
Laser – idea o ovládnutí světla

Pavel Gajdoš

(Dominika Mašlárová)

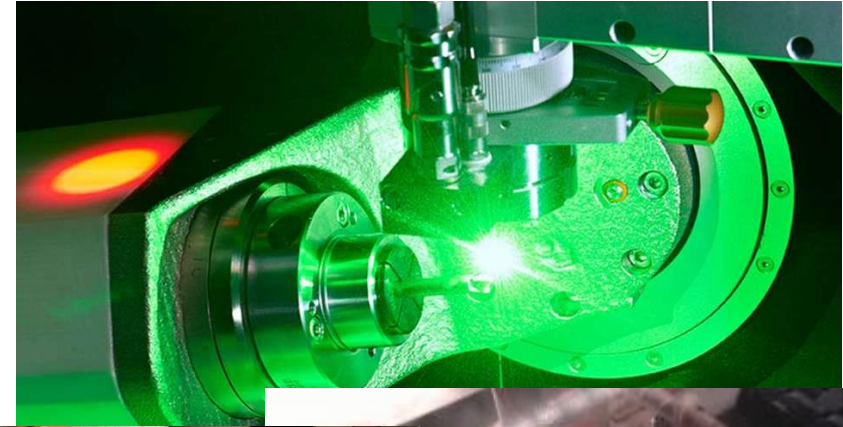
Ústav fyziky plazmatu AVČR

FJFI ČVUT

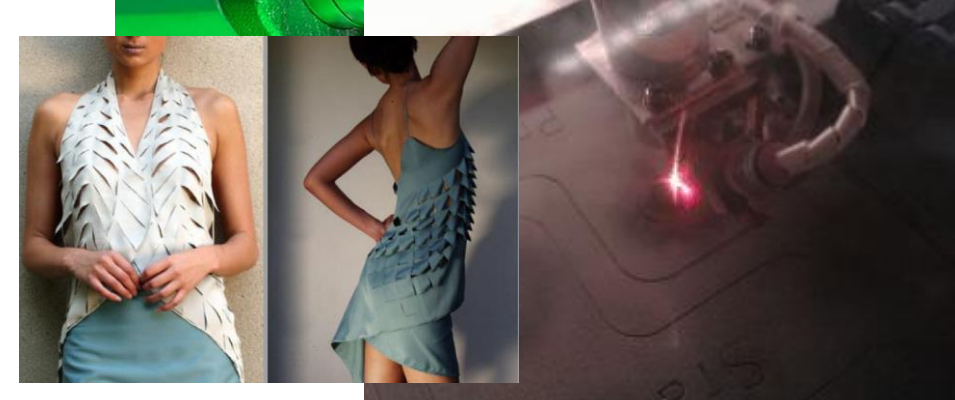
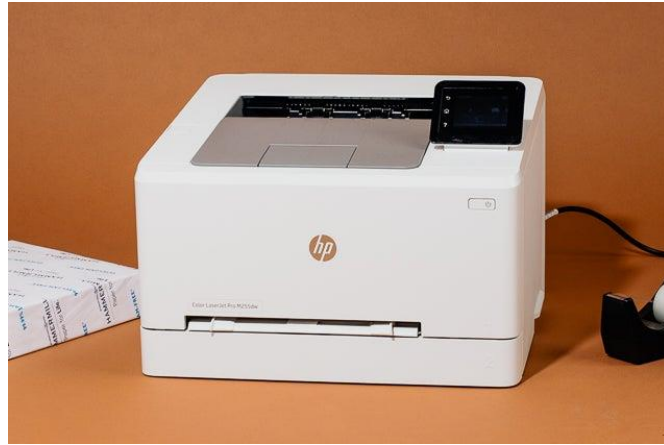
26. 2. 2024, U3V MFF

LASER-UNIVERZÁLNÍ OBJEV

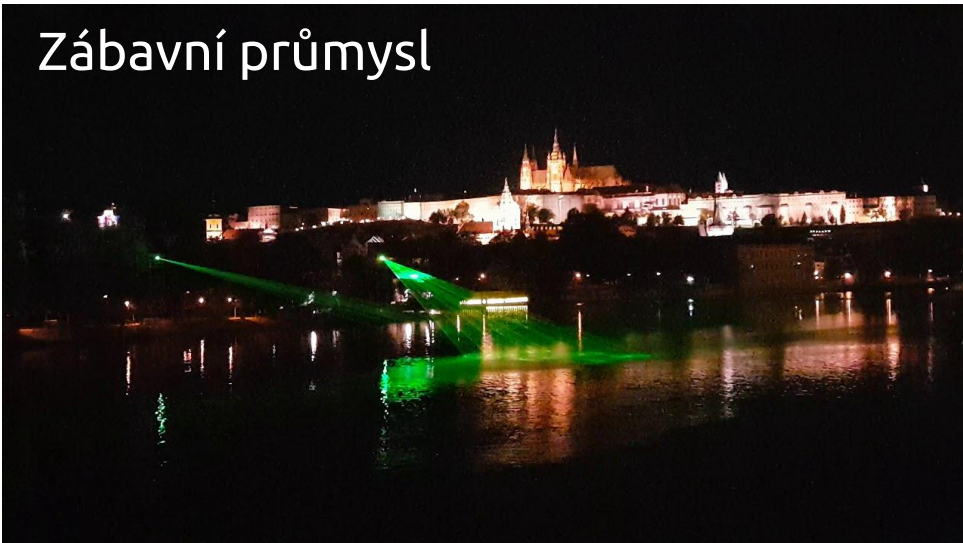
Průmysl



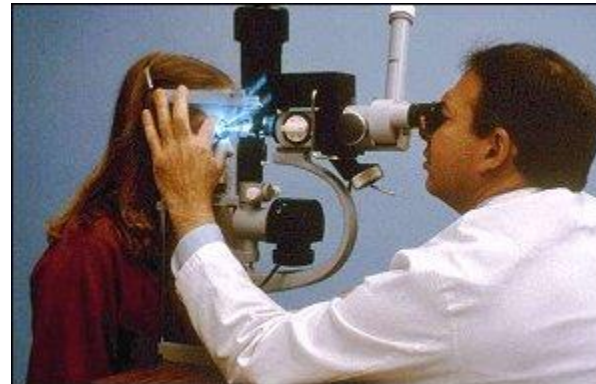
Komerční
využití



Zábavní průmysl



Medicína



Obsah:

- Co je to laser?
- Vysokointenzivní lasery
- Výzkum s vysokointenzivními lasery



Co je to LASER?

CO JE TO SVĚTLO?

2 způsoby popisu:

Elektromagnetická vlna (odraz, lom, ohyb, interference)

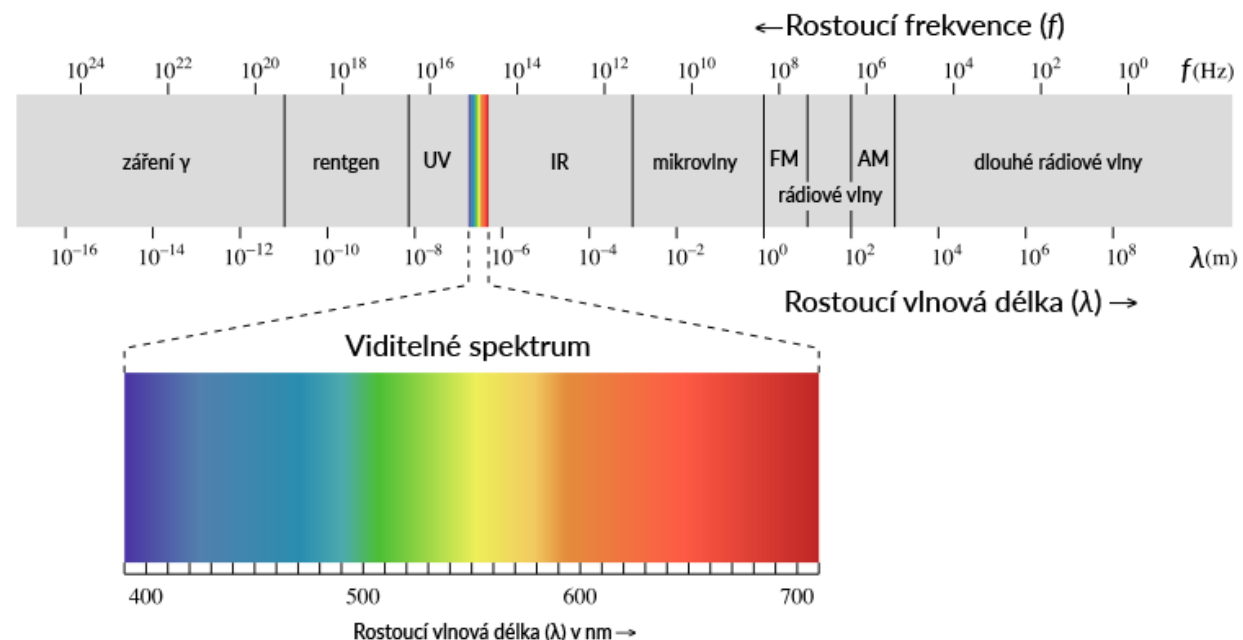
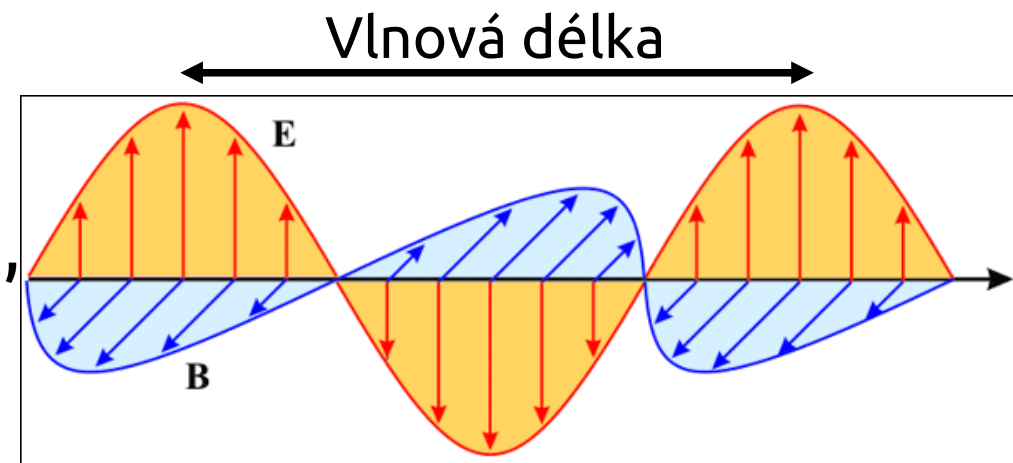
Částice – **foton** (nehmotný)

Mají energii $E=hc/\lambda$

h - Planckova konstanta

c – rychlost světla

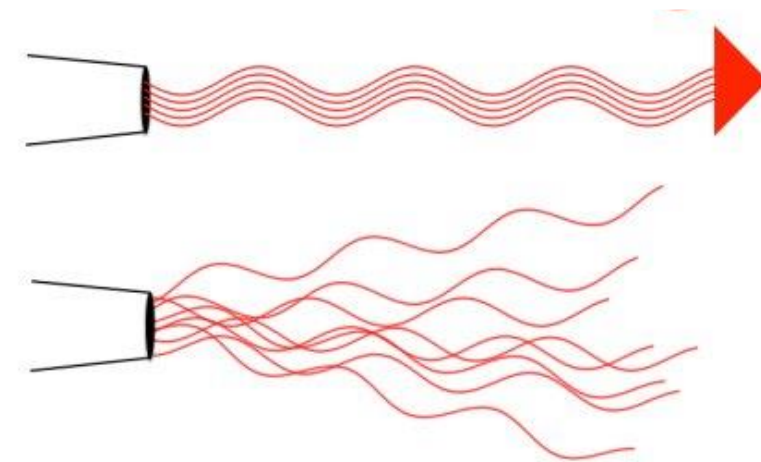
λ – vlnová délka světla



KLASICKÝ ZDROJ SVĚTLA VS LASER



Koherentní světlo:
stejná fáze a směr



Nekoherentní
světlo

- ✓ Koherentnost
- ✓ Kvazimonochromatičnost (jedna barva)
- ✓ Nízká rozbíhavost

INTERAKCE FOTONU S ATOMEM

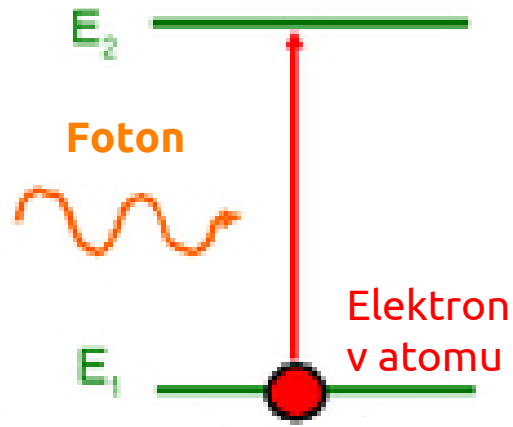
Atom se v klidu nachází v **základní energetické hladině**

Interakcí se světlem se může dostat do **vybuzené energetické hladiny**

Absorpce – látka pohlcuje fotony a elektrony přecházejí na vyšší energetické hladiny.

Vyšší energetická hladina

Nižší energetická hladina



INTERAKCE FOTONU S ATOMEM

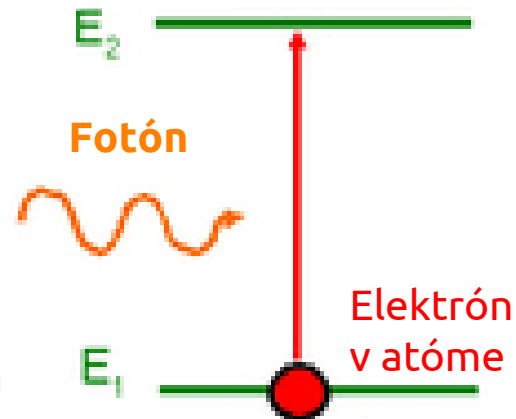
Atom se v klidu nachází v **základní energetické hladině**

Interakcí se světlem se může dostat do **vybuzené energetické hladiny**

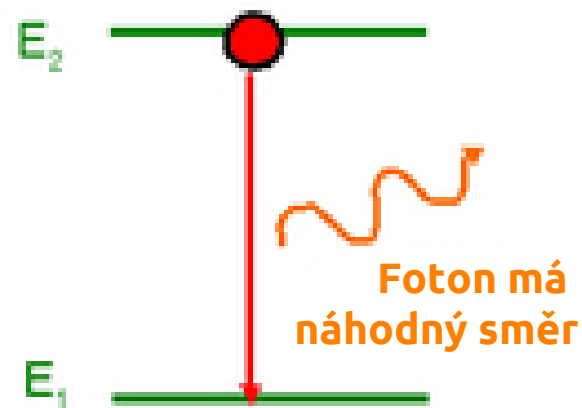
Absorpce – látka pohlcuje fotony a elektrony přecházejí na vyšší energetické hladiny.

Spontánní emise – elektrony samovolně přechází z vyšší energetické hladiny na nižší a atomy vyzařují fotony.

Vyšší energetická hladina



Nižší energetická hladina



INTERAKCE FOTONU S ATOMEM

Atom se v klidu nachází v **základní energetické hladině**

Interakcí se světlem se může dostat do **vybuzené energetické hladiny**

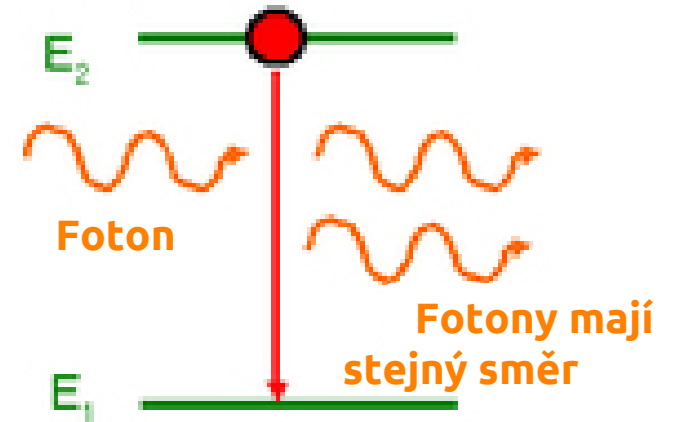
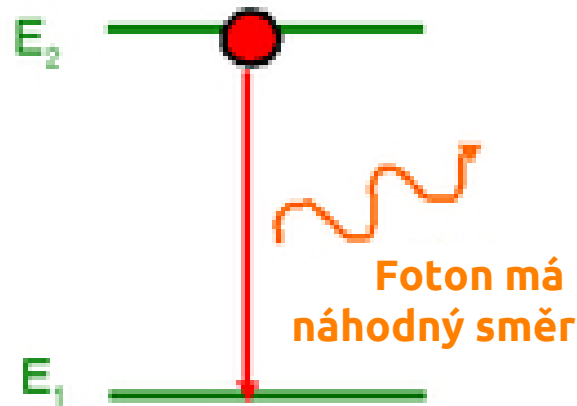
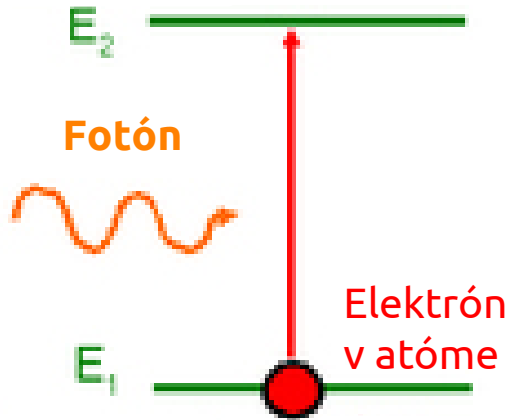
Absorpce – látka pohlcuje fotony a elektrony přecházejí na vyšší energetické hladiny.

Spontánní emise – elektrony samovolně přechází z vyšší energetické hladiny na nižší a atomy vyzařují fotony.

Stimulovaná emise – nastává v energeticky vybuzených atomech. Foton vyzářený stim. emisí má stejnou frekvenci jako foton, který emisi vyvolal.

Vyšší energetická hladina

Nižší energetická hladina

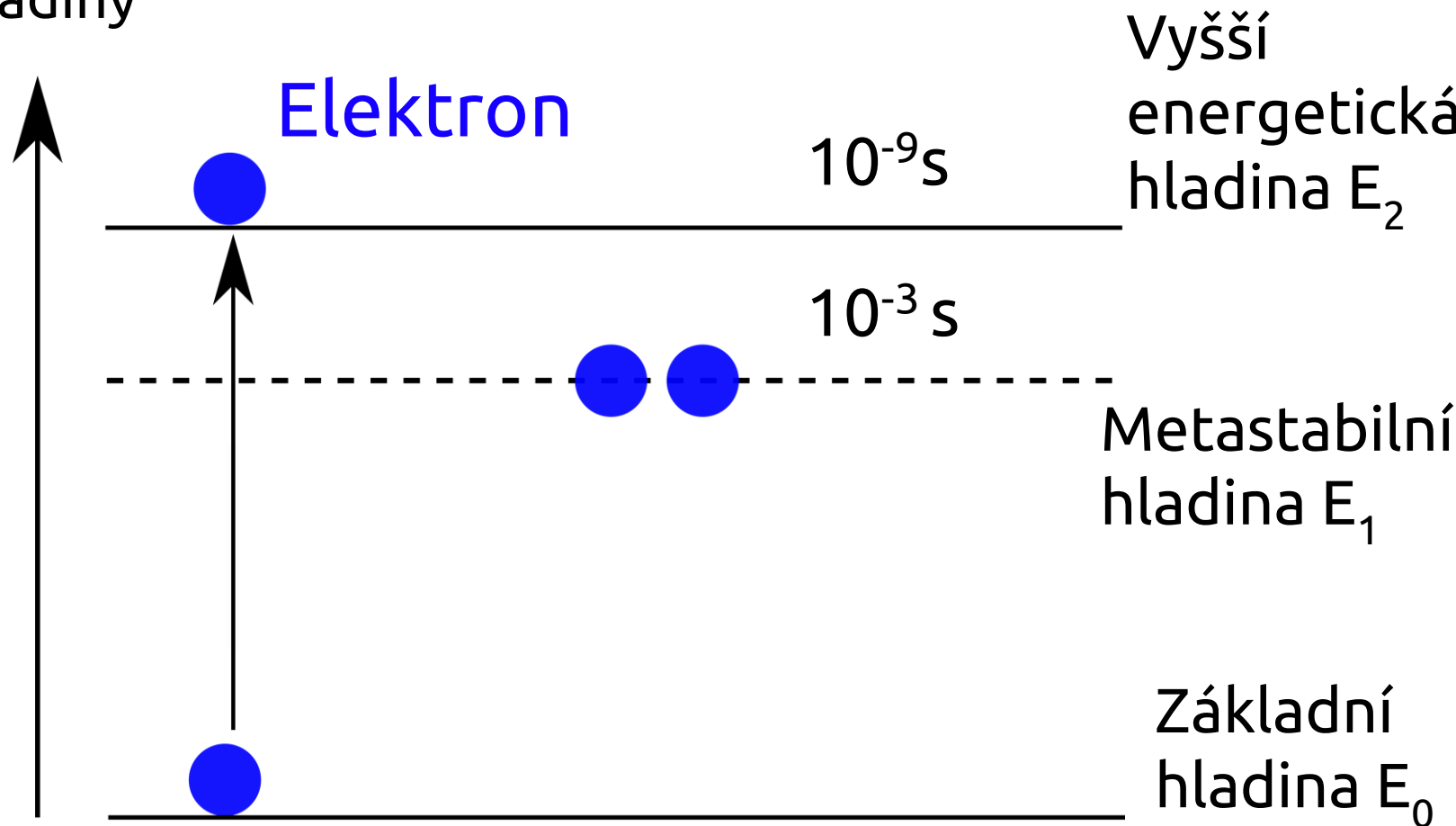


PRINCIP FUNGOVÁNÍ LASERU

Elektrony nejprve přejdou na E_2 , ze které ihned spadnou na metastabilní E_1

Pokud na takto vybuzený stav dopadne foton s energií rovnou rozdílu energií mezi metastabilní a základní hladinou, elektron spadne do základní hladiny a vyzáří foton o stejné energii, jako foton dopadající. Vznikne lavinová reakce – zesílení světla.

Energetické
hladiny

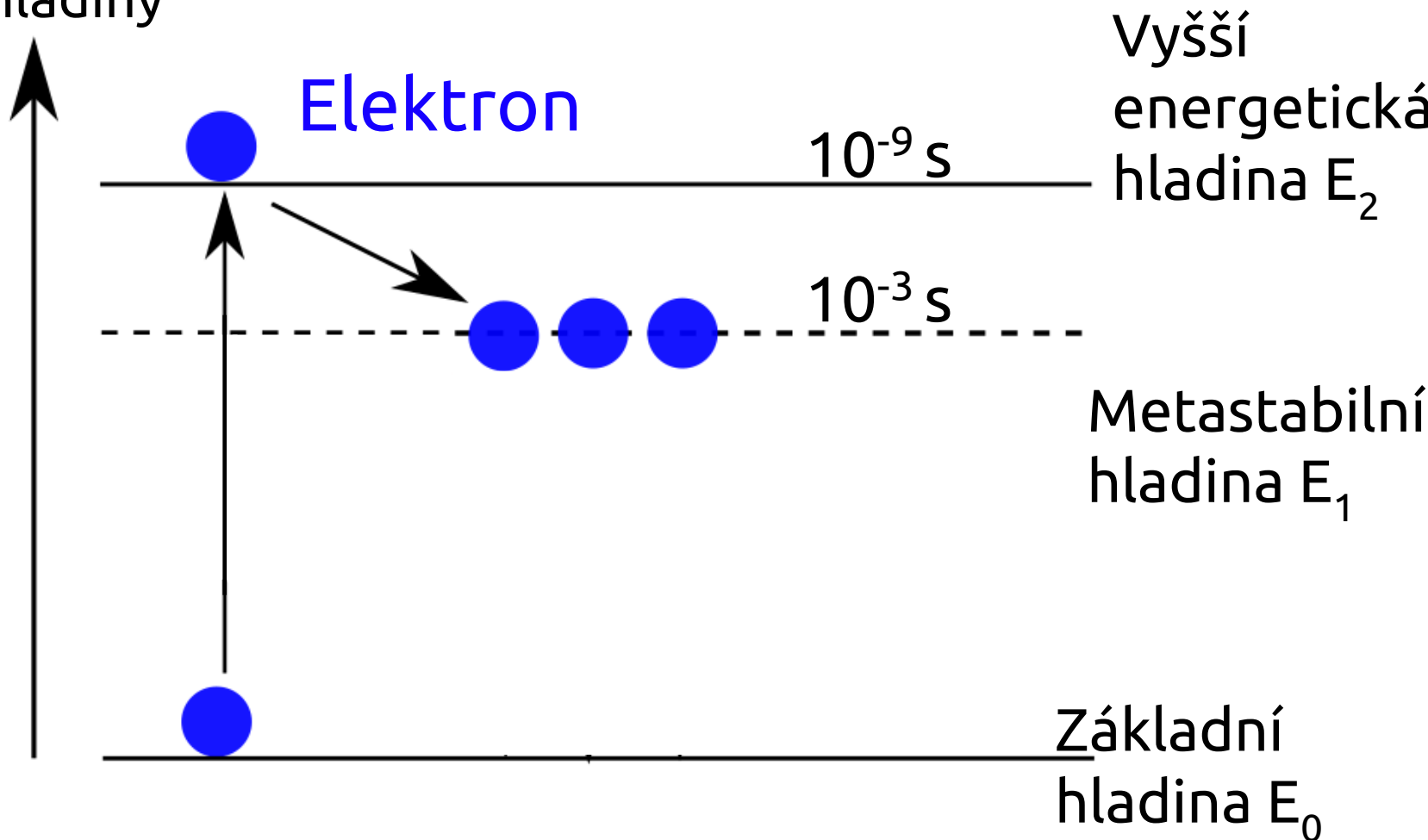


Elektrony nejprve přejdou na E_2 , ze které ihned spadnou na metastabilní E_1

Pokud na takto vybuzený stav dopadne foton s energií rovnou rozdílu energií mezi metastabilní a základní hladinou, elektron spadne do základní hladiny a vyzáří foton o stejné energii, jako foton dopadající. Vznikne lavinová reakce – zesílení světla.

PRINCIP FUNGOVÁNÍ LASERU

Energetické hladiny

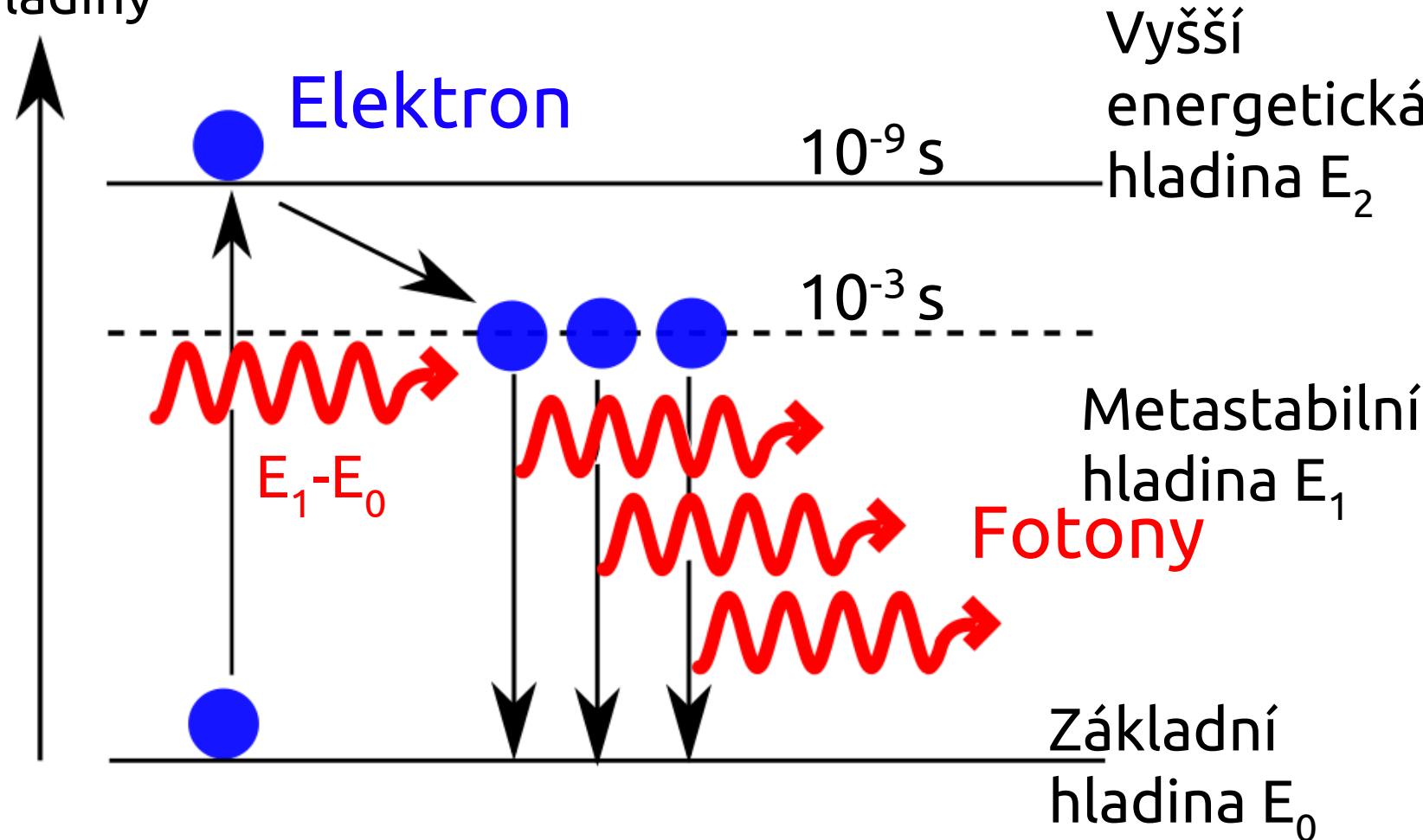


Elektrony nejprve přejdou na E_2 , ze které ihned spadnou na metastabilní E_1

Pokud na takto vybuzený stav dopadne foton s energií rovnou rozdílu energií mezi metastabilní a základní hladinou, elektron spadne do základní hladiny a vyzáří foton o stejné energii, jako foton dopadající. Vznikne lavinová reakce – zesílení světla.

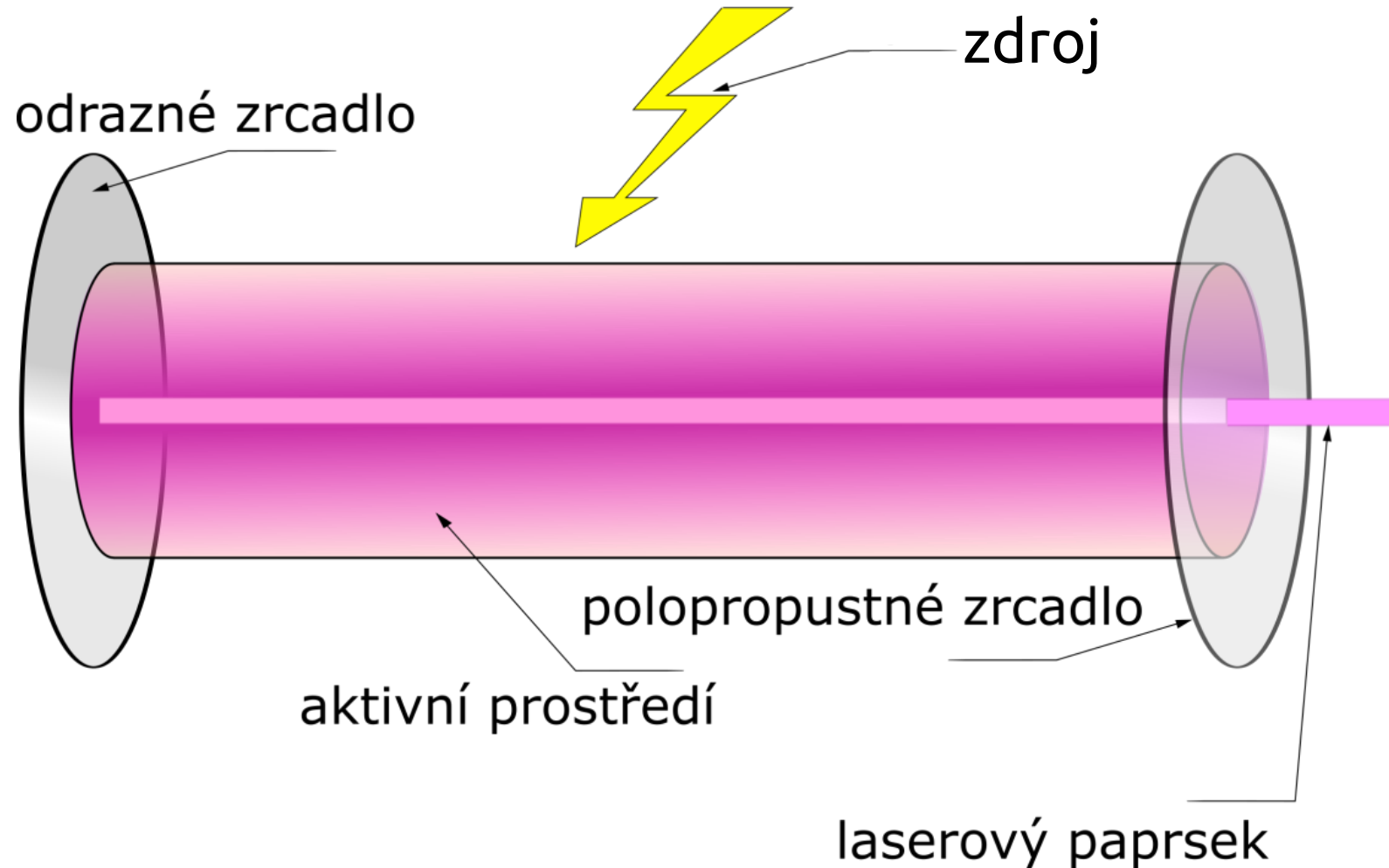
PRINCIP FUNGOVÁNÍ LASERU

Energetické hladiny



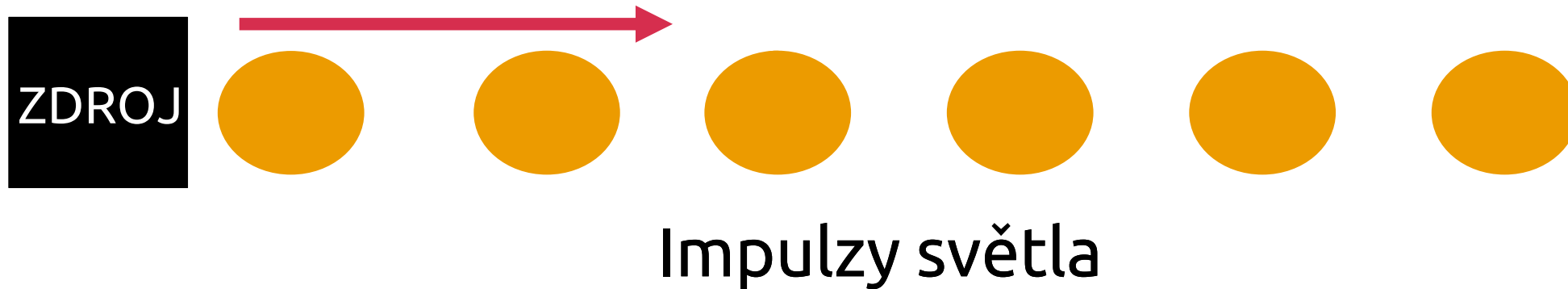
PRINCIP FUNGOVÁNÍ LASERU

- Stimulovaná emise je vyvolaná v aktivním prostředí
- Světlo se mnohonásobně odráží mezi zrcadly, tím se zvyšuje jeho intenzita
- Výsledný paprsek je vypuštěný přes polopropustné zrcadlo



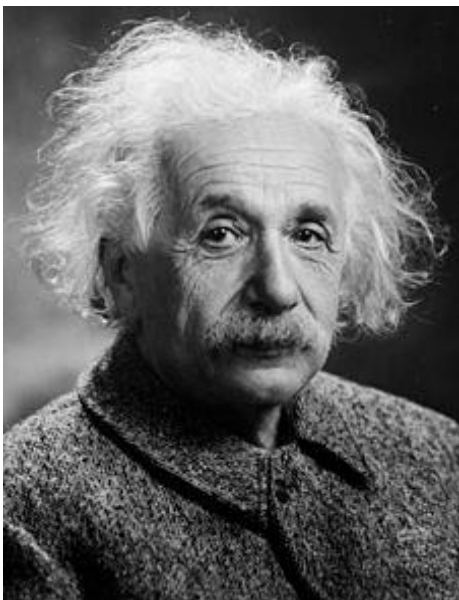
Aktivní prostředí určuje výslednou vlnovou délku laseru.

2 REŽIMY LASERU



HISTORIE LASERU

- LASER = zesilování světla stimulovanou emisí záření (anglický akronym)
- Generátor světla využívající stimulovanou emisí
 - Predpověděl Albert Einstein (1917)
- N.G. Basov a A.M. Prochorov představili MASER (1952), C.H. Townes sestavil MASER (1954), stimulovaná emise mikrovln Nobelova cena 1964
- C.H. Townes a A. Schawlow vyslovili myšlenku laseru, T. Maiman sestrojil první laser (1960)



Albert Einstein



Theodor Maiman



Článek, ve kterém T. Maiman popsal svůj objev (hore)

První laser na světě (nalevo)

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;

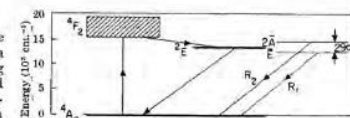


Fig. 1. Energy-level diagram of Cr³⁺ in corundum, showing pertinent processes.

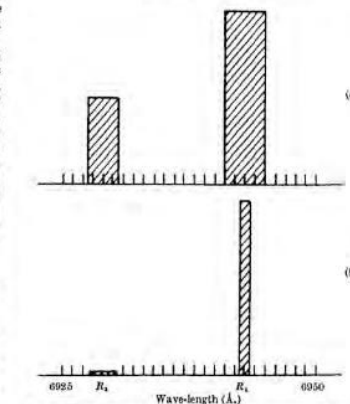


Fig. 2. Emission spectrum of ruby: a, low-power excitation; b, high-power excitation.

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).

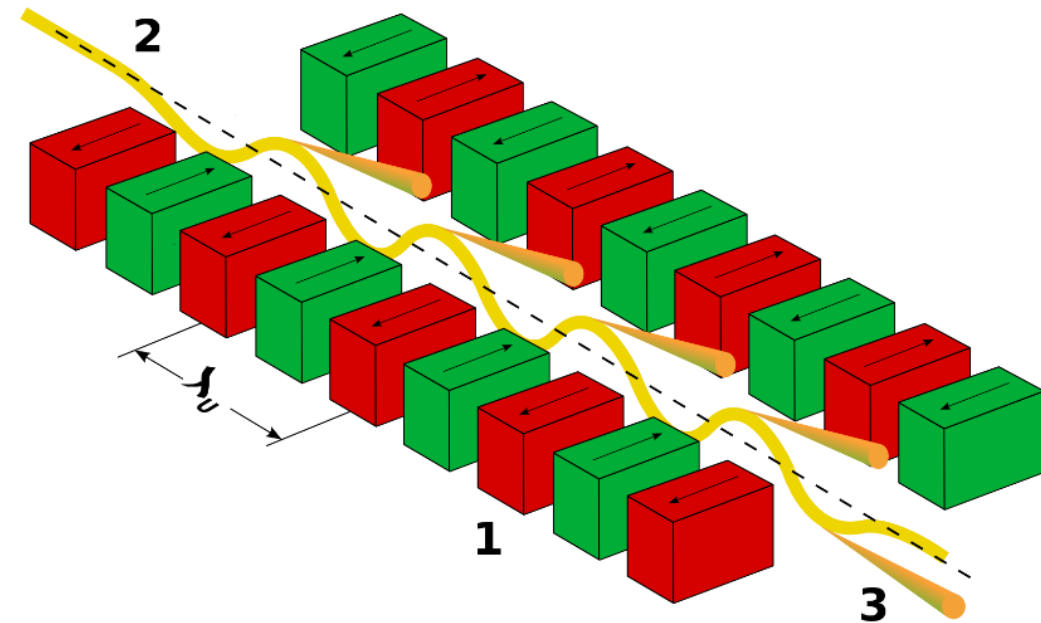
³ Sanders, J. H., *Phys. Rev. Letters*, **3**, 86 (1959).

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

LASER NA VOLNÝCH ELEKTRONECH

Vysokoenergetický elektron v magnetickém poli vyzařuje fotony – synchrotronní záření

Lze získat laser v rentgenové oblasti



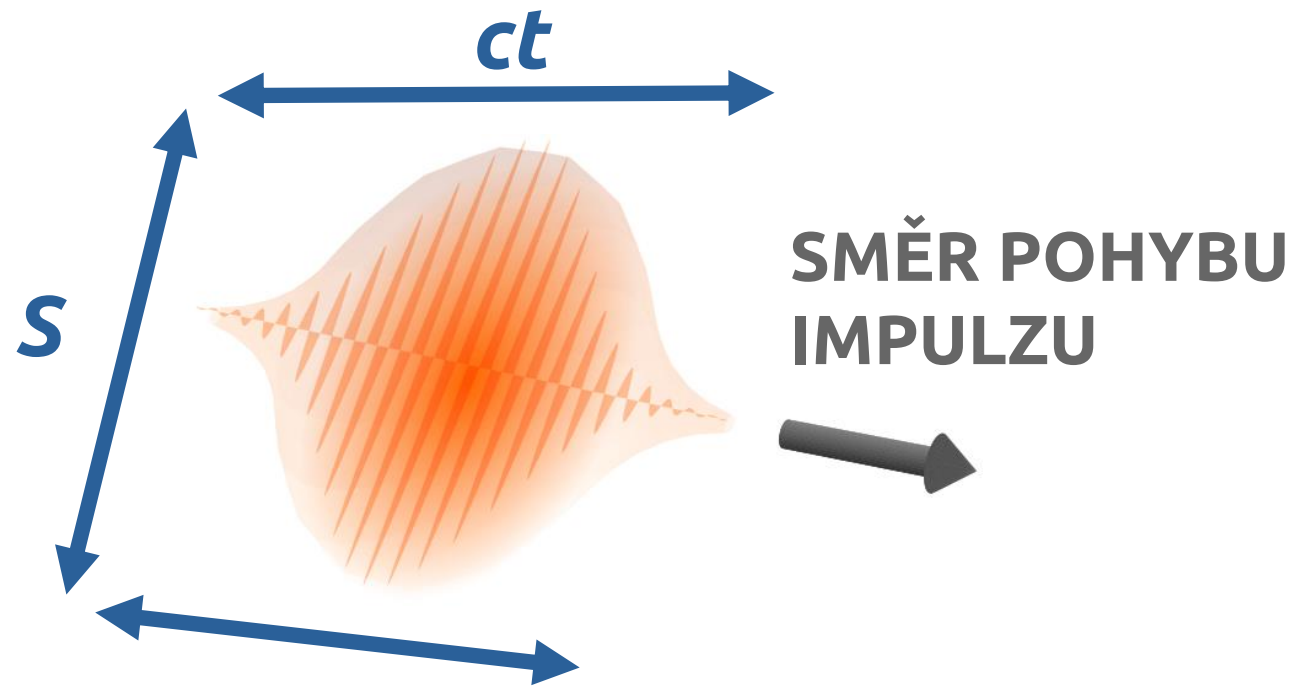
Undulátor

Vysokointenzivní lasery

CO JE TO INTENZITA?

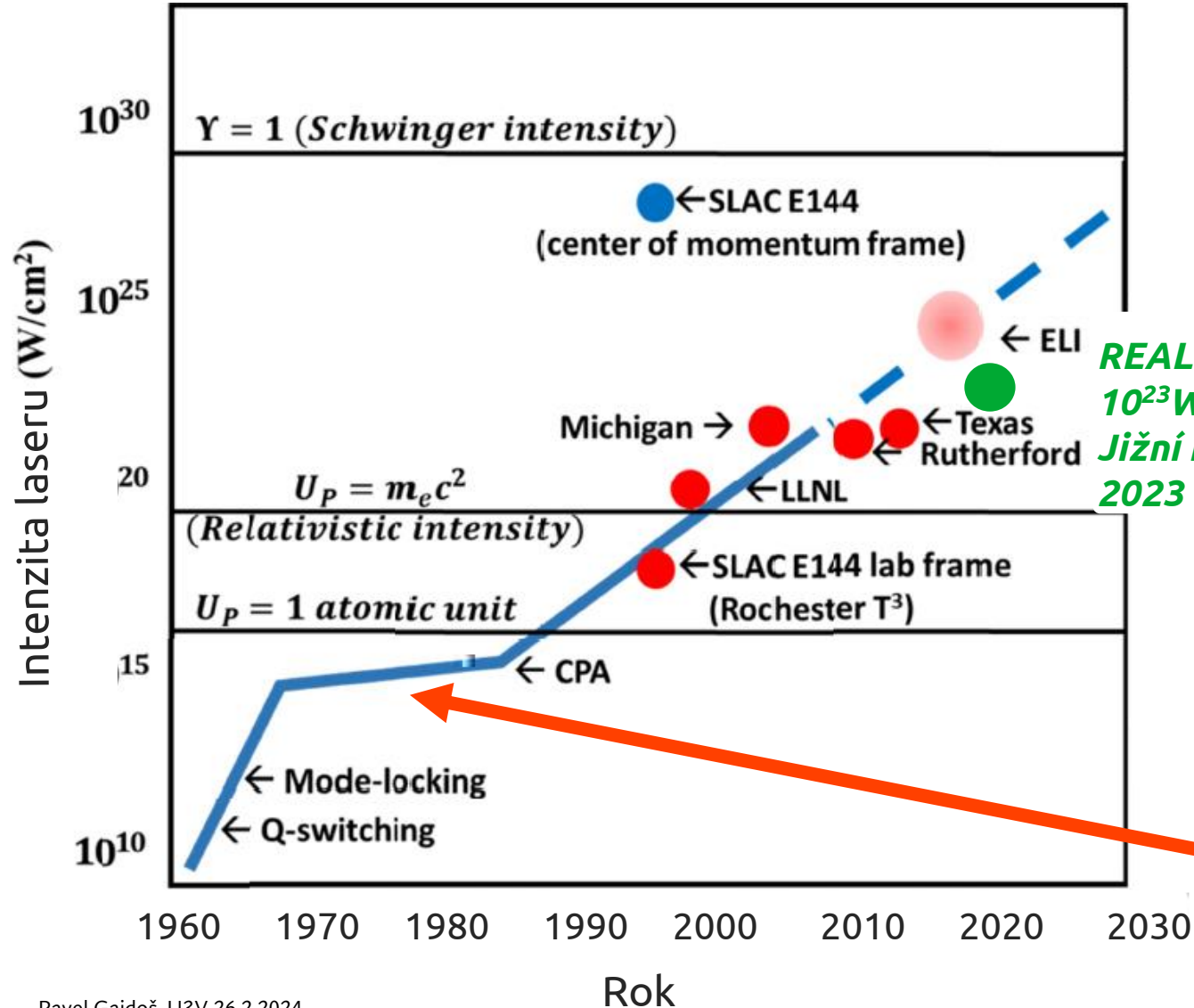
- Energie E
- Délka laserového impulzu t
- Plocha laserového impulzu S
- Rychlost světla c

Výkon $P = E/t$ energie za čas
Intenzita $I = P/S$ výkon na plochu



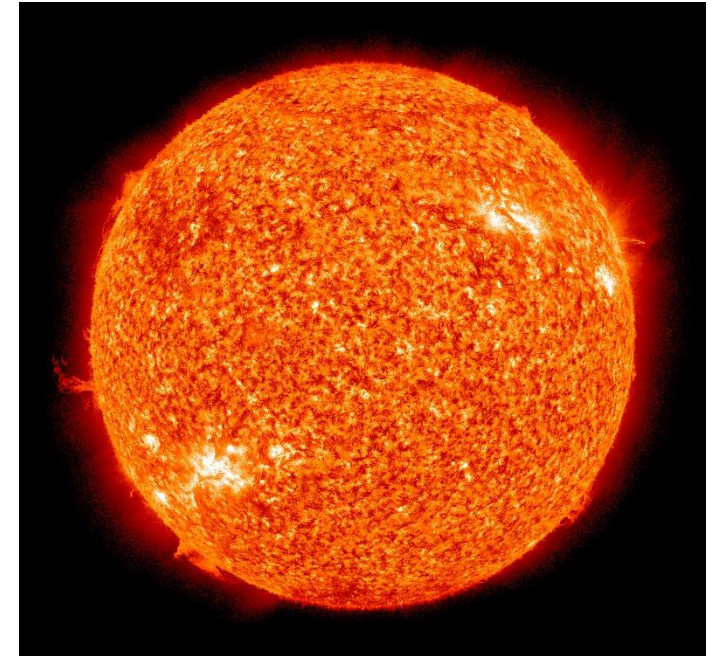
HISTORICKÝ VÝVOJ INTENZITY LASEROV

Předpověď z konce minulého desetiletí



REALITA:
 $10^{23} Wcm^{-2}$
Jižní Korea
2023

Pro porovnání
Intenzita záření na povrchu
Slunce je $6,4 \times 10^6 W/cm^2$.



Období stagnace nárůstu intenzity

ULTRAKRÁTKÉ INTENZÍVNÍ IMPULZY

- Metoda CPA (chirped pulse amplification)
- Gerard Mourou a Donna Strickland (1985)
- Nobelova cena 2018
- Zesílení ultrakrátkého svazku bez poškození optiky



20

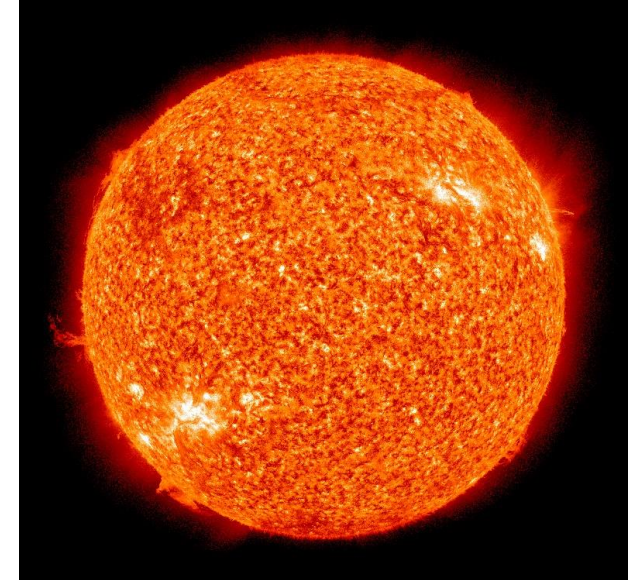


LASERY S PW VÝKONOM

V roku 2019 rekord v maximálním výkonu laseru: 10^{16} W v ELI-NP v Rumunsku
Odpovídá jednomu výstřelu světla

Pro porovnání
 17.3×10^{16} W : Celkový výkon
slunce dopadající na
atmosféru Země

21



Bežné laserové ukazovátka
jsou v řádu mW

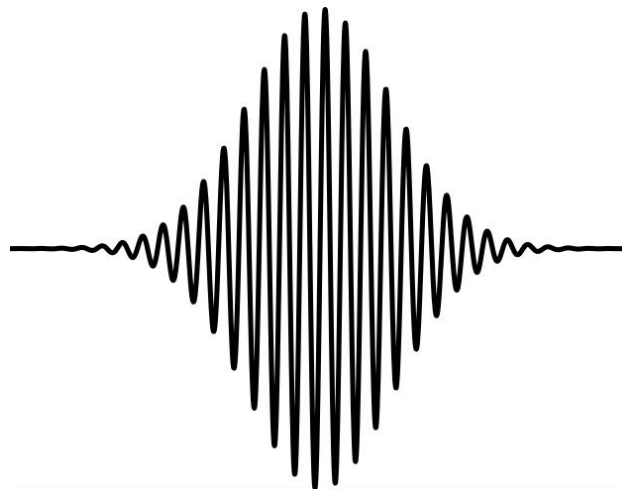


ENERGIA - POROVNANIE

DENNÍ ENERGETICKÝ VÝDEJ /PŘÍJEM DOSPĚLÉHO ČLOVĚKA
8 400 000 J



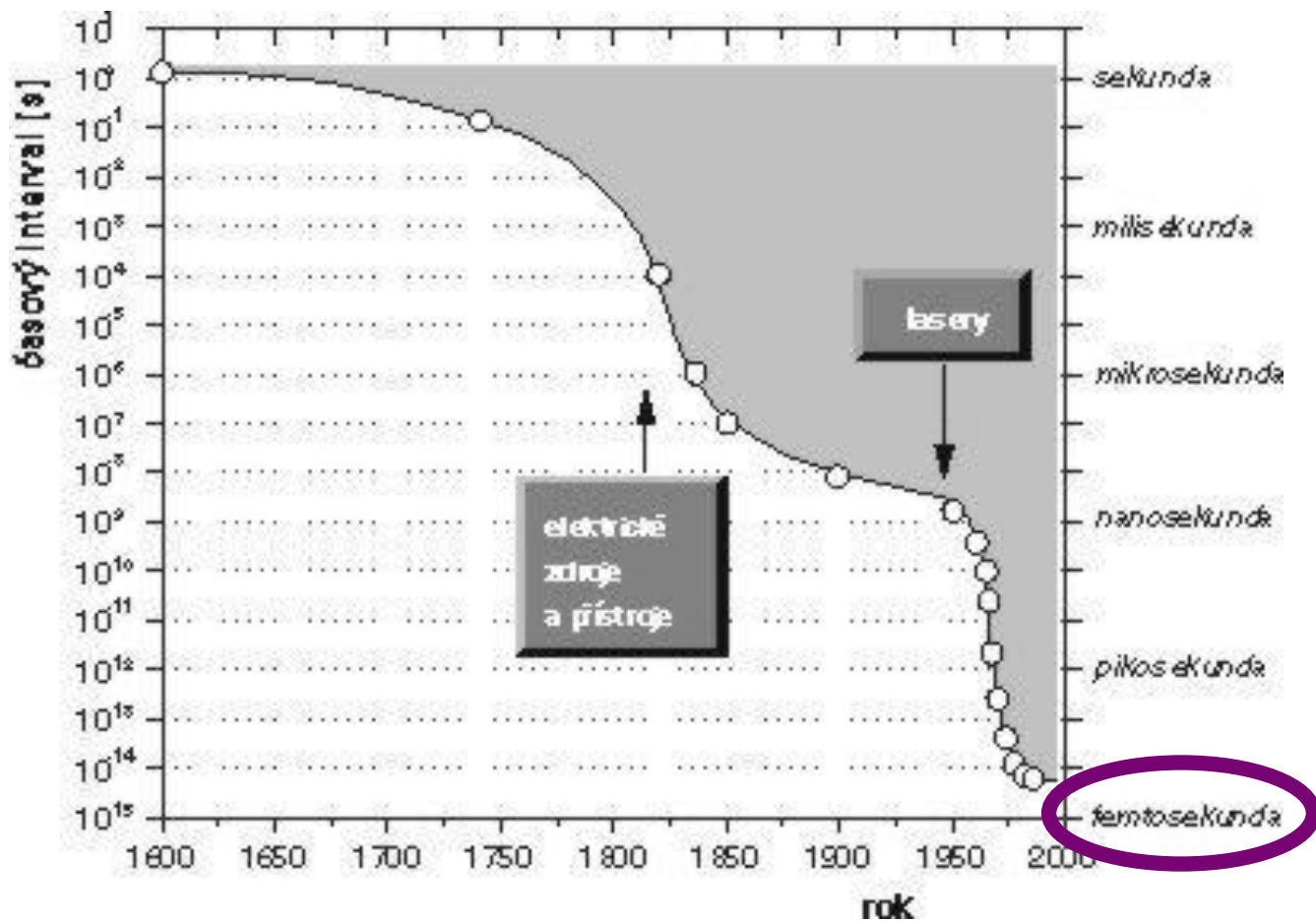
ENERGIE
 IMPULZU
 NEJVÝKON-
 NĚJŠÍHO
 LASERU
~ 250 J



VÝKON=ENERGIE/ČAS

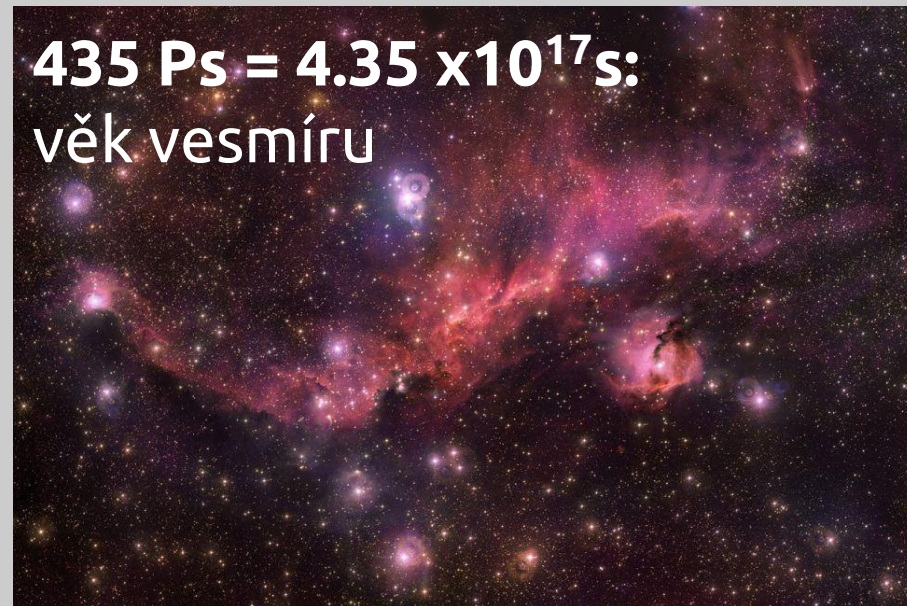
**LASEROVÉ IMPULZY
 JSOU ULTRAKRÁTKÉ**

ULTRAKRÁTKE LASEROVÉ IMPULZY

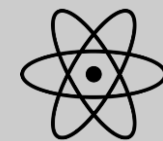


Dnešní lasery dosáhly impulz trvajících desítky attosekund (10^{-18} s)

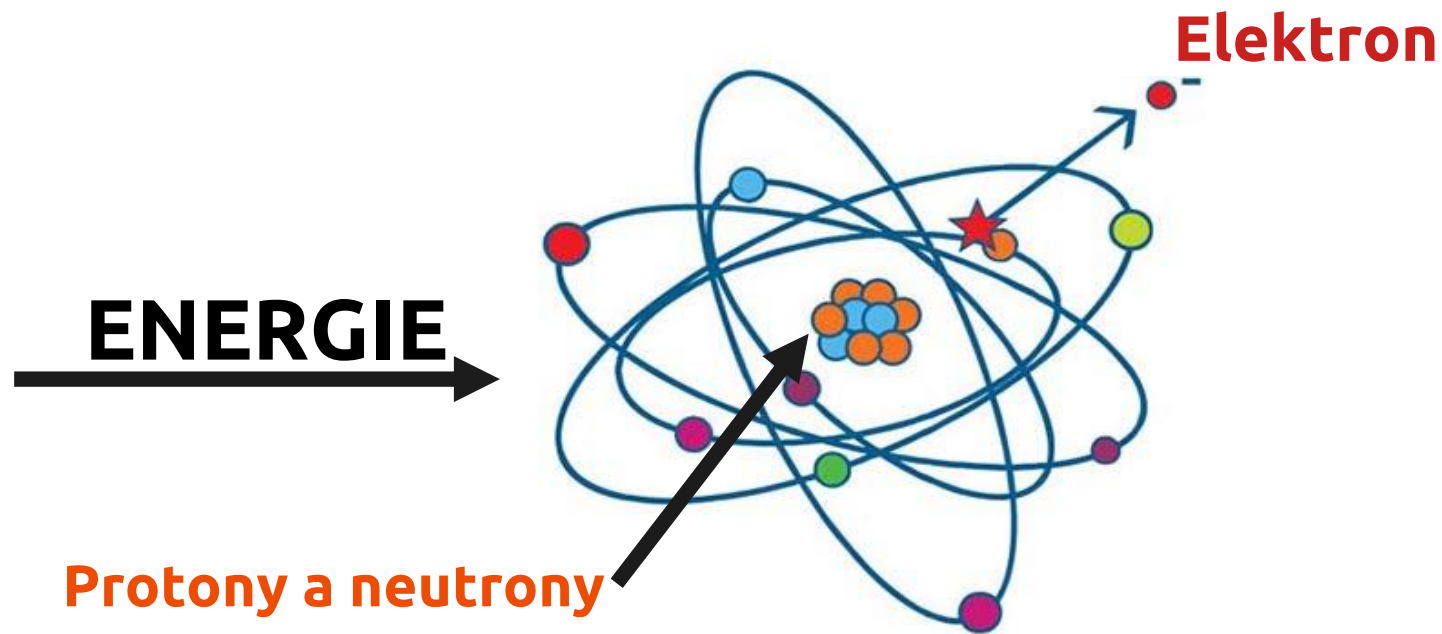
$435 \text{ Ps} = 4.35 \times 10^{17} \text{ s}$:
věk vesmíru



$9.5 \text{ Ts} = 9.5 \times 10^{12}$: doba od prvního homo sapiens
 $3 \text{ Gs} = 3 \times 10^9 \text{ s}$: 100 let
1 s: přibližná frekvence srdce
1 ds = 10^{-1} s: mrknutí oka
1 ms = 10^{-3} s: čas, za který neuron v mozku vyše impulz a vrátí se do klidu
1 fs = 10^{-15} s: Pohyb atomů při chemických reakcích



INTERAKCE VYSOCE INTENZIVNÍHO LASERU S LÁTKOU²⁴

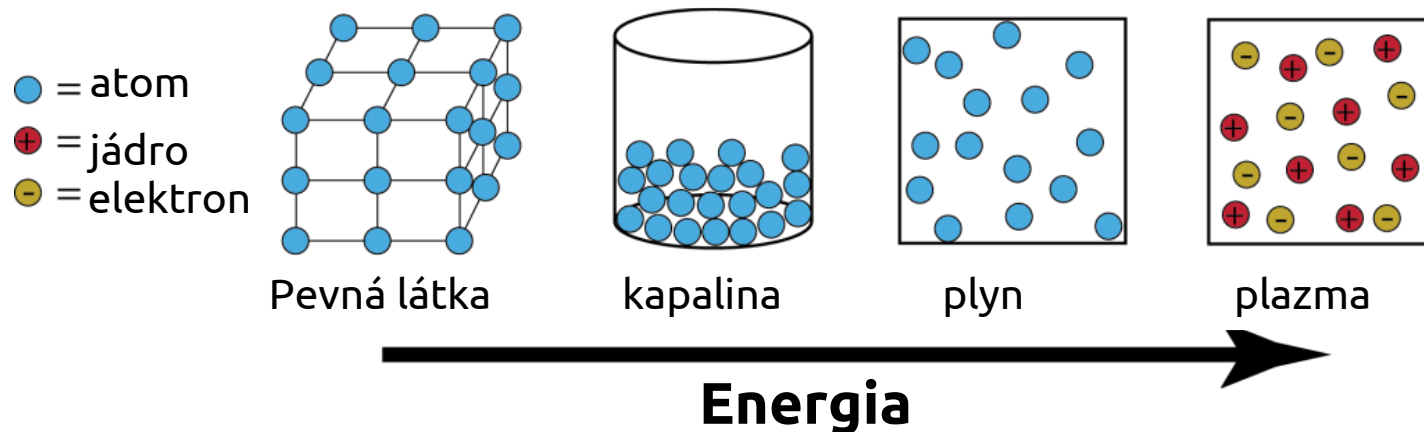


- Atomy se skládají z protonů, neutronů a elektronů
- Při dodání energie se mohou elektrony odtrhnout z atomového obalu, nastává **ionizace**

Velmi intenzivní lasery mohou narušit pole atomu natolik, že se odtrhnou všechny elektrony. Záporně nabitě elektrony a kladně nabitě ionty se pohybují volně, vzniká **PLAZMA**.

PLAZMA

- Plazma obsahuje velké množství nabitých částic
- Plazma samo vytváří elektromag. pole a reaguje na vnější pole
- Na velkých plochách se se ale jeví neutrálně
- Plazma vzniká prakticky okamžitě při interakci intenzivního laseru s látkou, složení potom závisí na typu látky a intenzitě laseru



Více jako 99% atomární látky ve vesmíru je ve formě plazmy!

Výzkum s vysokovýkonovými lasery

URYCHLOVÁNÍ ČÁSTIC POMOCÍ LASERU

27

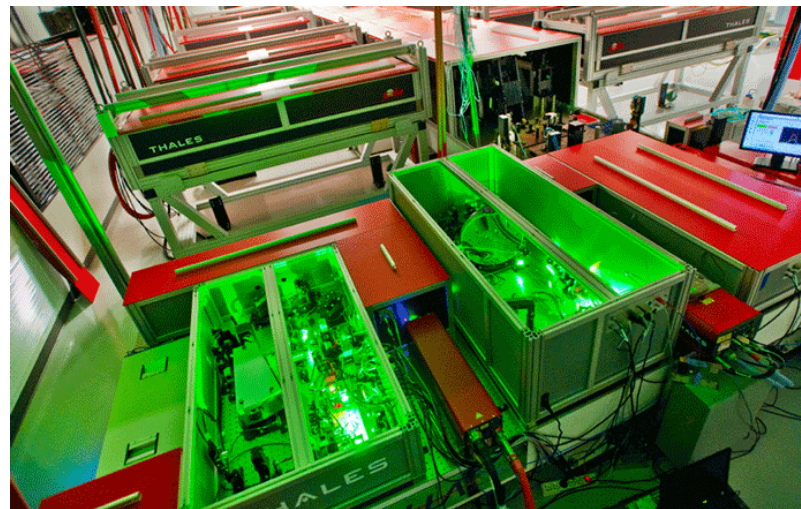
- Urychlovač částic: zařízení, které uděluje částicím velkou rychlost (energii)
- Klasické Urychlovače využívají střídavé napětí – jsou velké
- Pomocí laseru můžeme dosáhnout podobných energií na mnohem menších vzdálenostech

Rádiofrek-
večný
lineární
urychlovač
SLAC Linac:
40 GeV
na 3 km

(už dnes
neoperuje)



Laserový urychlovač BELLA
8 GeV na 20 cm!!!



*Oba urychlovače jsou v Kalifornii blízko San Francisca,
SLAC na Stanfordě a BELLA v Berkeley*

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

Komár je ale
 10^{24} krát
hmotnější
než
elektron!



JAK URYCHLIT ELEKTRONY LASEREM?

Analogie wakesurfingu: Surfař nabere dostatočnou rychlost a „skočí“ do brázdové vlny za lodí. Vlna ho začne urychlovať a nějakou dobu ho tahá so sebou. On se přitom ničeho nedrží! Urychluje ho pouze vlna.

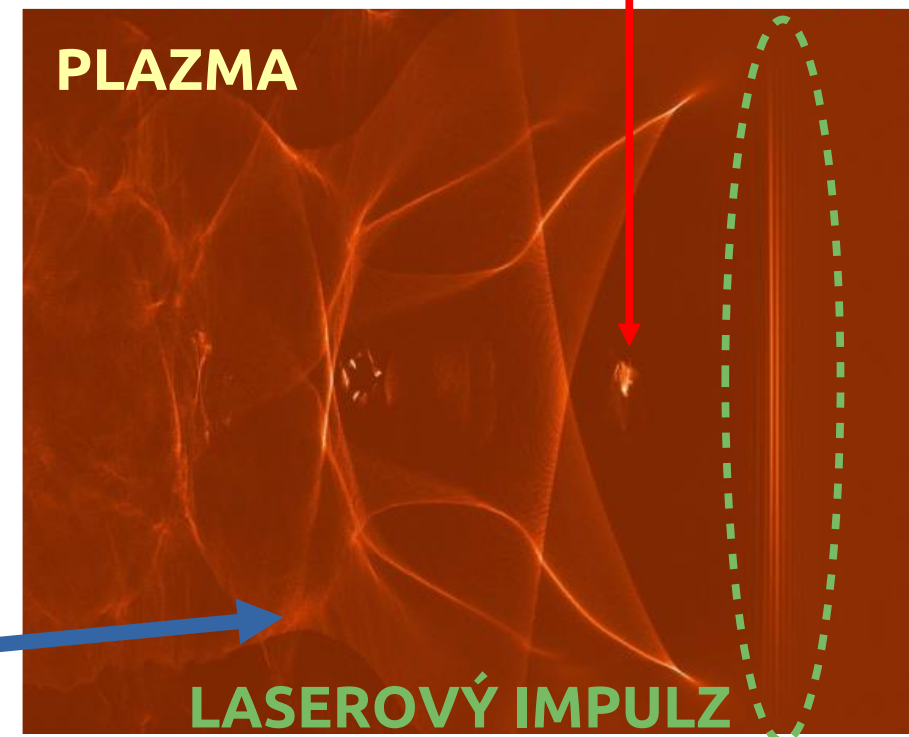
Urychlování elektrónů:

Elektronům udělíme malou počiatoční rychlost,
Oni potom „surfují“ na plazmové vlně.

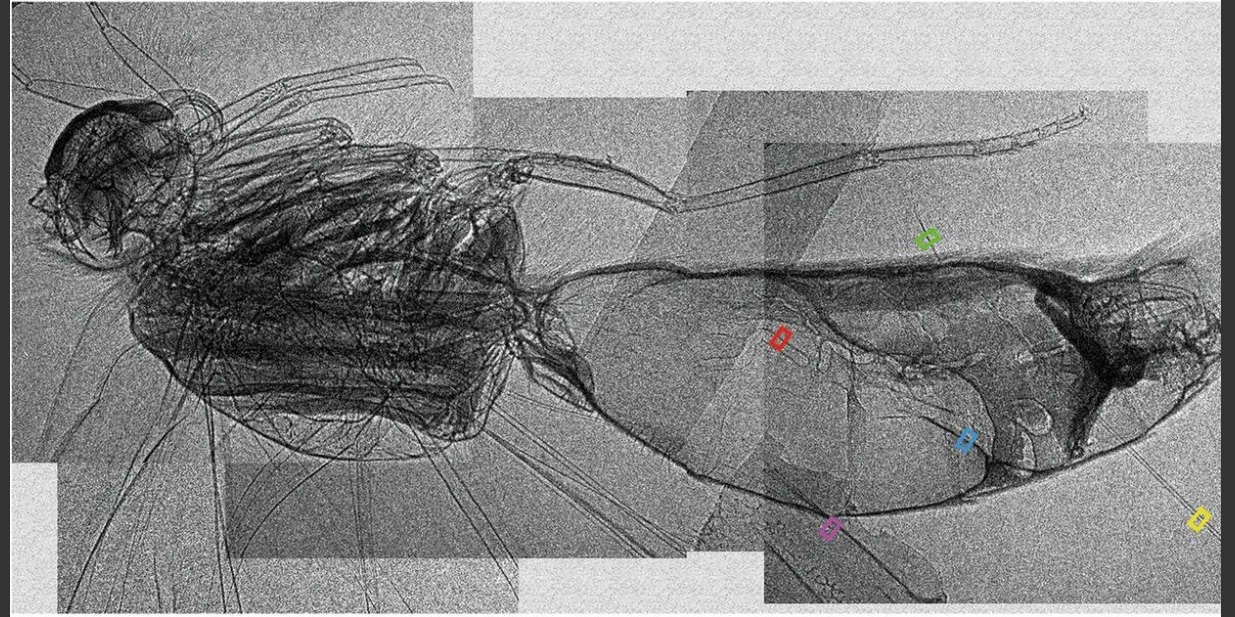


Pavel Gajdos, U3V 26.2.2024

**ELEKTRONOVÝ
SVAZEK**



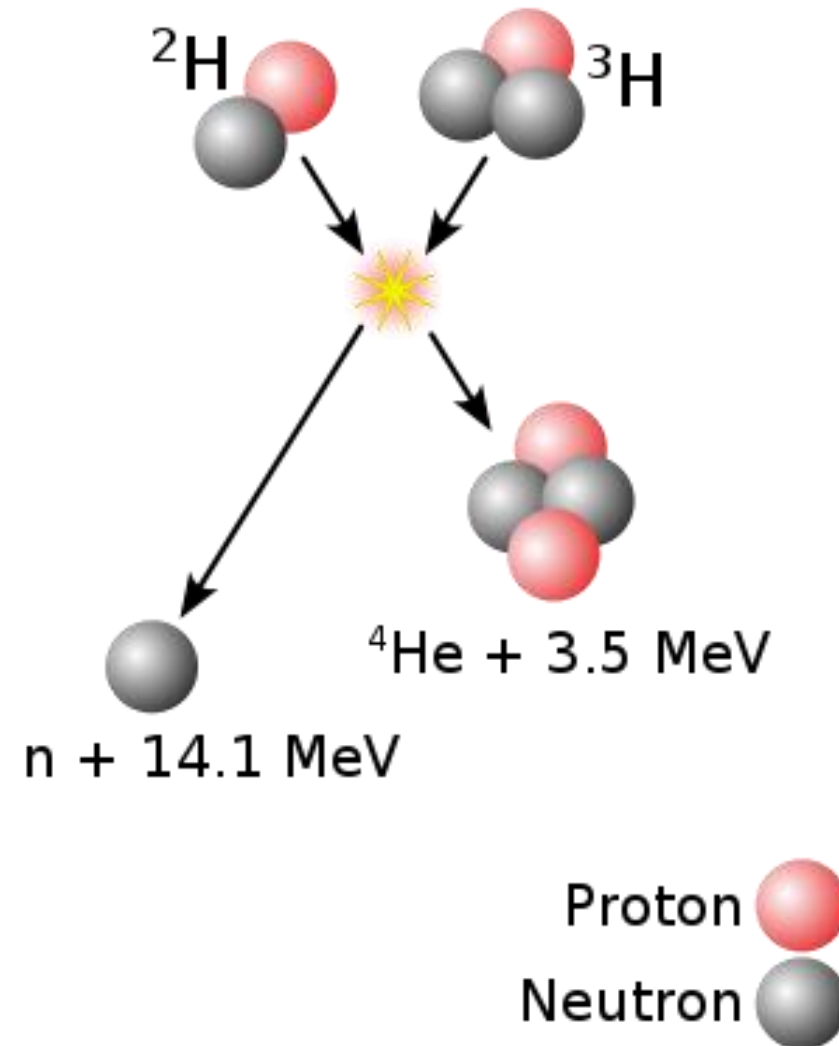
- Pomocí ozařováním plynu laserem nebo laserem urychlených elektronů lze generovat krátké UV nebo rentgeny
- Lasery lze generovat kratší rentgenové impulzy (než např. v nemocnici) s rozměry několika mikrometrů → nové možnosti aplikací



Zobrazení motýla s rozlišením 5 mikrometrů s vysokým fázovým kontrastem pomocí rentgenového záření generovaného vysokoenergetickými elektrony urychlenými laserem

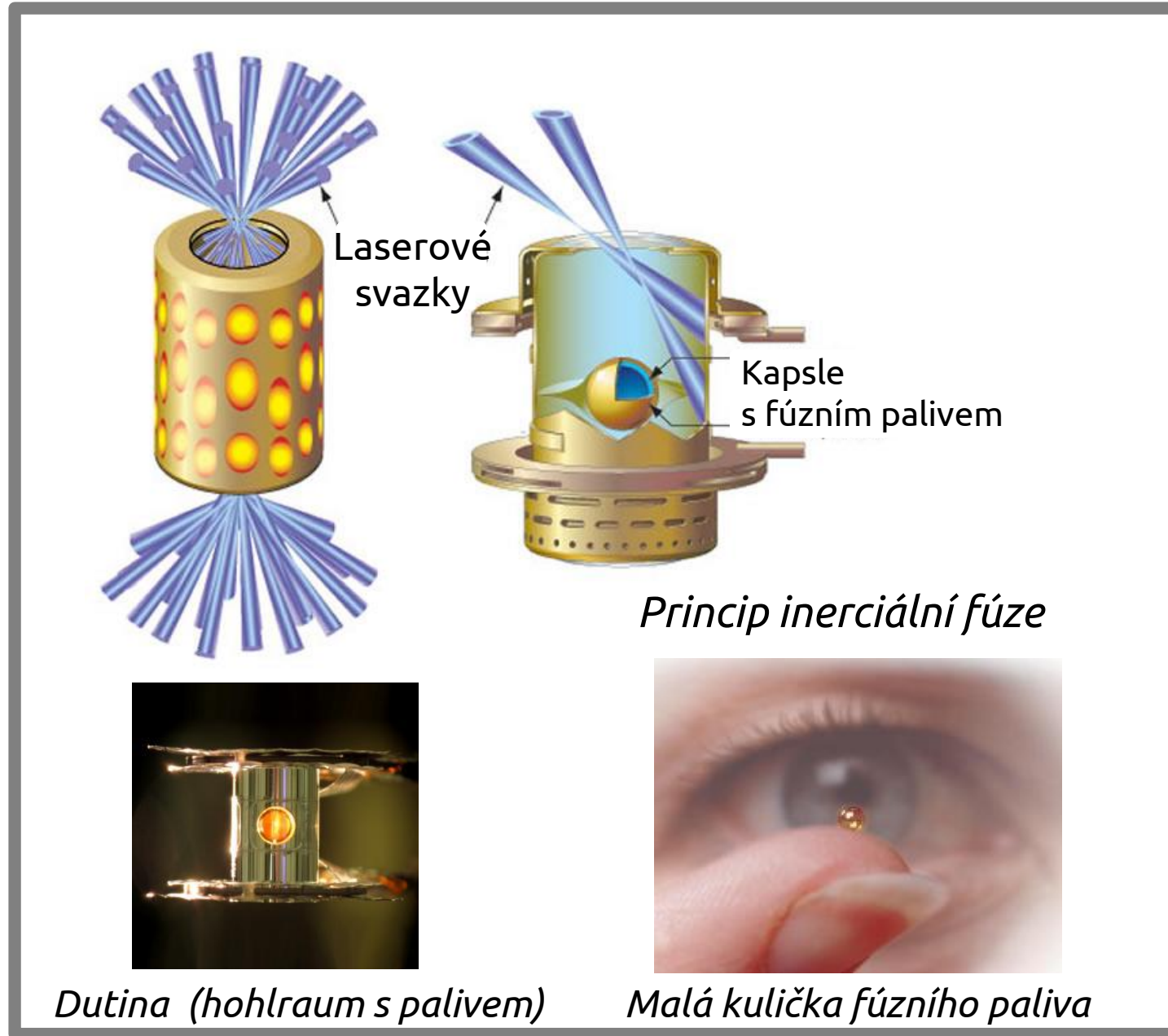
INERCIÁLNÍ FÚZE

- Fúze: slučování lehkých jader na těžší za vzniku energie
- 3 druhy fúze:
 - Gravitační (Slunce)
 - Magnetická (Tokamak)
 - Inerciální (Lasery)
- Nutné dosažení velmi vysoké teploty a hustoty



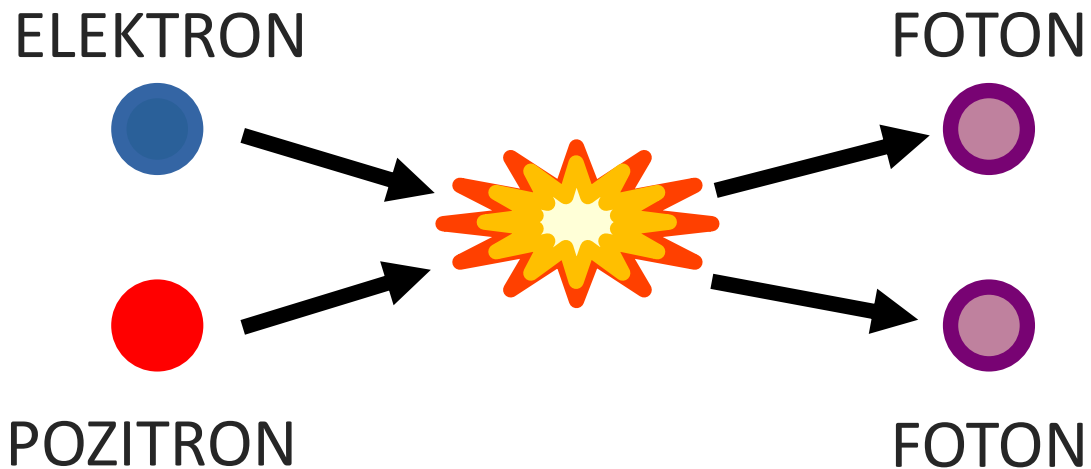
INERCIÁLNÍ FÚZE

- Množství laserových paprsků ozařuje zlatý dutý válec
- Atomy zlata získají prebytečnou energii, kterou vyzáří jako gamma fotony
- Kapsle z vodíku uvnitř dutiny je ozařována těmito fotony
- Vzniká výbuch fúzního paliva
- NIF (2022) – poprvé získá energie z inerc. fúze

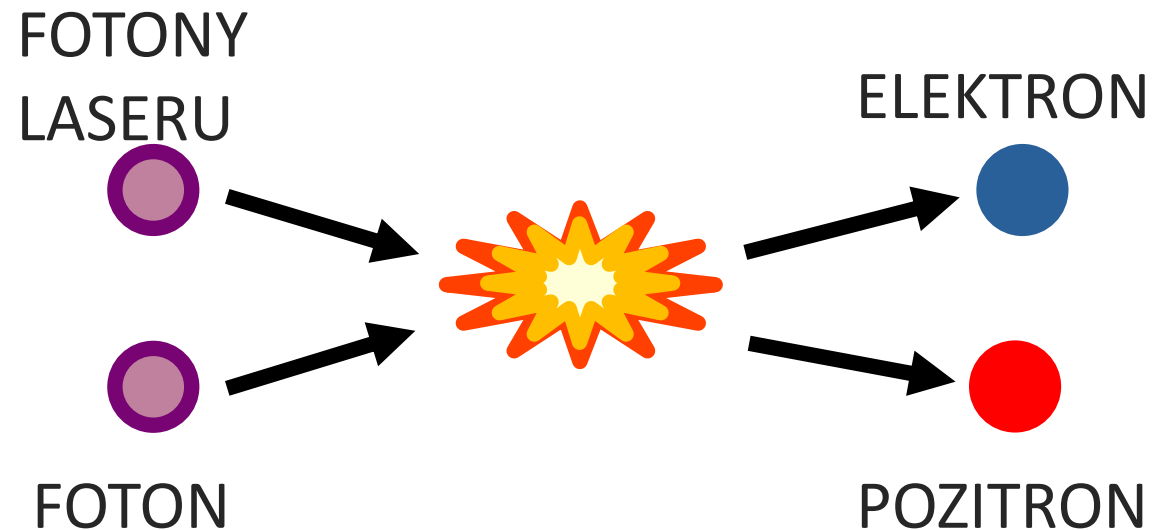


GENEROVÁNÍ ELEKTRON POZITRONOVÝCH PÁRŮ (EXOTICKÁ FYZIKA)

Pokud **elektron** interaguje so svojou antičasticí **pozitronem**, hmota *anihiluje* → elektron a pozitron zaniknú, vzniknou **2 vysoko energetické fotony svetla**.



S vysokointenzívnými lasery sme dnes schopní vyvolať opačný proces: **více fotonů z laseru** interaguje s **jedním vysokoenergetickým fotonem** → vzniká **elektron a pozitron!**



ZÁVĚREM

- Laser je jeden z nejuniverzálnějších vynálezů fyziky
- Od prvního laseru z roku 1960 se vývoj stále posouvá
- Dnes umíme generovat laserové impulzy s výkony v řádu PW, které trvají jen několik desítek attosekund
- Takto experimentálně dosažené výkony nám umožňují objevovat nové fyzikální jevy a vymýšlet nové aplikace
- Česká republika se velmi podílí na mezinárodním výzkumu v této oblasti (PALS, ELI Beamlines, HiLASE,...)



Prague Asterix Laser System (PALS), Praha

Iodový laser
 Energie 1 kJ
 Délka pulzu 400 ps
 Výkon 2.5 TW
 Vlnová délka
 1.315 μm
 1 pulz/půlhodina

DĚKUJI ZA POZORNOST!

Ing. Pavel Gajdoš
Ústav fyziky plazmatu AV ČR
FJFI ČVUT v Praze
gajdos@ipp.cas.cz



Zdroje obrázkov:

Titulní strana: <https://www.acuitylaser.com/>

Aplikace laserů:

- <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://cs.khanacademy.org/science/obecna-chemie/xefd2aace53b0e2de:atomy-a-jejich-vlastnosti/xefd2aace53b0e2de:fotoelektronova-spektroskopie/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum> 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/>

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.szsbajkalska.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/>

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

Fúze: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/3b/Deuterium-tritium_fusion.svg/330px-Deuterium-tritium_fusion.svg.png

Undulátor: <https://en.wikipedia.org/wiki/Undulator>

PodĎakování: *Děkuji Ing. Dominice Mašlárové za připravenou prezentaci*