PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM
UNIVERSITY OF PÉCS
Institute of Physics
www.physics.ttk.pte.hu

eli attosecond

Lézerrel pumpált terahertzes források és alkalmazásaik

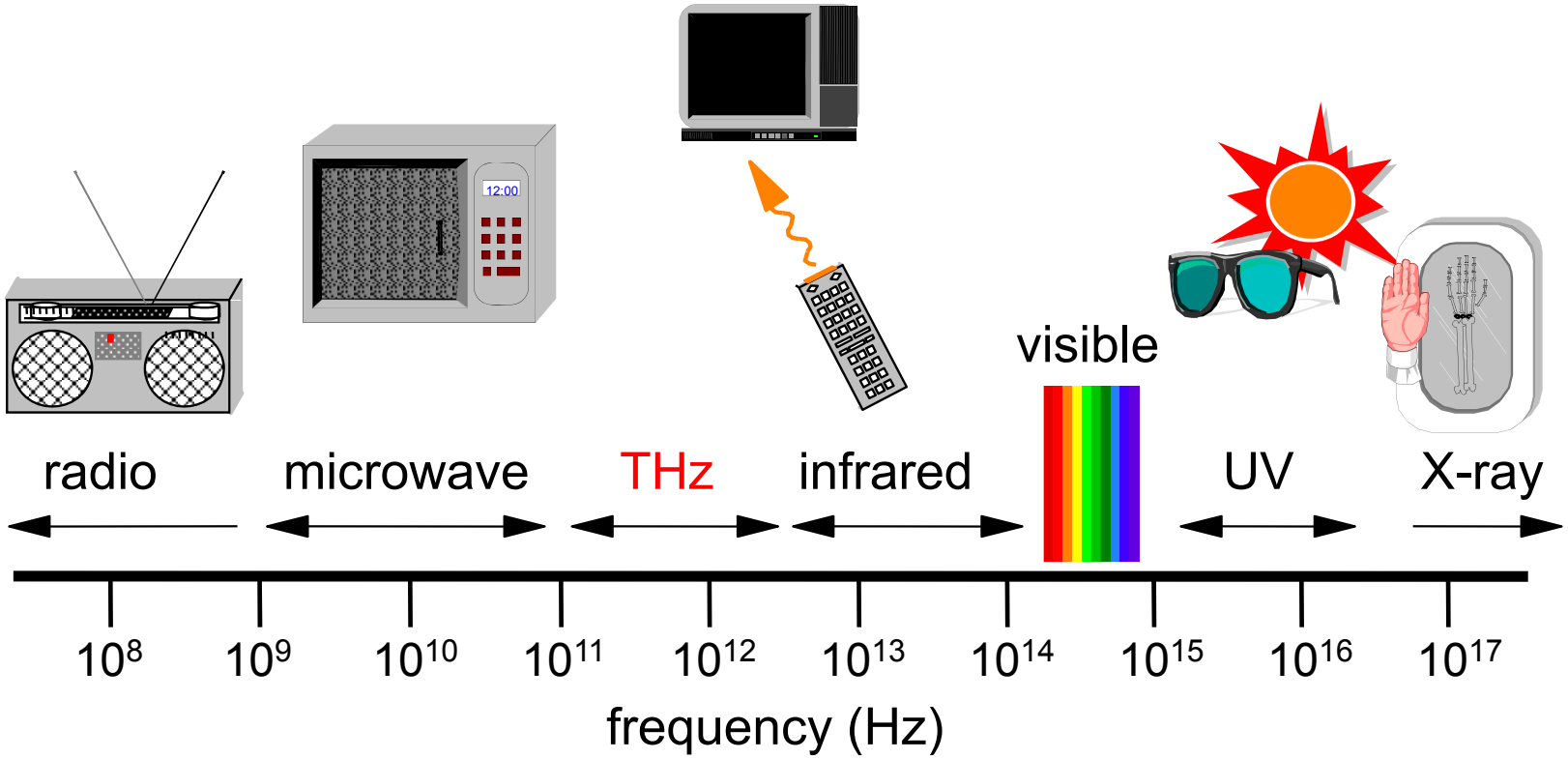
Fülöp J. A.[1,3], Pálfalvi L.[2], Ollmann Z.[2], Almási G.[1,2], Hebling J.[1,2]

[1] MTA-PTE Nagyintenzitású Terahertzes Kutatócsoport, Pécs
[2] Pécsi Tudományegyetem, Fizikai Intézet, Pécs
[3] ELI-HU Nkft., Szeged

Fizikus Vándorgyűlés, Debrecen, 2013. aug. 21-24.

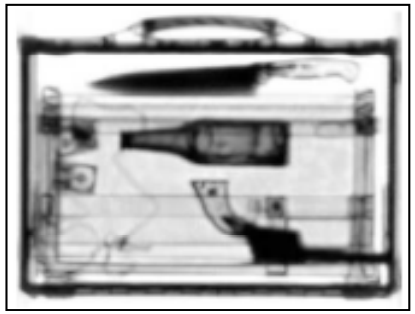
A THz-es tartomány az elektromágneses spektrumban

Frekvencia:	ν	=	0,1 – 30 THz
Hullámszám:	λ^{-1}	=	3,3 – 1000 cm^{-1}
Hullámhossz:	λ	=	10 – 3000 µm

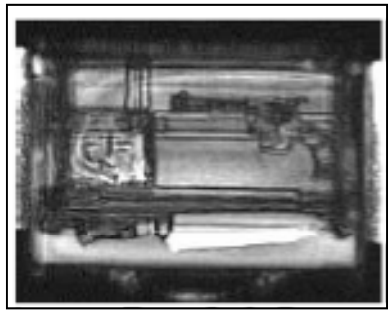


Miért érdekes a THz-es tartomány?

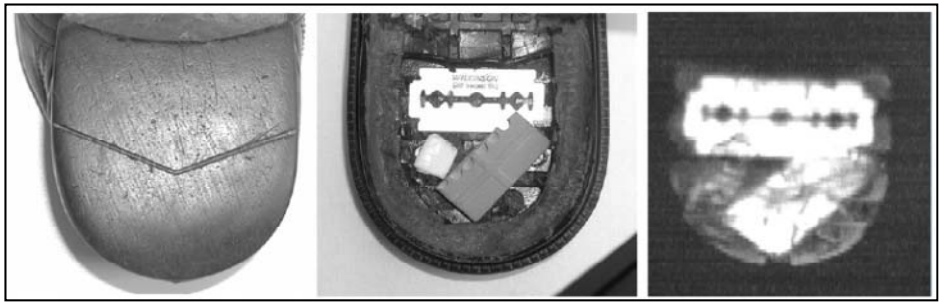
- Nagy molekulák rotációs frekvenciája a THz-es tartományba esik
- Fontos biomolekulák abszorpciós spektruma érzékeny a molekulák konformációjára
- Molekulák hidratációs környezete tanulmányozható
- Magas hőmérsékletű szupravezetők karakterisztikus frekvenciája
- Töltéshordozók szilárdtestekben
- Orvosi alkalmazások
- Biztonságtechnika



transmission

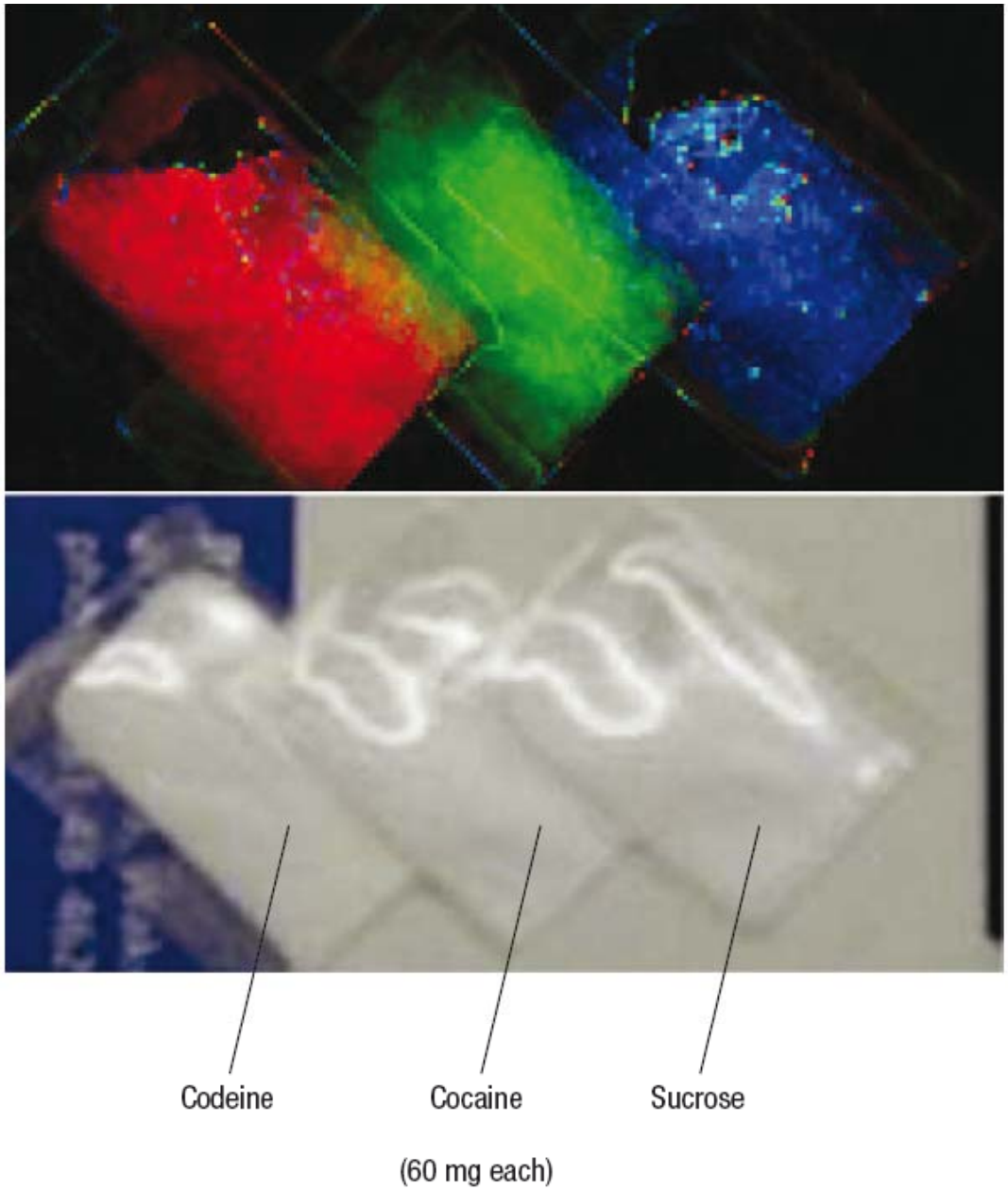


reflection



optical optical THz

THz-es spektrális képalkotás



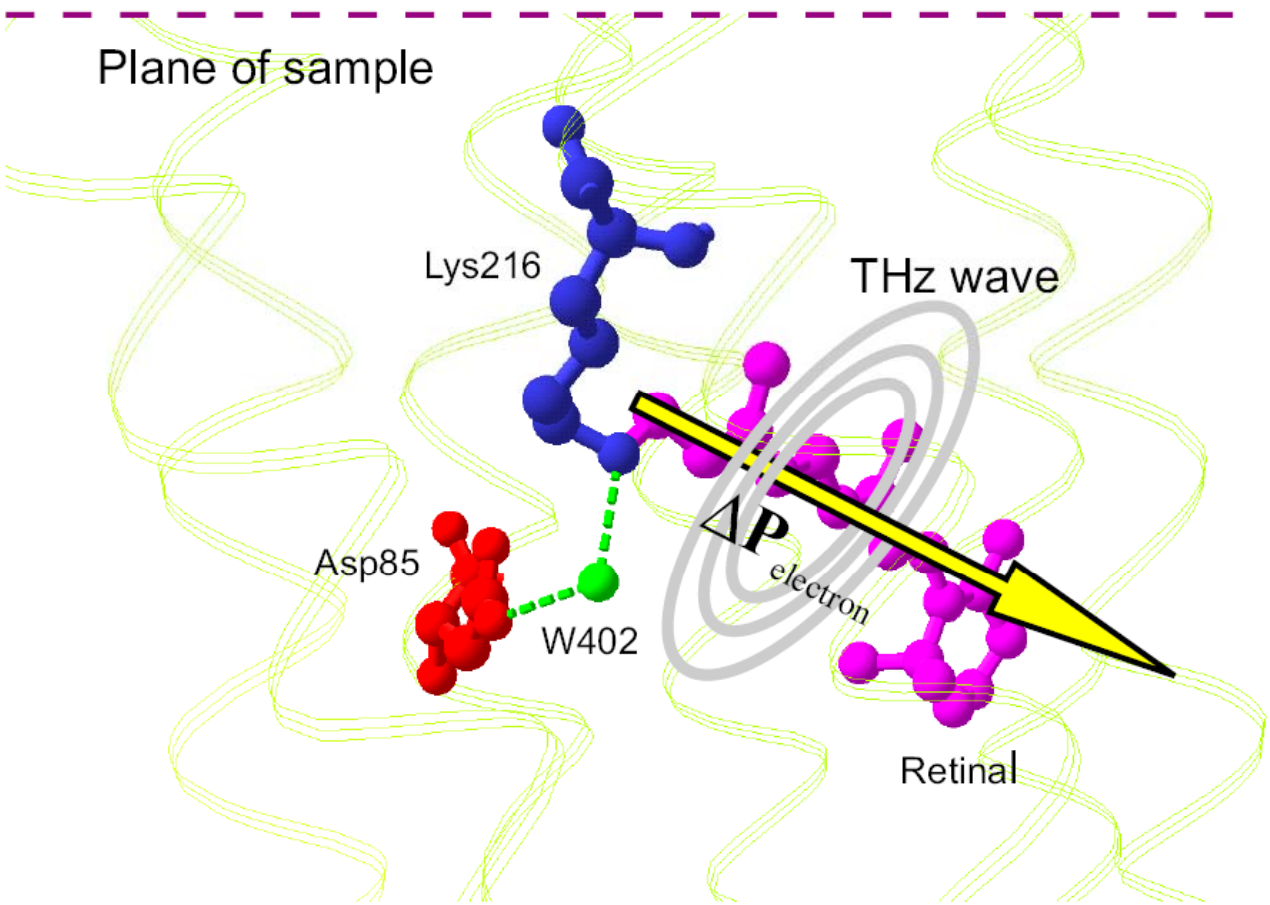
Hamisszínes kép különböző THz hullámhosszakon készített felvételek alapján.

A kémiai összetétel meghatározható a THz abszorpció alapján.

Látható fényben készített felvétel

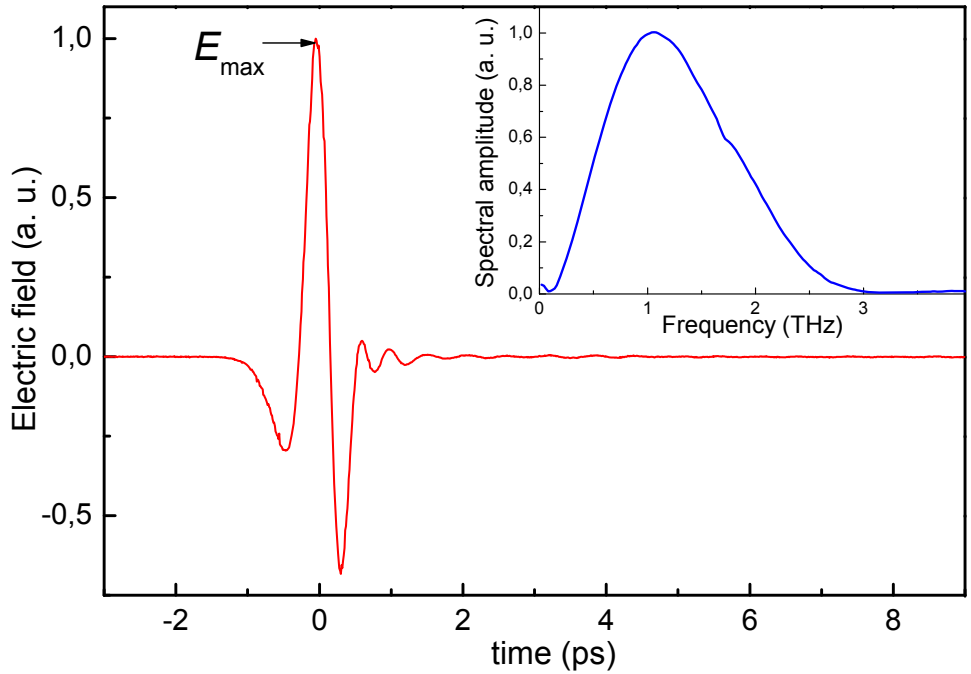
THz-es sugárzás fehérjéből

- Bakteriorodopszin molekula fényenergia felhasználásával protonokat pumpál a membránon át a sejten kívülre.
- Az így keletkező protonkoncentráció-gradiens kémiai energiává alakul, amit a sejt felhasznál.
- A protonpumpa töltésmozgása THz-es sugárzást kelt.



G.I. Groma, J. Hebling et al., PNAS 2008

THz-es impulzusok alkalmazásai



- Lineáris THz-es spektroszkópia (E_{max} ≈ 100 V/cm → 10 fJ impulzus energia)

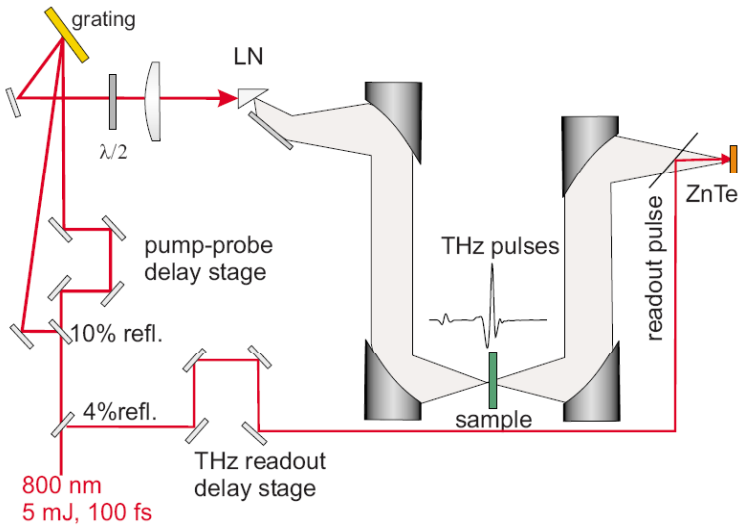
  grafén, szén nanocsövek, molekuláris mágnesek, hidratált molekulák, stb. vizsgálata

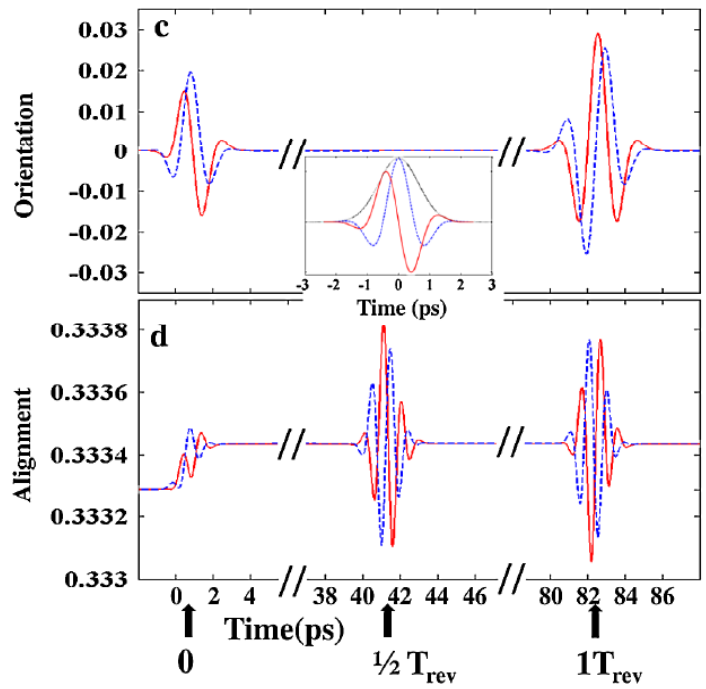
- Nemlineáris THz-es spektroszkópia (E_{max} ≈ 100 kV/cm → μJ impulzus energia)

  THz pumpa – THz próba mérések

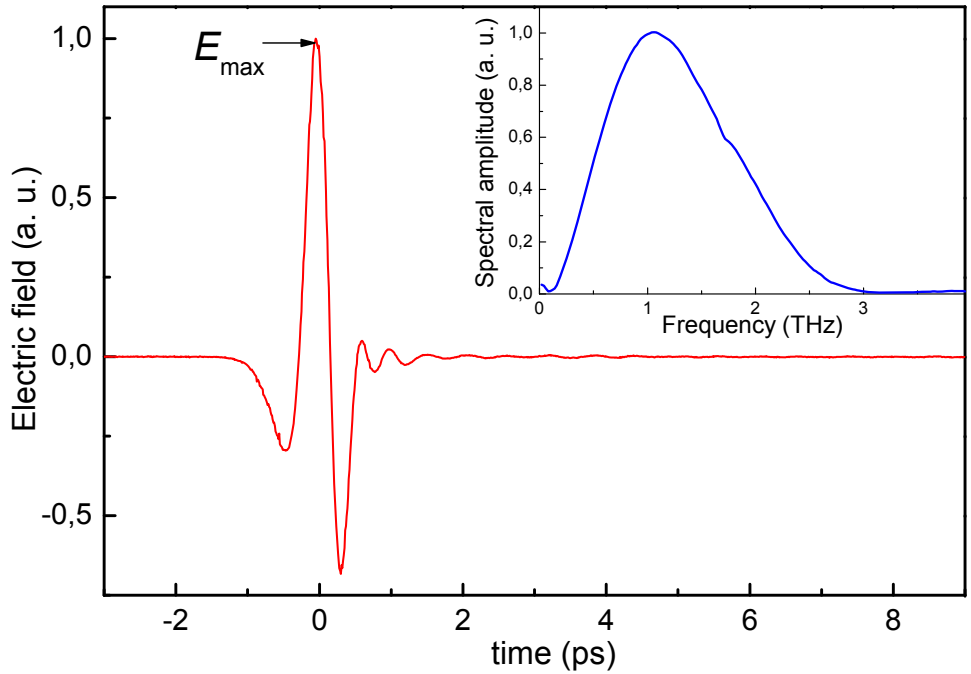
Intenzív THz-es impulzusok alkalmazásai

- THz-es nemlineáris optika és spektroszkópia
  - Impact ionization in InSb, THz pump–THz probe
    Hoffmann et al., Phys. Rev. B, 2009
  - Bleaching of absorption
    Razzari et al., Phys. Rev. B, 2009
  - Nonequilibrium carrier distribution
    Hebling et al., Phys. Rev. B, 2010
  - Exciton generation in multiple quantum wells and carbon nanotubes
    Hirori et al., Phys. Rev. B, 2010
    Watanabe et al., Opt. Express, 2011
- Anyagi tulajdonságok kontrollálása THz-es térrel
  - Ultrafast gating of interlayer charge transport in a superconductor
    Dienst et al., Nat. Photon., 2011
  - Molecular orientation and alignment
    Fleischer et al., PRL, 2011
  - Intense THz pulses activate DNA damage response in human skin tissue
    Titova et al., Biomed. Opt. Express, 2013





THz-es impulzusok alkalmazásai

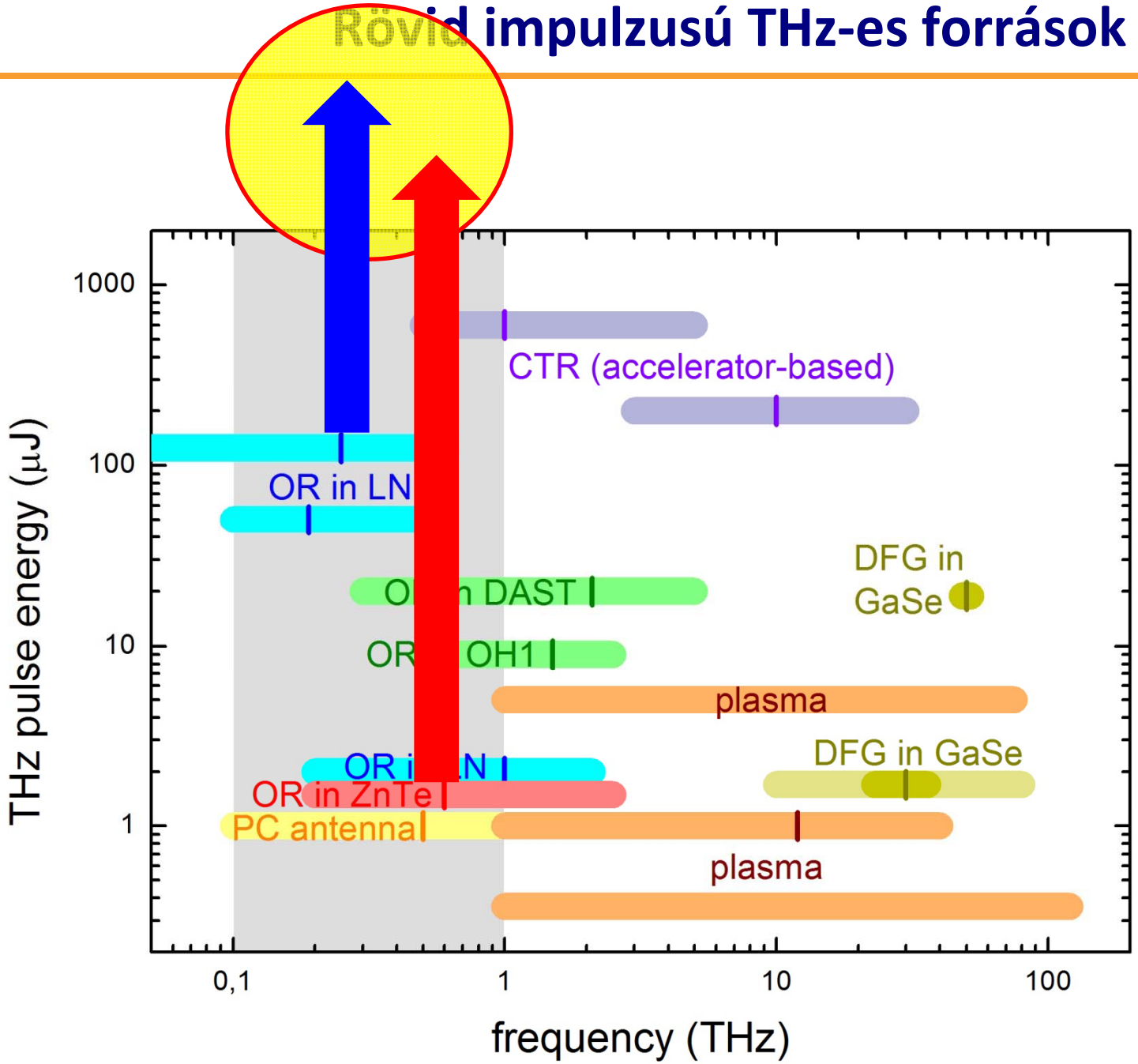


- Lineáris THz-es spektroszkópia (E_{max} ≈ 100 V/cm → 10 fJ impulzus energia)
  grafén, szén nanocsövek, molekuláris mágnesek, hidratált molekulák, stb. vizsgálata

- Nemlineáris THz-es spektroszkópia (E_{max} ≈ 100 kV/cm → μJ impulzus energia)
  THz pumpa – THz próba mérések

- Töltött részecskék gyorsítása, manipulálása
  (E_{max} ≈ 100 MV/cm → 10 mJ impulzus energia)
  proton- és relativisztikus elektronnyalábok gyorsítása, röntgen szabad-elektron lézer, stb.

Rövid impulzusú THz-es források



[1] Daranciang et al., Appl. Phys. Lett., 2011
[2] Chiadroni et al., Appl. Phys. Lett., 2013
[3] Hauri et al., Appl. Phys. Lett., 2011
[4] Ruchert et al., Opt. Lett., 2012
[5] Fülöp et al., Opt. Lett., 2012
[6] Hirori et al., Appl. Phys. Lett., 2011
[7] Stepanov et al., Appl. Phys. B, 2010
[8] Blanchard et al., Opt. Express, 2007
[9] Sell at al., Opt. Lett., 2008
[10] Kim et al., Nature Photon., 2008
[11] Thomson et al., Opt. Express ,2010
[12] Rodriguez et al., Opt. Express, 2010
[13] Jones et al., Phys. Rev. Lett., 1993

Optikai egyenirányítás

A hatásfok függ …

$$\eta_{\mathrm{THz}} = \frac{2\omega_{\mathrm{THz}}^2 d_{\mathrm{eff}}^2 L^2 I}{\varepsilon_0 n_v^2 n_{\mathrm{THz}} c^3} \cdot e^{-\alpha_{\mathrm{THz}} L/2} \cdot \frac{\sinh^2\left[\alpha_{\mathrm{THz}} L/4\right]}{\left[\alpha_{\mathrm{THz}} L/4\right]^2}$$

- a THz frekvenciától: $\boxed{\eta_{\mathrm{THz}} \propto \omega_{\mathrm{THz}}^2}$
- az anyagi paraméterektől: $d_{\mathrm{eff}}, \alpha_{\mathrm{THz}}, n(\omega)$
- a fázisillesztéstől → sebességillesztés: $\boxed{v_{\mathrm{g}}(\omega_{\mathrm{laser}}) = v_{\mathrm{p}}(\omega_{\mathrm{THz}})}$

Figure of merit (FOM):

$\alpha_{THz} L << 1$

$$\eta_{THz} = \frac{2\omega^2 d_{eff}^2 L^2 I}{\varepsilon_0 n_v^2 n_{THz} c^3} \qquad FOM_{NA} = \frac{d_{eff}^2 L^2}{n_v^2 n_{THz}}$$

$\alpha_{THz} L >> 1$

$$\eta_{THz} = \frac{8\omega^2 d_{eff}^2 I}{\varepsilon_0 n_v^2 n_{THz} \alpha_{THz}^2 c^3} \qquad FOM_A = \frac{4 d_{eff}^2}{n_v^2 n_{THz} \alpha_{THz}^2}$$

Optikai egyenirányításra használható anyagok

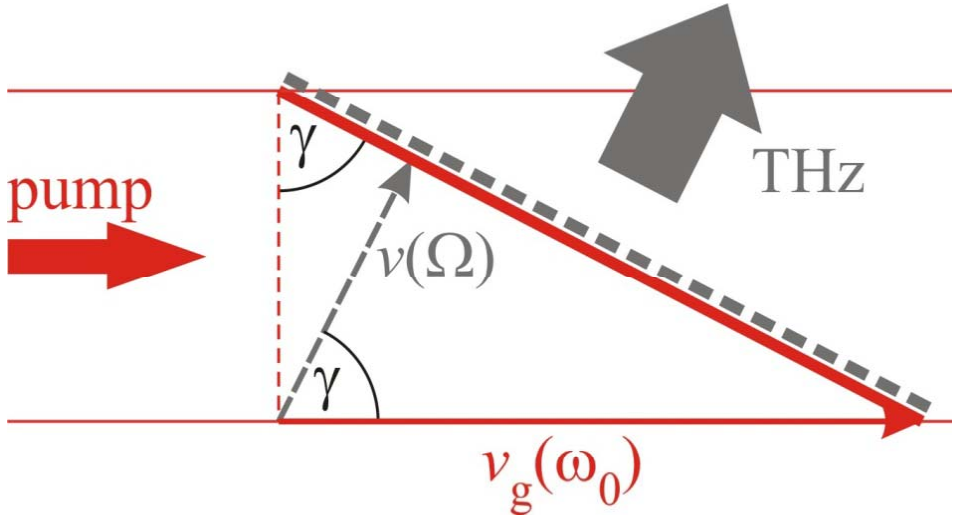
Anyag	d_{eff} [pm/V]	n_g @ 800 nm (1.55 µm)	n_{THz}	α_{THz} [cm^{-1}]	FOM (L = 2 mm) [pm^{2}cm^2/V^2]
CdTe	81.8	(2.81)	3.24	4.8	11.0
GaAs	65.6	4.18 (3.56)	3.59	0.5	4.21
GaP	24.8	3.67 (3.16)	3.34	0.2	0.72
ZnTe	68.5	3.13 (2.81)	3.17	1.3	7.27
GaSe	28.0	3.13 (2.82)	3.27	0.5	1.18
$sLiNbO_3$ @ 300 K @ 100 K	168	2.25 (2.18)	4.96	17 4.8	18.2 48.6
DAST	615	3.39 (2.25)	2.58	50	41.5

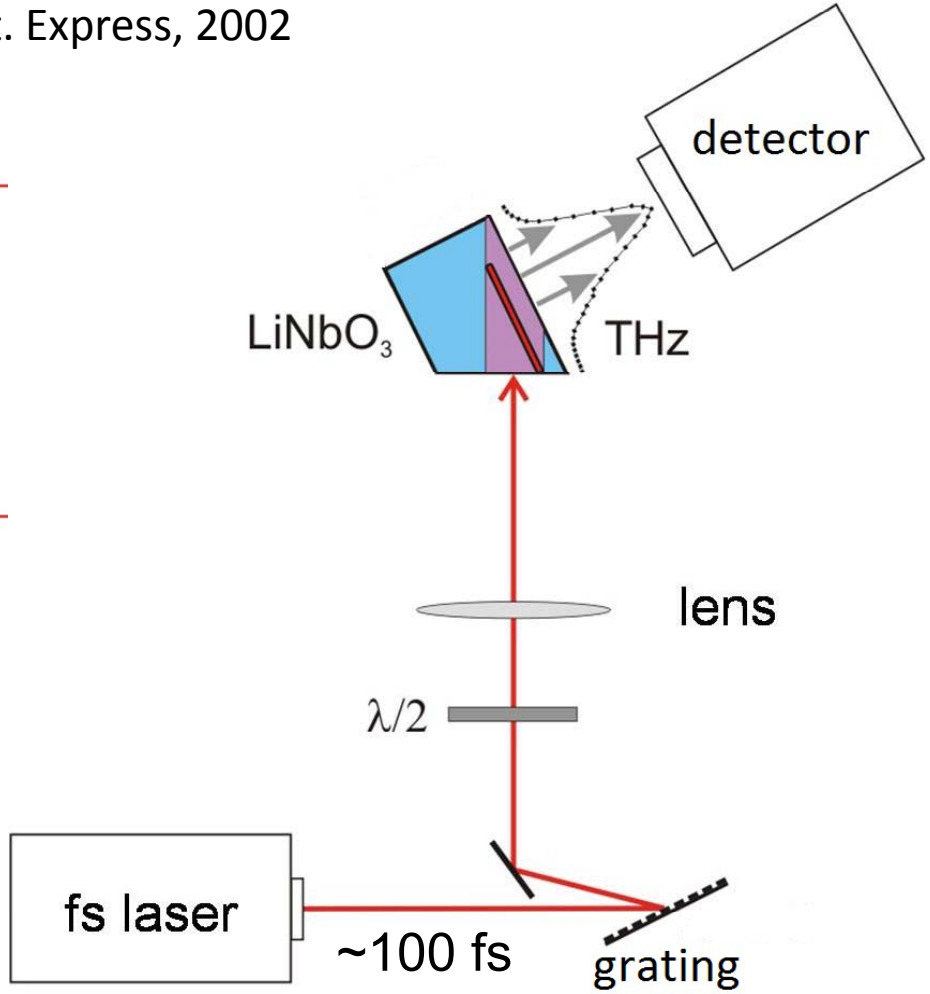
Hebling et al., JOSA B, 2008

Sebességillesztési feltétel: $v_g(\omega_{laser}) = v_p(\omega_{THz}) \rightarrow n_g(\omega_{laser}) = n(\omega_{THz})$

Döntött impulzusfrontú pumpálás

Hebling et al., Opt. Express, 2002





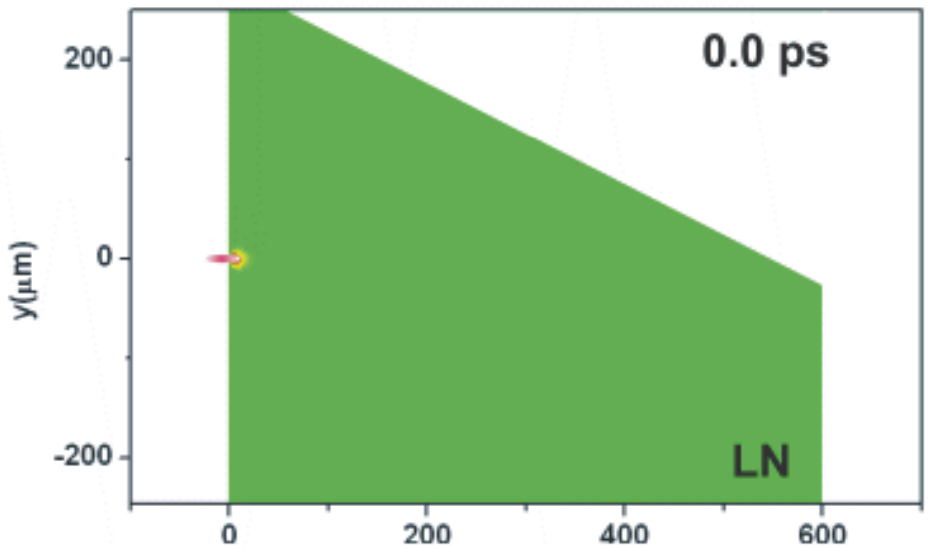
- Sebességillesztés

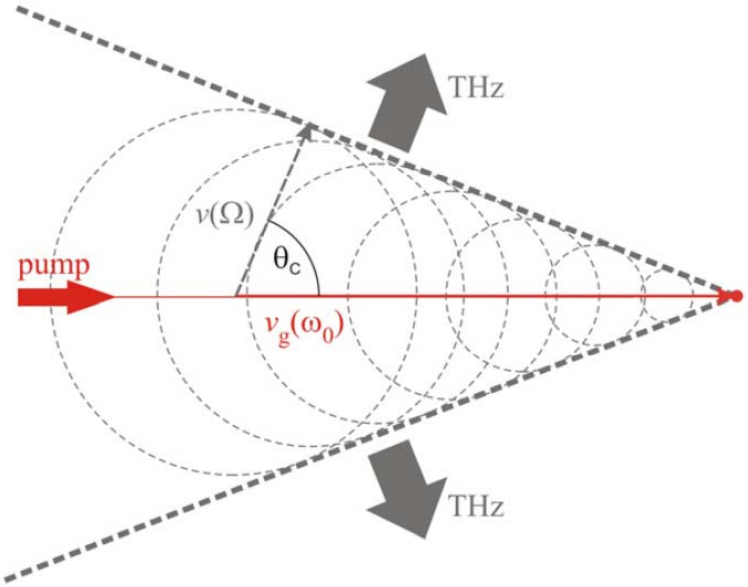
$$v_g(\omega_{laser}) \cdot \cos(\gamma) = v_p(\omega_{THz})$$

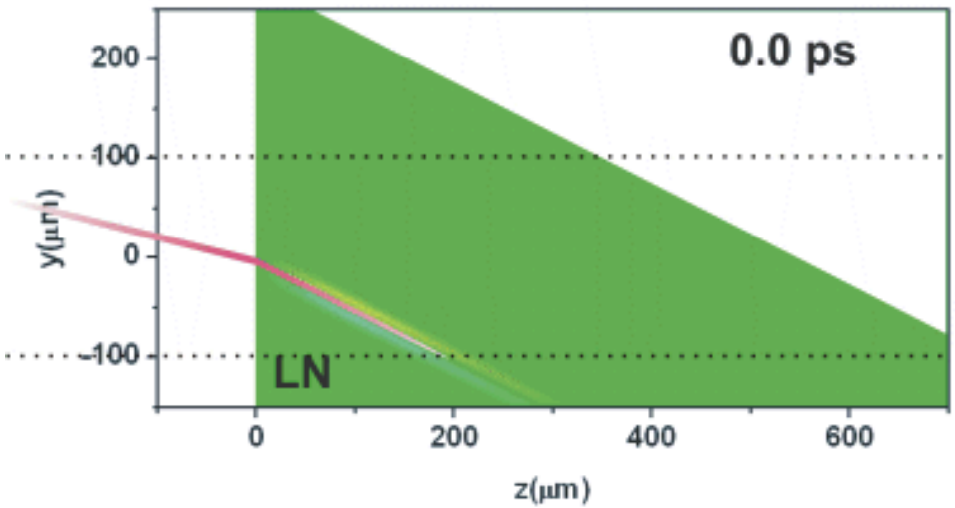
- Legnagyobb THz impulzuseneregia asztali forrásból

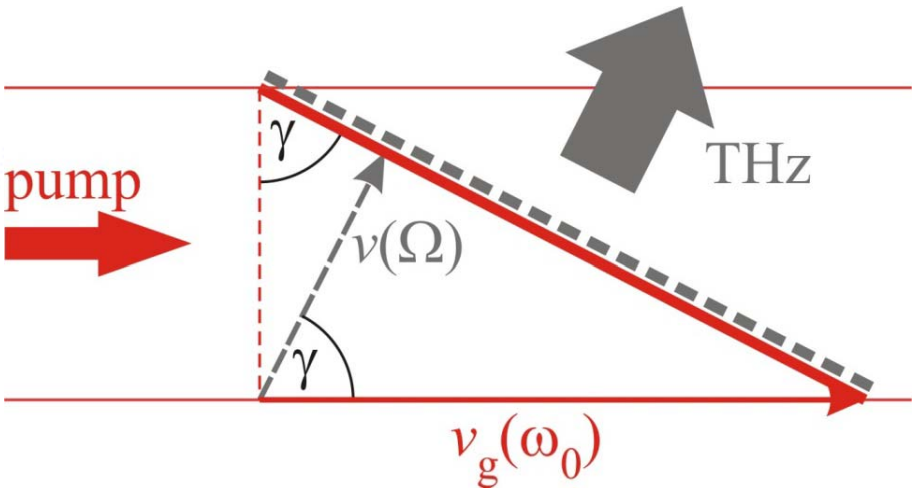
0.25	μJ	Stepanov et al., Opt. Express, 2005
10	μJ	Yeh et al., Appl. Phys. Lett., 2007
50	μJ	Stepanov et al., Appl. Phys. B, 2010
125	μJ	Fülöp et al., Opt. Lett., 2012

Vonalfókusz és döntött impulzusfrontú pumpálás









Stepanov et al., Opt. Express, 2005

Hoffmann & Fülöp, J. Phys. D, 2011

Lehetőségek a THz energia további növelésére

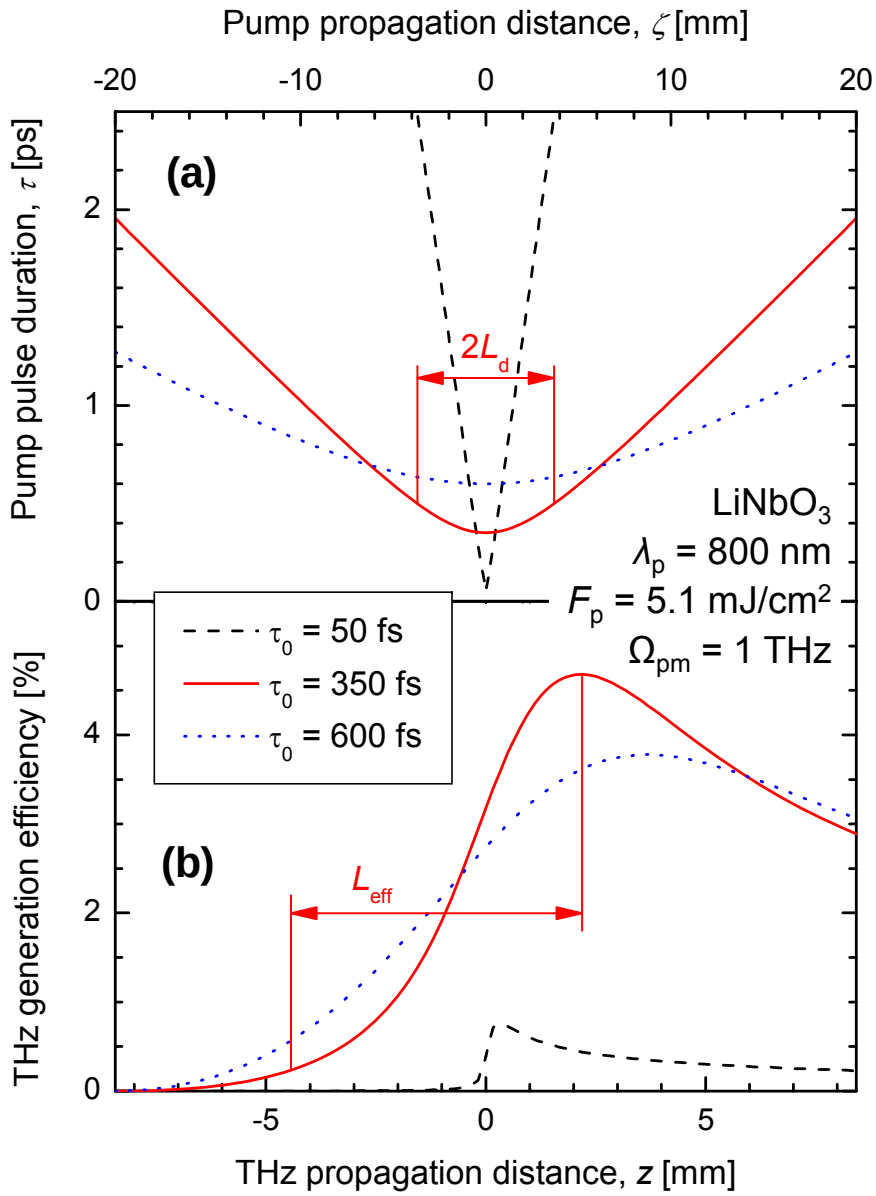
- optimális pumpáló impulzushossz
  Fülöp et al., Opt. Express, 2011

- kristály hűtése
  $LiNbO_3$ abszorpciós koefficiense:

T [K]	α [1/cm]
10	0.35
100	2.1
300	16

- kontakt rács használata
  Pálfalvi et al., Appl. Phys. Lett., 2008
  Fülöp et al., Opt. Express, 2010
  Ollmann et al., Appl. Phys. B, 2012
  Ollmann et al., in preparation

Effektív kölcsönhatási hossz



Impulzusfront-dőlés:

$$\tan\gamma = -\frac{n}{n_g}\lambda\frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}\lambda}$$

szög-diszperzió

anyagi diszperzió

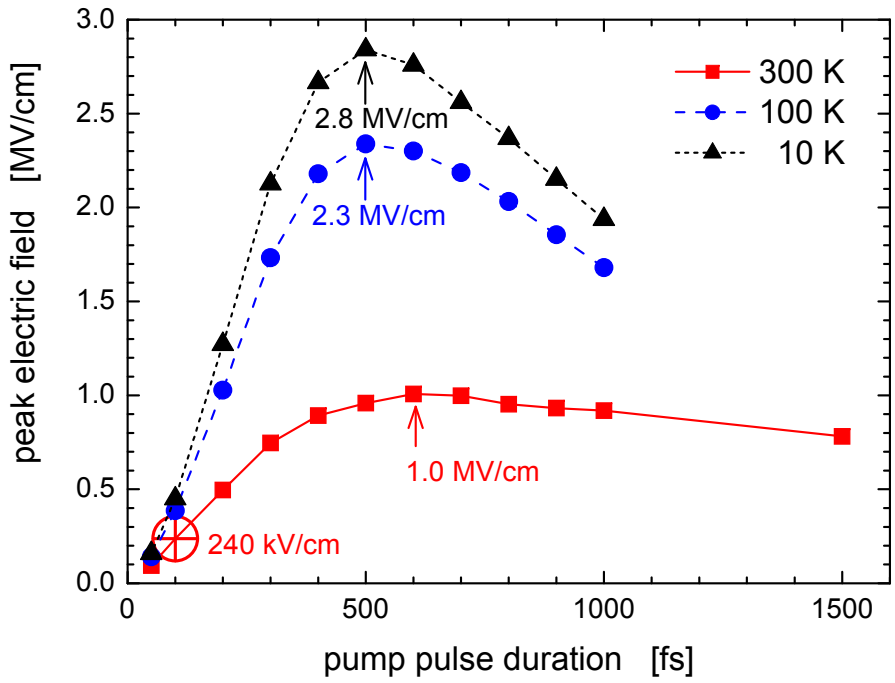
GVD paraméter:

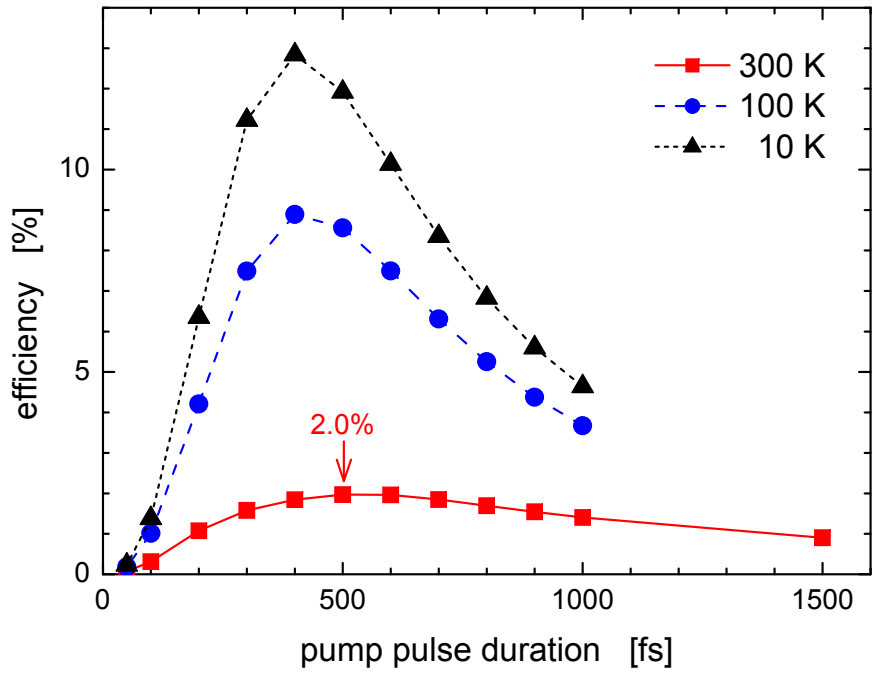
$$D = \frac{d\left(v_g^{-1}\right)}{d\lambda} = \frac{\lambda}{c}\left[n\left(\frac{d\varepsilon}{d\lambda}\right)^2 - \frac{d^2 n}{d\lambda^2}\right]$$

Martínez et al., J. Opt. Soc. Am. A, 1984
Hebling, Opt. Quantum Electron., 1996
Fülöp et al., Opt. Express, 2010

A pumpáló impulzushossz optimalizálása ($LiNbO_3$)

Fülöp et al., Opt. Express, 2011





τ_p = 500 fs

E_p = 200 mJ

$I_{p,\,max}$ = 40 GW/cm^2

THz energia ≈ 25 mJ

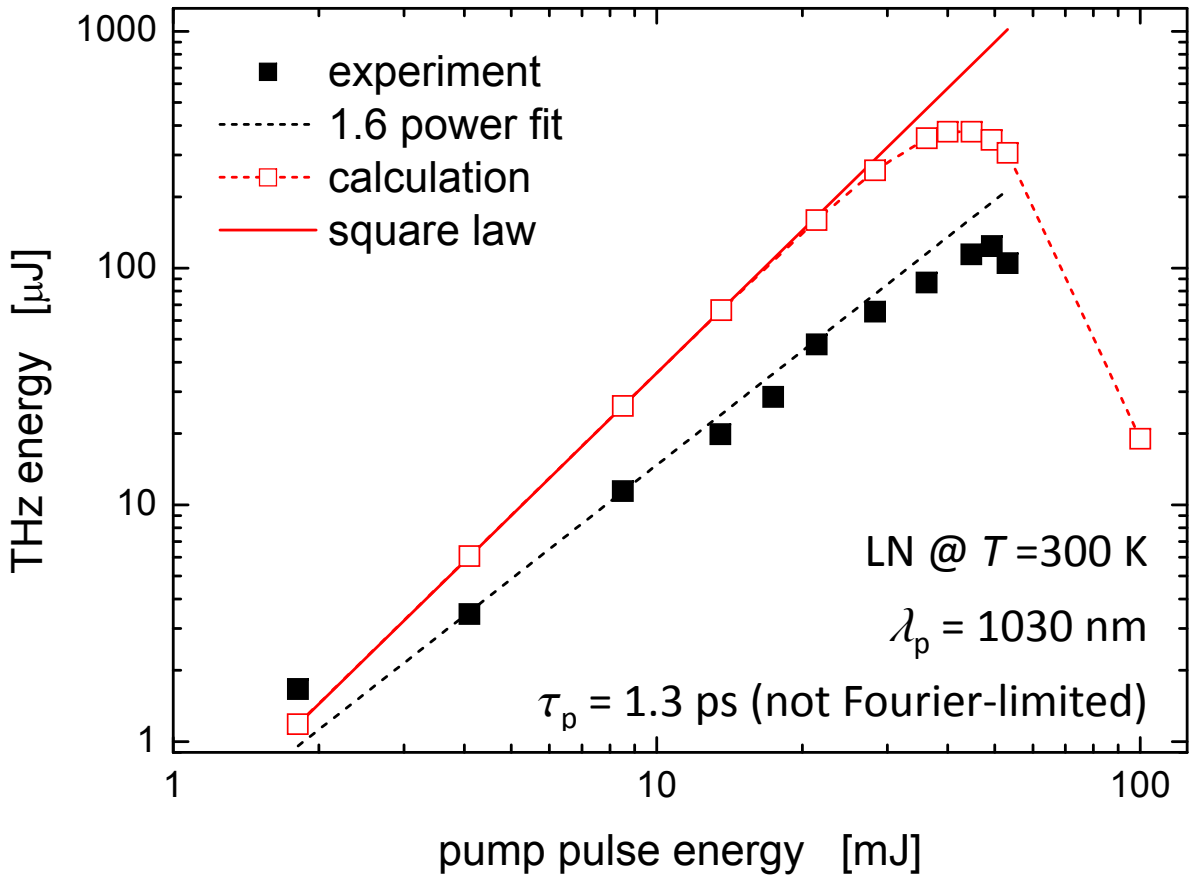
THz térerősség:

2.8 MV/cm fókuszálás nélkül

→ 10 MV/cm leképezéssel

→ 100 MV/cm fókuszálással

mJ impulzusenergiák felé: kísérlet



Együttműködésben az MPQ-val (Garching, Németország):

S. Klingebiel, F. Krausz, S. Karsch

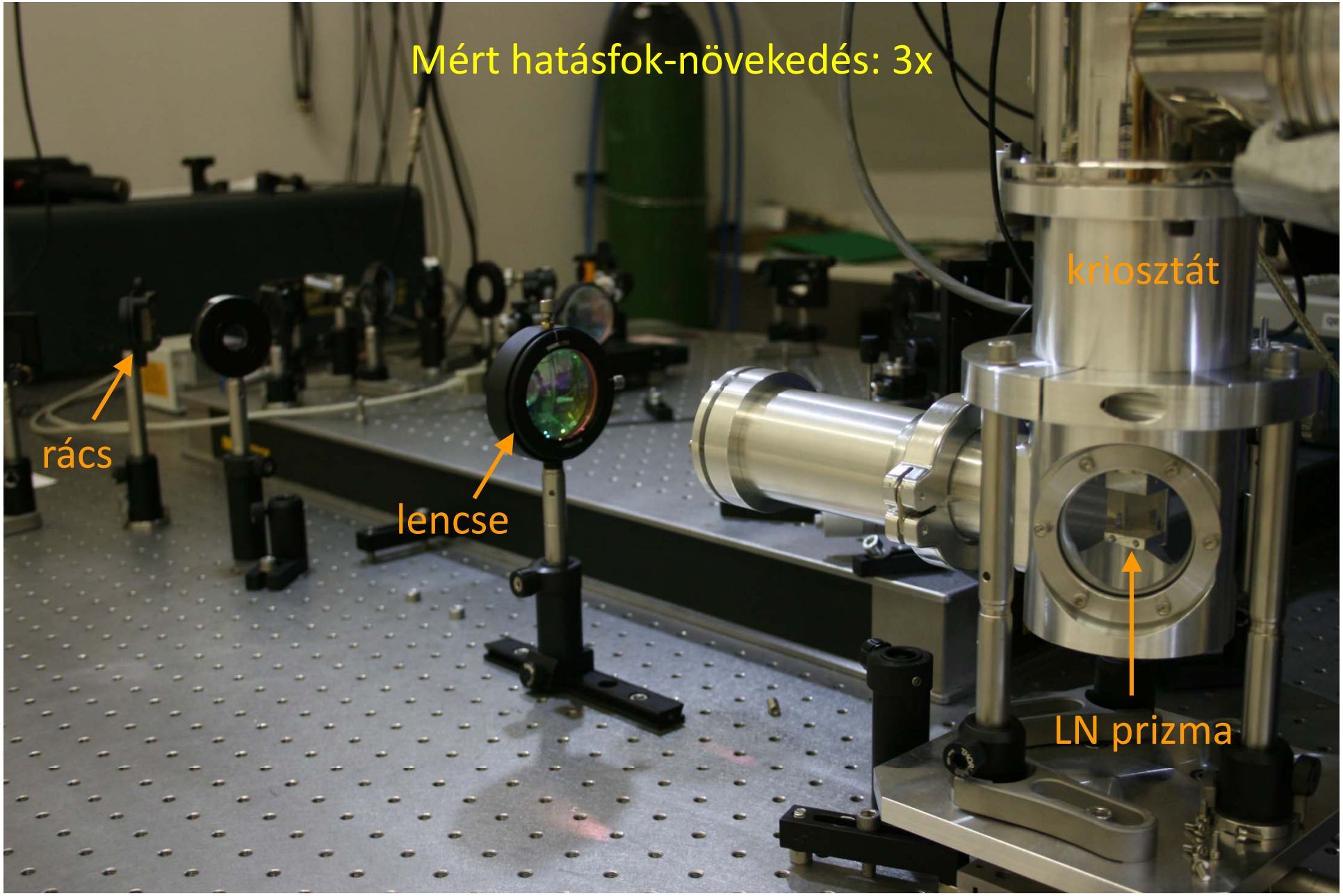
További lehetőségek:

- Optimális impulzushossz
- A $LiNbO_3$ kristály hűtése
- Kontakt rács

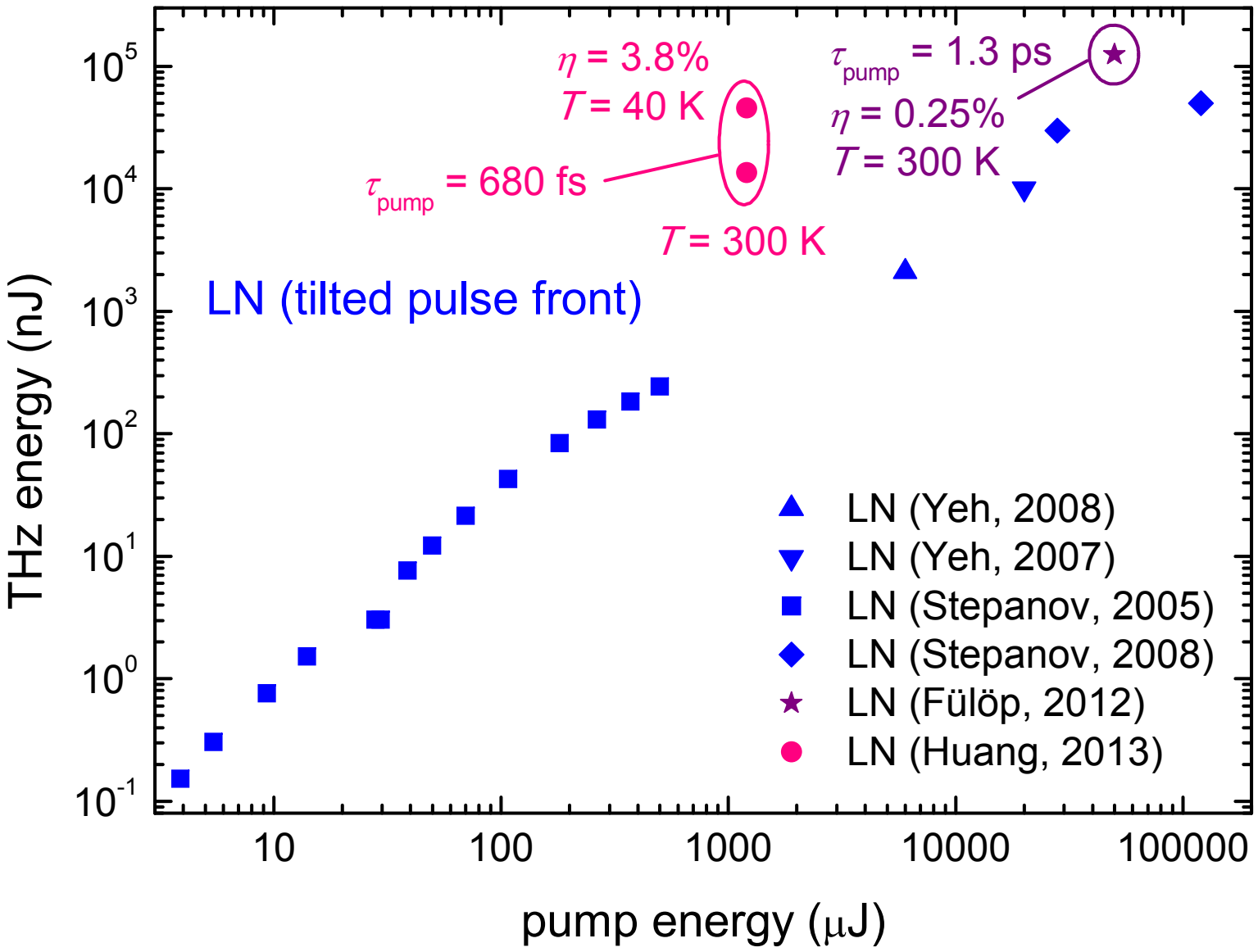
Korábbi eredményekkel összevetve:

Stepanov et. al., Appl. Phys. B, 2010:		Fülöp et al., Opt. Lett. 2012:
E_{THz} = 50 μJ	×2.5 →	125 μJ
η = 0.05%	×5 →	0.25%

A kristály hűtése

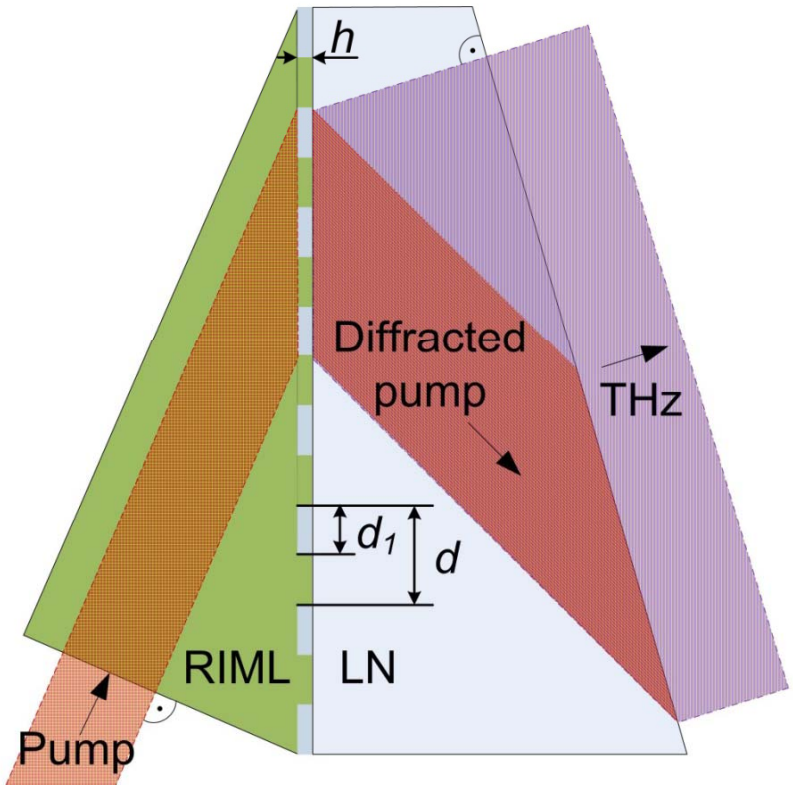


THz energia a pumpáló energia függvényében: $LiNbO_3$

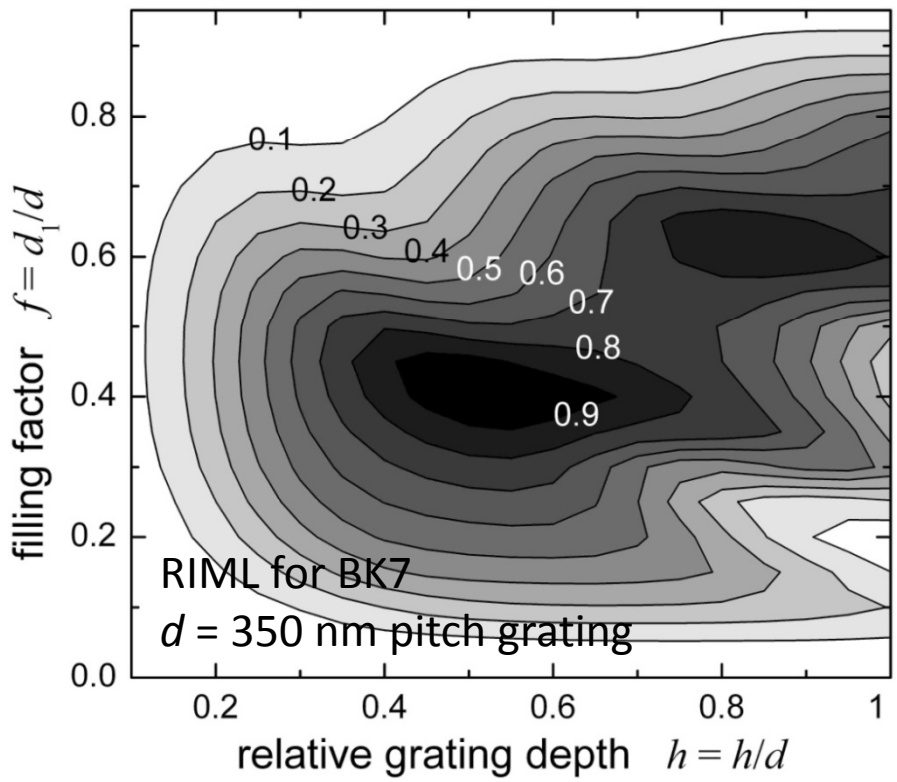


Kontakt rács

- Javaslat: Pálfalvi et al., APL, 2008
- Részletes tervezés: Ollmann et al., Appl. Phys. B, 2012 (LN)
  Ollmann et al., in preparation (ZnTe)



Diffraction efficiency for order -1



PTE Nagyintenzitású Terahertzes Laboratórium

PTE TTK

THz-es labor,
Hallgatói laborok (Helios)

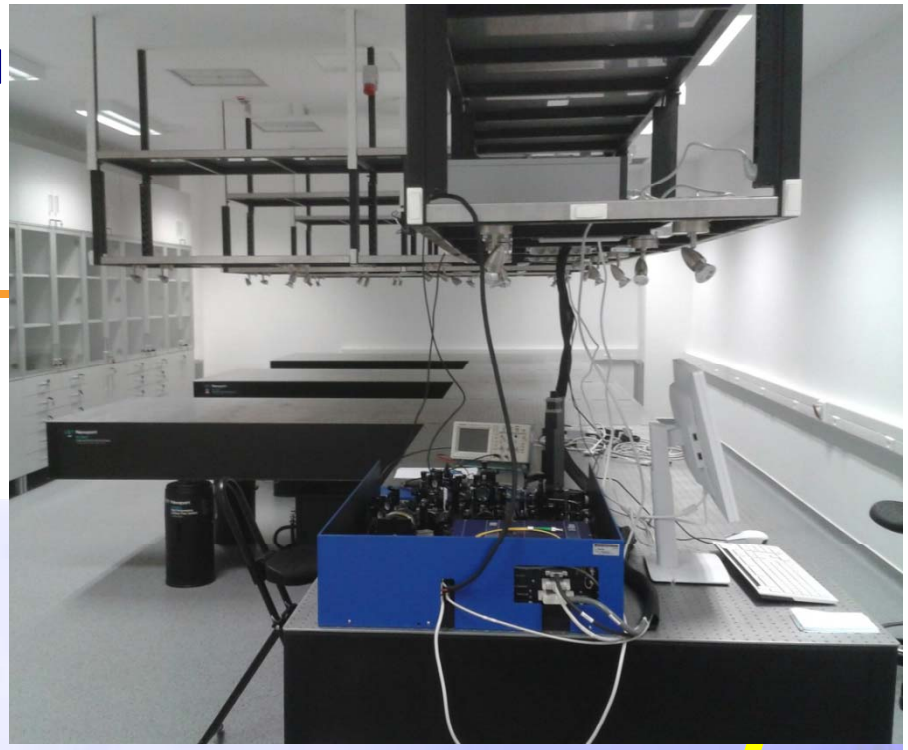
PTE SzKK

Nagyintenzitású Terahertzes Laboratórium
(kiépítés alatt)

HIGH-FIELD THz LAB

Nagyintenzitású Terahertzes Laboratórium

– kiépítés alatt –



THz-es infrastruktúra

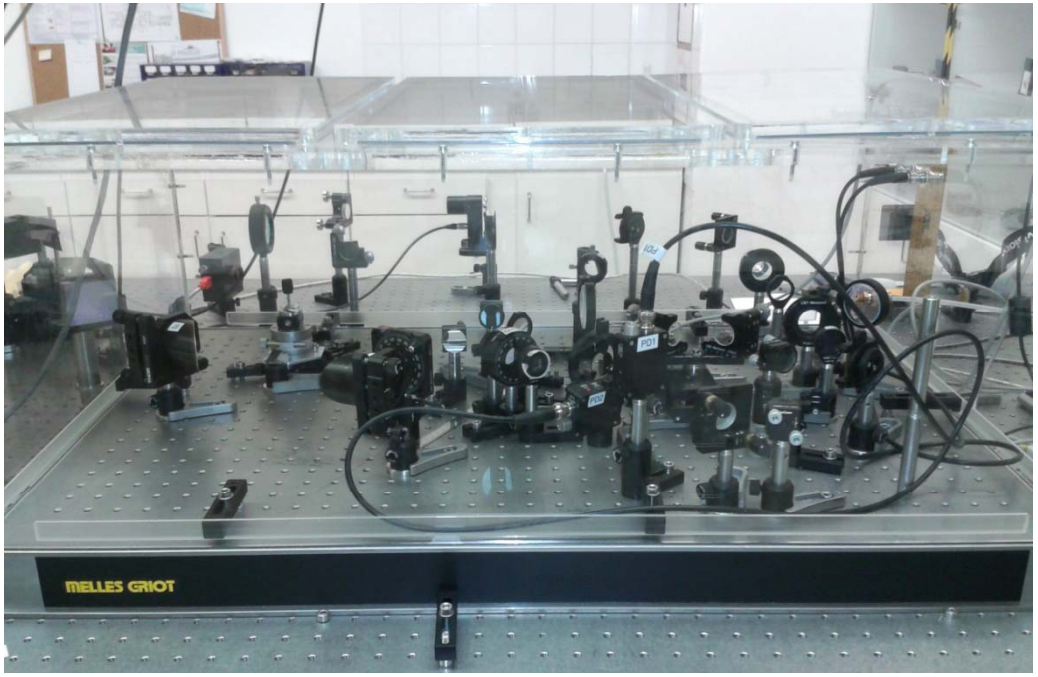
HIGH-FIELD THz LAB

THz-es időtartománybeli spektro-méter (TDTS)

- Lineáris THz spektroszkópiához
- Menlo Systems, Tera K8

Nagyintenzitású THz-es forrás és diagnosztika:

- Nemlineáris THz-es vizsgálatokhoz
- Pumpáló lézer:
  1 mJ / 1 kHz / 180 fs / 1.03 µm
  (Light Conversion, Pharos SP)
- THz forrás: 0.7 µJ @ 1 mJ pumpa
- Elektro-optikai mintavételező



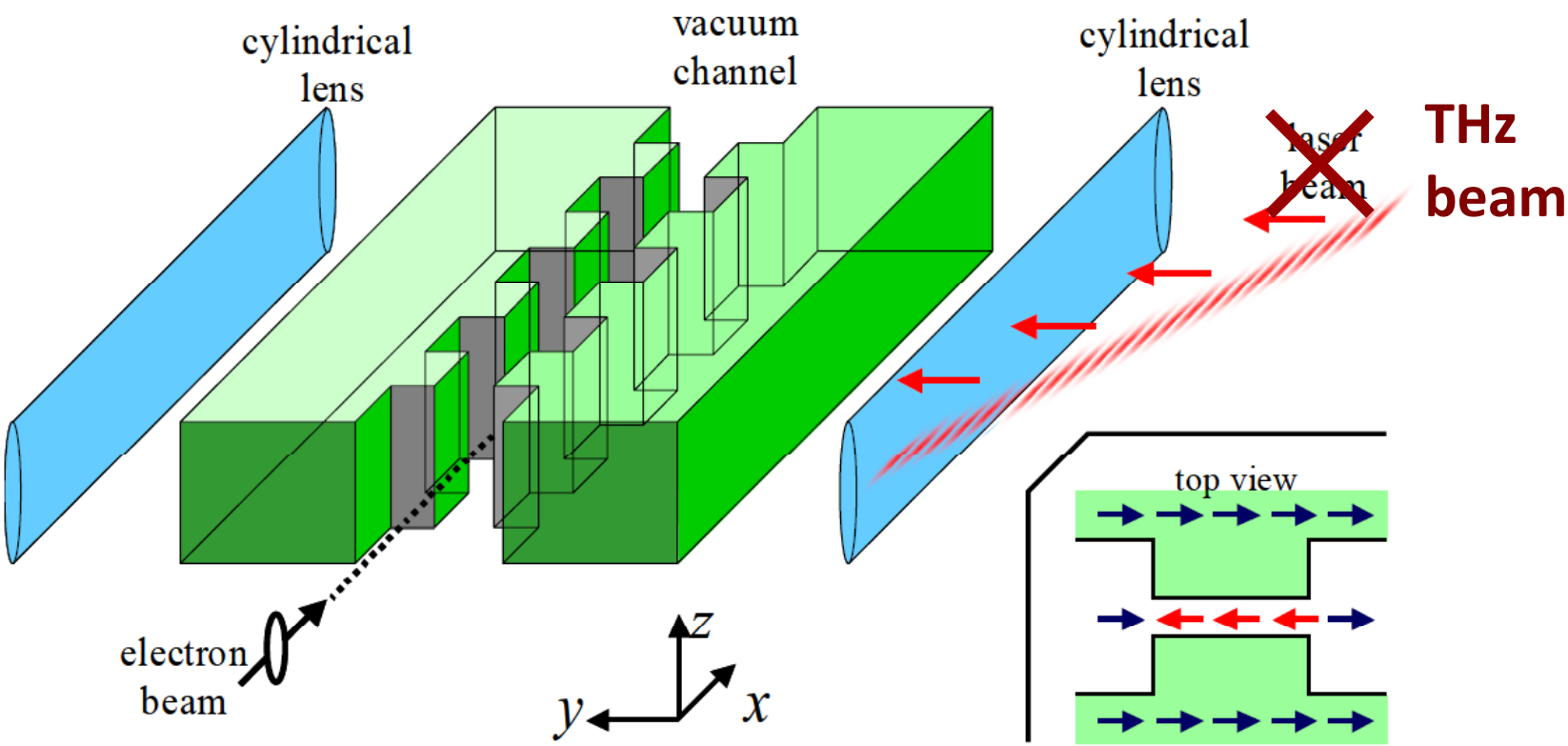
Extrém nagyintenzitású THz-es forrás:

- 8 mJ / 1 kHz / 200 fs pumpáló lézer
- 100 mJ / 500 fs utóerősítő
- Beszerzés/fejlesztés alatt

Extrém nagy térerősségű THz-es impulzusok lehetséges alkalmazási területei

- Relativisztikus elektroncsomagok gyorsítása, összenyomása
  → egyciklusú MIR…XUV impulzusok keltése
  Hebling et al., arXiv:1109.6852
- Elektron unduláció
  Hebling et al., arXiv:1109.6852
- Protongyorsítás
  (30 mJ THz energia szükséges 40 → 100 MeV gyorsításhoz)
  → hadronterápia
  Pálfalvi et al., submitted to Phys. Rev. Spec. Top. — Accel. and Beams
- Magas-harmónikus keltés tulajdonságainak javítása
  E. Balogh et al., PRB, 2011
  K. Kovács et al., PRL, 2012

Elektrongyorsítás



- Gyorsítás
  Plettner et al., Phys. Rev. Spec. Top. – Accel. and Beams 9, 111301 (2006)
- Nyaláb eltérítése, fókuszálása
  Plettner et al., Phys. Rev. Spec. Top. – Accel. and Beams 12, 101302 (2009)

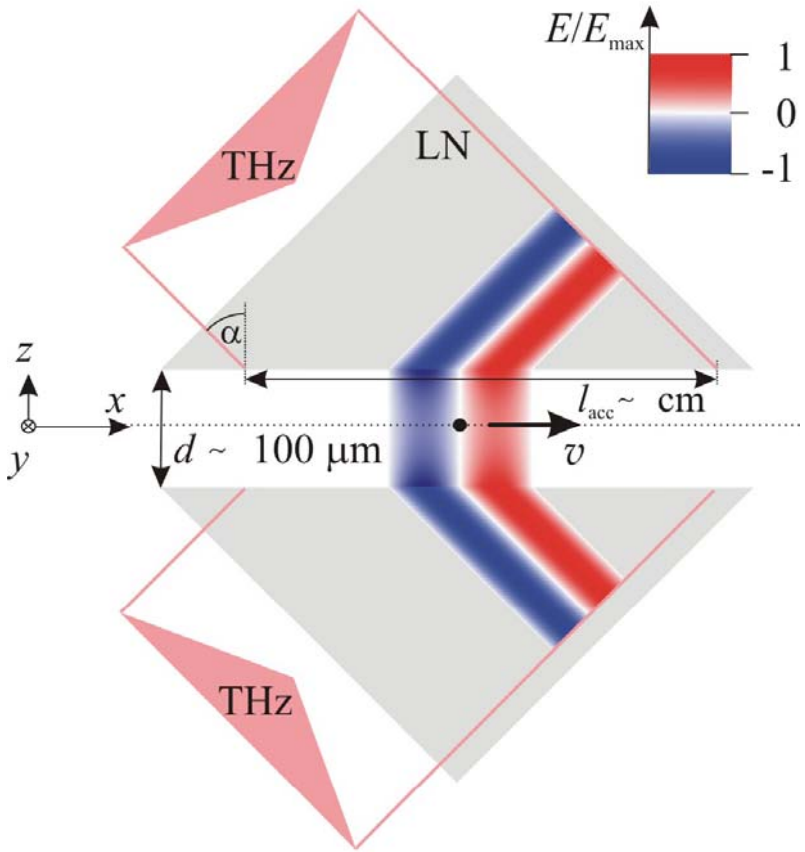
1 GV/m = 10 MV/cm csúcs-térerősség szükséges

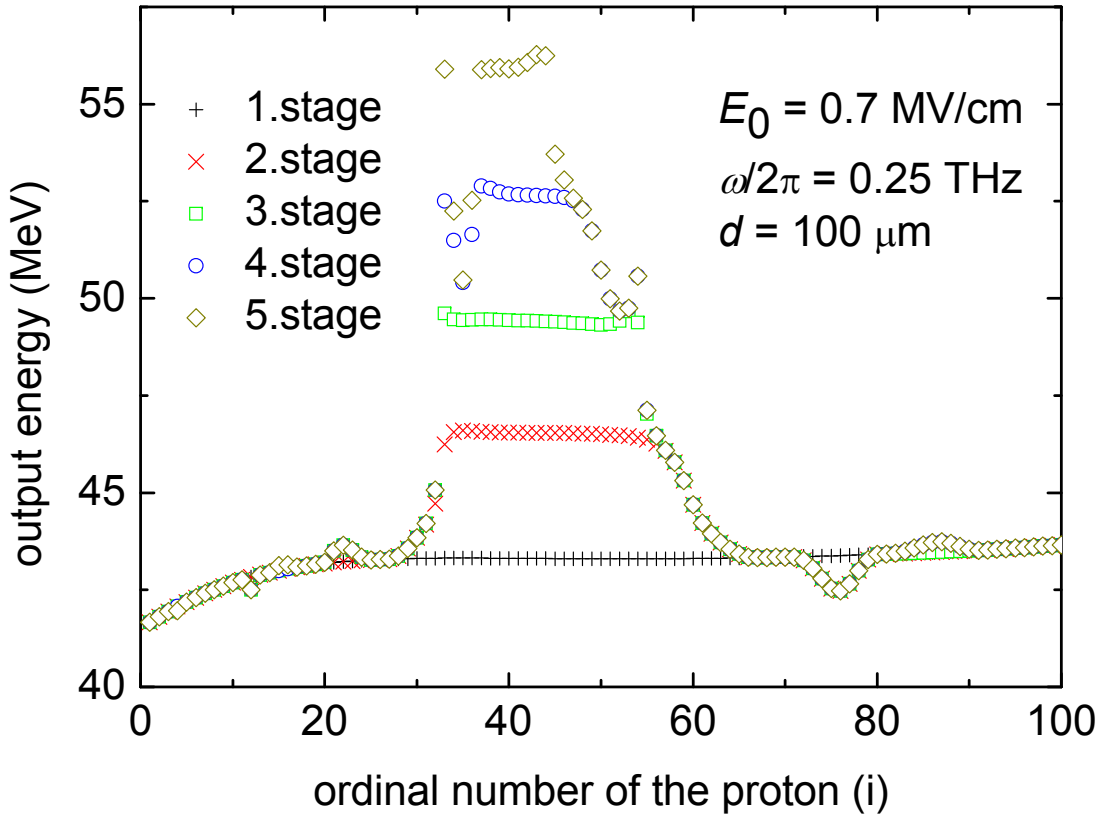
Protonok utógyorsítása THz-es evaneszcens térrel

Lézerrel gyorsított protonnyalábokhoz

Pálfalvi et al., submitted to Phys. Rev. Spec. Top. — Accel. and Beams

Protoncsomag több fokozatú gyorsítása és monokromatizálása 0.25 THz frekvencián





42 → 56 MeV

monochromatization rate: 10 %

Attoszekundumos impulzusok keltése THz tér jelenlétében

Magas-harmónikus keltés levágási frekvenciájának növelése

- IR és THz terek együtt

$$E(t) = E_0 \cos(\omega_{IR} t) + E_1 \cos(\omega_{THz} t)$$

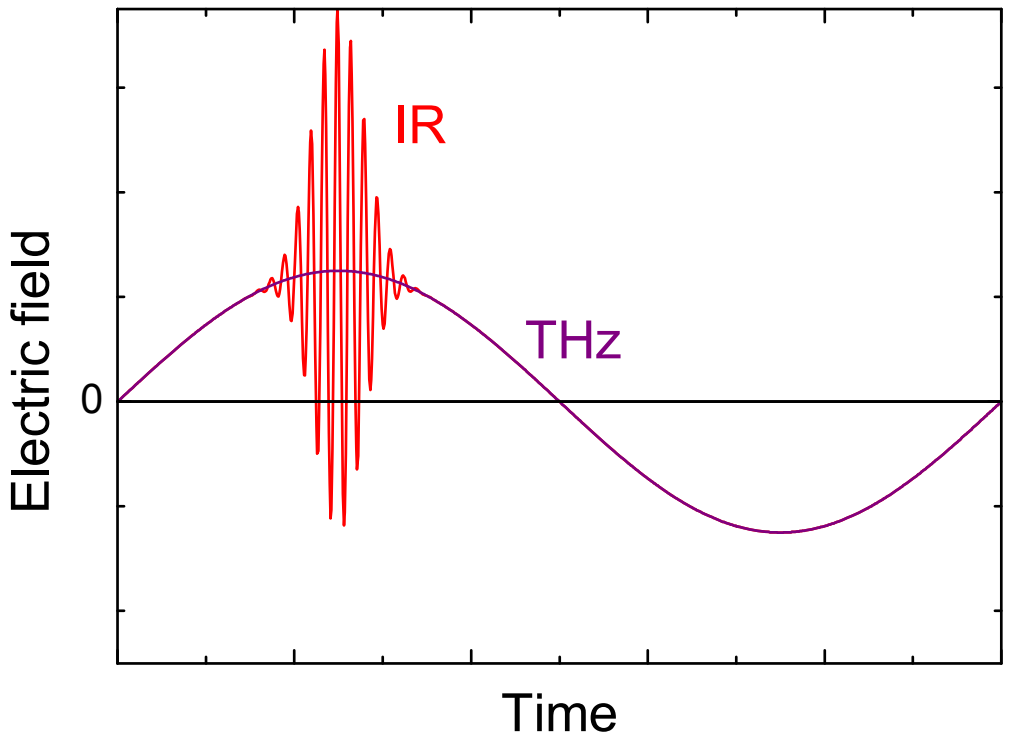
- THz aszimmetriát okoz

  Hong et al., Opt. Express, 2009

- Páros és páratlan harmónikus rendek

  Lewenstein, Phys. Rev. A, 1994

- IR optikai ciklusonként egy attoszekundumos impulzus



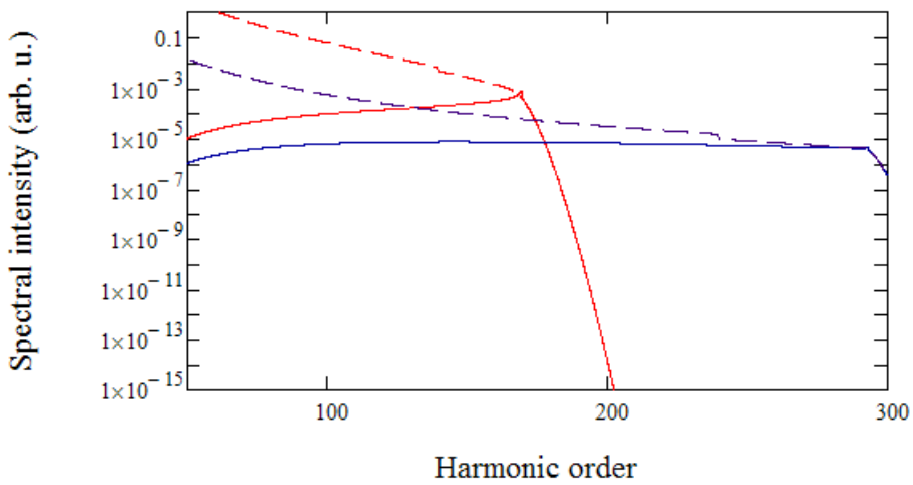
Attoszekundumos impulzusok keltése THz tér jelenlétében

E. Balogh et al., Phys. Rev. A, 2011

1560 nm

$I_{IR} = 2 \times 10^{14}$ W cm^{-2}

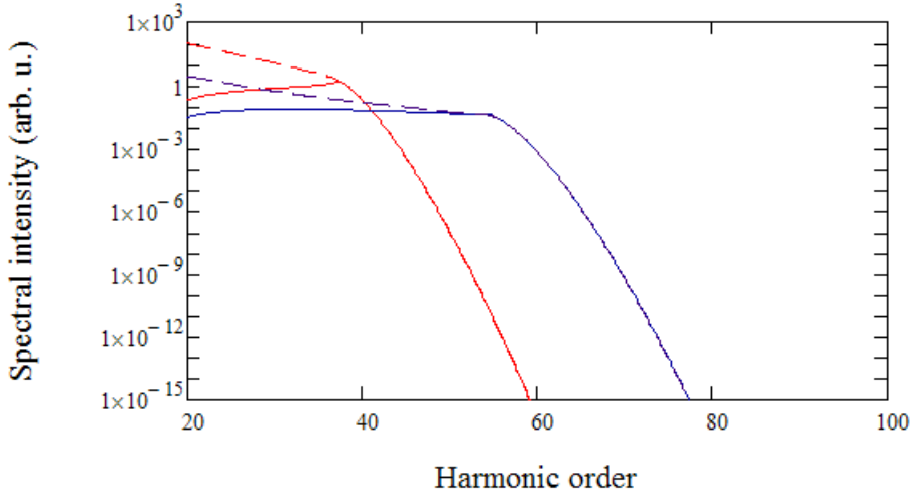
E1 = 4×10^{9} V/m



800 nm

$m_{(coffindex_1)} = 37.92$ $E_{IR} = 388$ MV/cm

E0 = 3.881×10^{10} V/m E1 = 4×10^{9} V/m



$E_{THz} = 0 \ldots 40$ MV/cm

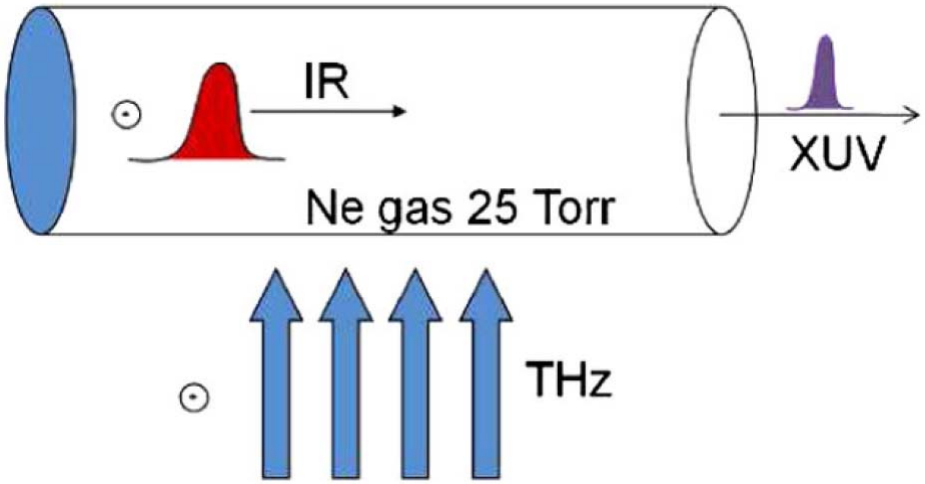
Attoszekundumos impulzusok keltése THz tér jelenlétében

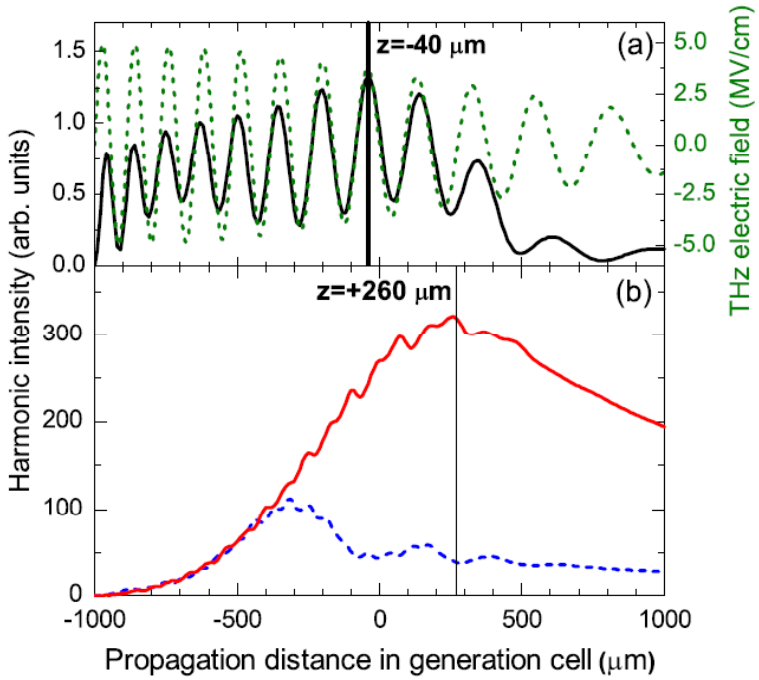
Kvázi-fázisillesztés

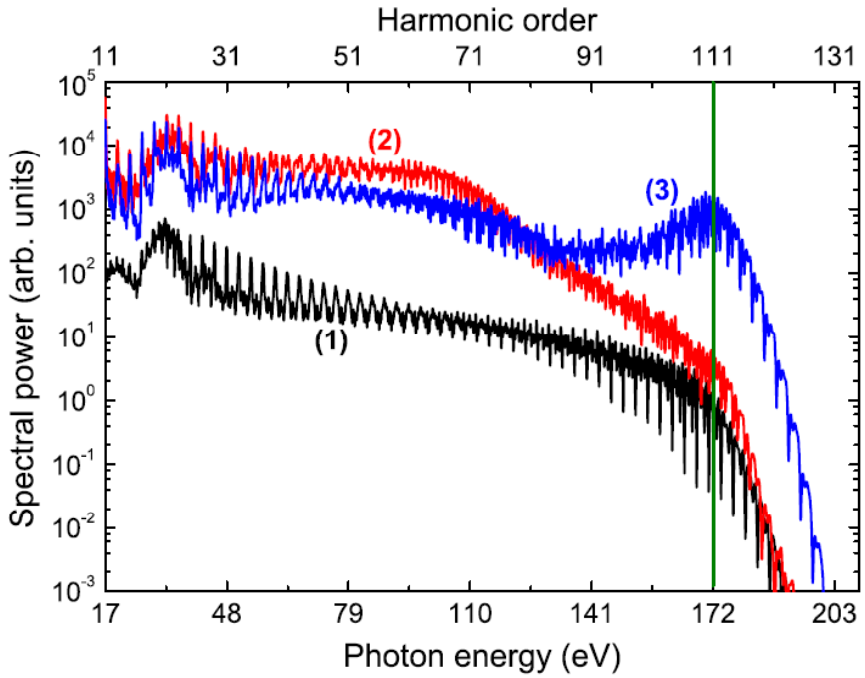
Kovács et al., Phys. Rev. Lett., 2012

250-szeres hatásfok-növekedés a levágási tartományban

$E_{THz} = 2 \div 6$ MV/cm, $W_{THz} = 2 \div 20$ mJ







Nagyintenzitású THz-es forrás az ELI-ALPS-ban

- ELI-ALPS:
  Attosecond Light Pulse Source of the Extreme Light Infrastructure (www.eli-alps.hu)
- Felépítési fázis:
  2013 – 2017.
- Koncepcionális tervezés
- Elsődleges (lézer) és másodlagos (lézerrel meghajtott) források a THz-től a röntgenig
- Felhasználói források, forrás K+F

Kutatási irányok:

1. Valence electron science
2. Core electron science
3. Attosecond 4D imaging
4. Ultrafast plasma dynamics
5. Biomedical applications
6. Manipulation of matter by intense THz fields

THz-es impulzusok alkalmazási lehetőségei az ELI-ALPS-ban

Application area	Energy [μJ]	Peak electric field [MV/cm]	Frequency [THz]	Waveform (single- or multi-cycle)
Multispectral single-shot imaging	10	0.1	1 – 30	single
Nonlinear THz spectroscopy	1	> 0.1	1 – 30	single/multiple
THz-assisted attosecond pulse generation	up to 3 000 (frequency dependent)	50	1 – 30	single
	3 000	5	1 – 4	multiple
Investigations under the influence of extremely high THz fields	10 – 3 000	1 – 100	< 0.5 – 2	single/multiple
Manipulation and characterization of relativistic electron beams	> 100	1 – 40	< 0.5 – 5	single/multiple
Post-acceleration of laser-generated proton beams	20 000	1 – 5	< 0.5	single

Conceptual Design Report of the High-Intensity THz Facility at ELI-ALPS

Munkatársak, együttműködő partnerek

- MTA-PTE Nagyintenzitási Terahertzes Kutatócsoport + Pécsi Tudományegyetem, Pécs:

  Almási G., Fülöp J. A., Hebling J., Kiliánné Raics K., Lombosi Cs., Márton Zs., Mechler M., Monoszlai B., Ollmann Z., Orbán J., Pálfalvi L., Polónyi Gy., A. Sharma, Tibai Z., Tóth Gy., Unferdorben M.

- Szegedi Tudományegyetem, Szeged:

  Balogh E., Kovács K., Varjú K.

- MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest:

  Dombi P., Farkas Gy., Márton I.

- Max Planck Institute of Quantum Optics, Garching, Németország:

  S. Klingebiel, C. Skrobol, F. Krausz, S. Karsch, P. Baum, W. Schneider

- Technical University of Vienna, Bécs, Ausztria:

  A. Baltuska, A. Pugzlys, G. Andriukaitis

- Helmholtz Zentrum Dresden-Rossendorf, Németország:

  T. Cowan, M. Bussmann

- Paul Scherrer Institute, Villigen, Svájc:

  C. P. Hauri, C. Vicario, Monoszlai B.

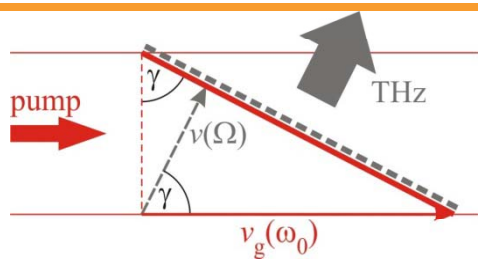
- Amplitude Systemes, Bordeaux, Franciaország:

  A. Mareczko, A. Courjaud

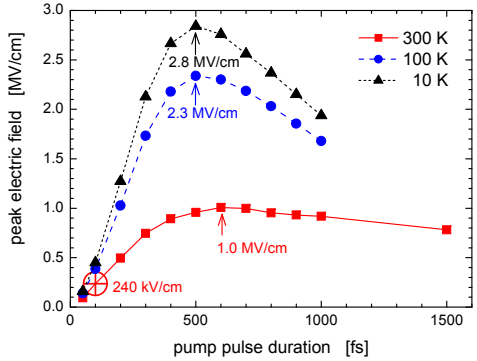
Financial support from Hungarian Scientific Research Fund grant numbers 101846 and 78262, from the National Development Agency grant number ELI_09-1-2010-0013, and SROP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0002 is acknowledged.

Összefoglalás

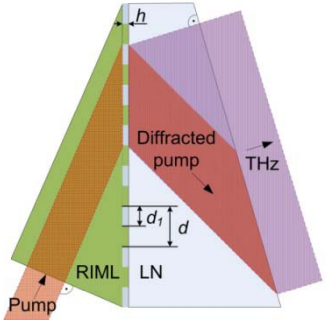
- 10 mJ energiájú, 100 MV/cm fókuszált térerősségű THz-es impulzusok keltése a 0.1 – 1 THz frekvenciatartományon lehetséges döntött impulzusfrontú pumpálással, hatékony diódapumpált szilárdtest-lézerekkel



- A THz energia növelése:
  - → optimális impulzushossz
  - → kristály hűtése
  - → kontakt rács nagyobb nyalábméretthez



- Előrejelzéseineket alátámasztják a kísérletek:
  125 μJ energia, 0.25% hatásfok (nem optimális!)
  3.8% hatásfok (Huang et al., Opt. Lett., 2012)



- Új alkalmazási lehetőségek: nagy térerősségű THz-es tudomány
  - → nemlineárisTHz-es spektroszkópia
  - → molekulák, elektronok, ionok manipulálása
- PTE Nagyintenzitású THz-es Laboraórium
- ELI-ALPS: High-Field THz Facility

HIGH-FIELD THz LAB

eli attosecond