



Hullámlovas elektronok

avagy:

Hogyan gyorsítsunk elemi részecskéket
lézerefénnyel plazmákban?

Tóth Csaba

*LOASIS-BELLA Program
LBNL, Berkeley, Kalifornia, USA*

*“Az atomoktól a csillagokig” előadássorozat keretében
2013. december 12, ELTE Fizikai Intézet, Budapest*

A mai menü

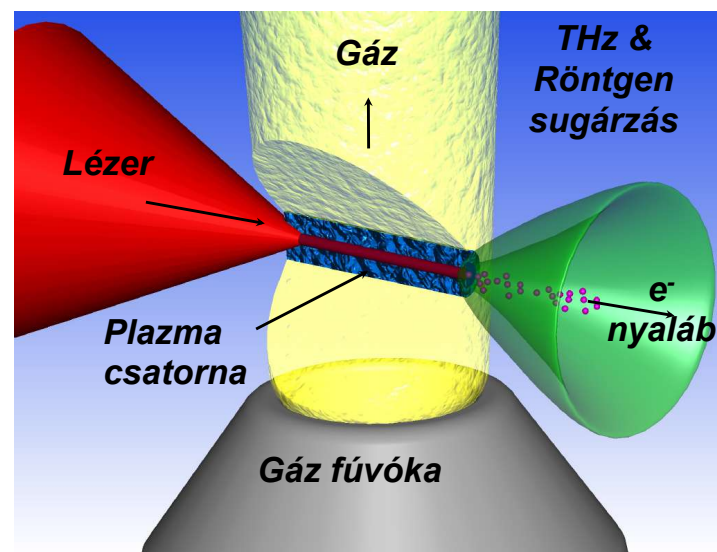


- **Lézerek-Plazmák-Gyorsítók**

motiváció és alapelvek

- **Praktikum**

*példák 3 tudományágból
és a határterületekről*



- **Miért érdemes fizikusnak lenni?**

*távlatok és dedikáció
("to be or not to be?")*

Mire jók a nagy energiákra fölgyorsított részecskék?



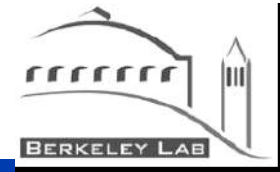
- LHC és részecskegyorsítókon alapuló fényforrások: az anyag legmélyebb titkainak kifürkészéséhez szükséges eszközök

az energia, a méret, és az időtartomány illeszkedése a vizsgálni kívánt folyamatokhoz

- Hogyan működnek a hagyományos gyorsítók?
- Paradigma váltás: 3 nagyságrend ugrás a **GRADIENS-ben!**
- Az ötlettől a megvalósításig

Tajima-Dawson ('79) → első kísérletek → monoenergetika →
→ az ügy mai állása → másra is jó! → BELLA és ELI-ALPS

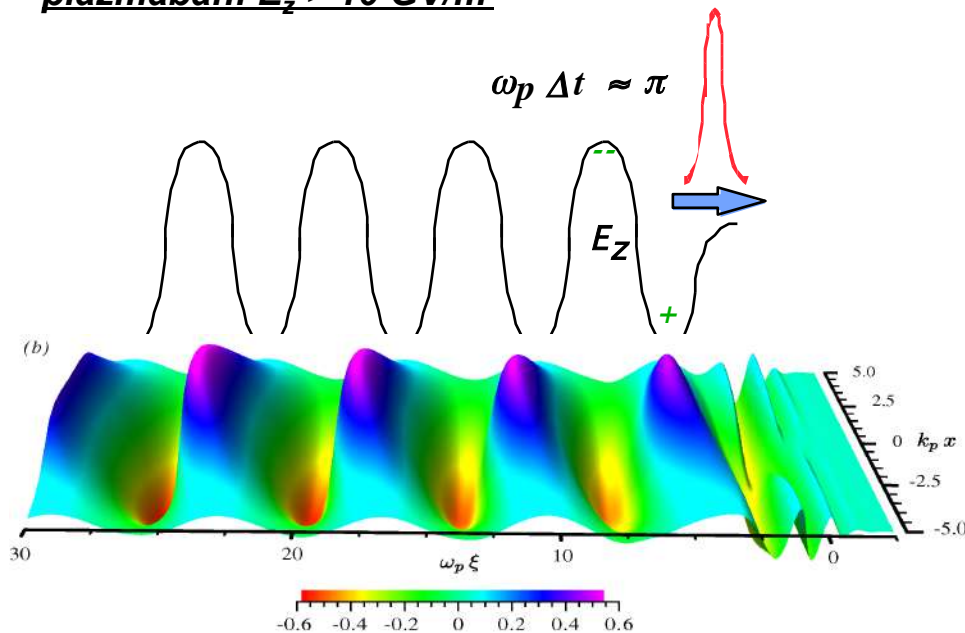
Lézeres plazmahullám gyorsítók — Alapfogalmak



$$W = e E_z L_{int}$$

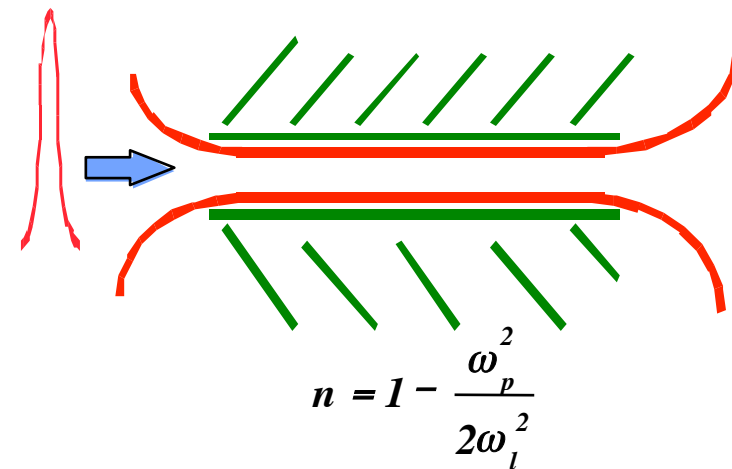
- Hagyományos RF gyorsítók gradiense: 10-100 MV/m, 100-1000 m kell 10 GeV-hez
- Lézeres plazmagyorsítók gradiense: 10-100 GV/m, 0.1-1 m elegendő 10 GeV-hez

A lézer nagy amplitudójú hullámokat kelt a plazmában: $E_z > 10$ GV/m



*T. Tajima and J.M. Dawson,
Phys. Rev. Lett. 43, 267 (1979)*

A lézernyalábot a plazma radiális törésmutató eloszlása tartja fókuszálva és növeli a kölcsönhatási hosszot, L_{int} .



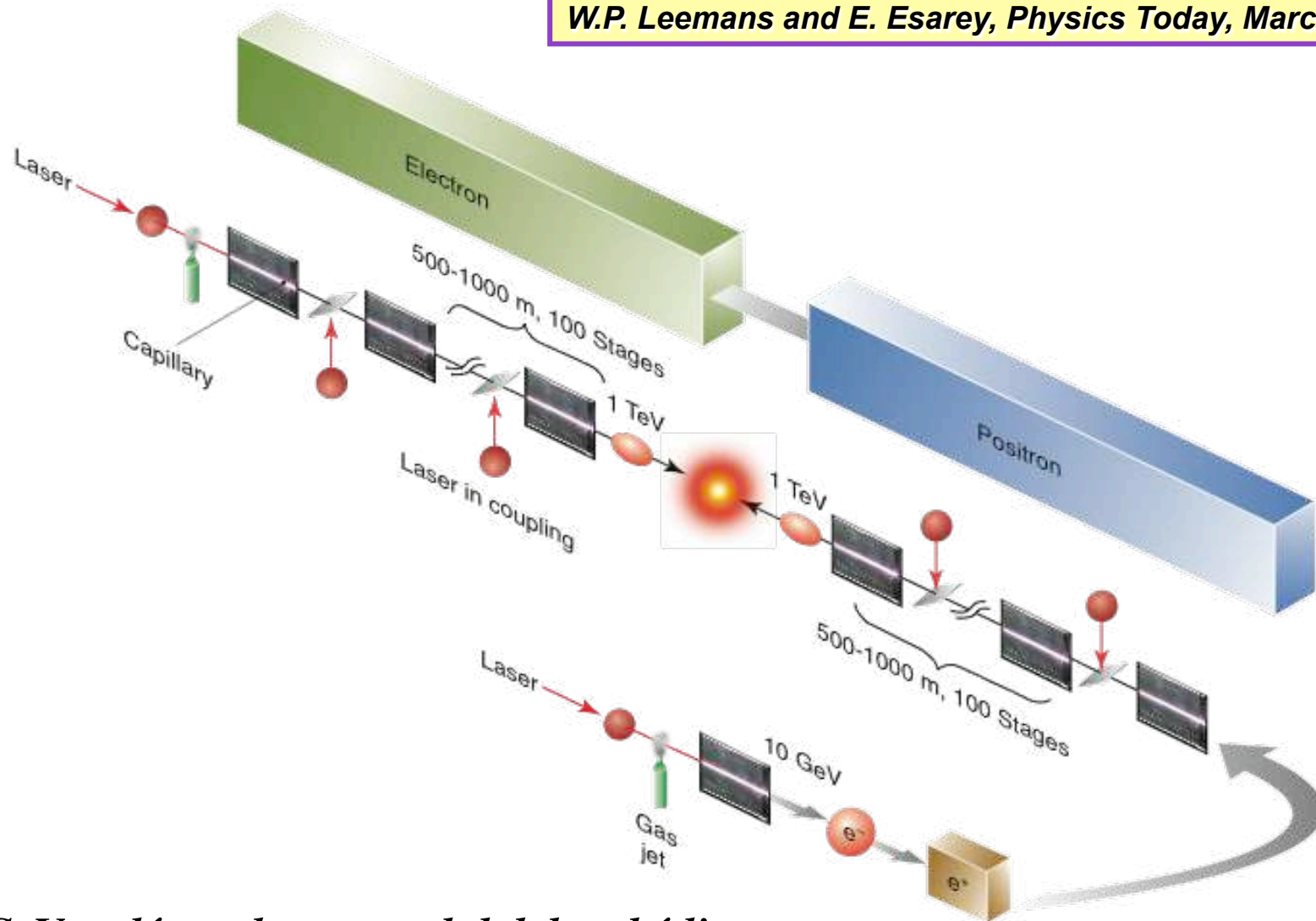
Optikai elektron injekció:

- ionizáció
- ön-modulált hullámtér
- interferáló fényimpulzusok

A lézer-plazmás gyorsításra alapuló lineáris ütköztető koncepciója

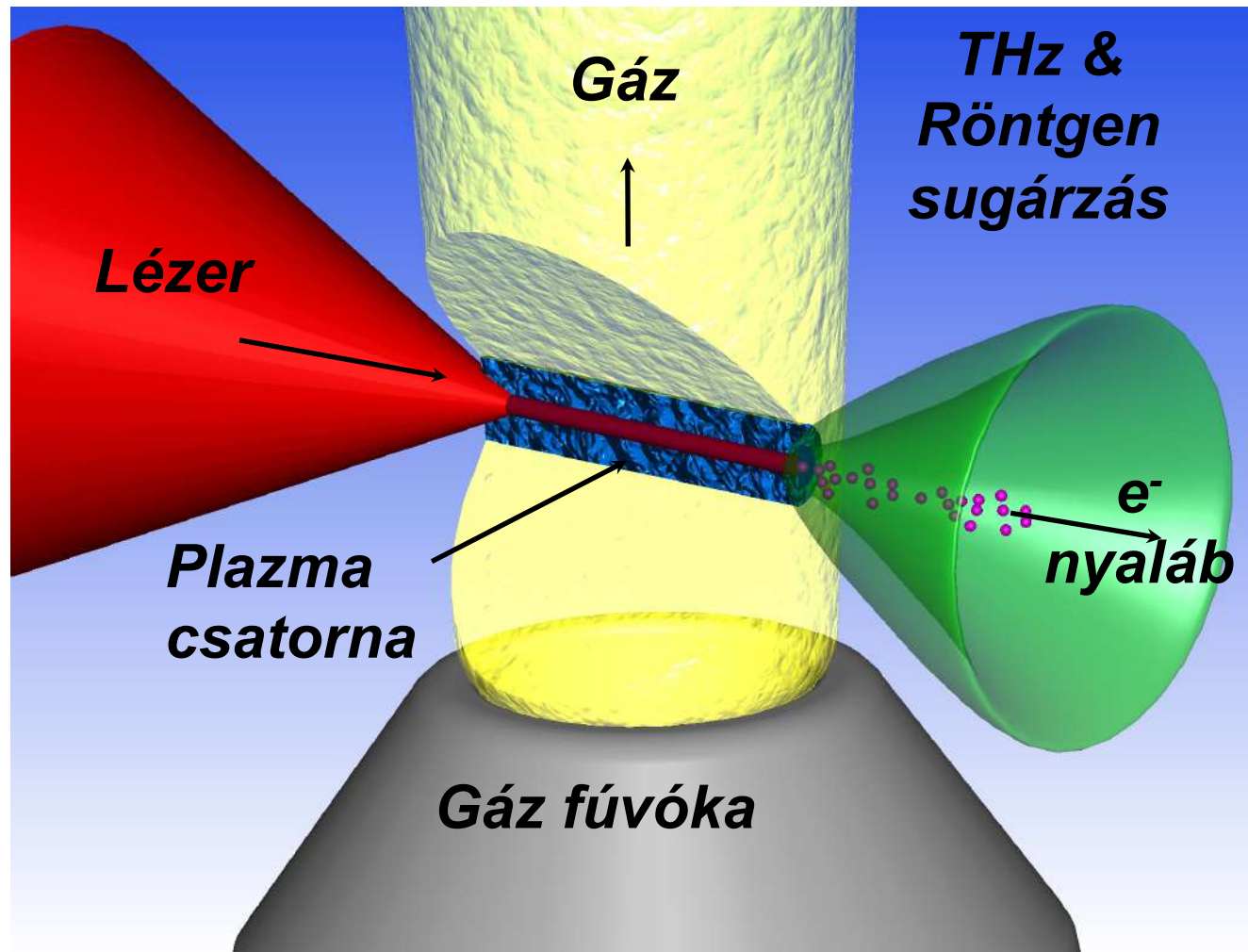


W.P. Leemans and E. Esarey, *Physics Today*, March 2009



- *10 GeV-os lézer plazma modulok kaszkádja*

A lézer-plazmás részecskegyorsítás kulcselemei



A lézer szerepe

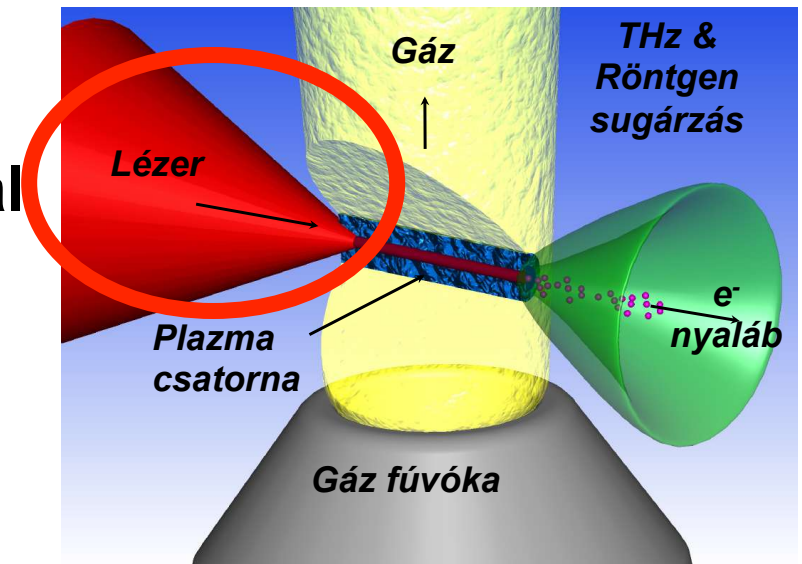


- Ultragyors, ultraintenzív kell legyen, időben és térben sűrítjük az adott energiát:

$$I = \frac{E}{\tau A}$$

- Hogyan készítsünk igen gyors impulzusokat?

- **Példák:**
Impulzus-kompresszió rácsokkal
Ultrarövid impulzusok mérése



Lézerek



- ***Egyszínű (keskeny hullámhossztartomány)***
- ***Kis nyalábszéttartású (kis divergencia)***
- ***Jól fókuszálható***
- ***Koherens (egy ütemben rezgő fényhullámok)***
- ***Példák lézerekre:***

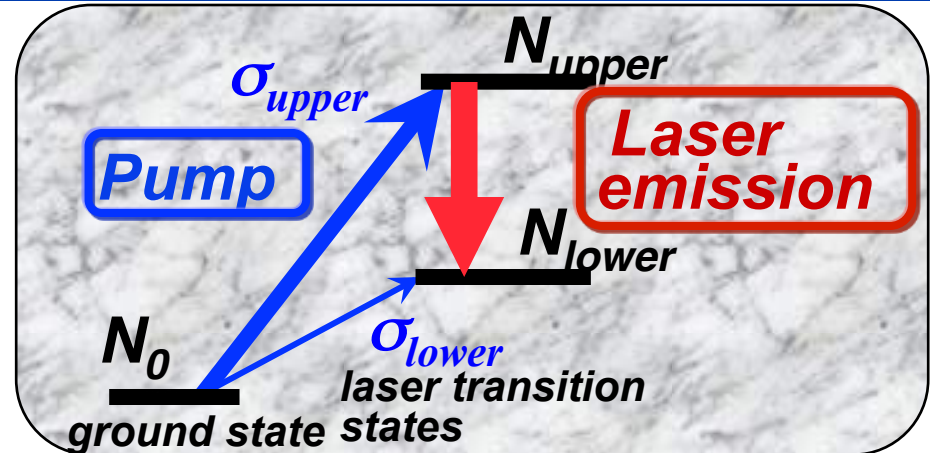
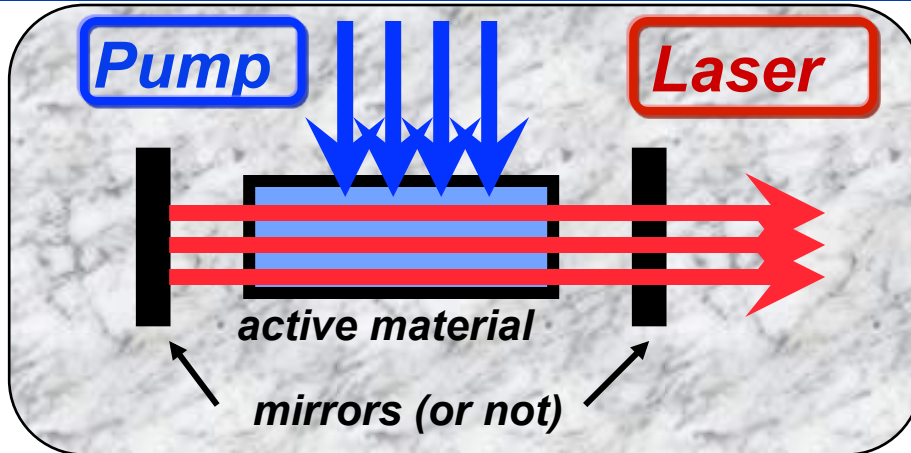
CD/DVD lejátszók

bolti vonalkód leolvasó szkennerek

orvosi és ipari vágóeszközök

száloptikás távközlési fényforrások

Lézerek — 102



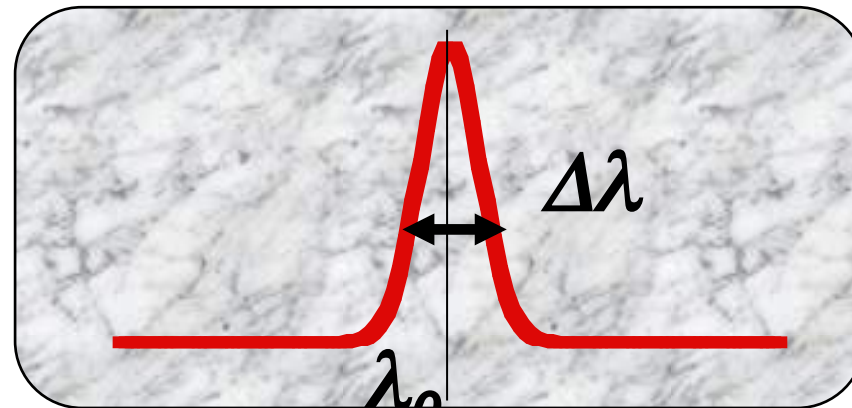
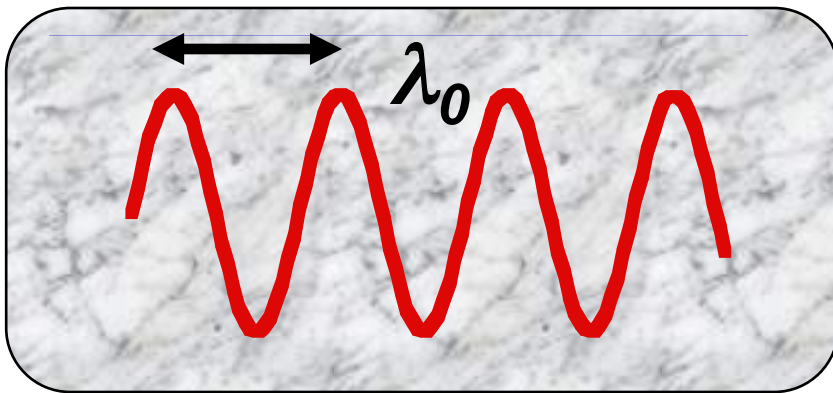
101

- **Pumpálás**
 - fényvel (villanólámpa, vagy másik lézer)
 - elektromos módszerekkel (kisülés, áram)
 - kémiai reakciókon keresztül
- **Aktív anyag**
 - szilárd (Nd:YAG, Ti:zafír - 'aktív ion' : 'hordozó közeg')
 - folyadék (festékek)
 - gáz (CO₂, KrF, HeNe, etc.)
 - félvezető (GaAs, InP, etc.)



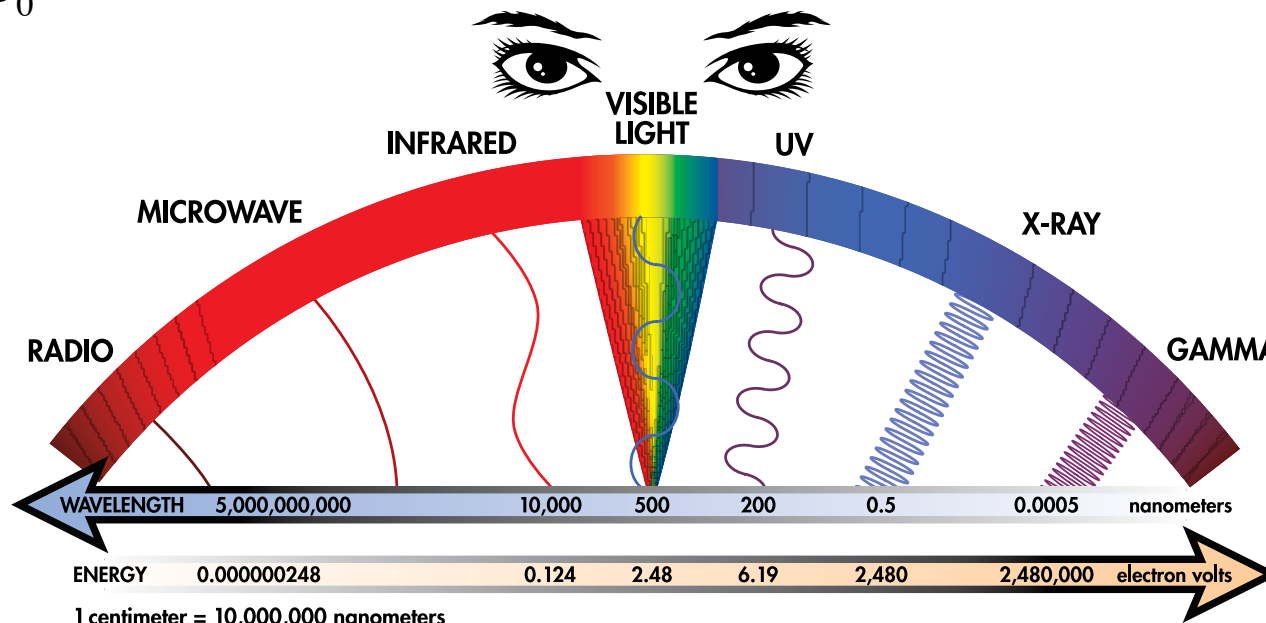
- **A gyorsításra alkalmazott lézerek fő jellemzői**
 - **Hullámhossz: λ_0 , $\Delta\lambda$**
 - **Impulzus: folytonos? pulzáló? ismétlési frekvencia?**
 - **Térbeli tulajdonságok: fókusználhatóság, divergencia**
 - **Energia, teljesítmény (csúcs és átlag)?**
 - **Megbízhatóság, biztonság, élettartam, ár?**

A fény színe: hullámhossz: λ_0 , $\Delta\lambda$



$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu} = \frac{2\pi c}{\omega_0}$$

$\Delta\lambda \equiv$ 'sáv szélesség'



A fény időtartama: folytonos vagy impulzusos

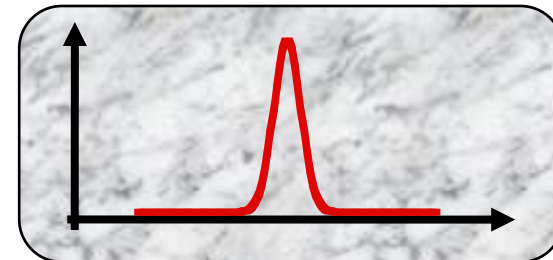


- Folytonos üzemmód

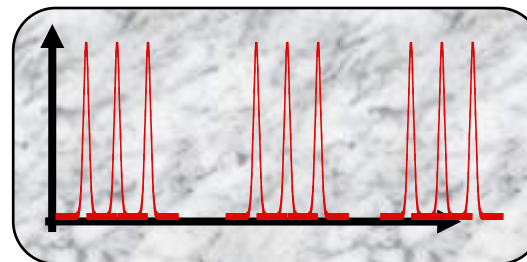


- Impulzusos üzemmód

$\sim \mu\text{s}$ $\sim \text{ns}$ $\sim \text{ps}$ $\sim \text{fs}$



- Impulzuscsomag módozat



Fényimpulzusokkal kapcsolatos kifejezések



- **‘ultrarövid’**
 - “Hát az attól függ”: viszonyítani kell a vizsgálandó jelenség lefolyási idejéhez
 - felfutási idő, impulzushossz, lecsengés
 - kontraszt, jel/zaj viszony
- **‘nagy teljesítmény’**
 - **csúcs**: pillanatnyi erősség (nemlineáris jelenségek, azonnali ionizáció)
 - W, kW, MW, **GW, TW, PW**
 - **átlag**: hatékonyság, hozam (hosszantartó folyamatok)
 - mW, **W, kW, MW**

Milyen rövid az ULTRARÖVID?



- **Referencia: a fénysebesség, 300000 km/s**
- **Egy fényimpulzus térbeli hossza, elejétől végéig:**

1 ms, milliszekundum = 300 km

⇒ gyors mechanikai zár

1 μ s, mikroszekundum = 300 m

⇒ gyors elektromos zár

1 ns, nanoszekundum = 300 mm

⇒ elektronikai áramkörök

1 ps, pikoszekundum = 300 mikron (~ papírlap)

⇒ molekula dinamika, kémiai kötések

1 fs, femtoszekundum = 300 nanométer

⇒ belső atomi folyamatok

Energia & teljesítmény



Energia: arányos a fotonok teljes számával, a rendelkezésre álló összes fény mennyiséggel

Teljesítmény: mennyire koncentrált ez az energia ... időben

Intenzitás: ... és térben

$$E = (\#) \times h\nu \quad [\text{eV}]; \quad [\text{Joule}]$$

$$P = \frac{E}{\tau} \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{s}} \right] = [\text{Watt}]$$

$$I = \frac{P}{A} \quad \left[\frac{\text{Watt}}{\text{cm}^2} \right] = [\text{W/cm}^2]$$

Példák:

500 mJ energia, $\lambda=800 \text{ nm}$ ($h\nu = 1.55 \text{ eV}$) fotonok $\# = 10^{19}$

50 fsec impulzusban:

$$P = 10^{13} \text{ W} = 10 \text{ TW}$$

6 μm átmérőben:

$$I = 3 \cdot 10^{19} \text{ W/cm}^2$$

Elektromos térerősség:

$$\vec{E}_{[\text{V/cm}]} = 27 \times \sqrt{I_{[\text{W/cm}^2]}}$$

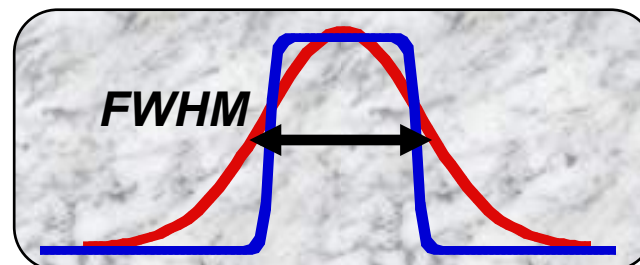
Relevancia:

- meghatározza az elérhető ill. elkerülendő nemlineáris optikai folyamatok tartományait
- részecskehozam mértéke és hatásfoka

Térbeli tulajdonságok – Gauss-nyaláb és divergencia



- **Az intenzitás eloszlása a nyalábterjedésre merőleges síkban**
 - 'top hat'
 - 'Gauss'
 - **FWHM: Full-Width-at-Half-Maximum**

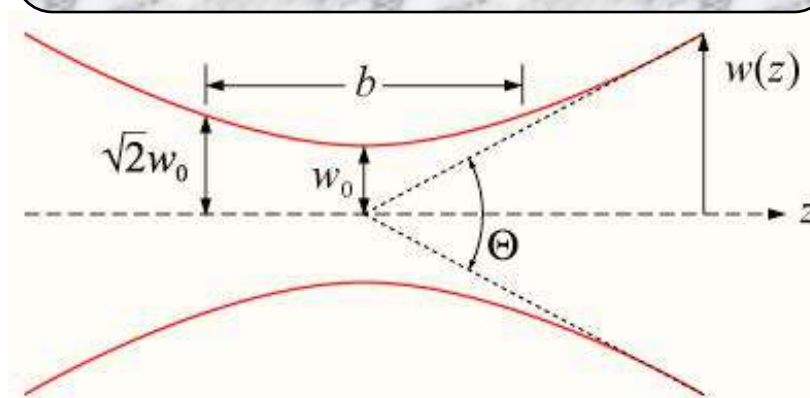


- **A divergencia határozza meg a Gauss-nyalábok fókuszálhatóságát**

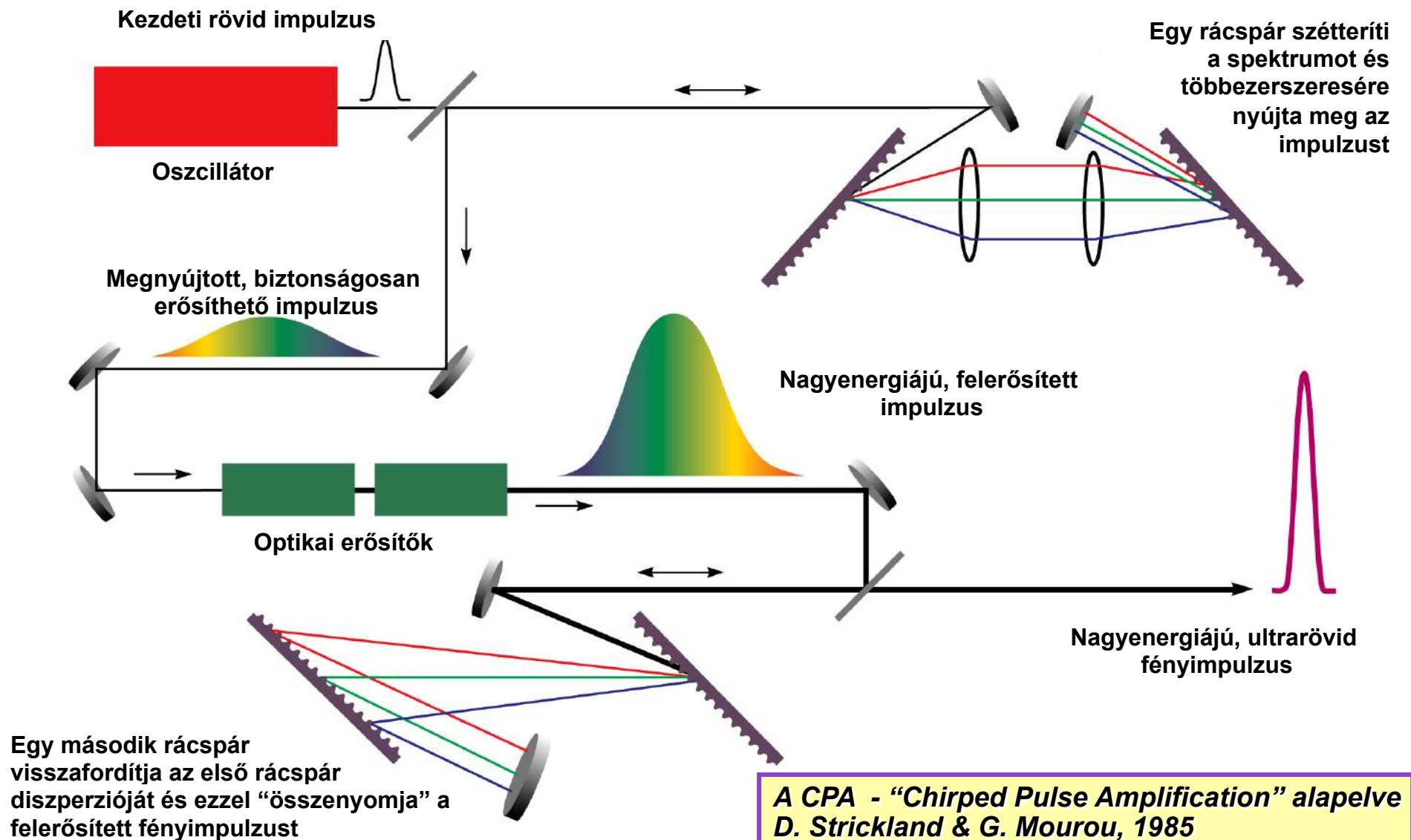
$$w^2(z) = w_0^2 + (\lambda/\pi w_0)^2 (z - z_0)^2$$
$$z_R \equiv \pi w_0^2 / \lambda, \text{ Rayleigh-tartomány}$$

$$\Theta = 2(\lambda/\pi w_0)$$
$$2z_R \equiv b, \text{ konfokális paraméter}$$

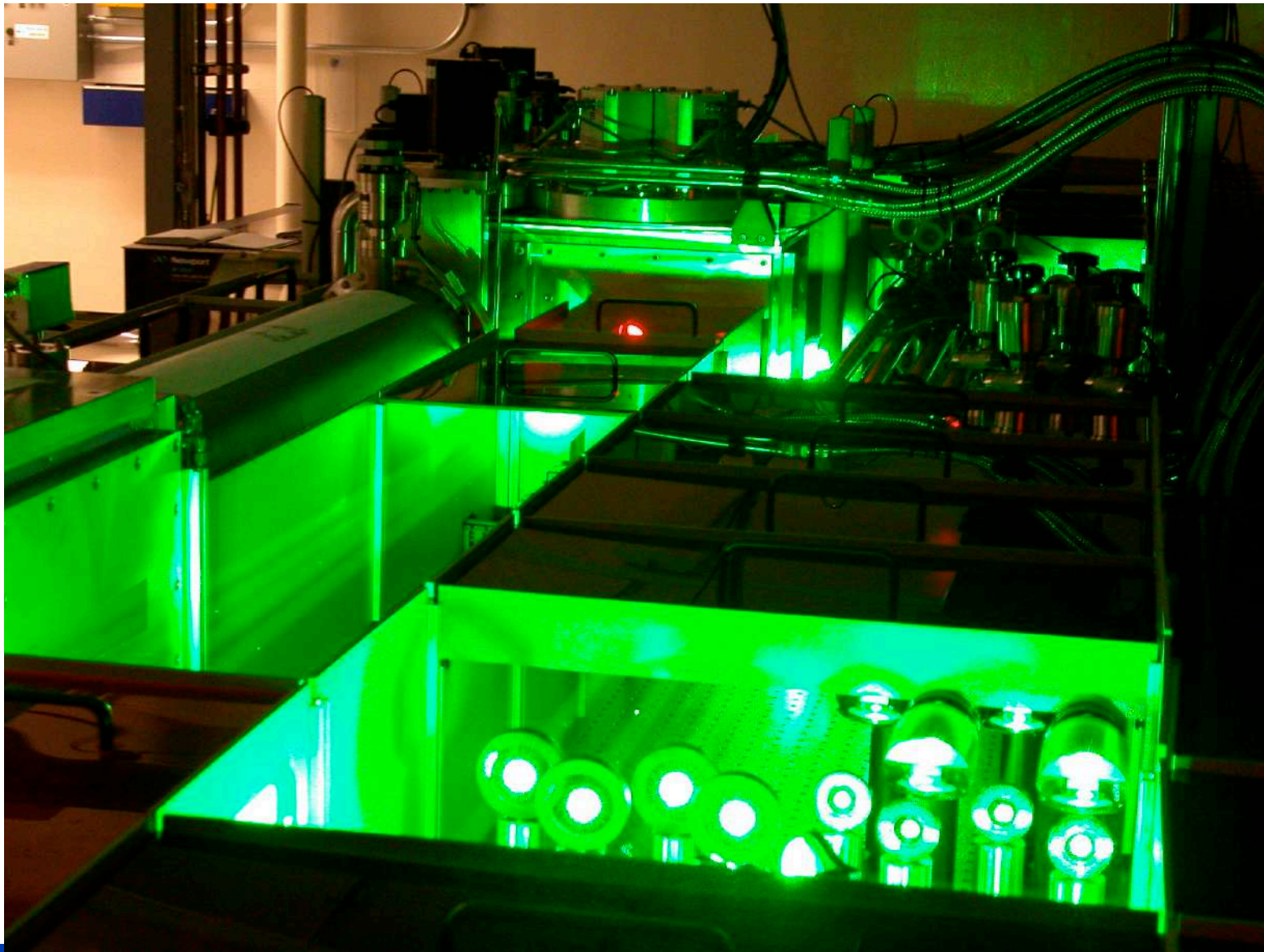
- **Relevancia:**
 - **fókuszálhatóság**
 - **illesztés a kölcsönhatási térfogathoz, átfedés hatásfoka**
 - **hullámvezetés**



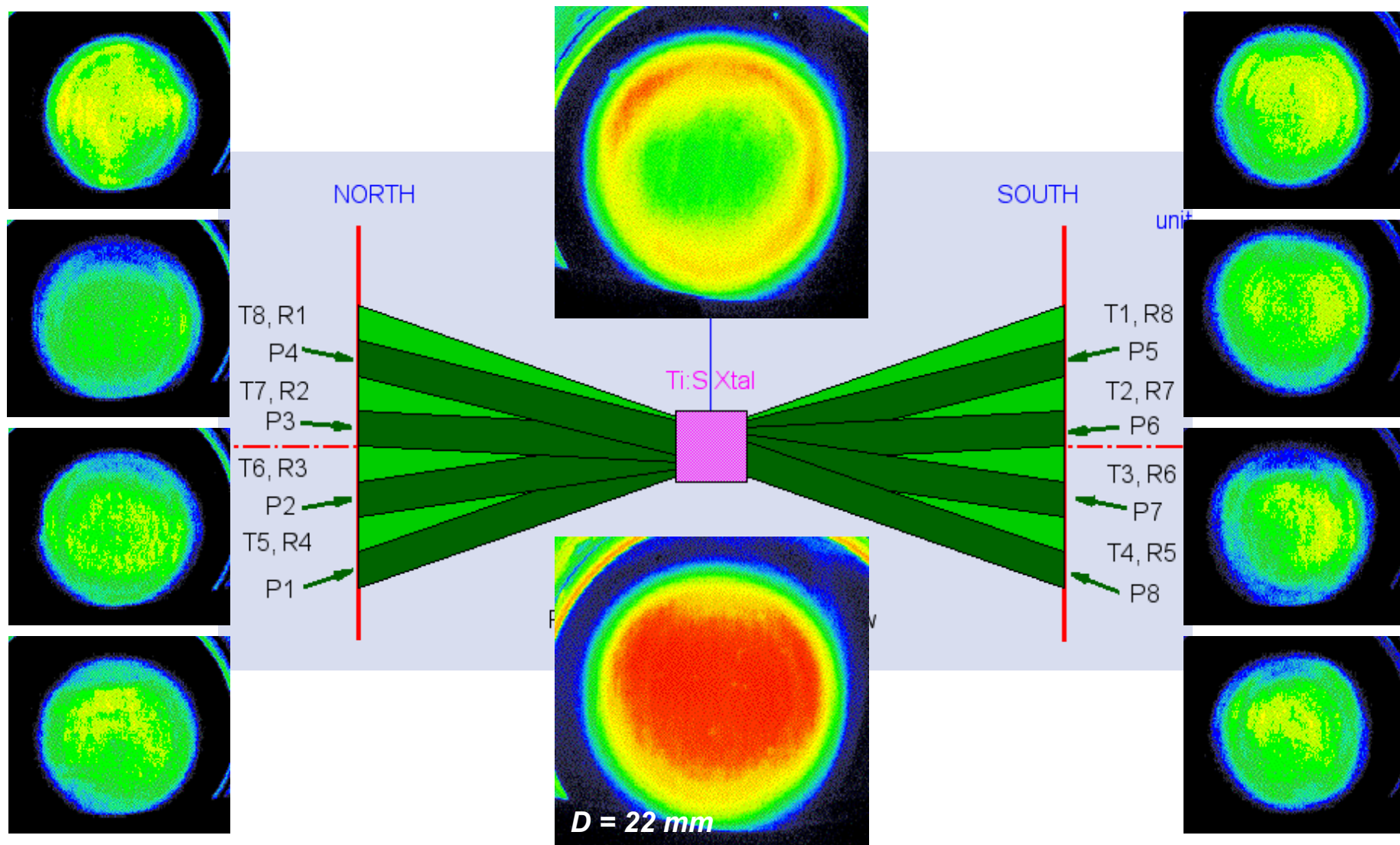
A csörpölt impulzusú fényerősítés lehetőséget nyújt (ön)roncsolás mentes optikai erősítésre



Lézer a laboratóriumban - 100 TW csúcsteljesítményű Ti:zafír lézer



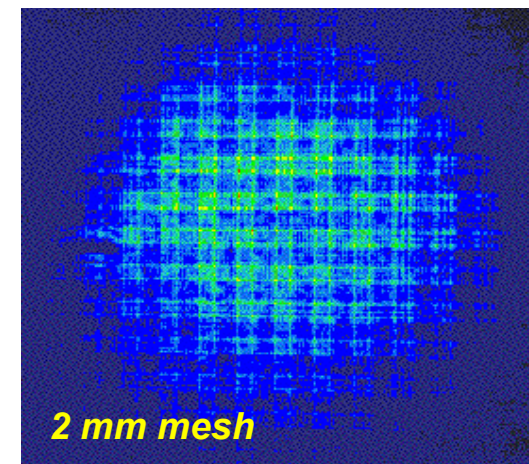
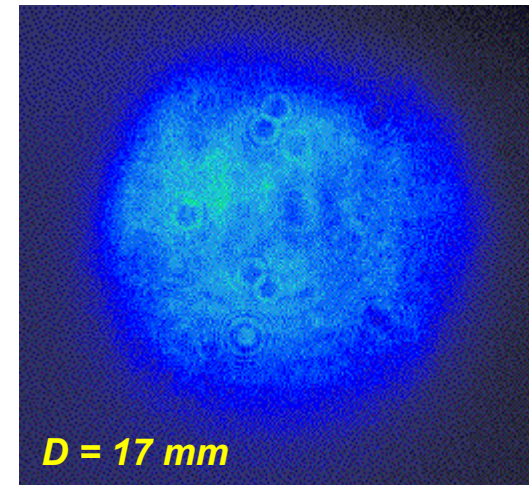
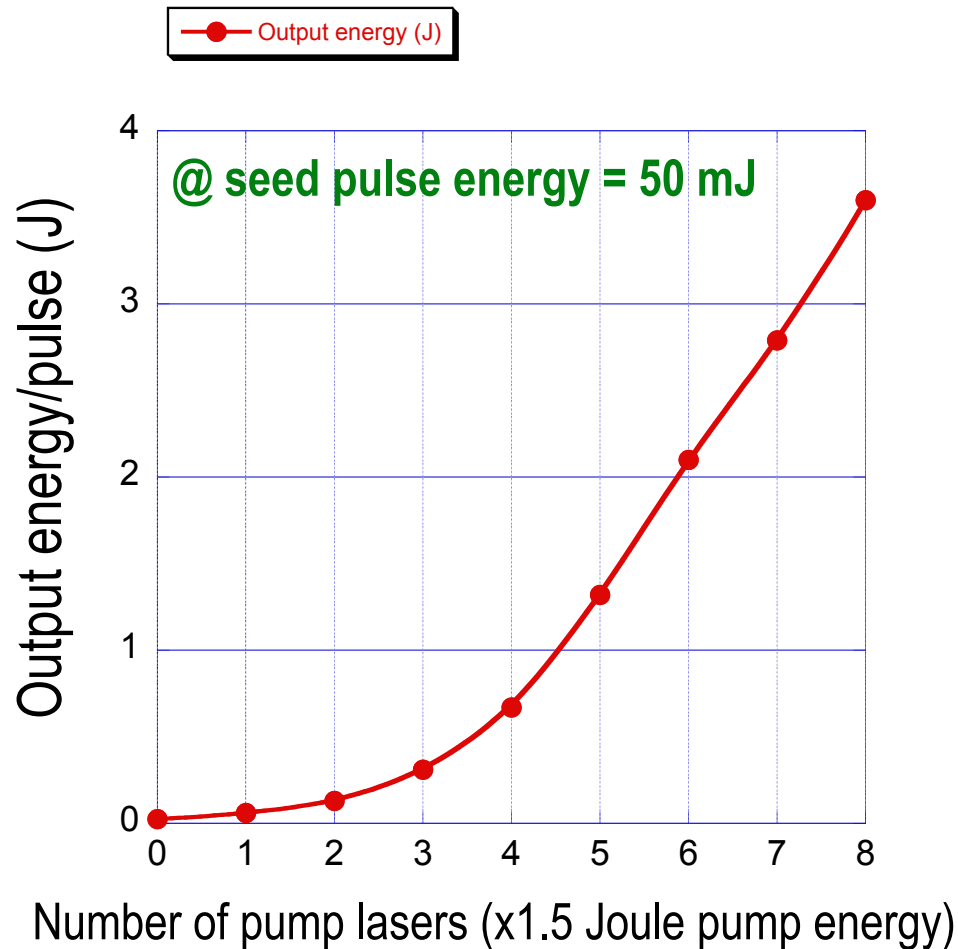
A pumpáló nyalábok profilja és az erősítő kristály fluoreszkálása



Erősítés és a kimenő nyaláb intenzitáseloszlása @ 800 nm



T-Rex @ 2.9 J

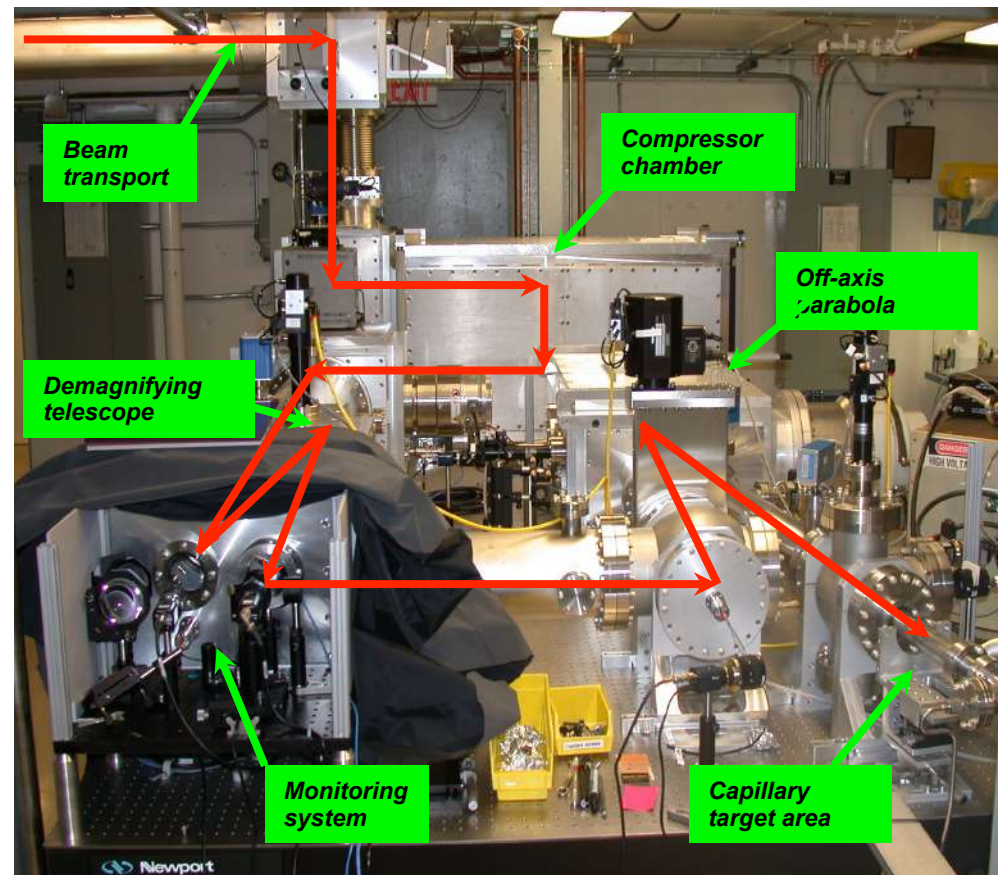


Impulzusösszenyomás és fókuszálás



12" átmérőjű rácspár: 1480 l/mm

- Az összenyomott impulzusban lévő energia, E :
1.6 J (2.3 J, max)
- Az összenyomott impulzus hossza, τ :
40 fs (38 fs, min)
- Csúcsteljesítmény, P :
40 TW (60 TW, max)
- A fókusz folt mérete, σ :
26 μm x 33 μm (22 μm , min)
- Intenzitás a fókuszbán, I :
3 x 10¹⁸ W/cm²



Fókuszáló parabola, OAP $f=2$ m

A csörpölt impulzusú erősítés “örökletes” speciális problémái



- Eredendő aszimetriák a ‘nyújtás-összenyomás’ geometriájában
- Az erősítő anyag (Ti:zafír) és az optikai elemek kompenzál(hat)atlan diszperziója
- Megoldás: a magasabb-rendű diszperziós tagok kontrolja és egymás elleni kijátszása (‘divide et impera’)
 - passzív: ab initio, számítógépes sugárkövető dizájn és tervezés, tolerancia analízis
 - aktív: fázis-moduláció akuszto-optikai, vagy elektro-optikai berendezésekkel (DAZZLER)
 - nagy impulzus energiájú rendszerekben: az empirikus és előre-tervezett módszerek iteratív kombinációja: kísérletek a rács-pár távolság szkennelésével, miközben igen pontosan mérjük az impulzusok alakváltozásait

Optikai impulzusok magasabbrendű fázisai — Definíciók



$$\varphi(\omega) = \varphi_0 + \underbrace{\frac{\partial\varphi}{\partial\omega}\bigg|_{\omega_0}}_{\text{time delay}} (\omega - \omega_0) + \underbrace{\frac{1}{2!} \frac{\partial^2\varphi}{\partial\omega^2}\bigg|_{\omega_0}}_{\text{'GDD'}} (\omega - \omega_0)^2 + \underbrace{\frac{1}{3!} \frac{\partial^3\varphi}{\partial\omega^3}\bigg|_{\omega_0}}_{\text{'cubic'}} (\omega - \omega_0)^3 + \underbrace{\frac{1}{4!} \frac{\partial^4\varphi}{\partial\omega^4}\bigg|_{\omega_0}}_{\text{'quartic'}} + \dots$$

time delay

'GDD'

'cubic'

'quartic'

idő késés

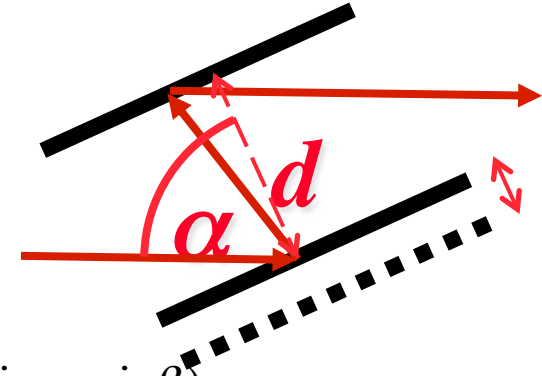
csoportsebesség
diszperzió

köbös
diszperzió

negyedrendű
diszperzió

- **Valós anyagokban ezek az együtthatók erősen összefüggnek egymással**
- **Egymásól függetlenül legtöbbször nem szabályozhatóak**
- **A magasabb rendű tagok leginkább a spektrum széleire érzékenyek**

Magasabb rendű fázisok — A rácspár példája



$$\left. \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \omega^2} \right|_{\omega_0} = \text{GDD} = -d \frac{N^2 \lambda^3}{2\pi c^2} \cdot \frac{1}{\cos^3(\beta)}$$

$$\left. \frac{\partial^3 \varphi}{\partial \omega^3} \right|_{\omega_0} = \text{'cubic'} = 3d \frac{N^2 \lambda^4}{4\pi^2 c^3} \cdot \frac{(1 + \sin \alpha \cdot \sin \beta)}{\cos^5 \beta} = -\frac{3\lambda}{2\pi c} \cdot \frac{(1 + \sin \alpha \cdot \sin \beta)}{\cos^2 \beta} \cdot (\text{GDD})$$

$$\left. \frac{\partial^4 \varphi}{\partial \omega^4} \right|_{\omega_0} = \text{'quartic'} = \frac{3\lambda^2}{4\pi^2 c^2} \cdot \frac{[\cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta - 5(1 + \sin \alpha \cdot \sin \beta)^2]}{\cos^4 \beta} \cdot (\text{GDD})$$

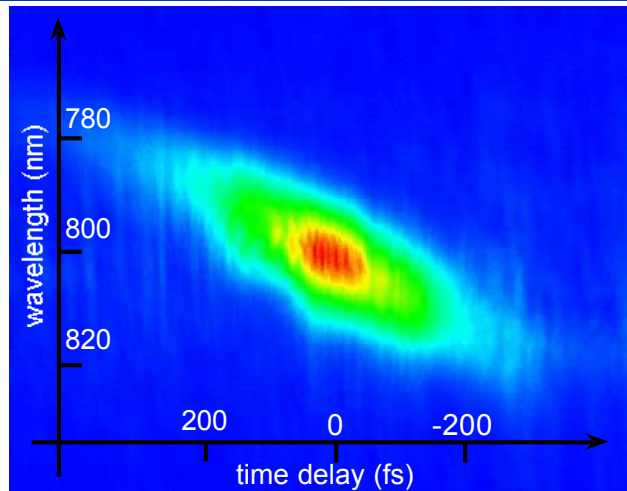
$$\text{'slope of GDD'} = \frac{\partial(\text{GDD})}{\partial d} = -\frac{N^2 \lambda^3}{2\pi c^2} \cdot \frac{1}{\cos^3(\beta)} = -2550 \text{ fs}^2/\text{mm}$$

$$\text{'slope of cubic phase'} = \frac{\partial(\text{cubic})}{\partial d} = 3 \frac{N^2 \lambda^4}{4\pi^2 c^3} \cdot \frac{(1 + \sin \alpha \cdot \sin \beta)}{\cos^5 \beta} = +5100 \text{ fs}^3/\text{mm}$$

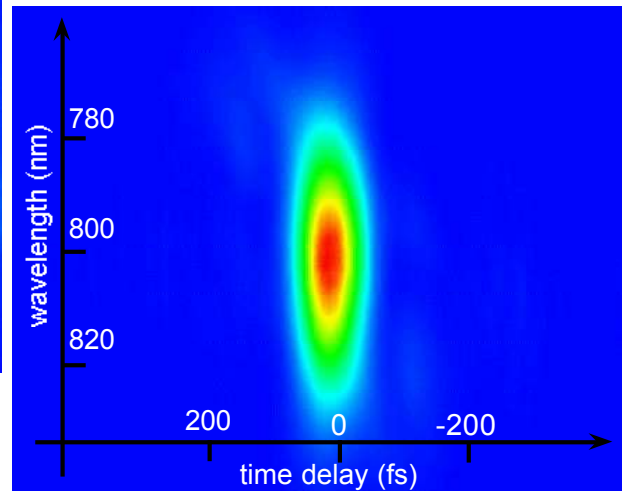
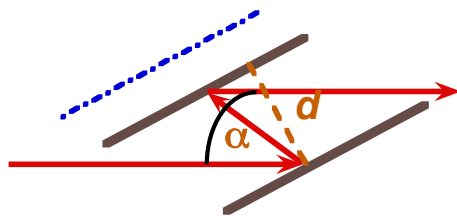
α = angle of incidence = 51 deg
 β = angle of diffraction = 24 deg
 d = grating separation = 330 mm
 N = groove density = 1480 mm⁻¹

e.g. Fiorini et al., IEEE J. QE-30, 1662, (1994); Backus et al., Rev. Sci. Instrum. 69, 1207 (1998)

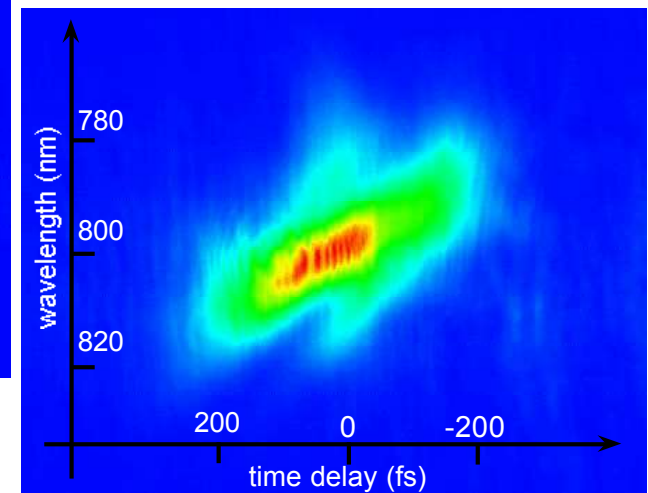
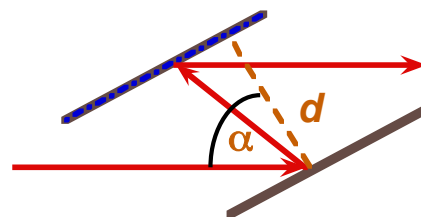
Impulzus diagnosztika — Polarizációs kapuzás (FROG)



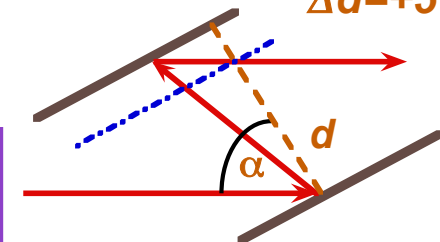
$\Delta d = -750 \mu\text{m}$



$\Delta d = +000 \mu\text{m}$



$\Delta d = +510 \mu\text{m}$



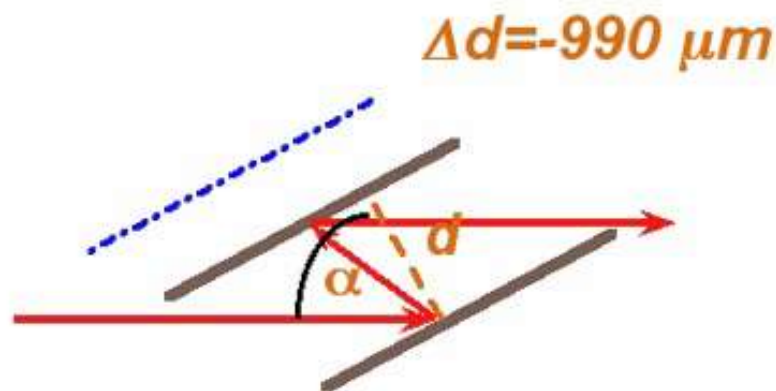
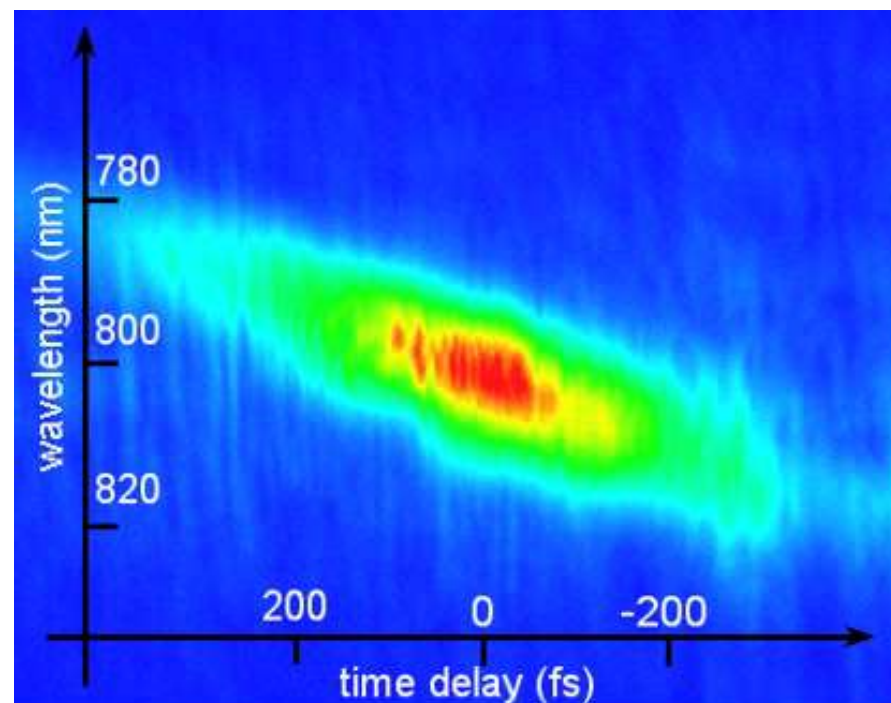
R. Trebino and D. J. Kane, *J. Opt. Soc. Amer. A* 10, 1101 (1993)
UCSD work: Fittinghoff et al., *IEEE JSTQE-4*, 430, (1998)
Tóth et al., *Ultrafast Phenomena XI*, 109, (1998)

Commercial version: Positive Light-Newport, PG-FROG - Frequency Resolved Optical Gating

Impulzus diagnosztika — Polarizációs kapuzás (FROG) - videó



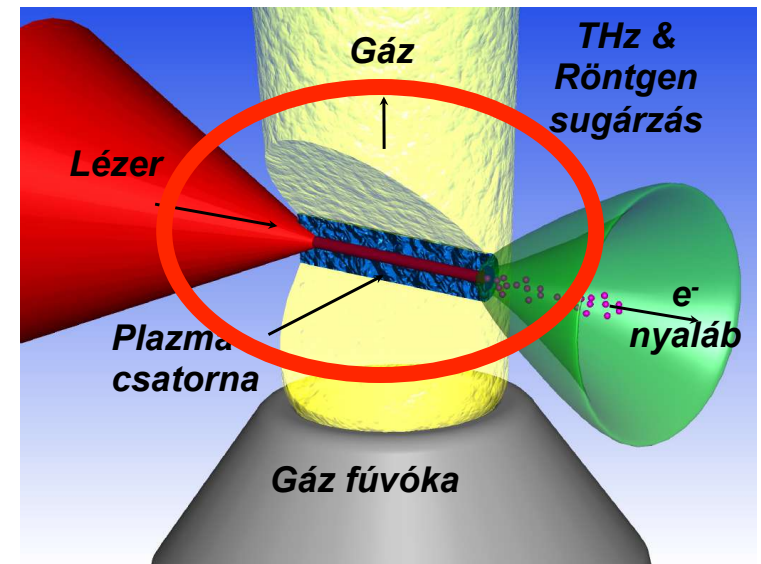
Az impulzus alakok nemlineáris optikai diagnosztikája iteratív optimalással kombinálva vezet a legjobban “összenyomott” impulzusok kísérleti megvalósításához



A plazma szerepe



- Teljesen ionizált, összességében semleges, rezgésre és hullámterjedésre alkalmas közeg
- Kulcs paraméterek és folyamatok:
 - plazmafrekvencia
 - elektromos térerősség oszcilláló plazmában
 - plazma-csatorna, mint optikai hullámvezető



Plazma



- *a negyedik halmazállapot*
- *ionok és elektronok keveréke*
- *példák plazmákra:*

a Nap belseje

neon-cső

hegesztő ívkisülés

villámlás

(Nem a biológiai vérplazma ! :-))

Plazmában haladó erős fényimpulzus hatására létrejött plazma hullámok



Tajima & Dawson, *Phys. Rev. Lett.* (1979); Esarey, Schroeder, Leemans, *Rev. Mod. Phys.* (2009)

Rövid lézerimpulzus hullámokat kelt elektronokból és ionokból álló plazmában

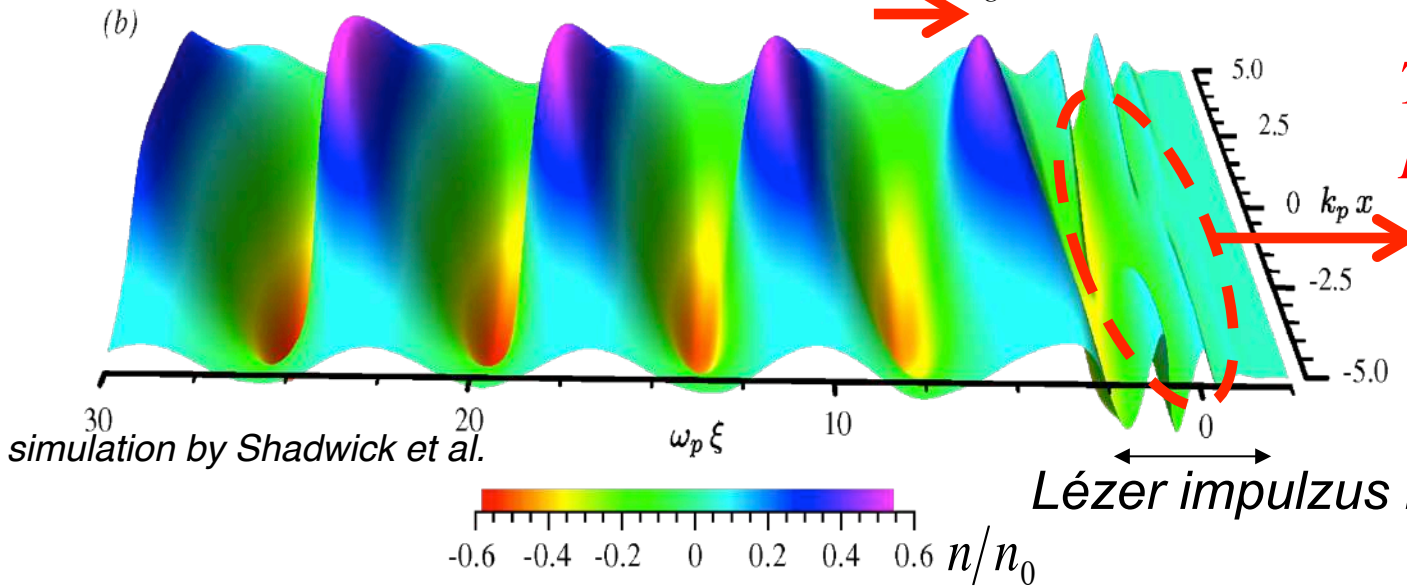
$$\underbrace{\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \omega_p^2 \right) \frac{n}{n_0}}_{\text{Plazma hullám: az elektron sűrűség perturbációja}} = \underbrace{c^2 \nabla^2 \frac{1}{4} \left(\frac{eE_{\text{Laser}}}{mc^2 \omega} \right)^2}_{\text{A lézerimpulzus ponderomotoros ereje ("sugárnyomás")}}$$

Plazma hullám: az elektron sűrűség perturbációja

A lézerimpulzus ponderomotoros ereje ("sugárnyomás")

E: 10 – 100 GV/m

$$V_{\text{wave}} \approx V_g \approx c$$



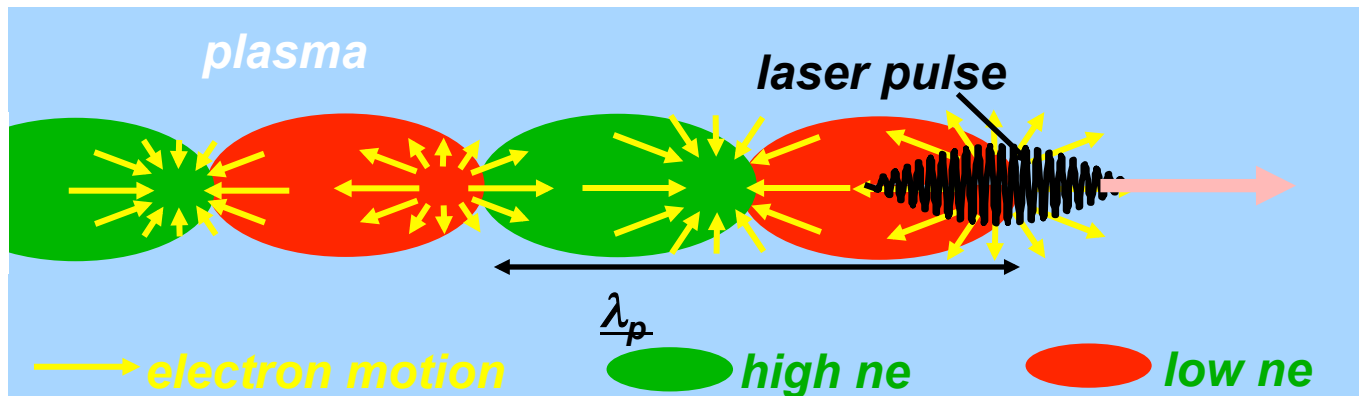
*Ti:zafír lézer
I ~ 10¹⁸ W/cm²*

Lézer impulzus hossz ~ λ_p/c ~ 10 fs

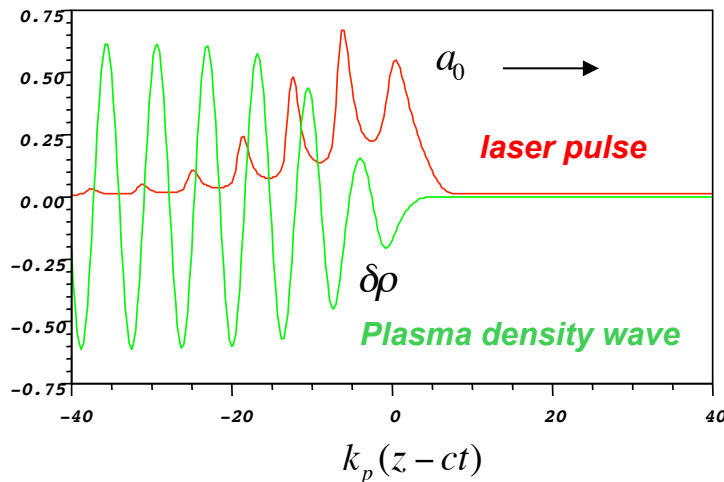
Standard és ön-modulált lézer plazma gyorsítási tartományok



- **Standard (LWFA):** a lézerimpulzus hossza illeszkedik a plazmarezgések periódusához



- **Ön-modulált (SM-LWFA):** a lézerimpulzus hosszabb a plazmarezgések periódusánál



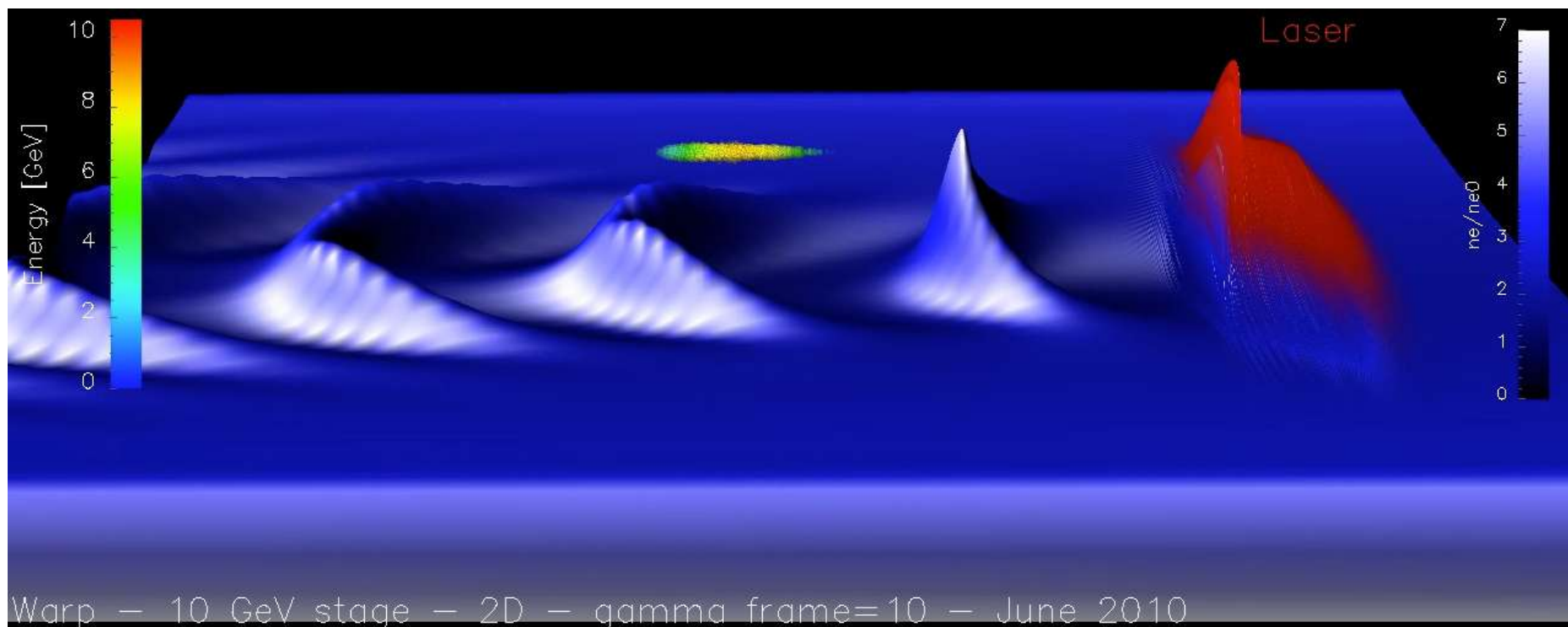
$$E_z > 10 \text{ GV/m}$$

LWFA: optikai hullámvezetés is kell

SM-LWFA: relativisztikus hullámvezetés automatikus is lehet

Sprangle et al. (92); Antonsen, Mora (92); Andreev et al. (92); Esarey et al. (94); Mori et al. (94)

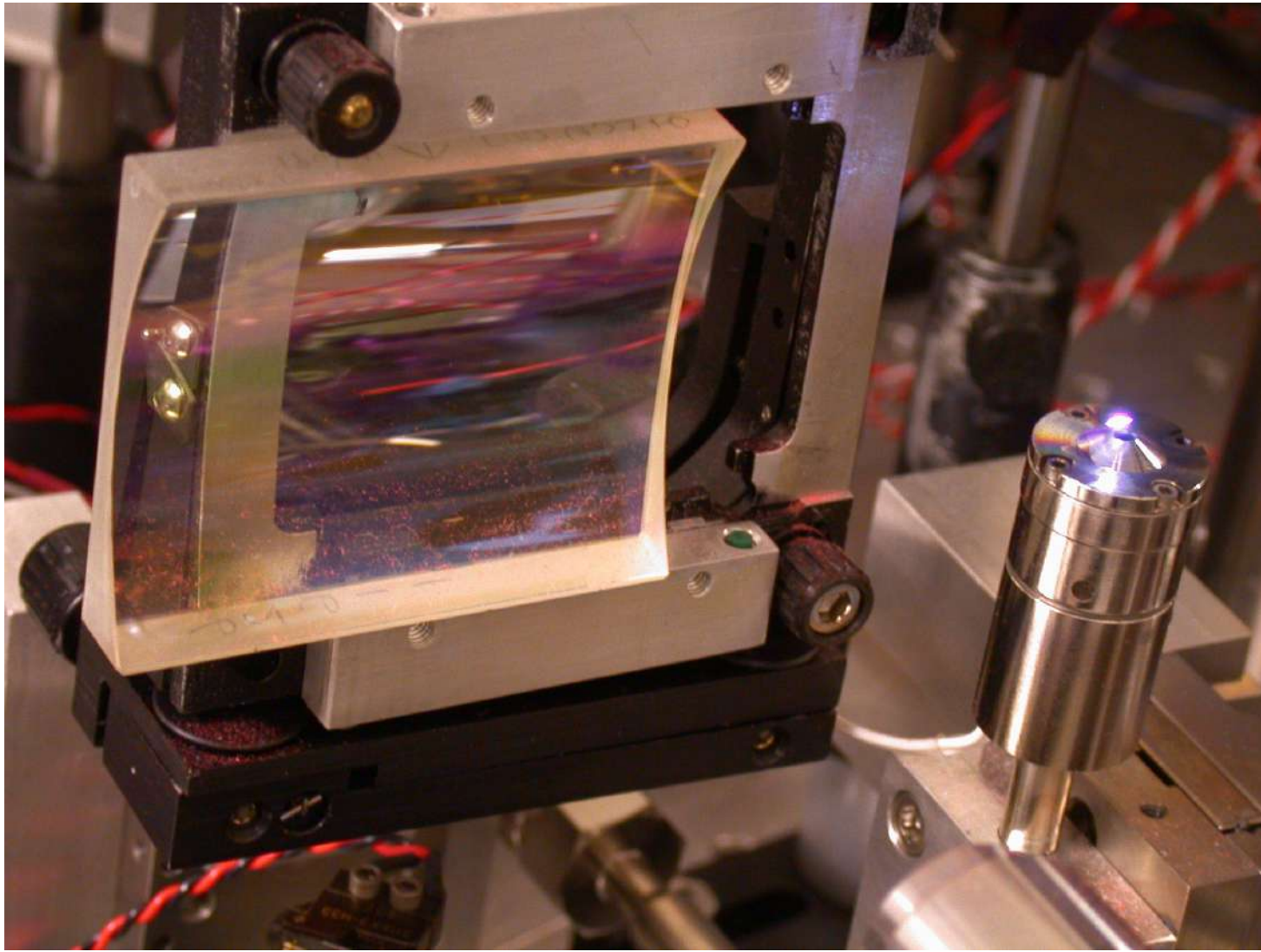
Számítógépes modellezés segít megérteni az egymással szorosan csatolt folyamatokat



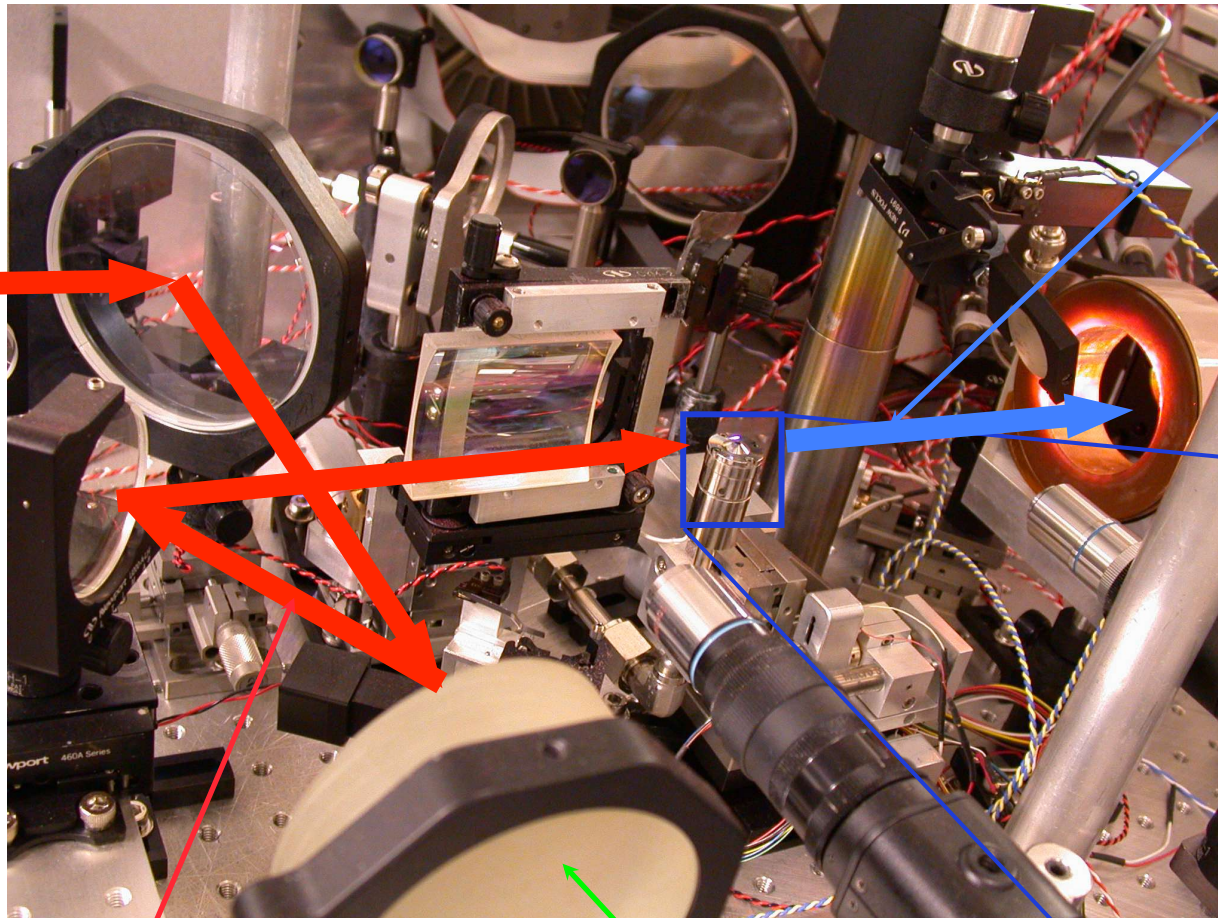
“Elektronok” gyorsulnak a hullám átcsapó homlokkfelületén – feltéve, hogy jól időzíteneek



Lézeres plazma gyorsító — H₂-gáz fúvóka a plazma szikrával

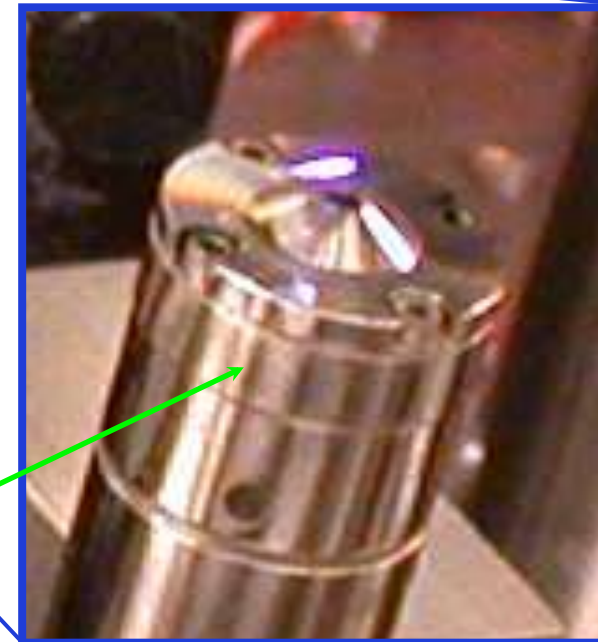


Lézerrel keltett szikra-kisülés a kísérleti vákuum kamrában



elektron nyaláb

5 mm



*gerjesztő
lézer nyaláb*

*parabola
tükör*

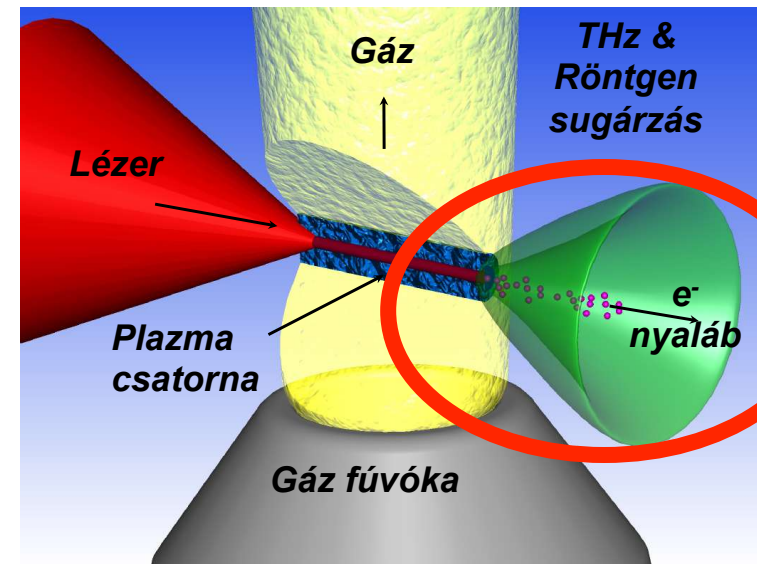
*H₂-gáz
fúvóka*

A gyorsított elektronok szerepe



- **Elektronnyaláb tulajdonságai:**
 - töltésmennyiség, Q
 - sebesség, γ
 - energia(sebesség)eloszlás, $\Delta \gamma$
 - divergencia \rightarrow emittancia

- **Példa:**
 - elektron energia spektrométer



Elektron nyalábok



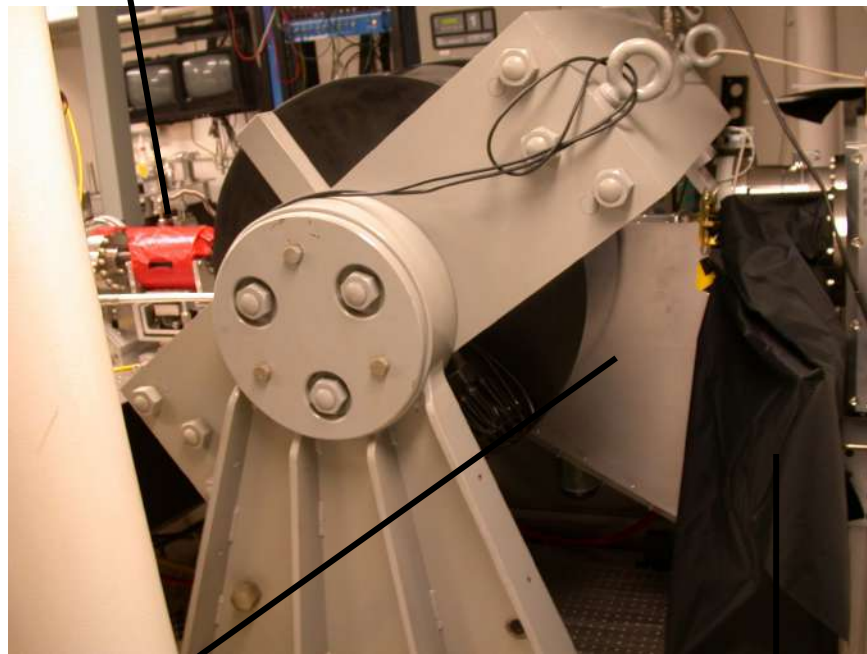
- ***Elektron nyalábok: az anyagból kiszabadult negatív töltésű részecskék árama - béta sugárzás***
- ***Példák elektron nyalábokra:***
 - TV képcsövek***
 - oszilloszkópok***
 - ciklotron gyorsítók***

GeV mágneses elektron spektrométer



- Maximum resolving energy: ~ 1.1 GeV
- Large momentum acceptance (factor 25)
- High resolution (bottom: $< 1\%$, forward: $2\sim 4\%$)

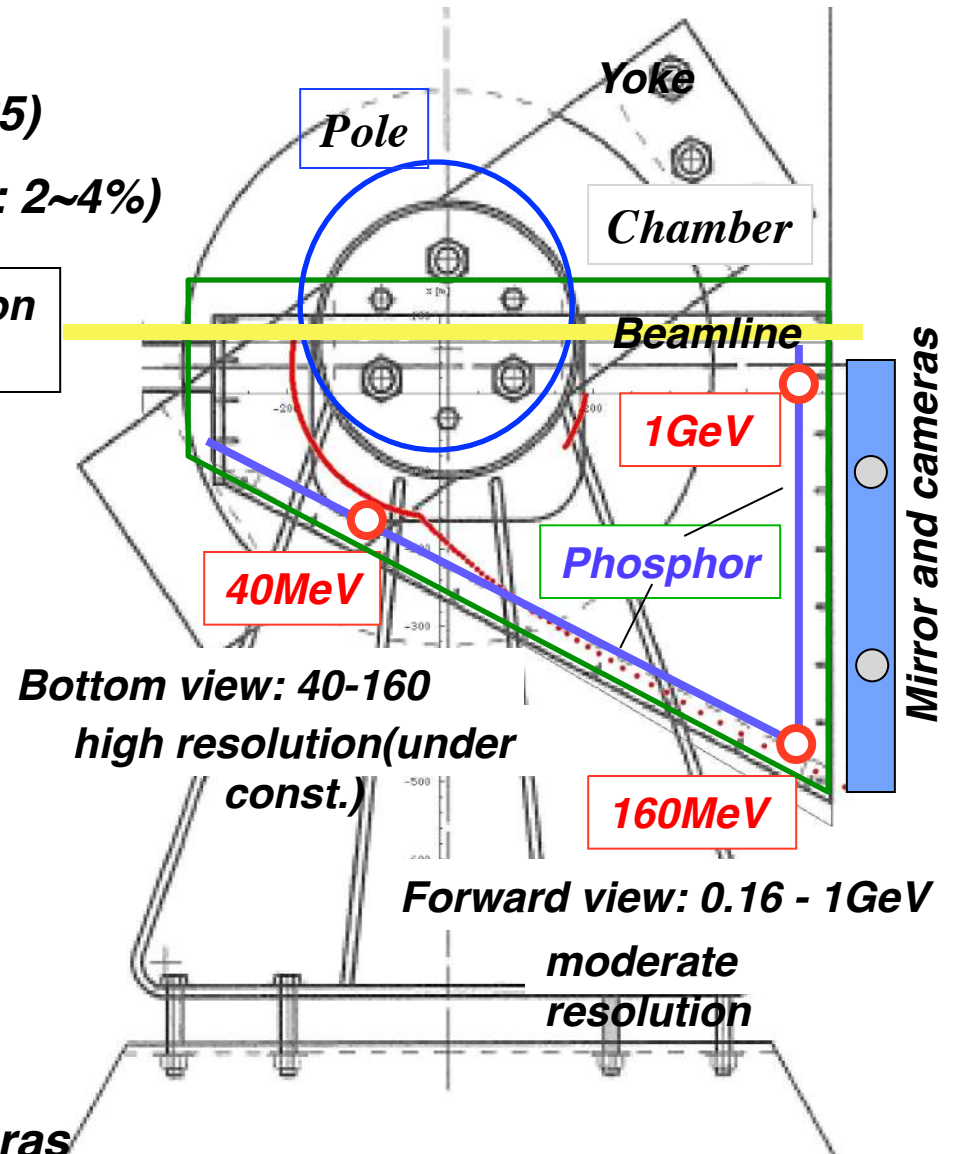
Capillary



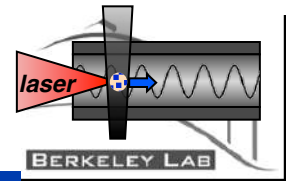
Chamber

Shielded mirror and cameras

Interaction point

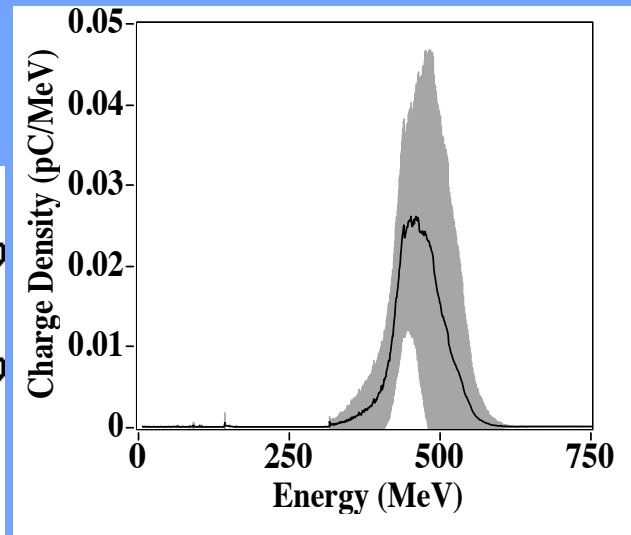
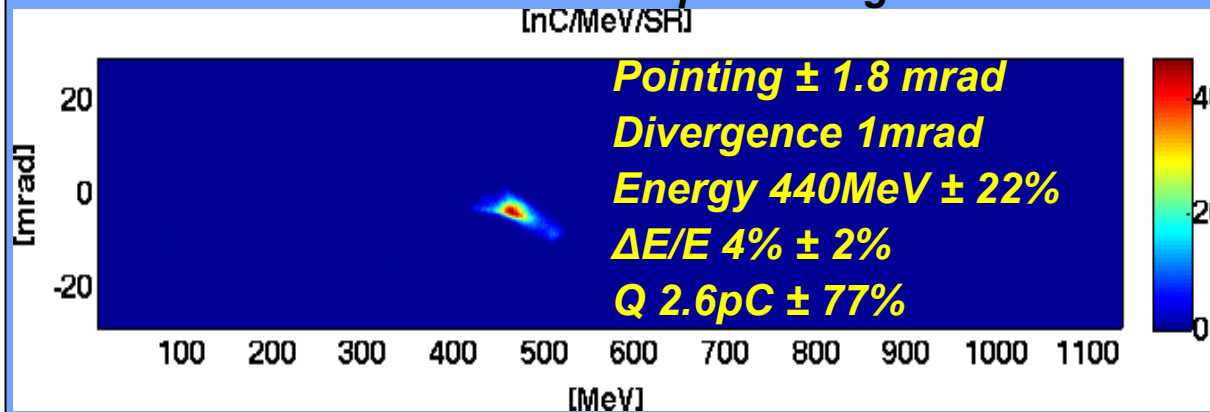


Tipikus elektron energia spektrum adatlap stabilitási információkkal



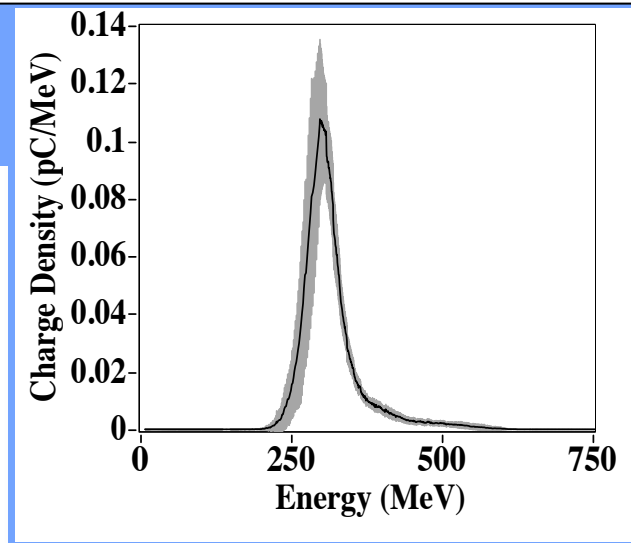
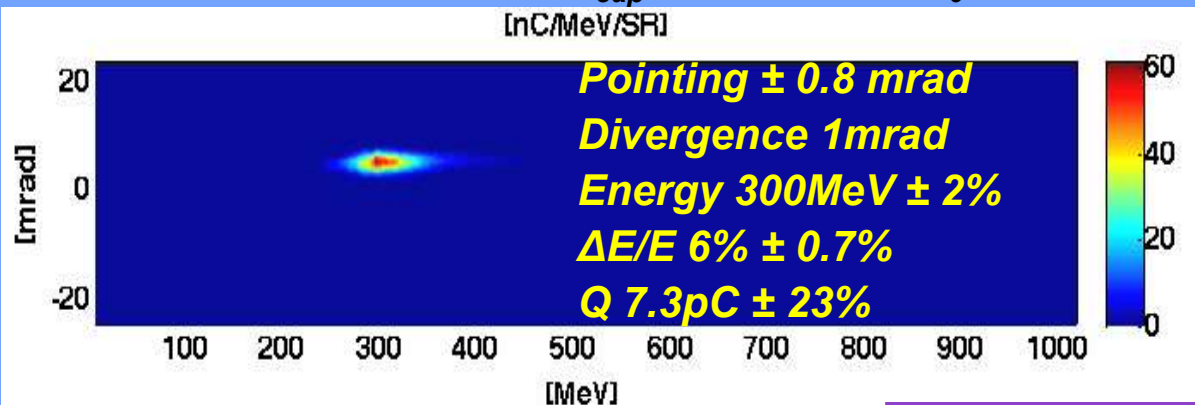
**Best stability
without jet**

*no jet in cap,
 $N_{e_{cap}} \approx 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}, a_0 \approx 1$ (25TW),
Laser pulse length $\approx 45 \text{ fs}$*



Stability with jet

*$N_{e_{jet}} \approx 1.4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ FWHM
 $0.5 \text{ mm},$
 $N_{e_{cap}} \approx 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}, a_0 \approx 1$ (25TW),*



További diagnosztikai eljárások a – lézerek, plazmák és nyalábok mérésére

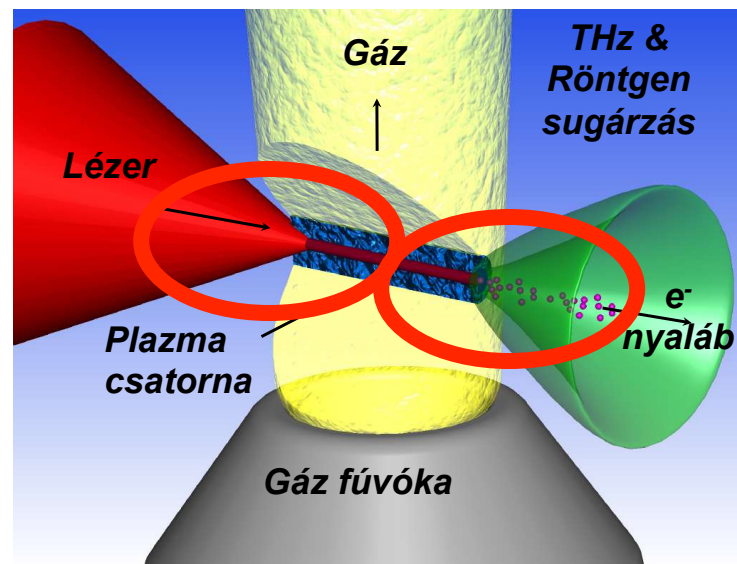


- **Energia, impulzuskontraszt**
 - hőérzékeny tejesítménymérők, diódák, kalibrált szűrők
- **Fókuszolt méret, divergencia**
 - kamerák, M^2 – módszer (v.ö. nem-ideális Gauss nyalábok)
- **Impulzushossz, fázis és amplitudó**
 - Autokorrelátorok, FROG, SPIDER
Frequency Resolved Optical Gating,
Spectral-Phase Interferometry for Direct Electric field Reconstruction
- **Plazma diagnosztika**
 - oldalnézeti és tengelyirányú interferometria, spektroszkópia
- **Részecskenyaláb diagnosztika**
 - OTR (Optical Transition Radiation), Thomson-szórás,
nyalábeltérülés mérése rezonancia üregekkel, etc.

Határterületi jelenségek



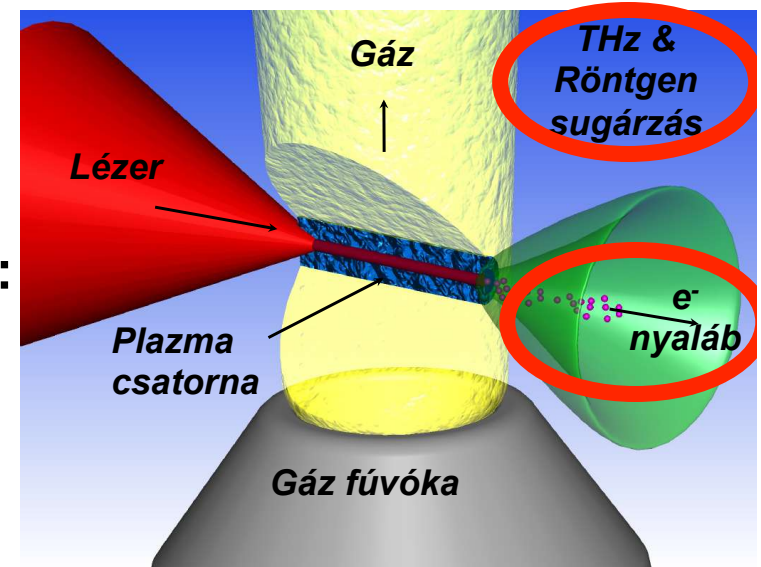
- Lézer & plazma:
a hullámkeltés dinamikája
visszahatás a lézernyalábra
- Plazma & elektronnyaláb:
csapdázódás, hullámtorzítás



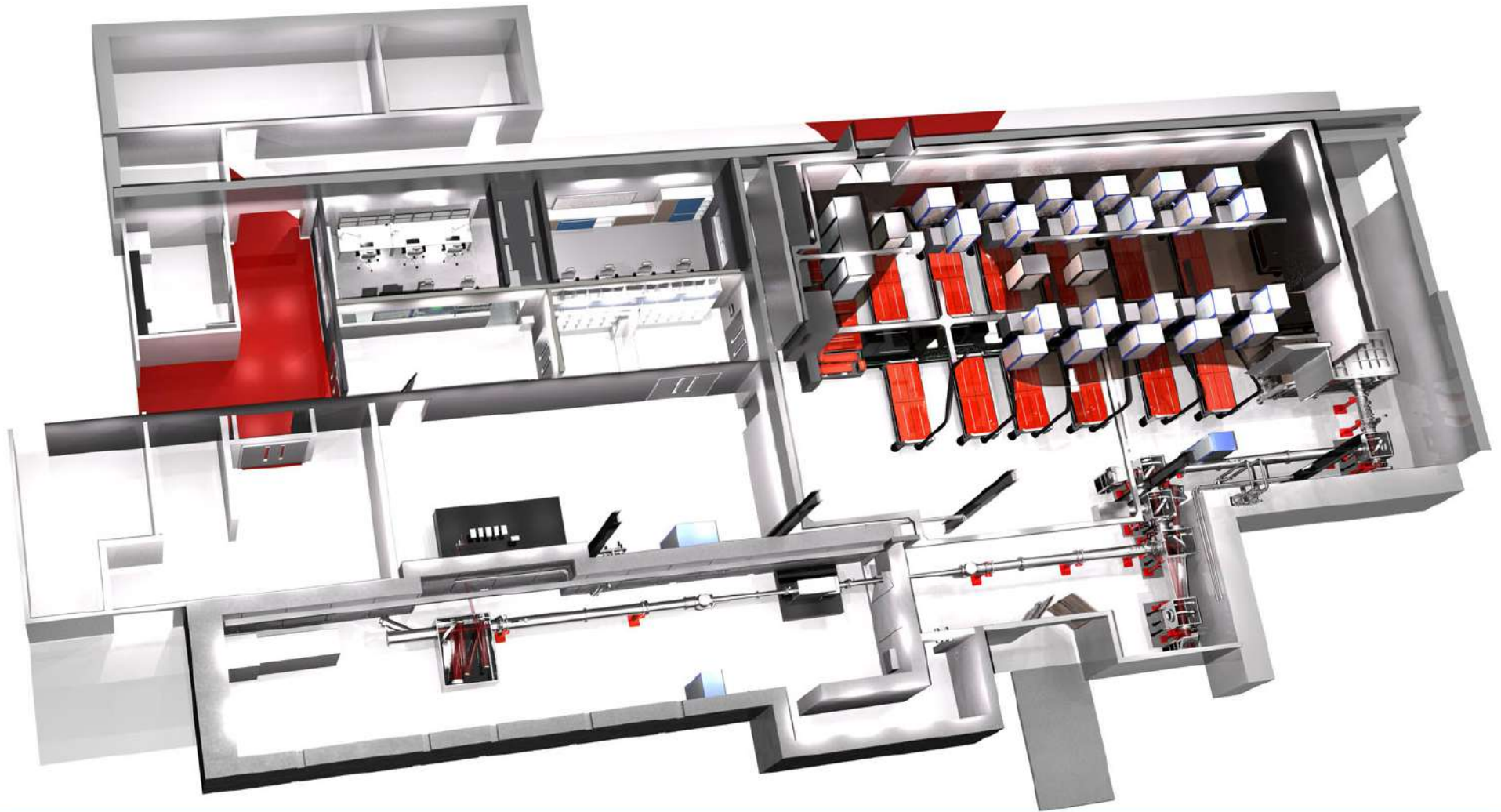
Alkalmazások: a hatalmasoktól a kisméretű, kompakt gyorsítóig



- Ütköztetőkben (“országnyi méretekben”):
 - a Standard Model igazolása
 - a korai Univerzum szimulációja (anyag/anti-anyag aszimmetria, kvark gluon plazma)
 - a Higgs-bozon
- Kompakt (“pincényi”) méretekben:
 - Orvostudomány: rákterápia, képalkotás
 - Ipari és állami feladatok: litográfia, rejtett nukleáris anyagok detektálása
 - Másodlagos fényforrások, szinkrotronok: biológiai rendszerek leképezése, szilárdtestek és új anyagok fizikája



A BELLA Project



BELLA

BERKELEY LAB
LASER ACCELERATOR



U.S. DEPARTMENT OF
ENERGY

BELLA = BERkeley Lab Laser Accelerator

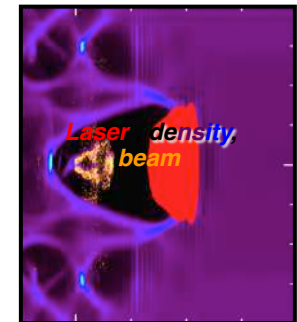
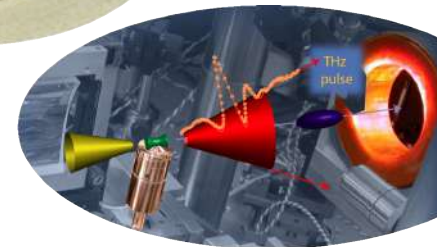
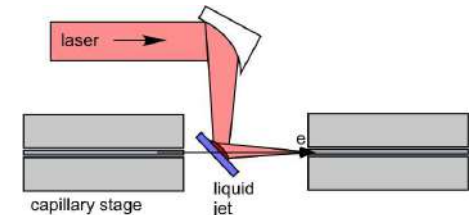
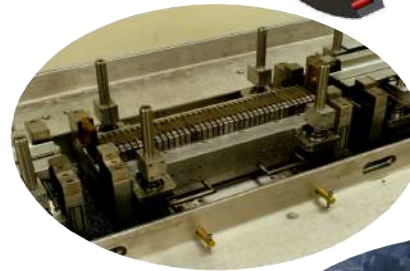
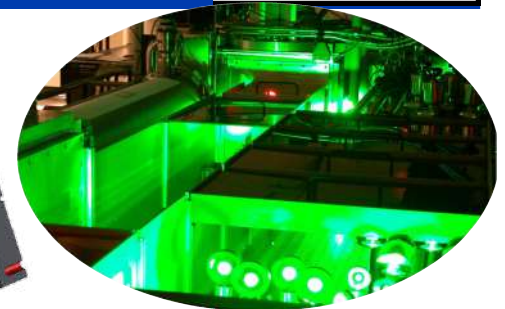
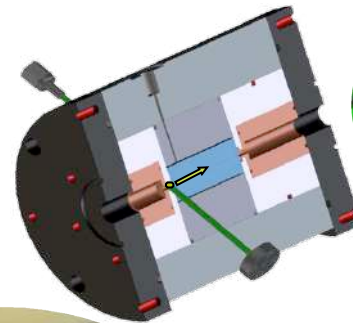


BELLA Project:

- 1 PW, 1 Hz lézer rendszer és a neki otthont adó épületek, termek

Laser Plasma Accelerator (LPA) R&D (Lézer-Plazma-Gyorsító K+F):

- Diagnosztika
- Többfokozatú gyorsítás
- 10 GeV egy lépcsőben
- Másodlagos fényforrások
- Számítógépes modellezés



In the frame of the LOASIS Program (Lasers, Optical Accelerator Systems Integrated Studies)

LOASIS Program – TREX/Godzilla/Chihuahua

BELLA Project - PW laser

plus BELLA

FY08

FY09

2010

2011

2012

2013

YEARS
2018



BERKELEY LAB

LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY



U.S. DEPARTMENT OF ENERGY

A-Z INDEX | PHONE BOOK | CAREERS | SEARCH

About The Director

About The Lab

Recovery Act

Visitor's Guide

For Staff and Guests

Calendar

29 Lab Breakthroughs and more

News Center

Today at Berkeley Lab

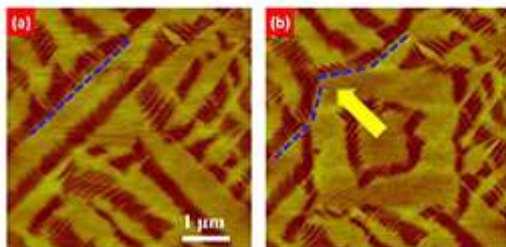
Bringing Science Solutions to the World

Carbon Cycle 2.0

Spring 2013 "10 on the Way" List

Globally Transformative Technologies

Remembrances of Things Past



Berkeley Lab researchers have introduced a shape memory effect in bismuth ferrite larger than any observed in a metal. This discovery opens the door to applications in a wide range of fields, including medical, energy and electronics. »

Studies Find Methane Emissions in U.S. 1.5 Times Greater Than Expected



<http://www.lbl.gov/>

<http://loasis.lbl.gov>

MOZI – Álomtól a valóságig



A CAD model – 2009

https://spe.lbl.gov/BELLA_Walkthrough-761.html

(felső videó)

Az elkészült lézer labor – 2012

https://spe.lbl.gov/BELLA_Walkthrough-761.html

(alsó videó)

Fizikus elődök nyomdokain



Sir Isaac Newton
(1642-1727)



Michael Faraday
(1791-1867)



James Clerk Maxwell
(1831-1879)



Albert Einstein
(1879-1955)



E.O. Lawrence
(1901-1958)



LOASIS-BELLA Lab,
headed by W. Leemans



Jedlik Ányos
(1800-1895)

Dedikáció



A mai előadást egykori középiskolai matematika tanárom emlékének ajánlom, aki a soproni Széchenyi István Gimnáziumban évtizedeken keresztül végzett kimagasló oktatói munkájával vezette be lelkes diákjait a szigorú és következetes probléma-megoldás rejtelmeibe.



Szakál Péter (1941-2013)

A “Lézerfény-Anyag” kölcsönhatások fizikájának tanulmányozása



- Mi következik a femtoszekundumok és a PetaWatt-ok után?
- Attoszekundumos impulzusok? Attoszekundumos Fizika? **10⁻¹⁸ sec**

IGEN, már itt is van !!! -> MPQ – Attoworld

- Hagyományok a KFKI-ban

Farkas & Tóth, *Proposal for attosecond light pulse generation using multiple harmonic conversion processes in rare gases.*

Phys. Lett. A168, 447-450 (1992) - beating of high-harmonics

- **Az “első évtized” kísérleti eredményei**

— Drescher, M. et al., X-ray pulses approaching the attosecond frontier. *Science* 291, 1923-1927 (2001).

— Itatani et al., Attosecond streak camera, *PRL* 88, 173903 (2002).

— Kienberger et al., Atomic transient recorder, *Nature* 427, 817 (2004)

— etc., sok-sok további cikk Krausz Ferenc csoportjából

- **ELI-ALPS: A legújabb lehetőség**

— Közvetlenül megfigyelni ultragyors atomi belsőhéj átmeneteket, nukleáris folyamatokat - mindent, ami “extrém-gyors”

— www.eli-hu.hu



ELI: Extreme Light Infrastructure “Go east young men !”



ICUIL News: “Go east young men!”

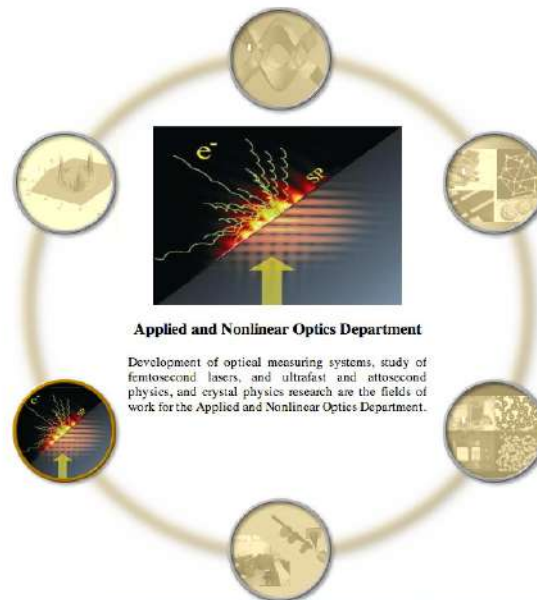
<http://www.icuil.org/>

The International Committee on Ultra-High Intensity Lasers

**... de utadat kezd(heted) a KFKI SZFKI
Wigner Intézetének hELlos laborjaiban (is) !**

<http://www.szfki.hu/>

INSTITUTE FOR SOLID STATE PHYSICS AND OPTICS
WIGNER RESEARCH CENTRE FOR PHYSICS of the H.A.S.



Applied and Nonlinear Optics Department

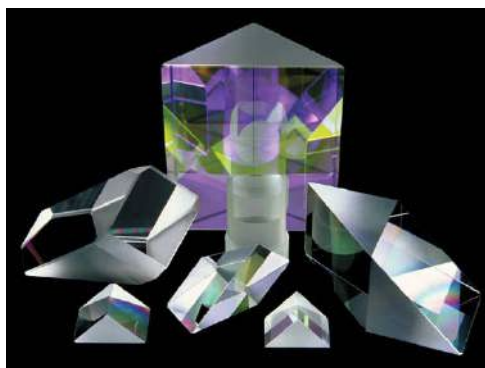
Development of optical measuring systems, study of femtosecond lasers, and ultrafast and attosecond physics, and crystal physics research are the fields of work for the Applied and Nonlinear Optics Department.



Néhány alap kísérleti eszköz - demo



Prizmák



Tükrök



Rácsok



Polarizátorok



Lézerek

