

ELI-vel kapcsolatos tudományterületek

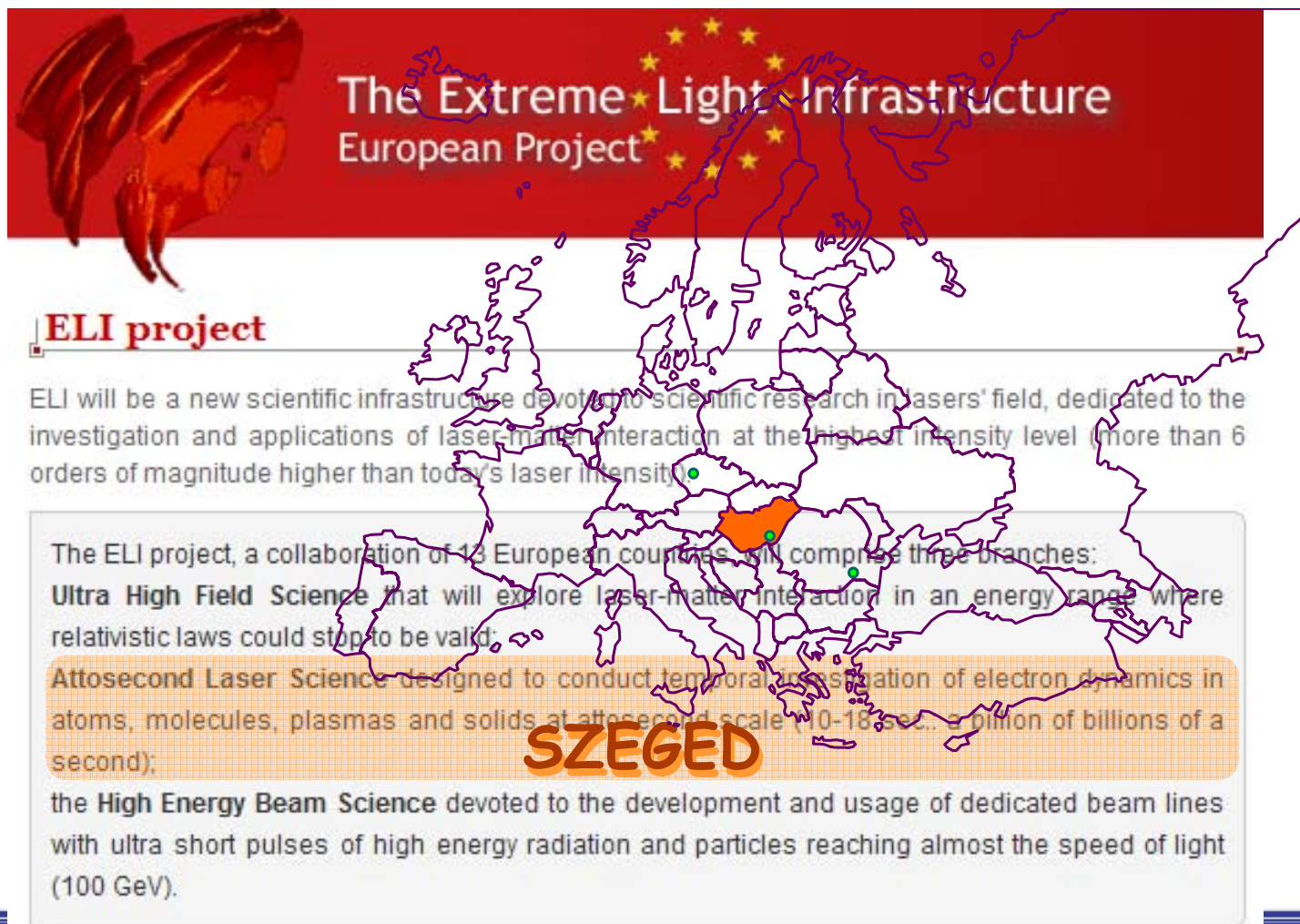
Attoszekundumos impulzusok keltése és alkalmazásai

Varjú Katalin

2012. február 2.

Varjú Katalin: Attoszekundumos impulzusok keltése és alkalmazásai

1/53



The Extreme Light Infrastructure European Project

ELI project

ELI will be a new scientific infrastructure devoted to scientific research in lasers' field, dedicated to the investigation and applications of laser-matter interaction at the highest intensity level (more than 6 orders of magnitude higher than today's laser intensity).

The ELI project, a collaboration of 13 European countries, will comprise three branches:

- Ultra High Field Science** that will explore laser-matter interaction in an energy range where relativistic laws could stop to be valid;
- Attosecond Laser Science** designed to conduct temporal investigation of electron dynamics in atoms, molecules, plasmas and solids at attosecond scale (10^{-18} s, a billion of billions of a second);
- the High Energy Beam Science** devoted to the development and usage of dedicated beam lines with ultra short pulses of high energy radiation and particles reaching almost the speed of light (100 GeV).

SZEGED

2012. február 2.

Varjú Katalin: Attoszekundumos impulzusok keltése és alkalmazásai

2/53



attoszekundum (10^{-18}s)

- miért?
- hogyan?
- mire?



Mire jó egy ultrarövid (fs, as) impulzus?

Rövid:

- gyors folyamatok vizsgálata (pillanatfelvétel)

Koncentrált

- adott energia esetén nagyobb a teljesítmény

Rövid impulzus - nagy intenzitás

1) nagy teljesítmény/intenzitás
eléréséhez csökkenteni kell az
impulzushosszat

2) az impulzushossz
csökkentéséhez növelni kell a
keltő impulzus intenzitását

Cornell University Library
arXiv.org > physics > arXiv:1108.2116
Physics > Optics
Exawatt-Zettawatt Pulse Generation and Applications
G.A.Mourou, N.J.Fisch, V.M.Malkin, Z.Toroker, E.A.Khazanov, A.M.Sergeev, T.Tajima
(Submitted on 10 Aug 2011)
A new amplification method, weaving the three basic compression techniques, Chirped Pulse Amplification (CPA) and Plasma Compression by Backward Raman Amplification (BRA) in plasma, is proposed.

IZEST
INTERNATIONAL ZETTAWATT-EXAWATT SCIENCE AND TECHNOLOGY
International Zettawatt-Exawatt Science and Technology
Launching Workshop:
Laser-based High-Energy Fundamental Physics

PHYSICAL REVIEW E 72, 066501 (2005)
Attosecond and zeptosecond x-ray pulses via nonlinear Thomson backscattering
Pengfei Lan, Peixiang Lu,* Wei Cao, and Xinlin Wang
State Key Laboratory of Laser Technology and Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, People's Republic of China
(Received 11 April 2005; revised manuscript received 26 September 2005; published 14 December 2005)
Nonlinear Thomson backscattering of an intense circularly polarized laser by a counterpropagating energetic electron is investigated. The results show that in the scattering of a non-tightly-focused laser pulse with an intensity around 10^{19} W/cm^2 and a pulse duration of 100 fs, full width at half maximum by a counterpropagating electron, attosecond and zeptosecond x-ray pulses can be generated.

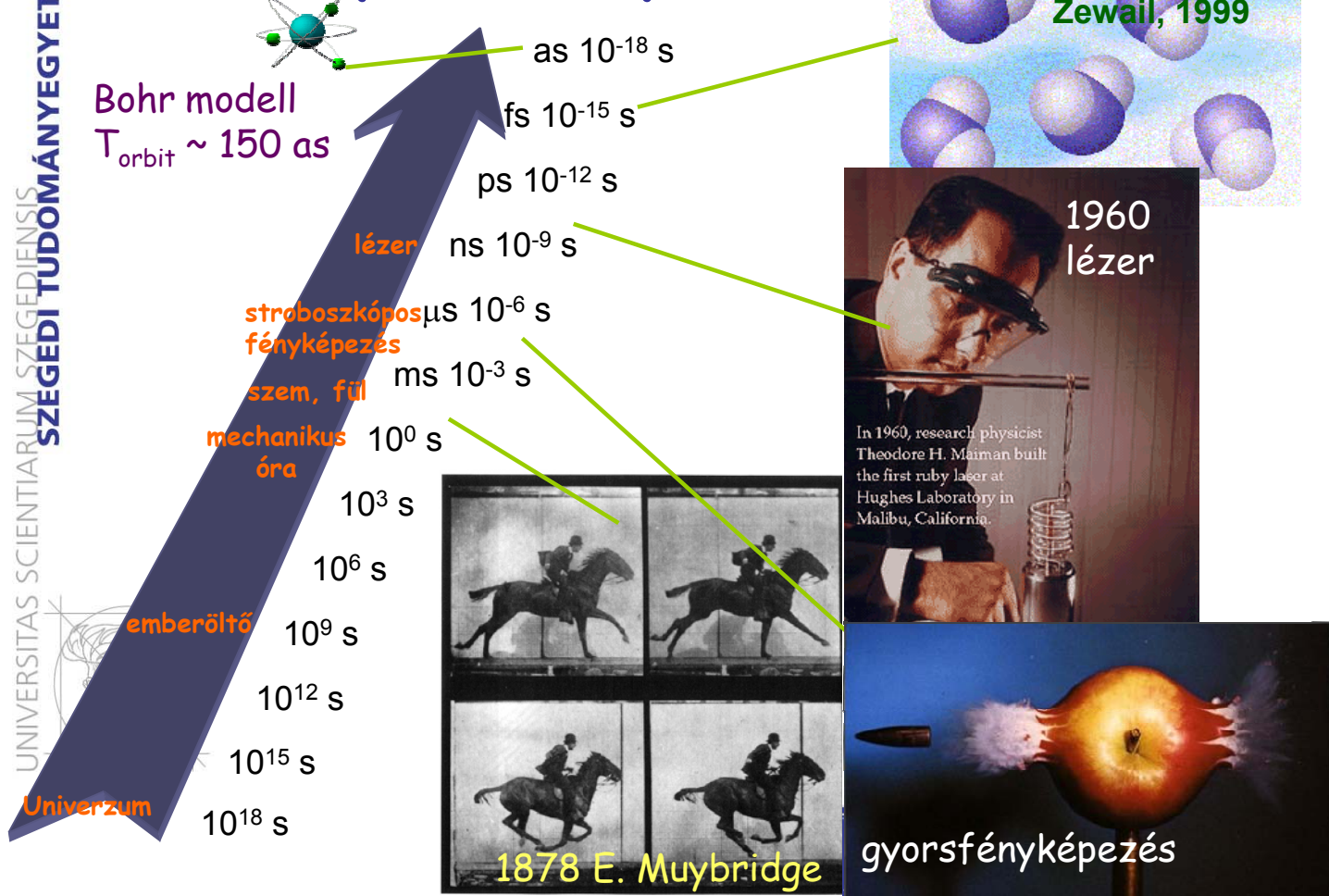
VR: 1,3 PW
80 as

Gyors-fényképezés



A labda „bemozdul”

„Gyors” folyamatok



Mozgás/változás követése

- Lassú folyamatok



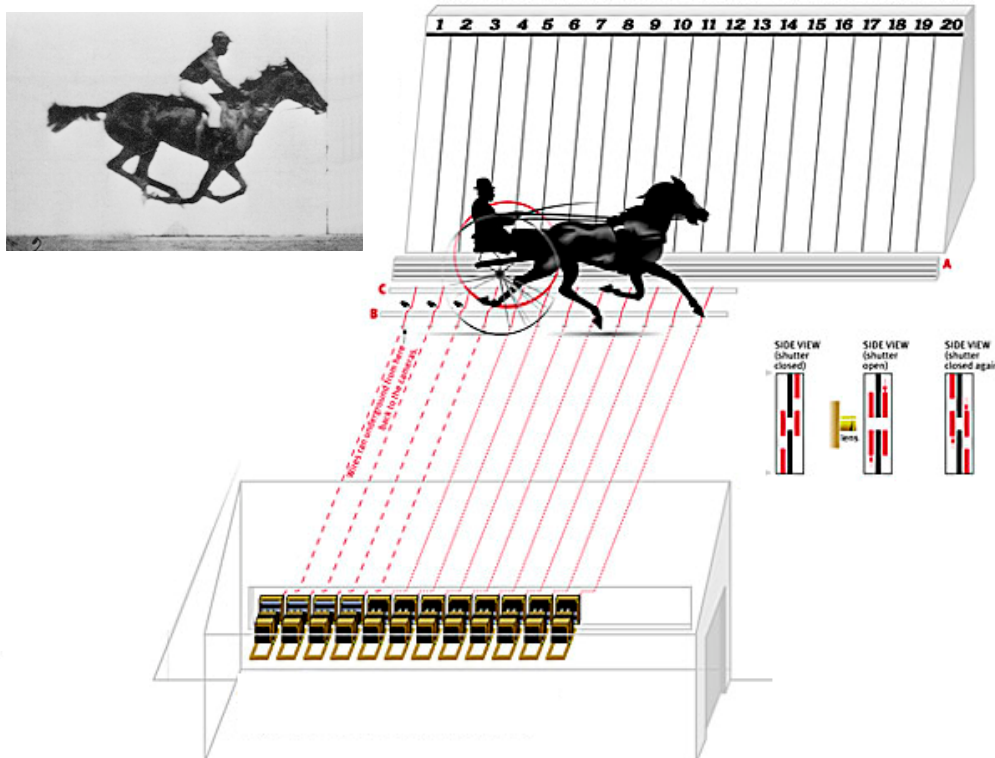
- Szem feloldása: 25 képkocka másodpercenként

$$\frac{1}{25} \text{ s} = 0,04 \text{ s} = 40 \text{ ms}$$

- Gyors folyamatok



Az első mozgóképfelvétel



1878 Muybridge, Palo Alto Track $\frac{1}{2000} \text{ s} = 0,0005 \text{ s} = 0,5 \text{ ms}$
felvétel expozíciós ideje:

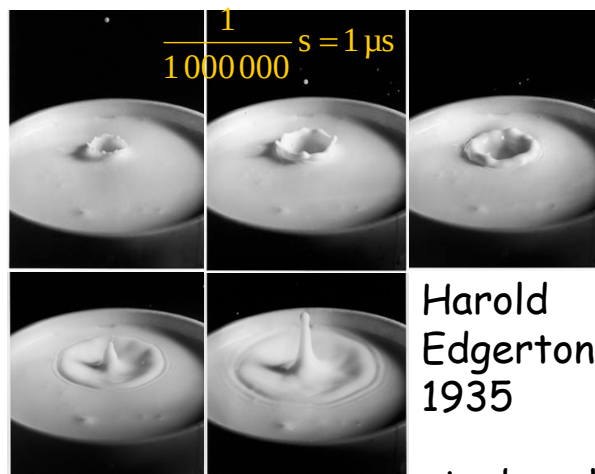
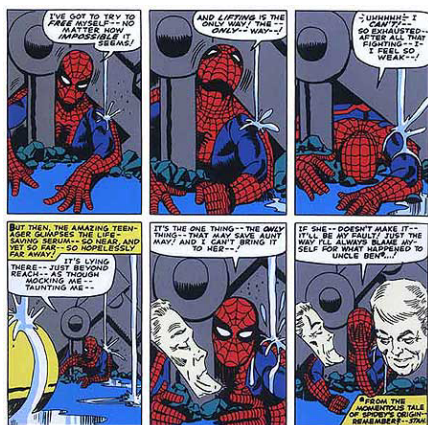
2012. február 2.

Varjú Katalin: Attoszekundumos impulzusok keltése és alkalmazásai

9/53

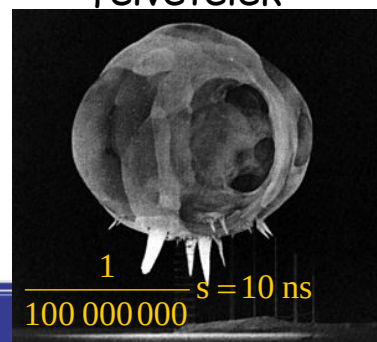
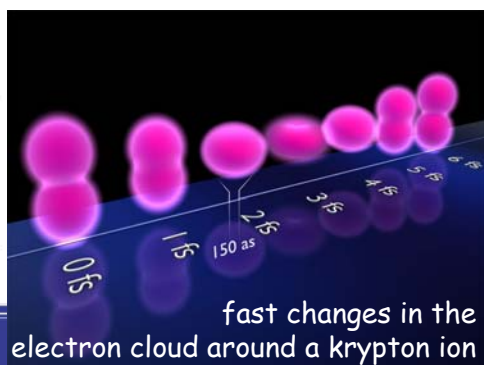
A sebesség megjelenítése:

pillanatsfelvételek sorozata



Harold
Edgerton,
1935

stroboszkópos
felvételek



2012. február 2.

Varjú Katalin: Attoszekundumos impulzusok keltése és alkalmazásai

10/53

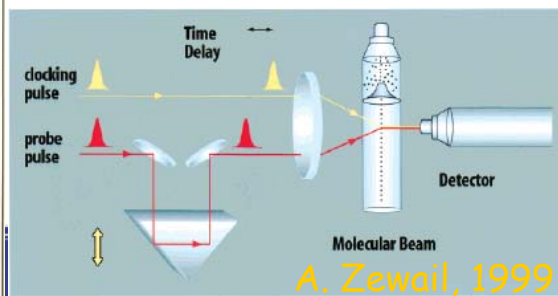
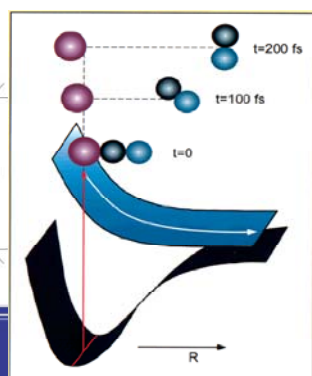
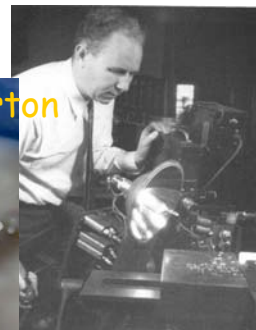
Idő „fagyasztási” technikák



mechanikus
zár: ms

elektronikusan
szinkronizált vaku: μs -ns

1937 H.E. Edgerton



lézeres
pumpa-próba:
ps - fs - as

A. Zewail, 1999

2012. február 2.

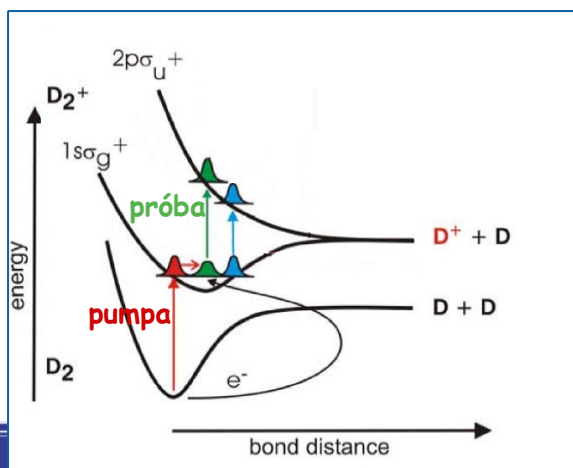
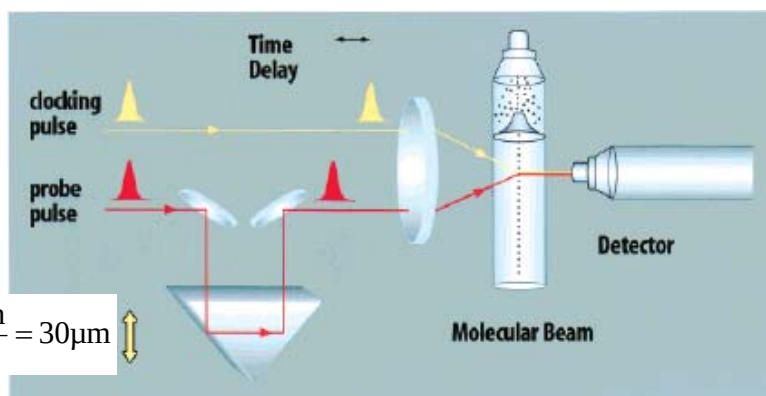
Varjú Katalin: Attoszekundumos impulzusok keltése és alkalmazásai

11/53

Pumpa-próba eljárás

- időzítés
- rövid vaku

$$100\text{fs} \cdot 0,3 \frac{\mu\text{m}}{\text{fs}} = 30\mu\text{m}$$



A. Zewail,
1999

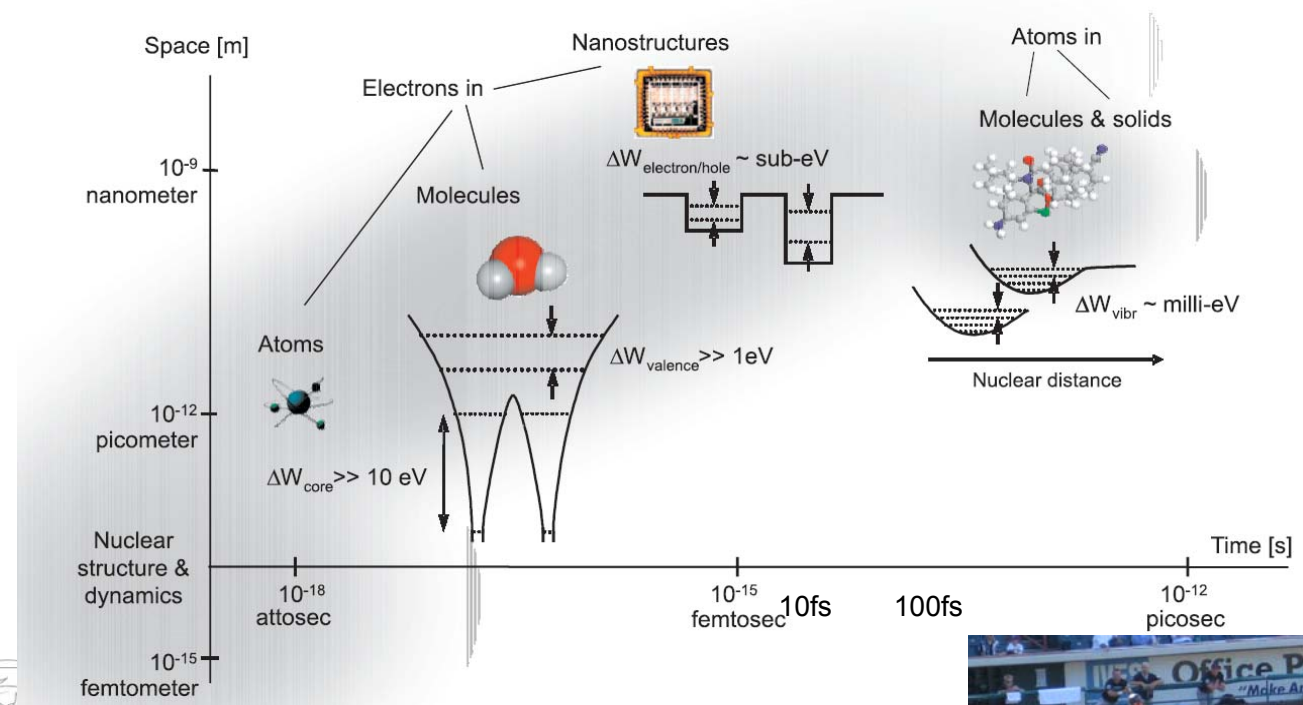


2012. február 2.

Varjú Katalin: Attoszekundumos impulzusok keltése és alkalmazásai

12/53

Karakterisztikus idők



Elektron jelentősége: fény emisszió
biológiai jelek továbbítása
kémiai kötések manipulálása
jel-feldolgozás sebessége



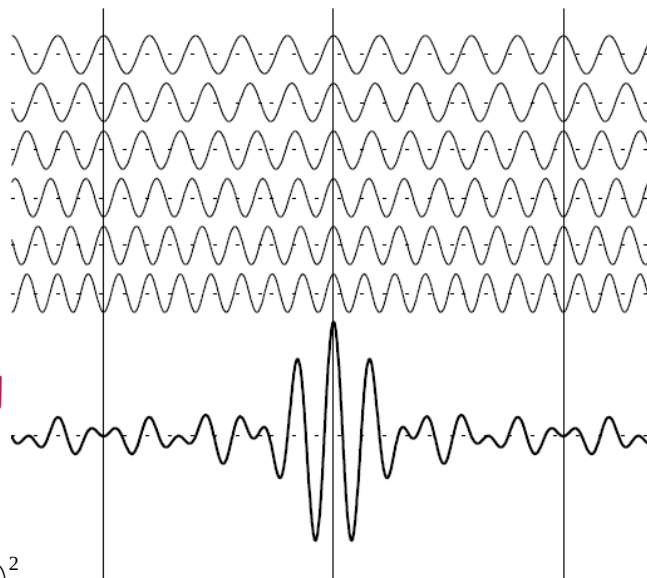
attoszekundum (10^{-18}s)

- miért?
- hogyan?
- alkalmazások

Mitől különleges egy ultrarövid impulzus?

végtelen hullám (CW - continuous wave):

$$E(t) = E_0 \sin(\omega_0 t)$$



rövid impulzus:

több (szinkronizált) módusból áll

$$E(t) = E_0 \sin(\omega_0 t) \times e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^2}$$

Nagy sáv szélesség?

„YAG”
532 nm

$$\tau = 10 \text{ ns}$$

$$\Delta\omega = \frac{4 \ln 2}{\tau} = 2,77 \times 10^{-7} \frac{1}{\text{fs}}, \quad \omega_l = 2\pi \frac{c}{\lambda} = 3,5 \frac{1}{\text{fs}}$$

„Ti:S”
800 nm

$$\tau = 12 \text{ fs}$$

$$\Delta\omega = \frac{4 \ln 2}{\tau} = 0,23 \frac{1}{\text{fs}}, \quad \omega_l = 2\pi \frac{c}{\lambda} = 2,356 \frac{1}{\text{fs}}$$

„világrekord”
Ti:S”
800 nm

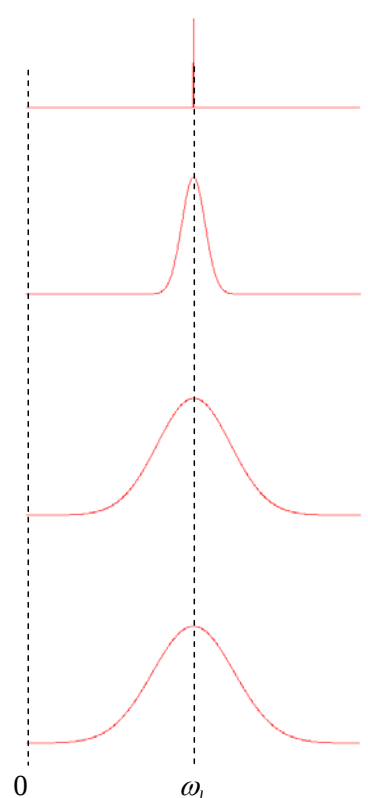
$$\tau = 3,8 \text{ fs}$$

$$\Delta\omega = \frac{4 \ln 2}{\tau} = 0,73 \frac{1}{\text{fs}}, \quad \omega_l = 2\pi \frac{c}{\lambda} = 2,356 \frac{1}{\text{fs}}$$

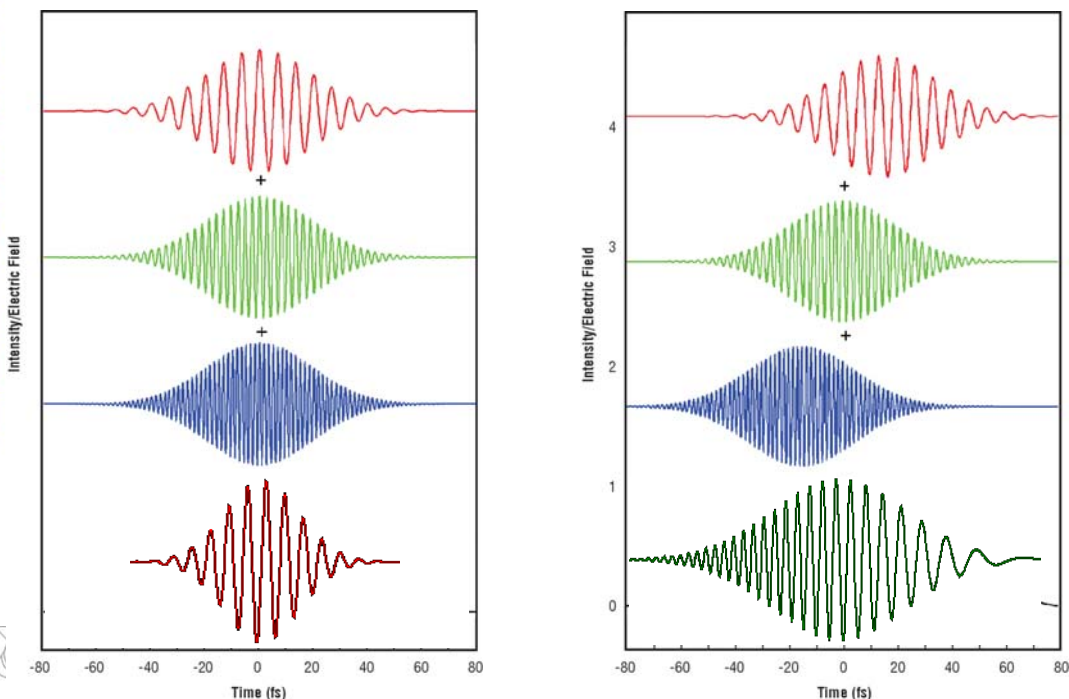
„attoszekundumos”
GHHG (q_c=20)

$$\tau = 0,17 \text{ fs}$$

$$\Delta\omega = \frac{4 \ln 2}{\tau} = 16,3 \frac{1}{\text{fs}}, \quad \omega_l = 2\pi \frac{c}{\lambda} = 47 \frac{1}{\text{fs}}$$

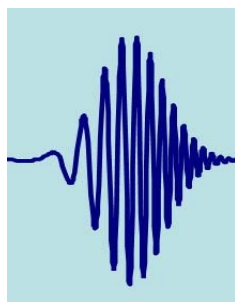


"Chirp"



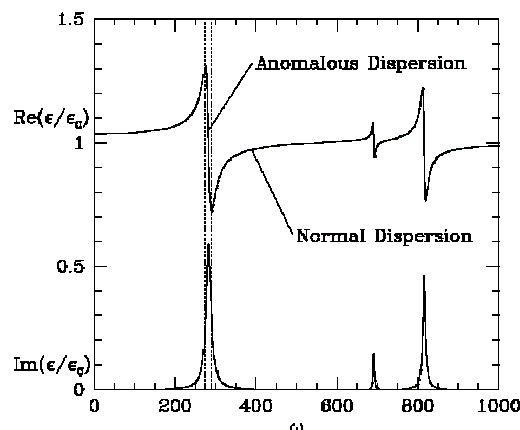
ha a komponensek nem egyszerre érkeznek:
- hosszabb impulzus
- időben változó frekvencia

Hogyan lehet az impulzus hosszát csökkenteni?



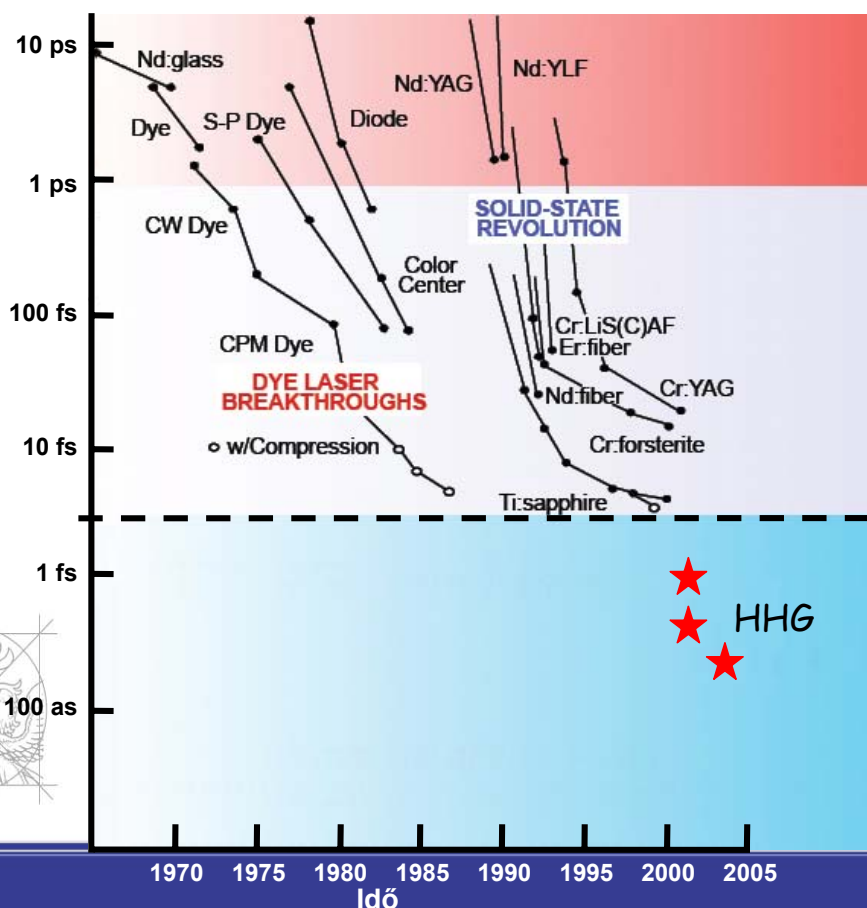
min: Fourier limit

$$\tau = \frac{4 \ln 2}{\Delta \omega}$$



Impulzushossz csökkenése

módusszinkronizálás
Q-kapcsolás



diszperzió-
kompenzálás

lézer-anyagok

új fizika!

2012. február 2.

Varjú Katalin: Attoszekundumos impulzusok keltése és alkalmazásai

19/53

Impulzus kompresszió: sáv szélesség növelése

Pl. Self Phase Modulation

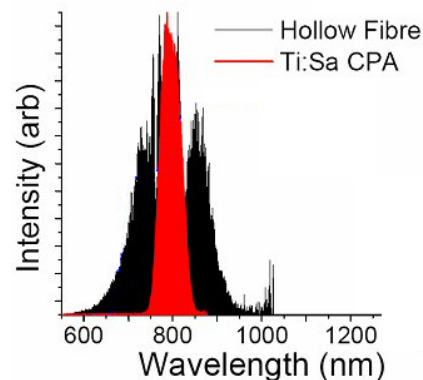
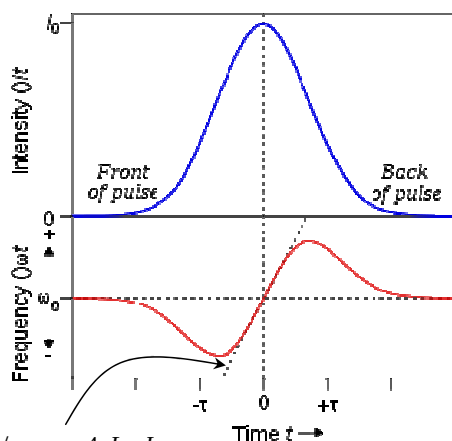
$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right)$$

&

$$n(I) = n_0 + n_2 I$$

$$\phi(t) = \omega_0 t - n(I(t)) \frac{2\pi L}{\lambda_0}$$

$$\omega(t) = \frac{d\phi}{dt} = \omega_0 - \frac{2\pi L n_2}{\lambda_0} \cdot \frac{dI}{dt}$$

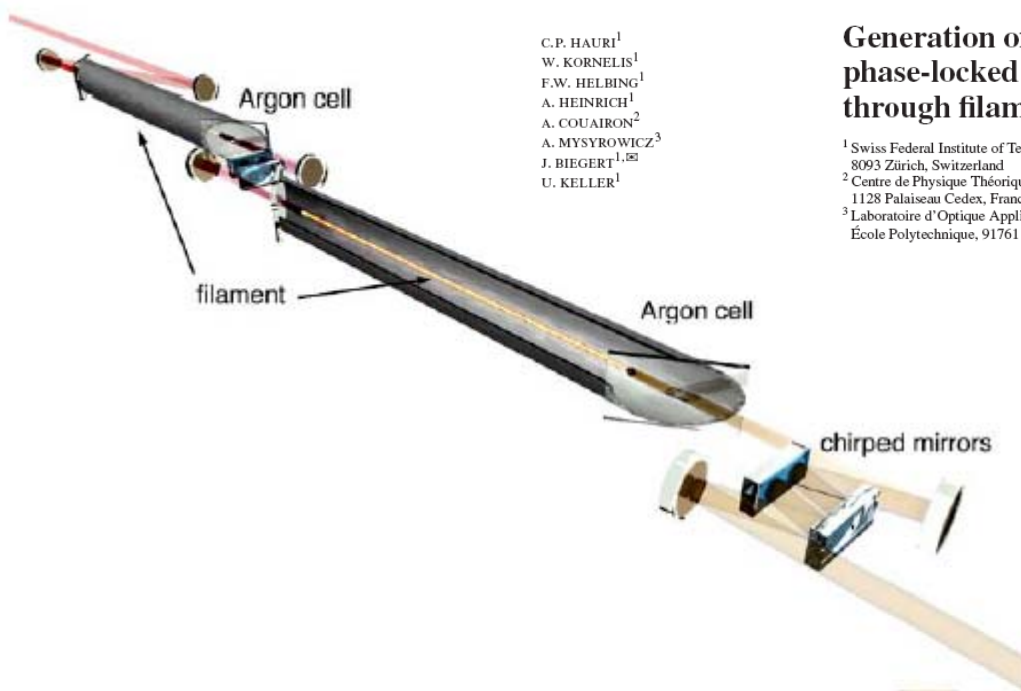


$$\omega(t) = \frac{d\phi}{dt} = \omega_0 + \frac{4\pi L n_2 I_0}{\lambda_0 \tau^2} t$$

2012. február 2.

Varjú Katalin: Attoszekundumos impulzusok keltése és alkalmazásai

20/53



C.P. HAURI¹
W. KORNELIS¹
F.W. HELBING¹
A. HEINRICH¹
A. COUAIRON²
A. MYSYROWICZ³
J. BIEGERT^{1,2}
U. KELLER¹

Generation of intense, carrier-envelope phase-locked few-cycle laser pulses through filamentation

¹ Swiss Federal Institute of Technology (ETH Zürich), Physics Department, 8093 Zürich, Switzerland

² Centre de Physique Théorique, École Polytechnique, CNRS UMR 7644, 1128 Palaiseau Cedex, France

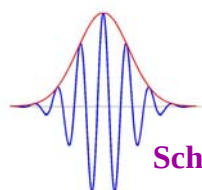
³ Laboratoire d'Optique Appliquée, École Nationale Supérieure de Techniques Avancées, École Polytechnique, 91761 Palaiseau Cedex, France

FIGURE 2 Experimental setup: Two cells are filled with argon at 840 mbar and 700 mbar respectively. CEO-phase-locked 43-fs IR pulses with 0.84 mJ energy form a 10–15-cm long filament in the middle of the first cell and are compressed with chirped mirrors to 10.5 fs at 790 μ J. Sending those pulses into the second cell results in a filament also 15–20 cm long that, after final recompression, leads to a 5.7-fs pulse with 45% of the initial pulse energy in an excellent spatial profile

"Breaking the femtosecond barrier"

Corkum: Opt. Phot. News 6, 18 (1995)

optikai hullámhossz,
800nm 3,8 fs, 1,5 periódus



Schenkel: Opt. Lett. 28, 1987 (2003)

XUV - röntgen tartomány, sávszélesség, koherens (nincs erősítő közeg)

nemlineáris folyamat:
stimulált Raman szórás

magasrendű harmonikus keltés

Thomson szórás

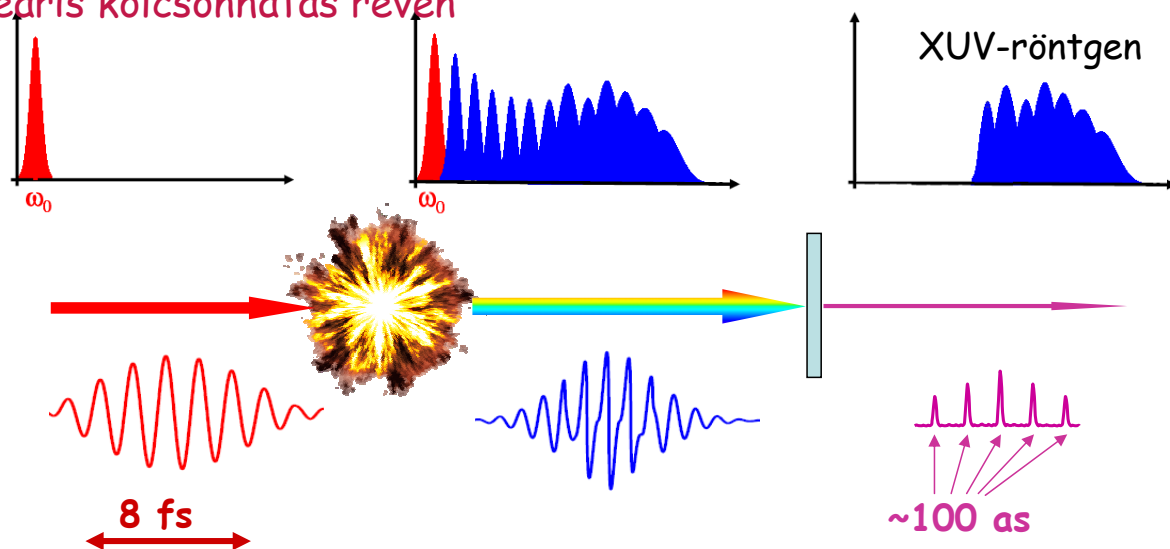


Attoszekundumos (10^{-18} s) impulzusok

Lézer elven kelthető legrövidebb impulzus: 3,8 fs.

DE a nagy intenzitású, femtoszekundumos lézerimpulzus felhasználható attoszekundumos impulzusok keltésére.

A lézer kedvező tulajdonságainak átörökítése nagy sávzélességű, magasabb központi hullámhosszú tartományba: nemlineáris kölcsönhatás révén



világrekord: 80 as

2012. február 2.

Varjú Katalin: Attoszekundumos impulzusok keltése és alkalmazásai

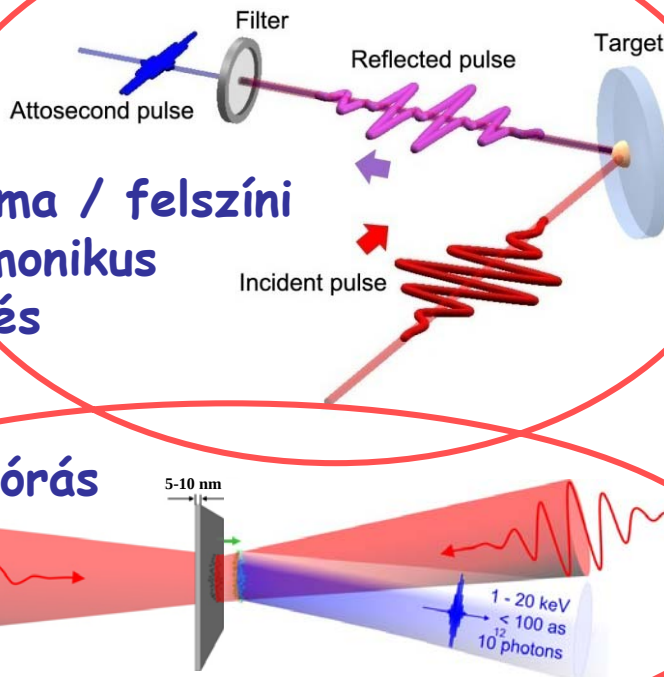
23/53

Attoszekundumos impulzus keltés

Gáz harmonikus keltés

Plazma / felszíni harmonikus keltés

Thomson-szórás



2012. február 2.

Varjú Katalin: Attoszekundumos impulzusok keltése és alkalmazásai

24/53

„Nagy” intenzitás? Elektromos tér?

atomi elektron: $E(r) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e}{r^2}$

$r \approx 10^{-10} \text{ m}$

$E \approx 10^{11} \frac{\text{V}}{\text{m}}$

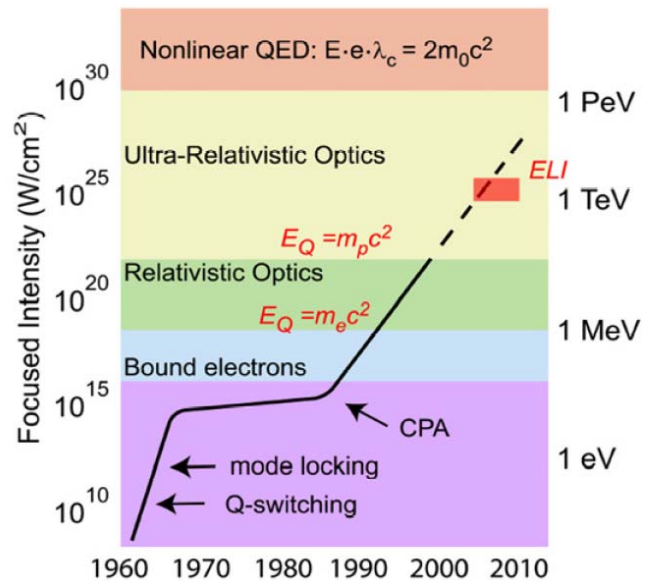
a fény e-m hullám, mekkora az elektromos térerősség?

intenzitás = teljesítménysűrűség = |Poynting vektor|

$I = 3,5 \text{ mJ} / 20 \text{ fs} / (100 \mu\text{m})^2 = 1,75 \times 10^{15} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$

$I = S = \frac{1}{2\mu_0} E_{\text{max}} B_{\text{max}} = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_{\text{max}}^2$

$E_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \cdot I}{\epsilon_0 c}} \approx 10^{11} \frac{\text{V}}{\text{m}}$



2012. február 2.

Varjú Katalin: Attoszekundumos

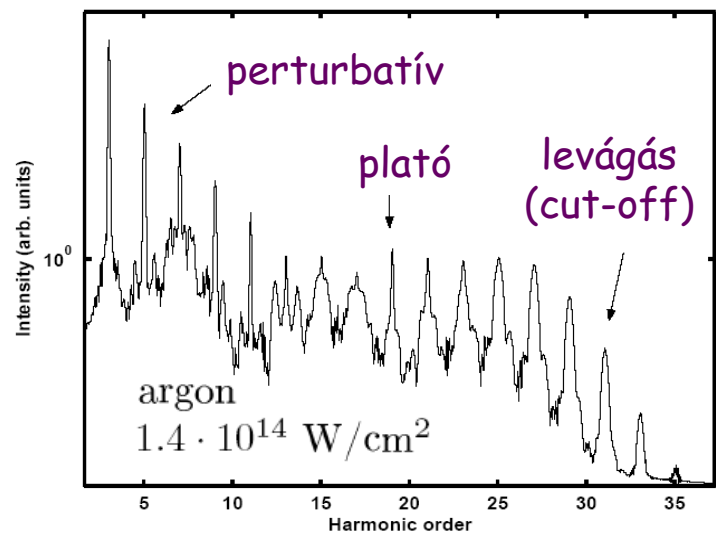
Gáz magas harmonikus keltés (GHHG)

Nagy intenzitású femtoszekundumos lézerimpulzus

$> 10^{14} \text{ W/cm}^2$

Ferray, JPhysB, 21, L31 (1988)

nemes gáz atomok



széles sávú XUV

attoszekundumos impulzus sorozat

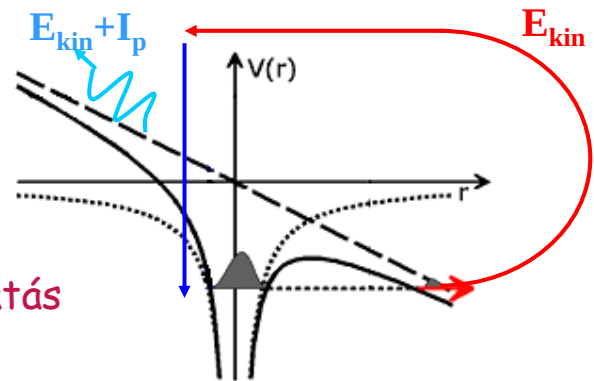
Farkas, Tóth: Phys. Lett. A 168, 447 (1992)

2012. február 2.

Varjú Katalin: Attoszekundumos impulzusok keltése és alkalmazásai

Gáz magas harmonikus keltés (GHHG)

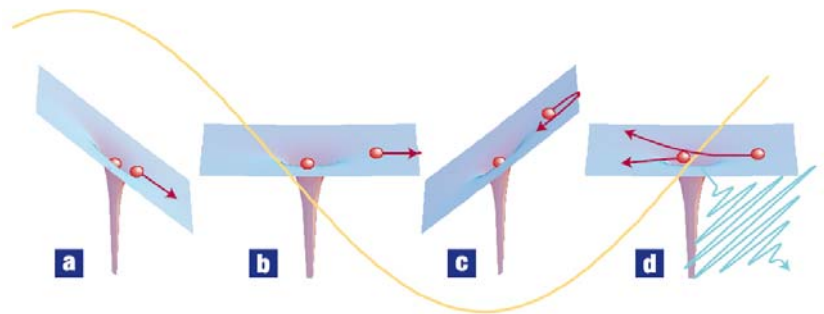
- I alagút effektus
- II lézer térben kényszerrezgés
- III rekombináció, foton kibocsátás



Schafer, PRL, 70, 1599 (1993)
Corkum, PRL, 71, 1994 (1993)

Félklasszikus leírás:

Az atomot a kvantummechanika segítségével írjuk le, de az elektromágneses mező hatását (a nagy foton-sűrűség miatt) klasszikus fizikai elvek szerint vesszük figyelembe.



Elektron lézertérben

A lézertérben az elektron gerjesztett rezgőmozgást végez.

átlagos mozgási energiája függ az e-m tér intenzitásától

$$E(t) = E_0 \sin(\omega t)$$

$$F = -eE = m\ddot{x}$$

$$U_p = \frac{e^2 I}{2m_e \epsilon_0 c \omega^2}$$

PI. $2 \cdot 10^{14} \text{ W/cm}^2$, 800nm
 $U_p = 12 \text{ eV}$
 cf. $I_p = 10\text{-}20 \text{ eV}$ (nemesgázok)
 $h\nu = 1,55 \text{ eV}$



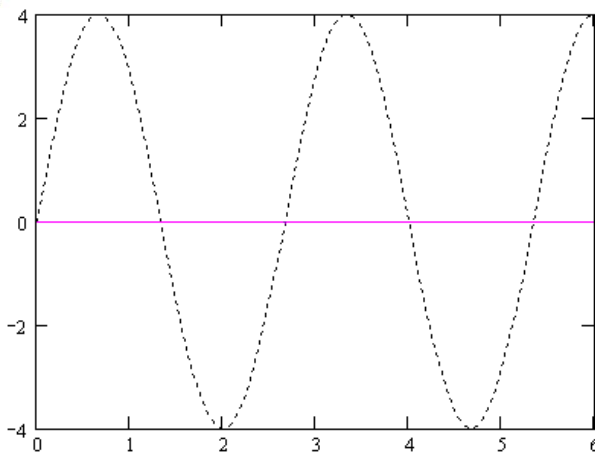
Szabad elektron a lézer terében: klasszikus leírás

$$E(t) = E_0 \sin(\omega t)$$

$$v = 0 \quad \text{at} \quad t_i \quad F = -eE = m\ddot{x}$$

$$x(t) = \frac{eE_0}{m\omega^2} [\sin(\omega t) - \sin(\omega t_i) - \omega(t - t_i) \cos(\omega t_i)]$$

analitikus megoldás



1, az elektron visszatérhet

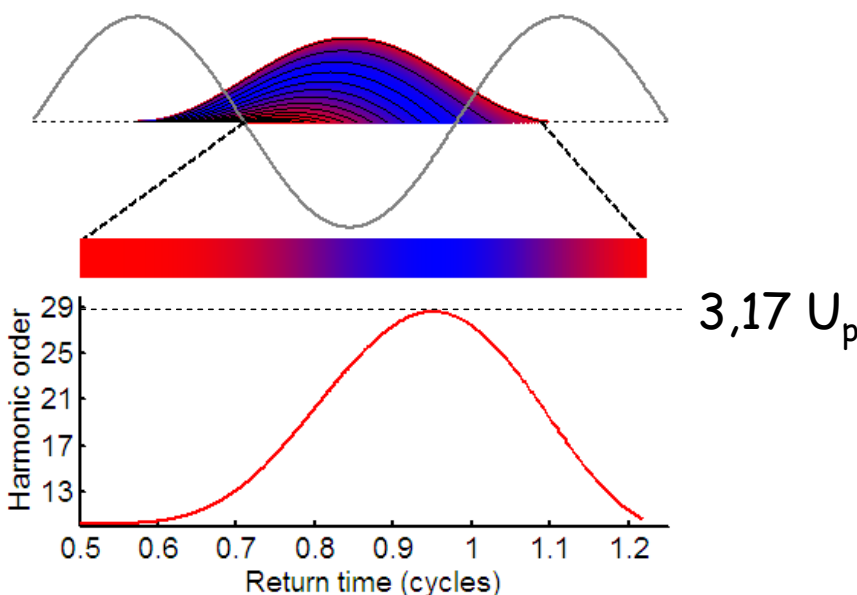
2, csak bizonyos ionizációs idő
esetén tér vissza

3, a lézertértől nyert energia
(~ sebesség négyzete ~ pálya
érintője) az ionizációs időtől függ.

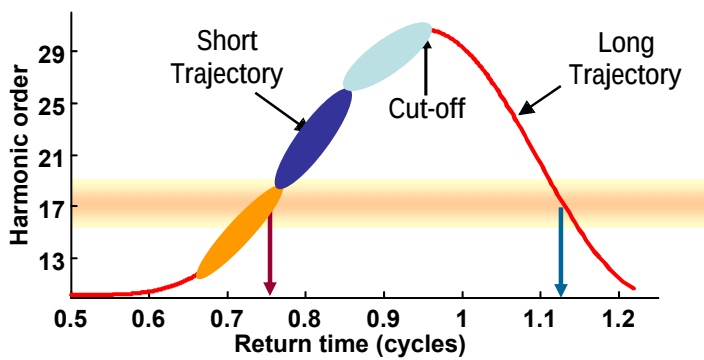
A visszatérő elektron energiája

$$\ddot{x} = -\frac{e}{m} E_0 \sin(\omega t)$$

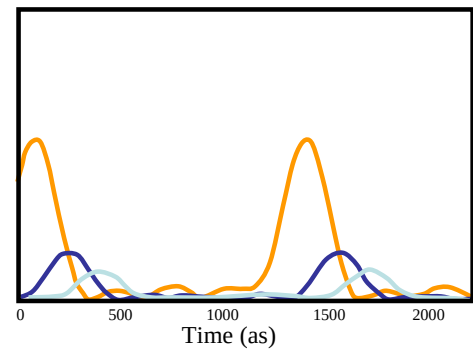
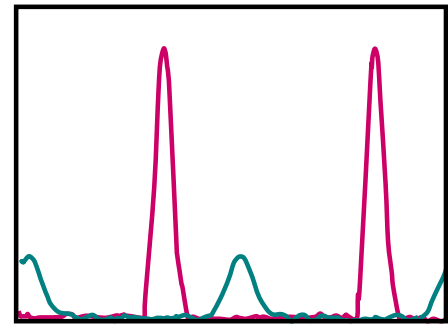
$$x(t) = \frac{eE_0}{m\omega^2} [\sin(\omega t) - \sin(\omega t_i) - \omega(t - t_i) \cos(\omega t_i)]$$



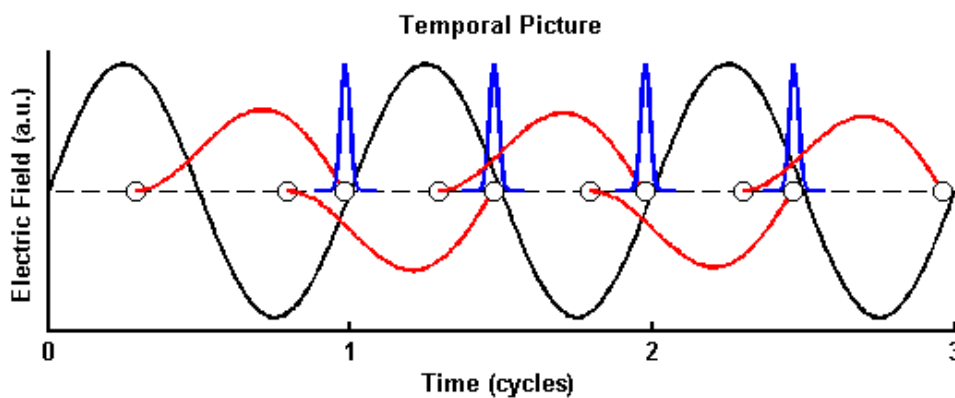
Következmények (klasszikus)



$$E_{kin}^{max} = 3,2 \times U_p \quad h\nu^{max} = I_p + 3,2 \times U_p$$



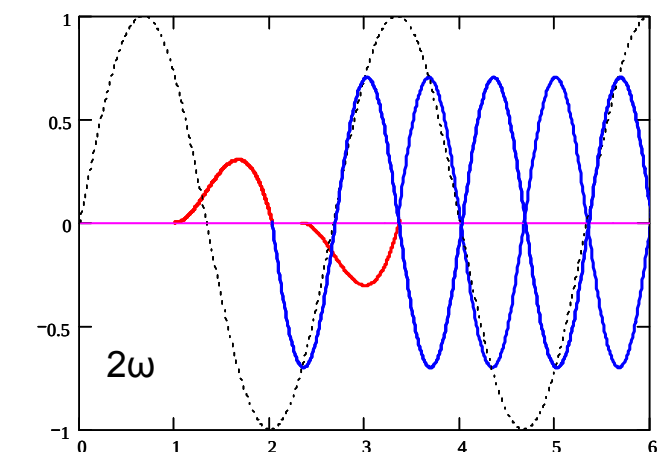
Periodicitás



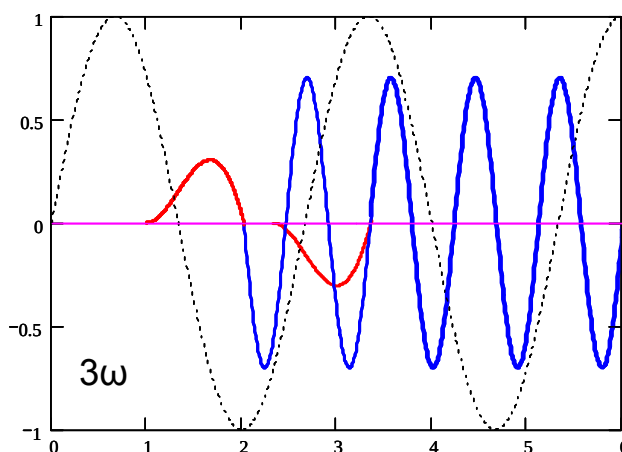
Mivel a fotonkibocsátás minden félciklusban (a gáz izotróp) megismétlődik (időkép), a spektrumban 2ω távolságokban elhelyezkedő csúcsokat találunk.

Miért a páratlan felharmonikusok?

A rendszer szimmetriája miatt (atom) a folyamat $T/2$ periódussal ismétlődik, vagyis a spektrum 2ω ismétléssel rendelkezik. (És természetszerűnek tűnik, hogy az ω komponenst tartalmazza...)

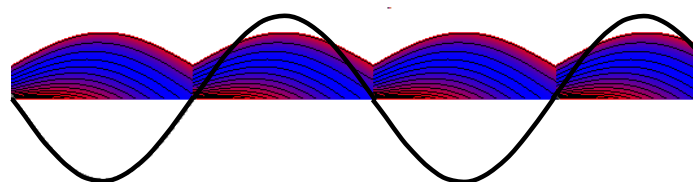
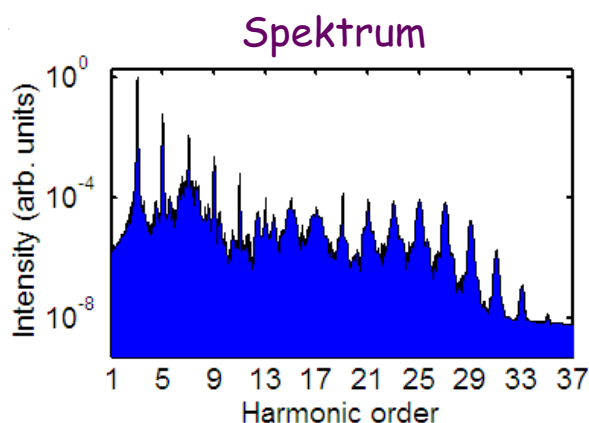


Kioltás

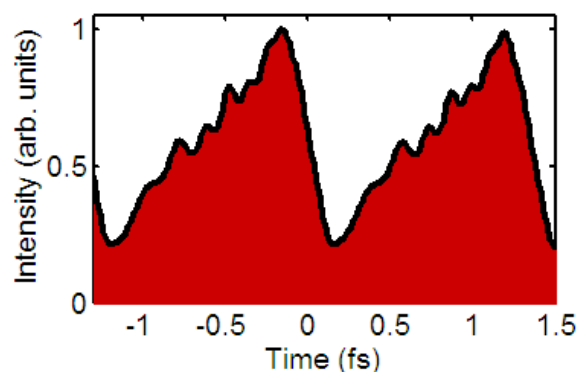


Erősítés

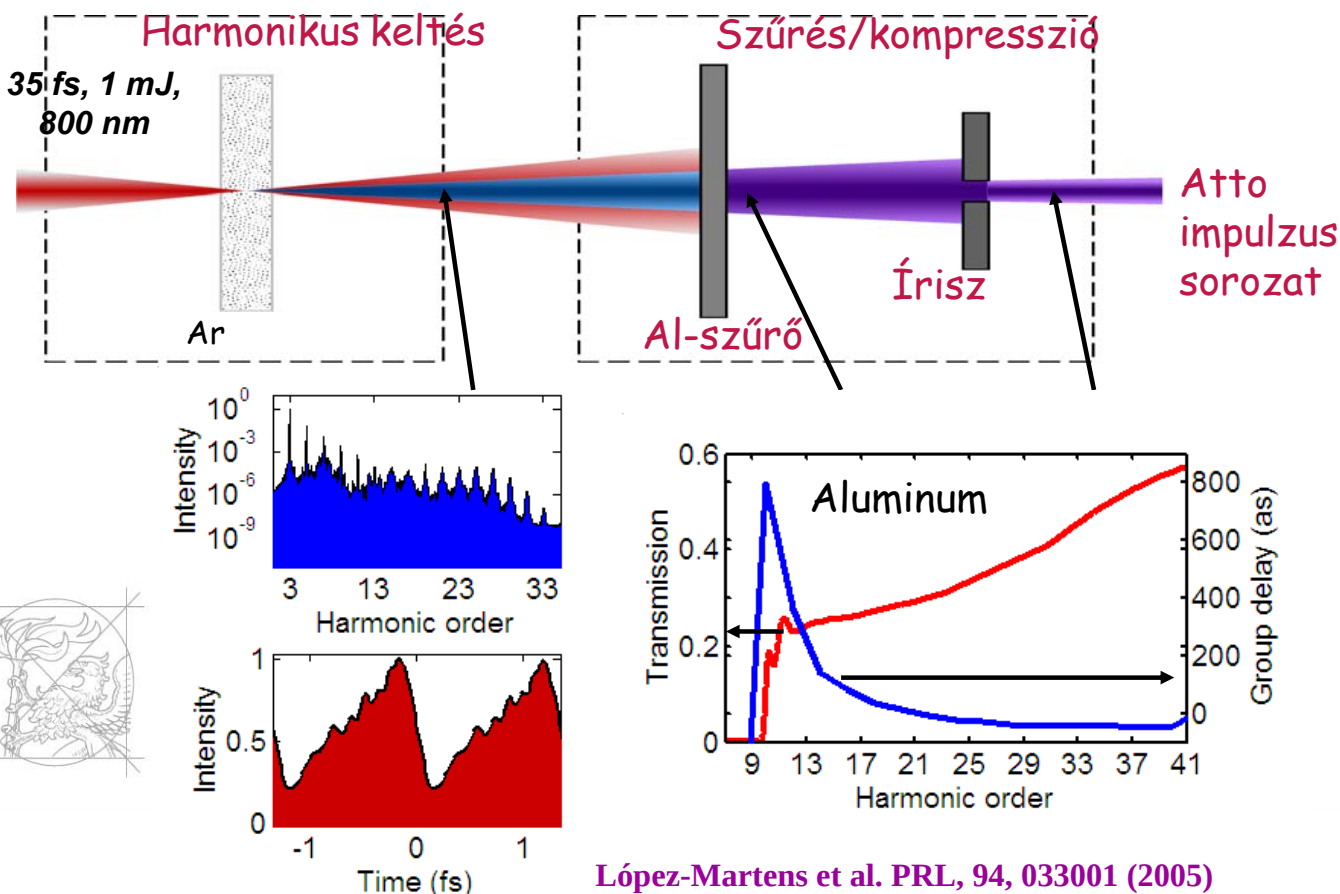
A harmonikus sugárzás időbeli alakja



Nem attoszekundumos impulzusok!!



Attoszekundumos impulzusok: kísérleti megvalósítás



Attoszekundumos forrás fejlesztése:

- 1, magasabb fotonenergia elérése („water-window“)
- 2, magasabb fotonszám (konverziós hatásfok, fázis-illesztés)
- 3, formálható impulzus
- 4, izolált impulzus (cutoff, time-gate, depletion)

Fotonenergia (cutoff: $I_p + 3,2 \cdot U_p$)

$$\hbar\omega_{\max} = I_p + 3,17U_p$$

$$U_p = eE^2/4m\omega^2 \propto I\lambda^2$$

Typical values :

$$I_p = 10 \text{ to } 24 \text{ eV}, I = 10^{15} \text{ W/cm}^2$$

$$@ 800 \text{ nm } U_p = 60 \text{ eV}$$

$$I_p + 3,17U_p \approx 200 \text{ eV}$$

1, lézer intenzitás növelése

korlát: a közeg ionizációja miatt romlik a fázisillesztés, és a közeg kimerül

lehetőség: nagyon rövid impulzusok, kvázi-fázisillesztés

2, lézer hullámhosszának növelése

korlát: lézer technológia

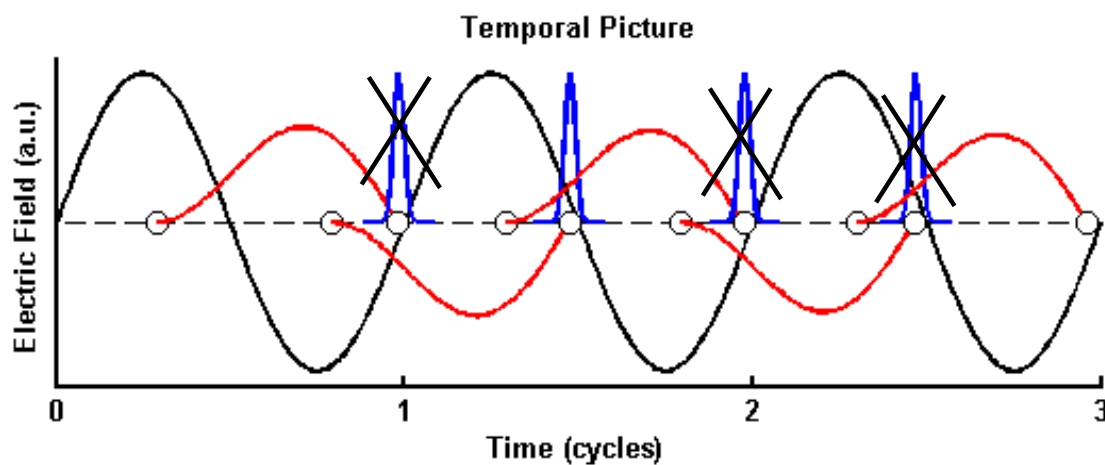
probléma: a keltés hatásfoka $\propto \lambda^{-(5-6)}$

3, ionizációs potenciál növelése (ionok használata)

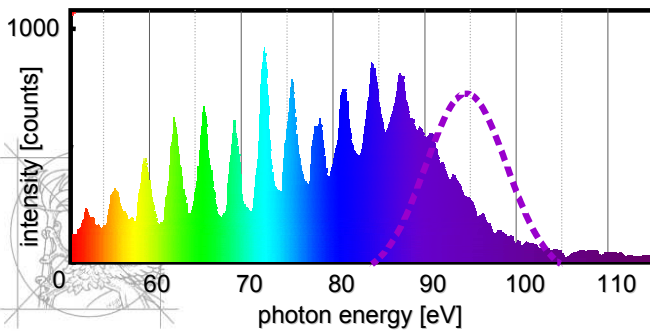
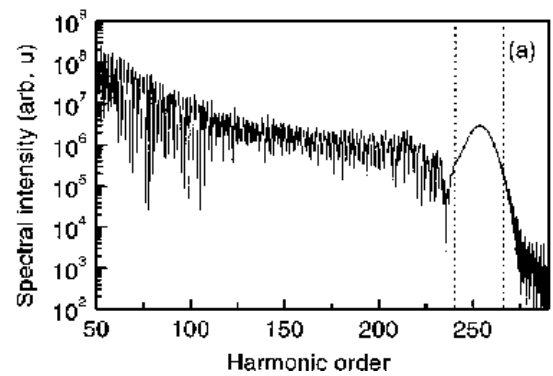
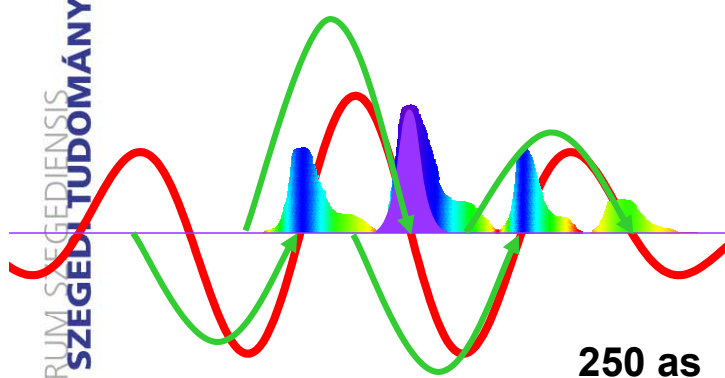
probléma: fázisillesztés



Izolált attoszekundumos impulzus



Intenzitás-kapu



$\tau = 5 \text{ fs}$, CEP-stabilizált

- a cutoff spektrális szűrése
- kis intenzitás
- kis sávszélesség (impulzushossz)

A. Baltuska: *Nature* **421**, 611 (2003)

M. Hentschel *et al.*, *Nature* **414**, 509 (2001)

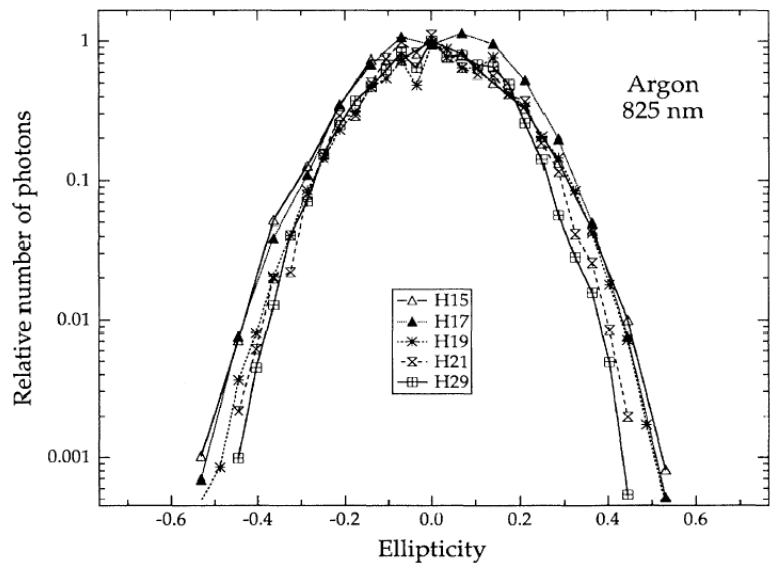
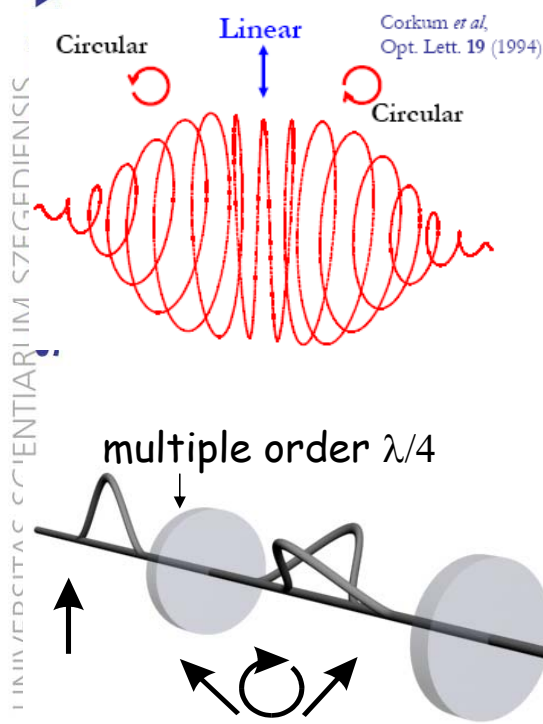
2012. február 2.

Varjú Katalin: Attoszekundumos impulzusok keltése és alkalmazásai

39/53

Ellipticitás-kapu

Budil *et al.*, *PRA* **48**, R3437 (1993)



Sansone, *Science* **314** (2006)

2012. február 2.

Varjú Katalin: Attoszekundumos impulzusok keltése és alkalmazásai

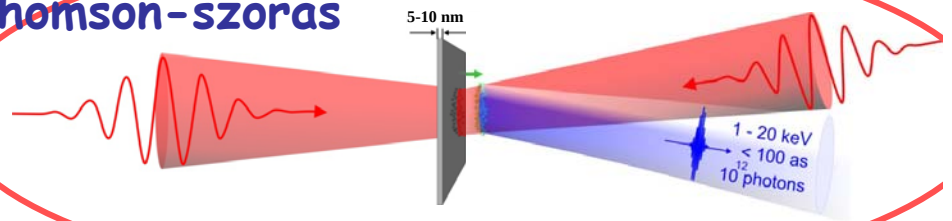
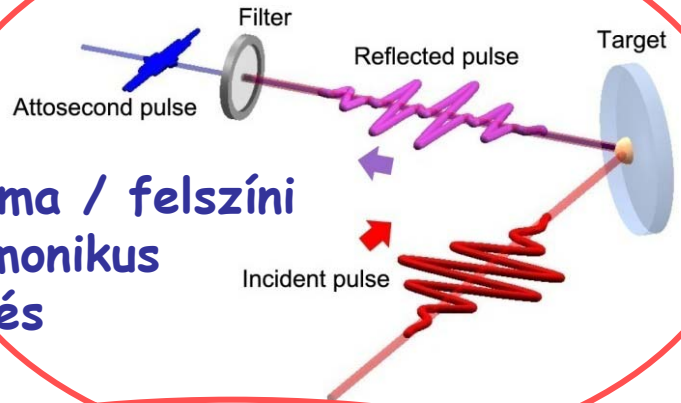
40/53

Attoszekundumos impulzus keltés

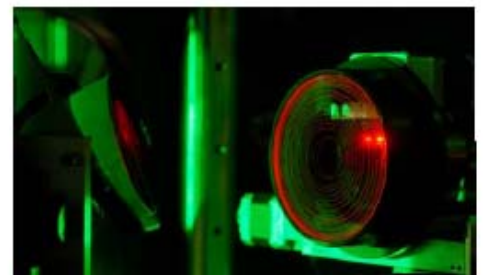
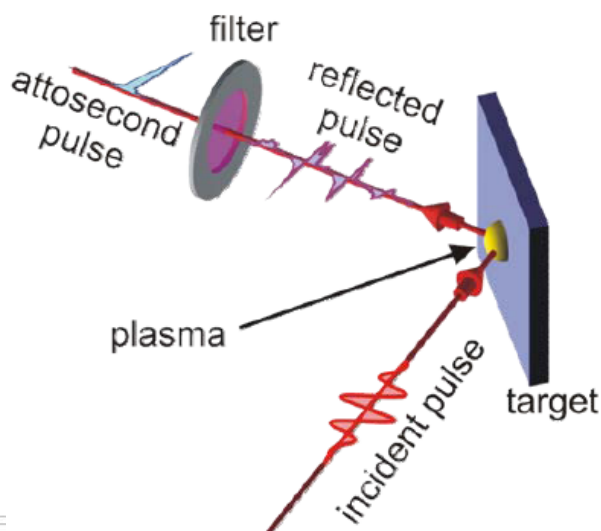
Gáz
harmonikus
keltés

Plazma / felszíni
harmonikus
keltés

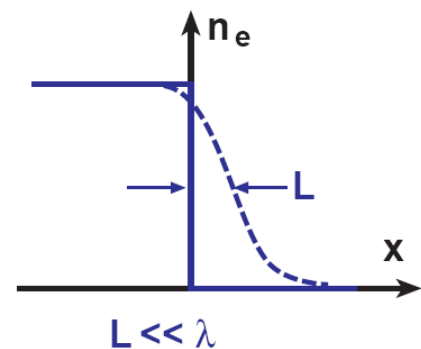
Thomson-szórás



Plazma-tükör



Plasma density profile

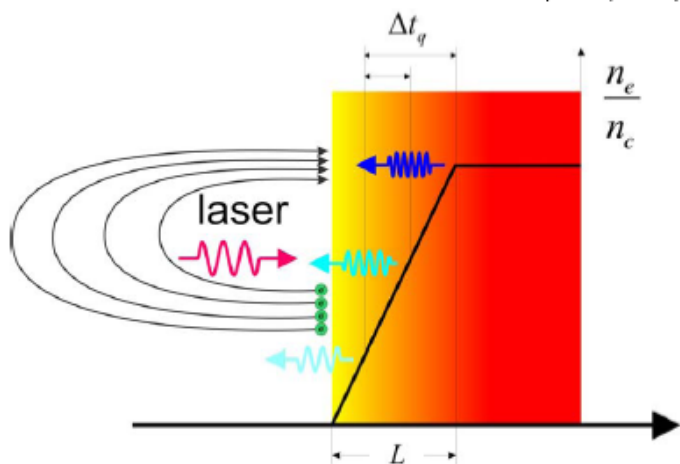


2 mechanizmus

Coherent Wake Emission (CWE)

non-relativistic $a_L^2 \leq 1$

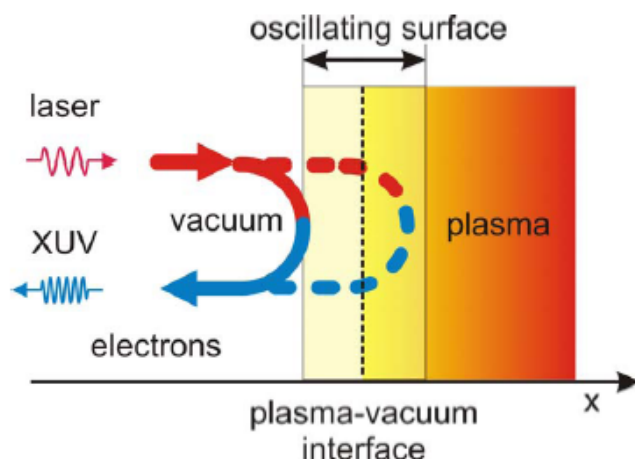
$$a_L^2 = I_L \lambda^2 / (1.38 \times 10^{18} \text{ W } \mu\text{m}^2 / \text{cm}^2)$$



F. Quéré et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 125004 (2006)
A. Tarasevitch et al., Phys. Rev. Lett. **98**, 103902 (2007).
F. Quéré et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 095004 (2008).
C. Thaury et al., Nat. Phys. **4**, 631 (2008).

Relativistic Oscillating Mirror (ROM)

relativistic $a_L^2 \geq 1$



S.V. Bulanov et al. Phys. Plasmas, **1**, 745 (1994)
S. Gordienko et al. Phys. Rev. Lett. **93**, 115002 (2004)
R. Lichters et al. Phys. Plasmas **3**, 3425 (1996)
G. D. Tsakiris et al. New J. Phys. **8**, 19(2006)
T. Baeva et al., PRE, **74**, 046404(2006)

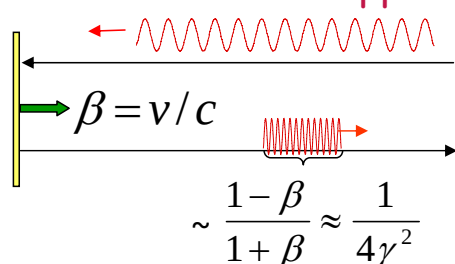
2012. február 2.

Varjú Katalin: Attoszekundumos impulzusok keltése és alkalmazásai

43/53

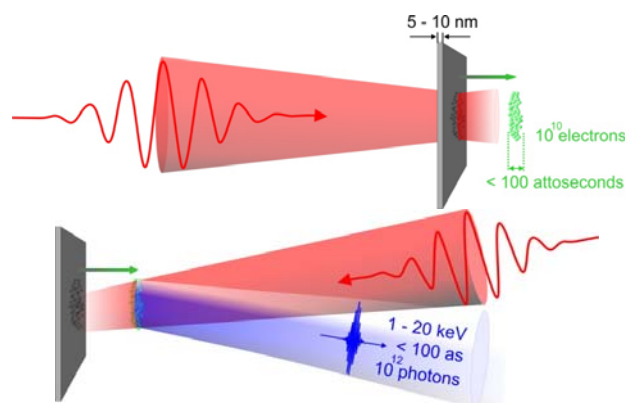
Koherens Thomson szórás

Relativisztikus Doppler eltolódás



Sűrű, relativisztikus sebességgel repülő elektron-lap létrehozása (pár nanométer vastagságú fóliából)

Szükséges lézerimpulzus:
ultra-nagy kontraszt ($< 10^{12}$)
ultra-nagy intenzitás $10^{19} - 10^{20} \text{ W/cm}^2$ (ELI-ALPS)



V. V. Kulagin et al., Phys. Rev. Lett. **99**, 124801 (2007).

H.C. Wu, J. Meyer-ter-Vehn, et al. Phys. Rev. Lett. **104**, 234801 (2010).

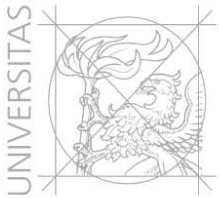
2012. február 2.

Varjú Katalin: Attoszekundumos impulzusok keltése és alkalmazásai

44/53

attoszekundum (10^{-18}s)

- miért?
- hogyan?
- alkalmazások

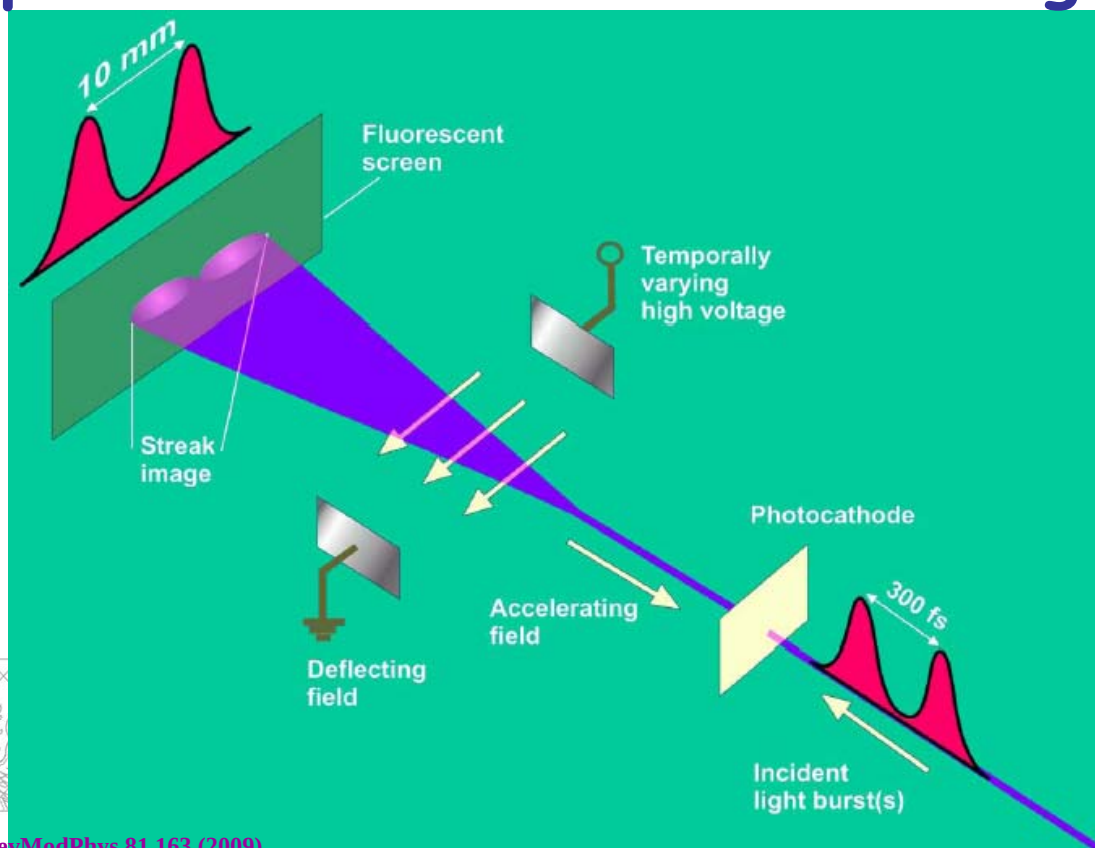


2012. február 2.

Varjú Katalin: Attoszekundumos impulzusok keltése és alkalmazásai

45/53

Impulzus-alak: sávkamera-analógia



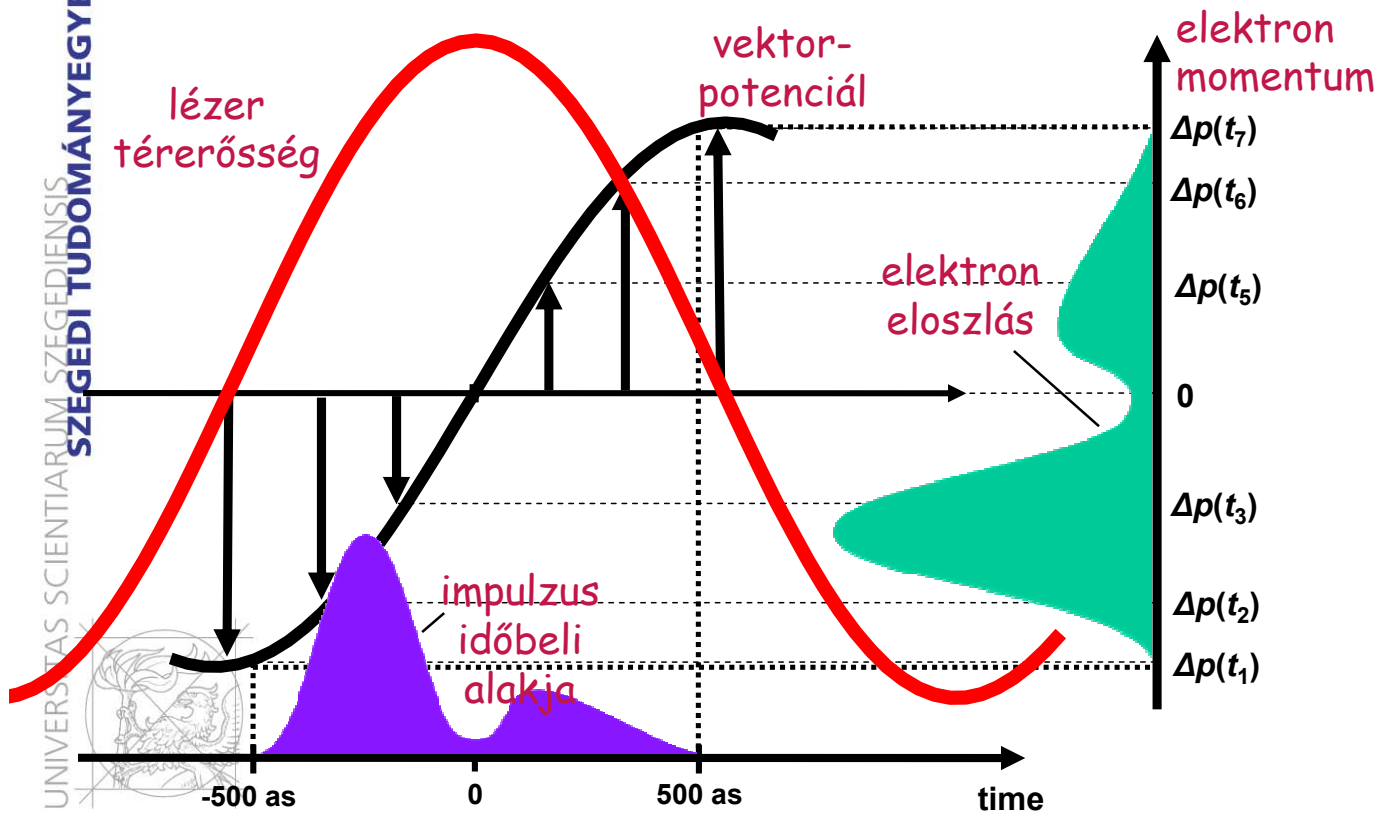
Krausz, Ivanov, RevModPhys 81 163 (2009)

2012. február 2.

Varjú Katalin: Attoszekundumos impulzusok keltése és alkalmazásai

46/53

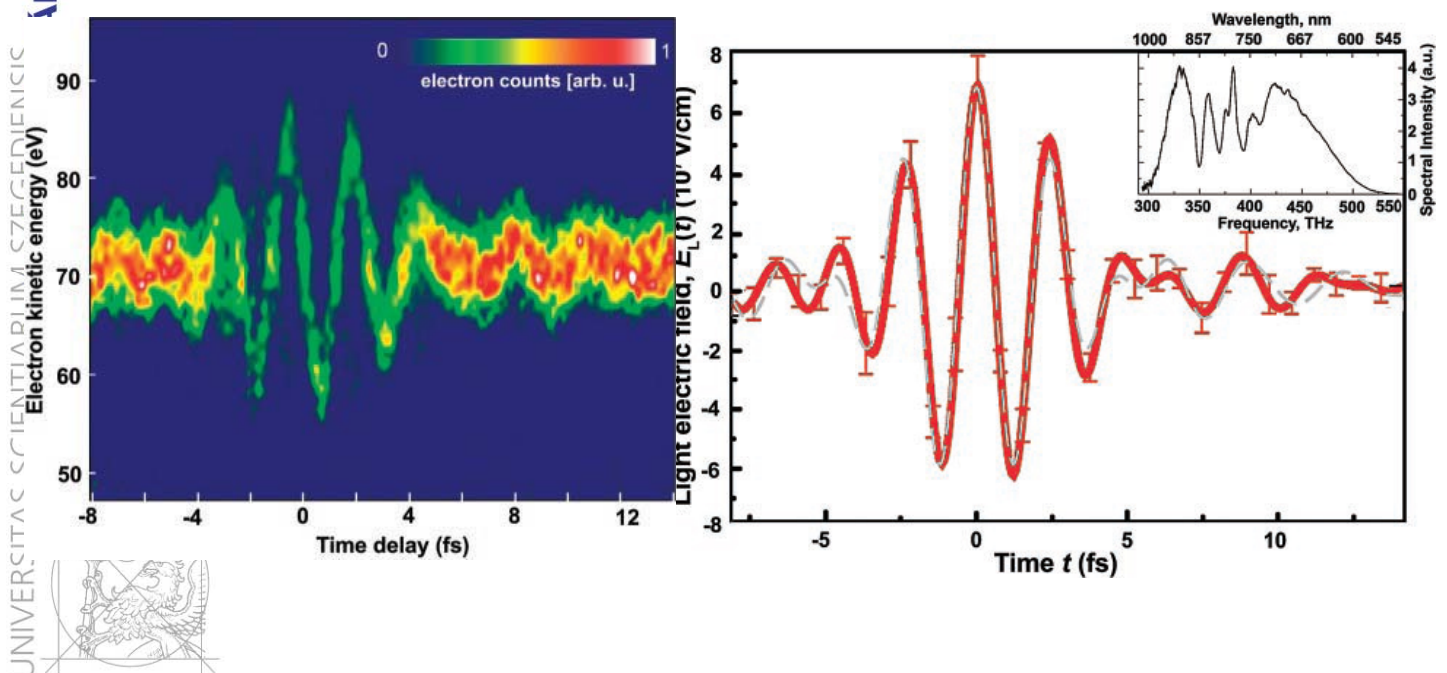
„optical-field-driven streak camera”



Itatani: PRL 88, 173903 (2002)

Kitzler: PRL 88, 173904 (2002)

A fényhullám megmérése



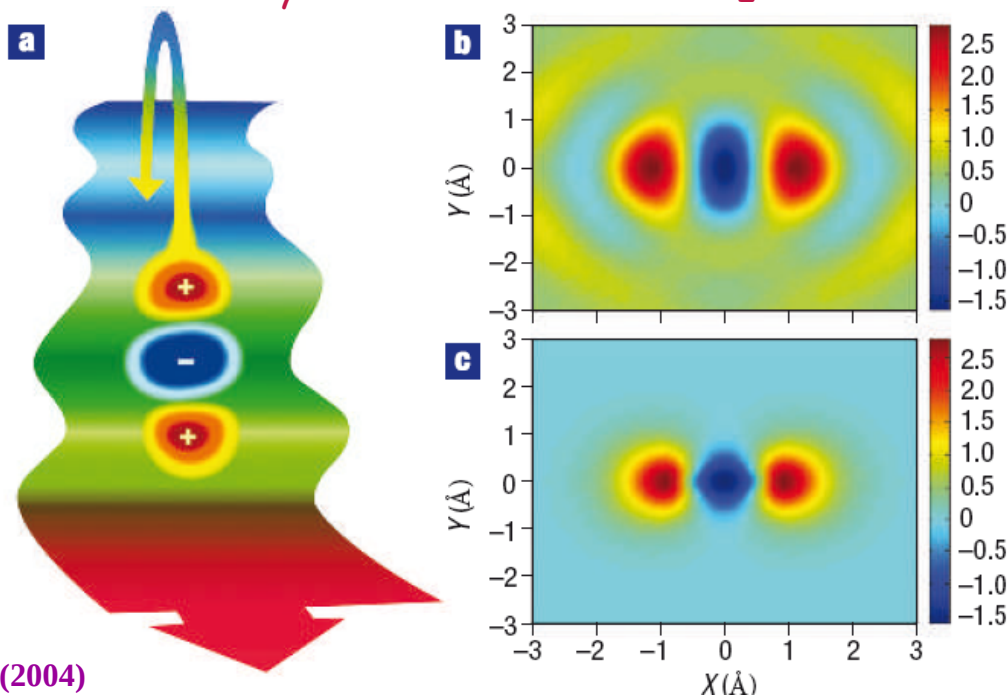
Gouliemakis et al. Science 305, 1267 (2004)

Molekula-tomográfia

magasrendű harmonikusok keltése molekulákban

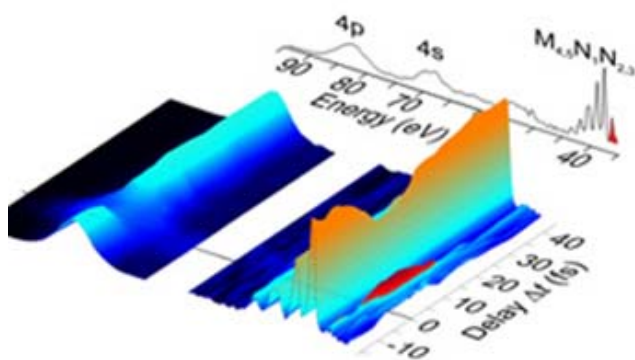
a visszatérő elektron az iontörzsön szóródik
elektron-eloszlás → ionok elhelyezkedése

N_2

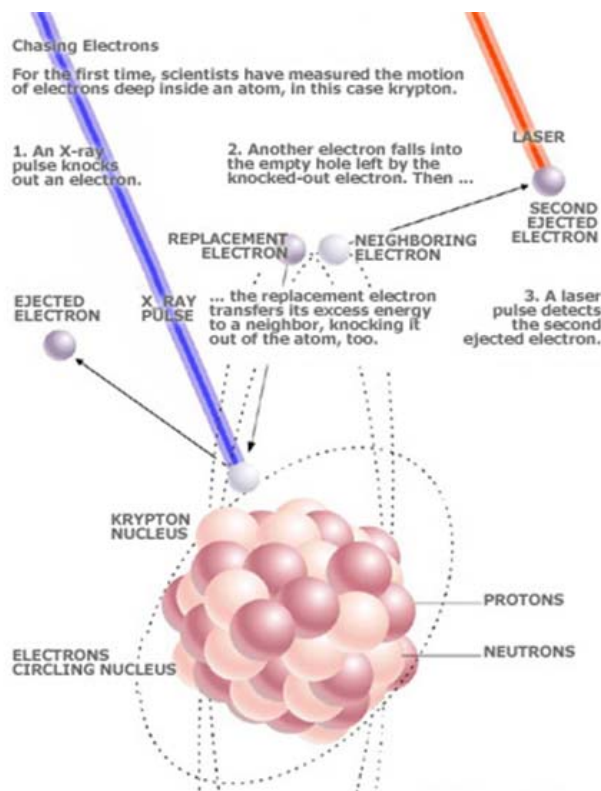


Itatani: Nature 432, 867 (2004)

Auger-folyamat vizsgálata



Az M-héjon létrejövő lyuk
élettartama 8 fs.

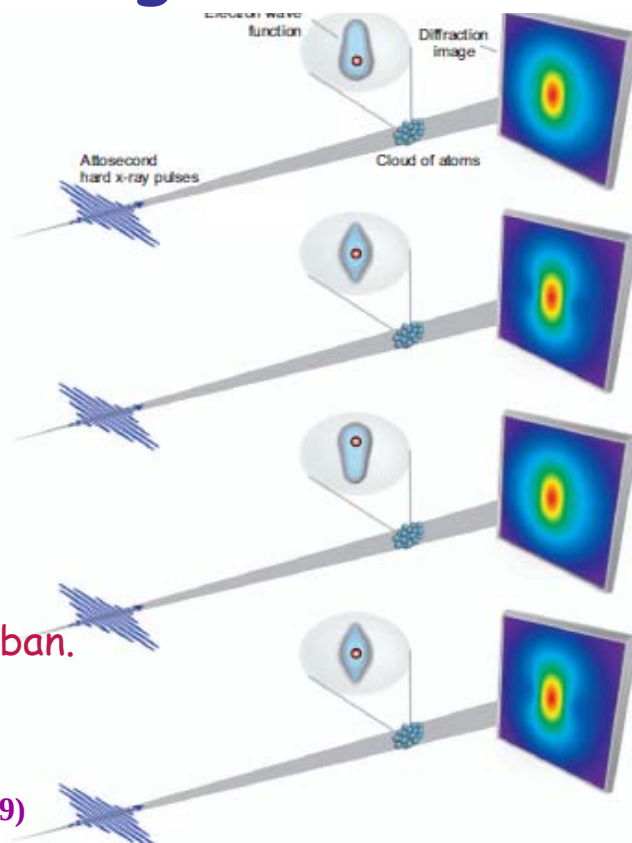


Drescher, Nature 419 803 (2002)

Attoszekundumos röntgen diffrakció

Kristálytani analógia

Atomi rendszerek elektron-eloszlás dinamikájának megfigyelése.



Hidrogén atom 1S-2P állapotok szuperpozíciójában.

Krausz, Ivanov, RevModPhys 81 163 (2009)

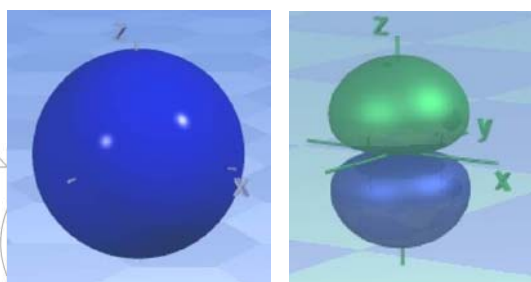
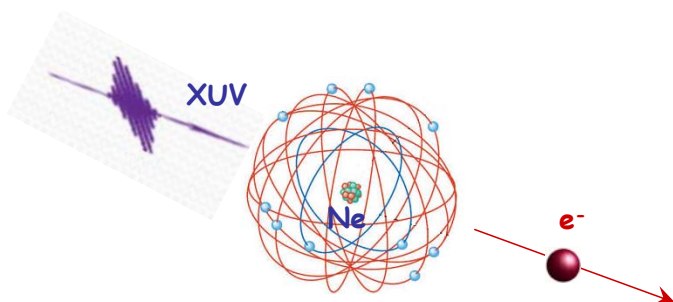
2012. február 2.

Varjú Katalin: Attoszekundumos impulzusok keltése és alkalmazásai

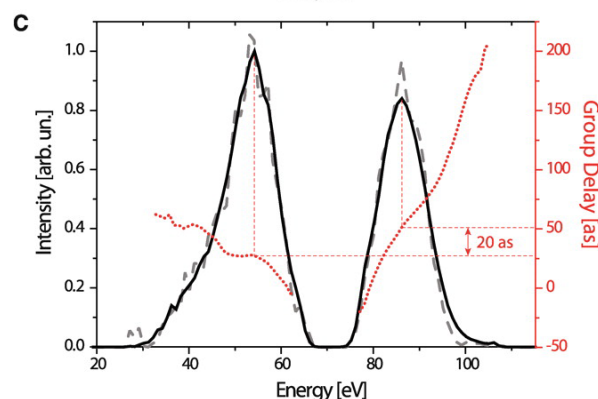
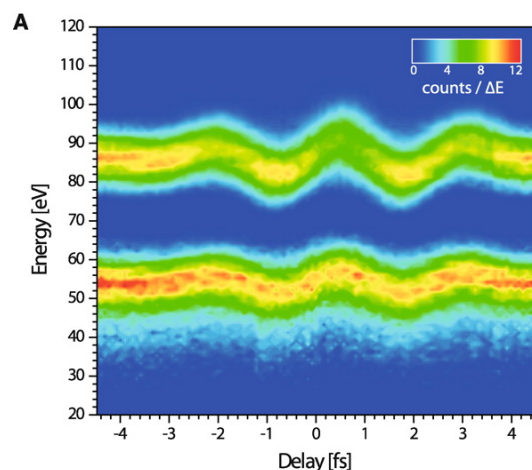
51/53

Ne ionizációja 2s illetve 2p pályáról:

a 2p foto-elektron 21 ± 5 as-ot késik a 2s foto-elektronhoz képest.



Schultze, Science 328 1658 (2010)



2012. február 2.

Varjú Katalin: Attoszekundumos impulzusok keltése és alkalmazásai

52/53

Extremely short laser pulses can illuminate electrons in motion



The fast show

Aug 31st 2006

From The Economist print edition