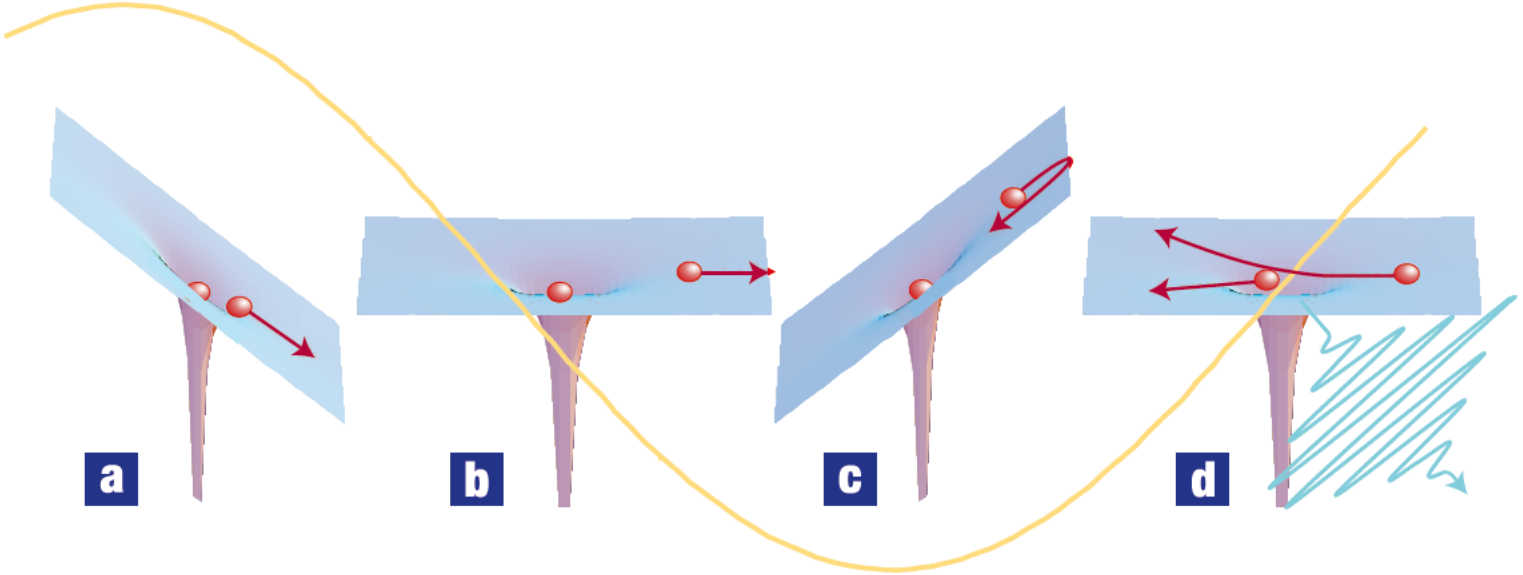
Kérdések:

(1) Hasonló ekzakt megoldások keresése

(2) Hogyan adja át az impulzusnyomatékot ez a hullám részecskéknek?

Számolni szeretőknek ajánlott!

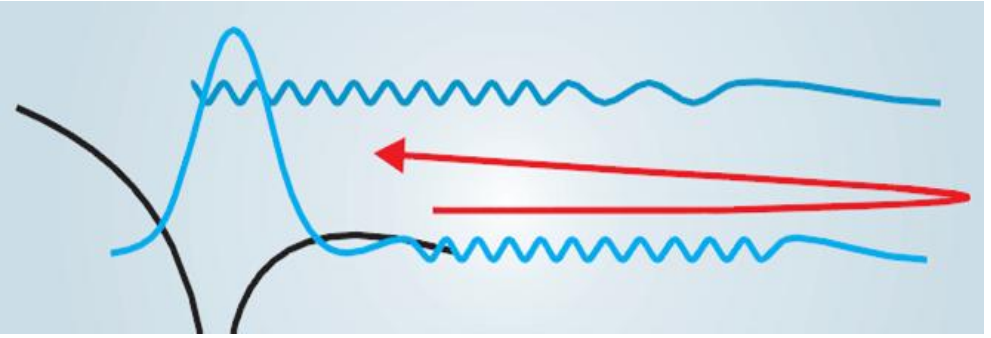
Atomok erős lézertérben



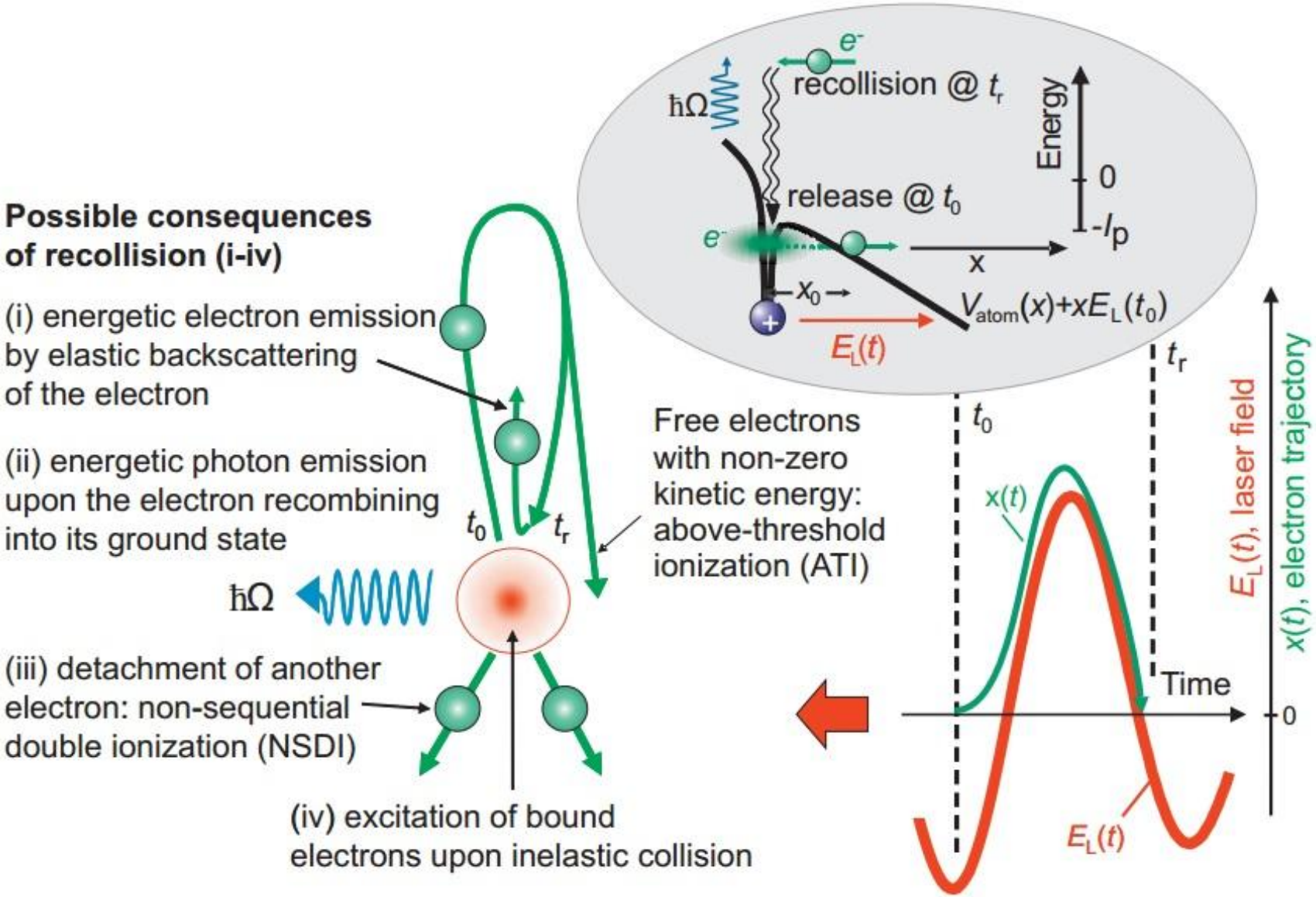
P. Corkum, F. Krausz, Nat. Phys. **3**, 381 (2007)

M. Lewenstein et al., Phys. Rev. A **49** 2117(1994)

P. B. Corkum, Phys. Rev. Lett. **71**, 1994 (1993)

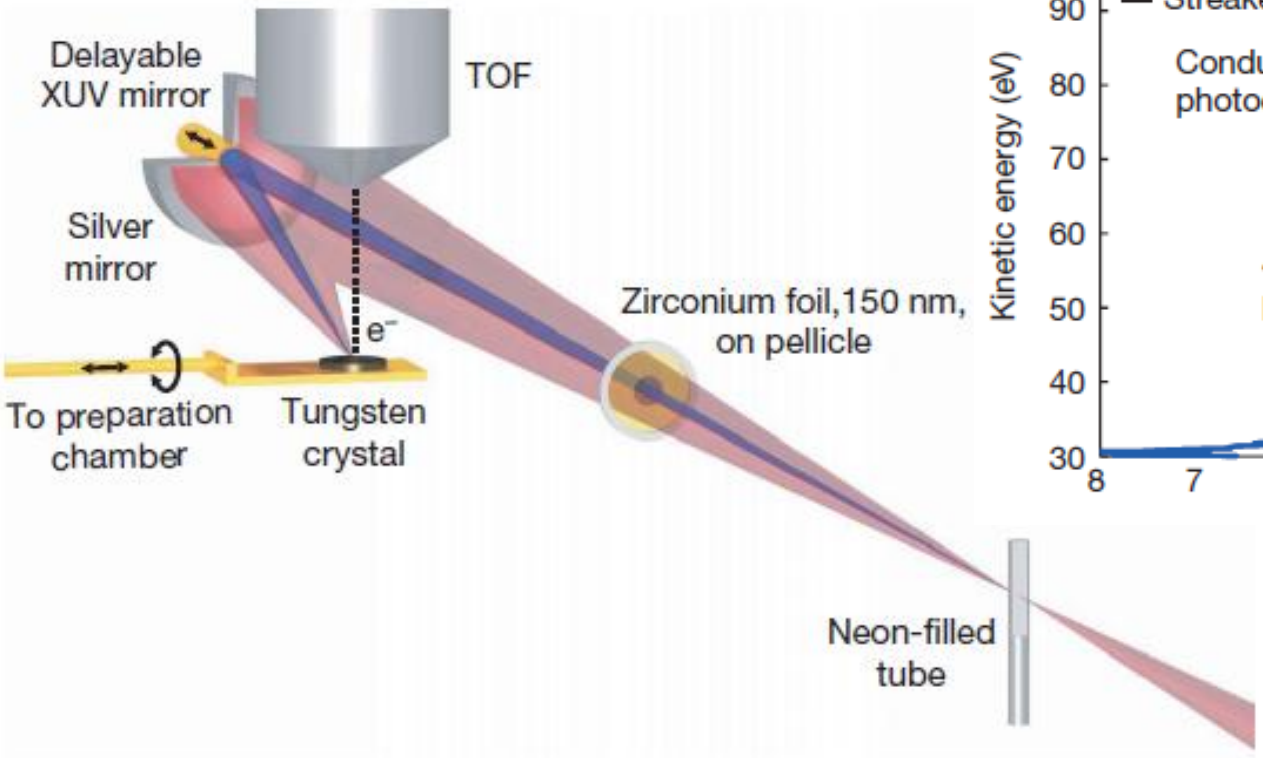


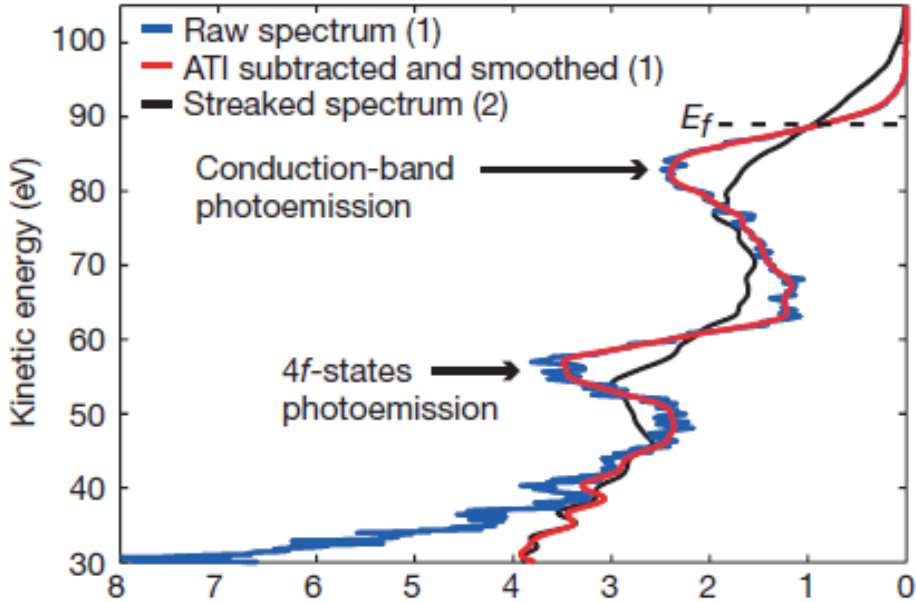
Optikai alagutazás

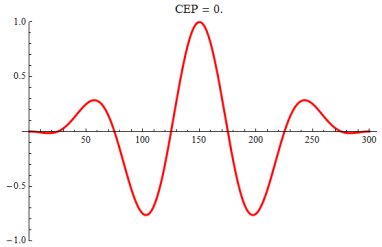


[1] F. Krausz and M. Ivanov. Attosecond physics. Reviews of Modern Physics, 81, 2009.

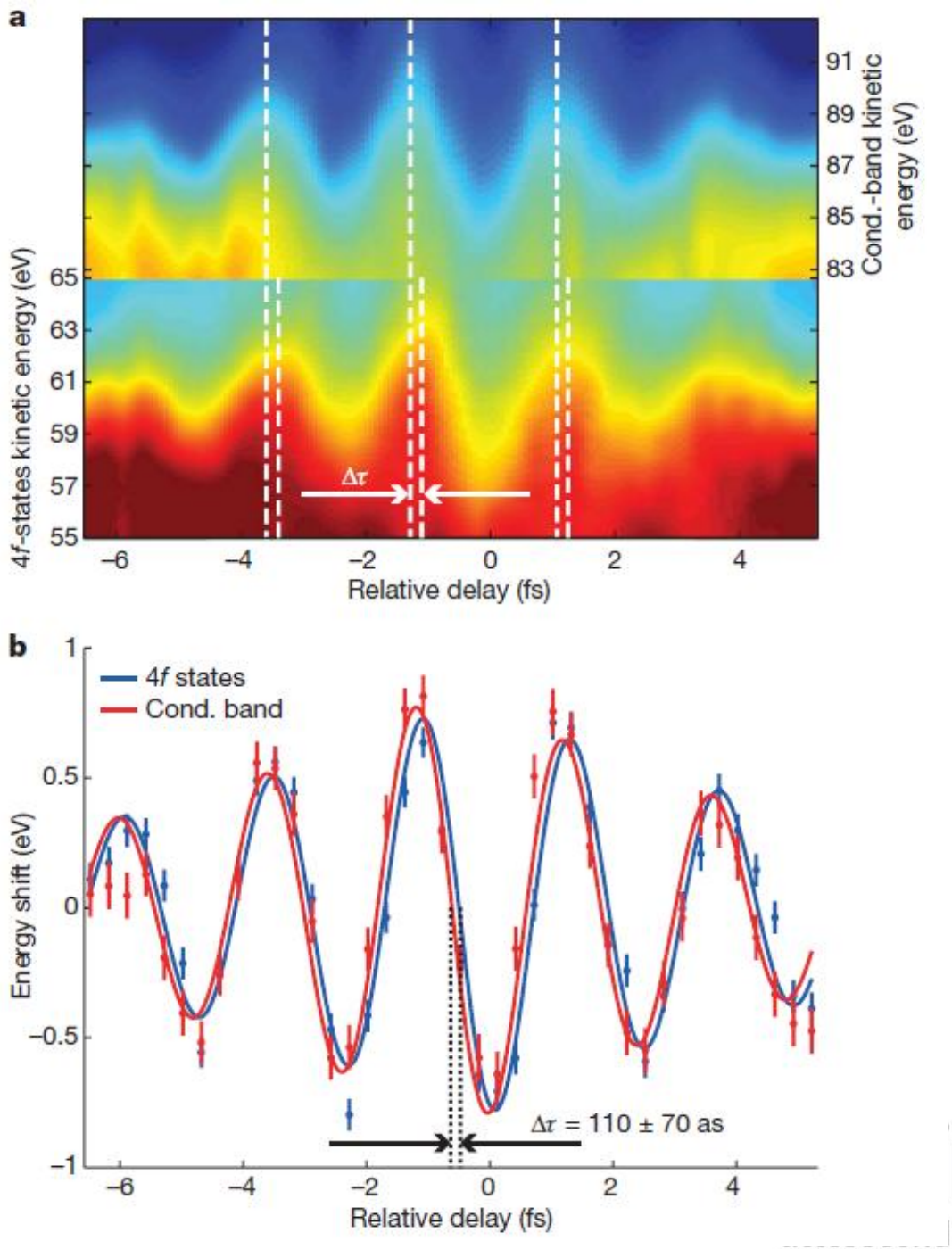
Attosec. pumpa–próba kísérletek







Cavalieri et. al. Nature 2007



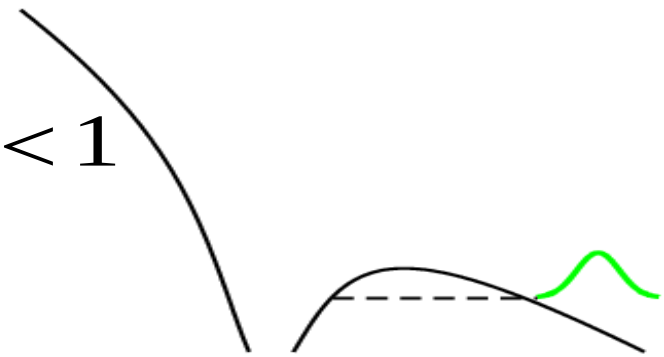
Cavalieri et. al. Nature 2007

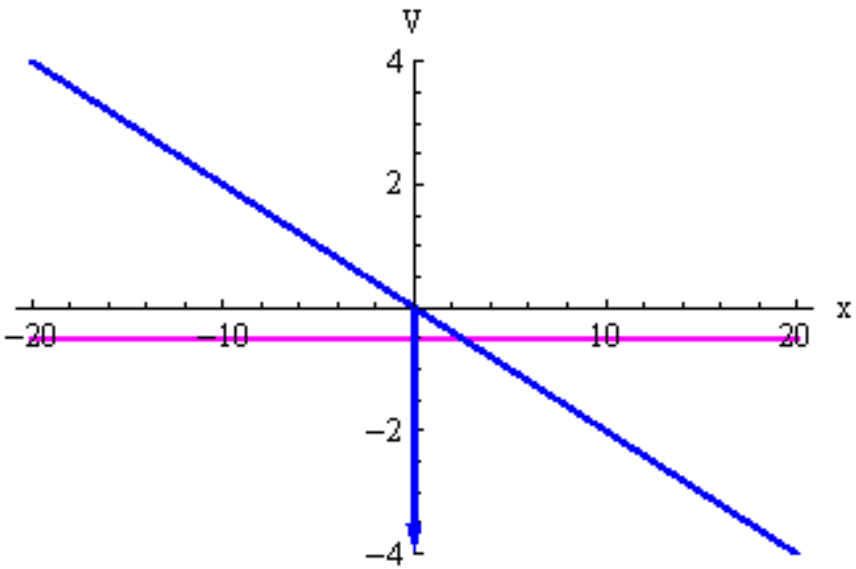
Egyszerű 1D TDSE modell

- Lin. pol. lézerimpulzus, elektromos mező, hossz-mérték, Dirac-delta atomi potenciál

$$\gamma = \sqrt{\frac{I_P}{2U_P}}$$

$\gamma < 1$





Wigner-függvény

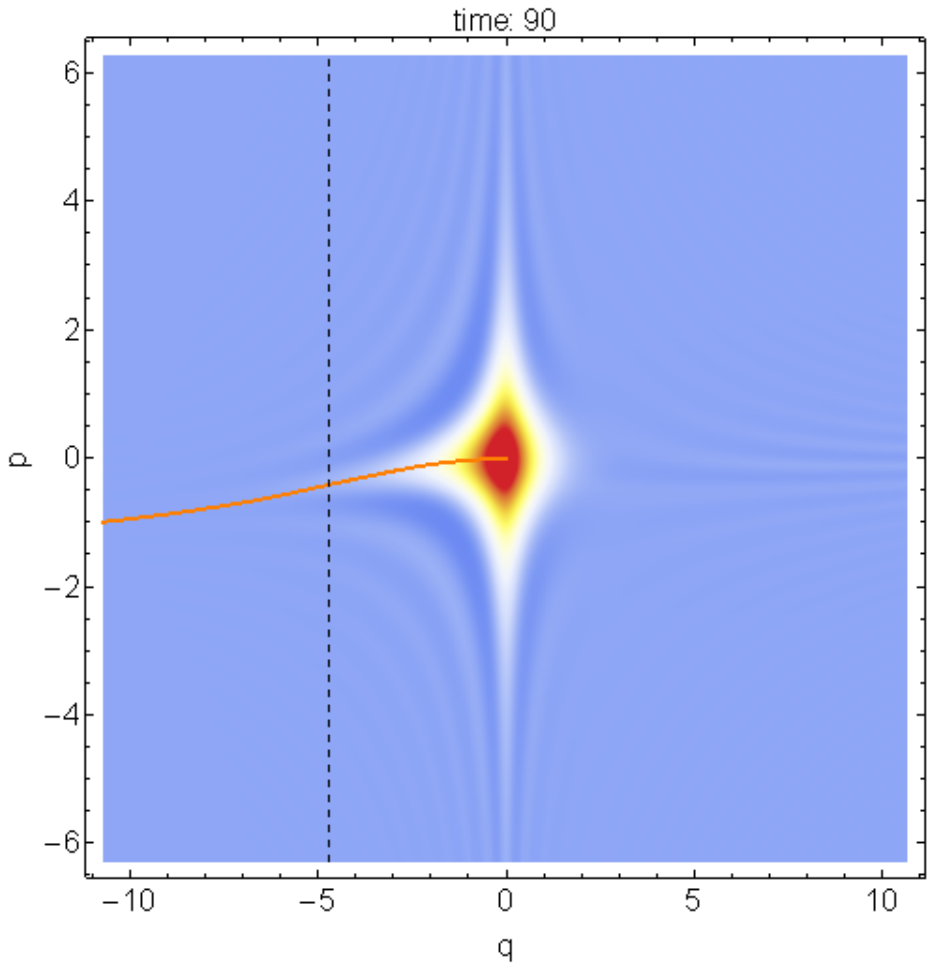
- Definíció:

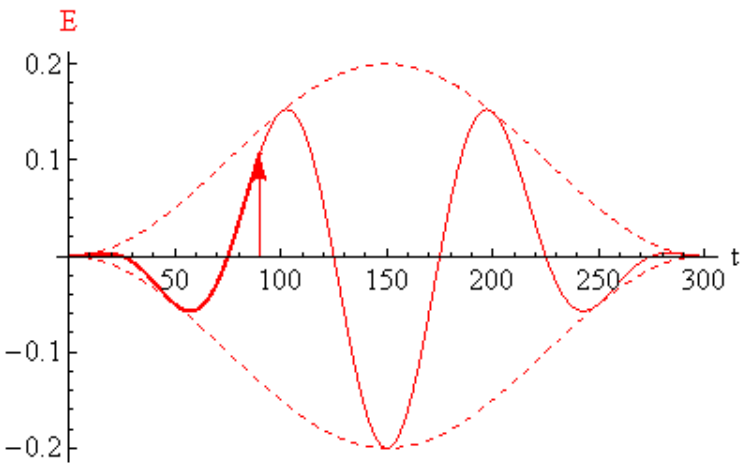
$$W(q,p) = \frac{1}{\pi\hbar}\int_{-\infty}^{\infty} \psi^*(q-x)\,\psi(q+x)\exp\left(2\frac{i}{\hbar}p\,x\right)dx$$

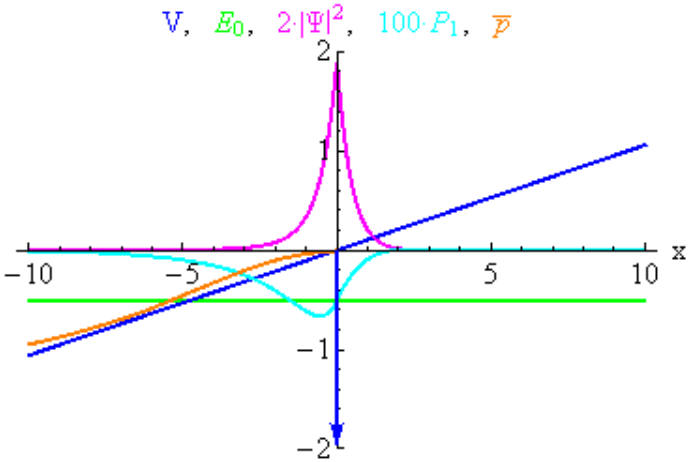
- Várható értékek, marginálisok, időfejlődés
- Kvantumoptika, kvantum interferencia, nem-klasszikusság
- Erős lézertér témakörben:

  Czirjak, et.al, Opt. Com. 179, 29-38 (2000)
  S. Graefe et.al., J. Phys. B. 45, 055002 (2012)
  H-J Kull, New Journal of Physics 14, 055013 (2012)

Optikai alagutazás fázisteres dinamikája







Kvantumos összefonódottság, 1D TDSE modell

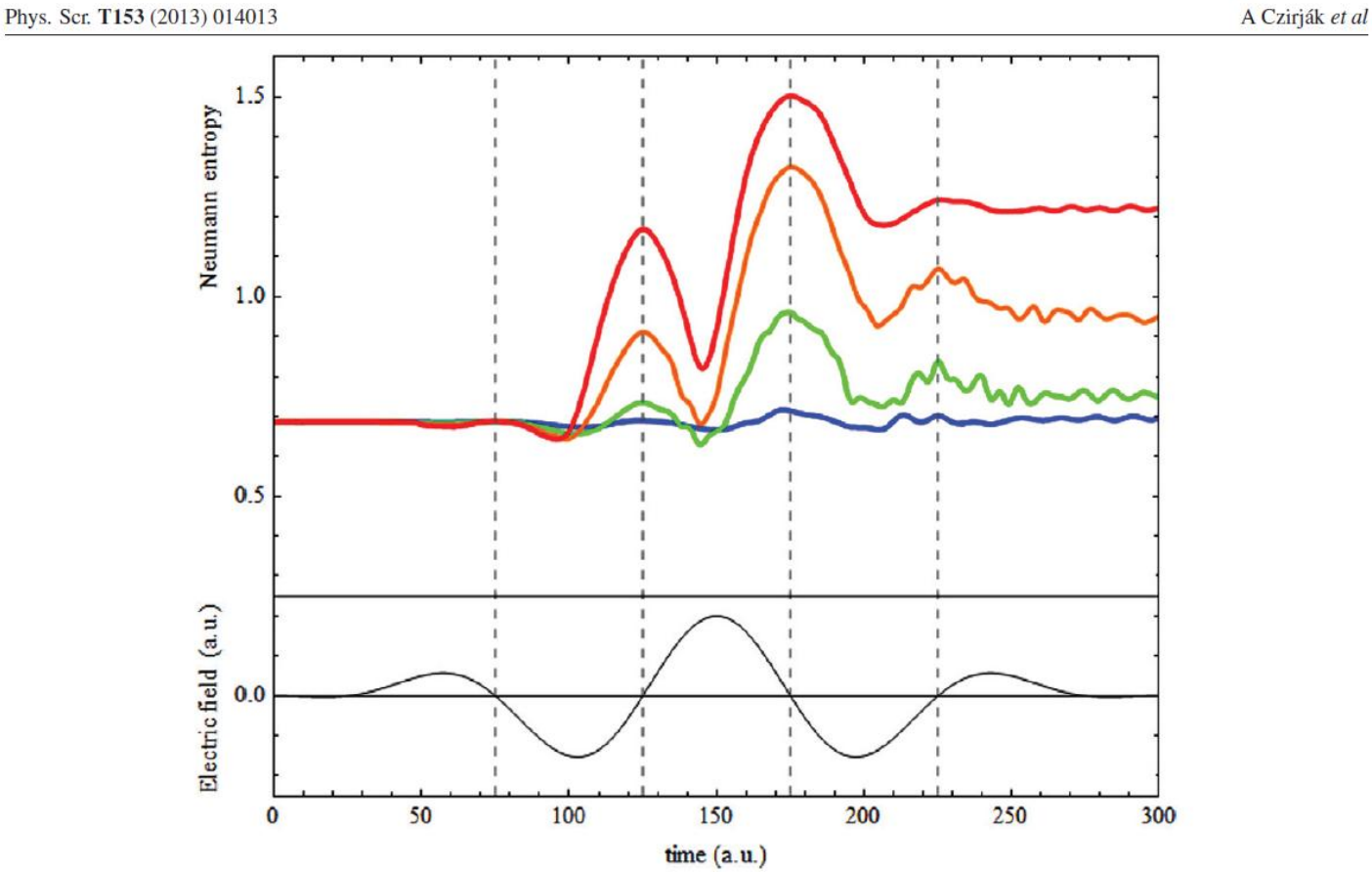
- Single active electron, kéttest probléma

$$H_{ec} = \frac{P_e^2}{2m_e} + \frac{P_c^2}{2m_c} - V_0 \delta\left(X_e - X_c\right) + e\,E(t)\,\left(X_e - X_c\right)$$

$$H_{ec} = H_0 + H, \quad H_0 = \frac{P_0^2}{2m}, \quad H = \frac{P^2}{2\mu} - V_0 \delta(X) + e\,E(t)\,X$$

- Relatív koordináták: numerikus megoldás, magasbb-rendű Crank-Nicolson
- Neumann entrópia:
  a kvantumos összefonódottság egyik mértéke

Erős mező által az atomból kiszakított elektron újraszóródik az atomtörzsönés azzal összefonódott állapotba kerül

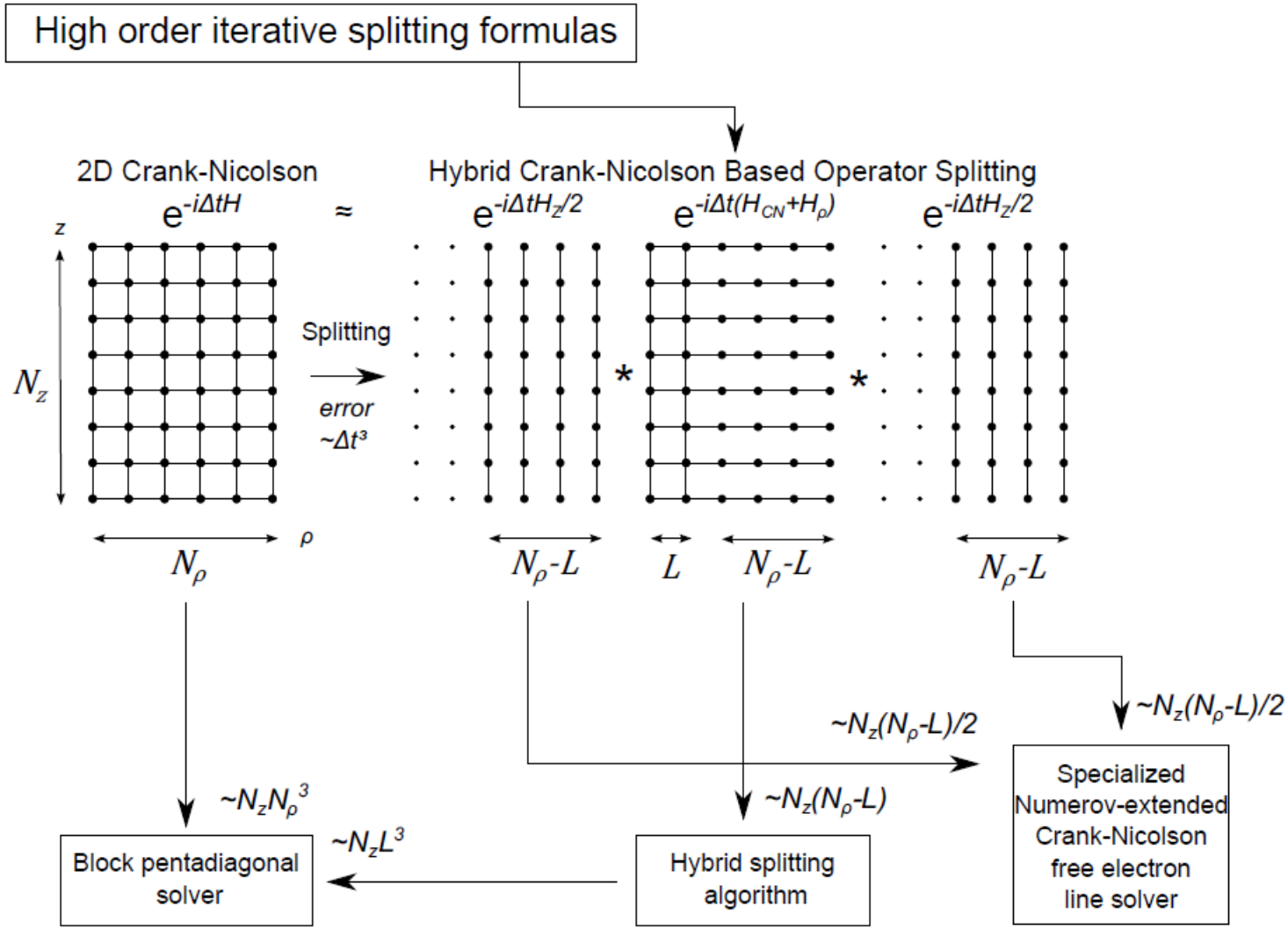


A Neumann entrópia lokális maximumai egybeesnek az elektromos térerősség zéróhelyeivel

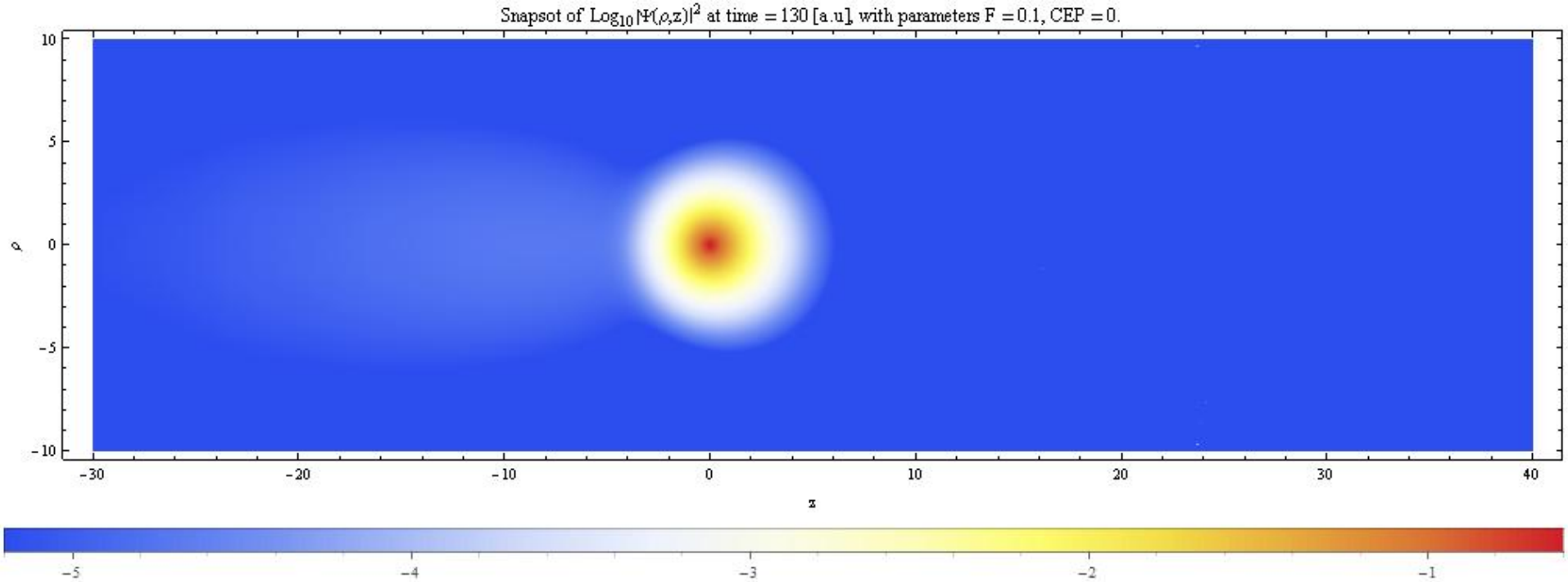
A. Czirják, Sz. Majorosi, J.Kovács, MGB Phys. Scr. **T153** (2013) 014013

3D TDSE numerikus megoldása

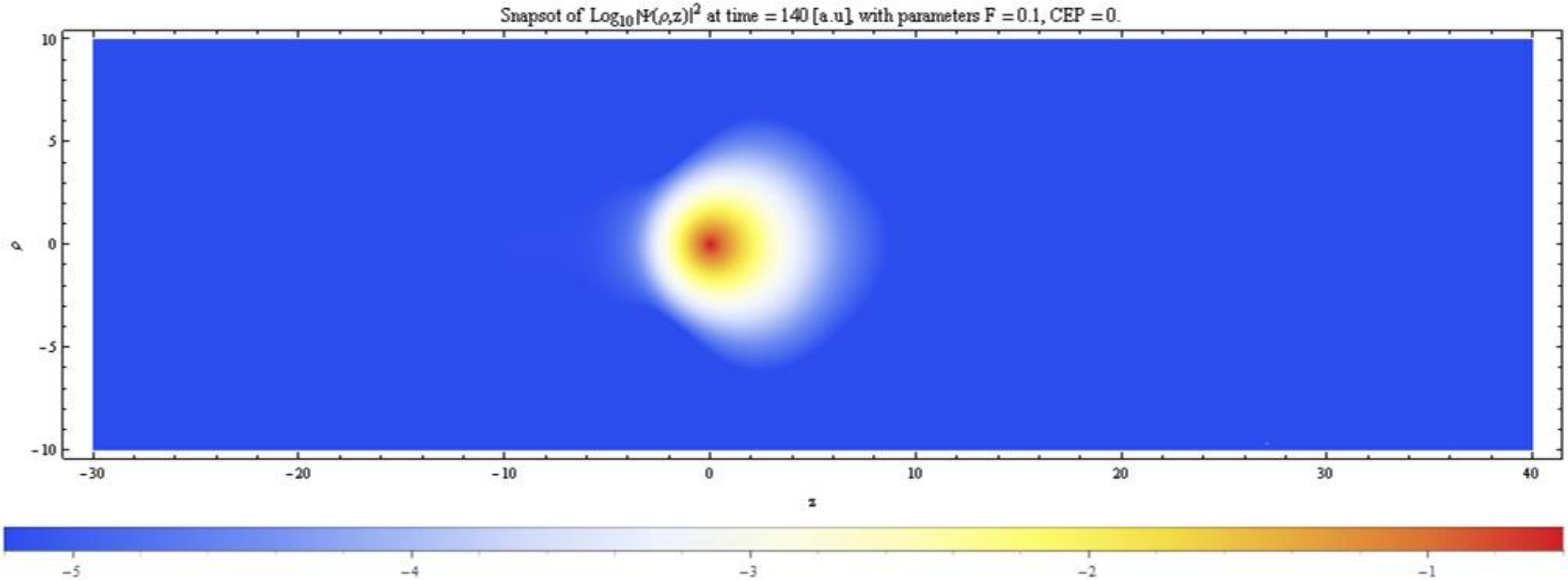
$$i\hbar\partial_t\Psi(\mathbf{r},t)=\frac{-\hbar^2}{2m}\Delta\Psi(\mathbf{r},t)+[V(\mathbf{r})-e\mathbf{r}\cdot\mathbf{E}(t)]\Psi(\mathbf{r},t)$$



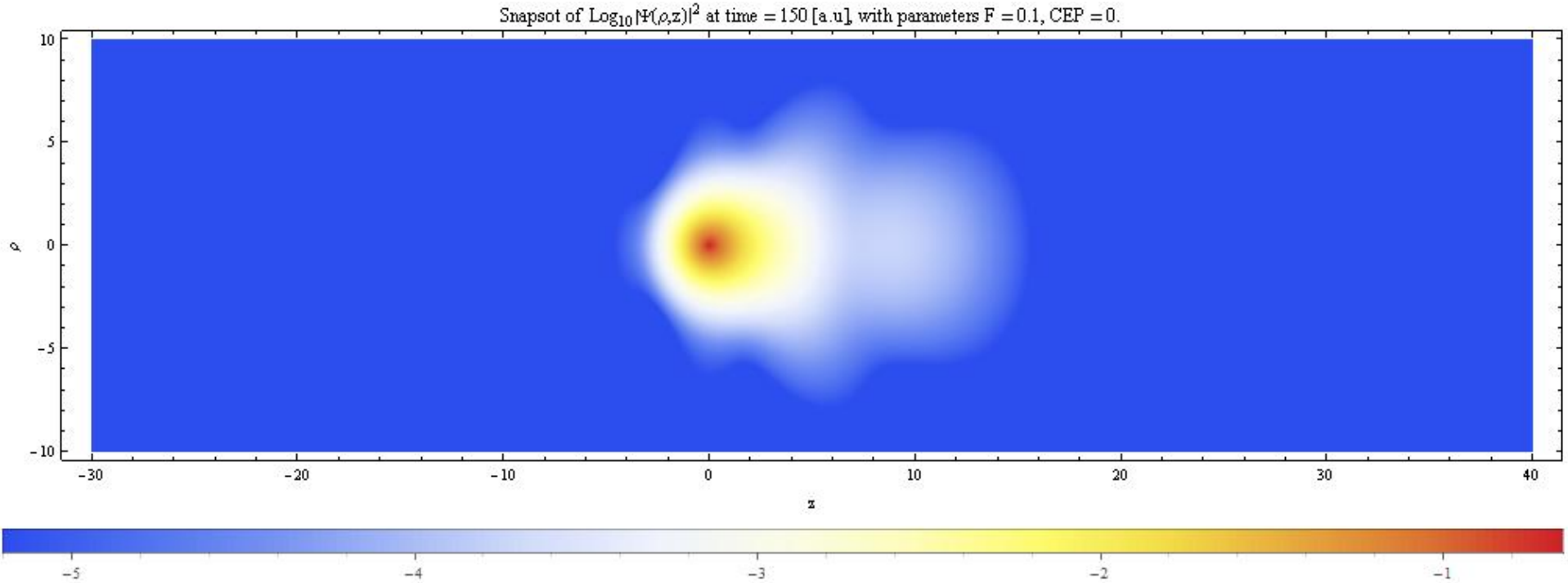
3D H-atom optikai alagutazás



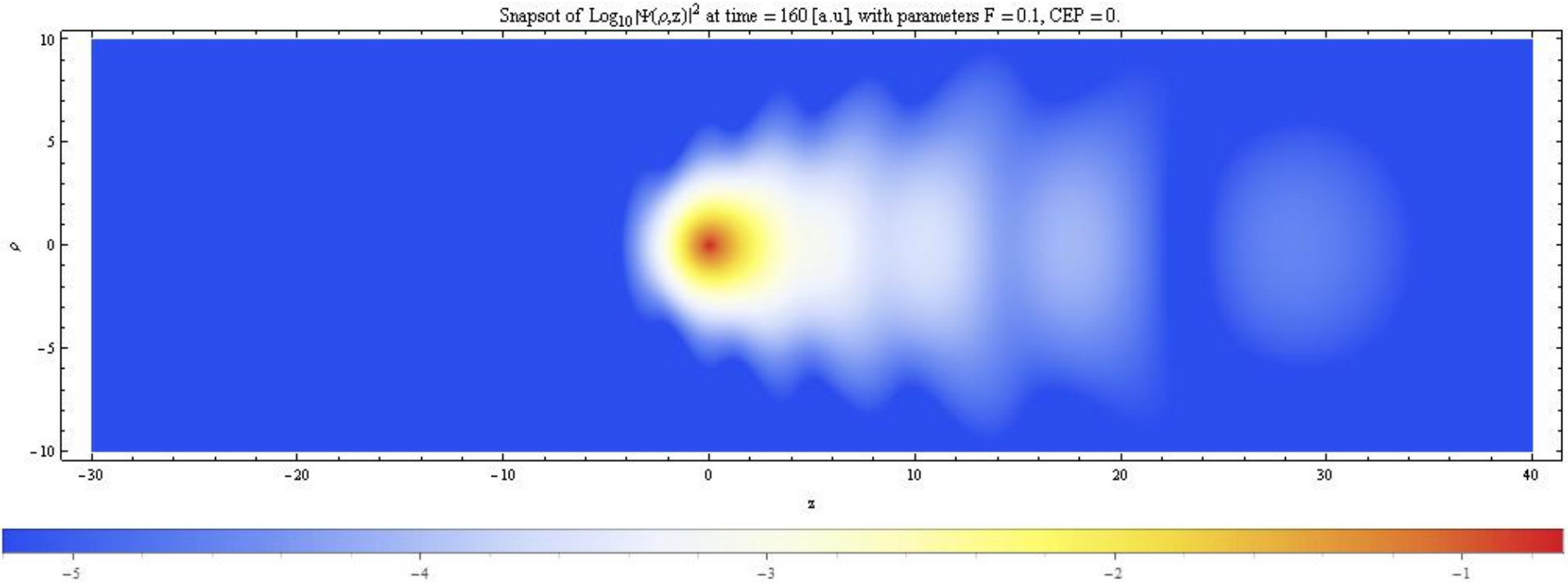
3D H-atom optikai alagutazás



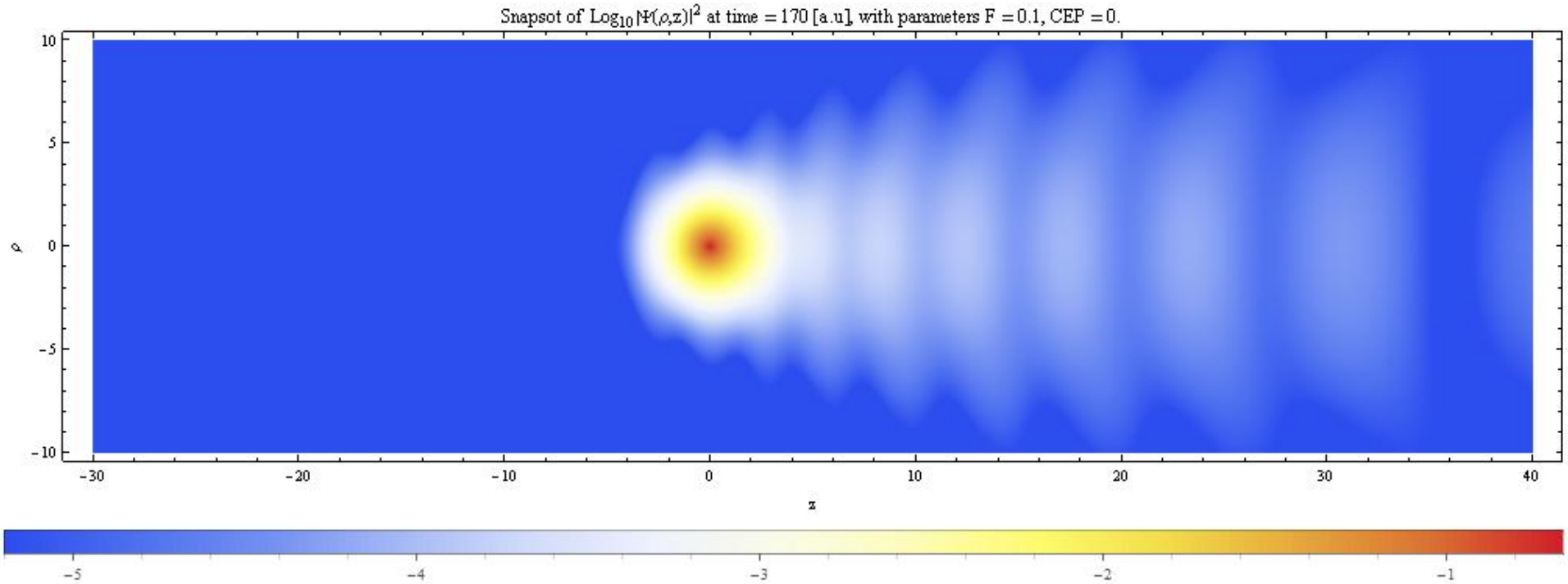
3D H-atom optikai alagutazás



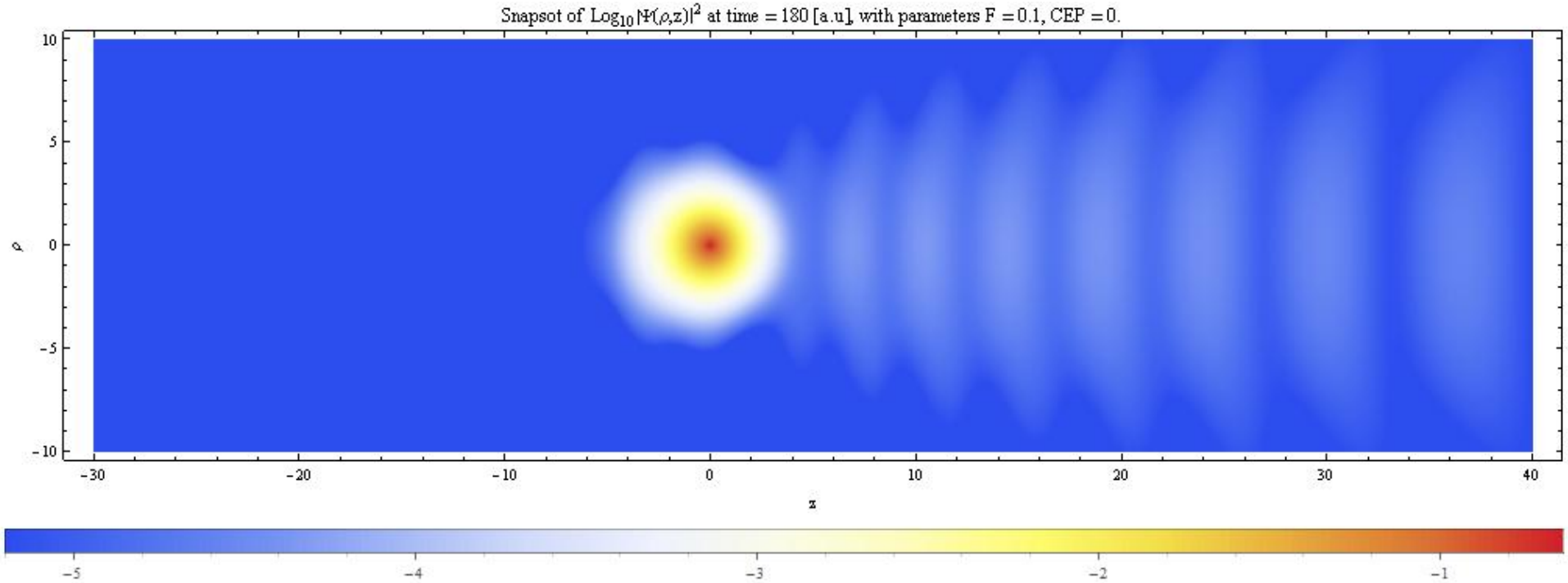
3D H-atom optikai alagutazás



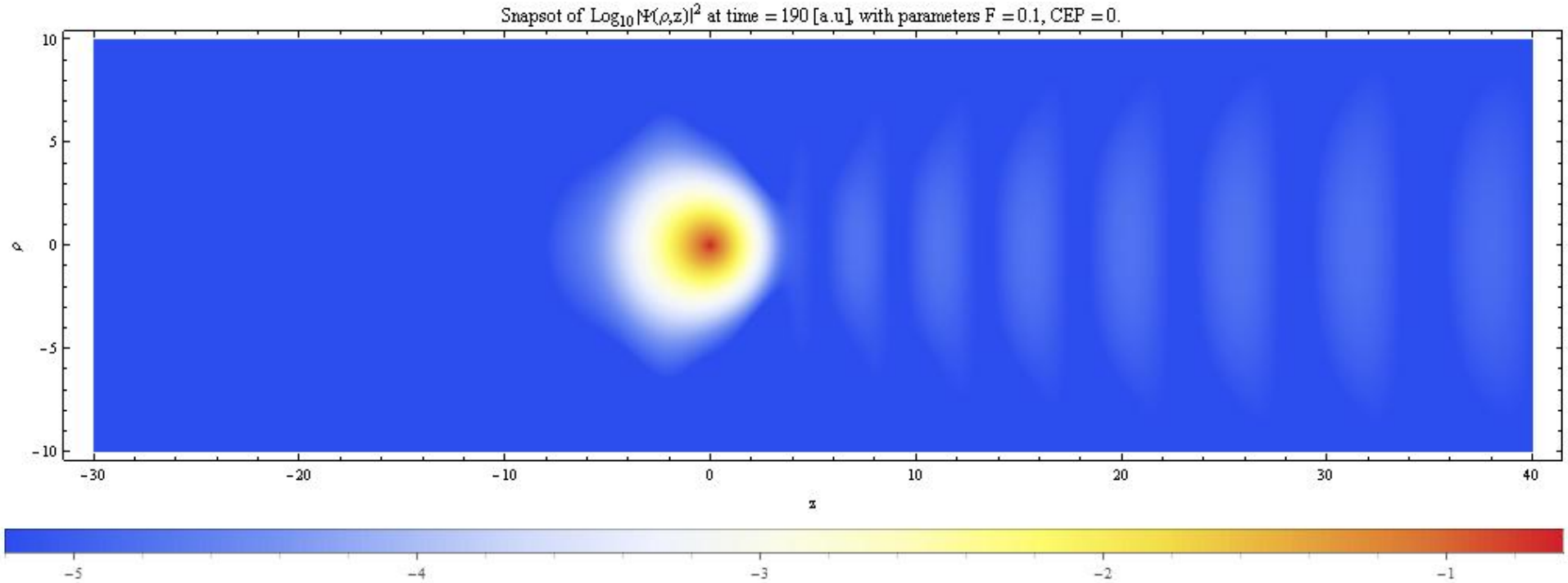
3D H-atom optikai alagutazás



3D H-atom optikai alagutazás

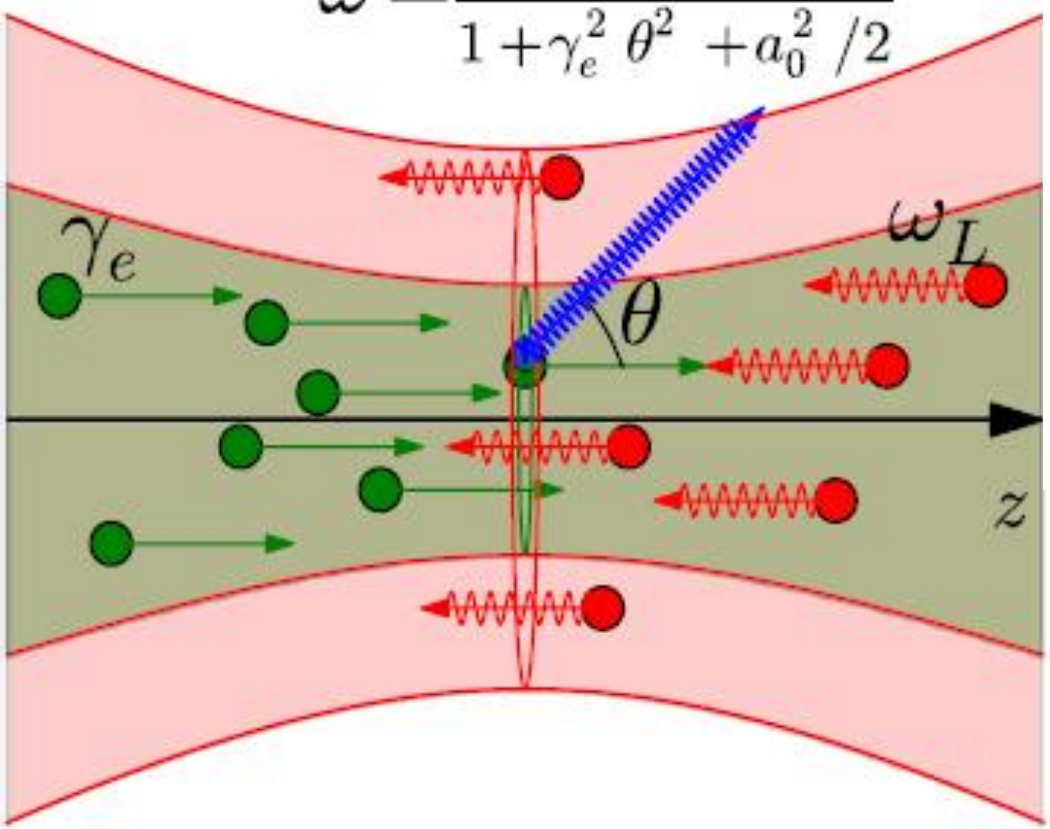


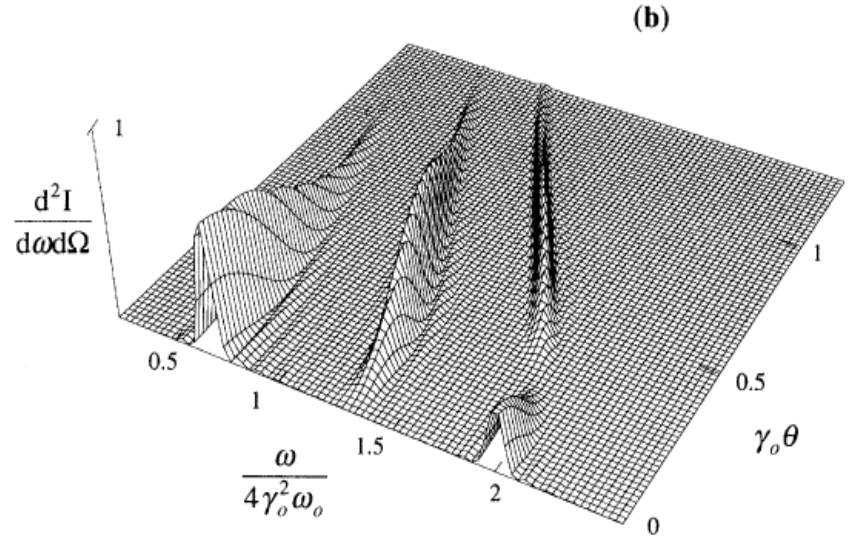
3D H-atom optikai alagutazás

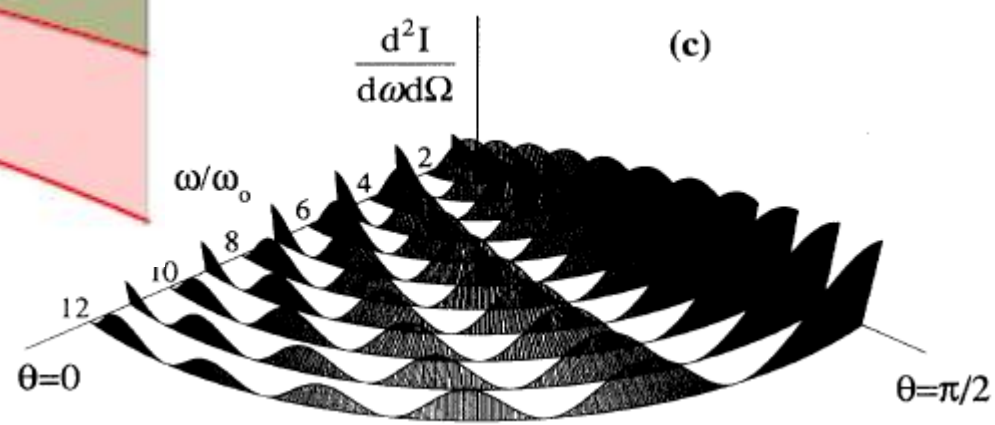


Nemlineáris Thomson-szórás

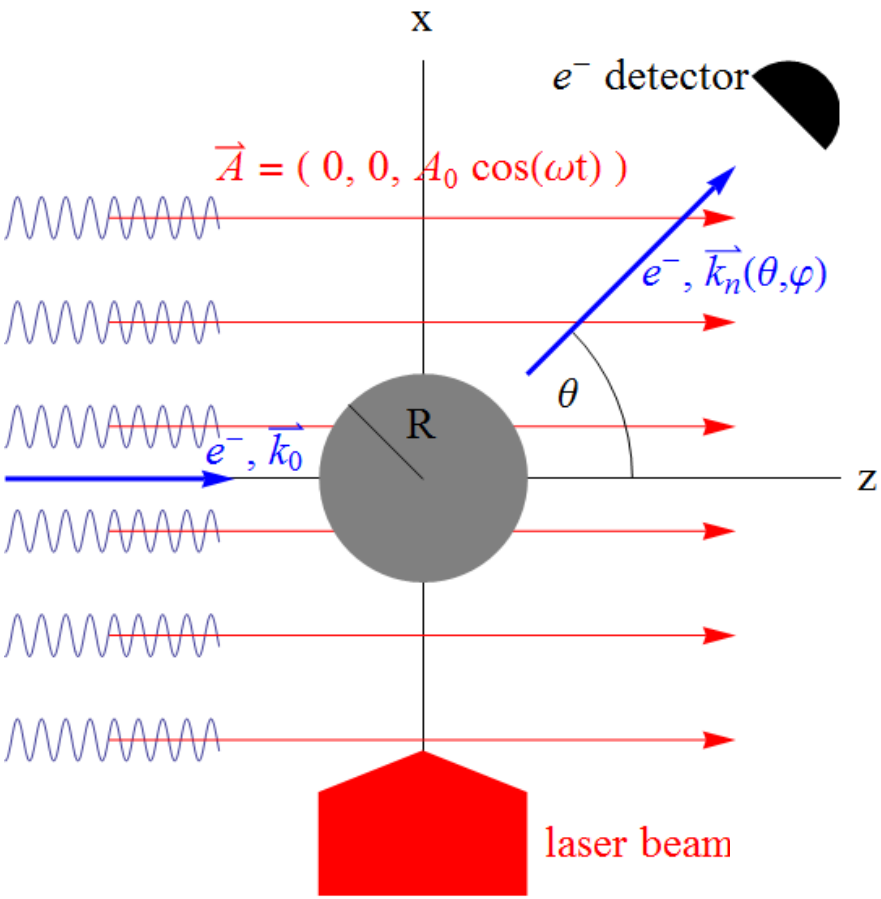
$$\omega = \frac{4\gamma_e^2\,\omega_L}{1+\gamma_e^2\,\theta^2\,+a_0^2\,/2}$$

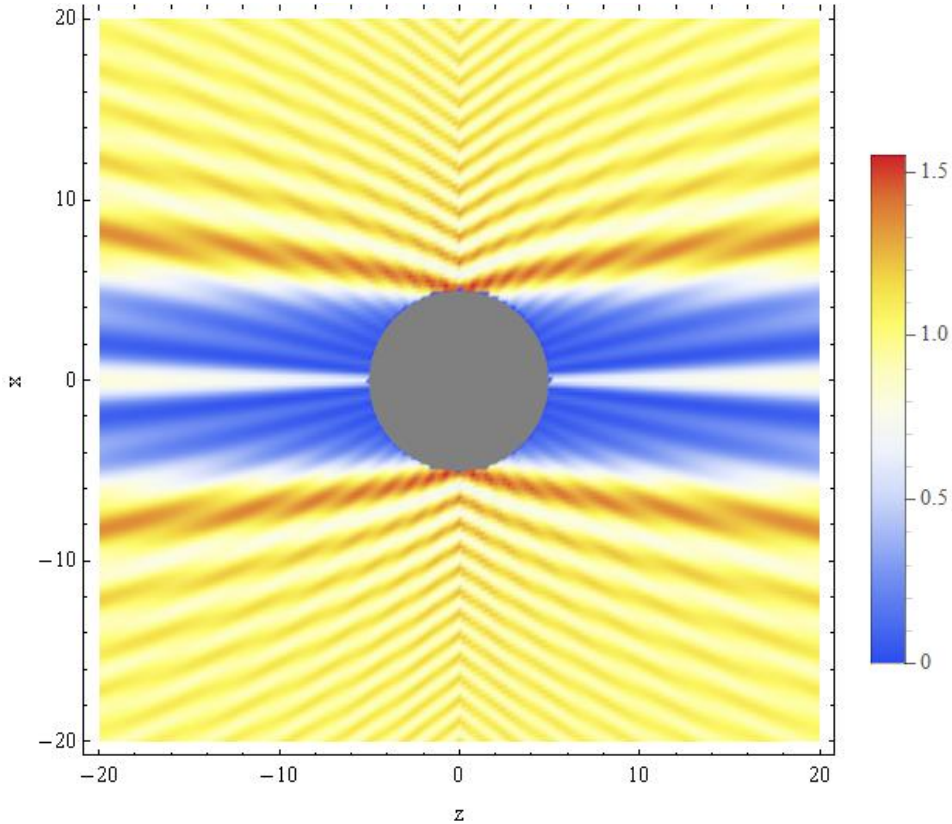




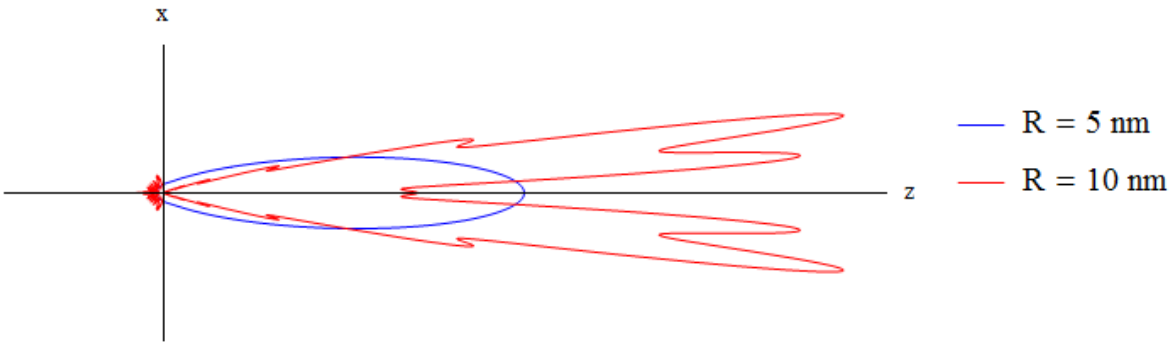


Elektron szórás nanorészecskéken lézertér jelenlétében





polar plot of $d\sigma_1/d\Omega$, $E_0 = 2$ eV



Optikai terek által keltett áramok szigetelőkben

Schiffrin et. al. 70 | NATURE | VOL 493 | 3 JANUARY 2013

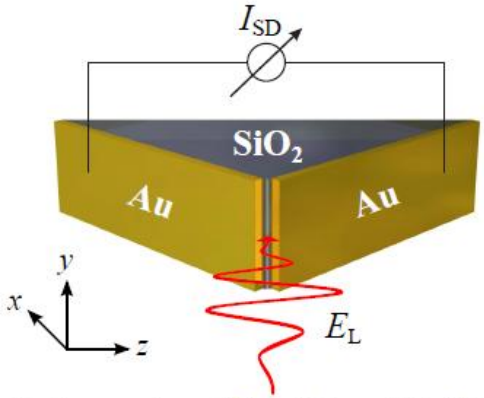
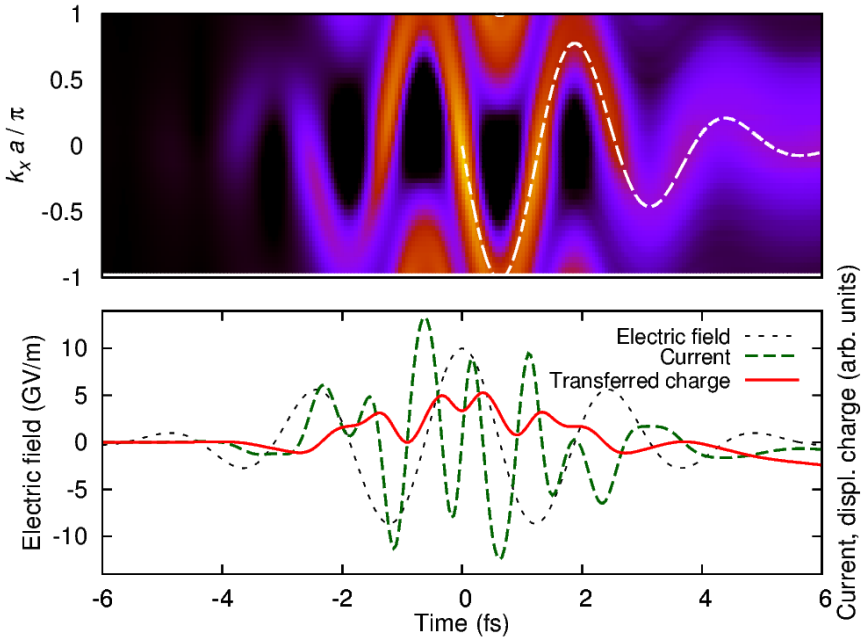


Fig. 1. In the experiment [1], a 100-nm thick SiO_2 was placed between two gold electrodes, and the current induced by a train of few-cycle pulses CEP-stabilized pulses was measured. Courtesy of A. Schiffrin.

SiO_2 :Wide band gap material ~9eV !



The effect of dynamical Bloch oscillations on optical-field-induced current in a wide-gap dielectric

P Földi[1], M G Benedict[1] and V S Yakovlev[2,3,4]

[1] Department of Theoretical Physics, University of Szeged, Tisza Lajos Körút 84-86, H-6720 Szeged, Hungary

[2] Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Hans-Kopfermann-Strasse 1, D-85748 Garching, Germany

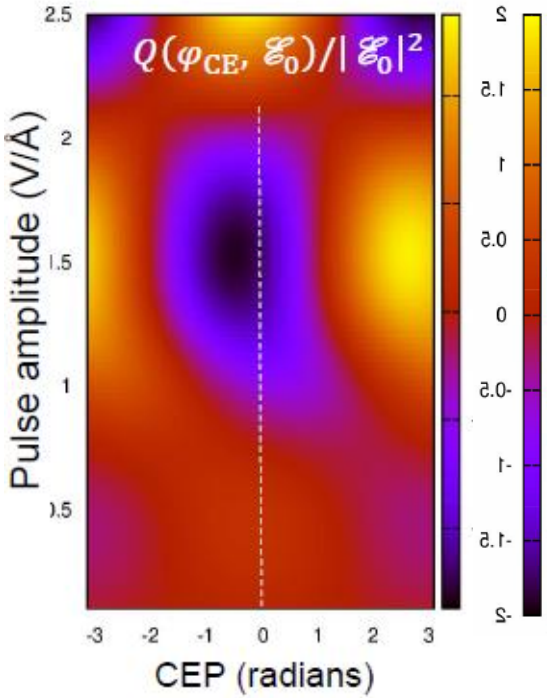
New Journal of Physics 15 (2013) 063019
The open access journal for physics

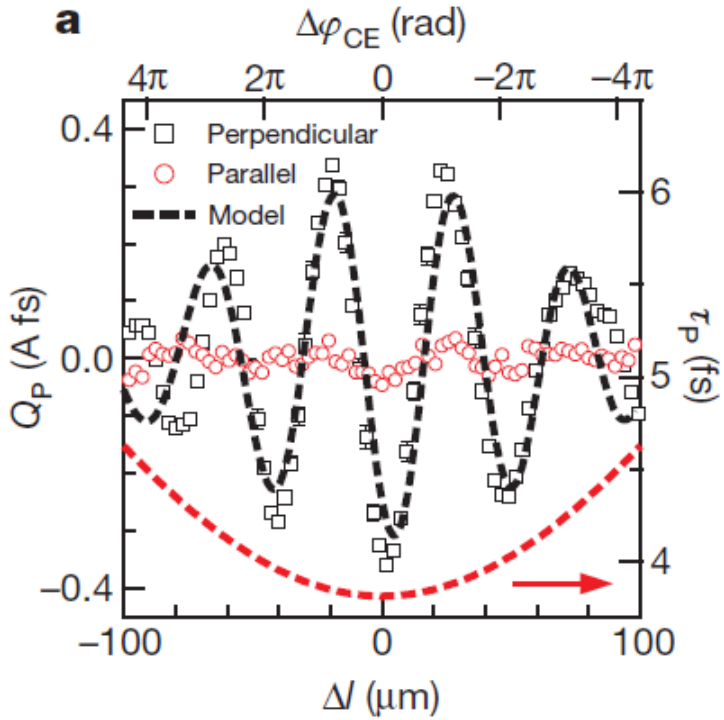
Az igen széles tiltott sáv ellenére a az erős lézertér a vezetési sávban elektronpopulációt gerjeszt, majd ezt oszcillációkra kényszeríti
Ezt számításokkal követjük

Theory with main approximations:

- two bands (valence and conduction);
- two spatial dimensions (for simplicity);
- Markov approximation for scattering by LO phonons

Az eredmény: töltésátvitel, amely CEP függő





Theory

Experiment of Schiffrin et. aí. (Garching)

Relaxation processes

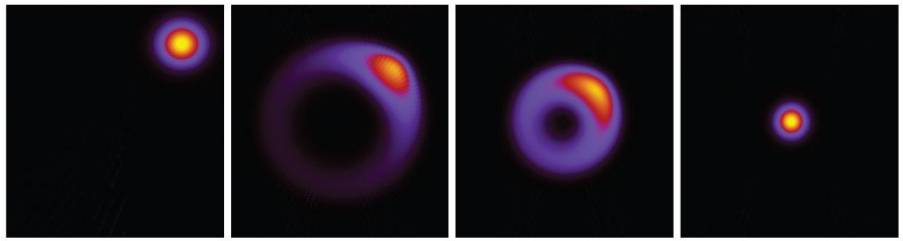


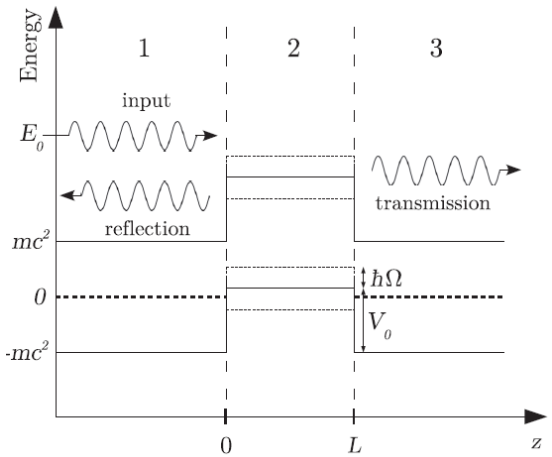
FIGURE 1. Time evolution of an electronic wave packed in the first Brillouin zone due to electron-phonon interaction at time instants $t = 0, 3, 6, 50$ fs.

PHYSICAL REVIEW B 88, 075438 (2013)

Relativistic electron transport through an oscillating barrier: Wave-packet generation and Fano-type resonances

Lóránt Zs. Szabó, Mihály G. Benedict, Attila Czirják, and Péter Földi*
Department of Theoretical Physics, University of Szeged, Tisza Lajos körút 84, H-6720 Szeged, Hungary

Original motivation graphene



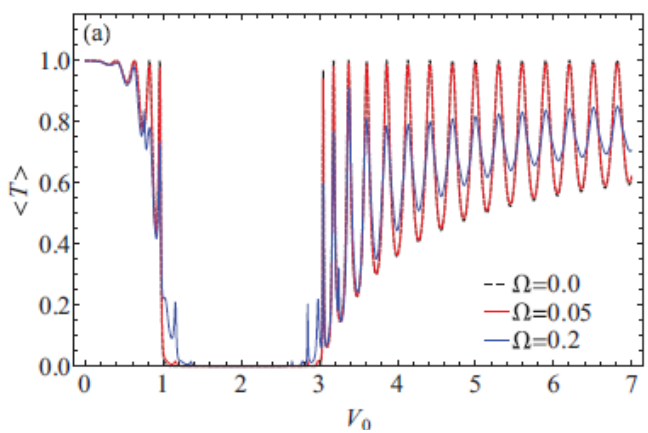


FIG. 3. (Color online) Panel (a): $\langle T \rangle$ as a function of barrier height V_0 for the indicated values of the oscillation amplitude Ω. Additional parameters: $E_0 = 2mc^2, \nu = 0.2, L = 10$. Panel (b): Zoom into the interval $E_0 - mc^2 < V_0 < E_0 + mc^2$ of panel (a).

$$H(t) = H_0 + V_1(t) = c\alpha_3\left(-i\hbar\frac{\partial}{\partial z}\right) + \beta mc^2 + V_0 + V_1(t)$$

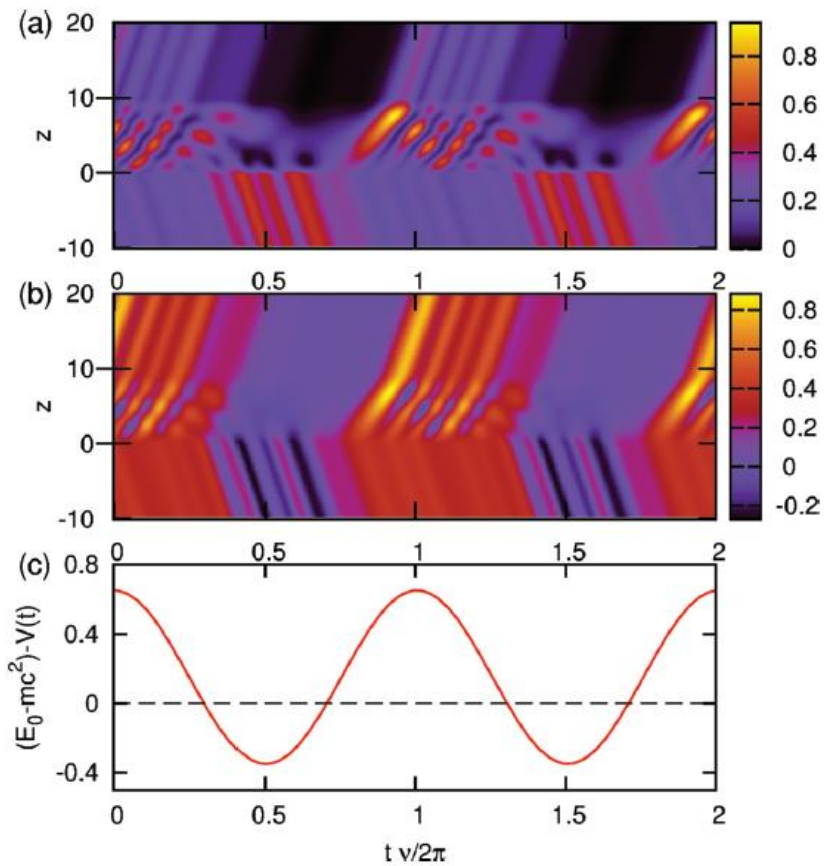
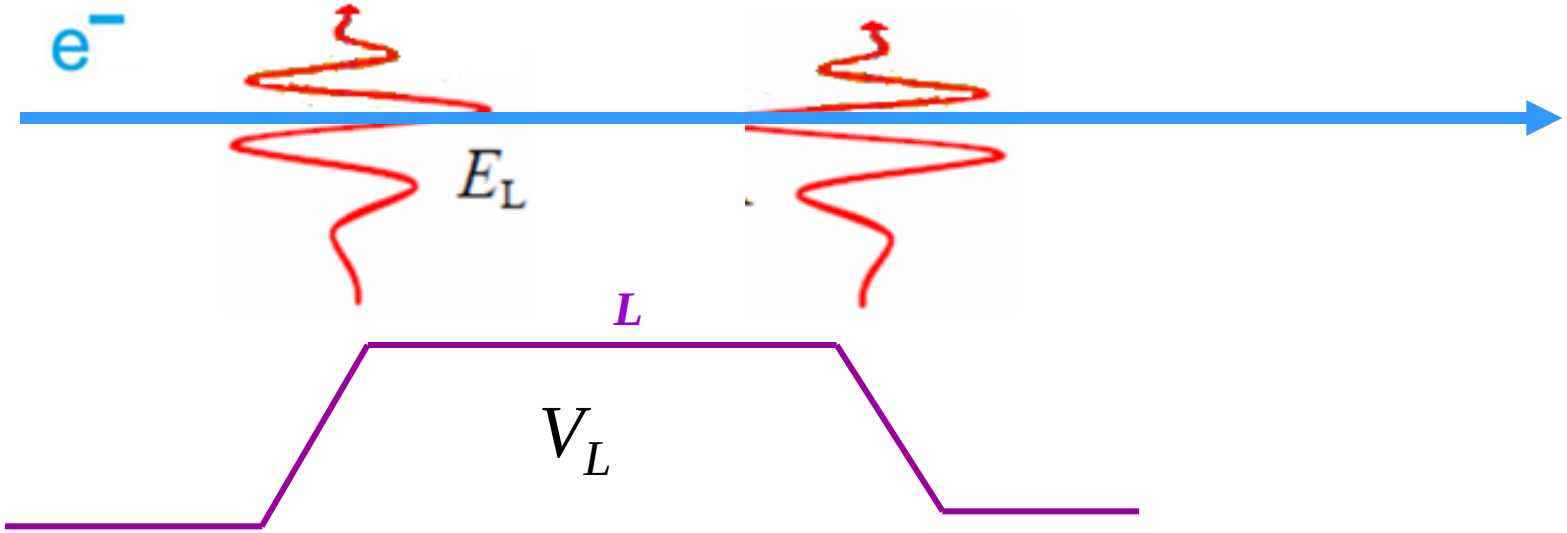


FIG. 7. (Color online) Density plot of $\rho(z,t)$ in panel (a), and of $j(z,t)$ in panel (b), and plot of $E_0 - mc^2 - V(t)$ in panel (c), for the parameters $L = 10$, $V_0 = 1.85mc^2$, $E_0 = 3mc^2$, and $\Omega = 0.5$.

Elvégzendő számítások és numerikus kísérletek



Electron nyaláb energia ~100 KeV- relativisztikus ~ 10 MeV ultrarelativisztikus

Két fókuszált lézernyaláb hat az elektronokra .
Oszcillációk várhatók az áramban

Elektron emisszió nano-méretű fémrészecskékből

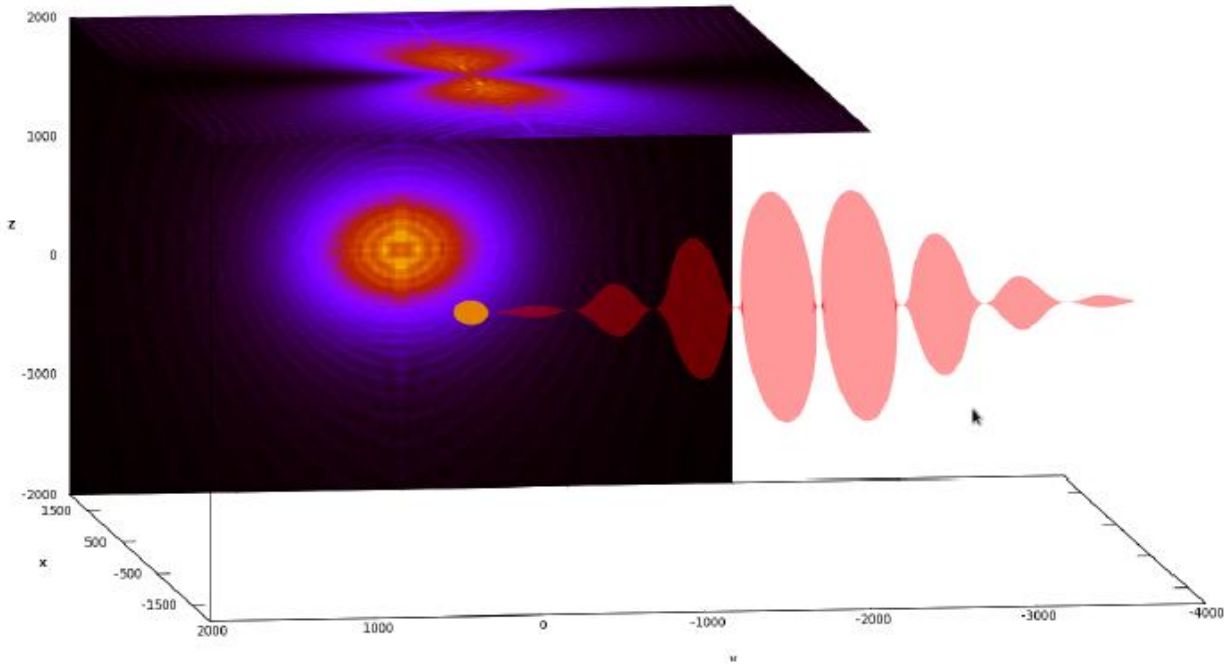


Figure 1. A schematic view of the process we consider. The laser pulse (transparent red) impinges on a nanoellipsoid (plotted by yellow), possibly excites plasmonic oscillations, and the net electric field leads to photoemission. The emitted electrons are driven by the electric field, and can be detected e.g., at the planes indicated where characteristic distributions are also shown.

P. Földi, I. Márton, N. Német, V. Ayadi, P. Dombi, *Apl. Phys. Lett.* **106,** 013111 (2015.)