

A MAGYAR
TUDOMÁNY
ÜNNEPE



Magyar Tudományos
Akadémia

2017 EMBERKÖZPONTÚ TUDOMÁNY

ADY Endre Líceum, Nagyvárad



Fizikai és kémiai előadások

Lézerek

az alapoktól az extrém fény-anyag kölcsönhatásig



Major Zsuzsanna
Silke Stähler-Schöpf

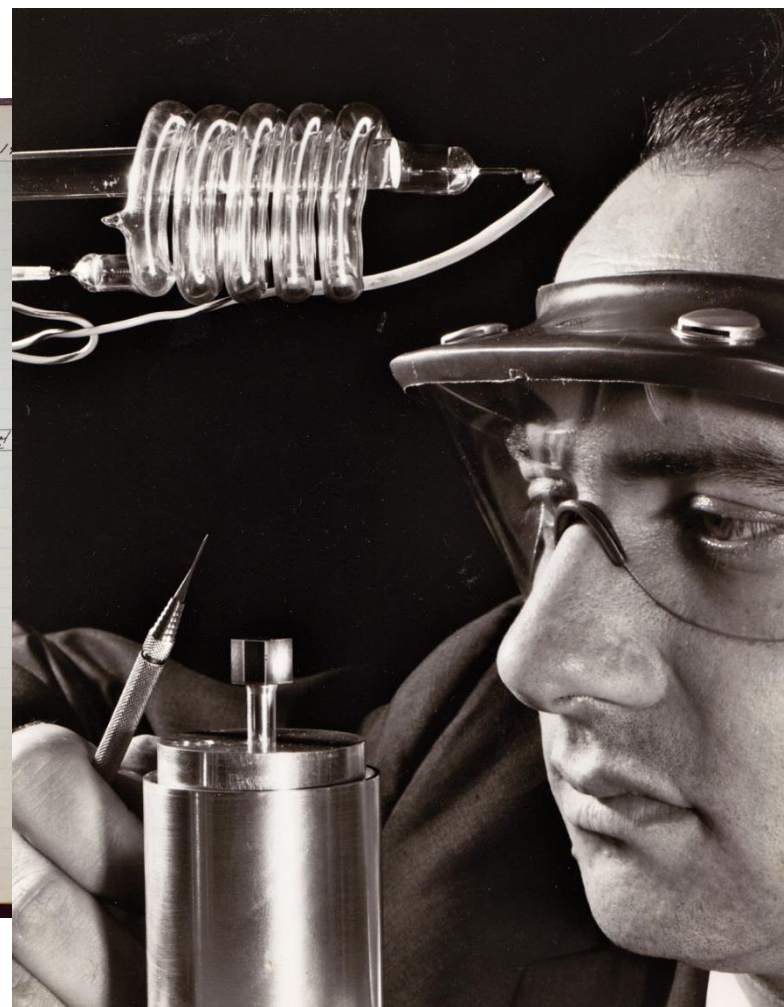
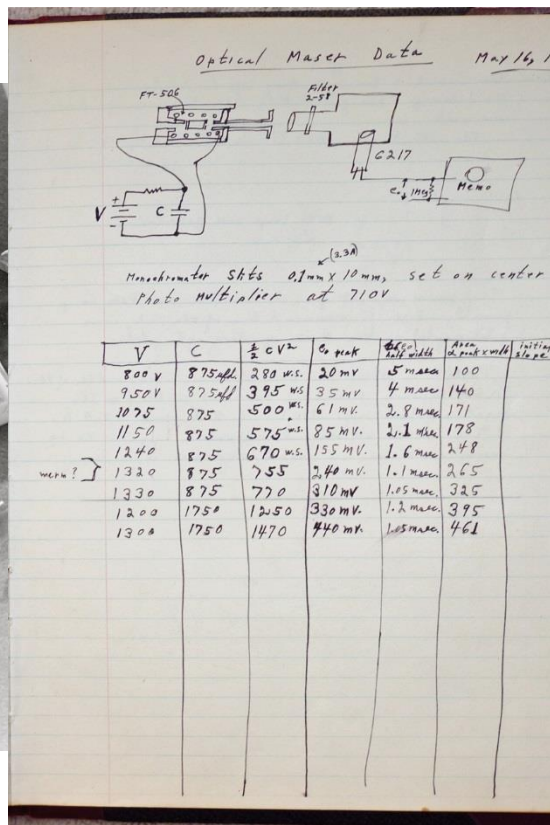
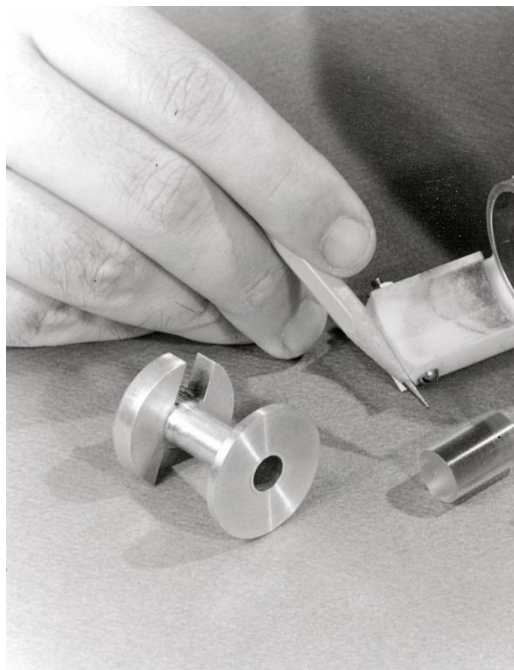
Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching
Ludwig-Maximilians-Universität München

Az első lézer

Indukált emisszió elmélete:

Einstein

1917



Kísérlet:

Theodore Maiman

1960



Lézerek alkalmazásai

a mindennapi életben

- CD/DVD lejátszó
- vonalkód olvasó
- fényorompó
- lézeres mutató
- sebességmérés
- hosszúságmérés
- ...



az orvostudományban

- sebészeti beavatkozás (pl. szem korrekció, lézerek)
- precíz helymeghatározás (pl. a sugárterápiában)
- kórkép meghatározási alkalmazások
- ...



az iparban

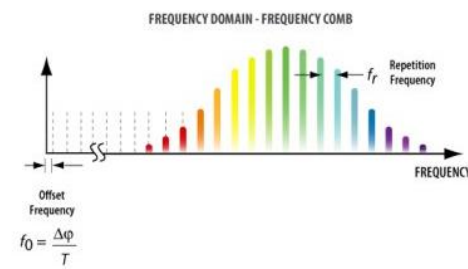
- anyagok megmunkálása (vágás, fúrás, ponthegeztés...)
- precíz helymeghatározás
- folyamatos ellenőrzés
- ...

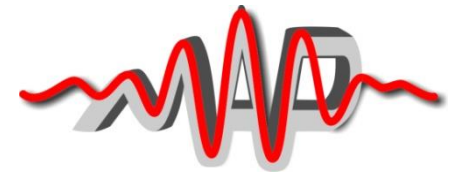


National Ignition Facility

a kutatásban

- spektroszkópia
- attoszekundumos fizika
- lézer-anyag kölcsönhatás
- nemlineáris optika
- fúziós kutatás
- nanostruktúrák
- precíz frekvenciamérés
- kvantum információ
- ..



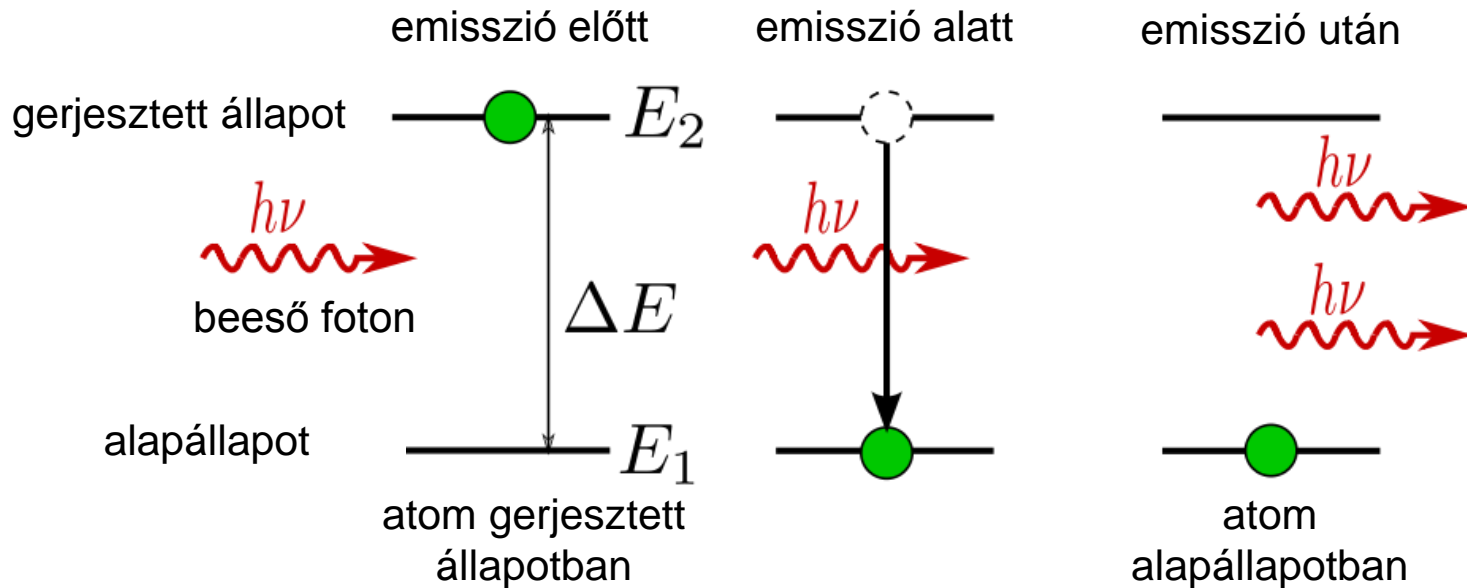


Az előadás vázlatja

- **A lézer működési elve**
- **Lézerfény tulajdonságai**
- **Kísérleti bemutató**
- **Extrém környezetek: ultrarövid lézerimpulzusok**
 - Rövid impulzusok előállítása
 - Alkalmazások
- **Kitekintés: „Extreme Light Infrastructure”**

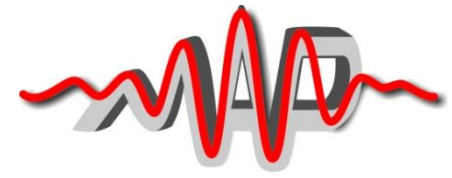
Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

→ Fényerősítés stimulált (indukált) emisszióval
 Atomok energiaszintjei a lézeraktív médiumban:

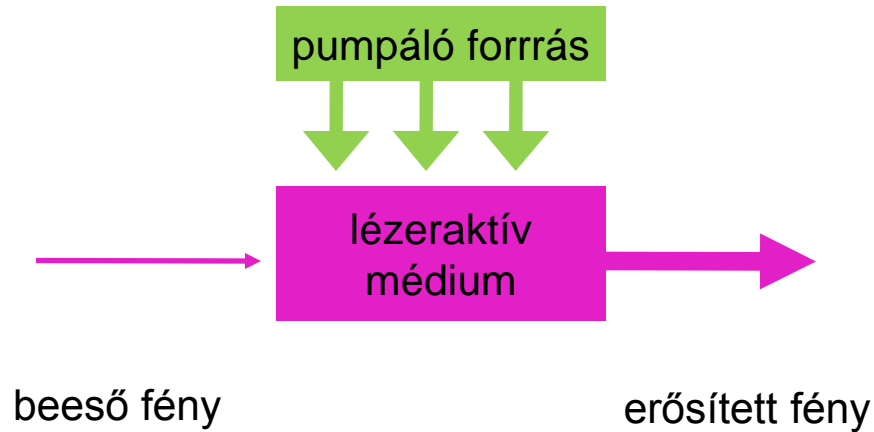


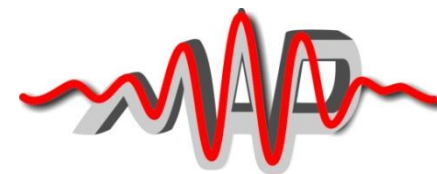
$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$

Forrás: Wikipedia

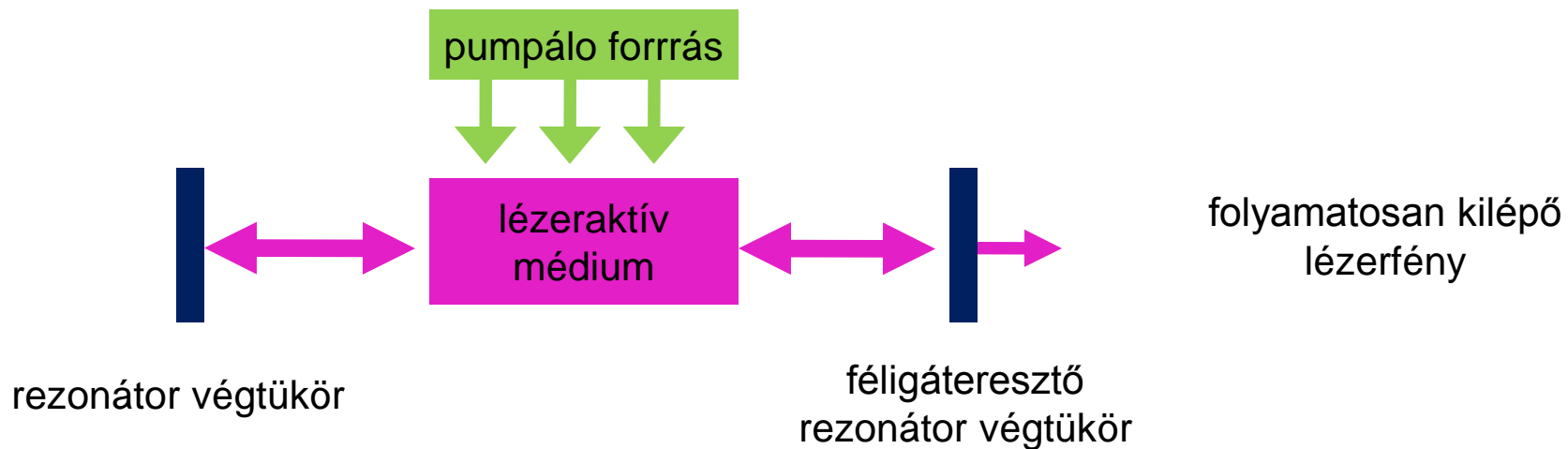


Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

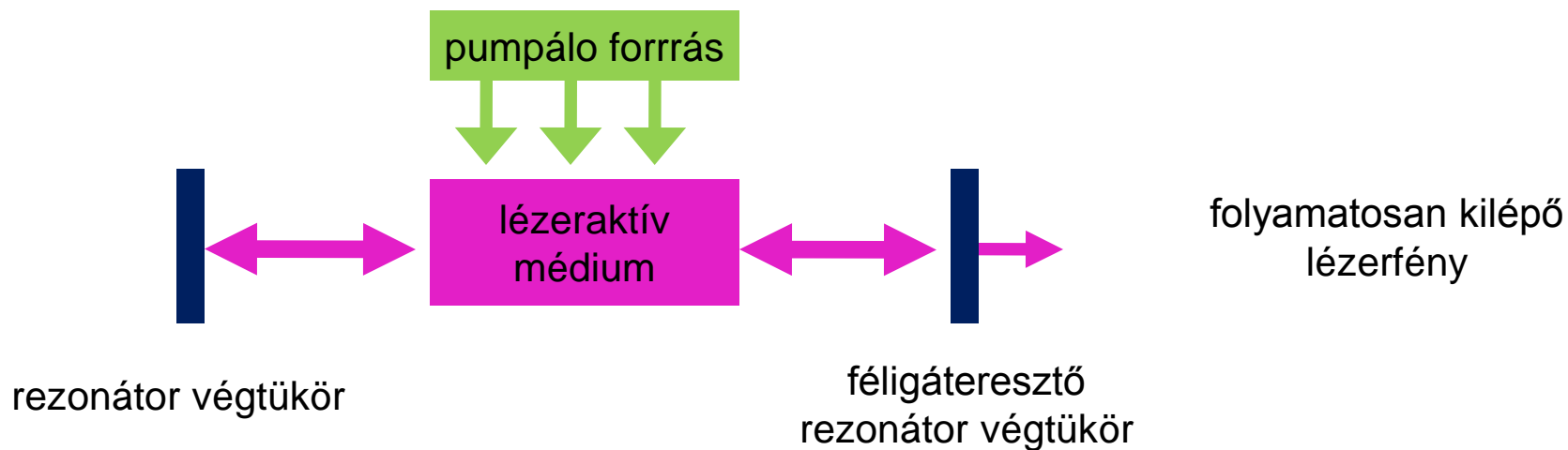




Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation



A lézerfény speciális tulajdonságai:

- koherens
- monokromatikus
- lineárisan polarizált



Kísérleti bemutató: A lézerfény speciális tulajdonságai

- **Koherencia**
 - 1. kísérlet: interferométer
 - 2. kísérlet: „speckle” mintázat
 - 3. kísérlet: diffrakció – egy hajszál vastagsága
- **Spektrum**
 - 4. kísérlet: optikai spektrométer

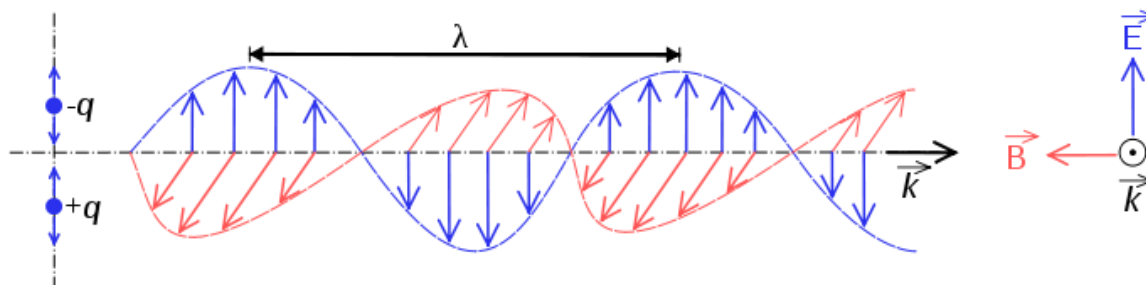
Impulzus üzemű lézerek – miért használunk rövid impulzusokat?

$$\text{teljesítmény [watt]} = \frac{\text{energia [joule]}}{\text{idő [másodperc]}}$$

- erőmű – elektromos teljesítmény:
~ 300 millió watt
→ 300.000.000 W = 300 x 10⁶ W = 300 MW
- a Nap besugárzása a Földre: 1.7 x 10¹⁷ W

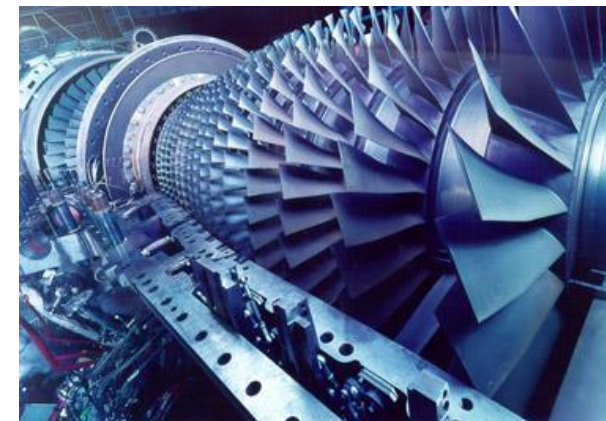


$$\text{intenzitás [watt/cm}^2\text{]} = \text{teljesítménysűrűség [watt/cm}^2\text{]} = \frac{\text{teljesítmény [watt]}}{\text{terület [cm}^2\text{]}}$$



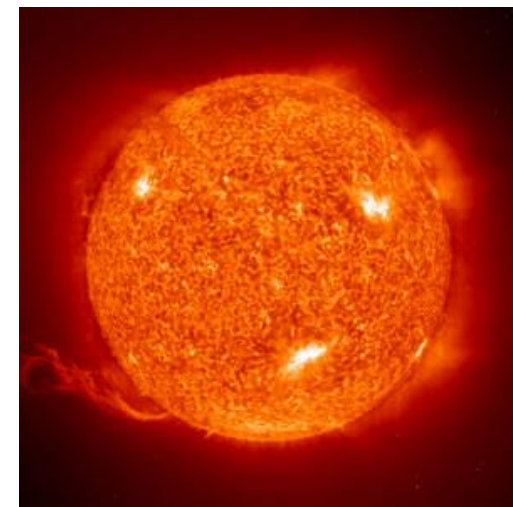
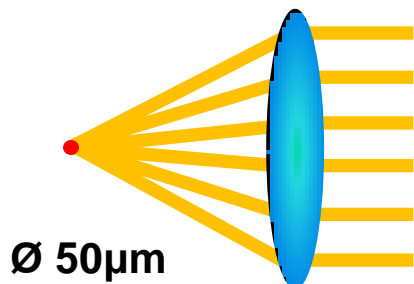
fény: intenzitás ~ (elektromos térerősség)²

→ **megoldás:** rövid impulzusok



Rövid impulzusok intenzitása

Hogyan lehet 10^{22} W/cm^2 intenzitást elérni?



1 terawatt teljesítmény:

$$1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W} = 20 \text{ mJ} / 20 \text{ fs}$$

$$\rightarrow 10 \text{ µm-re fókuszálva: } \sim 10^{18} \text{ W/cm}^2$$

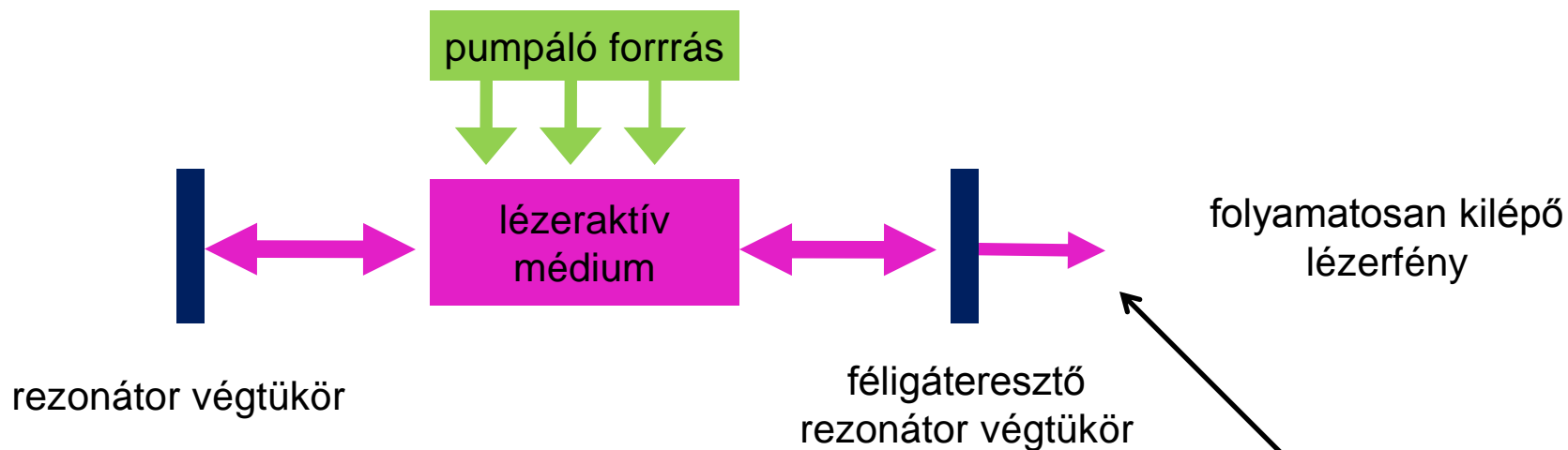
1 petawatt teljesítmény :

$$1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W} = 20 \text{ J} / 20 \text{ fs}$$

$$\rightarrow 10 \text{ µm-re fókuszálva: } \sim 10^{21} \text{ W/cm}^2$$

A Nap besugárzása Németország területére $\sim 0.5 \times 10^{15} \text{ W} \rightarrow$ **0.5 petawatt (PW)**

Impulzusüzemű lézerek

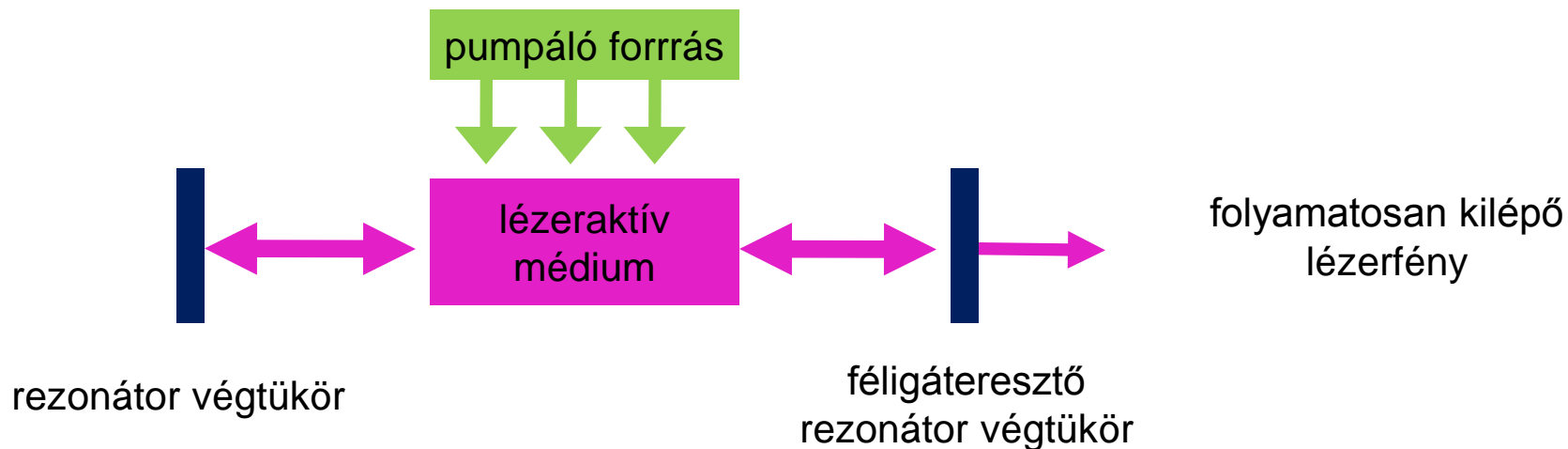


Hogyan lehet lézerimpulzusokat előállítani?

- “chopper” → milliszekundumos impulzusok (10^{-3} s)



Impulzusüzemű lézerek



Hogyan lehet lézerimpulzusokat előállítani?

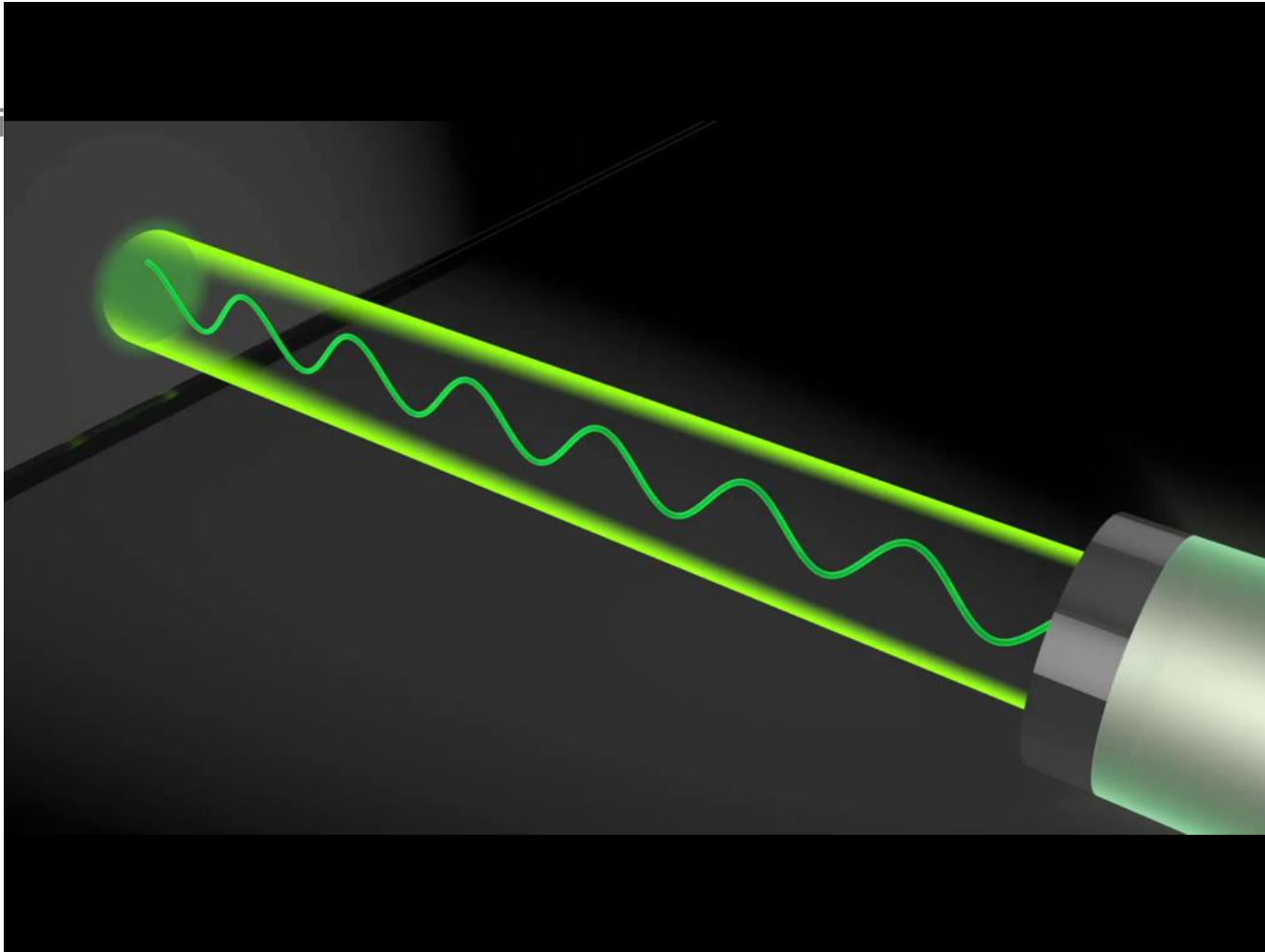
Trükkök:

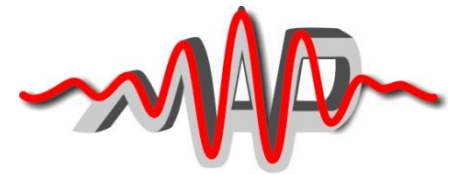
- „q-kapcsolás” (nanoszekundumos/pikoszekundumos impulzusok 10^{-9} – 10^{-12} s)
- „móduscsatolás” (femtosekundumos impulzusok 10^{-15} s)

Lézerimpulzusok hossza

Móduscsatolás

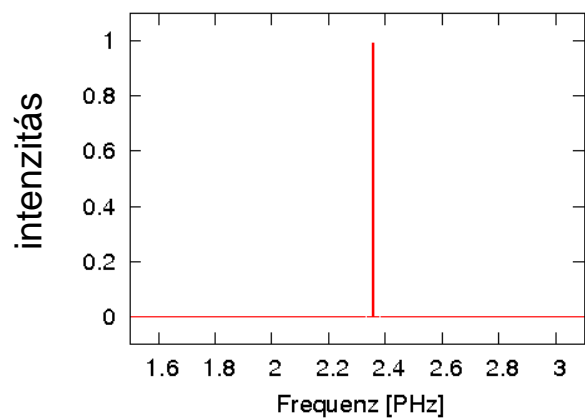
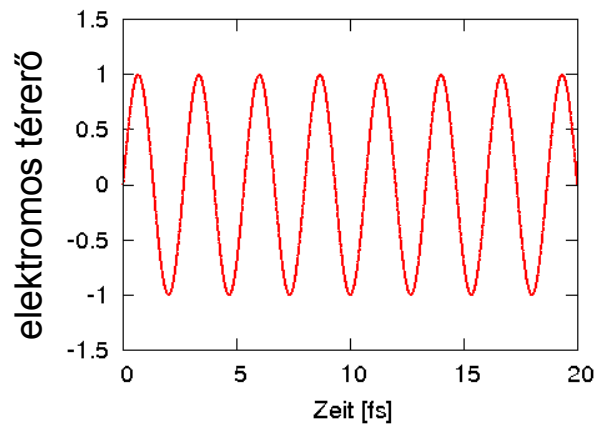
animati

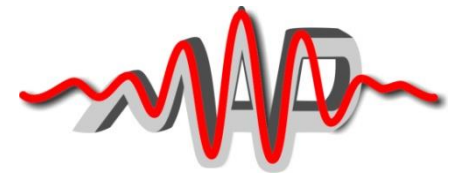




Impulzushossz – frekvencia spektrum

monokromatikus fény

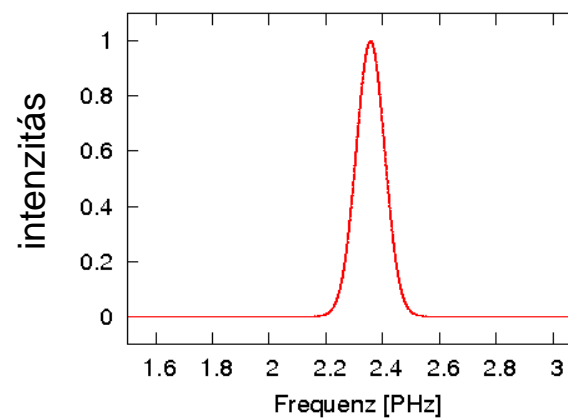
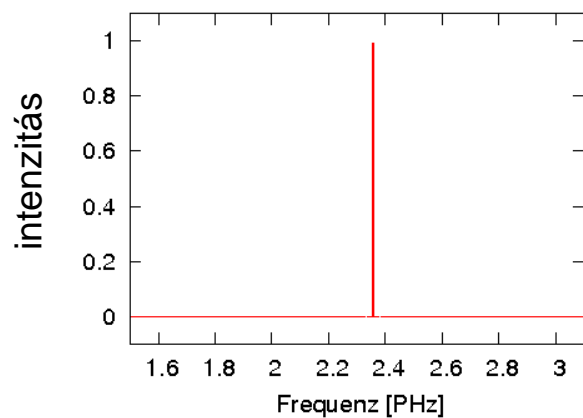
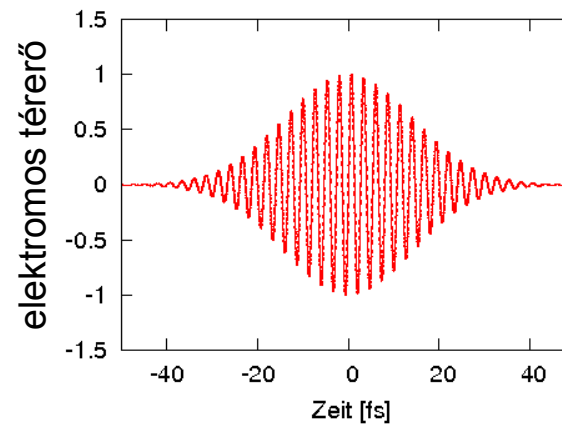
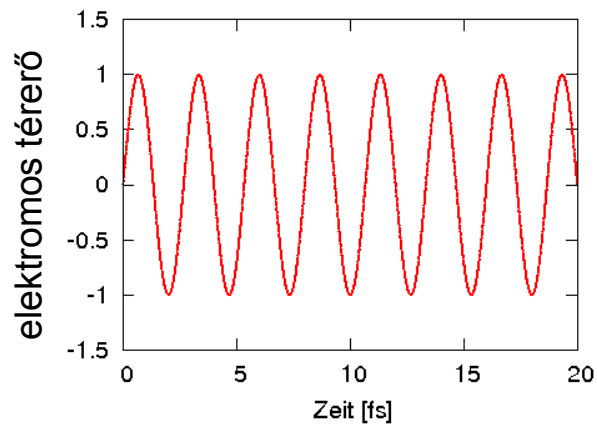


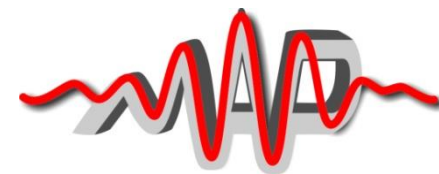


Impulzushossz – frekvencia spektrum

monokromatikus fény

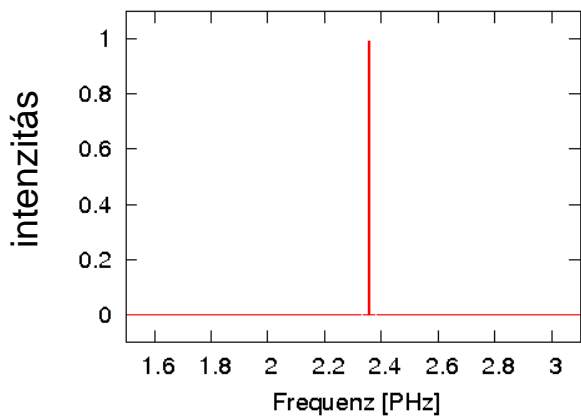
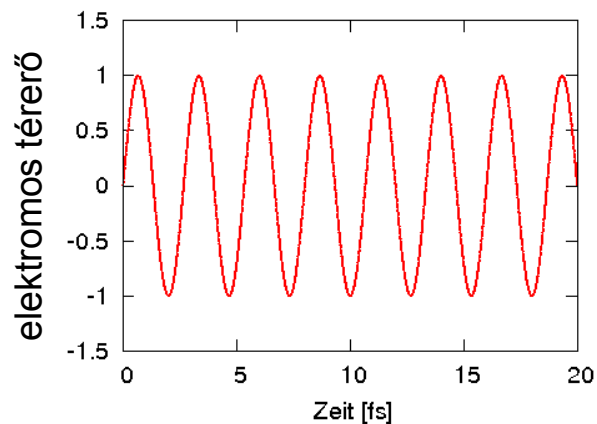
20 fs-os impulzus



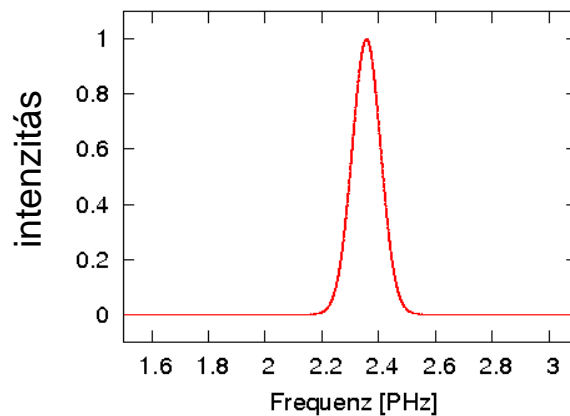
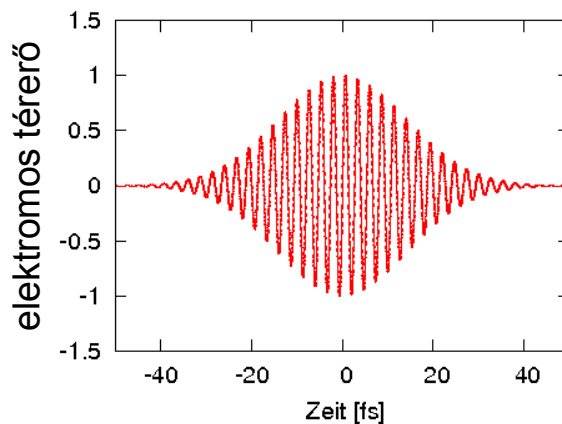


Impulzushossz – frekvencia spektrum

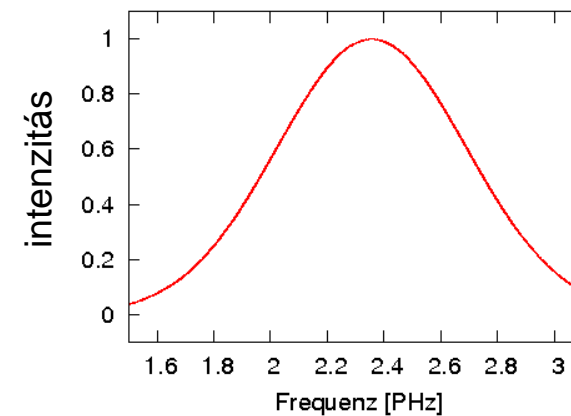
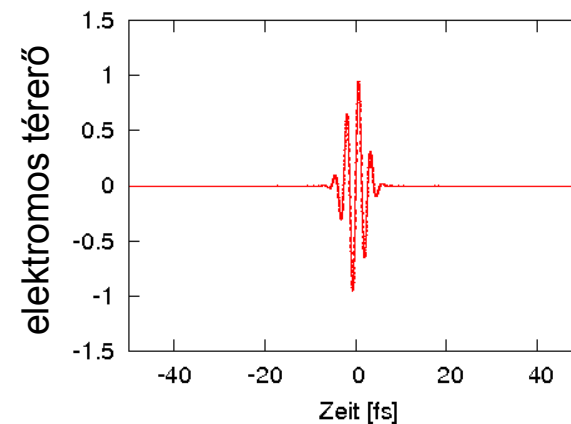
monokromatikus fény



20 fs-os impulzus



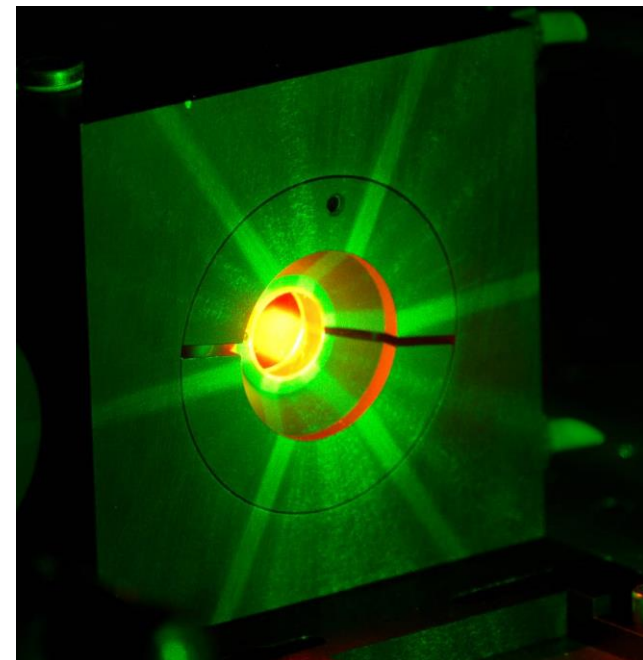
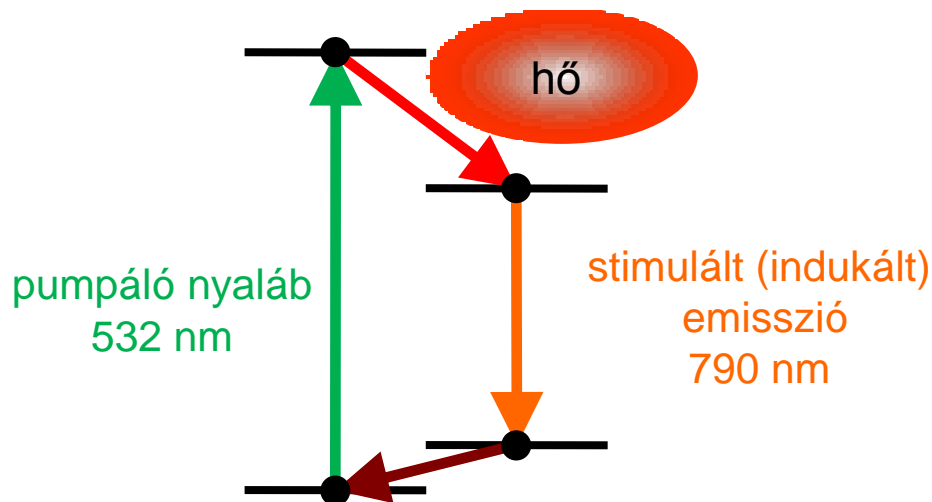
5 fs-os impulzus



Rövid lézerimpulzusok erősítése

Light Amplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

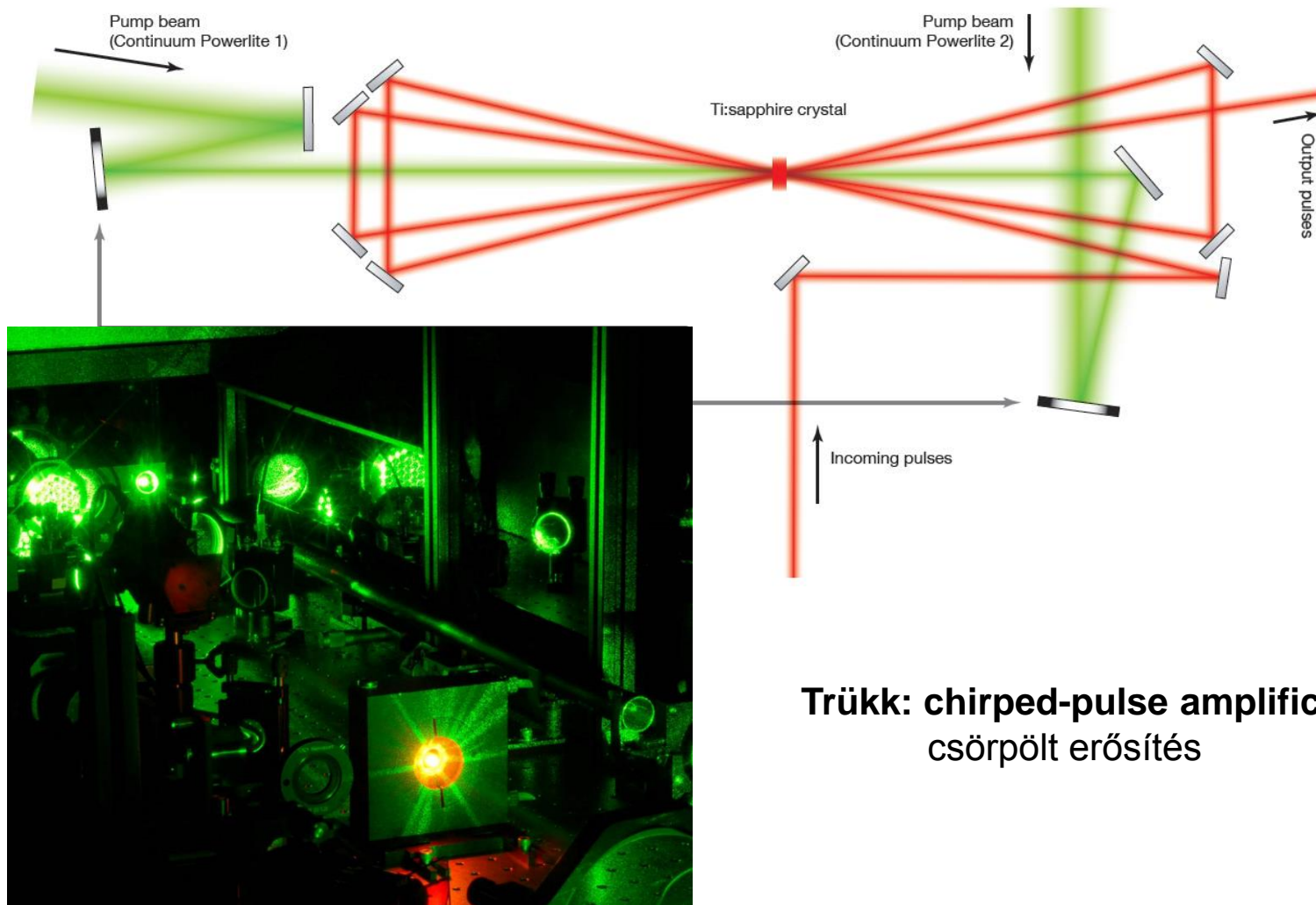
Példa: Titán-Zafír ($\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$)



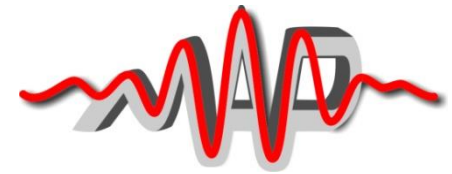
Titán-zafír lézerkristály az
ATLAS-lézerben (MPQ/CALA)

pumpáló lézer hullámhossza: 532 nm

Nagy energiájú impulzusok



Trükk: chirped-pulse amplification (CPA)
csörpölt erősítés

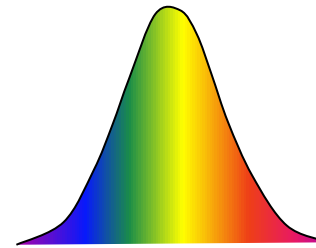


Chirped-pulse amplification (CPA)

nyújtás



erősítés



összenyomás



bemenő impulzus:
1 μ J, < 44 fs

nyújtott impulzus:
1 μ J, 350 ps

nyújtott, erősített
impulzus:
1.8 J, 350 ps

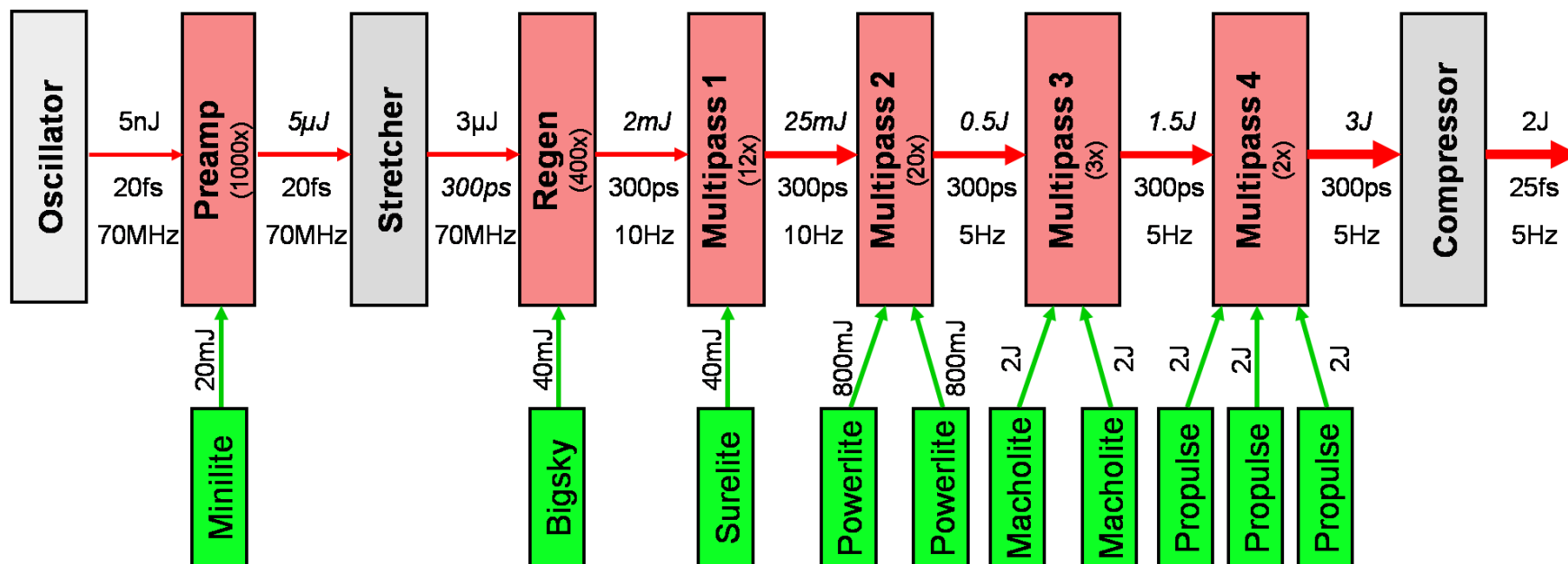
összenyomott,
nagyenergiás
impulzus:
1.2 J, 44 fs





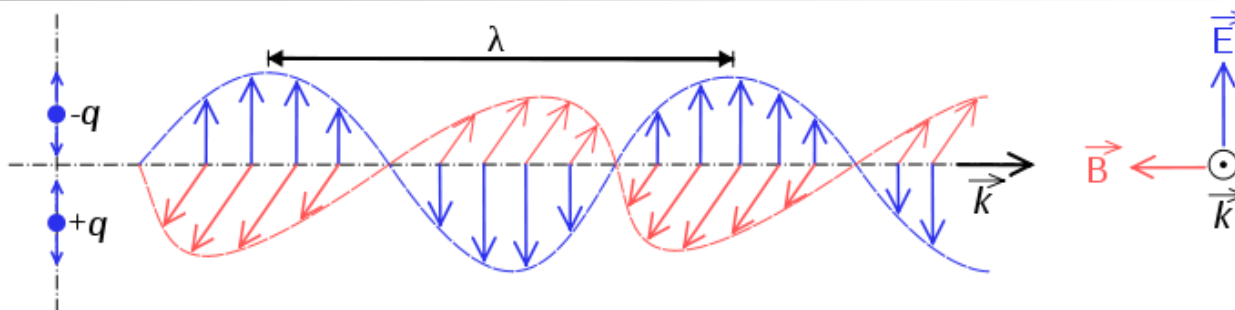
Magas teljesítményű lézerrendszer blokkdiagrammja

ATLAS az MPQ-ban/CALA-ban





Elektron elektromágneses térben: relativisztikus lézer impulzusok



elektron mozgási egyenlete síkhullám elektromágneses térben:

$$m_e \frac{d}{dt} (\gamma \vec{v}) = -e (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad \rightarrow$$

az elektron a tér negyedperiódusa alatt relativisztikus sebességre gyorsul

normált vektorpotenciál:

$$a_0 = \frac{e |\vec{A}|}{m_e c} \quad \begin{array}{l} a_0 \ll 1: \text{nemrelativisztikus} \\ a_0 > 1: \text{relativisztikus} \end{array}$$

$\rightarrow 10^{12} \text{ W} = \text{TW}$ lézerteljesítmény szükséges

$$\vec{A}(\vec{x}, t) = \vec{A}_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x} + \phi)$$

lézerimpulzusok:

$$P = 20 \text{ mJ} / 20 \text{ fs} = 10^{12} \text{ W} = 1 \text{ TW}$$

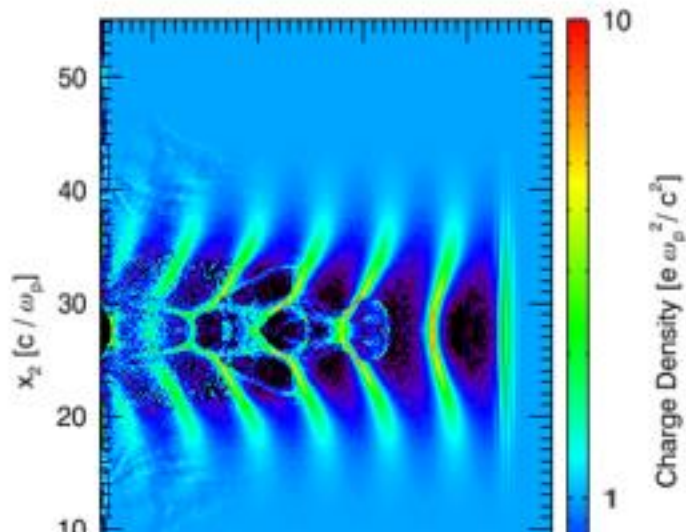
$$P = 20 \text{ J} / 20 \text{ fs} = 10^{15} \text{ W} = 1 \text{ PW}$$

lézer intenzitás:

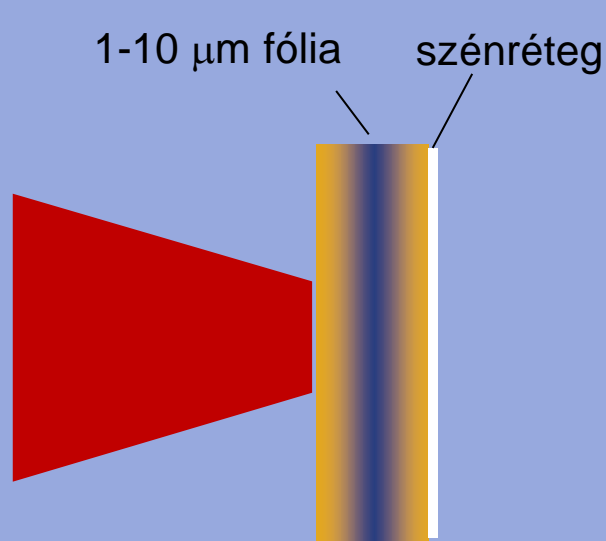
$$I_L > 10^{18} \text{ W/cm}^2 \\ \text{at } \lambda = 1 \mu\text{m}$$

relativisztikus leírás szükséges

Elektrongyorsítás lézerekkel: „laser-wakefield acceleration”

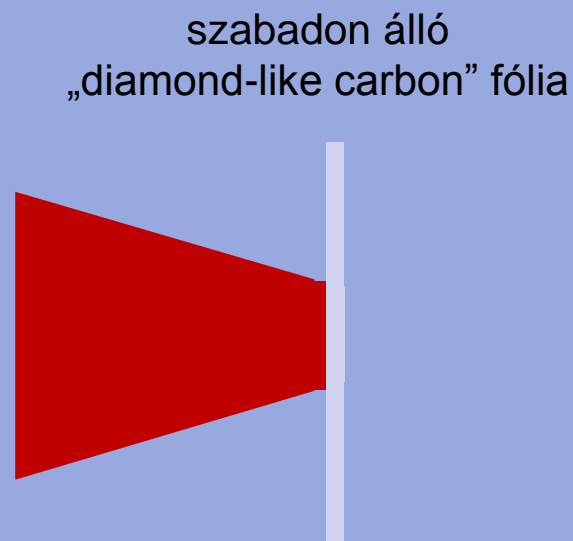


longyorsítás



„Target-normal sheath acceleration”

Jelenleg >5 MeV protonnyaláb érhető el DLC fóliákkal. Első alkalmazások az orvostudomány irányába \rightarrow rákkezeléshez magasabb energiára van szükség $\sim 25\text{-}100$ MeV/u

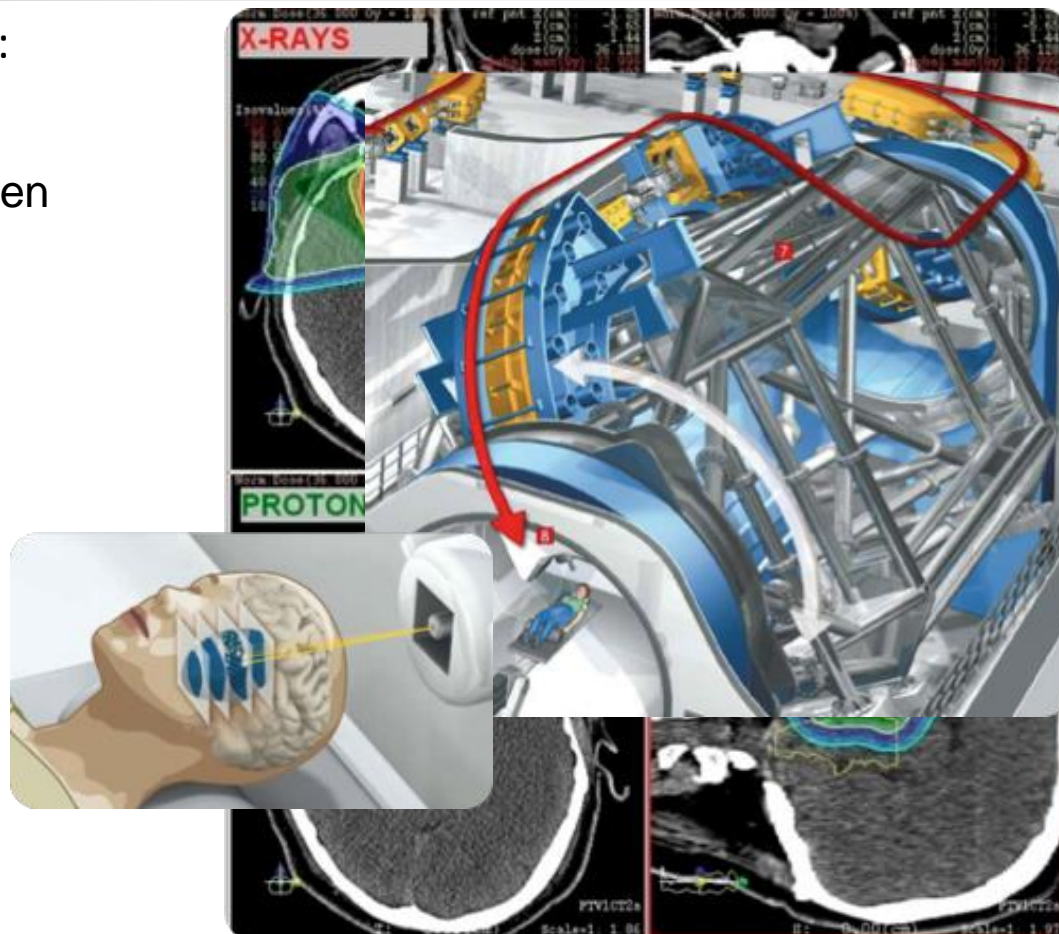
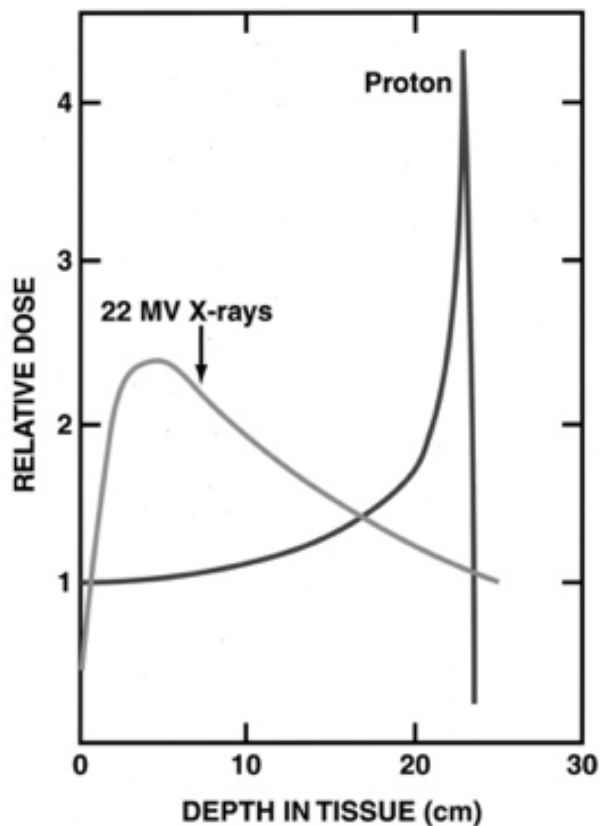


gyorsítás fénynyomással

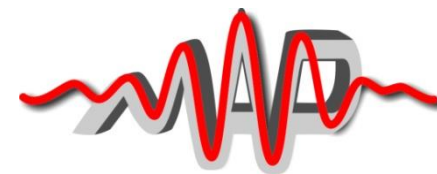
longyorsítás

Ionsugár alkalmazása a rákkezelésben:

Röntgensugár és ionsugár dóziseloszlása biológiai szövetben



Jelenleg nagy készülékekre van szükség az ionterápiában (pl. Heidelberg)



Extreme Light Infrastructure – ELI



Nagyteljesítményű lézer
laboratóriumok hálózata
Európában

Csehország

Magyarország (Szeged)

Románia

ELI-Beamlines, Prága



100 mJ/20 fs/1 kHz
20J/15 fs/10 Hz
30 J/30 fs/0.1-10 Hz
2 kJ/130 fs → 10 PW

Célok:

- lézeres részecskegyorsítás, lézerrel keltett röntgensugárzás és ezen források alkalmazásai
- nemzetközi nagyberendezés felhasználók számára (user facility)

ELI-ALPS, Magyarország



Célok:

- attoszekundumos fizika
- időfelbontott anyagtudomány és biológia
- nemzetközi nagyberendezés felhasználók számára (user facility)

1 mJ/8 fs/1 kHz
1 J/8 fs/1 kHz
1J/12 fs/100Hz
40 J/15 fs/10 Hz

ELI-NP, Bucharest



**10 PW-os lézer
hagyományos elektron-
gyorsítással csatolva**

Célok :

- a fotoindukált nukleáris vizsgálatok
- asztrofizika a laborban
- anyagtudomány
- nemzetközi nagyberendezés felhasználók számára (user facility)

Köszönöm a figyelmet!

