

Terahertzes óriásimpulzusok az ELI számára



2018.03.15. 61. Fizikatanári Ankét, Szeged

Almási Gábor
(és még sokan mások)

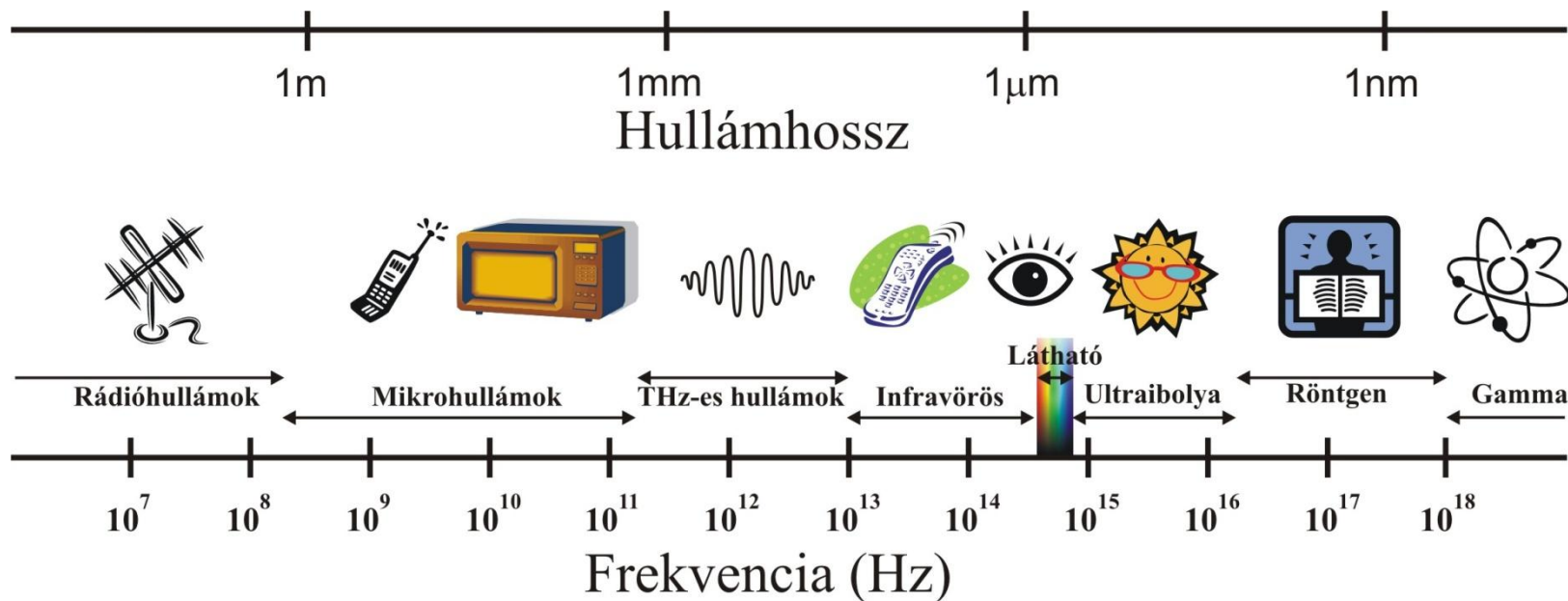
PTE TTK Fizikai Intézet
almasi@fizika.ttk.pte.hu

1

Tartalom

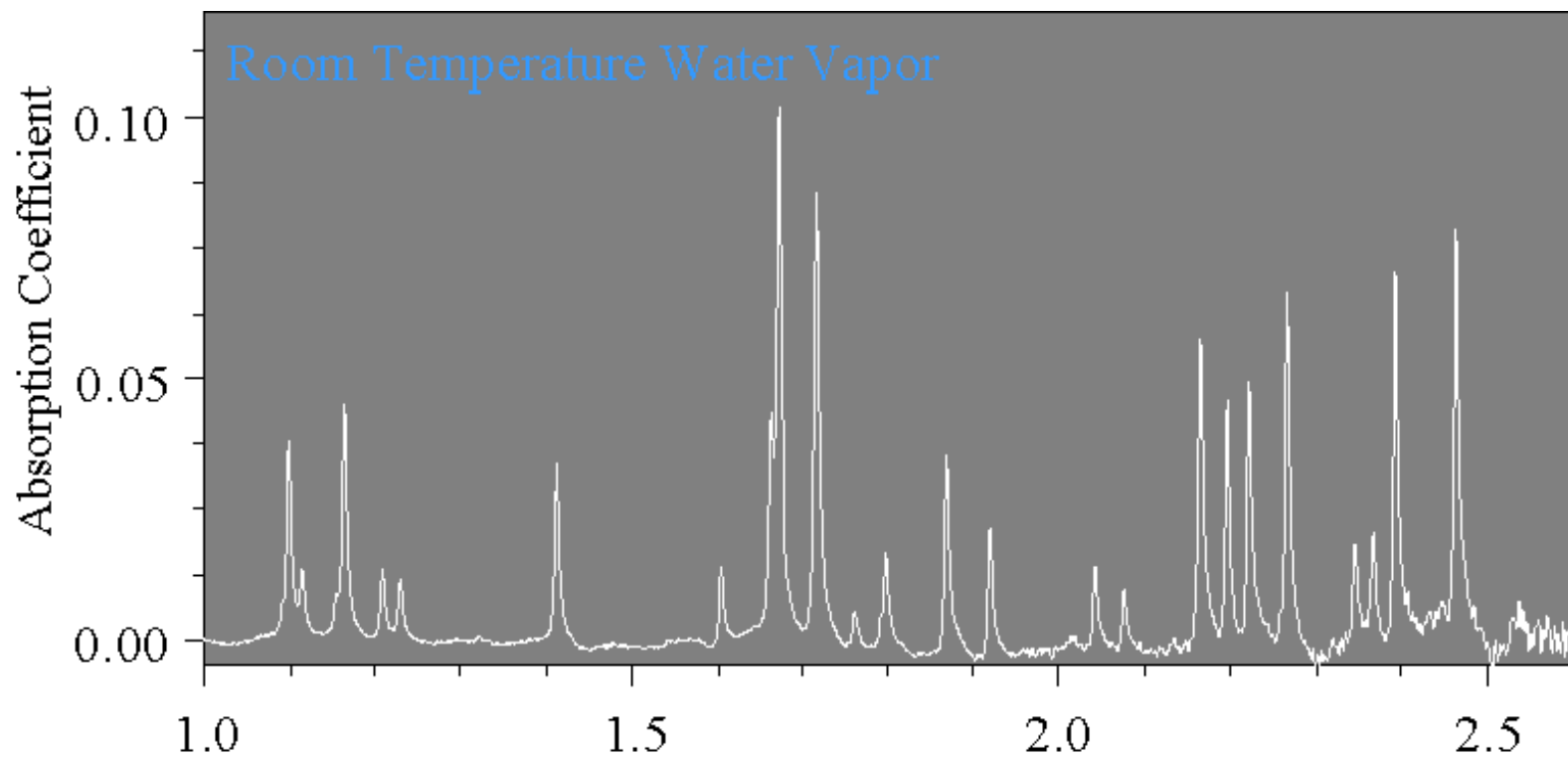
- A terahertzes tartomány meghódítása
- Néhány szó az ELI-PTE közreműködésről
 - THz pumpa – THz próba (TP2)
 - Pumpa – Próba mérés
 - Multispektrális képképzés
 - Nagy energiájú THz-es forrás
- THz-es sugárzás keltése
 - Cserenkov geometria
 - Döntött impulzusfrontú gerjesztés
- Főbb alkalmazási lehetőségek
- Nagy energiájú alkalmazások
 - Relativisztikus elektronok gyorsítása
 - Protonok utógyorsítása

Mit értünk THz-es sugárzáson?



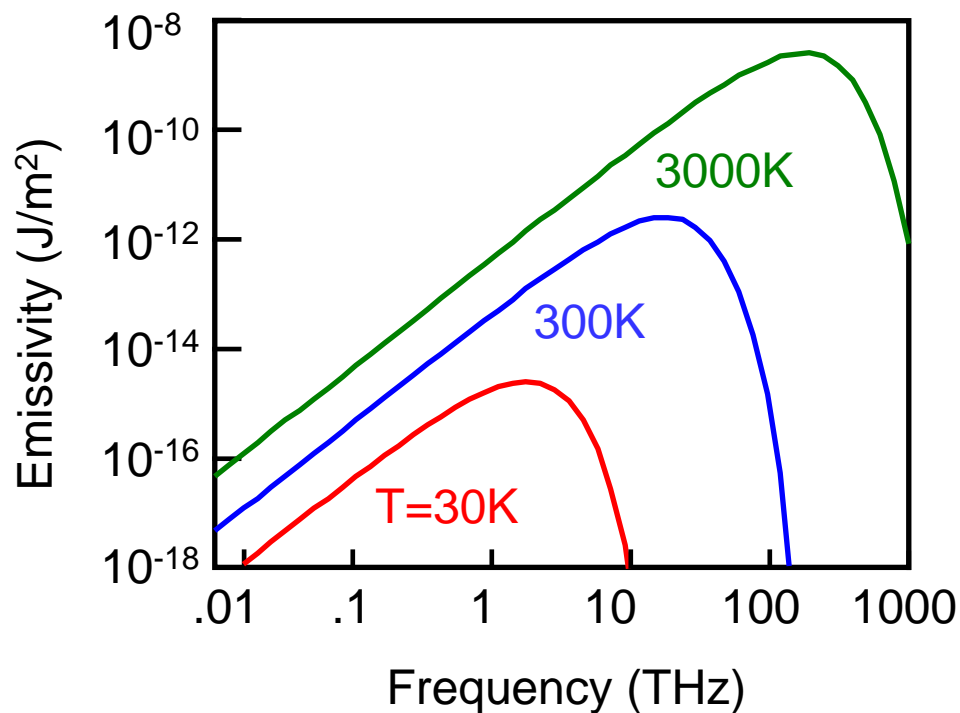
- 1 THz \div 4,15 meV
- 1 THz \div 33,3 cm⁻¹
- 1 THz \div 300 μ m
- 1 THz \div 1 ps
- 1 THz \div 48,1 K

Mit értünk THz-es sugárzáson?

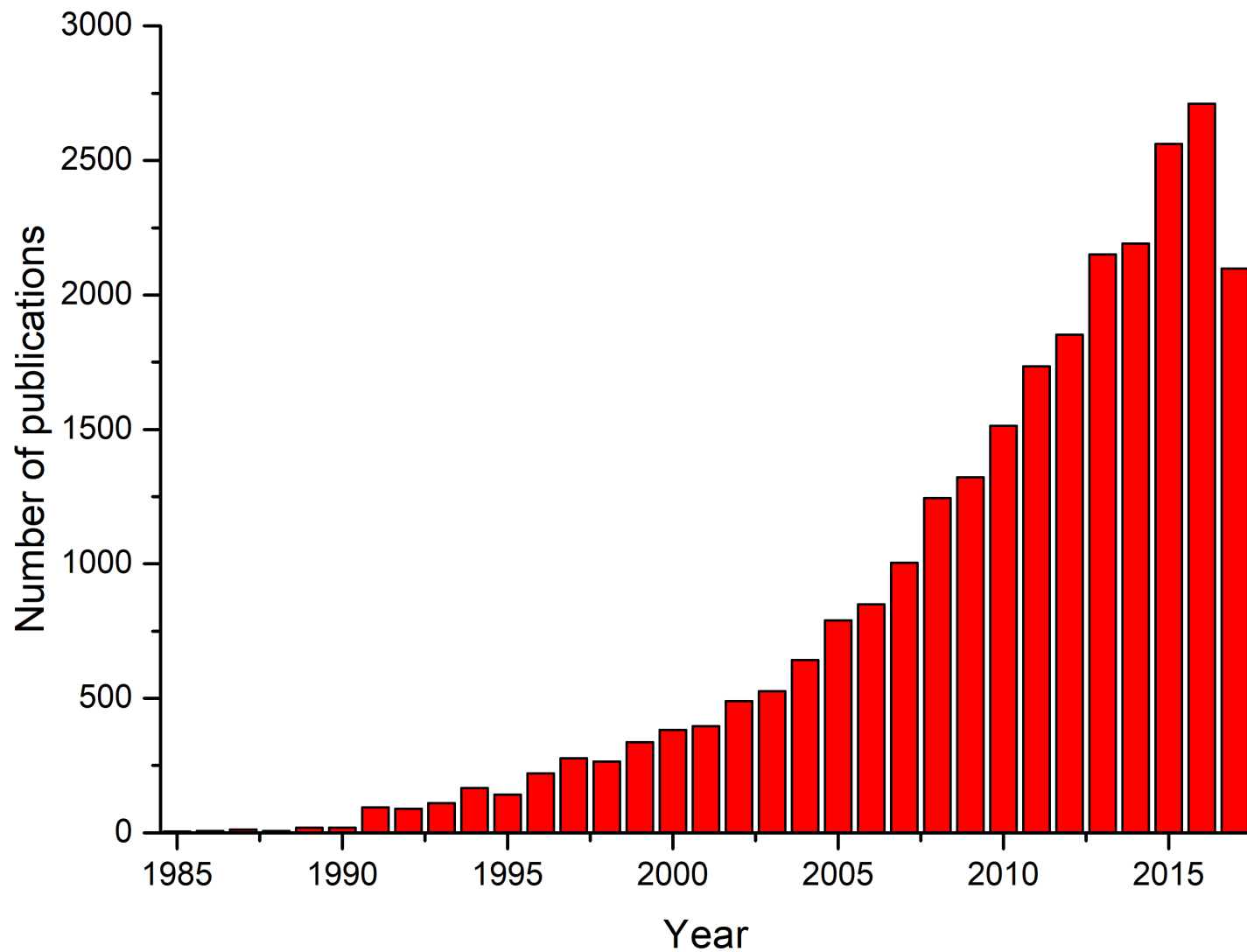


Mit értünk THz-es sugárzáson?

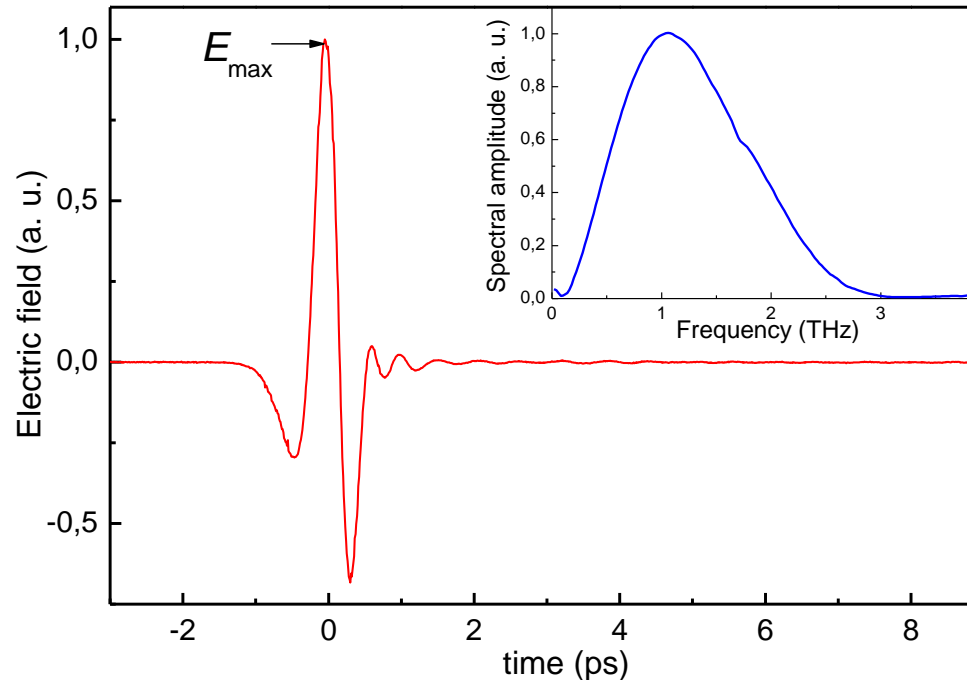
Feketesugárzók zavaró hatása a THz-es mérésekre



THz-es közlemények

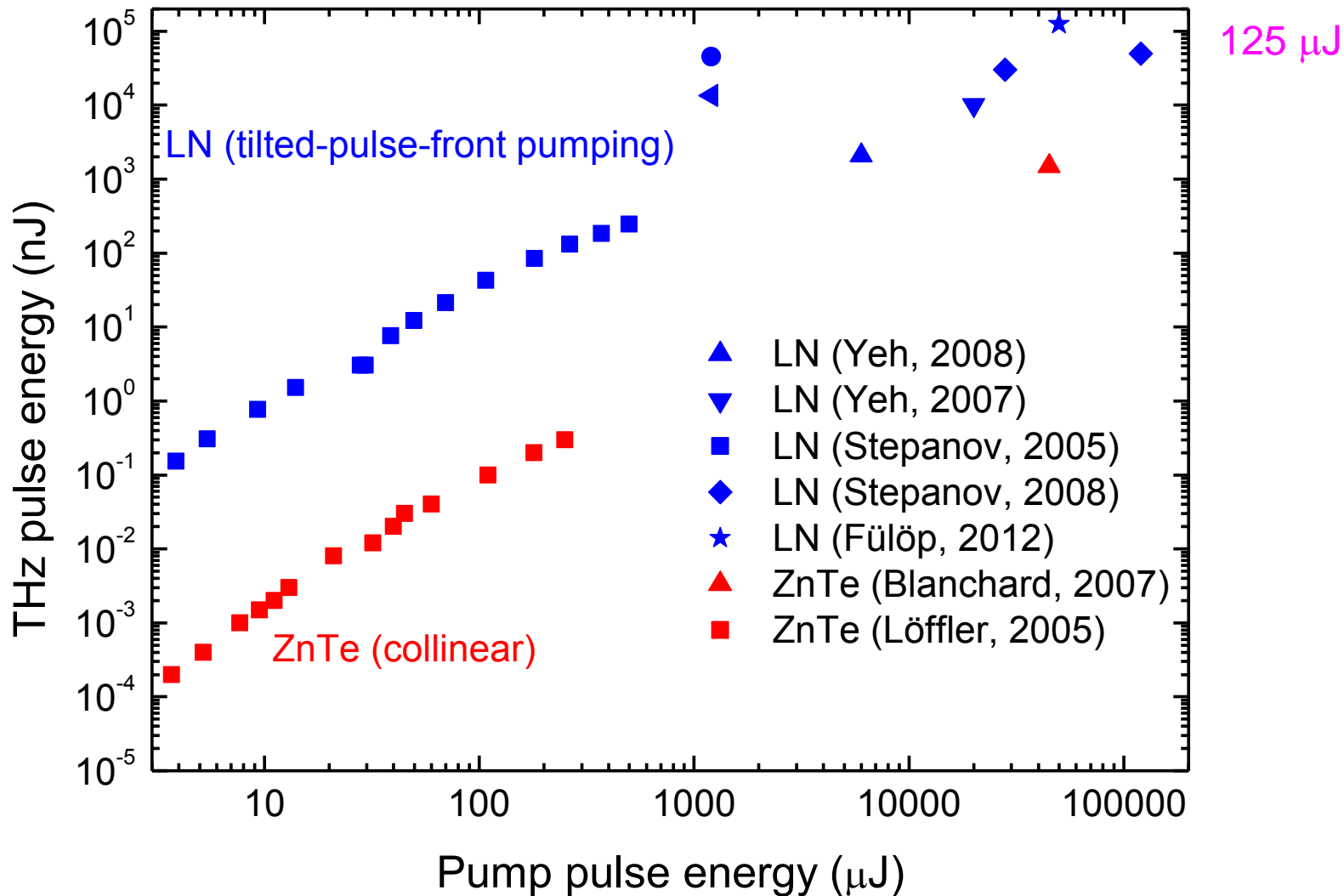


THz-es impulzusok osztályozása a csúcs-térerősség alapján



- Kis térerősségű ($E_{\max} \approx 100 \text{ V/cm} \rightarrow 10 \text{ fJ}$ energia) Lineáris (TDTs) THz spektroszkópia
- Nagy térerősségű ($E_{\max} \approx 100 \text{ kV/cm} \rightarrow \mu\text{J}$ energia) pumpa-próba
- Extrém nagy térerősségű ($E_{\max} \approx 100 \text{ MV/cm} \rightarrow 10 \text{ mJ}$ energia)

A THz-es impulzus energia a pumpáló energia függvényében

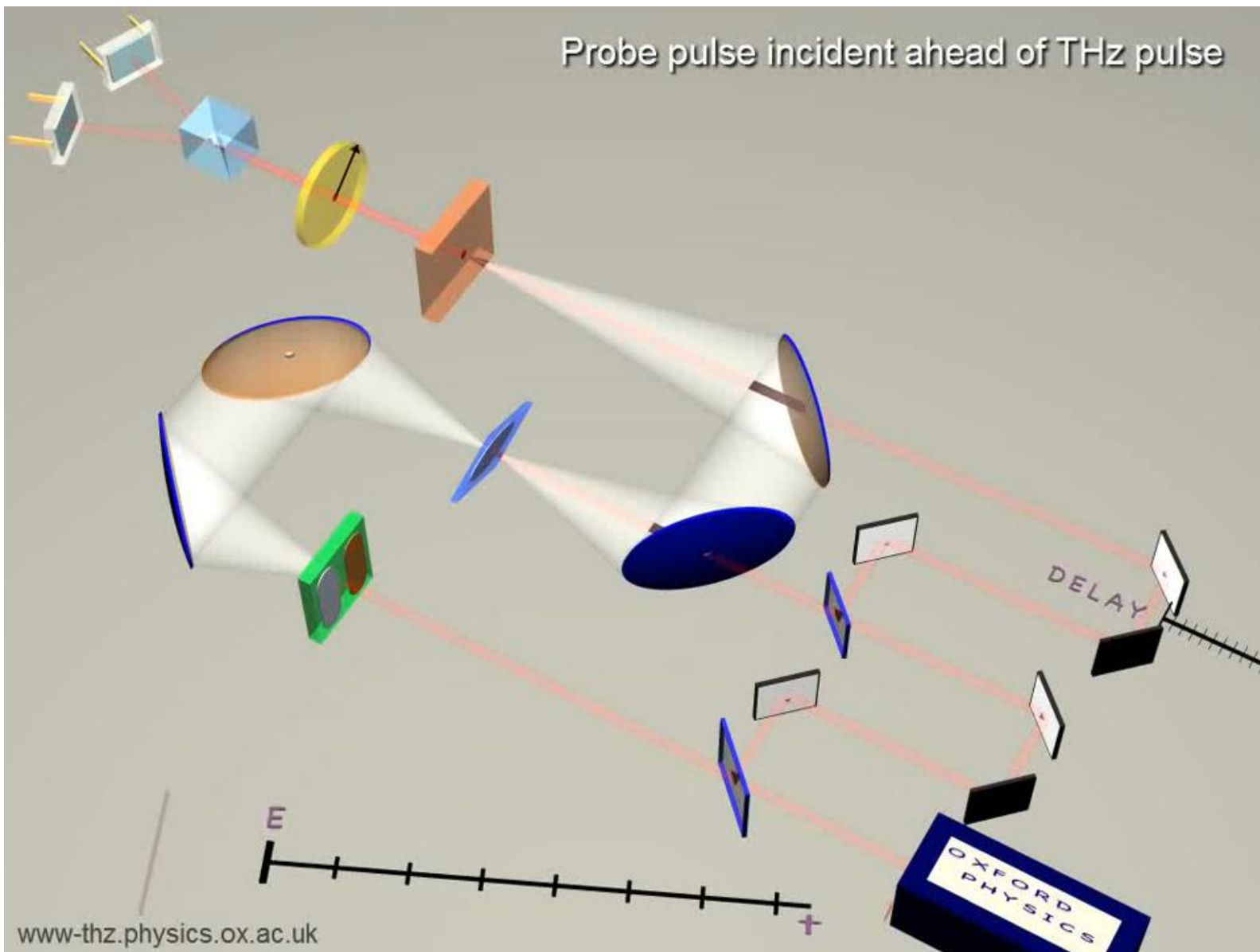


Az ELI-PTE együttműködésről

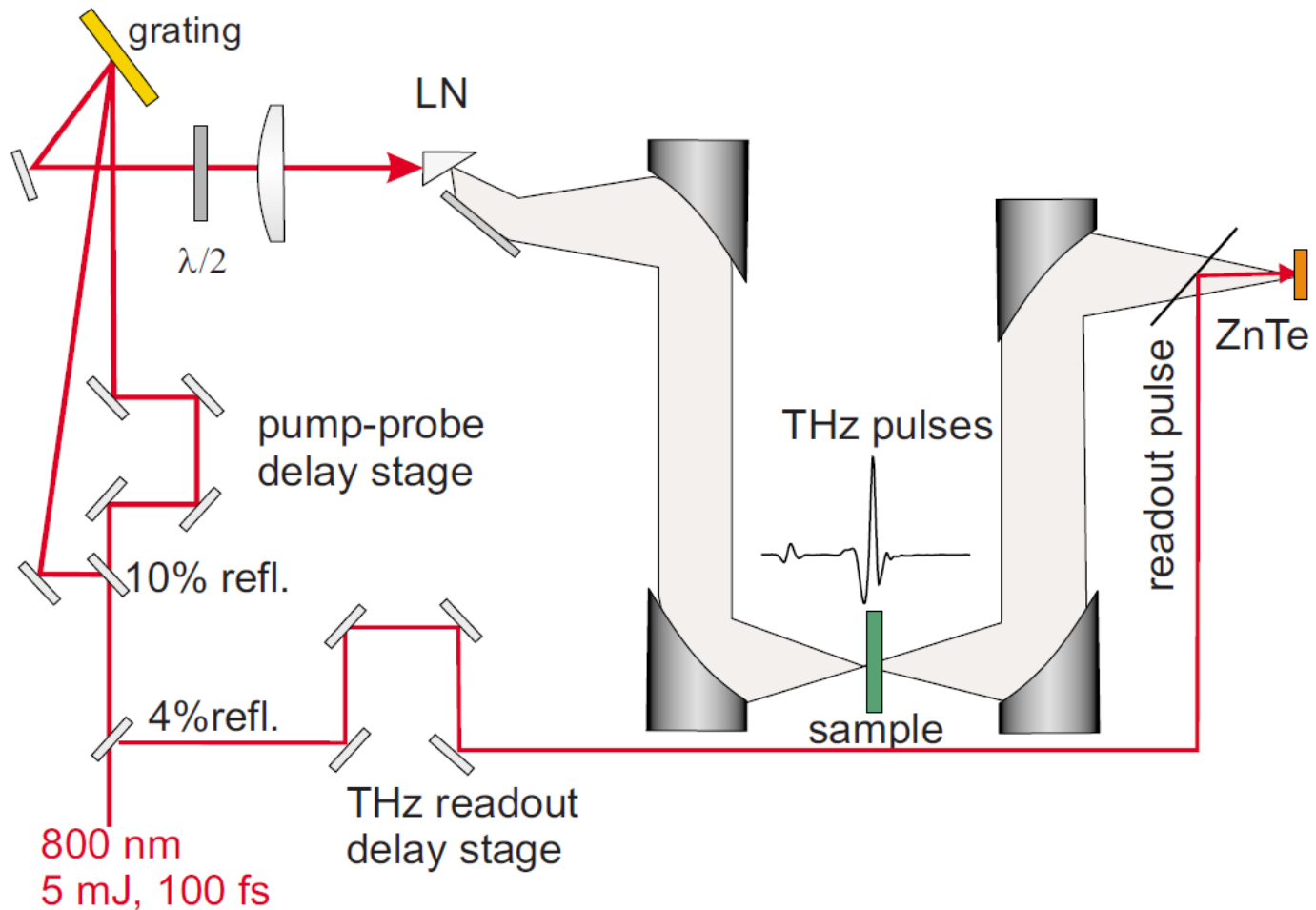
1 – THz pumpa – THz próba (TP2)

Pump-probe
technique

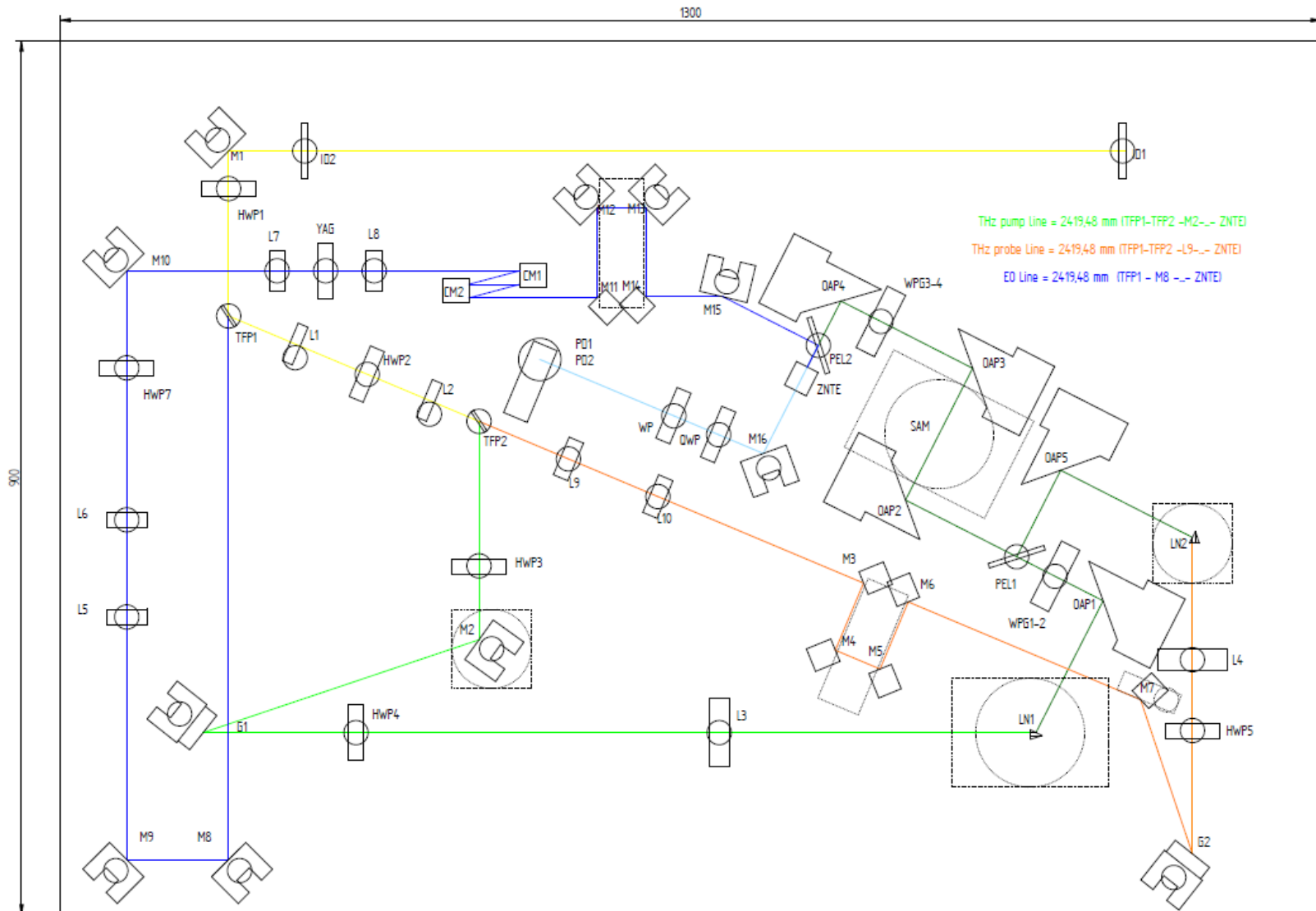
Optikai pumpa – THz próba (OFTP)



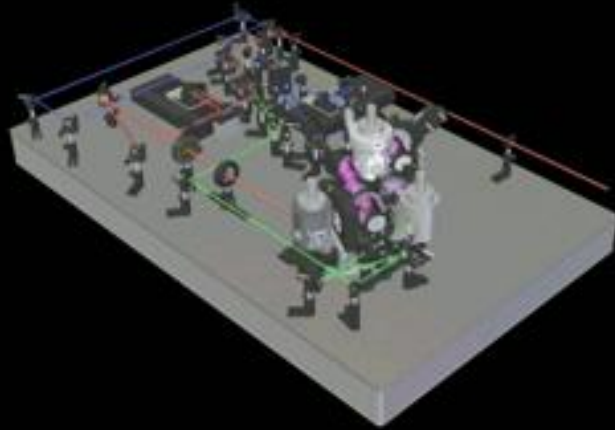
THz pumpa – THz próba



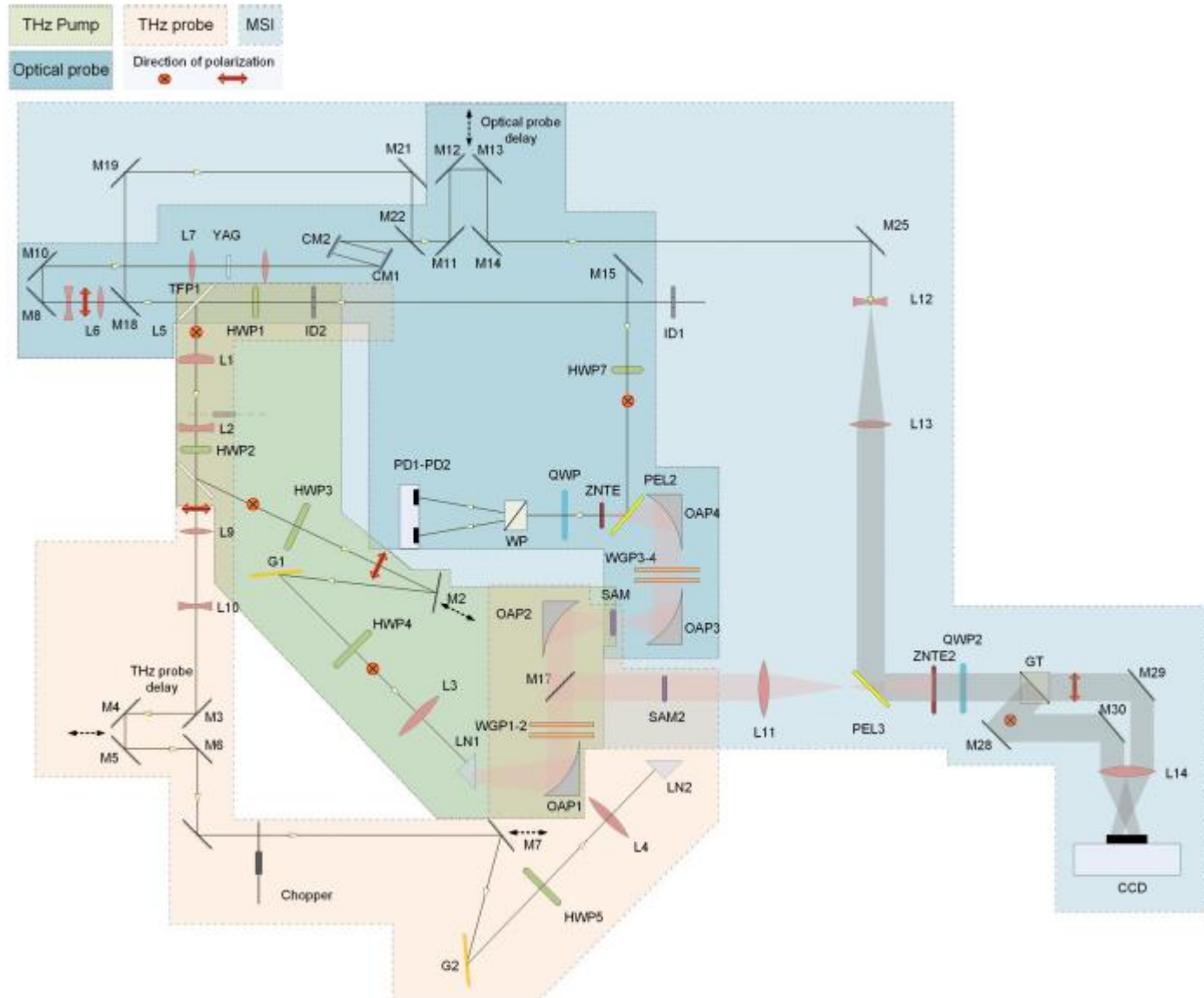
THz pumpa – THz próba (TP2)



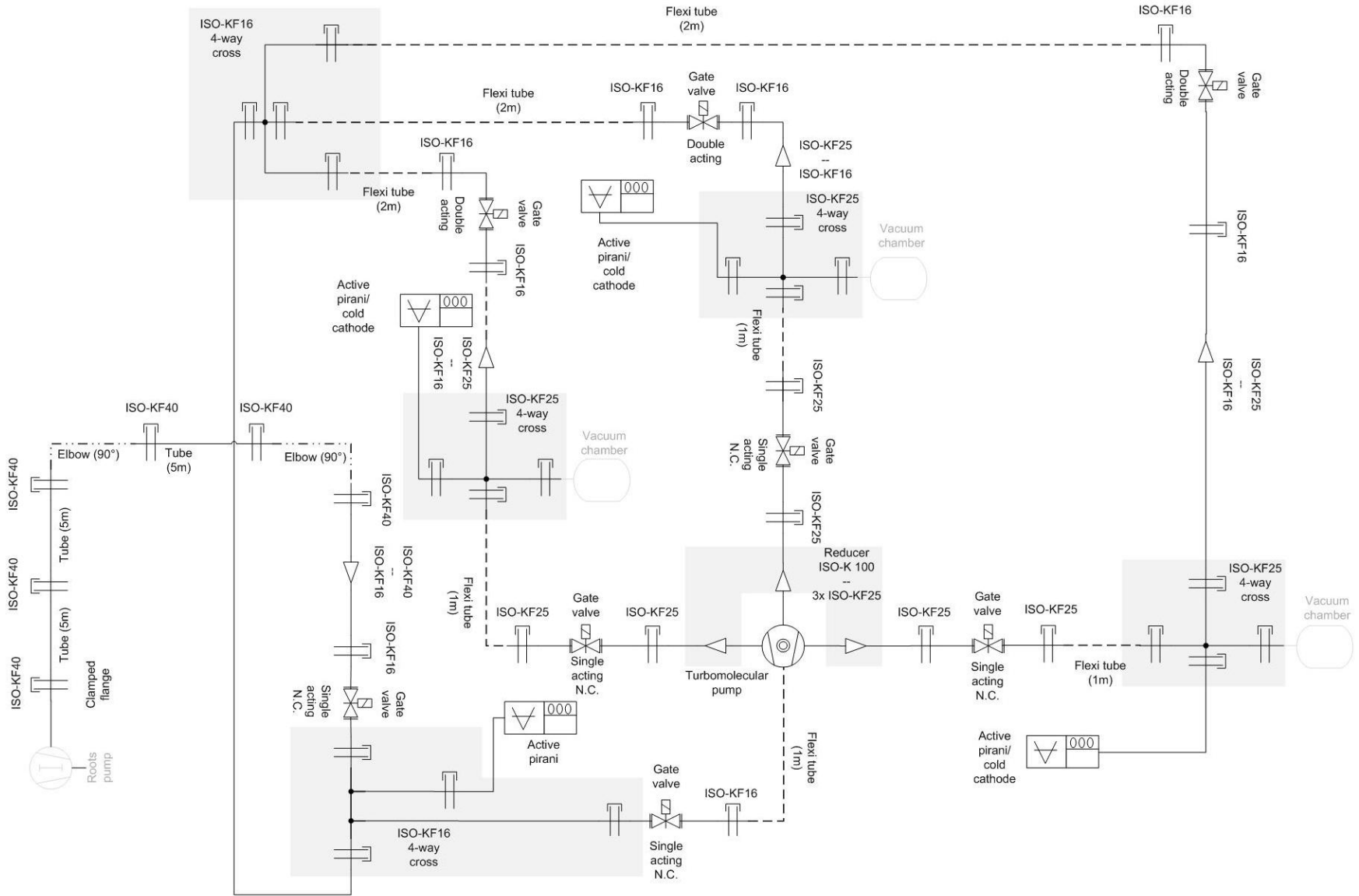
THz pumpa – THz próba (TP2)



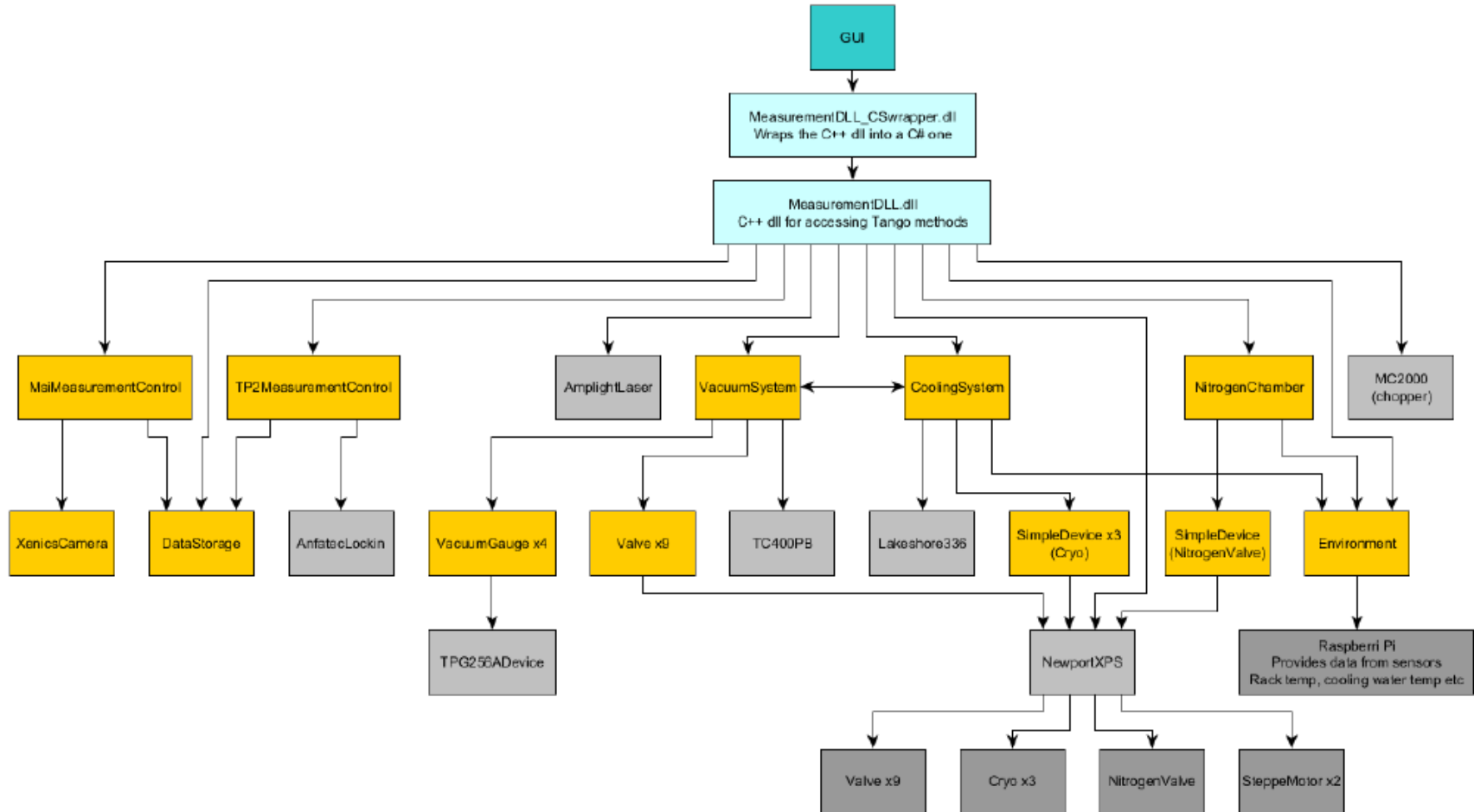
Multispektrális képalkotás (MSI)



A finom részletek... (Vákuum)



A finom részletek...(TANGO)



THz-es sugárzás keltése

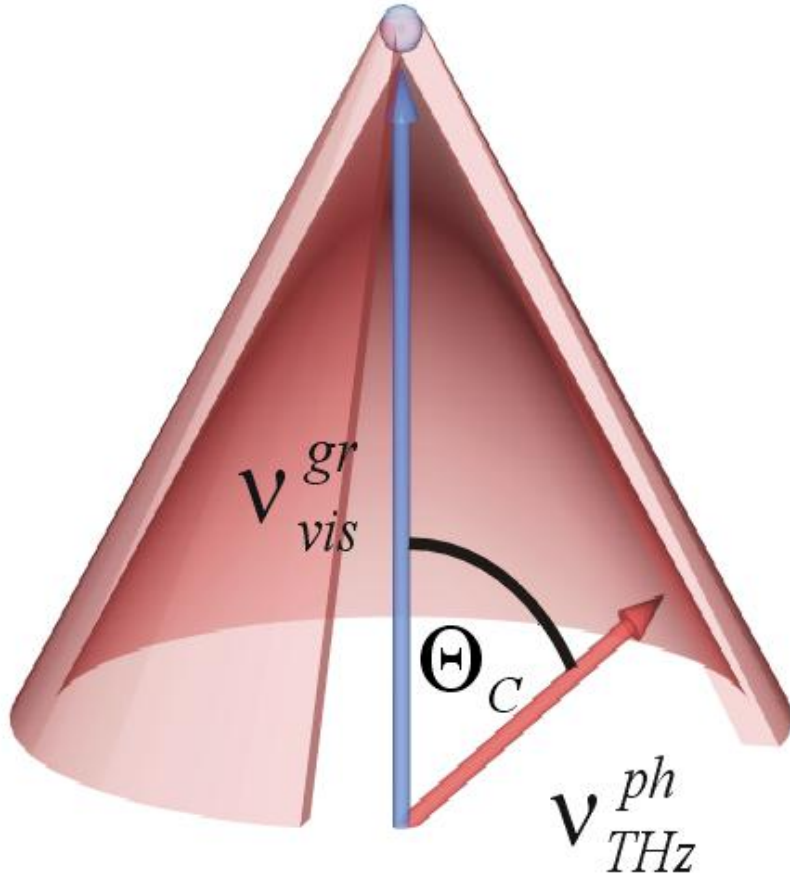
FOM 2 mm-es kristályhossz esetén

Material	d_{eff} (pm/V)	n_{800nm}^{gr}	n_{THz}	$n_{1.55\mu m}^{gr}$	α_{THz} (cm ⁻¹)	<i>FOM</i> (pm ² cm ² /V ²)
CdTe	81.8		3.24	2.81	4.8	11.0
GaAs	65.6	4.18	3.59	3.56	0.5	4.21
GaP	24.8	3.67	3.34	3.16	0.2	0.72
ZnTe	68.5	3.13	3.17	2.81	1.3	7.27
GaSe	28.0	3.13	3.27	2.82	0.5	1.18
sLiNbO ₃ sLN 100K	168	2.25	4.96	2.18	17 4.8	18.2 48.6
DAST	615	3.39	2.58	2.25	50	41.5

Sebesség illesztés feltétele:

$$v_{NIR}^{gr} = v_{THz}^{ph} \Rightarrow n_{NIR}^{gr} = n_{THz}$$

THz-es sugárzás keltése: Cserenkov geometria



Cserenkov

$$\Delta t_{\text{pump}} < T_{\text{THz}}$$

$$w_{\text{pump}} < \lambda_{\text{THz}}$$

Kúp alakú hullámfront

THz-es sugárzás keltése: Cserenkov geometria



2018.03.15. 61. Fizikatanári Ankét, Szeged

THz-es sugárzás keltése

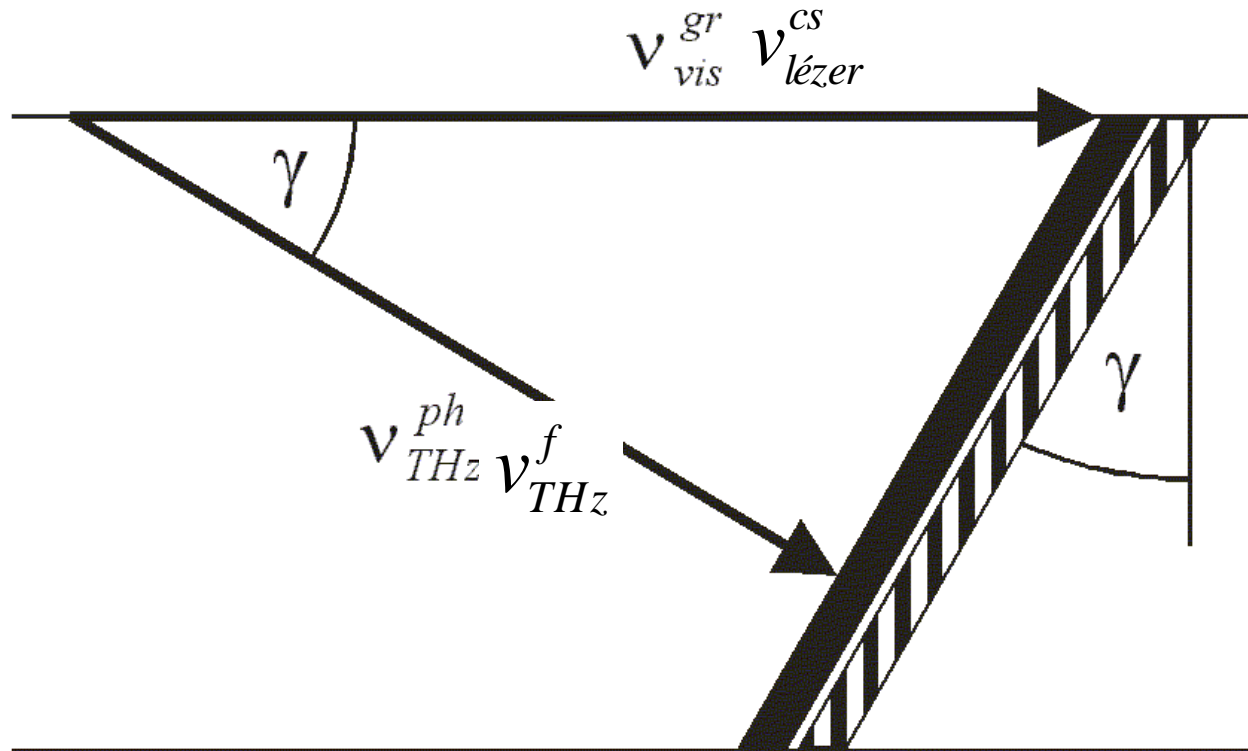
J. Hebling et al: Optics Exp. **10**, 1161 (2002)

Sebességillesztés:

$$v_{THz}^f = v_{lézer}^{cs}$$

LiNbO₃: nagy
nemlinearitás, de

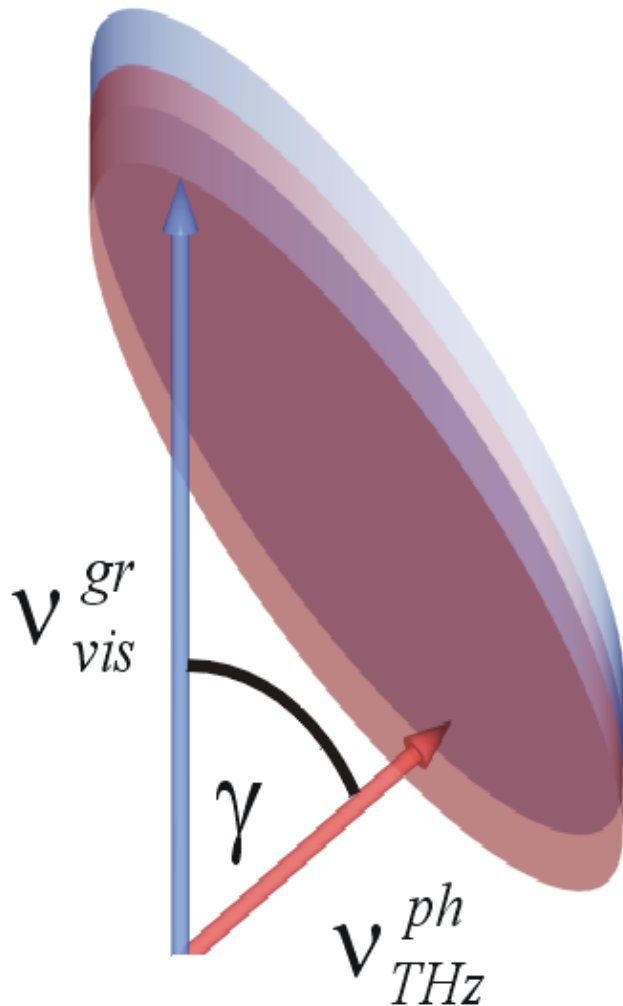
$$v_{THz}^f \ll v_{lézer}^{cs}$$



A döntött pumpáló intenzitásfront által keltett THz-es sugárzás erre a frontra merőlegesen halad → **a sebességillesztés feltétele módosul:**

$$v_{THz}^f = \cos \gamma \cdot v_{lézer}^{cs}$$

THz-es impulzusok keltése: Döntött impulzusfrontú gerjesztés



Döntött impulzusfront

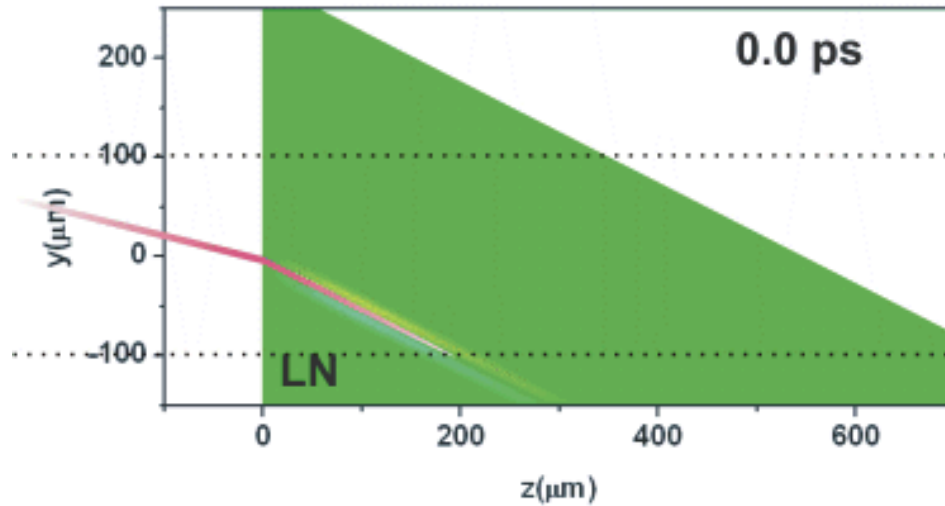
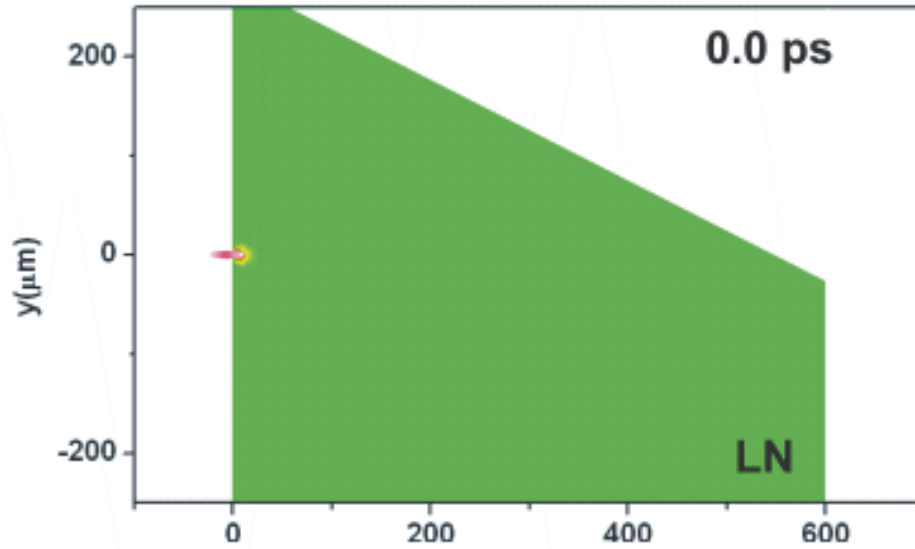
$$\Delta t_{\text{pump}} < T_{\text{THz}}$$

Skálázható ω_{pump}

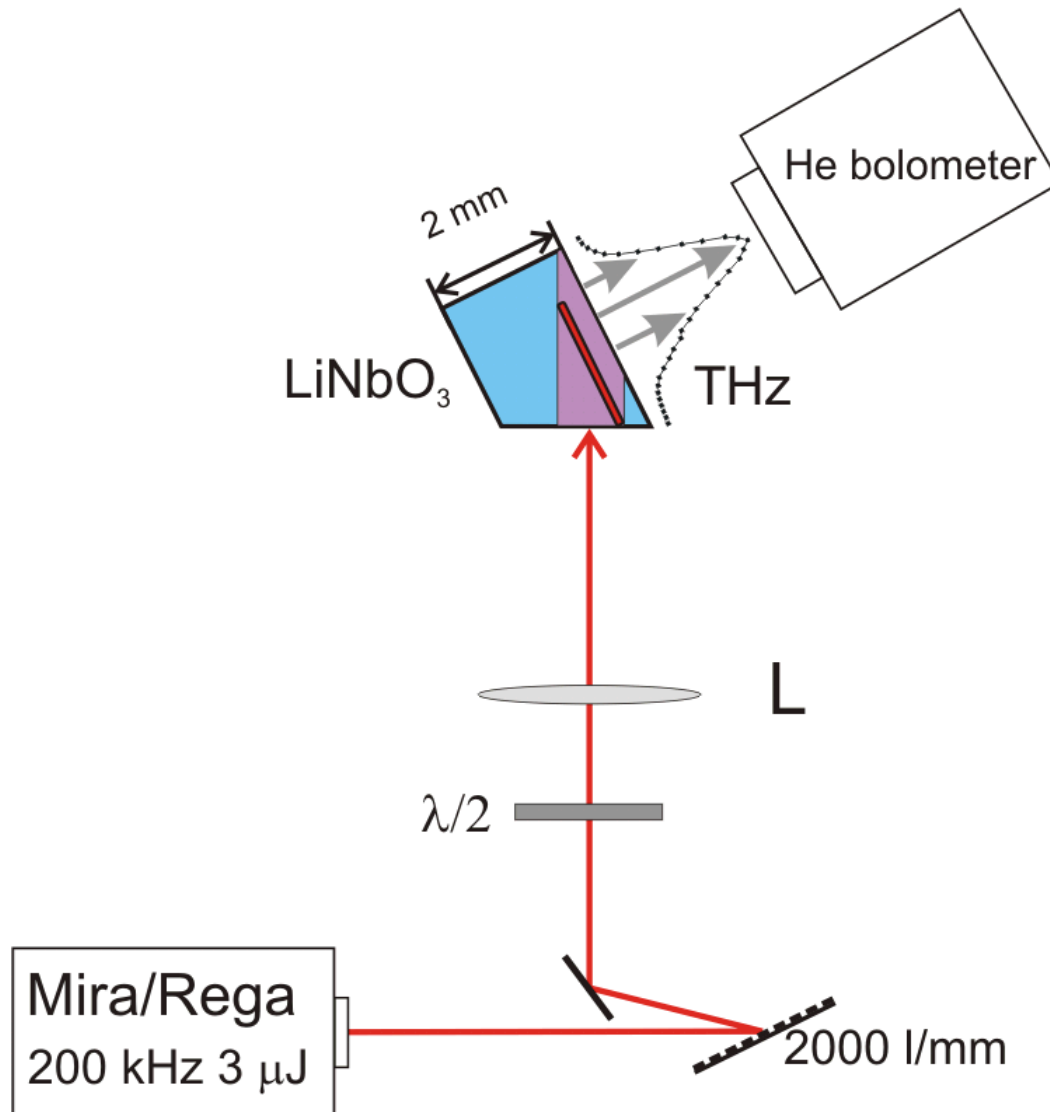
Síkhullám

$$v_{vis}^{gr} \cos \gamma = v_{THz}^{ph}$$

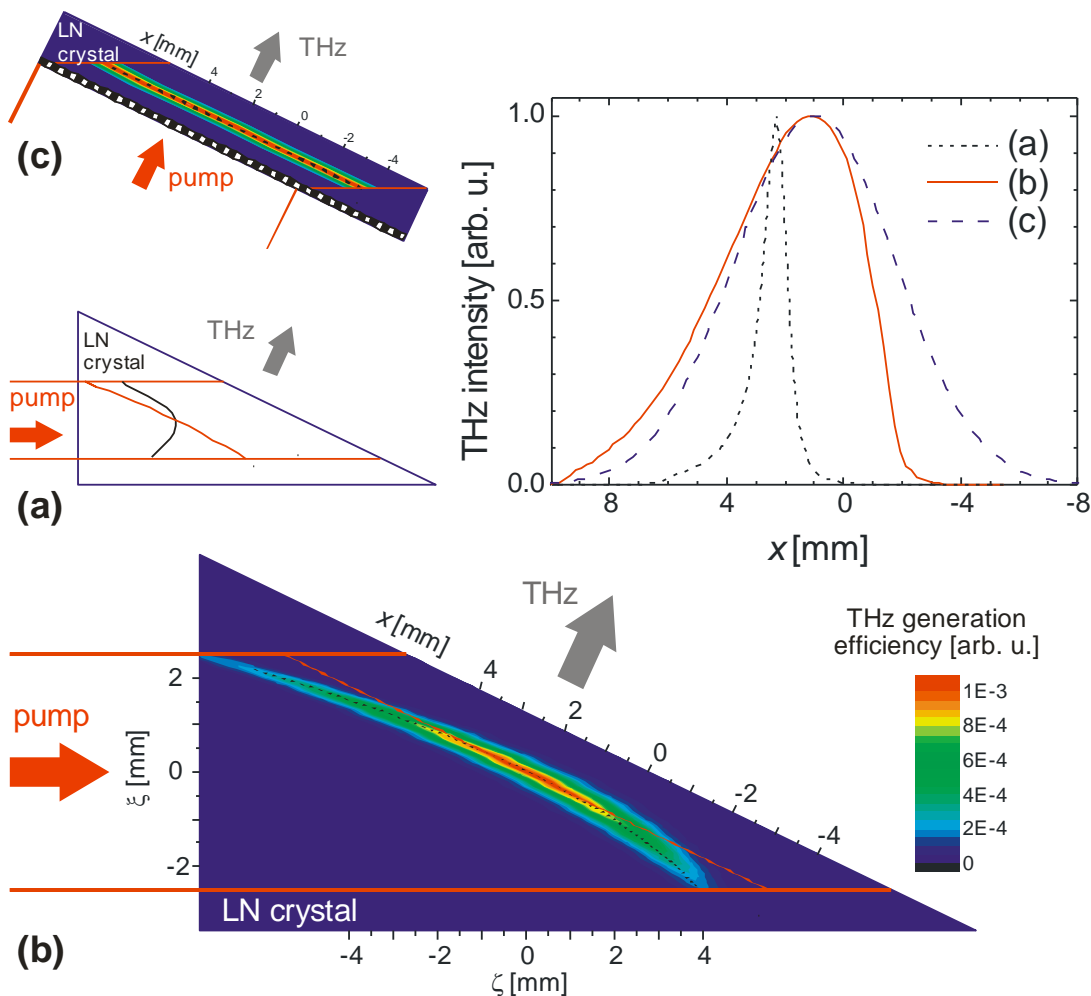
THz-es sugárzás keltése



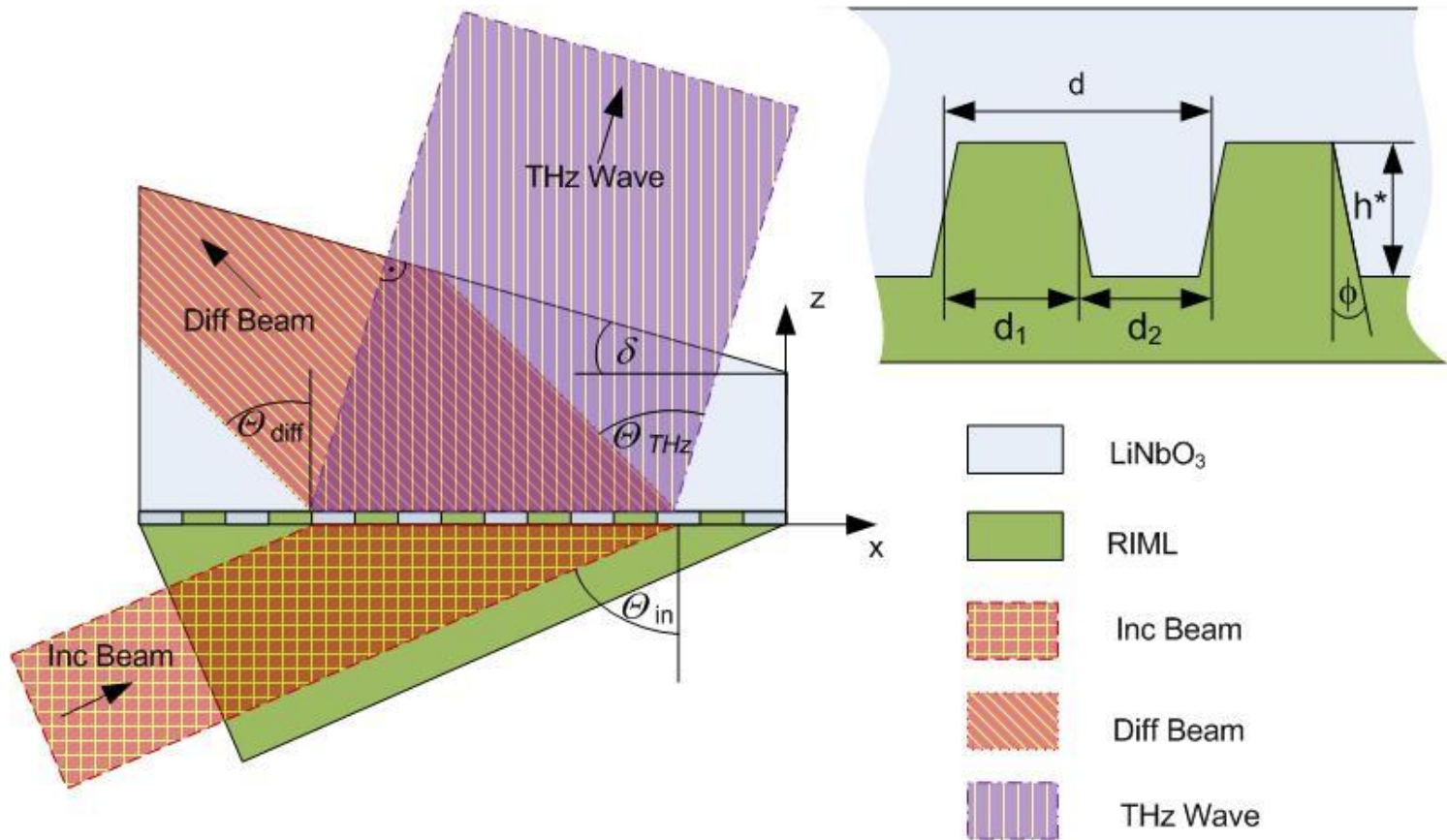
THz-es sugárzás keltése



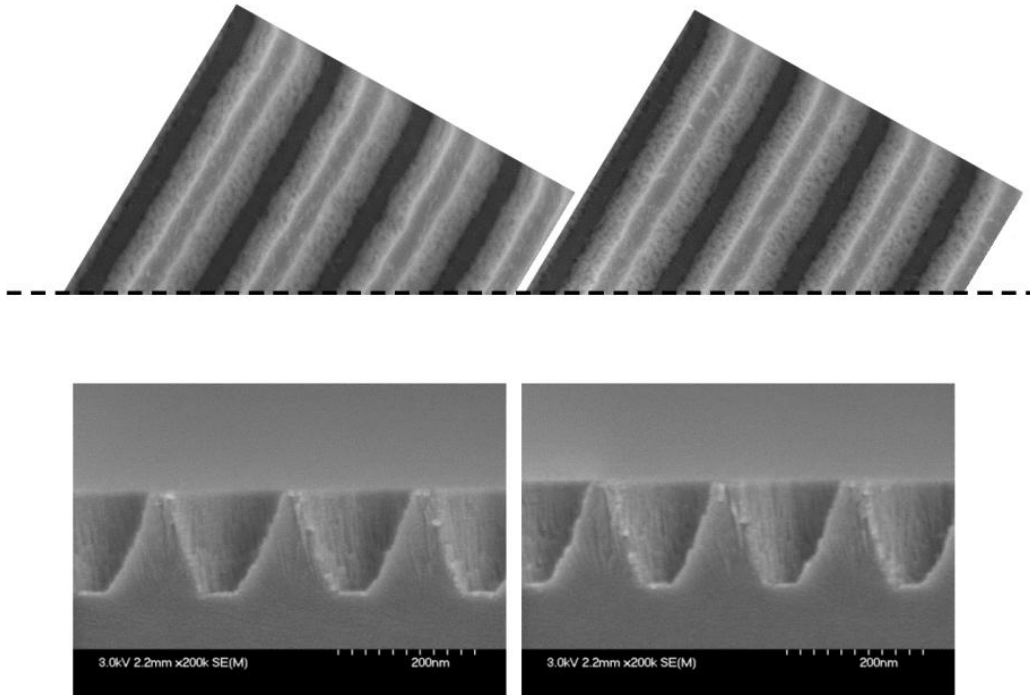
THz-es impulzusok keltése: Döntött impulzusfrontú gerjesztés



THz-es impulzusok keltése: Döntött impulzusfrontú gerjesztés – kontaktrács I.

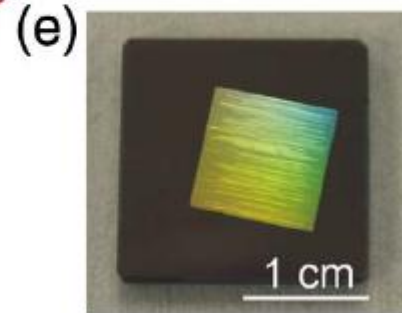
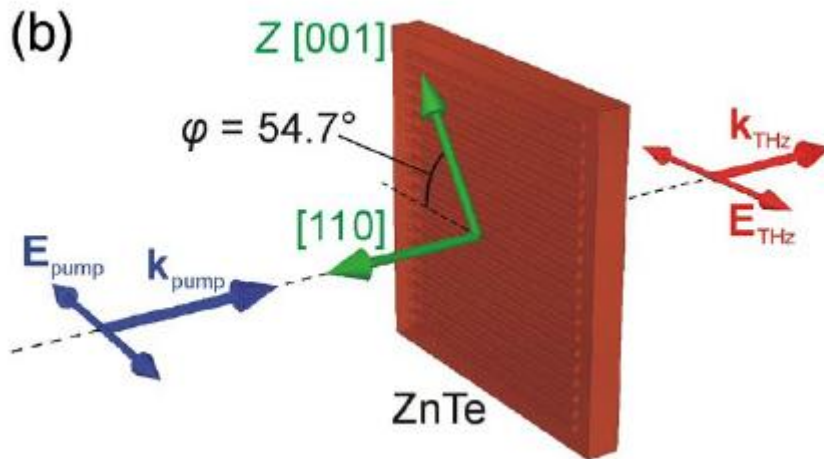
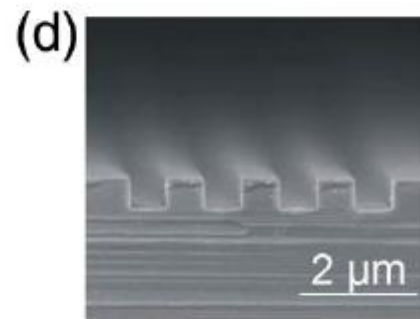
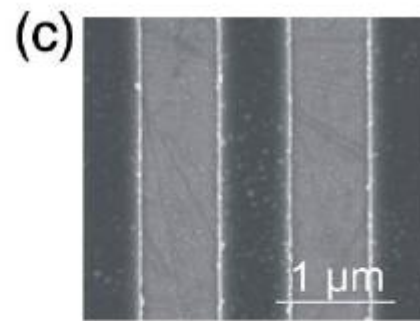
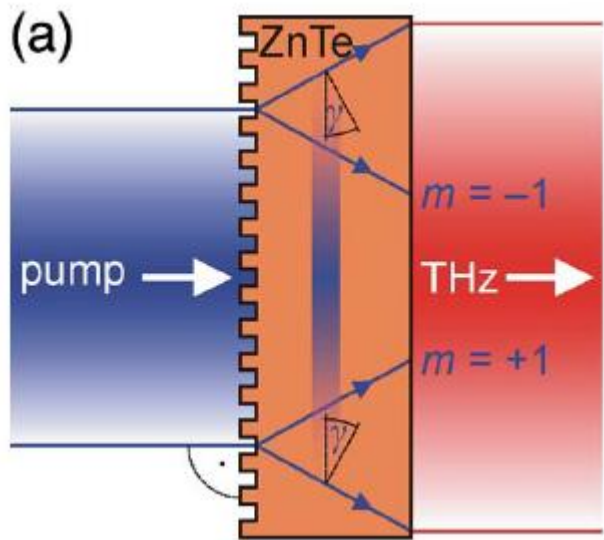


THz-es impulzusok keltése: Döntött impulzusfrontú gerjesztés – kontaktrács II.

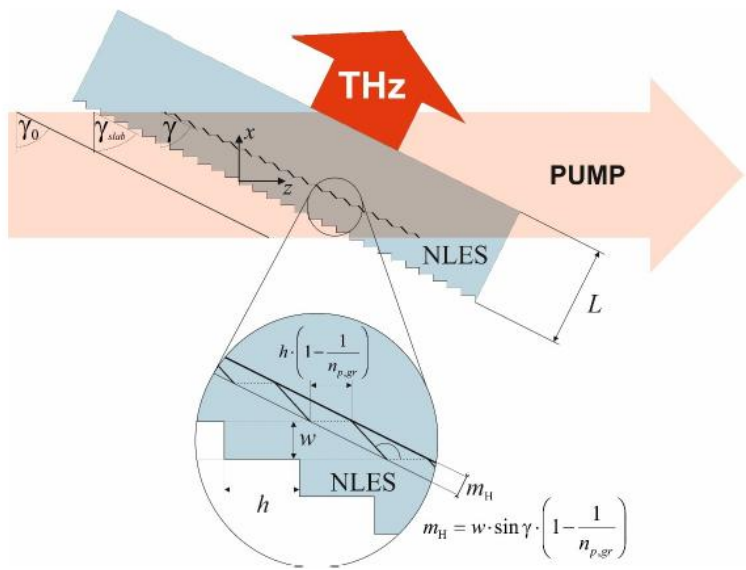
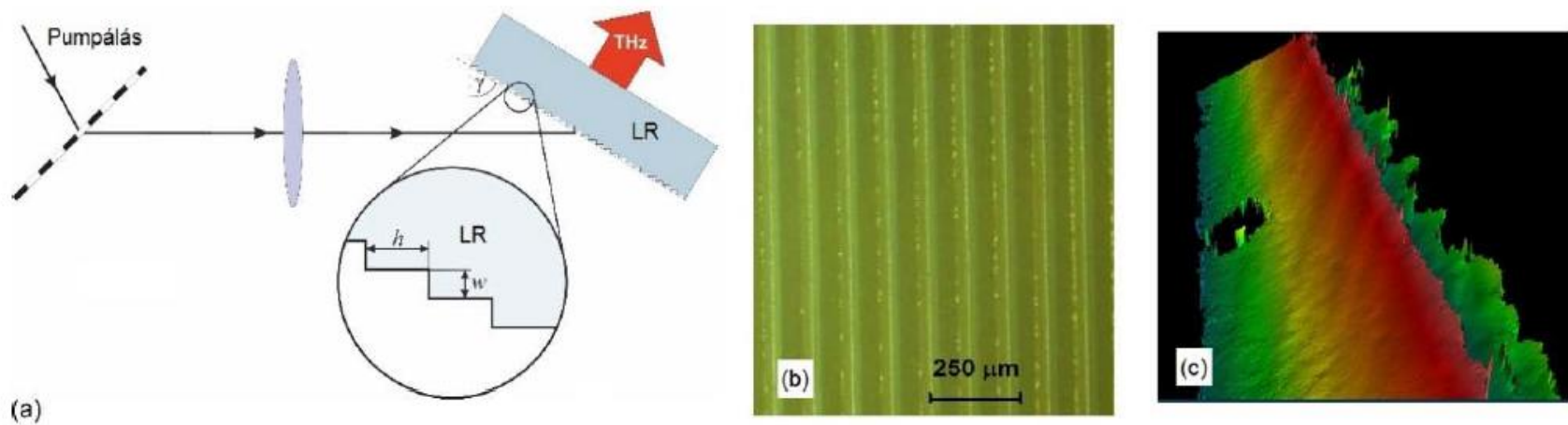


LiNbO₃ kontaktrács elektronmikroszkópos képe

THz-es impulzusok keltése: Döntött impulzusfrontú gerjesztés – kontaktrács III.



THz-es impulzusok keltése: Döntött impulzusfrontú gerjesztés – kontaktrács IV.

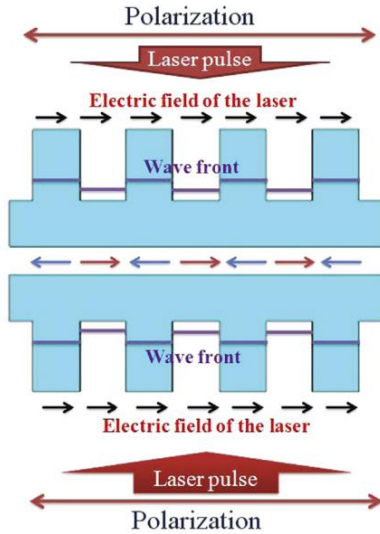


Echelle rácson elrendezés

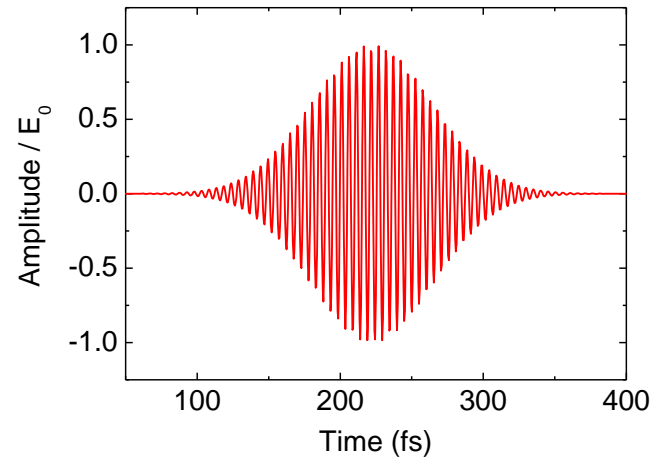
Extrém térerjű THz-es impulzusok alkalmazása I. Relativisztikus elektronok utógyorsítása

THz meghajtású dielektrikus lézer gyorsító relativisztikus elektronokra

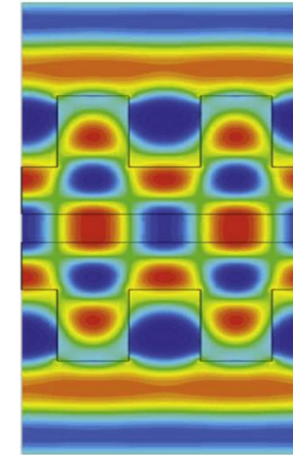
Modell



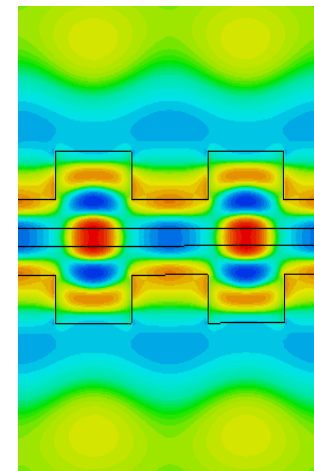
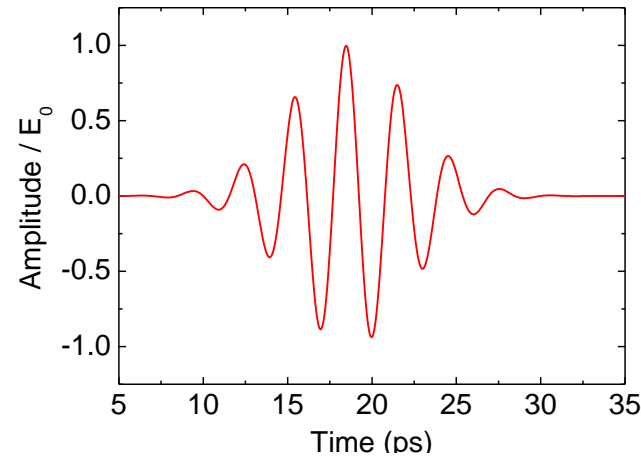
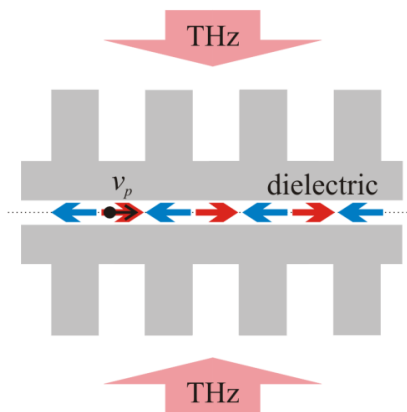
Meghajtó impulzus



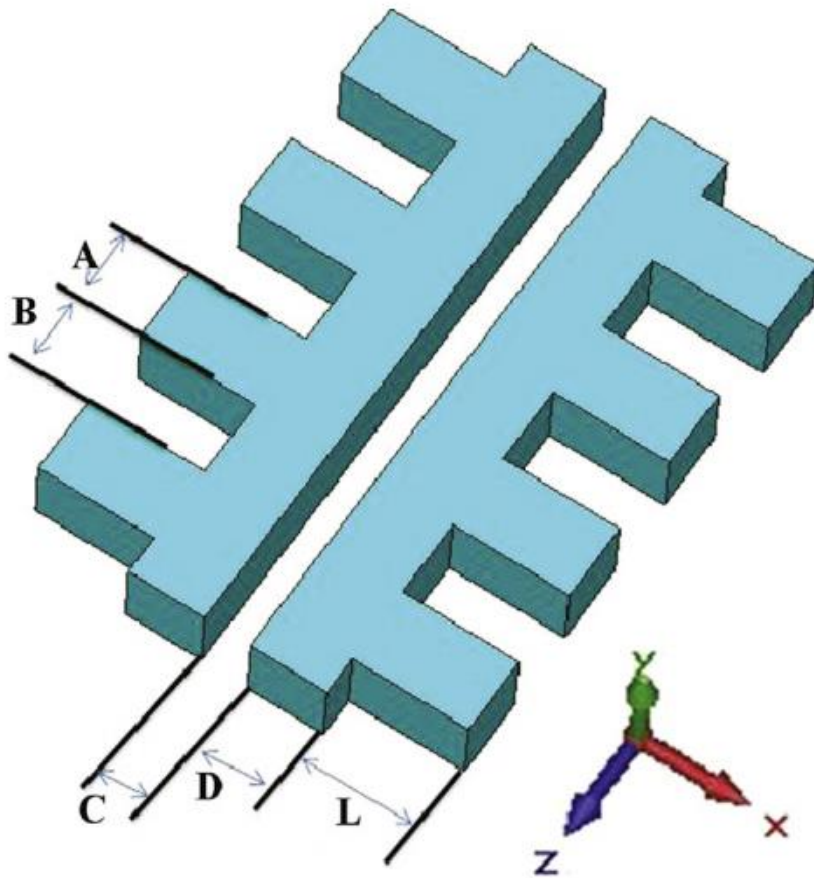
Elektromos térerő z-irányban



A. Aimidula et al., *Nucl. Instr. and Meth. A*, **19**, 15090 (2014)
 Computer Simulation Technology (CST)



THz meghajtású dielektrikus lézer gyorsító optimális paramétereit (Az alkalmazott anyagtól függenek)



- Anyag: Szilícium ($n = 3.41$)
- $A = B = \lambda / 2$
- Optimalizáltuk a C, D és L paramétereiket.

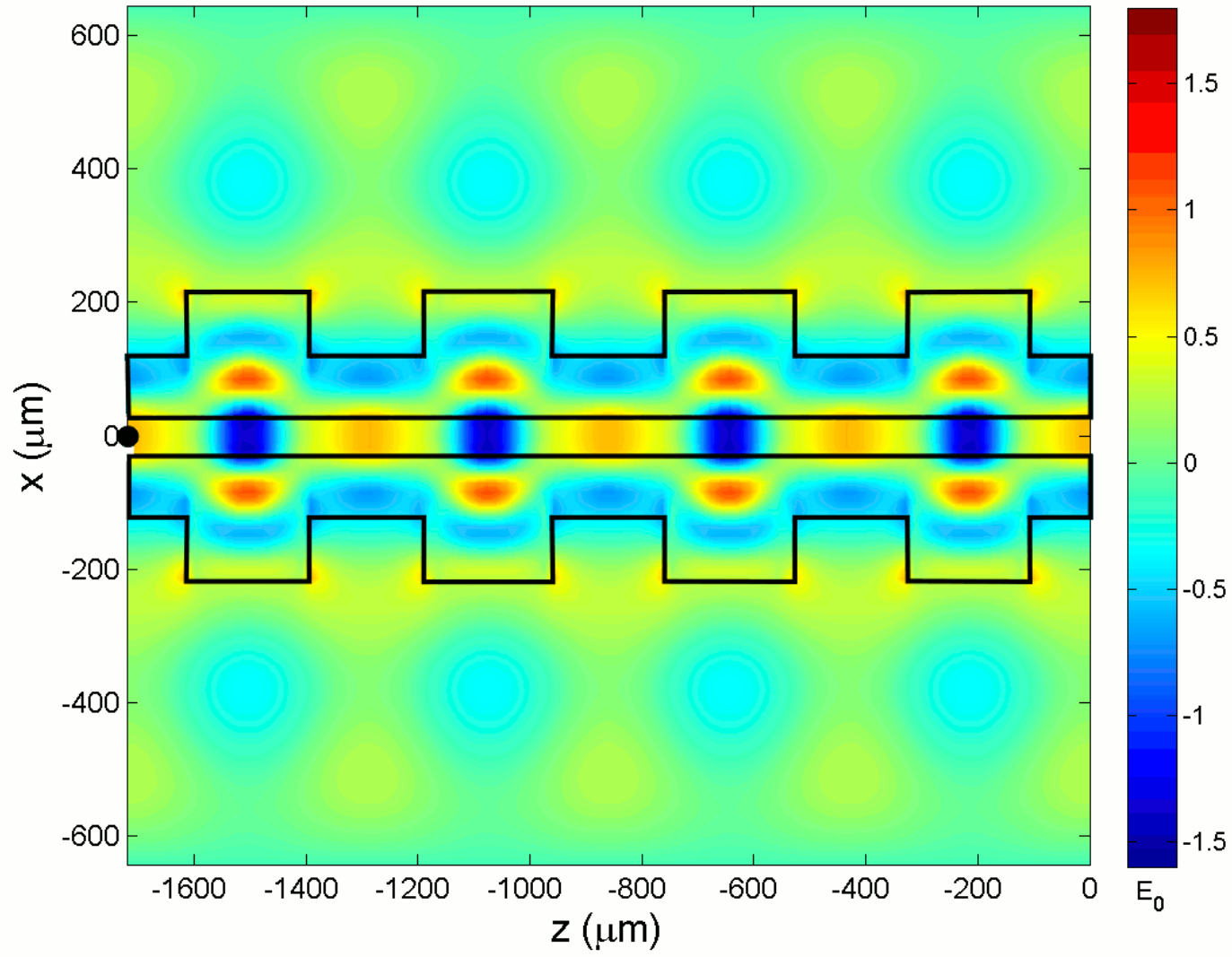
→ $C = 0.1 \lambda$

→ $D = 0.167 \lambda$

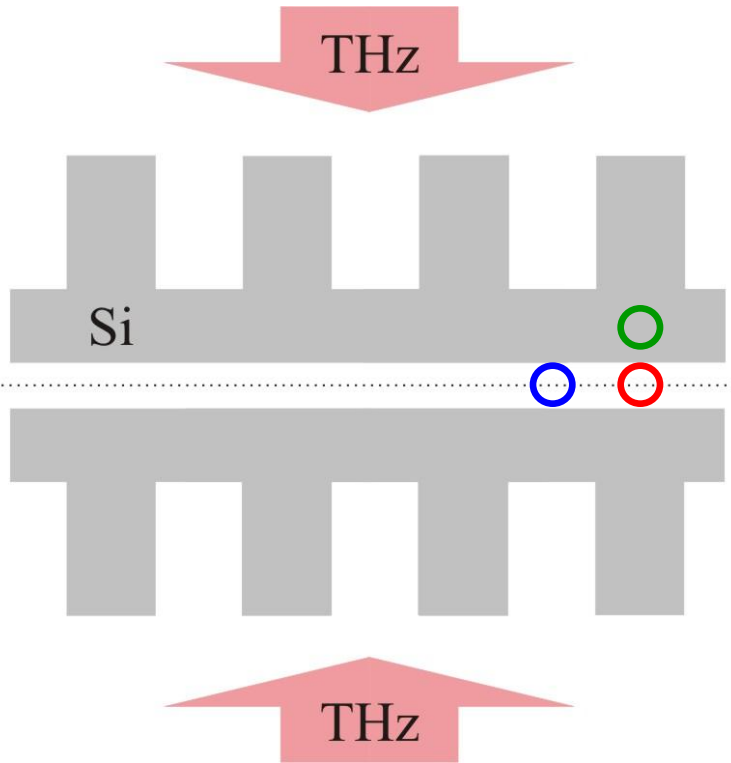
→ $L = 0.28 \lambda$

$\lambda = 0.9 \text{ mm (0.33 THz)}$

Elektromos tér a rácsok közötti térrészben



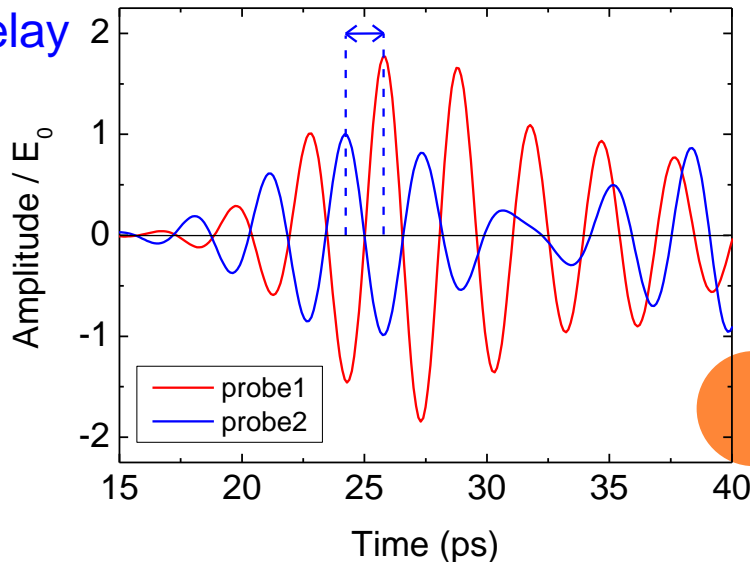
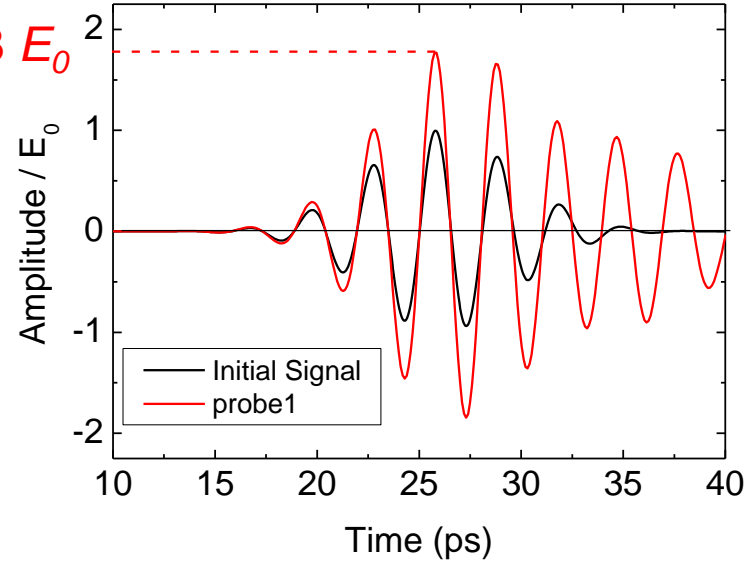
Elektromos tér a rácscok közötti térrészben



$E_{z,max} = 1.8 E_0$

Maximum elektromos mező a dielektrikumban: $E_{z,max} = 1.08 E_0$

π phase delay



Várható gyorsítás

THz paraméterek:

0.33 THz

1 MV/cm

15 ps

20 mJ

5 cm dielektrikum hossz:

1 MeV \rightarrow 4 MeV

Gradiens: 59 MeV/m

THz paraméterek:

0.7 THz

2 MV/cm

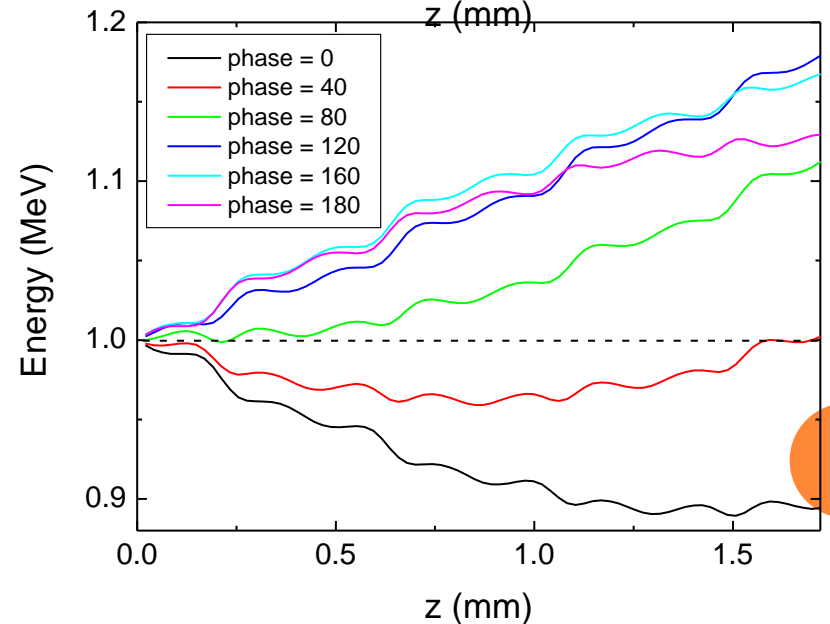
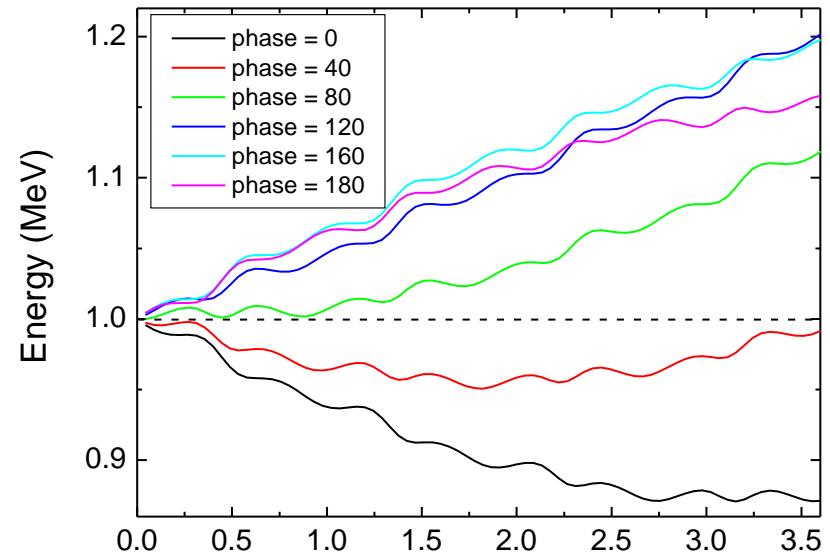
7 ps

20 mJ

5 cm dielektrikum hossz:

1 MeV \rightarrow 6.35 MeV

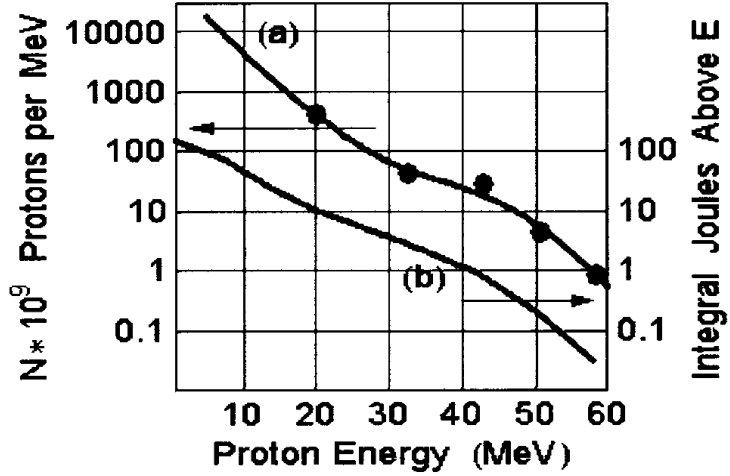
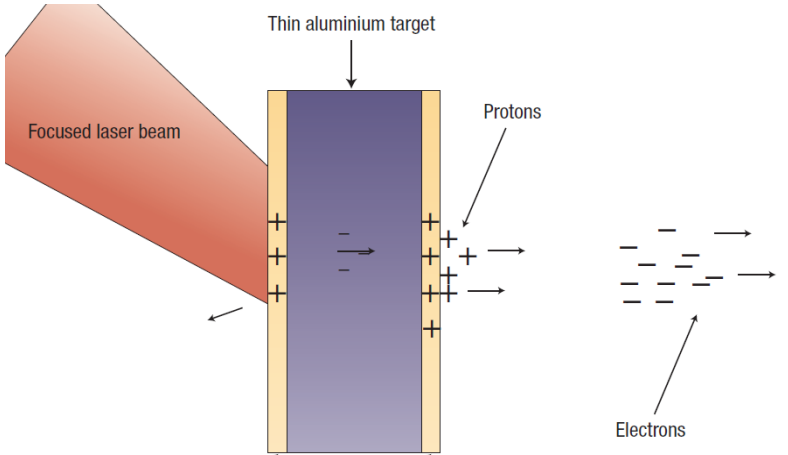
Gradiens: 107 MeV/m



Extrém térerjű THz-es impulzusok alkalmazása II.

Protonok utógyorsítása

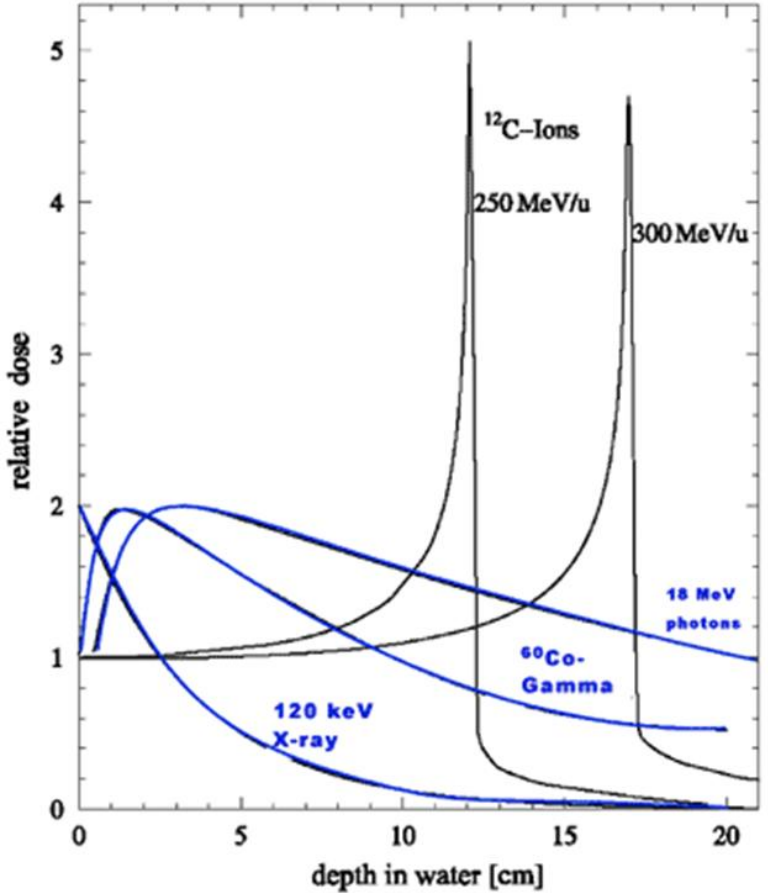
Gyors protoncsomag előállítása lézerrel keltett plazmákban



Snively et al.: PRL **85**, 2945 (2000)

1 PW, 500 J, 500 fs

Protonterápiához $E > 70$ MeV kell !



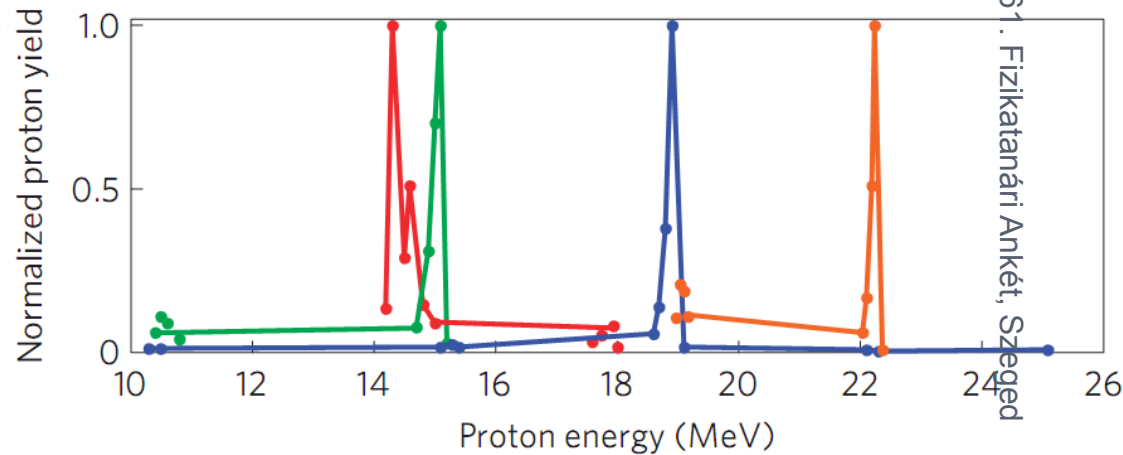
2018.03.15. 61. Fizikatanári Ankét, Szeged

A hadron terápia elvárásai a protonforrásokkal szemben

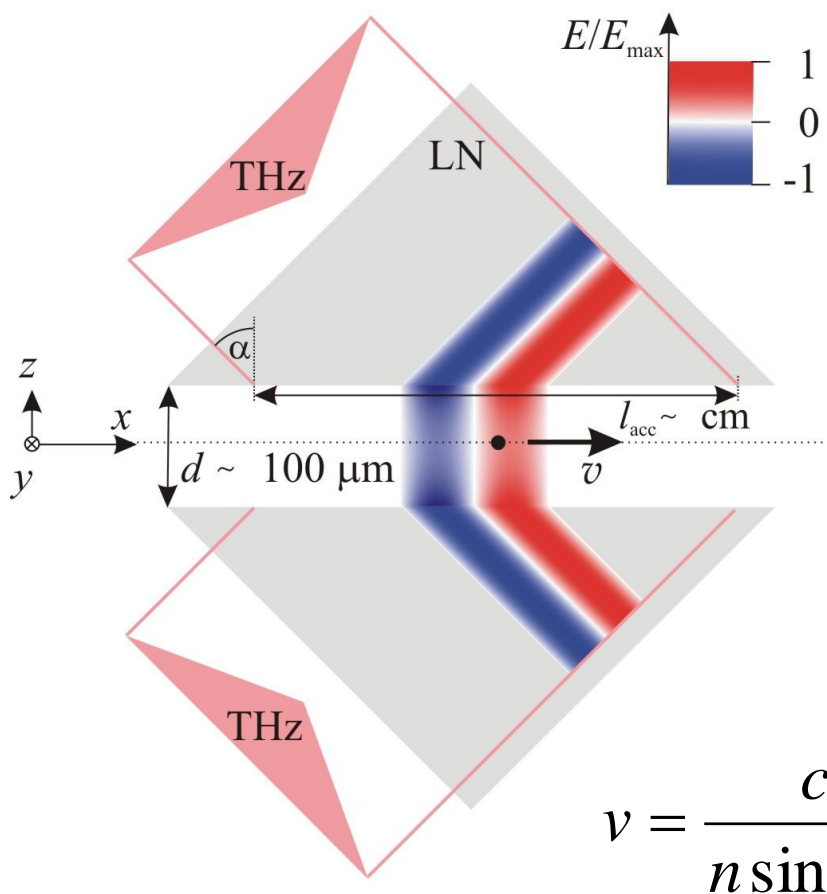
- 70 - 250 MeV/nukleon energia
- Relatív energia fluktuáció <1% (kvázi-monoenergikus nyaláb)
- Alacsony nyaláb divergencia

Jelen képességek:

- Legnagyobb közölt energia: 58 MeV (proton) /széles sáv/ vékony szilárd target *Phys. Rev. Lett.* **85**, 2945 (2000)
- Keskeny sáv (~1%), de alacsony energia (20 MeV) gáz target *Nature Physics* **8**, 95 (2012)



Az evaneszcens térrel működő THz-es gyorsító elrendezés



Elvárások az anyaggal szemben

- Nagy optikai roncsolási küszöb
- Nagy törésmutató
- Alacsony THz-es abszorpció
- Kis diszperzió

↓
Hűtött LiNbO₃ (LN)

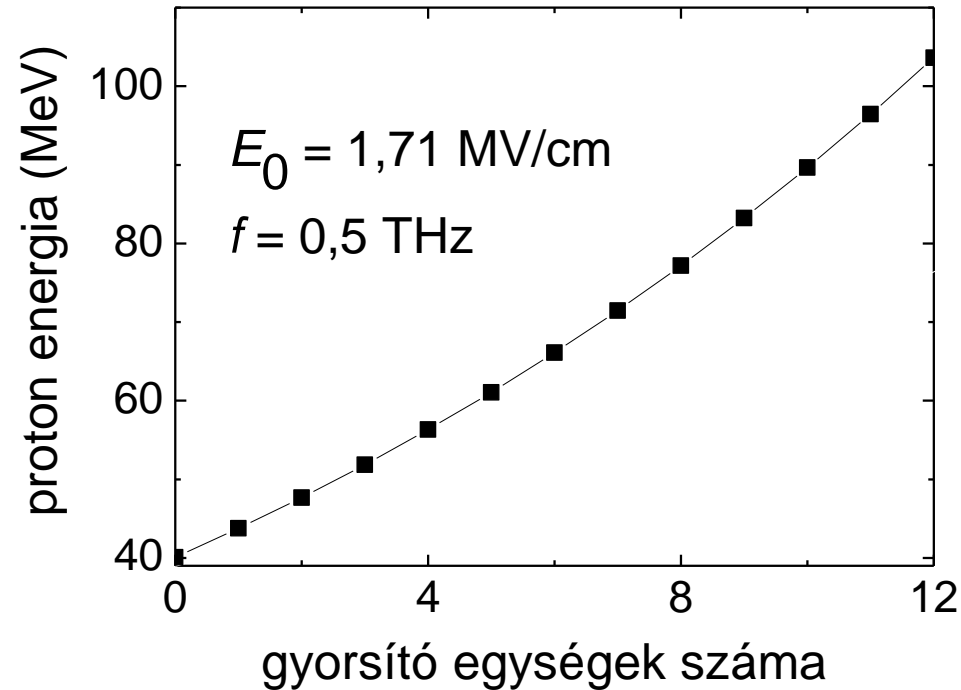
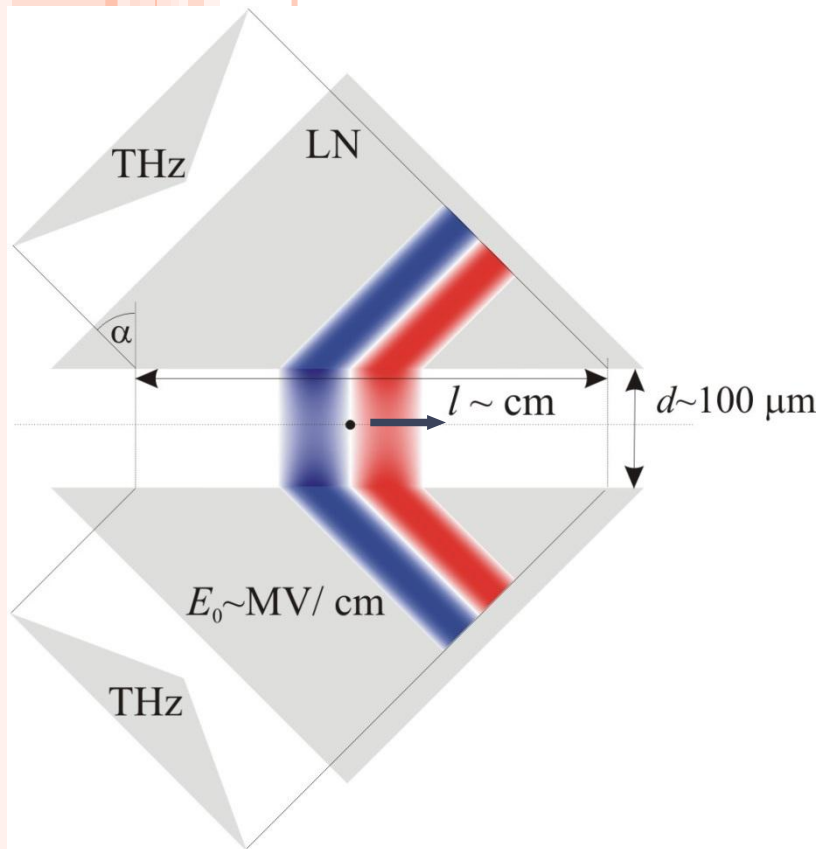
$$v = \frac{c}{n \sin(\alpha)}$$

$$\frac{c}{n} < v < c$$

Palfalvi et al., Phys. Rev. ST-AB 17, 031301 (2014)

Utógyorsítás evaneszcens THz-es térrel

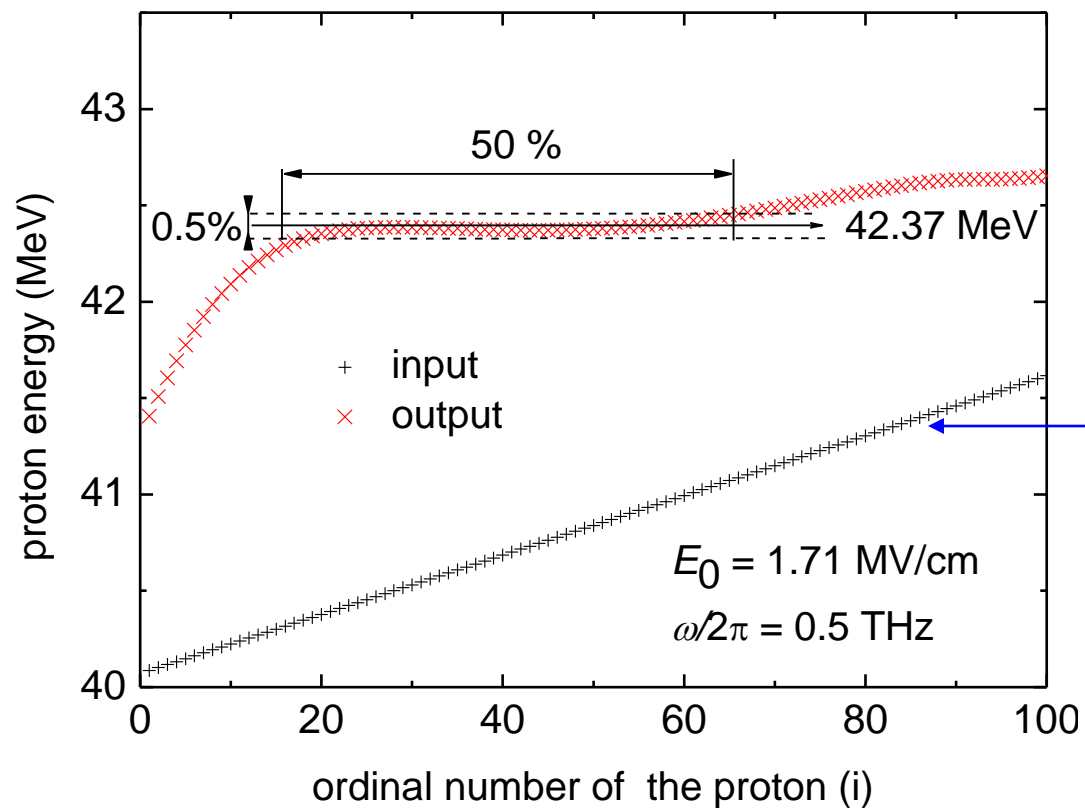
egyetlen proton gyorsítása



- Szabadalmi bejelentés (2012)

Pálfalvi et al. PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS
- ACCELERATORS AND BEAMS 17, 031301 (2014)

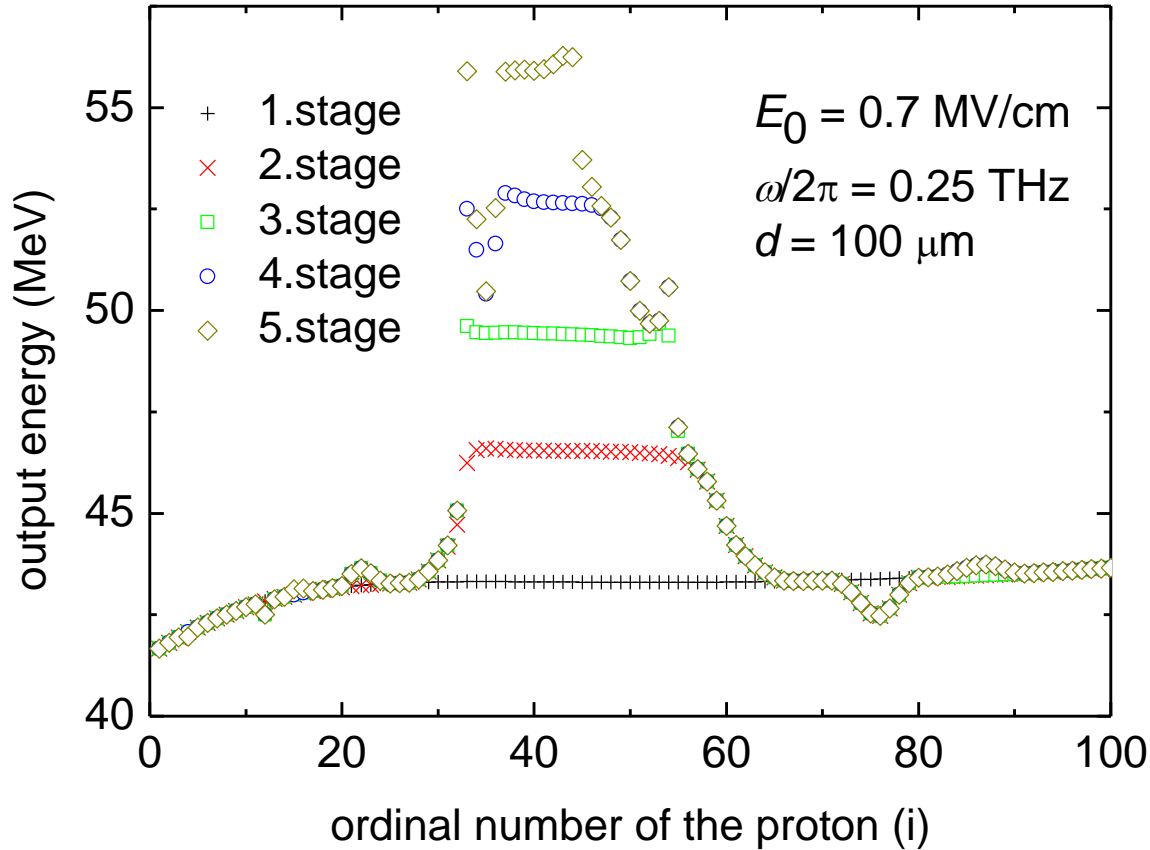
Proton csomag gyorsítása és monokromatizálása



Optimális beállítások:

$$l_{\text{acc}} = 1.25 \text{ cm}$$
$$V_{\text{THz}} = 0.2871 \cdot c$$
$$\varphi_0 = 3 \text{ rad}$$

Proton csomag gyorsítása és monokromatizálása több fokozattal 0.25 THz frekvenciával



42 → 56 MeV

Monokromatizálási hányad: 10%



Az alacsonyabb THz-es frekvencia előnyösebb!

Köszönet a kollégáknak!

Az eredmények létrejöttében meghatározó szerepet játszottak:

Hebling János
Buzády Andrea
Márton Zsuzsa
Pálfalvi László
Ollmann Zoltán
Monoszlai Balázs
Mechler Mátyás Illés

Fülöp József András
Unferdorben Márta
Lombosi Csaba
Polónyi Gyula
Tibai Zoltán
Tóth György

■

Köszönöm a figyelmet!

