

A femtoszekundumos lézerektől az attoszekundumos fizikáig

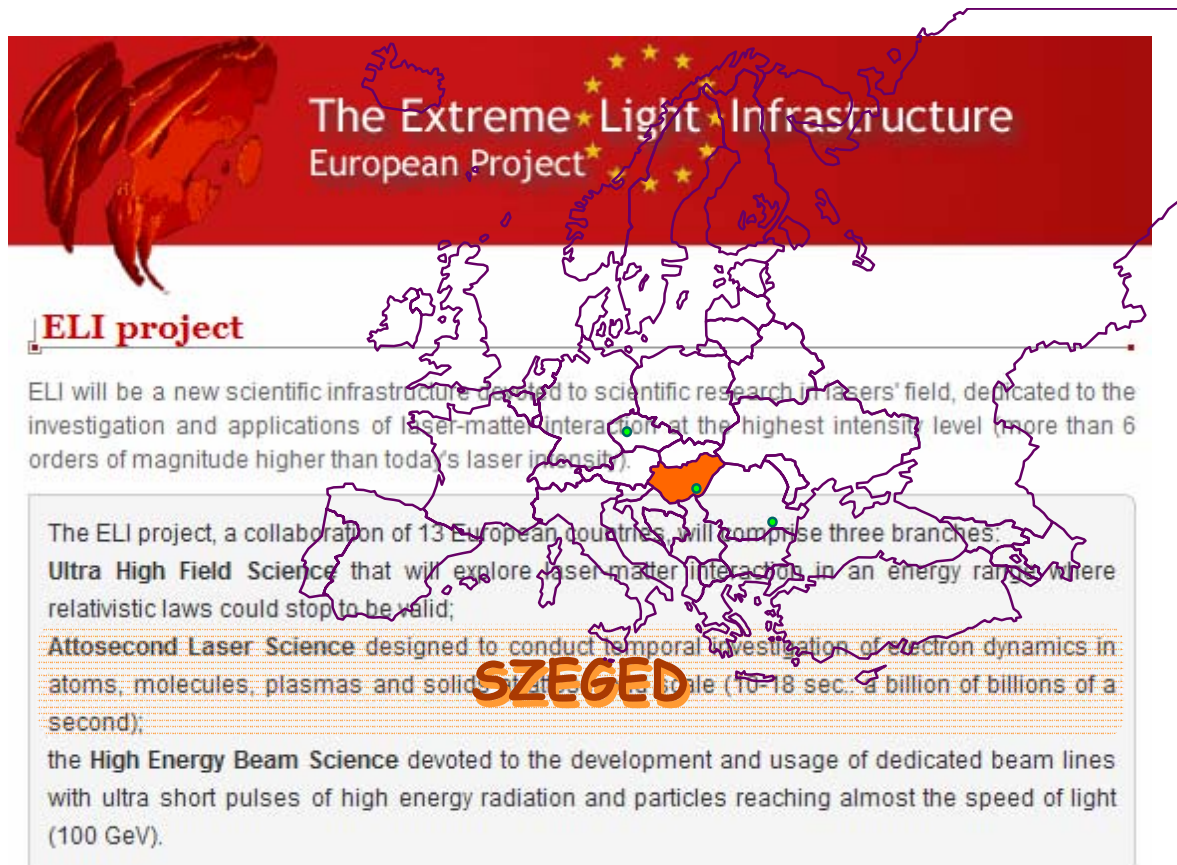
Varjú Katalin, Dombi Péter

Kapcsolódási pont:

- ultrarövid impulzusok: karakterizálás, alkalmazások
- egy attoszekundumos impulzus előállításához kell egy femtoszekundumos impulzus

DE!

Az impulzus létrejötte egészen más fizikán alapul! (fs impulzus, a rezonátor módusai)



**The Extreme Light Infrastructure
European Project**

ELI project

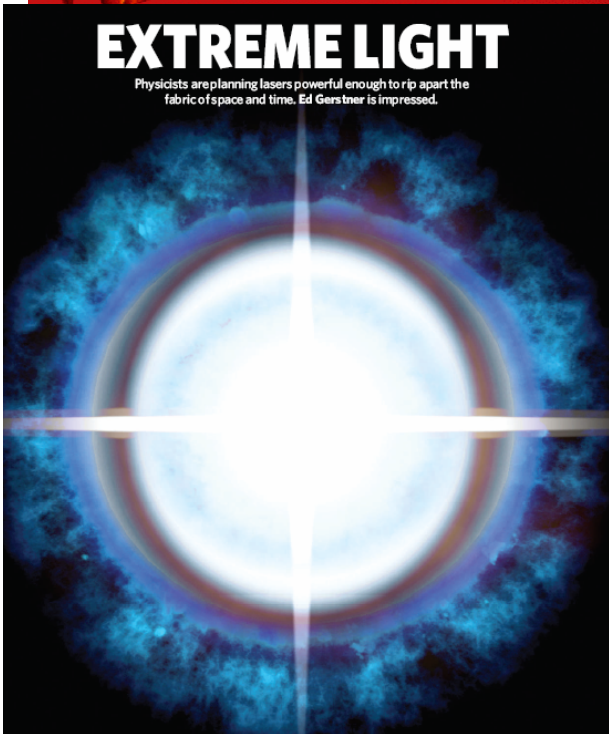
ELI will be a new scientific infrastructure devoted to scientific research in lasers' field, dedicated to the investigation and applications of laser-matter interaction at the highest intensity level (more than 6 orders of magnitude higher than today's laser intensity).

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 the attosecond scale (10^{-18} sec.: 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).

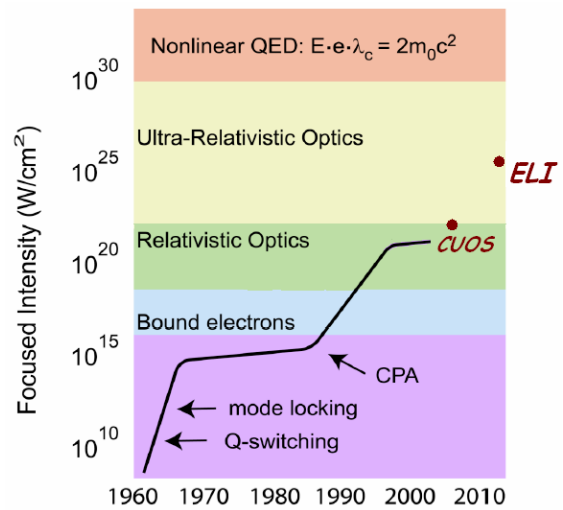


The Extreme Light Infrastructure European Project

EXTREME LIGHT

Physicists are planning lasers powerful enough to rip apart the fabric of space and time. Ed Gerstner is impressed.



Tematika

	téma	Dátum
1	A kurzus ismertetése, a teljesítés feltétele. Ultrarövid impulzusok (fs és as). Spektrális és időkép.	Szept. 13.
2	Lézerfizikai és nemlineáris optikai bevezető	Szept. 20. (DP)
3	A móddusszinkronizált lézerműködés alapjai	
4	Szélessávú szilárdtest-lézeranyagok	Szept. 27. (DP)
5	Femtosekundumos lézerimpulzusok erősítése, impulzuskompresszió	
6	Femtosekundumos impulzusok karakterizálása	Okt. 11. (DP)
7	Optikai hullámformák szintetizálása és nagy pontosságú optikai frekvenciamérés femtosekundumos lézerekkel. fs lézerek alkalmazásai (femtokémia és koherens kontroll, anyagmegmunkálás stb.)	Okt. 18. (DP) SZFKI
8	Laborlátogatás (IDŐPONT!!)	
9	Atomok erős lézertérben (optikai ionizáció, magasrendű felharmonikusok keltése, küszöbfeletti ionizáció stb.)	Nov. 8.
10	Attosekundumos impulzusok modellezése	Nov. 15.
11	Attosekundumos impulzusok előállítása: kísérleti aspektusok	Nov. 22.
12	Attosekundumos impulzusok karakterizálása	
13	Attofizikai jelenségek	Nov. 29.

Irodalom:

- J.-C. Diels, W.Rudolph: Ultrashort Laser Phenomena, Academic Press, 1996
- órai jegyzet

A tárgy teljesítésének követelményei:

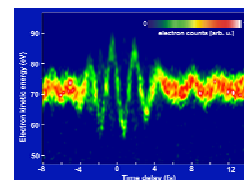
Az előadáson való részvétel nem kötelező, de ajánlott.

A kurzus kollokviummal zárul.

A vizsga részét képezi egy előre kiadott (otthoni) számolási feladat megoldása.

A vizsga másik része az előre egyeztetett vizsgaidőpontban és teremben, írásban történik, ennek teljesítése közben semmilyen segédeszköz nem használható. A vizsgán, az előadáson elhangzó tananyagot kérjük számon, előre kiadott tételek alapján.

2010/2011. tanév őszi szemeszter



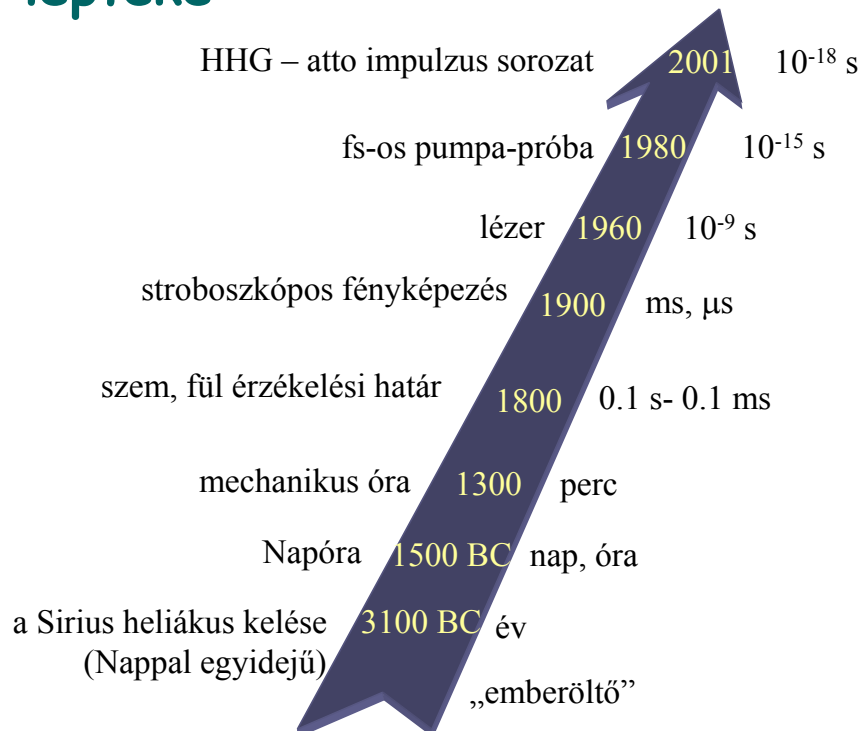
Mennyi egy femto/attoszekundum?

Másodperc (wikipedia):

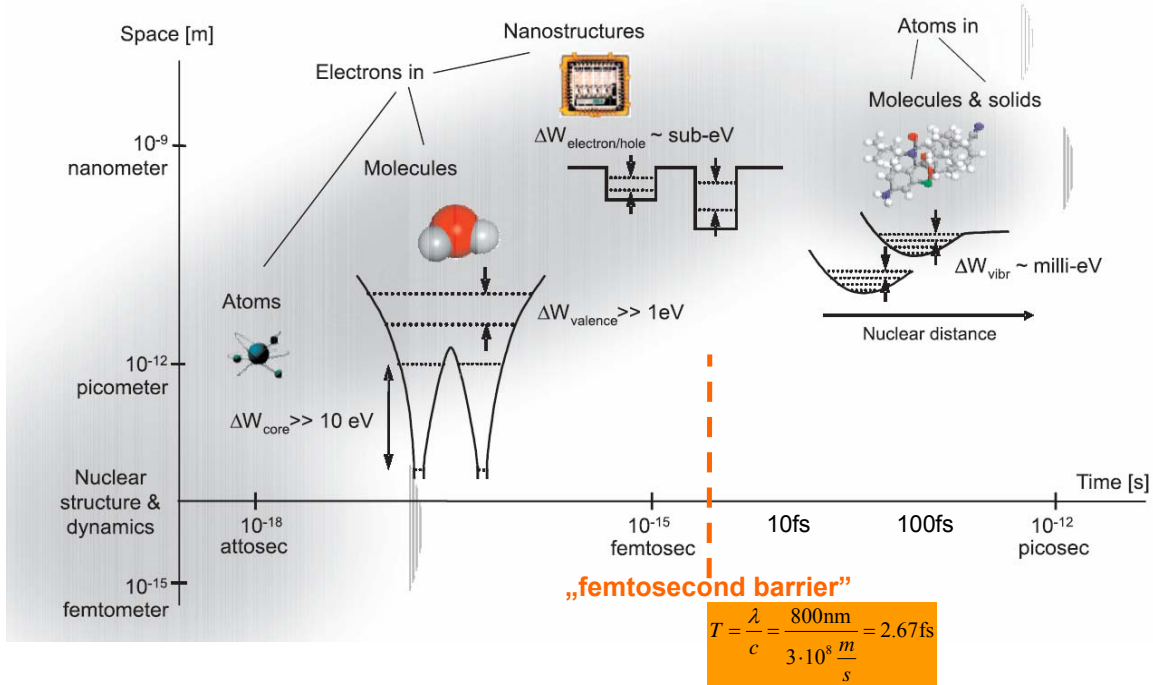
A másodperc az alapállapotú cézium-133 atom két hiperfinom energiaszintje közötti átmenetnek megfelelő sugárzás 9 192 631 770 periódusának időtartama.

Factor Name	Symbol	Factor Name	Symbol
10^{24}	yotta Y	10^{-1}	deci d
10^{21}	zetta Z	10^{-2}	centi c
10^{18}	exa E	10^{-3}	milli m
10^{15}	peta P	10^{-6}	micro μ
10^{12}	tera T	10^{-9}	nano n
10^9	giga G	10^{-12}	pico p
10^6	mega M	10^{-15}	femto f
10^3	kilo k	10^{-18}	atto a
10^2	hecto h	10^{-21}	zepto z
10^1	deka da	10^{-24}	yocto y

Az idő léptéke

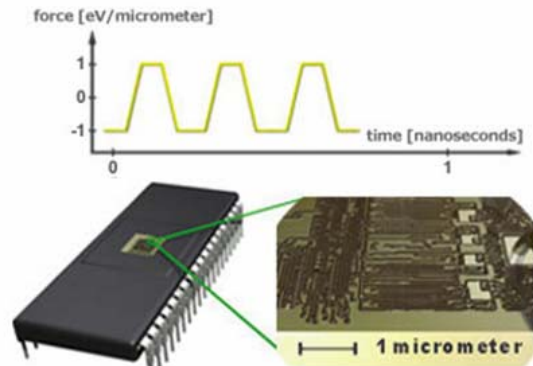
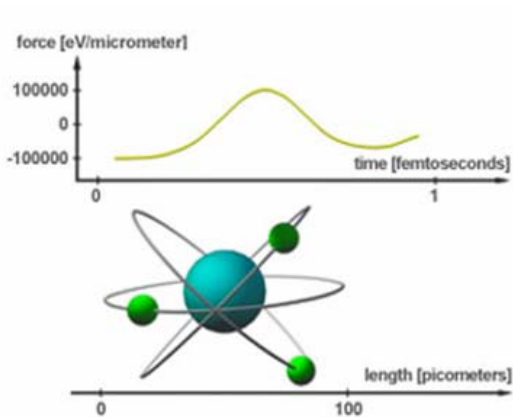


Karakterisztikus idők



Miért érdekes az elektron?

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



Mire jó egy ultrarövid (fs, as) impulzus?

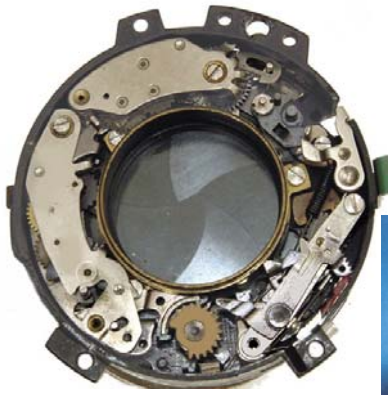
Rövid:

- gyors folyamatok
- adott energia esetén nagyobb a teljesítmény

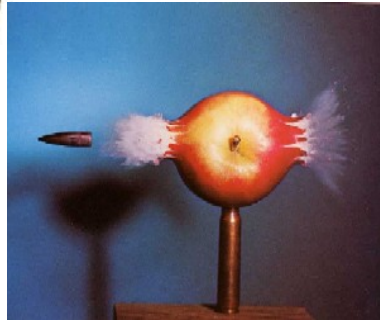
Gyors-fényképezés



A labda „bemozdul”

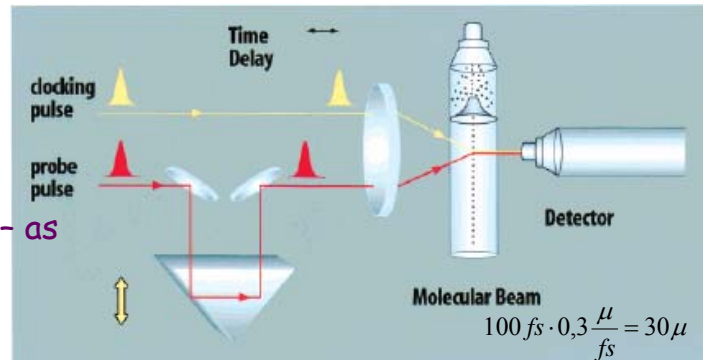


mechanikus: ms



elektronikus: μ s

lézeres pumpa-próba: ns - fs - as



Pillanat-felvétel

Attofizika



as 10^{-18} s

fs 10^{-15} s

ps 10^{-12} s

ns 10^{-9} s

μ s 10^{-6} s

ms 10^{-3} s

10^0 s

10^3 s

10^6 s

10^9 s

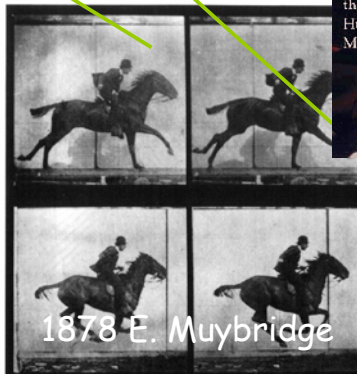
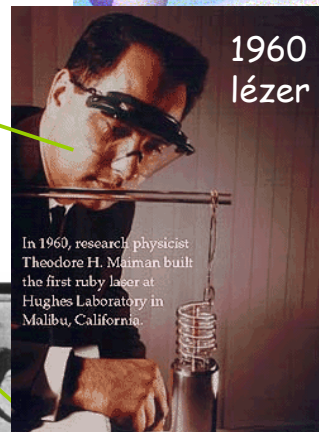
10^{12} s

10^{15} s

Univerzum 10^{18} s

szem

ember



1878 E. Muybridge



Energia - teljesítmény - intenzitás

E - energia
 τ - felvillanási idő
 A - megvilágított terület

$$P = \frac{E}{\tau} \quad \text{teljesítmény}$$

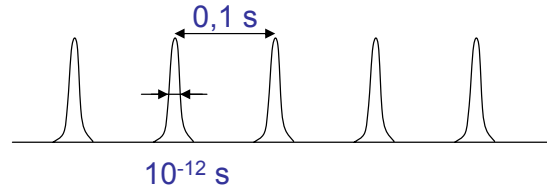
$$I = \frac{P}{A} = \frac{E}{\tau \cdot A} \quad \text{teljesítmény sűrűség, intenzitás}$$

Csúcsteljesítmény és átlagteljesítmény

$$E = 10 \text{ mJ} = 10^{-2} \text{ J}$$

$$\tau = 35 \text{ ps} = 35 \times 10^{-12} \text{ s}$$

$$P = \frac{E}{\tau} = 286 \text{ MW} \quad \text{csúcsteljesítmény}$$



Ismétlési frekvencia 10 Hz, vagyis 1 s alatt 10 felvillanás, azaz az átlagos teljesítmény:

$$P = \frac{10 \times E}{1 \text{ s}} = 2,86 \text{ W}$$

Paks: $4 \times 465 \text{ MW} = 1,86 \text{ GW} = 1,86 \times 10^9 \text{ W}$

TeVATI (SZTE): $35 \text{ mJ}/20 \text{ fs} = 1,75 \text{ TW} = 1,75 \times 10^{12} \text{ W}$

ELI: $EW=10^{18} \text{ W}$

„Nagy” intenzitás? Elektromos tér?

atomi elektron: $E(r) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e}{r^2} \quad r \approx 10^{-10} \text{ m}$

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

a fény elektromágneses hullám, mekkora az elektromos térerősség?

intenzitás = teljesítménysűrűség = |Poynting vektor|

$$I = 35 \text{ mJ}/20 \text{ fs}/(100\mu\text{m})^2 = 1,75 \times 10^{20} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

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

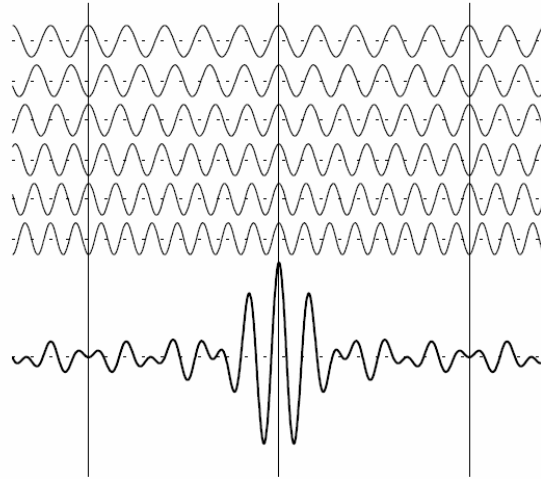
$$E_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \cdot I}{\epsilon_0 c}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,75 \times 10^{20} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{8,8 \times 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}} \approx 10^{11} \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

Intenzív fény – anyag kölcsönhatás

Mitől különleges egy ultrarövid impulzus?

végtelen hullám (CW - continuous wave):

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



rövid impulzus:

több (szinkronizált) módusból áll

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

Ultrarövid impulzusok tulajdonságai

Időbeli, illetve spektrális leírás

$$\tilde{E}(\Omega) = \mathcal{F}\{E(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} E(t)e^{-i\Omega t} dt$$

$$\tilde{E}^+(\Omega) = |\tilde{E}(\Omega)|e^{i\Phi(\Omega)}$$

$$E(t) = \mathcal{F}^{-1}\{\tilde{E}(\Omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}(\Omega)e^{i\Omega t} d\Omega$$

$$\tilde{E}^+(t) = \frac{1}{2} \mathcal{E}(t)e^{i\Gamma(t)}$$

Rövid impulzus esetén:

$$E(t) = e^{i\omega_0 t} e^{-2\ln 2 \frac{t^2}{\tau^2}}$$

τ : intenzitás FWHM

Fourier transzformálva:

$$E(\Omega) = \int e^{i\omega_0 t} e^{-2\ln 2 \frac{t^2}{\tau^2}} e^{-i\Omega t} dt \propto e^{-\frac{(\Omega - \omega_0)^2}{4 \cdot 2 \ln 2 \frac{\tau^2}{\tau^2}}}$$

$$\Delta\omega \cdot \tau = 4 \ln 2 = 2,77$$

Mennyire nagy ez a sávzélesség?

800 nm: 6 nJ, 12 fs, 70 MHz

35 mJ, 20 fs, 10 Hz

530 nm: 0.2 mJ, 25 fs, 10 Hz

532 nm: 360 mJ, 3 ns, 10 Hz

400 nm: 2 mJ, 25 fs, 10 Hz

266 nm: 140 mJ, 3 ns, 10 Hz

„YAG”: $\tau = 10\text{ns}$, $\Delta\omega = \frac{4\ln 2}{\tau} = 2,77 \times 10^8 \frac{1}{\text{s}} = 2,77 \times 10^{-7} \frac{1}{\text{fs}}$, $\omega_l = 2\pi \frac{c}{\lambda} = 2\pi \frac{0,3 \frac{\mu\text{m}}{\text{fs}}}{532\text{nm}} = 3,5 \times 10^{15} \frac{1}{\text{s}} = 3,5 \frac{1}{\text{fs}}$

„Ti:S”: $\tau = 12\text{fs}$, $\Delta\omega = \frac{4\ln 2}{\tau} = 0,23 \frac{1}{\text{fs}}$, $\omega_l = 2\pi \frac{c}{\lambda} = 2\pi \frac{0,3 \frac{\mu\text{m}}{\text{fs}}}{0,8\mu\text{m}} = 2,356 \frac{1}{\text{fs}}$

„világrekord Ti:S” $\tau = 3,8\text{fs}$, $\Delta\omega = \frac{4\ln 2}{\tau} = 0,73 \frac{1}{\text{fs}}$, $\omega_l = 2\pi \frac{c}{\lambda} = 2\pi \frac{0,3 \frac{\mu\text{m}}{\text{fs}}}{0,8\mu\text{m}} = 2,356 \frac{1}{\text{fs}}$

„attoszekundumos” $\tau = 0,17\text{fs}$, $\Delta\omega = \frac{4\ln 2}{\tau} = 16,3 \frac{1}{\text{fs}}$, $\omega_l = 2\pi \frac{c}{\lambda} = 2\pi \frac{0,3 \frac{\mu\text{m}}{\text{fs}}}{0,8\mu\text{m}} = 47 \frac{1}{\text{fs}}$

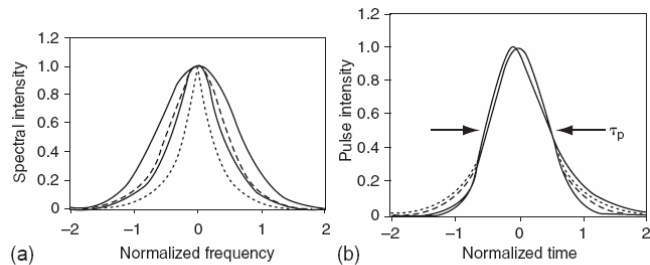


Figure 1.3 Temporal pulse profiles and the corresponding spectra (normalized).

———— Gaussian pulse	$\mathcal{E}(t) \propto \exp[-1.385(t/\tau_p)^2]$
- - - - - Sech pulse	$\mathcal{E}(t) \propto \text{sech}[1.763(t/\tau_p)]$
..... Lorentzian pulse	$\mathcal{E}(t) \propto [1 + 1.656(t/\tau_p)^2]^{-1}$
- · - · - Asymm. sech pulse	$\mathcal{E}(t) \propto [\exp(t/\tau_p) + \exp(-3t/\tau_p)]^{-1}$

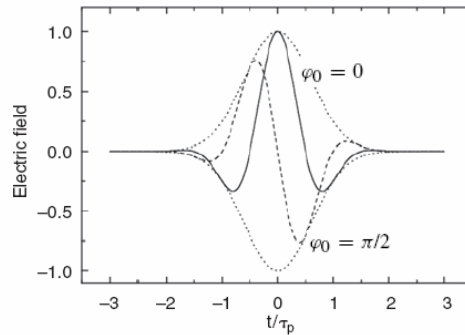
$$\Delta\omega_p \tau_p = 2\pi \Delta\nu_p \tau_p \geq 2\pi c_B$$

Shape	Intensity profile $I(t)$	τ_p FWHM	Spectral profile $S(\Omega)$	$\Delta\omega_p$ FWHM	c_B	$\{\tau_p\}\{\Delta\Omega_p\}$ MSQ
Gauss	$e^{-2(t/\tau_G)^2}$	$1.177\tau_G$	$e^{-(\frac{\Omega\tau_G}{2})^2}$	$2.355/\tau_G$	0.441	0.5
Sech	$\text{sech}^2(t/\tau_S)$	$1.763\tau_S$	$\text{sech}^2 \frac{\pi\Omega\tau_S}{2}$	$1.122/\tau_S$	0.315	0.525
Lorentz	$[1 + (t/\tau_L)^2]^{-2}$	$1.287\tau_L$	$e^{-2 \Omega \tau_L}$	$0.693/\tau_L$	0.142	0.7
Asym. sech	$[e^{t/\tau_a} + e^{-3t/\tau_a}]^{-2}$	$1.043\tau_a$	$\text{sech} \frac{\pi\Omega\tau_a}{2}$	$1.677/\tau_a$	0.278	
Square	1 for $ t/\tau_r \leq 1$, 0 elsewhere	τ_r	$\text{sinc}^2(\Omega\tau_r)$	$2.78/\tau_r$	0.443	3.27

Ultrarövid impulzusok tulajdonságai

$$\tilde{E}^+(t) = \frac{1}{2} \mathcal{E}(t) e^{i\varphi_0} e^{i\varphi(t)} e^{i\omega_\ell t}$$

$\mathcal{E}(t)$ the real field envelope
 φ_0 , often referred to as "carrier to envelope phase."
 $\varphi(t)$ is the time-dependent phase
 carrier frequency ω_ℓ



$$E(t) = \exp[-2 \ln 2 (t/\tau_p)^2] \cos(\omega_\ell t + \varphi_0)$$

Térerősség:

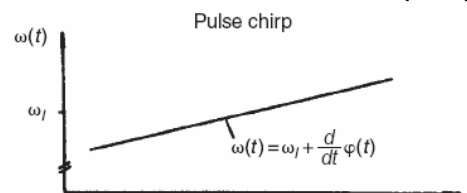
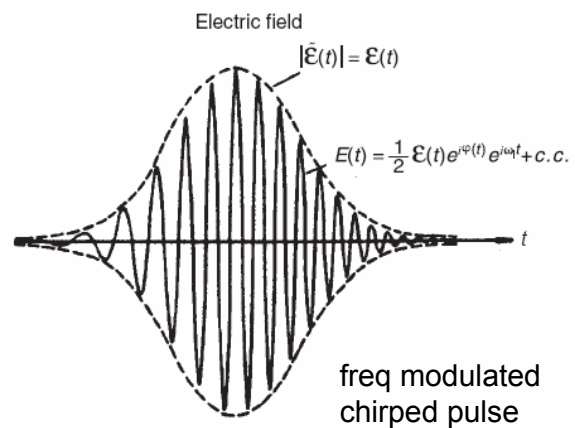
$$\mathcal{E}(t) \cdot e^{i\Gamma(t)} = \mathcal{E}(t) \cdot e^{i\varphi_0} e^{i\varphi(t)} e^{i\omega_\ell t}$$

Vivő frekvencia:

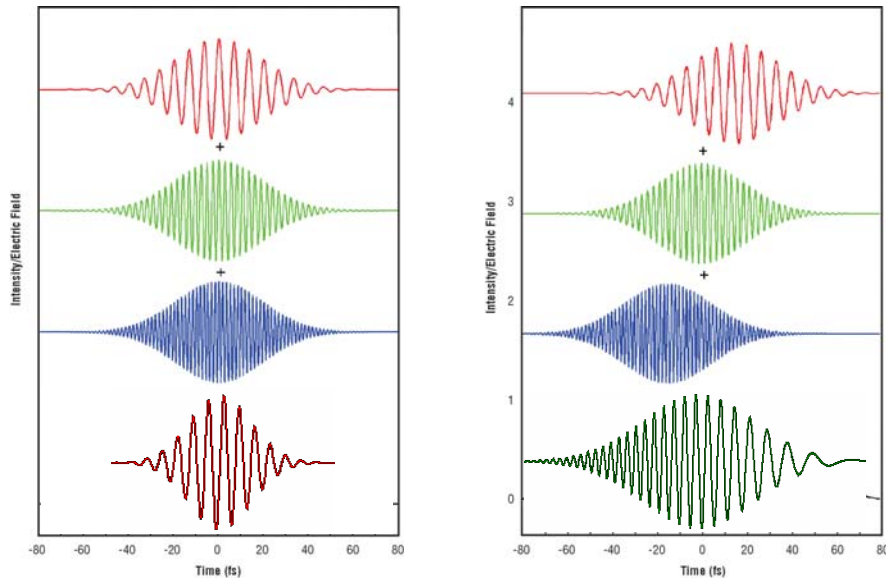
$$\omega(t) = \frac{d}{dt} \Gamma(t) = \omega_\ell + \frac{d}{dt} \varphi(t)$$

időben változik:

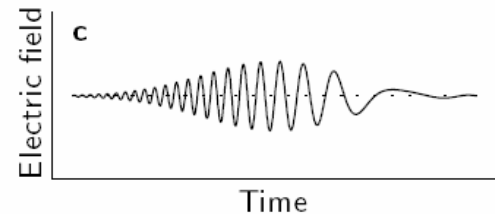
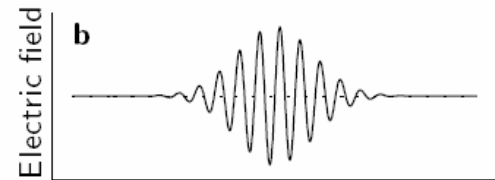
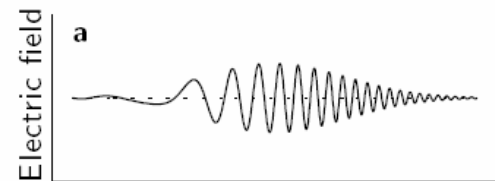
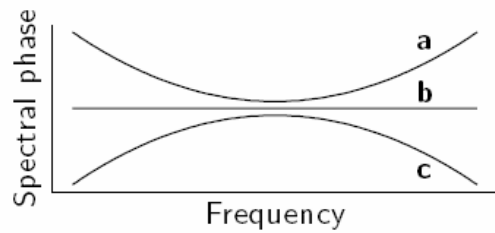
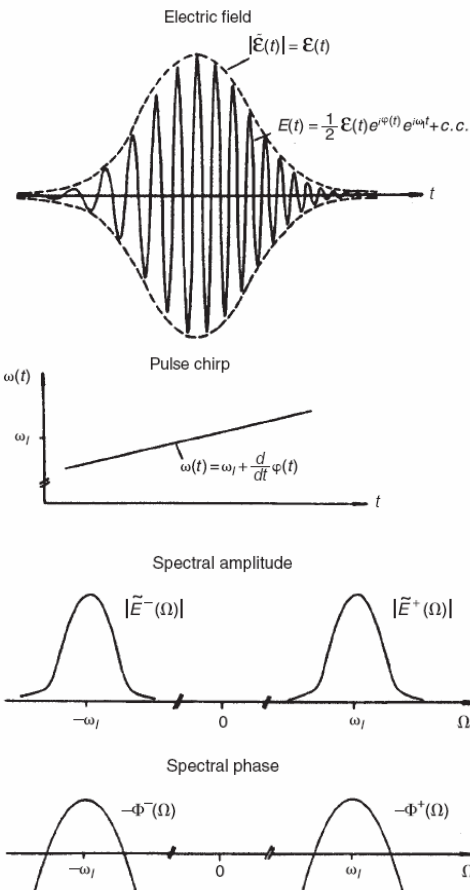
$$\varphi(t) = \varphi_0 + \omega_\ell t + \frac{1}{2} b t^2$$



"Chirp"



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



Gaussian chirped pulse

$$\tilde{\mathcal{E}}(t) = \mathcal{E}_0 e^{-(1+ia)(t/\tau_G)^2}$$

$$\tau_p = \sqrt{2 \ln 2} \tau_G$$

$$d\phi/dt = -2at/\tau_G^2 \quad \text{chirp parameter}$$

Fourier transform

$$\tilde{\mathcal{E}}(\Omega) = \frac{\mathcal{E}_0 \sqrt{\pi} \tau_G}{\sqrt{1+a^2}} \exp \left\{ i\Phi - \frac{\Omega^2 \tau_G^2}{4(1+a^2)} \right\}$$

$$\phi(\Omega) = -\frac{1}{2} \arctan(a) + \frac{a\tau_G^2}{4(1+a^2)} \Omega^2$$

másodfokú

impulzus-hossz:

$$\Delta\omega_p = 2\pi\Delta\nu_p = \frac{1}{\tau_G} \sqrt{8 \ln 2 (1+a^2)}$$

$$\Delta\nu_p \tau_p = \frac{2 \ln 2}{\pi} \sqrt{1+a^2}$$

minimális, ha $a=0$, Fourier limit

Csörp (időbeli kép) és GDD (spektrális kép) közötti kapcsolat

$$\phi(t) = \phi_0 + \frac{d\phi}{dt} t + \frac{1}{2} \frac{d^2\phi}{dt^2} t^2 + \dots = \phi_0 + \omega t + \frac{1}{2} b t^2 + \dots \quad \left(\frac{1}{2} b = \frac{a}{\tau_G^2} \right)$$

$$\begin{aligned} \Phi(\Omega) &= \Phi_0 + \frac{d\Phi}{d\Omega} (\Omega - \Omega_0) + \frac{1}{2} \frac{d^2\Phi}{d\Omega^2} (\Omega - \Omega_0)^2 + \dots \\ &= \Phi_0 + GD(\Omega - \Omega_0) + \frac{1}{2} GDD(\Omega - \Omega_0)^2 + \dots \end{aligned}$$

$$GDD = \frac{2a\tau_G^2}{4(1+a^2)} = \frac{b}{b^2 + \frac{16(\ln 2)^2}{\tau^4}}$$

$$\phi(\Omega) = -\frac{1}{2} \arctan(a) + \frac{a\tau_G^2}{4(1+a^2)} \Omega^2$$

$$b = \frac{GDD}{GDD^2 + \frac{16(\ln 2)^2}{(\Delta\Omega)^4}}$$

Fény terjedése közegben

Maxwell egyenletek:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \mathbf{E}(x, y, z, t) = \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{P}(x, y, z, t)$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}^L + \mathbf{P}^{NL} \quad \text{közeg hatása a fényre (forrás)}$$

The Reduced Wave Equation

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) E(z, t) = \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} P^L(z, t)$$

$$\tilde{P}^L(\Omega, z) = \epsilon_0 \chi(\Omega) \tilde{E}(\Omega, z), \quad P^L(t, z) = \epsilon_0 \int_{-\infty}^t dt' \chi(t') E(z, t - t')$$

Fourier transzformált:

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \Omega^2 \epsilon(\Omega) \mu_0 \right] \tilde{E}(z, \Omega) = 0 \quad \epsilon(\Omega) = [1 + \chi(\Omega)] \epsilon_0$$

megoldása:

$$\tilde{E}(\Omega, z) = \tilde{E}(\Omega, 0) e^{-ik(\Omega)z} \quad k^2(\Omega) = \Omega^2 \epsilon(\Omega) \mu_0 = \frac{\Omega^2}{c^2} n^2(\Omega).$$

z vastagságú közegen való áthaladás után:

$$\tilde{E}(\Omega, z) = \tilde{E}(\Omega, 0) \exp \left(-\frac{i}{2} k''_{\ell} \Omega^2 z - \frac{i}{3!} k'''_{\ell} \Omega^3 z - \dots \right) \quad k''_{\ell} = \left. \frac{\partial^2 k}{\partial \Omega^2} \right|_{\omega_{\ell}}$$

chirped Gaussian: bemenő

$$\tilde{E}(t, z=0) = \mathcal{E}_0 e^{-(1+ia)(t/\tau_{G0})^2} = \mathcal{E}_0 e^{-(t/\tau_{G0})^2} e^{i\varphi(t, z=0)} \quad \exp \left(-i \frac{1}{2} k''_{\ell} \Omega^2 z \right)$$

közegen való áthaladás után:

$$\tilde{E}(\Omega, z) = \tilde{A}_0 e^{-x\Omega^2} e^{iy\Omega^2} \quad x = \frac{\tau_{G0}^2}{4(1+a^2)} \quad y(z) = \frac{a\tau_{G0}^2}{4(1+a^2)} - \frac{k''_{\ell} z}{2}$$

időképben:

$$\tilde{E}(t, z) = \tilde{A}_1 \exp \left\{ - \left(1 + i \frac{y(z)}{x} \right) \left(\frac{t}{\sqrt{\frac{4}{x}[x^2 + y^2(z)]}} \right)^2 \right\}$$

$$\tau_G(z) = \sqrt{\frac{4}{x}[x^2 + y^2(z)]} \quad \varphi(t, z) = -\frac{y(z)}{4[x^2 + y^2(z)]} t^2$$

ha a kezdeti impulzus transform limitált ($a=0$)

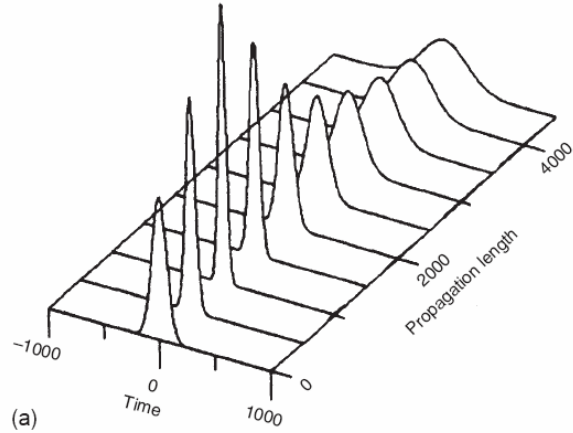
$$\tau_G(z) = \tau_{G0} \sqrt{1 + \left(\frac{z}{L_d}\right)^2}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \varphi(t, z) = \left(\frac{1}{\tau_{G0}^2}\right) \frac{2z/L_d}{1 + (z/L_d)^2}$$

$$L_d = \frac{\tau_{G0}^2}{2|k_\ell''|}$$

az impulzus hossza
duplájára nő $1,73 L_d$ út
megtétele után

ha a kezdeti impulzus „csörpölt” és a illetve k'' előjele megegyezik:



Példa: milyen vastag BK7-es üvegen kell egy 5 fs illetve 50 fs impulzusnak áthaladni, hogy duplájára nyúljon:

$$L_d = \frac{\tau_{G0}^2}{2|k_\ell''|}$$

$$k_\ell'' = 4,5 \times 10^{-2} \frac{\text{fs}^2}{\mu\text{m}}$$

$$\tau_p = \sqrt{2 \ln 2} \tau_G$$

τ_p	τ_G	$1,73L_d$
5 fs	4,25 fs	208 μm
50 fs	42,5 fs	20,8 mm

Material	λ_ℓ (nm)	$n(\omega_\ell)$	$n'(\omega_\ell)$ 10^{-2} (fs)	$n''(\omega_\ell)$ 10^{-3} (μm^{-1})	$n'''(\omega_\ell)$ 10^{-4} (fs^2)	$n'(\lambda_\ell)$ 10^{-4} (μm^{-2})	$n''(\lambda_\ell)$ 10^{-4} (fs^3)	$n'''(\lambda_\ell)$ (μm^{-3})
BK7	400	1.5307	1.13	-13	3	1.10	6.9	-12
	500	1.5213	0.88	-6.6	2.3	0.396	7.7	-3.5
	620	1.5154	0.75	-3.6	1.6	0.150	13	-1.1
	800	1.5106	0.67	-2	0.06	0.05	39	-0.29
	1000	1.5074	0.73	-1.4	-3.2	0.016	114	-0.09
SF6	400	1.8674	5.8	-67	30	7.40	214	-120
	500	1.8236	3.7	-28	16	2	86	-21
	620	1.8005	2.7	-13	12	0.70	50	-5.3
	800	1.7844	2	-5.9	8	0.22	56	-1.2
	1000	1.7757	1.71	-3.2	4	0.08	115	-0.36
SF10	400	1.7784	4.6	-54	24	5.9	183	-98
	500	1.7432	3	-22	13	1.6	69	-17
	620	1.7244	2.2	-11	9	0.56	42	-4.2
	800	1.7112	1.7	-5	6	0.17	58	-1
	1000	1.7038	1.5	-2.8	2	0.06	132	-0.3

Levegő?

$$k_l'' = 21,28 \times 10^{-6} \frac{\text{fs}^2}{\mu\text{m}}$$

$$L_d = \frac{\tau_{G0}^2}{2 |k_l''|}$$

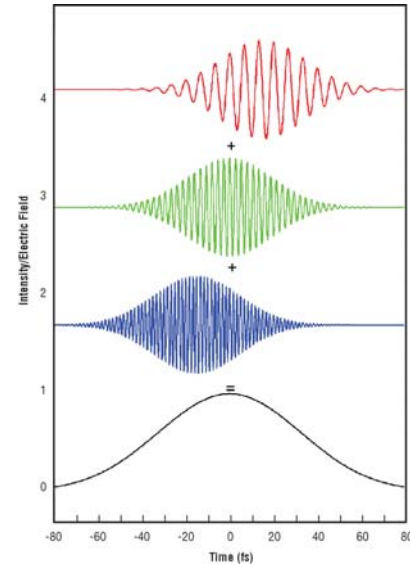
τ_p	τ_G	$1,73L_d$
5 fs	4,25 fs	0,73 m
50 fs	42,5 fs	73 m

Miért nagyobb a nyúlás mértéke egy rövid impulzusnál?

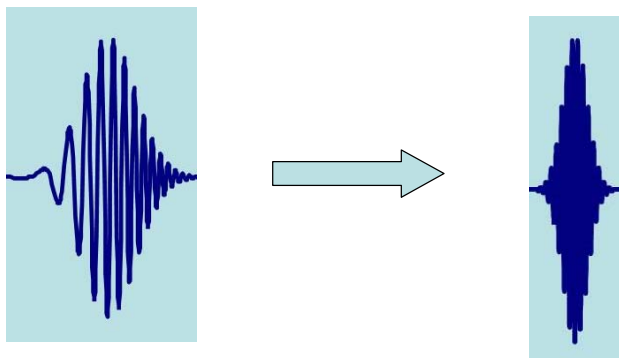
adott z vastagságú közegen való

áthaladásakor: $GDD = k''z$

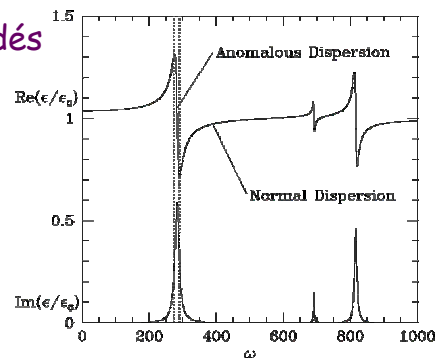
$$\tau_z = \tau_0 \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{GDD^2}{\tau_G^4}}$$



Hogyan lehet az impulzus hosszát csökkenteni?

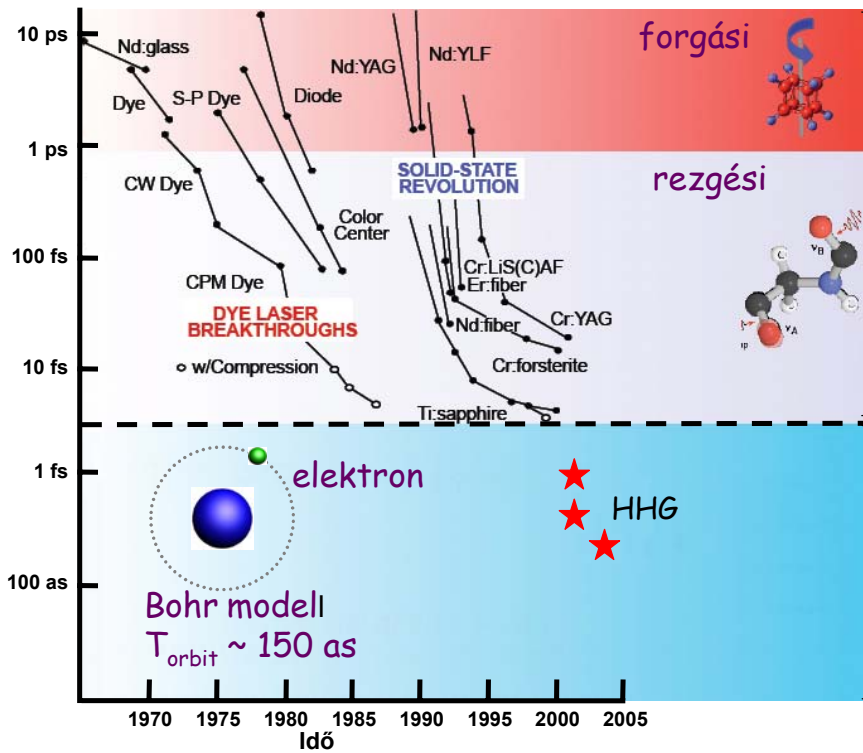


Az anyagok általában pozitív GDD-vel rendelkeznek, emiatt az impulzusok terjedés során pozitív csörpöt „szereznek”.
Kompenzálás: negatív GDD



Impulzushossz csökkenése

módusszinkronizálás
Q-kapcsolás

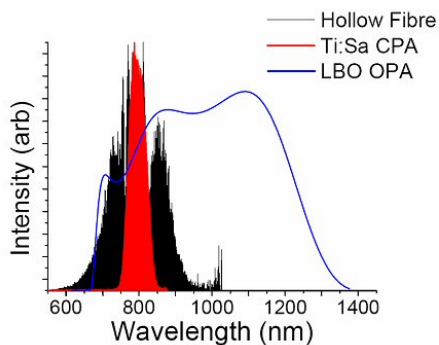
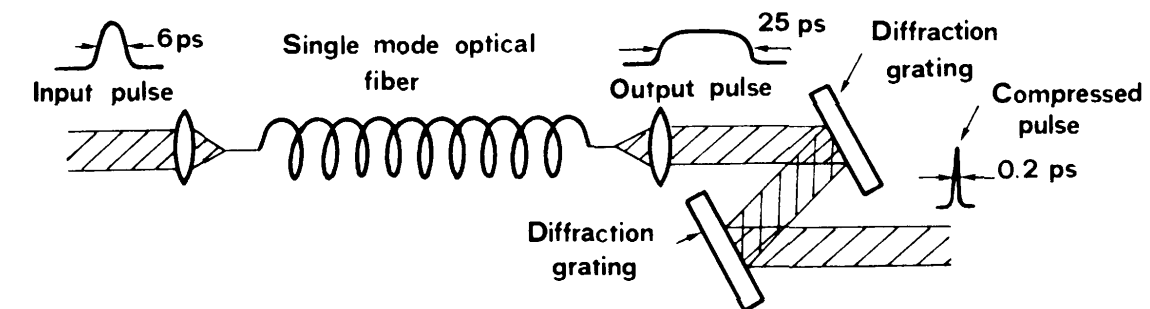


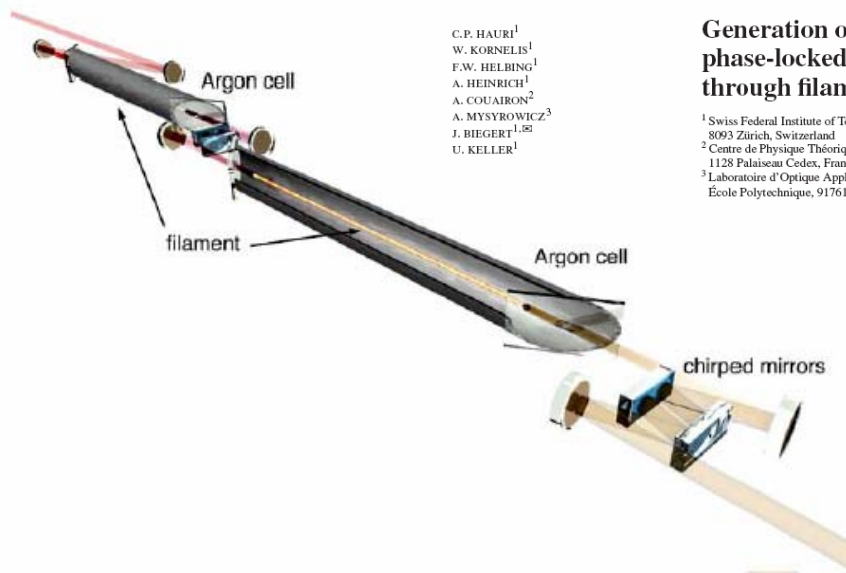
diszperzió-
kompenzálás

lézer-anyagok

új fizika !

Impulzus kompresszió - SPM





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

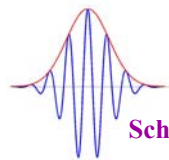
³ Laboratoire d'Optique Appliquée, École Nationale Supérieure de Techniques Avancées, École Polytechnique, 91761 Palaiseau Cedex, France

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

Attoszekunumos impulzusok előállítása

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

