

LASER

IDEA O OVLÁDNUTÍ SVETLA



DOMINIKA MAŠLÁROVÁ
ÚSTAV FYZIKY PLAZMATU AV ČR
FJFI ČVUT v Praze
11.10.2021, U3V MFF UK

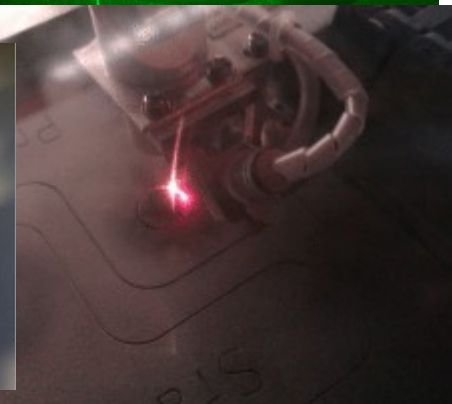
LASER-UNIVERZÁLNY OBJAV



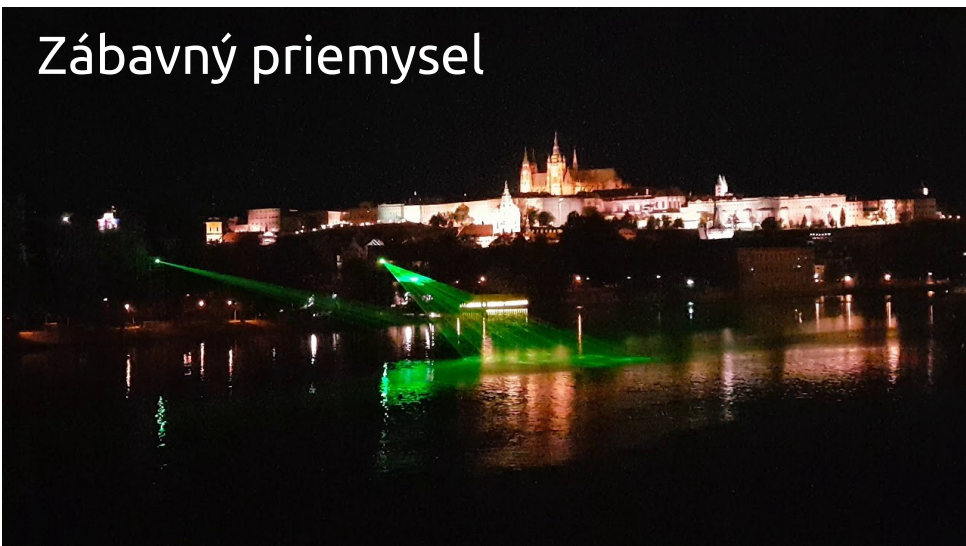
Komerčné
využitie



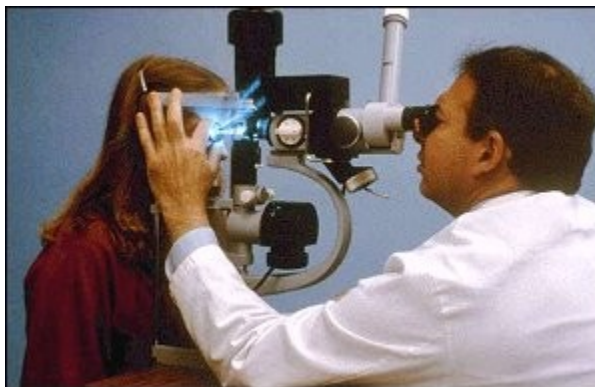
Priemysel



Zábavný priemysel

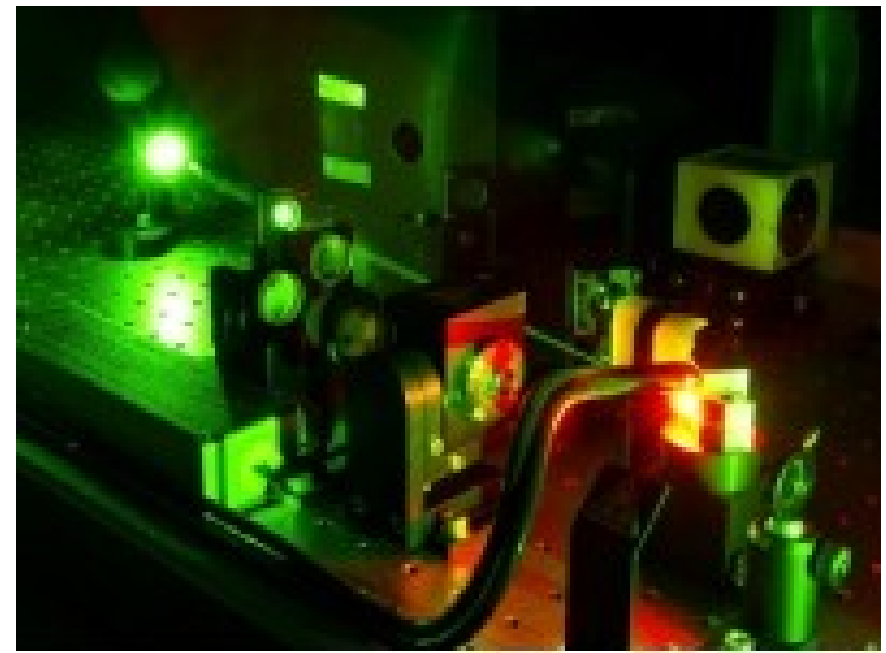


Medicína

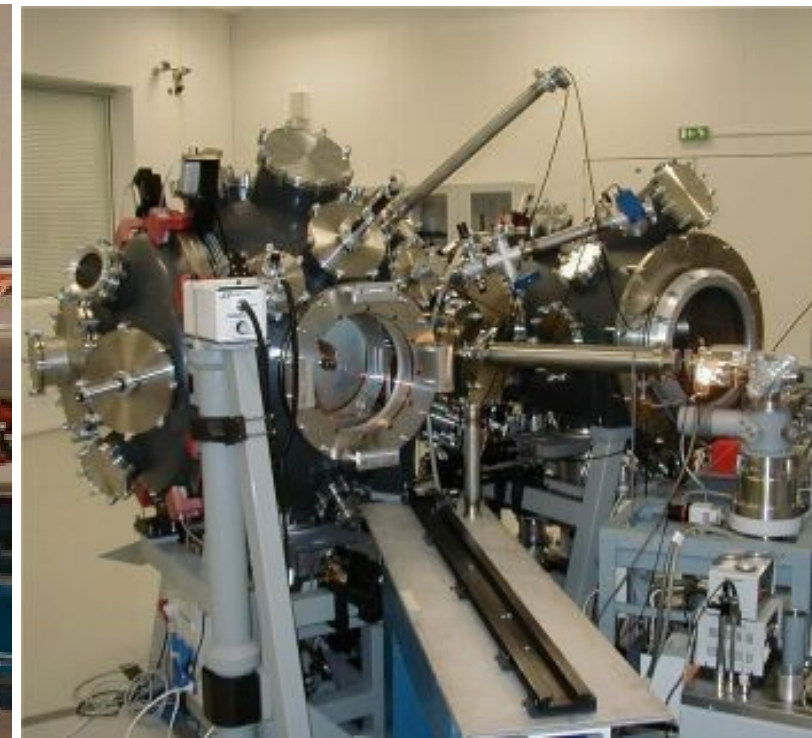
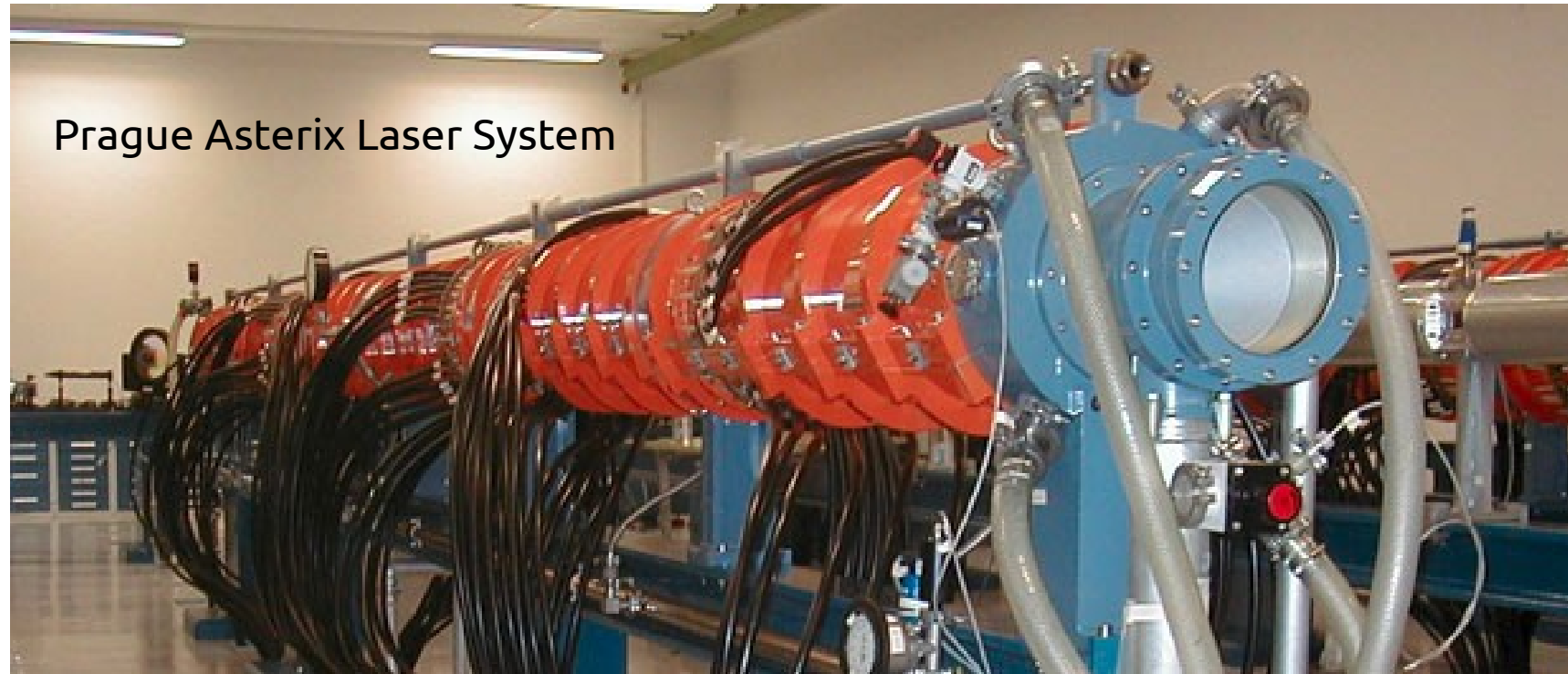


OBSAH PREZENTÁCIE

- Čo je to laser?
- Aké sú to vysokointenzívne lasere?
- Aplikácie vysokointenzívnych laserov
- Laserový urýchľovač



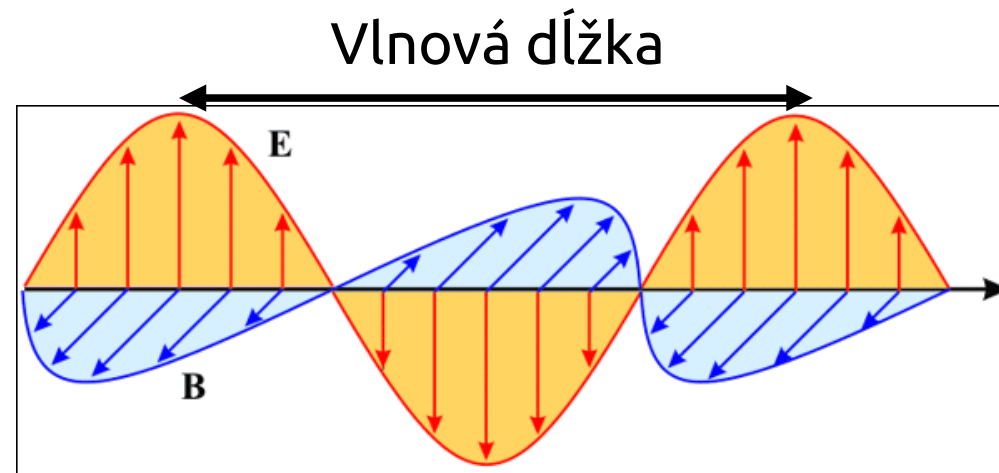
Prague Asterix Laser System



ČO JE TO LASER?

ČO JE TO SVETLO?

- Svetlo je **elektromagnetická vlna**
Má elektrické aj magnetické pole
Vlny sa môžu odrážať, lámať, ohýbať, skladať medzi sebou (interferovať)



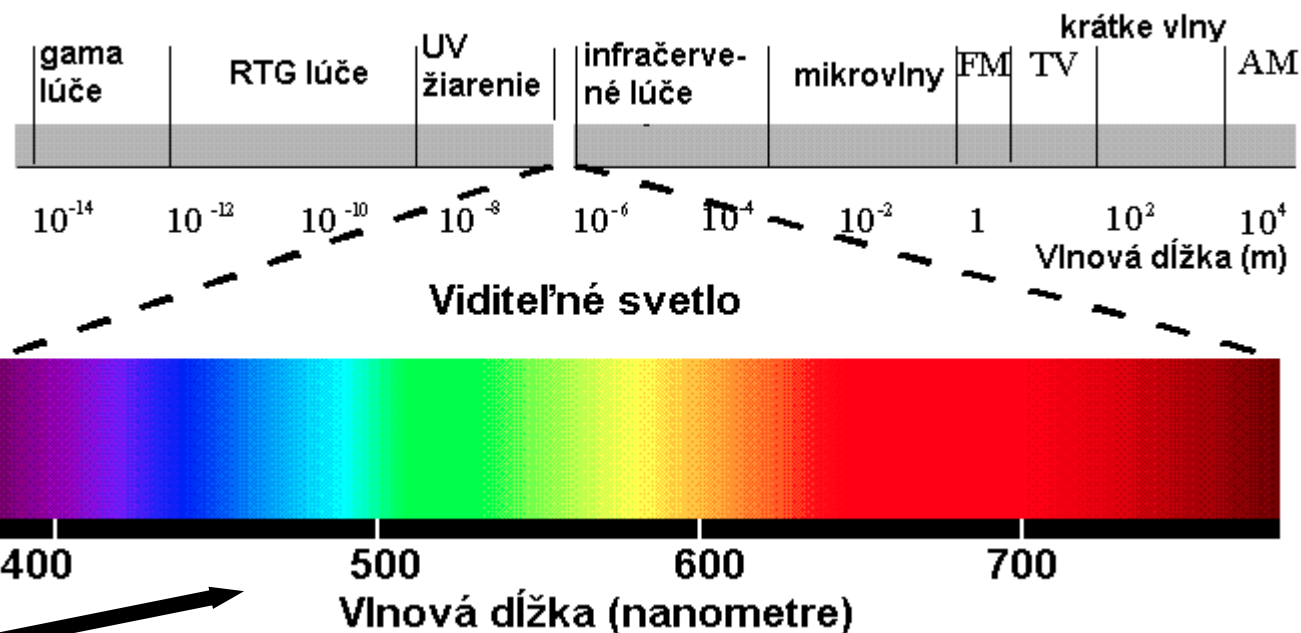
- Zároveň sa skladá z častíc, ktoré nazývame **fotóny**
Fotóny sú častice s nulovou hmotnosťou

Majú energiu $E=hc/\lambda$

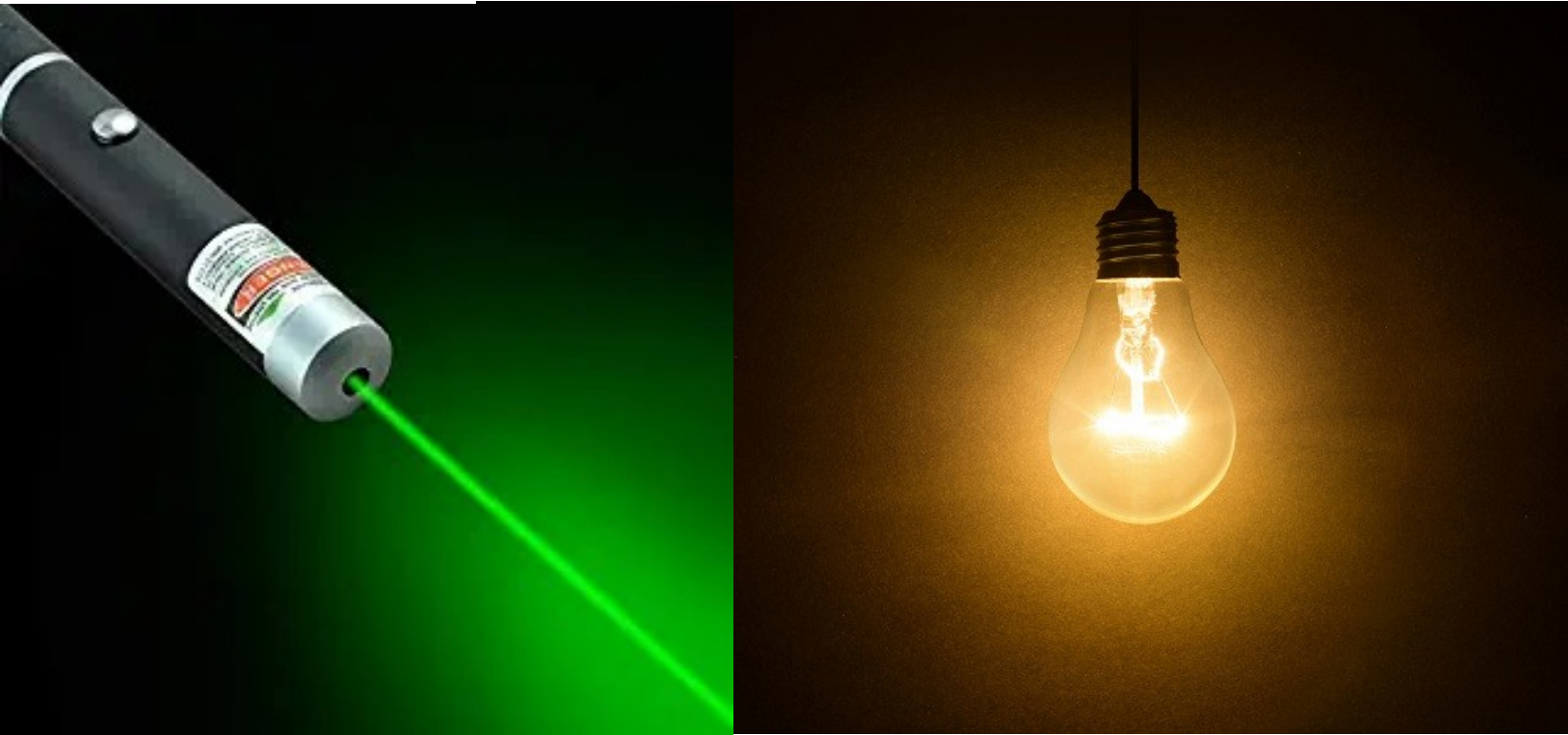
h - Planckova konštanta

c - rýchlosť svetla

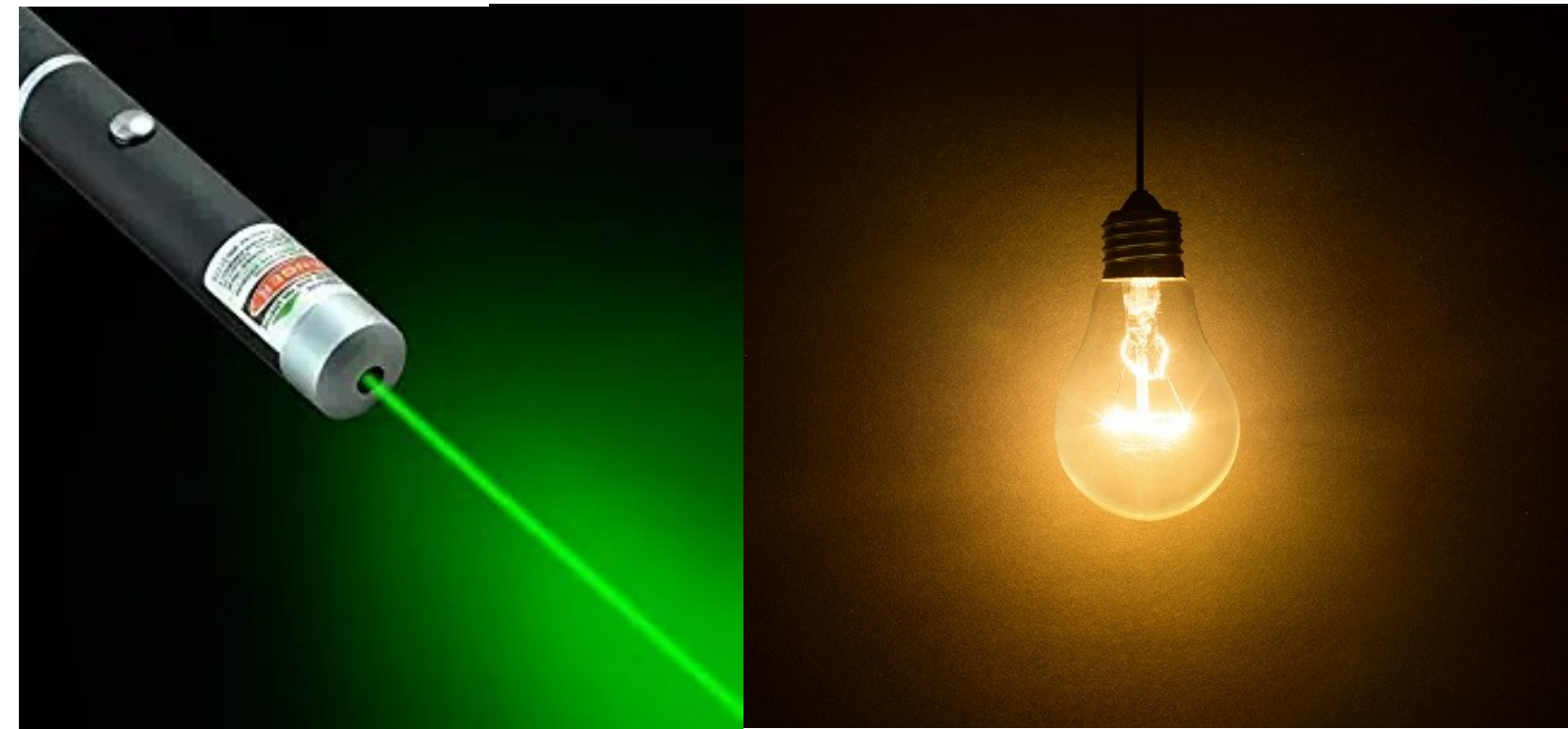
λ - vlnová dĺžka svetla



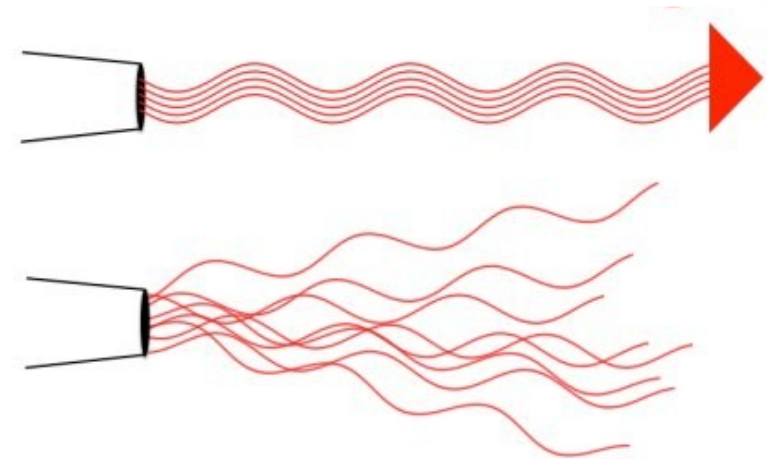
KLASICKÝ ZDROJ SVETLA VS. LASER



KLASICKÝ ZDROJ SVETLA VS. LASER



Koherentné svetlo:
rovnaká fáza aj smer



Nekoherentné
svetlo

- ✓ Koherentnosť
- ✓ Monochromatickosť
(jedna farba)
- ✓ Nízka rozbiehavosť

- ✗ Koherentnosť
- ✗ Monochromatickosť
(jedna farba)
- ✗ Nízka rozbiehavosť

INTERAKCIA FOTÓNU A ATÓMU

Atóm sa normálne nachádza v **základnej energetickej hladine**.
Interakciou so svetlom sa môže dostať do **vybudenej energetickej hladiny**.

INTERAKCIA FOTÓNU A ATÓMU

Atóm sa normálne nachádza v **základnej energetickej hladine**. Interakciou so svetlom sa môže dostať do **vybudenej energetickej hladiny**.

Absorpcia – látka pohlcuje fotóny žiarenia a elektróny prechádzajú na vyššie energetické hladiny.

Vyššia energetická hladina

E_2

Fotón



Elektrón v atóme

E_1



Nižšia energetická hladina

INTERAKCIA FOTÓNU A ATÓMU

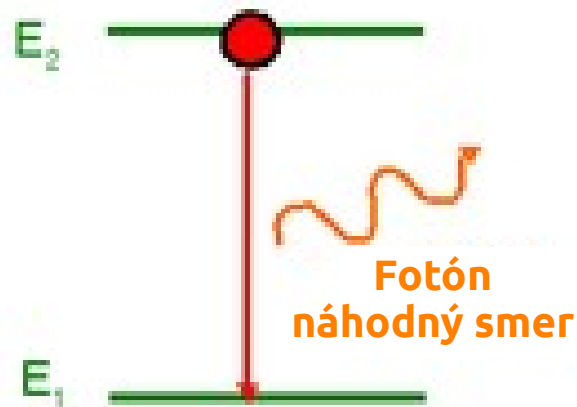
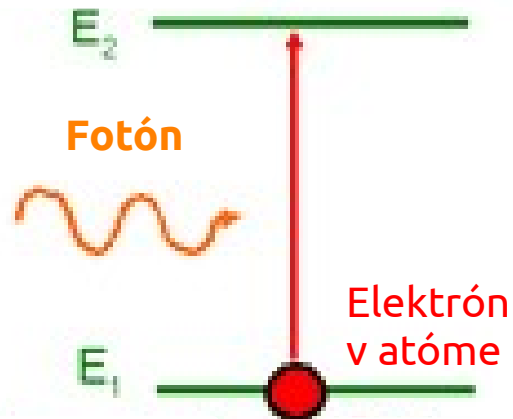
Atóm sa normálne nachádza v **základnej energetickej hladine**. Interakciou so svetlom sa môže dostať do **vybudenej energetickej hladiny**.

Absorpcia – látka pohlcuje fotóny žiarenia a elektróny prechádzajú na vyššie energetické hladiny.

Spontánna emisia – elektróny samovoľne prechádzajú z vyššej energetickej hladiny na nižšiu a atómy vyžarujú fotóny.

Vyššia energetická hladina

Nižšia energetická hladina



INTERAKCIA FOTÓNU A ATÓMU

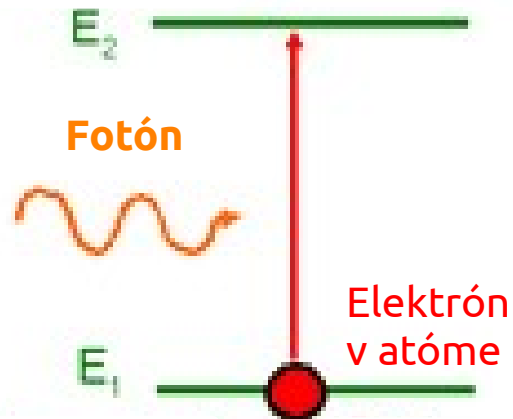
Atóm sa normálne nachádza v **základnej energetickej hladine**. Interakciou so svetlom sa môže dostať do **vybudenej energetickej hladiny**.

Absorpcia – látka pohlcuje fotóny žiarenia a elektróny prechádzajú na vyššie energetické hladiny.

Spontánna emisia – elektróny samovoľne prechádzajú z vyššej energetickej hladiny na nižšiu a atómy vyžarujú fotóny.

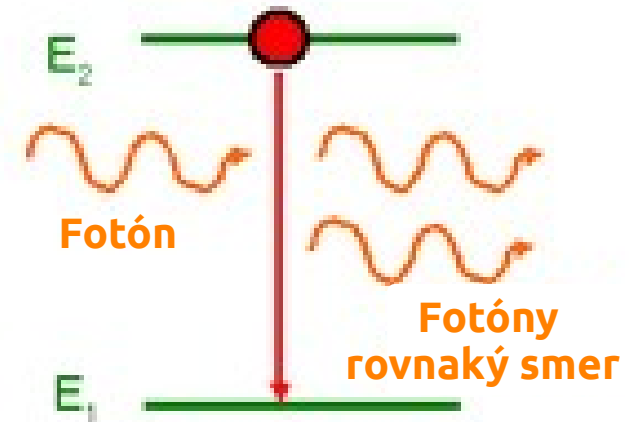
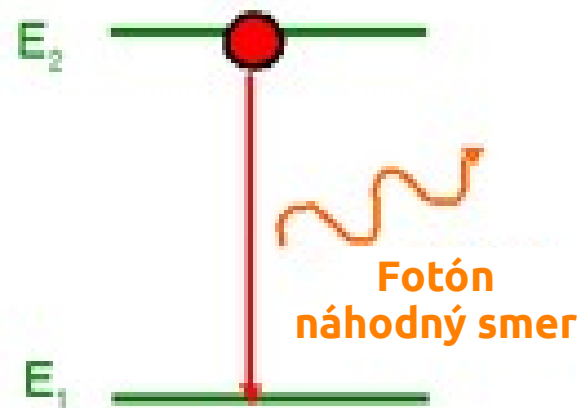
Stimulovaná emisia – nastáva v energeticky vybudených atóмоch. Fotón vylúčený emisiou má rovnakú frekvenciu ako fotón, ktorý emisiu vyvolal.

Vyššia energetická hladina



Elektrón v atóme

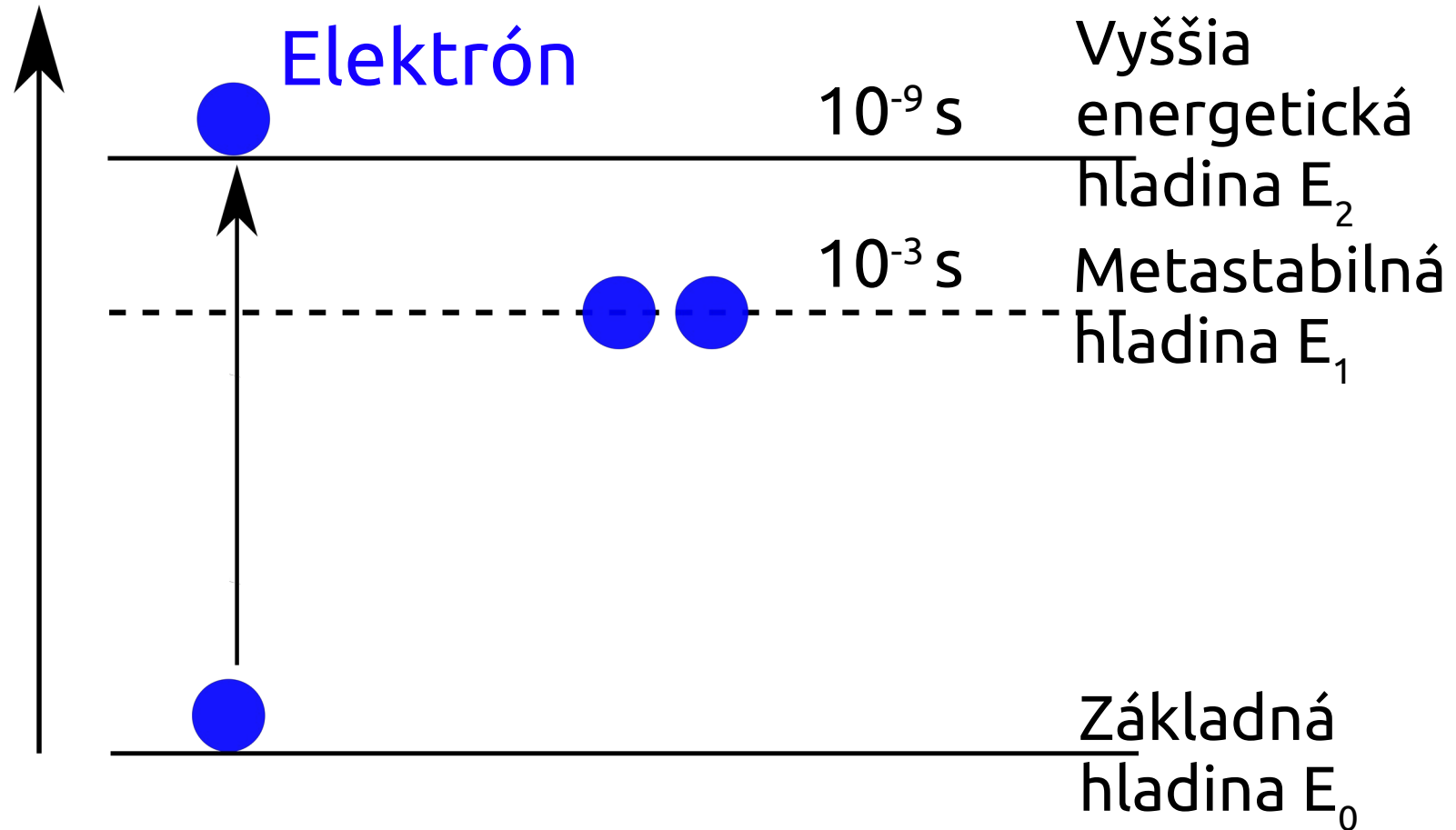
Nižšia energetická hladina



Po dodaní energie z externého zdroja prejdú elektróny zo základnej hladiny do vyššej energetickej hladiny. Odtiaľ spadnú prakticky okamžite na metastabilnú hladinu. Fotón s energiou rovnou rozdielu energií medzi metastabilnou a základnou hladinou interaguje s elektrónom, elektrón sa vráti na základnú hladinu a vyžiari rovnaký fotón. Vzniká lavínový efekt a svetlo sa zosilňuje.

PRINCÍP FUNGOVANIA LASERU

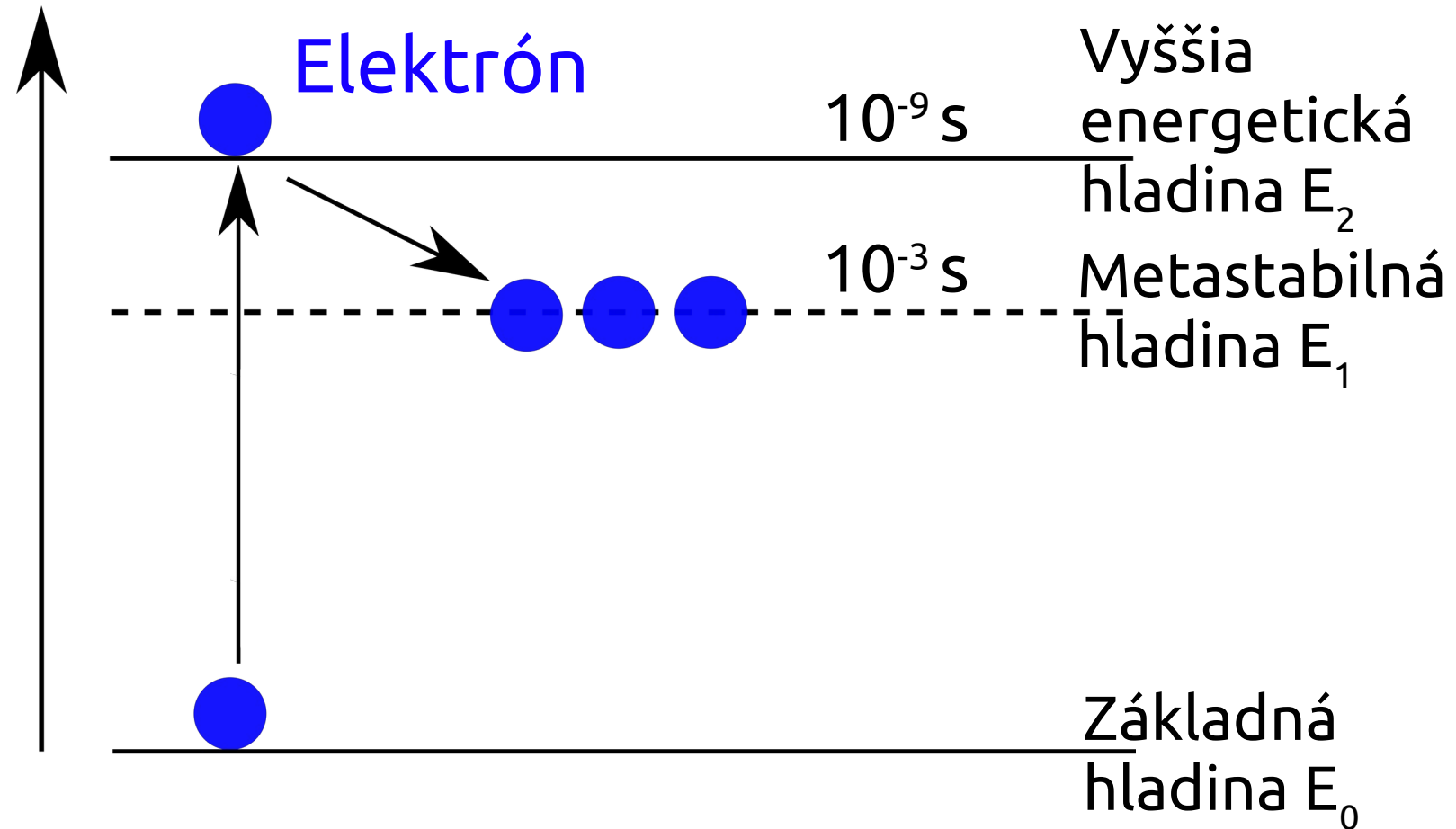
Energetické hladiny



Po dodaní energie z externého zdroja prejdú elektróny zo základnej hladiny do vyššej energetickej hladiny. Odtiaľ spadnú prakticky okamžite na metastabilnú hladinu. Fotón s energiou rovnou rozdielu energií medzi metastabilnou a základnou hladinou interaguje s elektrónom, elektrón sa vráti na základnú hladinu a vyžiari rovnaký fotón. Vzniká lavínový efekt a svetlo sa zosilňuje.

PRINCÍP FUNGOVANIA LASERU

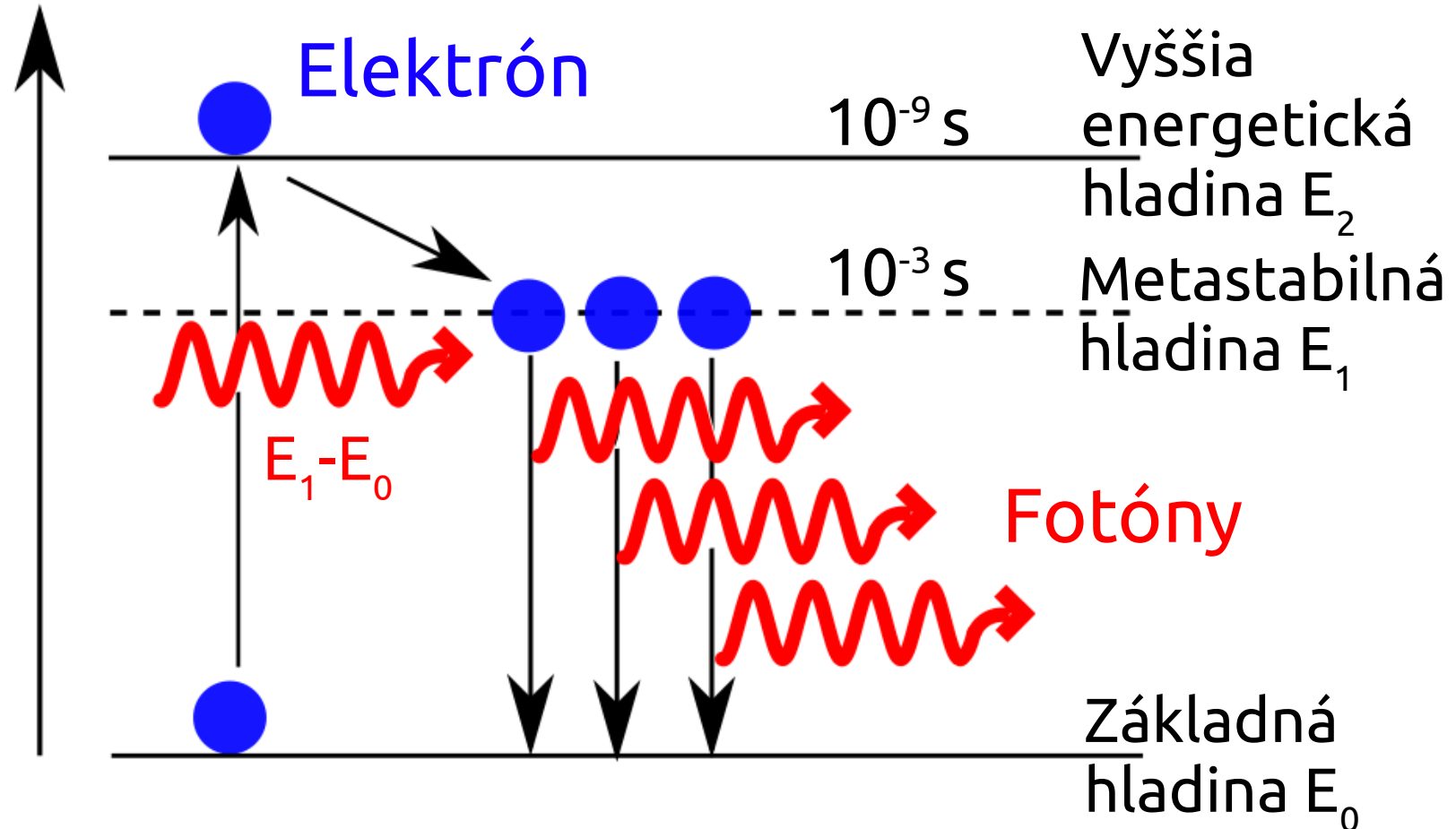
Energetické hladiny



Po dodaní energie z externého zdroja prejdú elektróny zo základnej hladiny do vyššej energetickej hladiny. Odtiaľ spadnú prakticky okamžite na metastabilnú hladinu. Fotón s energiou rovnou rozdielu energií medzi metastabilnou a základnou hladinou interaguje s elektrónom, elektrón sa vráti na základnú hladinu a vyžiari rovnaký fotón. Vzniká lavínový efekt a svetlo sa zosilňuje.

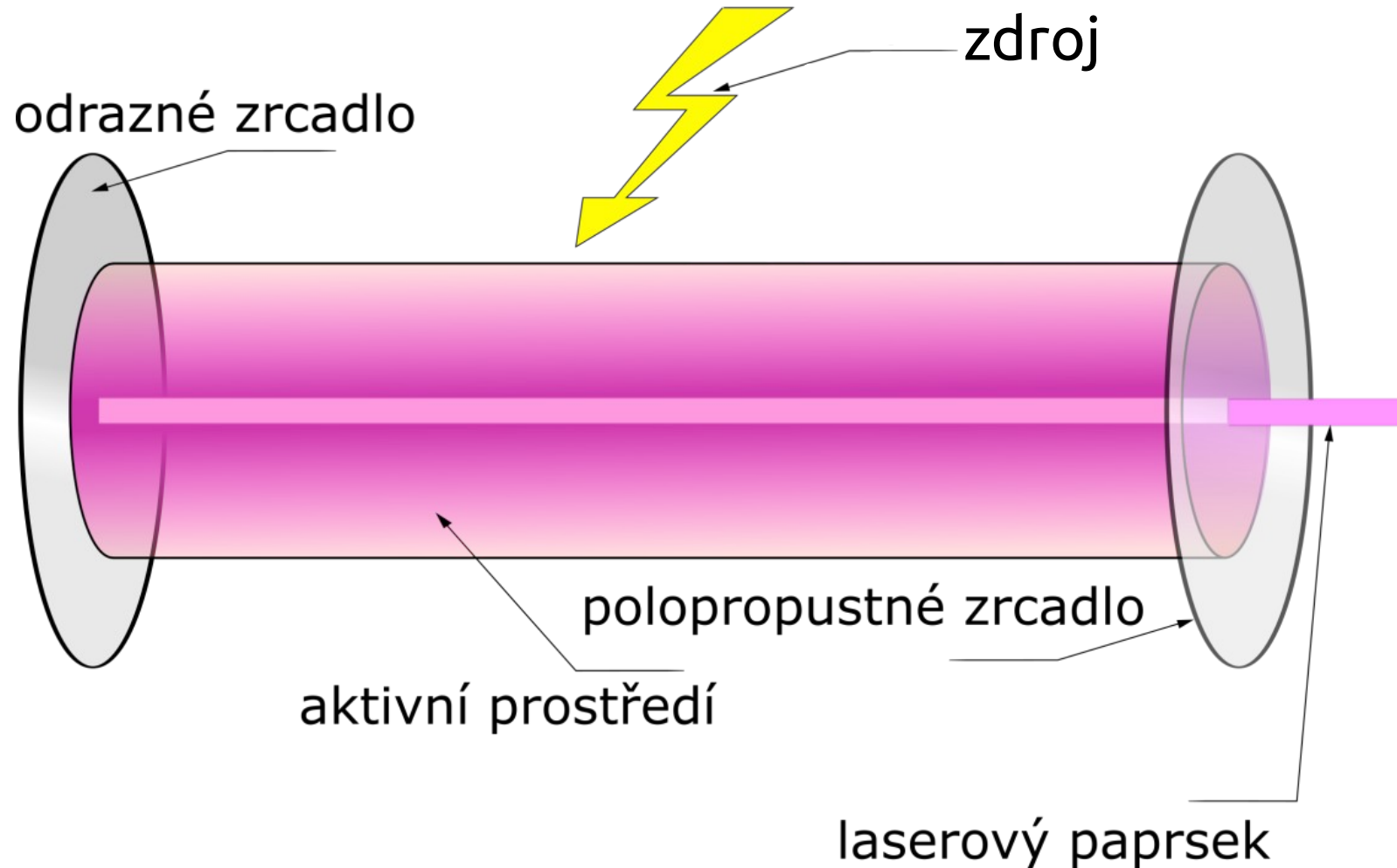
PRINCÍP FUNGOVANIA LASERU

Energetické hladiny



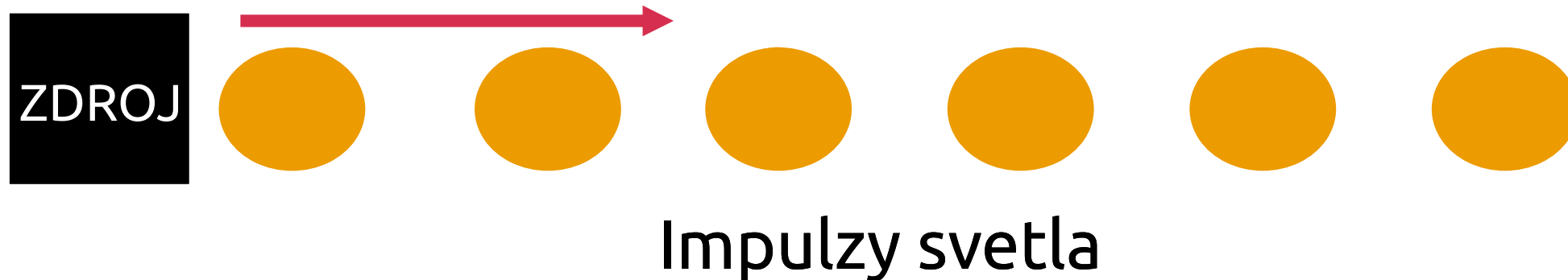
PRINCÍP FUNGOVANIA LASERU

- Stimulovaná emisia je vyvolaná v aktívnom prostredí
- Svetlo sa mnohonásobne odráža medzi zrkadlami, tým sa navyšuje jeho intenzita
- Výsledný paprsok je vypustený cez polopriepustné zrkadlo



Aktívne prostredie určuje výslednú vlnovú dĺžku laseru.

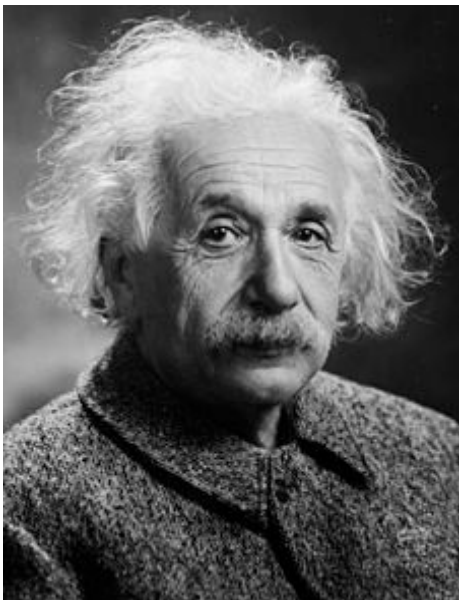
KONTINUÁLNE SVETLO VS. IMPULZY



Lasery dokážu fungovať v oboch režimoch.

HISTÓRIA LASERU

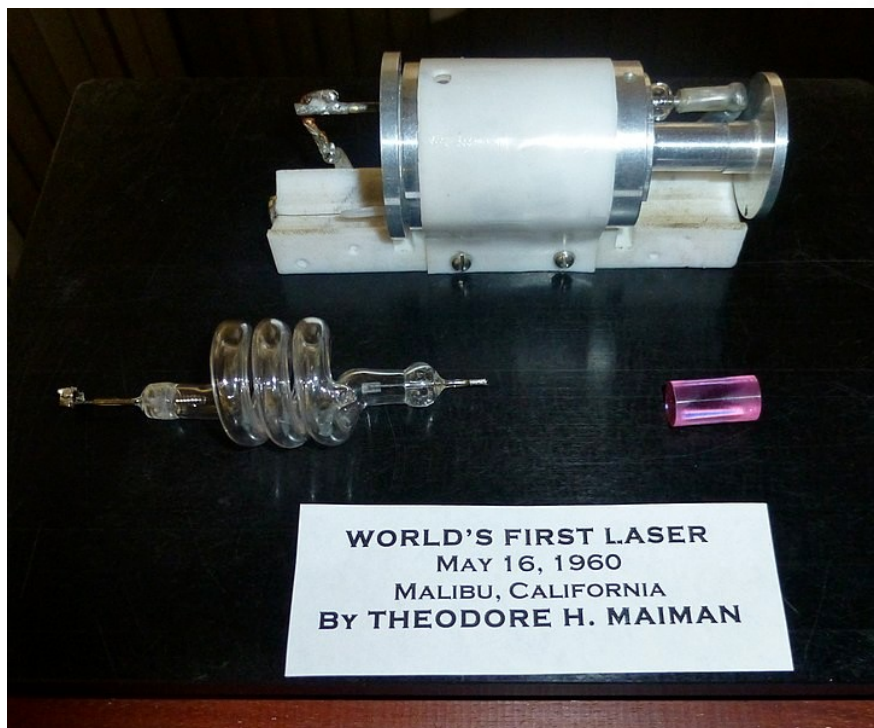
- LASER = zesilování světla stimulovanou emisí záření (anglický akronym)
- Generátor svetla využívajúci stimulovanú emisiu
 - Predpovedal Albert Einstein (1917)
- N.G. Basov a A.M. Prochorov predstavili MASER (1952), C.H. Townes zostavil MASER (1954), stimulovaná emisia mikrovln Nobelova cena 1964
- C.H. Townes a A. Schawlow vyslovili myšlienku laseru, T. Mainman zostrojil prvý laser (1960)



Albert Einstein



Theodor Maiman



Stimulated Optical Radiation in Ruby

Schawlow and Townes¹ have proposed a technique for the generation of very monochromatic radiation in the infra-red optical region of the spectrum using an alkali vapour as the active medium. Javan² and Sanders³ have discussed proposals involving electron-excited gaseous systems. In this laboratory an optical pumping technique has been successfully applied to a fluorescent solid resulting in the attainment of negative temperatures and stimulated optical emission at a wave-length of 6943 Å.; the active material used was ruby (chromium in corundum).

A simplified energy-level diagram for triply ionized chromium in this crystal is shown in Fig. 1. When this material is irradiated with energy at a wave-length of about 5500 Å., chromium ions are excited to the ⁴F₂ state and then quickly lose some of their excitation energy through non-radiative transitions to the ²E state⁴. This state then slowly decays by spontaneously emitting a sharp doublet the components of which at 300° K. are at 6943 Å. and 6929 Å. (Fig. 2a). Under very intense excitation the population of this metastable state (²E) can become greater than that of the ground-state; this is the condition for negative temperatures and consequently amplification via stimulated emission.

To demonstrate the above effect a ruby crystal of 1-cm. dimensions coated on two parallel faces with silver was irradiated by a high-power flash lamp;

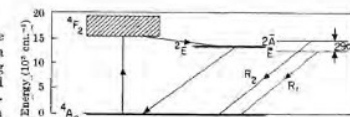


Fig. 1. Energy-level diagram of Cr³⁺ in corundum, showing pertinent processes

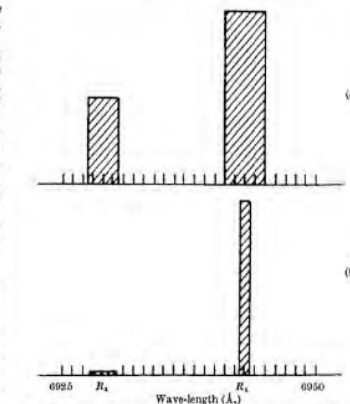


Fig. 2. Emission spectrum of ruby: a, low-power excitation; b, high-power excitation

the emission spectrum obtained under these conditions is shown in Fig. 2b. These results can be explained on the basis that negative temperatures were produced and regenerative amplification ensued. I expect, in principle, a considerably greater (~10³) reduction in line width when mode selection techniques are used⁵.

I gratefully acknowledge helpful discussions with G. Birnbaum, R. W. Hellwarth, L. C. Levitt, and R. A. Satten and am indebted to I. J. D'Haensens and C. K. Asawa for technical assistance in obtaining the measurements.

T. H. MAIMAN

Hughes Research Laboratories,
A Division of Hughes Aircraft Co.,
Malibu, California.

¹ Schawlow, A. L. and Townes, C. H., *Phys. Rev.*, 112, 1940 (1955).

² Javan, A., *Phys. Rev. Letters*, 3, 87 (1959).

³ Sanders, J. H., *Phys. Rev. Letters*, 3, 86 (1959).

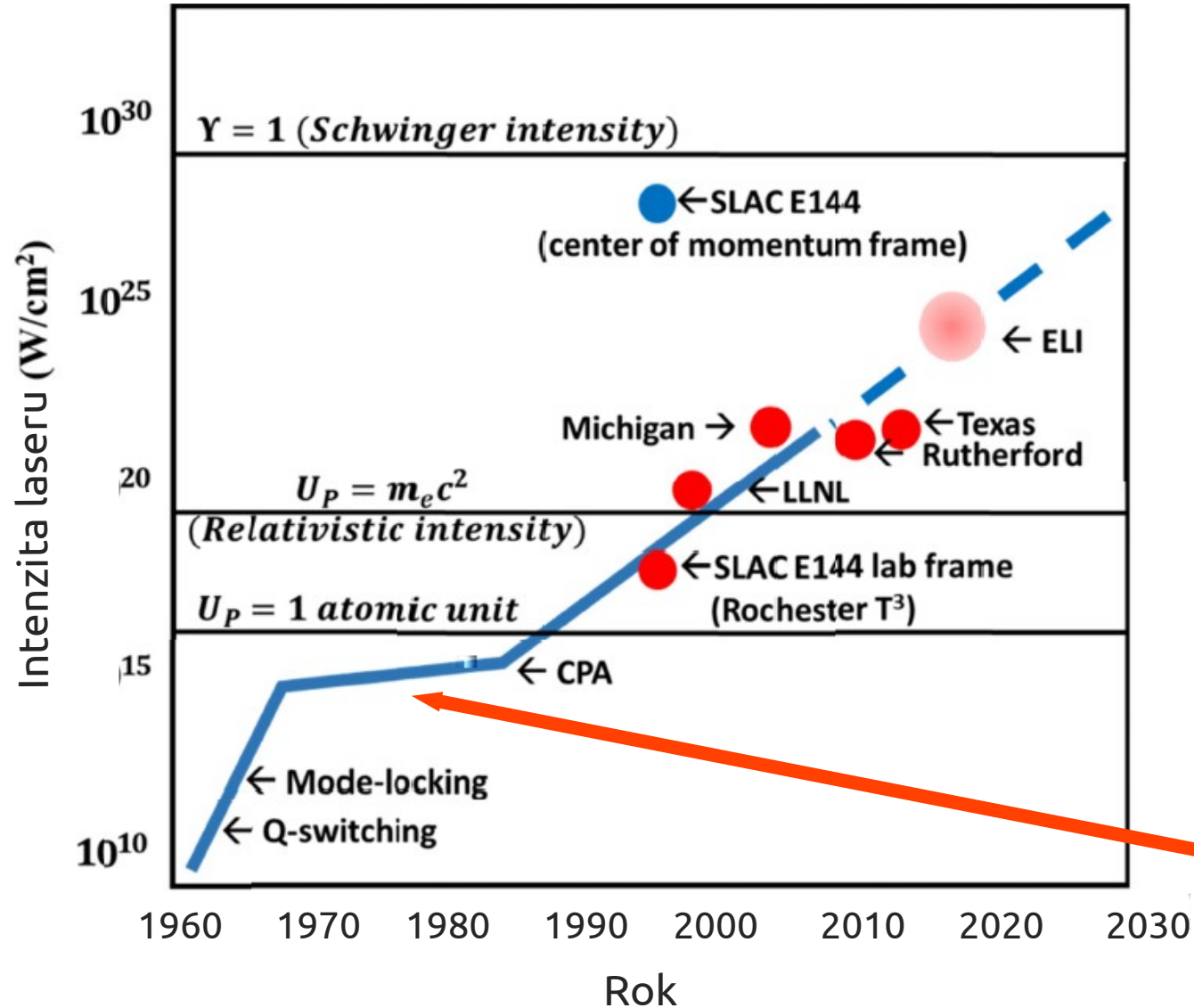
⁴ Maiman, T. H., *Phys. Rev. Letters*, 4, 564 (1960).

Článok , v ktorom
T. Mainman prvý krát
Popísal svoj objav (hore)

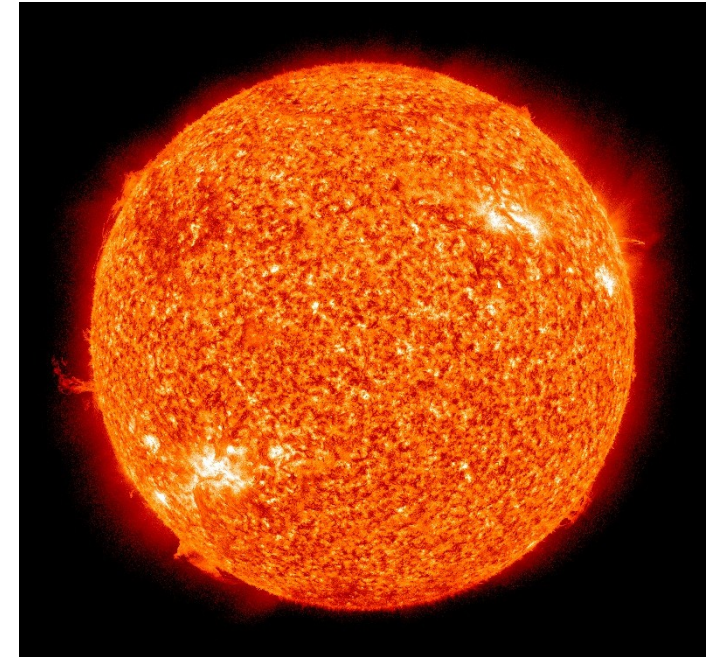
Prvý laser na svete
(naľavo)

**AKÉ SÚ TO
VYSOKOINTENZÍVNE
LASERE?**

HISTORICKÝ VÝVOJ INTENZITY LASEROV



Pre porovnanie
Intenzita žiarenia na povrchu
Slnka je $6,4 \times 10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$.



Obdobie stagnácie nárastu intenzity

ULTRAKRÁTKÉ INTENZÍVNE IMPULZY

- Metoda CPA (chirped pulse amplification)
- Gerard Mourou a Donna Strickland (1985)
- Nobelova cena 2018
- Zosilenie ultrakrátkeho zväzku bez poškodenia optiky



LASERY S PW VÝKONOM

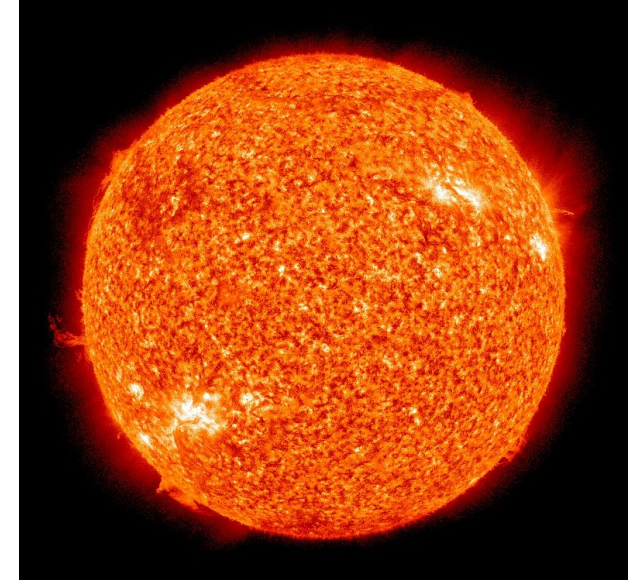
V roku 2019 rekord v maximálnom výkone laseru:

10^{16} W v ELI-NP v Rumunsku

Zodpovedá to jednému výstrelu svetla



Pre porovnanie
 17.3×10^{16} W : Celkový výkon
slnka dopadajúci na
atmosféru Zeme



Bežné laserové ukazovátka
sú v ráde mW



ENERGIA - POROVNANIE

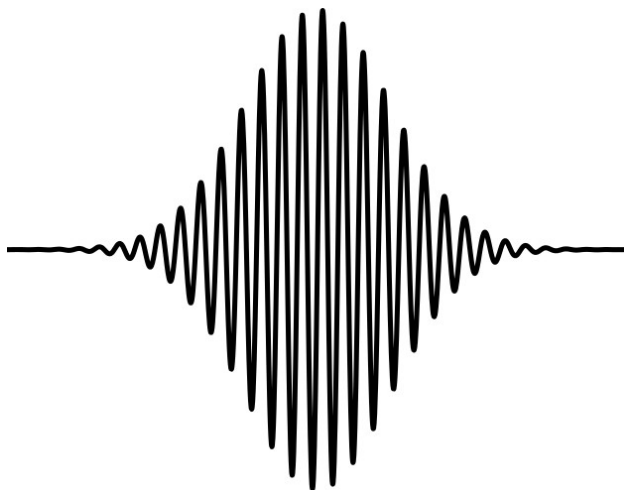
DENNÝ ENERGETICKÝ VÝDAJ /PRÍJEM DOSPELÉHO ČLOVEKA

8 400 000 J



LASEROVÝ
IMPULZ
NAJVÝKO-
NNEJŠIEHO
LASERU

~ 250 J

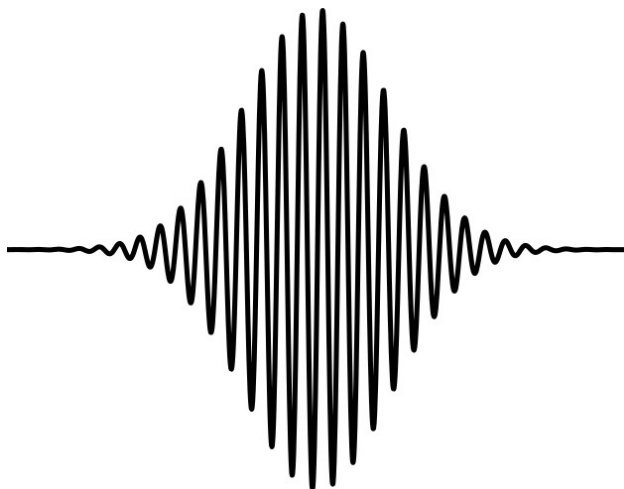


ENERGIA - POROVNANIE

DENNÝ ENERGETICKÝ VÝDAJ /PRÍJEM DOSPELÉHO ČLOVEKA
8 400 000 J



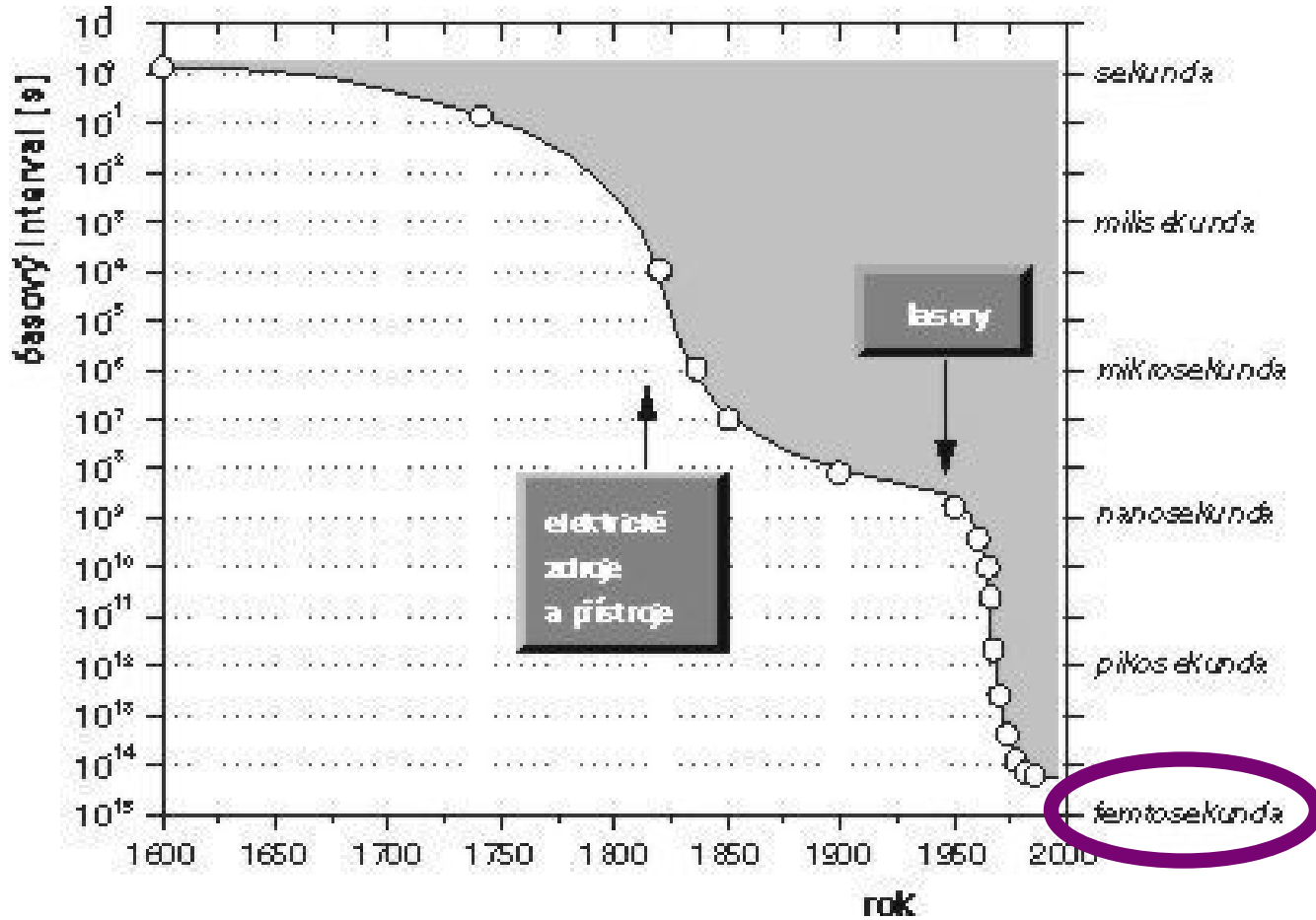
LASEROVÝ
IMPULZ
NAJVÝKO-
NNEJŠIEHO
LASERU
~ 250 J



$$\text{VÝKON} = \text{ENERGIA} / \text{ČAS}$$

LASEROVÉ IMPULZY
SÚ ULTRAKRÁTKE

ULTRAKRÁTKE LASEROVÉ IMPULZY

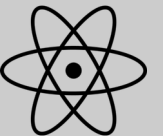


Dnešné lasery dosiahli impulz trvajúci desiatky attosekúnd (10^{-18} s)

435 Ps = 4.35×10^{17} s:
vek vesmíru



9.5 Ts = 9.5×10^{12} : doba od prvého homo sapiens
3 Gs = 3×10^9 s: 100 rokov
1 s: približná frekvencia srdca
1 ds = 10^{-1} s: mrknutie oka
1 ms = 10^{-3} s: čas, za ktorý neurón v mozgu vyše impulz a vráti sa do klúdu
1 fs = 10^{-15} s: Pohyb atómov pri chemických reakciách

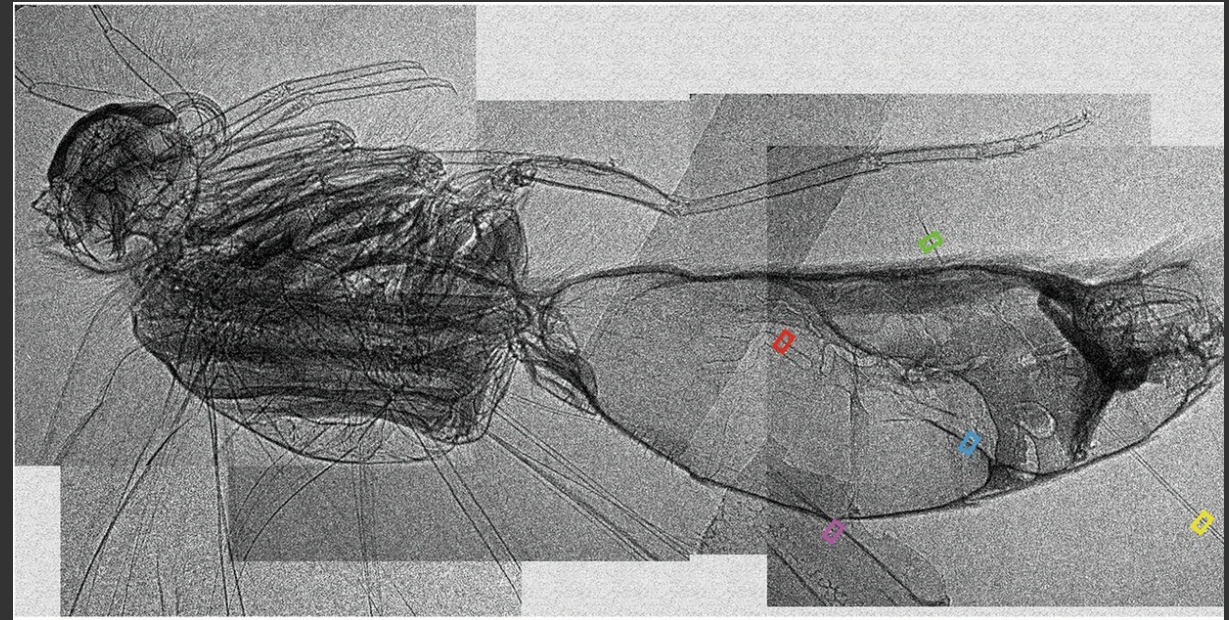


**APLIKÁCIE
VYSOKOINTENZÍVNYCH
LASEROV**

VÝSKUM V OBLASTI VYSOKOINTENZÍVNYCH ULTRAKRÁTKÝCH LASEROVÝCH IMPULZOV

Pulzy s vysokým výkonom a ultrakrátkym trvaním umožňujú výskum úplne nových rozmerov pre praktické aplikácie a fundamentálny výskum

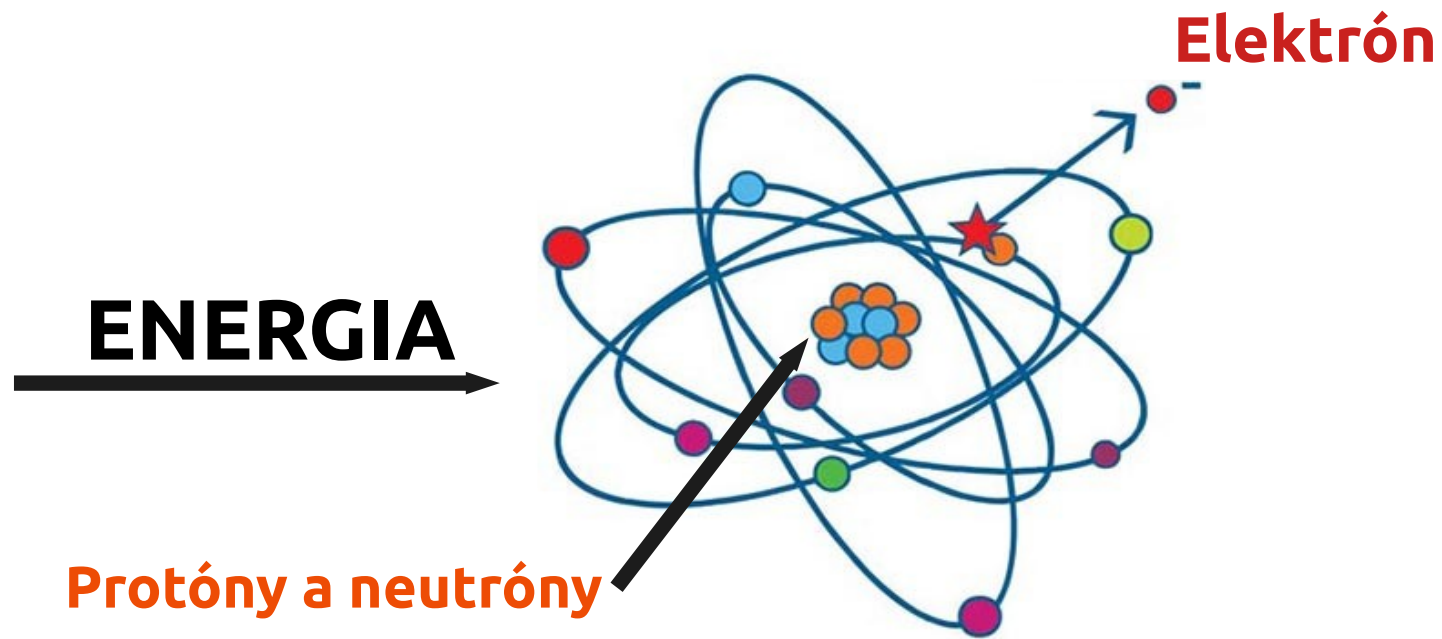
- Ultrakrátke rentgenové impulzy:
zobrazovanie prírody v atomárnom rozlíšení
v priestore aj čase
- Laboratórna astrofyzika:
Simulácia javov vo vesmíre vytváraním
vysokých intenzít v laboratóriu
- Exotická fyzika:
Generácia pozitronov a elektrónov z vákua
- Urýchľovanie častíc, elektrónov aj iontov
a mnoho ďalších výskumných smerov...



**Zobrazenie motýľa s rozlíšením 5 mikrometrov
s vysokým fázovým kontrastom pomocou
rentgenového žiarenia generovaného
vysokoenergetickými elektrónmi urýchlených
laserom**

LASEROVÝ URÝCHĹOVAČ

INTERAKCIA VYSOKOINTENZÍVNEHO LASERU S LÁTKOU

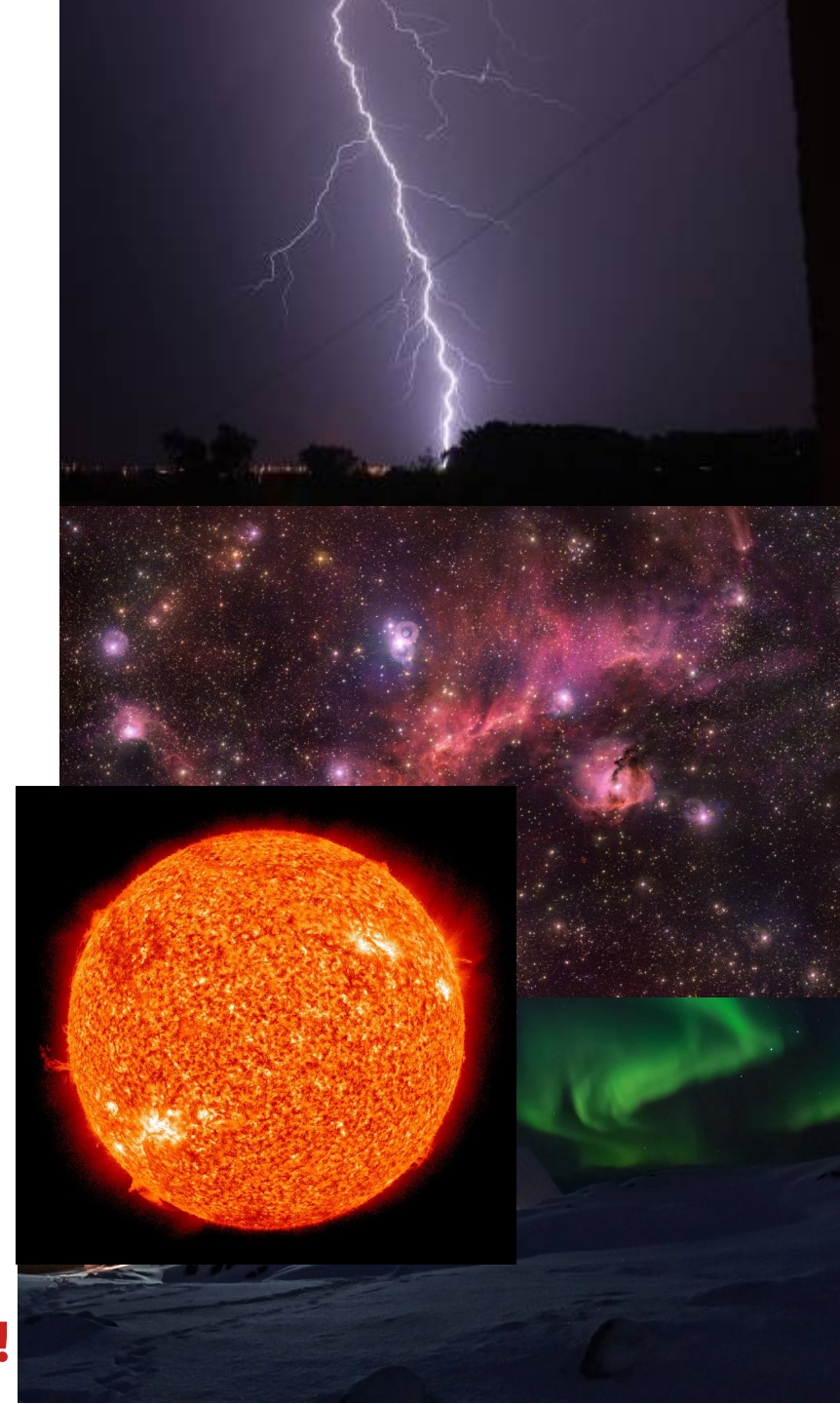
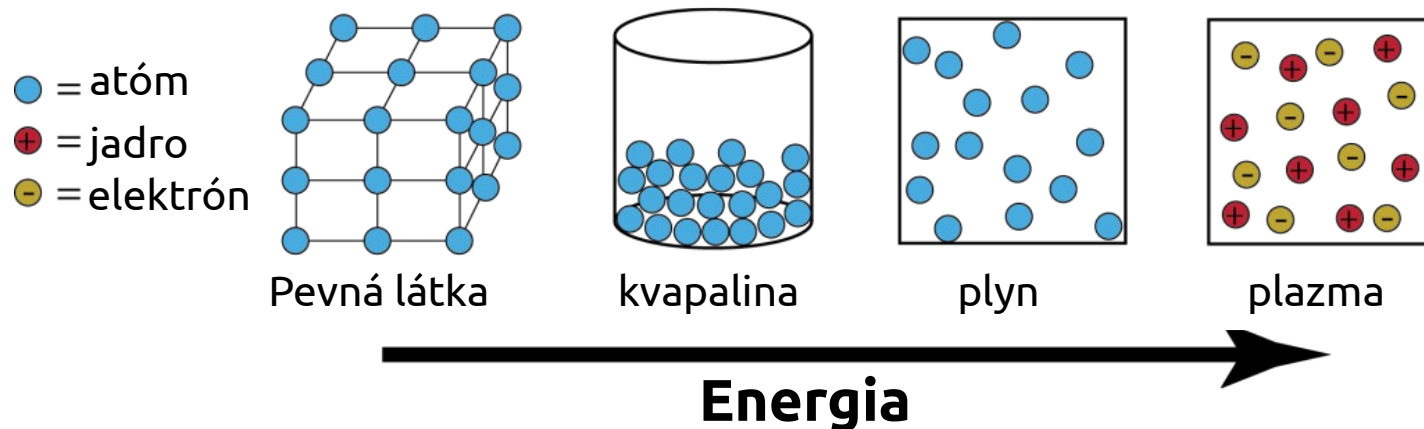


- Atómy sa skladajú z protónov, neutrónov a elektrónov
- Pri dodaní energie sa môžu elektróny odtrhnúť z atómového obalu, nastáva **ionizácia**

Lasere s intenzitou $6,4 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$ majú tak silné pole, že kompletne narušia väzbové pole atómu, ktoré udržiava elektróny v obale. Záporne nabité elektróny a kladne nabité ionty sa pohybujú voľne, vzniká **PLAZMA**.

PLAZMA

- Plazma obsahuje množstvo nabitých častíc
- Plazma sama vytvára elektromagnetické polia a reaguje na vonkajšie polia
- Na veľkých plochách sa však javí ako elektricky neutrálna
- Plazma vzniká prakticky okamžite pri prechode intenzívneho laseru látkou, samotná skladba závisí na type látky a intenzite laseru



Viac ako 99% atómarnej látky vo vesmíre je vo forme plazmy!

ČO JE TO ČASTICOVÝ URÝCHLOVAČ?

- Zariadenie, ktoré udeľuje elektricky nabitým časticiam vysokú rýchlosť
- Súčasné veľké urýchľovače: sústava po sebe idúcich elektród, v ktorých sa využíva striedavé napätie
- Urýchľovače majú veľmi široké využitie od nemocníc až po základný výskum
- Maximálne energie iónov: v TeV
- Maximálne energie elektrónov: desiatky GeV



Urýchľovač v Jihlavskej nemocnici



LHC v Cern, základný výskum

eV: Jednotka energie
 $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$
 $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$
je energia
letiaceho komára

Komár je ale
 10^{24} krát
hmotnejší
ako
elektrón!



KRÁTKÝ PREHĽAD SÚČASNÝCH URÝCHLOVAČOV

Jméno	Druh částic	Rozměry	Max. energie	Aplikace
Large Hadron Collider (Švýcarsko)	Protony a ionty	27 km kruhový	13 TeV	Částicová fyzika
SLAC (USA)	Elektrony a pozitrony	3.2 km lineární	50 GeV	Částicová fyzika, ultrarychlé rentgeny
European XFEL (Německo)	Elektrony	2.1 km lineární	17.5 GeV	Ultrarychlé rentgeny, fyzika plazmatu
SOLEIL Synchrotron (Francie)	Elektrony	354 m kruhový	2.75 GeV	Materiálové vědy, biomedicínský výzkum
Urychlovače pro radioterapii (celý svět)	Elektrony	~ 2 m lineární	~ 25 MeV	Léčba rakoviny
Průmyslové lineární urychlovače (celý svět)	Elektrony	~ 2 m lineární	~ 10 MeV	Nedestruktivní testování, inspekce nákladů, sterilizace
Budoucí plazmový urychlovač	Elektrony	~ pár cm	5 GeV	Ultrarychlé rentgeny, fyzika vysokých hustot energie
Budoucí plazmový urychlovač	Elektrony	~ pár mm	~ 50 MeV	Léčba rakoviny, nedestruktivní testování, inspekce nákladů, sterilizace

TVORBA BRÁZDOVEJ VLNY V PLAZME

Lod' ťahá za sebou na hladine vody tzv. brázdovú vlnu.

Brázdová vlna: vlna, ktorá sa šíri za rozruchom ("plavidlom") v nestlačiteľnej tekutine. Plavidlo odsúva tekutinu, z čoho vznikne vlna.

Podobne laserový impulz šíriaci sa plazmou odtláča elektróny voľne sa pohybujúce v plazme a vytvára plazmovú vlnu.



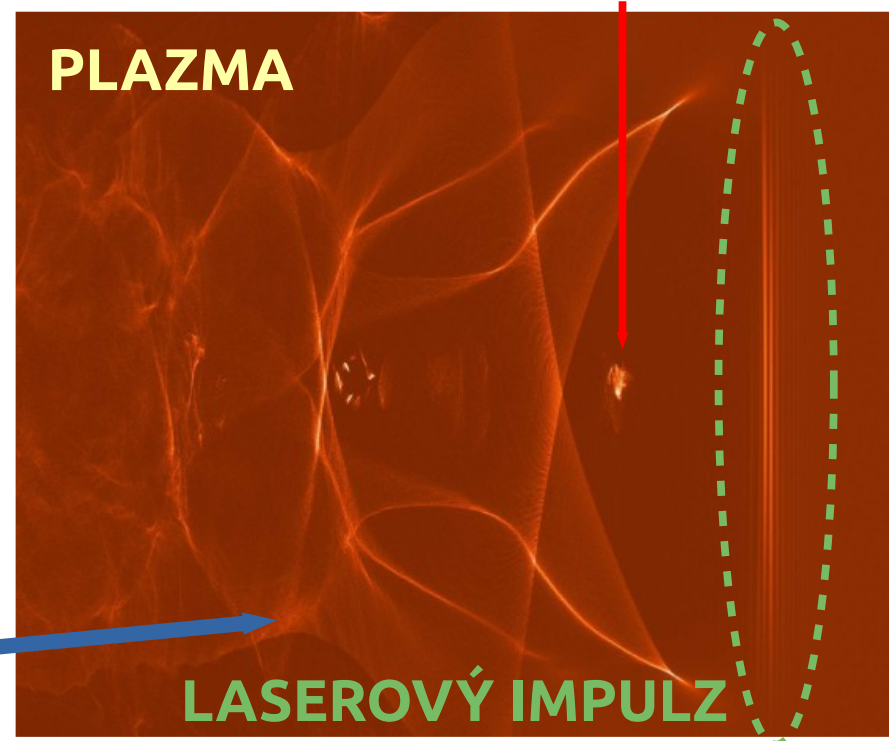
AKO MÔŽEME URÝCHĽOVAŤ ELEKTRÓNY LASEROM?

Šport wakesurfing: Surfer naberie dostatočnú rýchlosť a “skočí” do brázdovej vlny za loďou. Vlna ho začne urýchľovať a nejakú dobu ho ťahá so sebou. On sa pri tom ničoho nedrží! Urýchľuje ho len vlna.

Urýchľovanie elektrónov:

Elektrónom udelíme malú počiatočnú rýchlosť,
Oni potom surfujú na plazmovej vlne.

**ELEKTRÓNOVÝ
ZVÄZOK**



PREČO VYUŽÍVAŤ LASERE NAMIESTO ŠTANDARDNÝCH URÝCHĽOVAČOV?

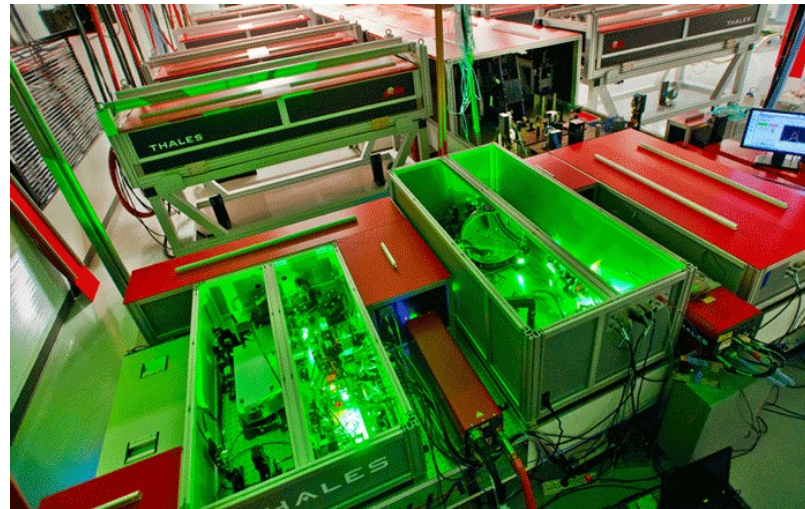
Laserové urýchľovače sú veľmi sľubnou alternatívou ku štandardným urýchľovačom. U štandardných urýchľovačov existuje horný limit urýchľovacieho napätia, lebo vysoké napätie ničí materiál komory, cez ktorú sa ženu rýchle elektróny. To znamená, že na to, aby sme dosiahli určitú energiu, potrebujeme určitú dĺžku urýchľovača.

Porovnanie momentálnych rekordov:

Rádiofrekvenčný lineárny urýchľovač SLAC Linac:
40 GeV
na 3 km



Laserový urýchľovač BELLA
8 GeV na 20 cm!!!



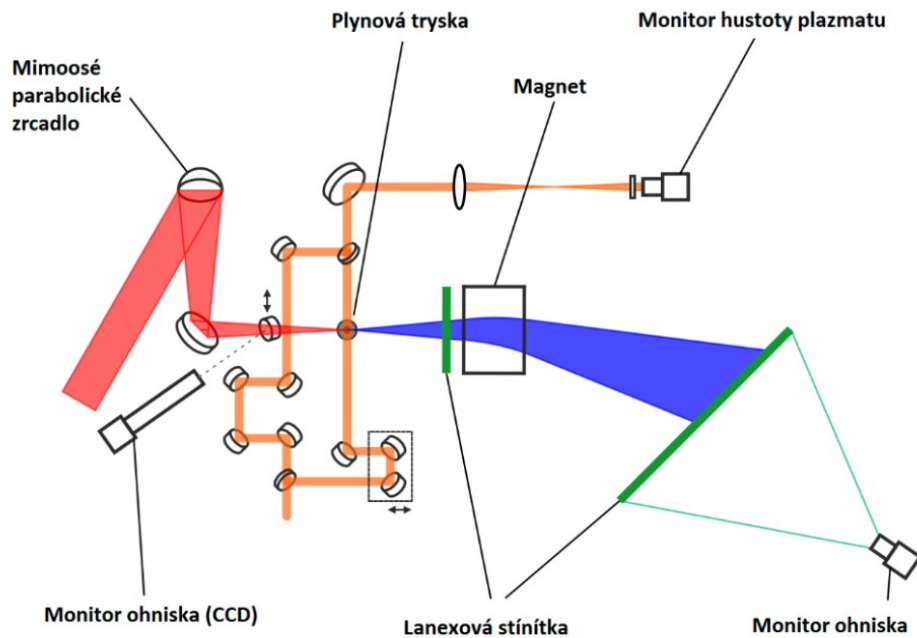
Oba urýchľovače sú v Kalifornii.

U elektrónových zväzkov nás zaujíma aj kvalita: Vysoký náboj elektrónového zväzku (veľké množstvo urýchlených elektrónov), Aby mali tieto elektróny veľmi podobné energie a aby boli zhustené v malej priestorovej oblasti. V tomto laserové urýchľovače zatiaľ nedosahujú potrebnú kvalitu, avšak každým rokom sa zlepšujú a výskum sa posúva rapídne vopred!

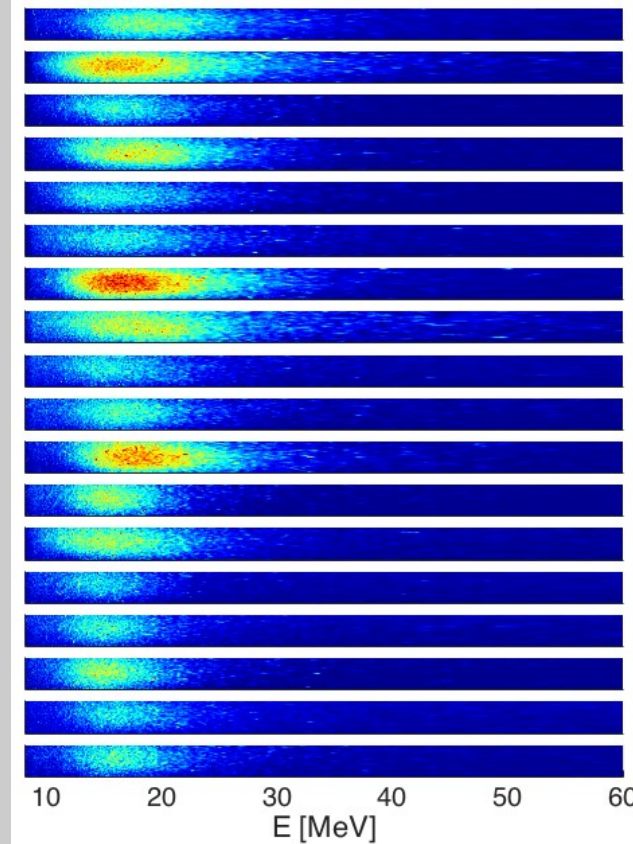
EXPERIMENT U NÁS NA ÚSTAVE FYZIKY PLAZMATU (2016)

Titanový-safírový laserový systém

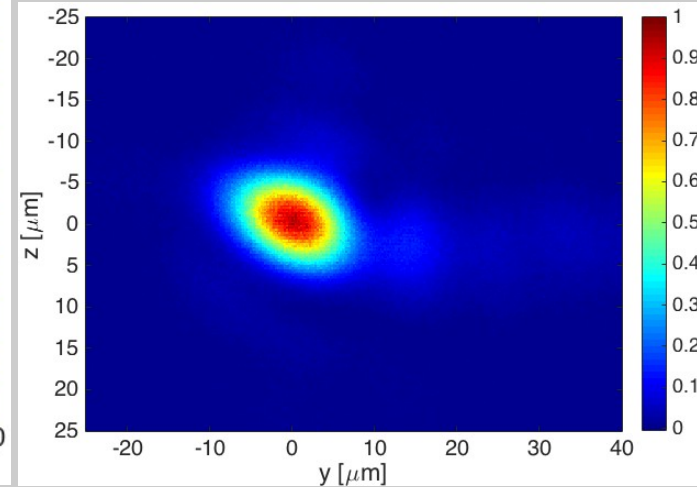
- 20 TW výkon, 1 J energie v impulzu, $I \approx 5 \times 10^{18}$ W/cm²
- dĺžka impulzu 45 fs, priemer impulzu 11-14 μm
- Strieľalo sa do suchého vzduchu ($\text{N}_2 + \text{O}_2$) s relatívne vysokou hustotou ($n_e \approx 5 \times 10^{19}$ cm⁻³)
- Stabilný zdroj 20 MeV elektrónov



Grafická schéma experimentu



Naľavo: Energie elektrónov v jednotkách MeV (10^6 eV) pre rôzne elektrónové zväzky
Dole: Priestorový profil jedného elektrónového zväzku.
Červená farba zobrazuje miesto s najvyšším počtom elektrónov.



Takto vyzerá klasický výstup z experimentu. Na detektore sa zaznamenajú elektróny s vysokou energiou, ktoré vyletia z plazmy spolu s laserovým impulzom, konkrétne ich priestorové rozloženie aj energie. Priamo do plazmy nevidíme, všetky diagnostiky sú v podstate nepriame. Na vysvetlenie výsledkov preto často využívame počítačové simulácie.

PÁR SLOV NA ZÁVER

- Laser je jeden z najuniverzálnejších vynálezov fyziky
- Od prvého laseru v roku 1960 vývoj laserov stále napreduje
- Dnes vieme generovať laserové impulzy s výkonmi v ráde PW, ktoré trvajú len niekoľko desiatok attosekúnd
- Takto experimentálne dosiahnuté výkony nám umožňujú objavovať nové fyzikálne javy a vymýšľať nové aplikácie
- Česká republika sa vo veľkom podieľa na medzinárom výskume v tejto oblasti



Prague Asterix Laser System (PALS), Praha



ELI Beamlines, Dolní Břežany

ĎAKUJEM VÁM ZA POZORNOST!

Ing. Dominika Mašlárová
Ústav fyziky plazmatu AV ČR
KFE FJFI ČVUT v Praze
maslarova@ipp.cas.cz



Zdroje obrázkov:

Titulná strana: <https://wallpaper-house.com/wallpaper-id-60782.php>

Aplikácie laserov:

- <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k32.htm>
- <https://www.industr.com/en/laser-machining-of-diamond-tools-2289759>
- <https://3dprintingindustry.com/news/laser-technology-helping-3d-printing-76751/>
- <http://www.hariomlaser.com/fashion-and-textile-laser-cutting-fabric-services-designer-laser-cutting>
- <https://www.nytimes.com/wirecutter/reviews/best-laser-printer/>
- https://www.amazon.com/Esky-Automatic-Scanning-Bar-code-Rechargeable/dp/B00406YZGK/ref=sr_1_13?keywords=esky&qid=1555139574&s=gateway&sr=8-13
- <https://www.lansfamilydentistry.com/treatment/laser-therapy/>
- <https://www.youtube.com/watch?v=AnGmN1CWZqY>

Prvý laser, základná konštrukcia laseru, A. Einstein, G. Mourou, D. Strickland: wikipedia,

T. Maiman: <https://history.aip.org/phn/11606001.html>

Elektromagnetické spektrum: <https://vesmirny-web.webnode.cz/neviditelna-astronomia/>

CPA technológia, elektromagnetická vlna: <https://www.aldebaran.cz/>

Obrázok Slnka: NASA's Solar Dynamics Observatory, Ionizácia: <https://saltlamps.biz/ionization/>

Obrázky laserového systému PALS: <http://www.pals.cas.cz/cz/>

Žiarovka: Kirsten Hastings, 16 Jul 18,

<https://international-adviser.com/seven-steps-for-better-platform-client-outcomes/light-bulb-on-dark-background/>

Ďalšie zdroje obrázkov:

Laserové ukazovátka: <https://www.amazon.in/EXSESON-Multipurpose-Pointer-Adjustable-Presentation/dp/B07MBB5JSF>
<https://laser-shop.cz/laserova-ukazovatka/380-laserove-ukazovatko-cervene-7-mw.html>
Excitácia atómu: http://www.optique-ingenieur.org/en/courses/OPI_ang_M01_C01/co/Contenu_05.html
Horalka: <https://sedita.sk>, Bežiaci muž: <https://www.clipartmax.com/>,
Obrázok atómu: <https://www.freeiconspng.com/images/atom-png>
Časová škála dĺžky laserových impulzov: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/1997/cislo-3/zkrocene-femtosekundy.html>
Fotoelektrický jav: http://www.szsbaikalska.sk/data/01/projekty/2018_2019/narrators/svetlom_svetom/stranky/fotoefekt.html
RTG zobrazovanie biologickej vzorky: Guo, Bo & Zhang, Xiaohui & Zhang, Jie & Hua, Jianfei & Pai, Chih-Hao & Zhang, Chaojie & Chu, Hsu-Hsin & Mori, Warren & Joshi, Chandrashekhar & Wang, Jyhyng & Lu, Wei. (2019). High-resolution phase-contrast imaging of biological specimens using a stable betatron X-ray source in the multiple-exposure mode. Scientific Reports. 9. 10.1038/s41598-019-42834-2.
Polárna žiara: Vadim Nefedov/Getty Images, Plazma ako skupenstvo: <http://mrdclassified.weebly.com/states-of-matter.html>
Brázdová vlna vo vode: https://wikiwaves.org/Ship_Kelvin_Wake, Michael Meylan et al.
Surfer na vlne: <https://cobaltboats.com/surf-class/surf-series/>
Ilustrácia brázdovej vlny v plazme: Laboratoire d'Optique Appliquée, <https://loa.ensta-paris.fr/research/upx-research-group/laser-wakefield-acceleration-lwfa/>,
Urýchľovač LHC: CERN, <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>
Urýchľovač v Jihlavské nemocnici: Jihlavské listy, 8.12.2015, Komár: Ondřej Daněk, oandd.cz,
Vývoj intenzity laserov: <https://www.nap.edu/read/24939/chapter/1#iii>
Urýchľovač BELLA: <https://bella.lbl.gov/>, Urýchľovač SLAC Linac: SLAC National Accelerator Laboratory
Experiment na PALSe: Bohacek, K. et al. (2016). Generation of laser-driven femtosecond electron beams for secondary photon sources with 7 TW Ti-sapphire laser system at PALS.

Pod'akovanie: Ďakujem Ing. Vojtěchovi Hornému, Ph.D. za podnetné návrhy k obsahu prezentácie a niektoré materiály, ktoré boli využité pri tvorbe tejto prezentácie.