

LASER

IDEA O OVLÁDNUTÍ SVETLA



DOMINIKA MAŠLÁROVÁ
ÚSTAV FYZIKY PLAZMATU AV ČR
FJFI ČVUT v Praze
27.2.2023, U3V MFF UK

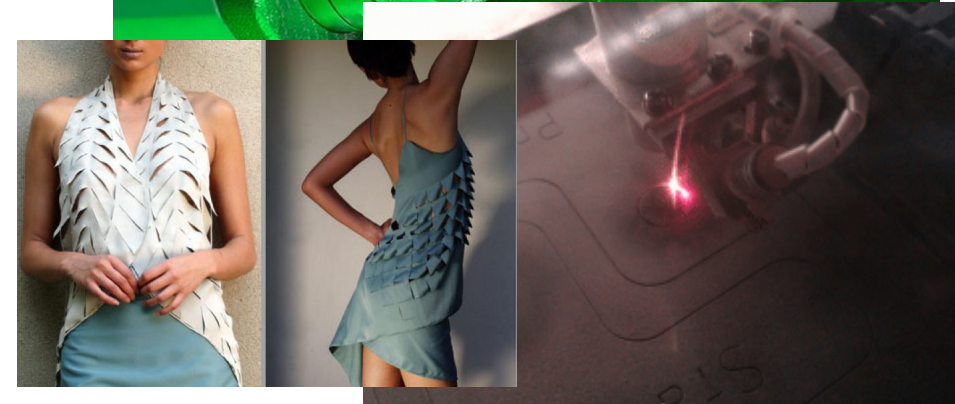
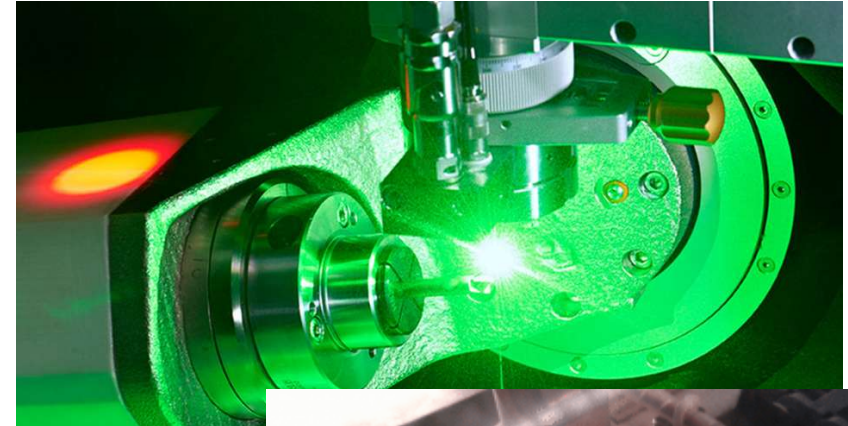
LASER-UNIVERZÁLNY OBJAV



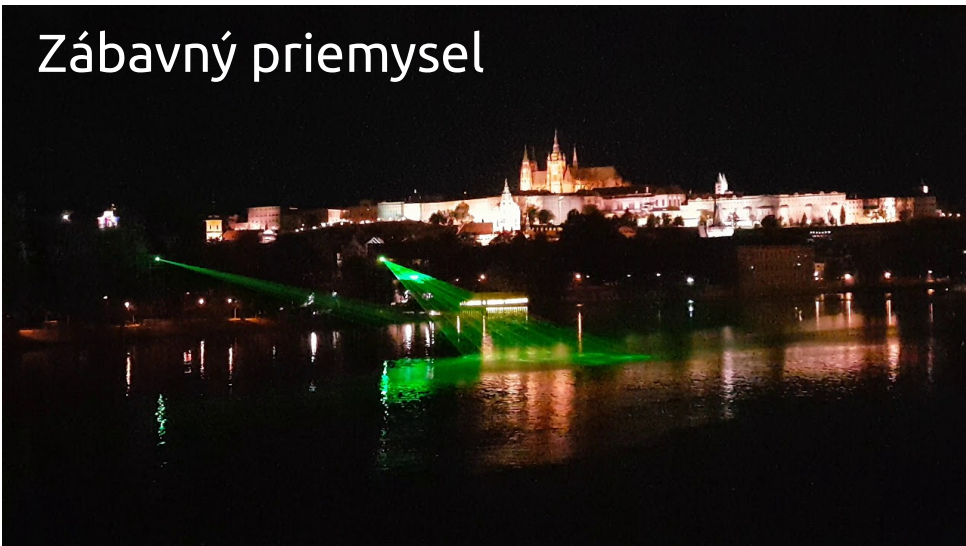
Komerčné
využitie



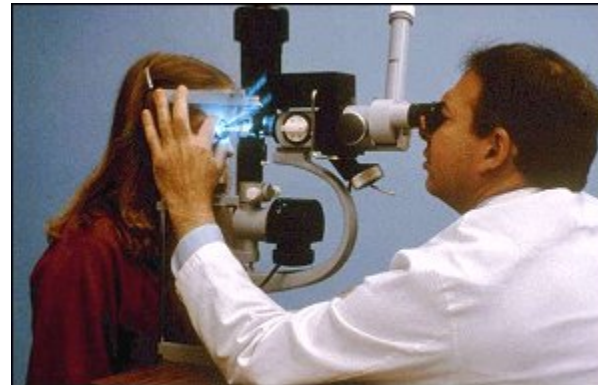
Priemysel



Zábavný priemysel

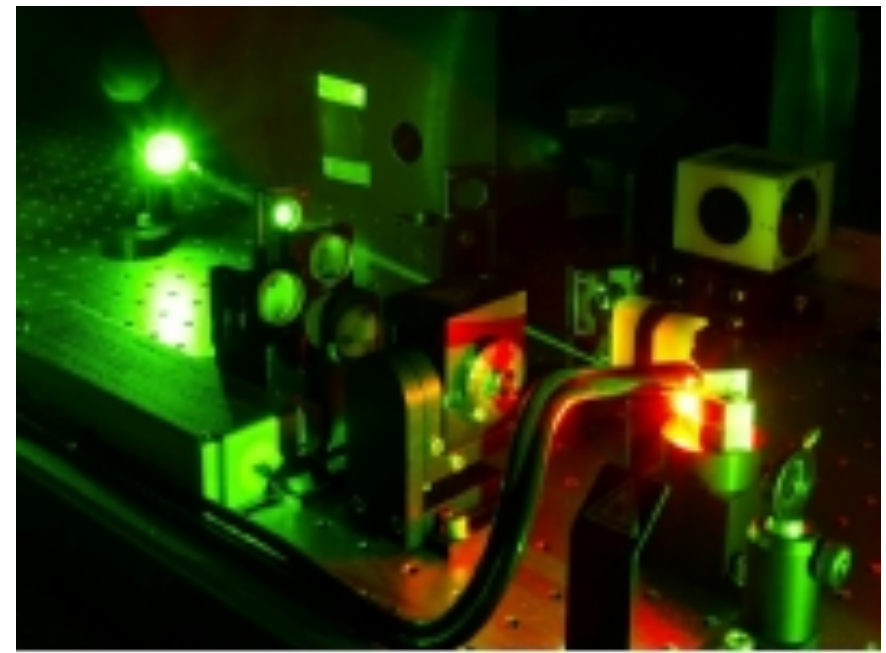


Medicína

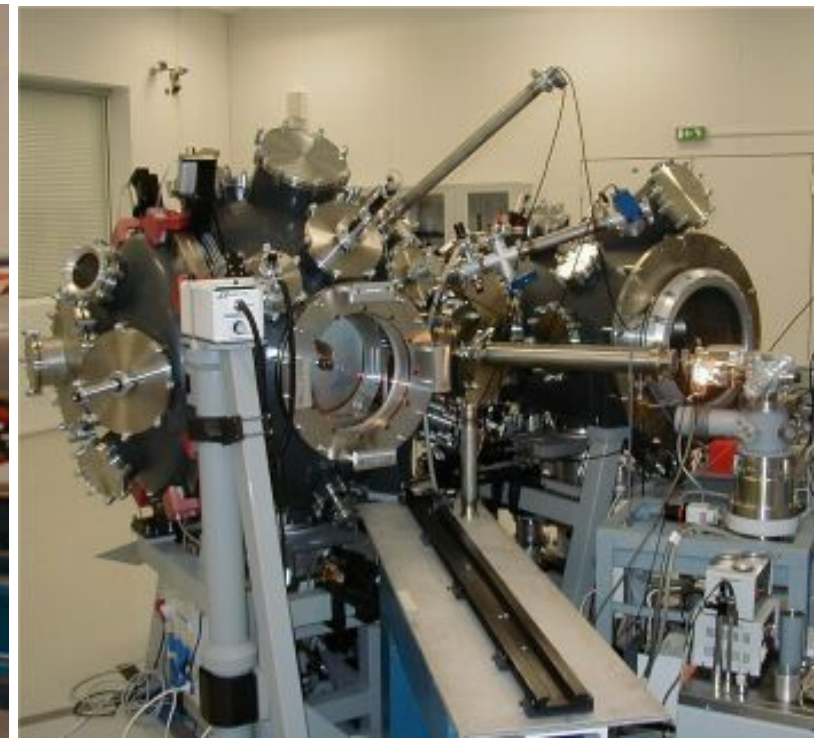
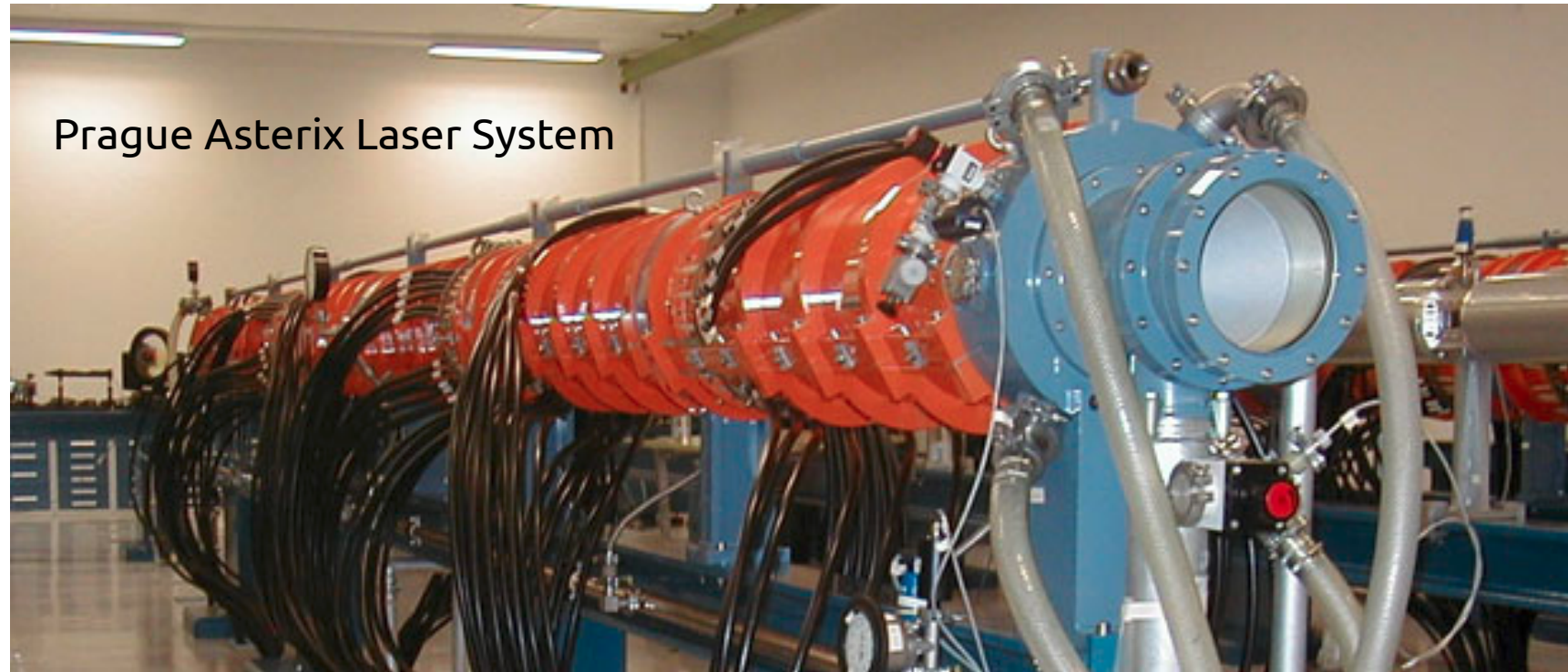


OBSAH PREZENTÁCIE

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



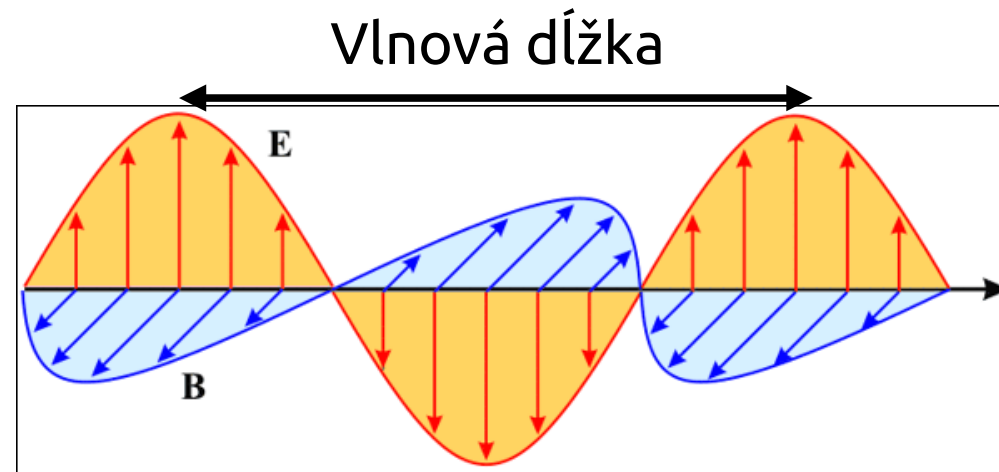
Prague Asterix Laser System



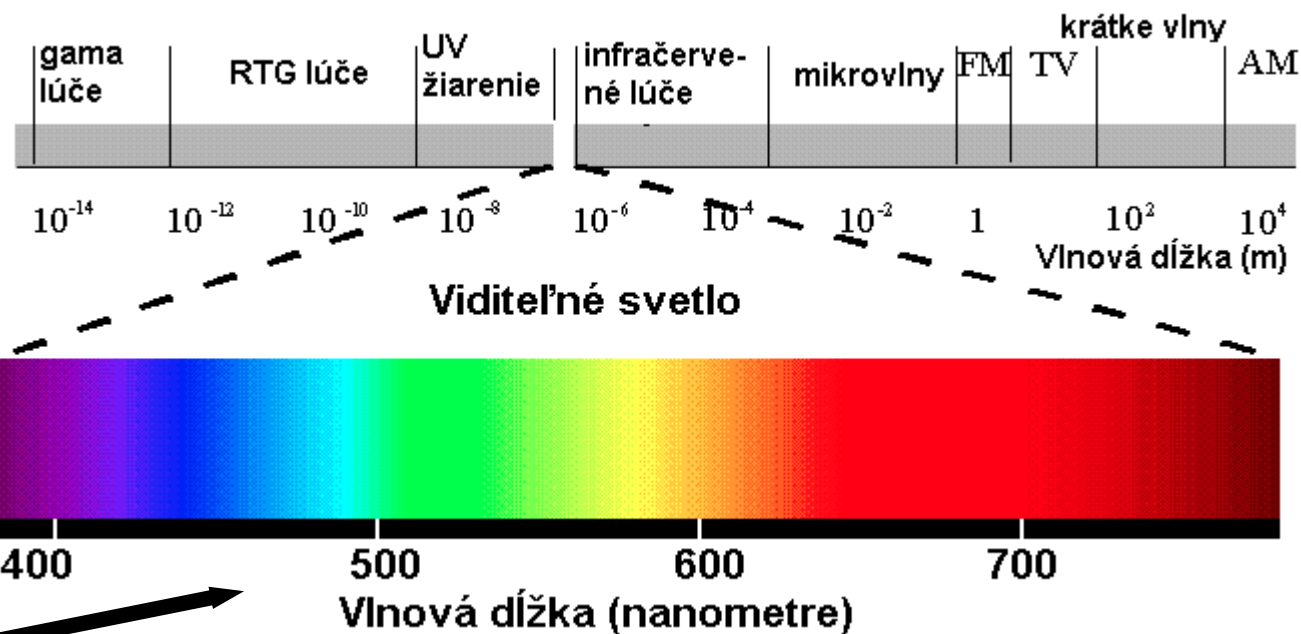
ČO JE TO LASER?

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

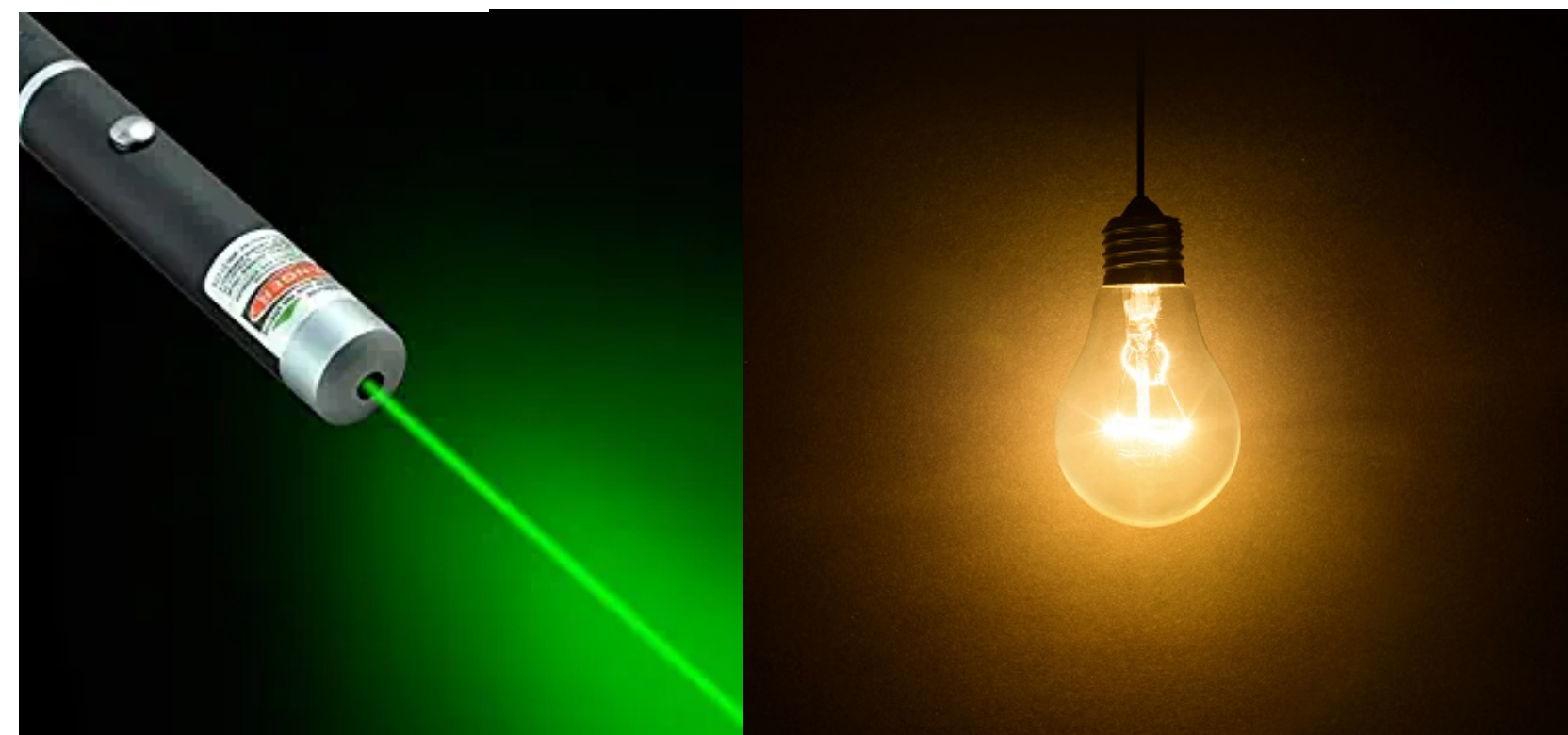
c - rýchlosť svetla

λ - vlnová dĺžka svetla

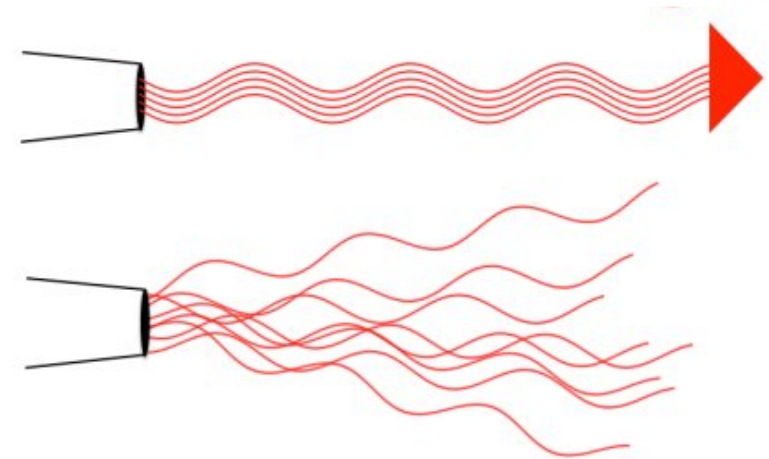
KLASICKÝ ZDROJ SVETLA VS. LASER



KLASICKÝ ZDROJ SVETLA VS. LASER



Koherentné svetlo:
rovnaká fáza aj smer



Nekoherentné
svetlo

- ✓ Koherentnosť
- ✓ Kvazimono-
- ✓ chromatickosť
(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

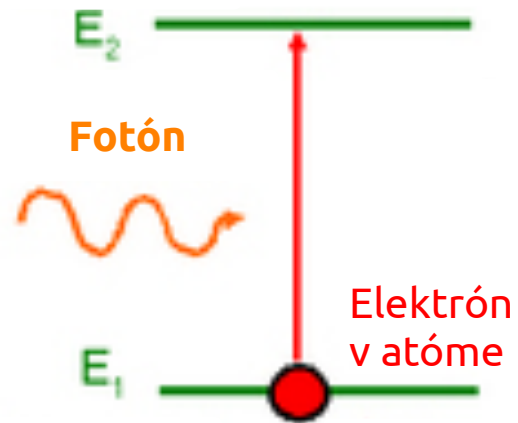
INTERAKCIA FOTÓNU A ATÓMU

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

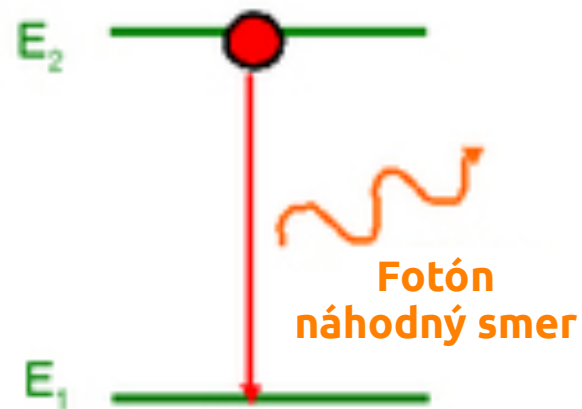
Absorpcia – látka pohlcuje fotóny žiarenia a elektróny prechádzajú na vyššie energetické hladiny.

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**.

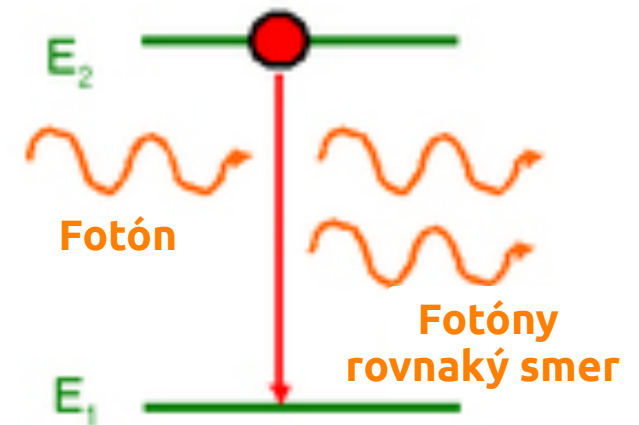
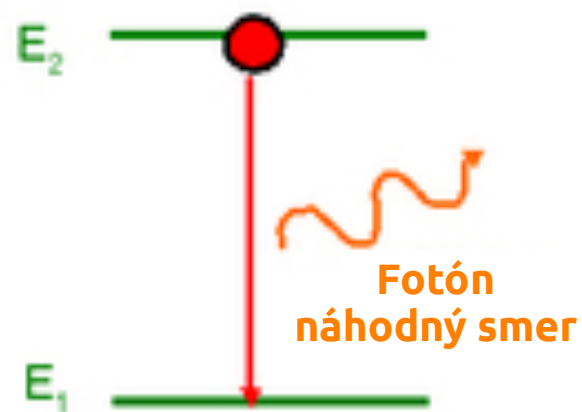
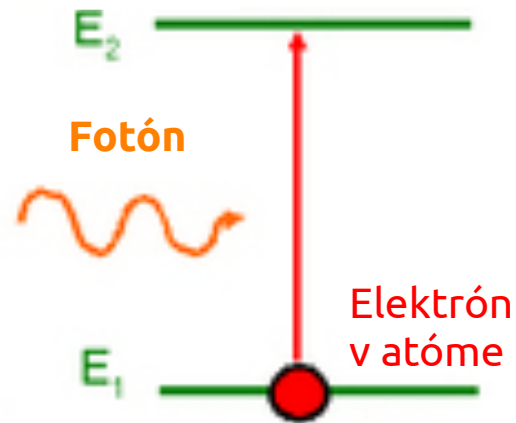
Absorpcia – látka pohlcuje fotóny žiarenia a elektróny prechádzajú na vyššie energetické hladiny.

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

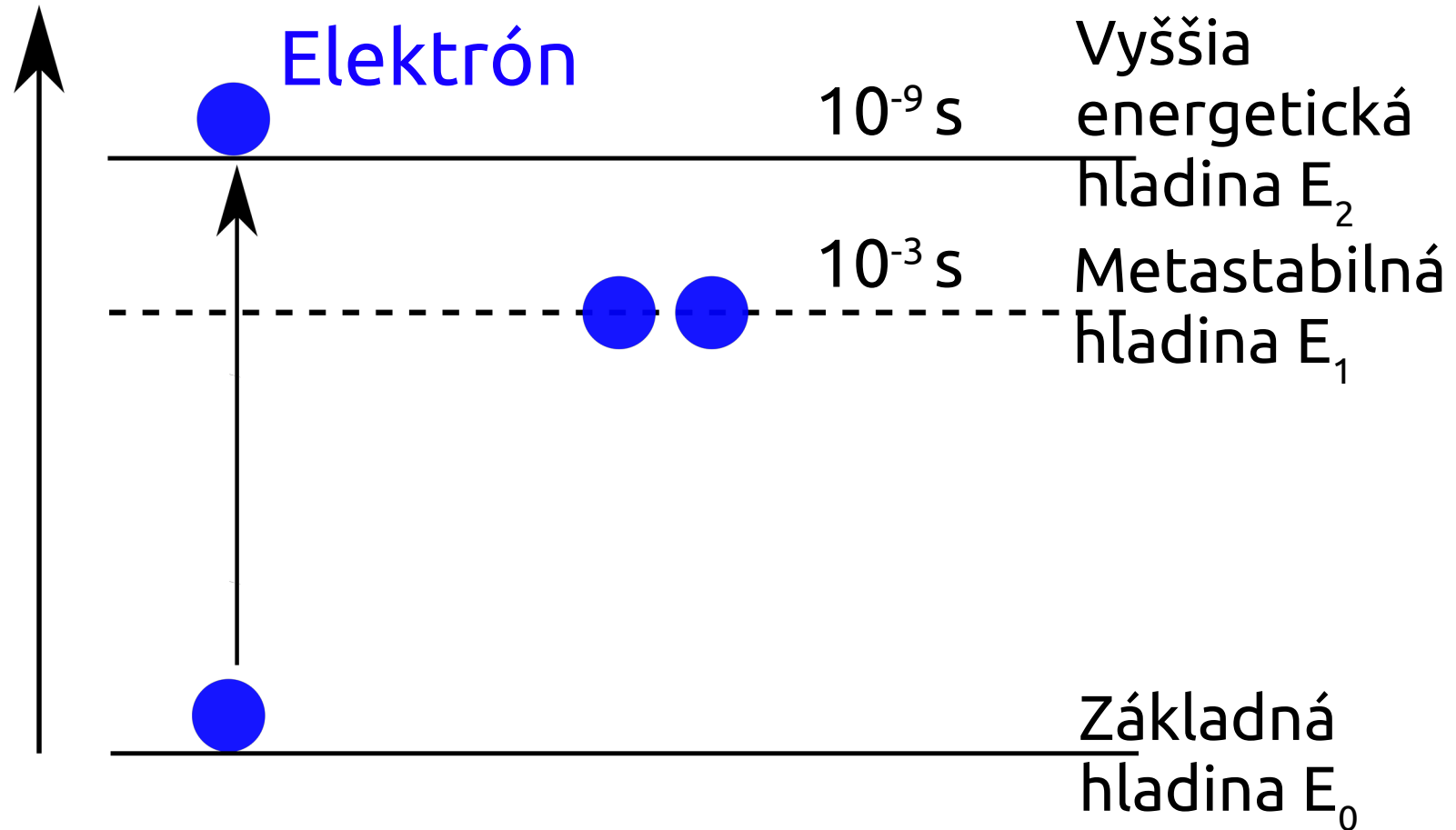
Nižšia energetická hladina



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

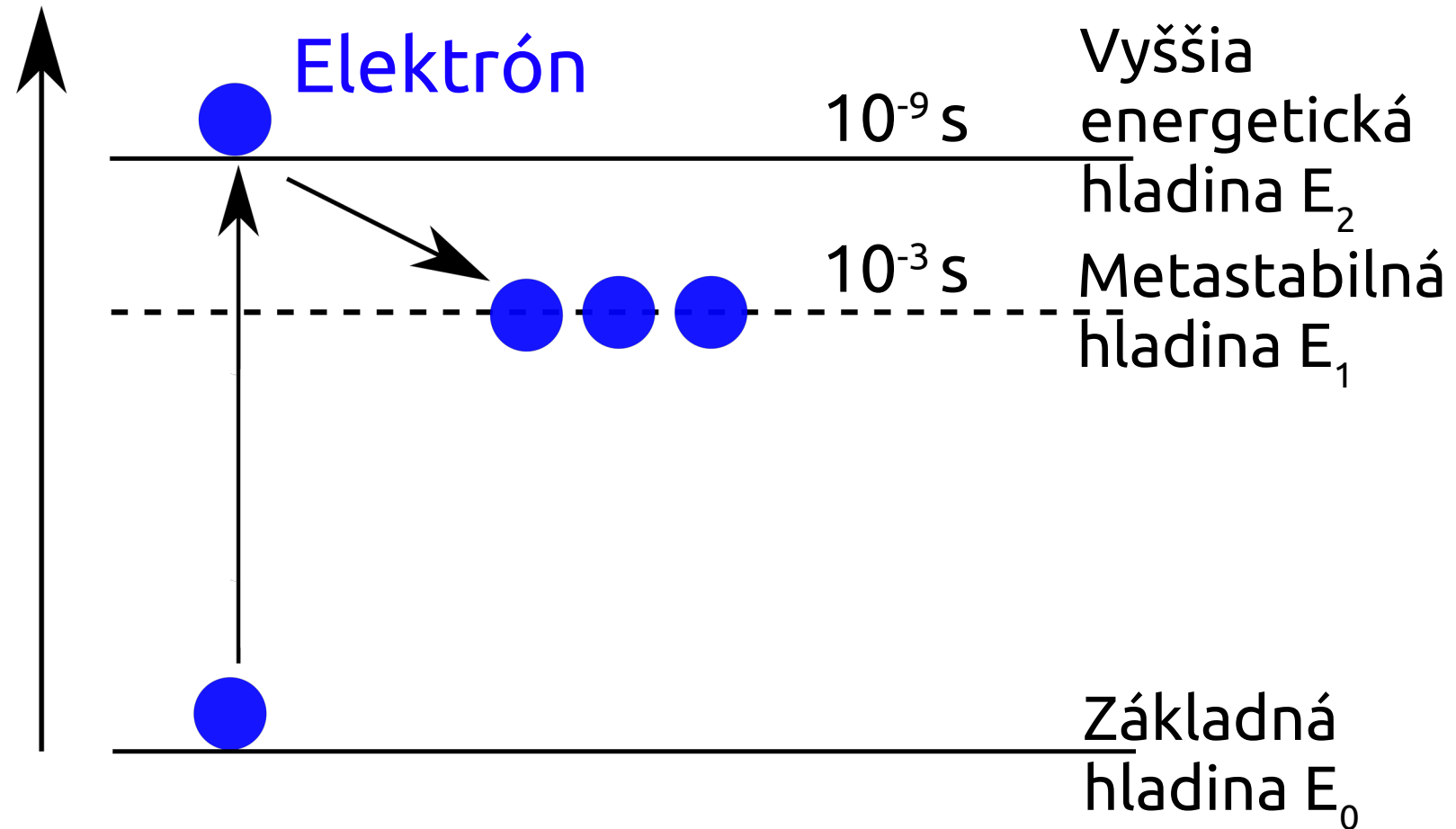
Energetické hladiny



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

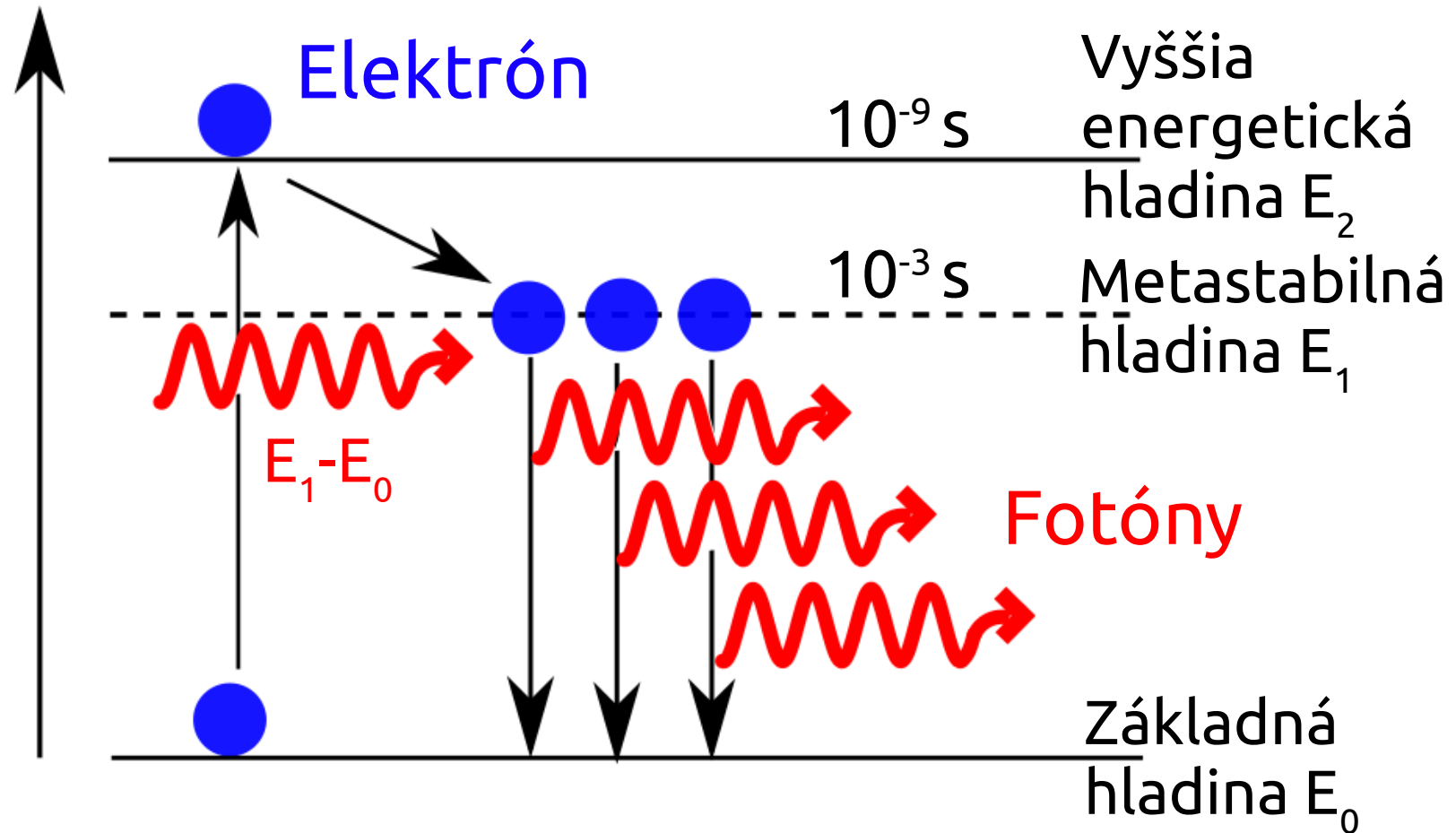
Energetické hladiny



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.

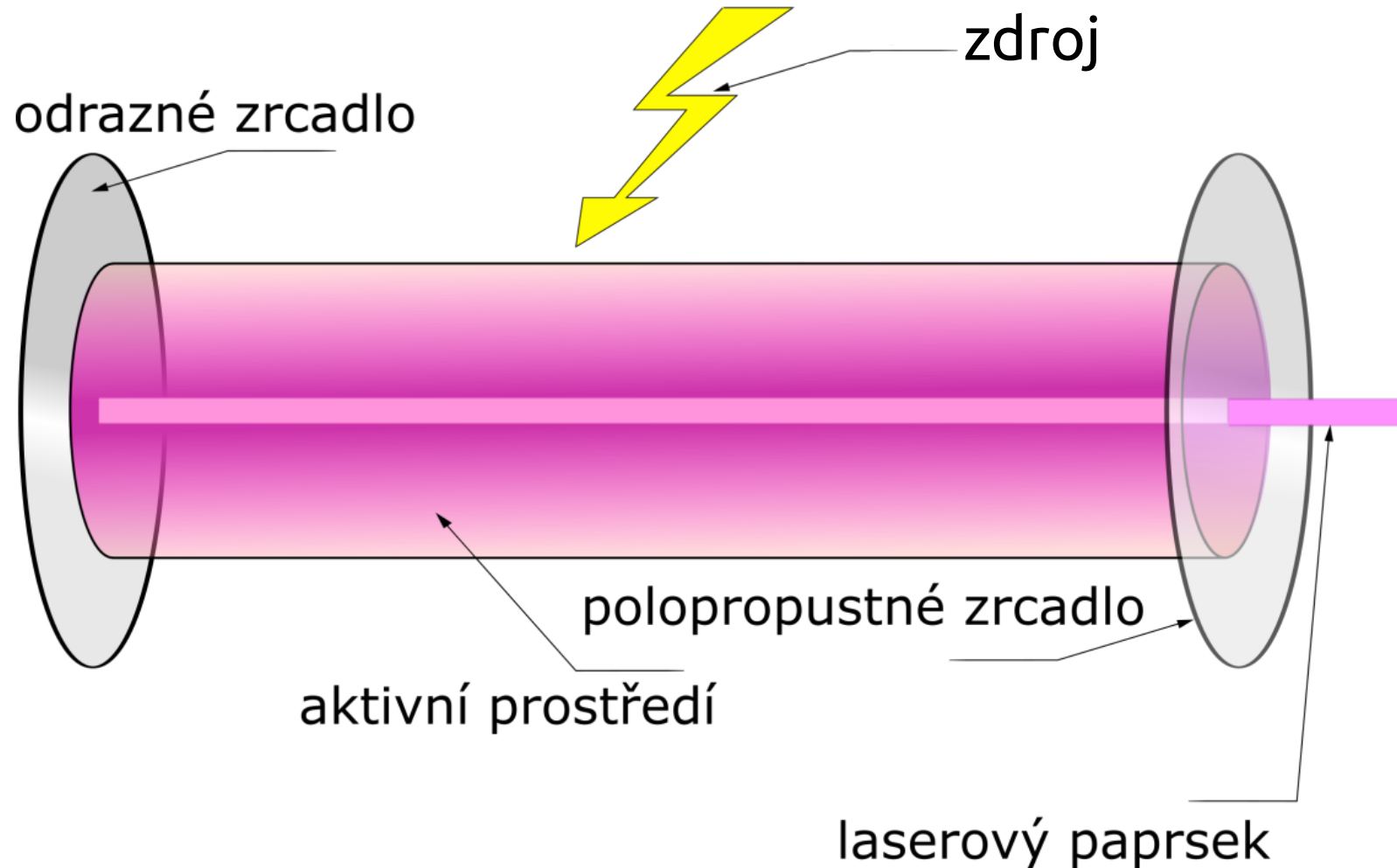
PRINCÍP FUNGOVANIA LASERU

Energetické hladiny



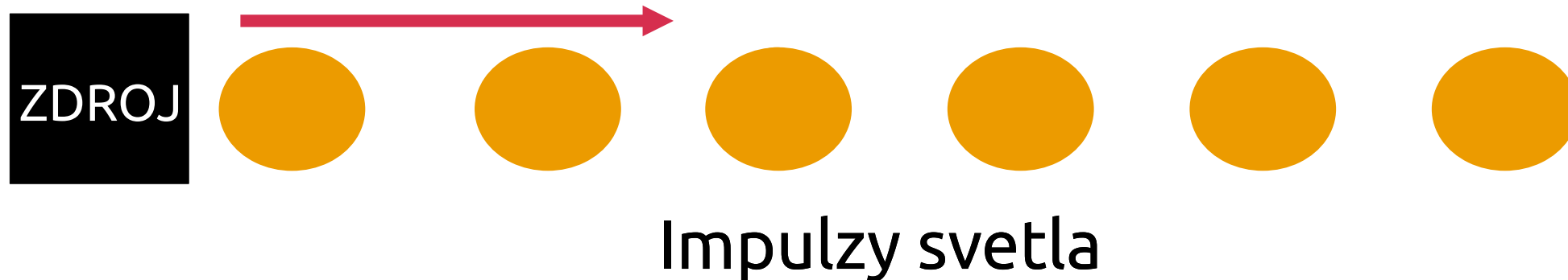
PRINCÍP FUNGOVANIA LASERU

- 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



Aktivne prostredie určuje výslednú vlnovú dĺžku laseru.

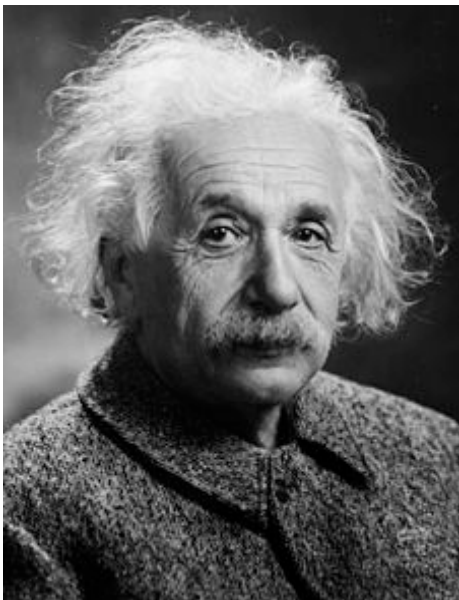
KONTINUÁLNE SVETLO VS. IMPULZY



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;

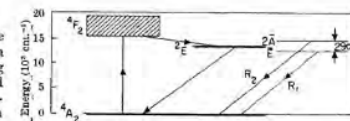


Fig. 1. Energy-level diagram of Cr³⁺ in corundum, showing pertinent processes

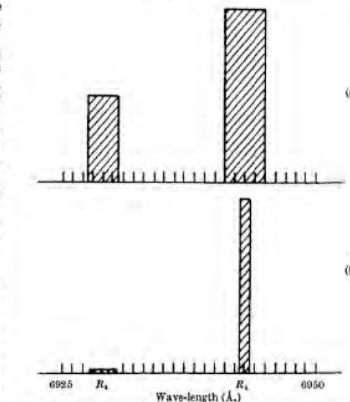


Fig. 2. Emission spectrum of ruby: a, low-power excitation; b, high-power excitation

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 used⁴.

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)

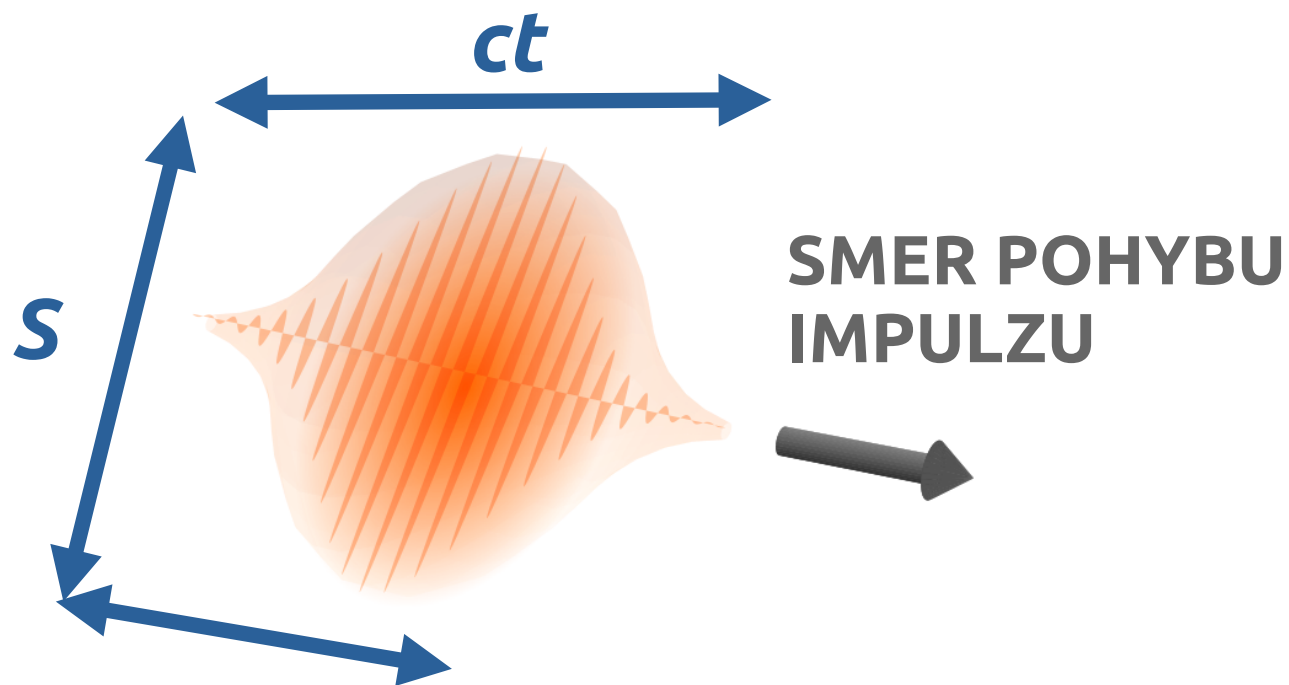
**AKÉ SÚ TO
VYSOKOINTENZÍVNE
LASERE?**

ČO JE TO INTENZITA?

- Energia E
- Trvanie laserového impulzu t
- Plocha laserového impulzu S
- Rýchlosť svetla c

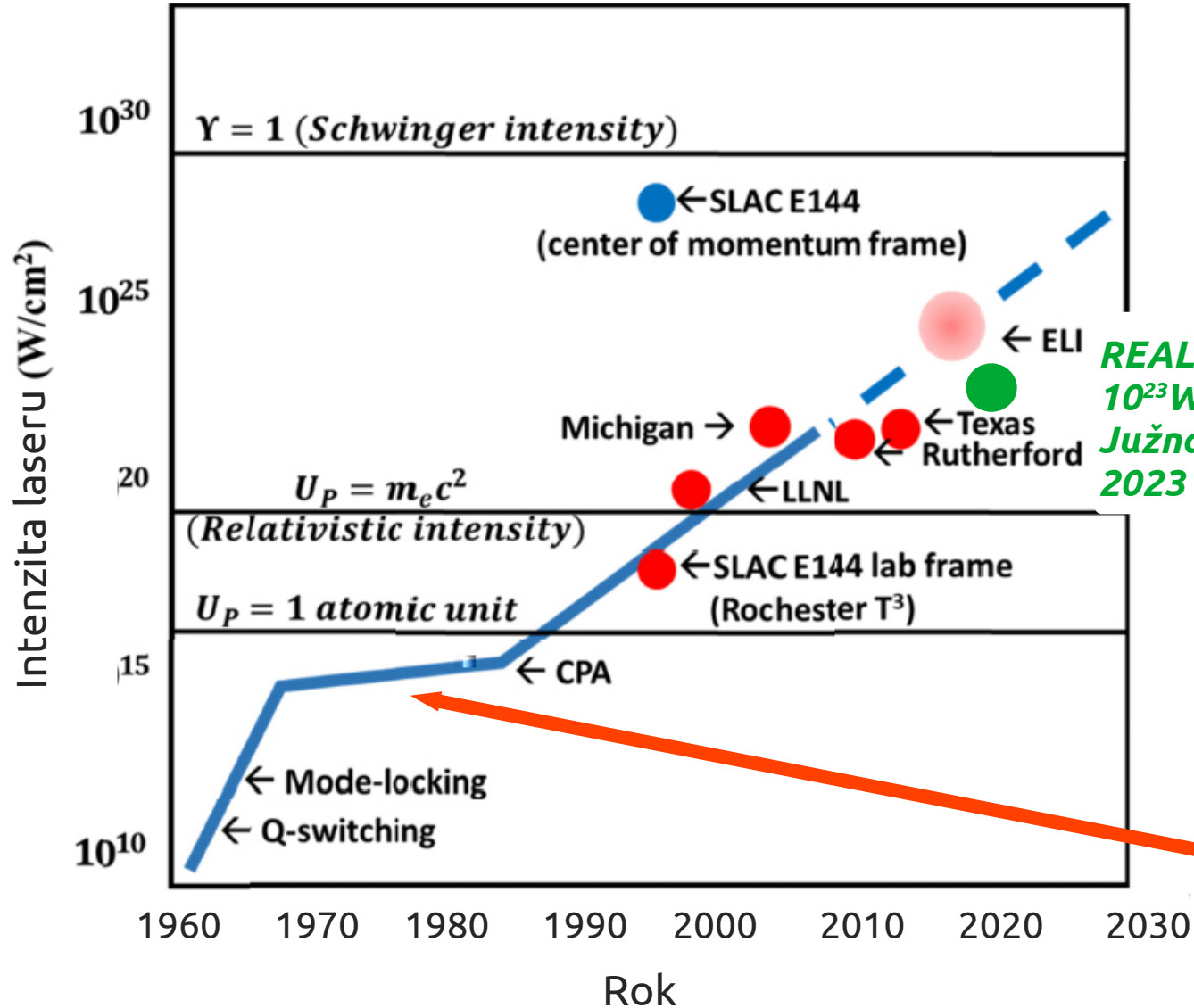
Výkon $P = E/t$ energia za čas

Intenzita $I = P/S$ výkon na plochu



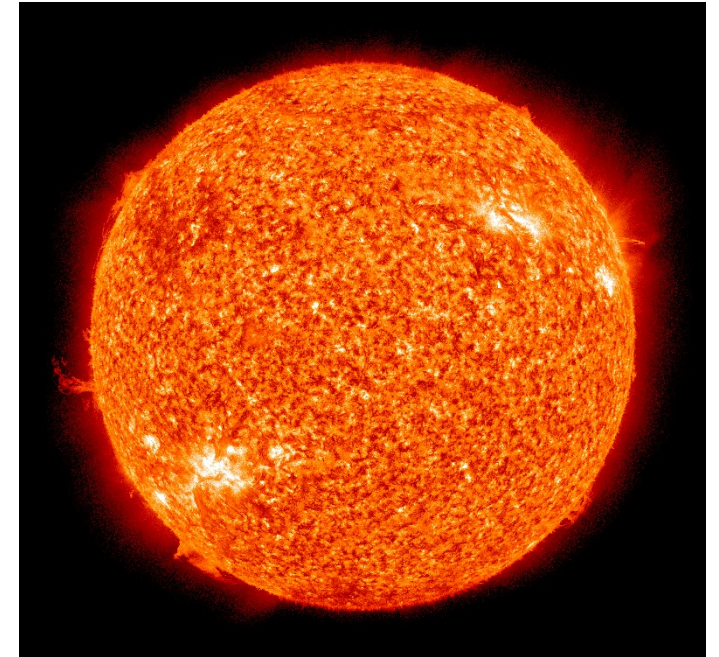
HISTORICKÝ VÝVOJ INTENZITY LASEROV

Predpoveď z konca minulého desaťročia



REALITA:
 10^{23} Wcm^{-2}
Južná Kórea
2023

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

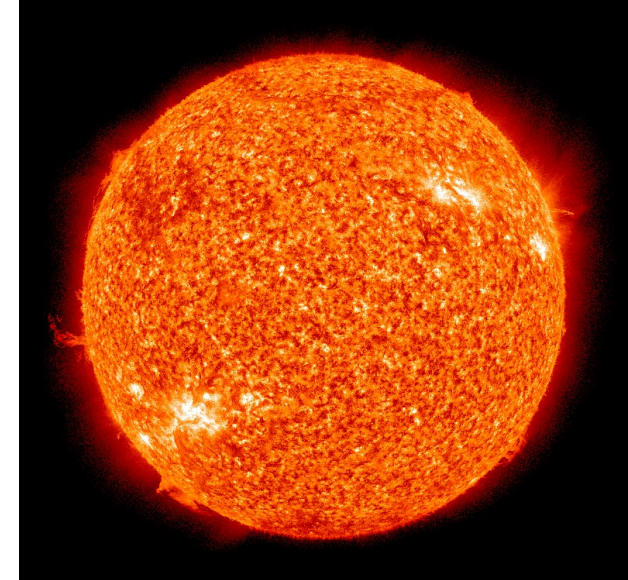
V roku 2019 rekord v maximálnom výkone laseru:

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

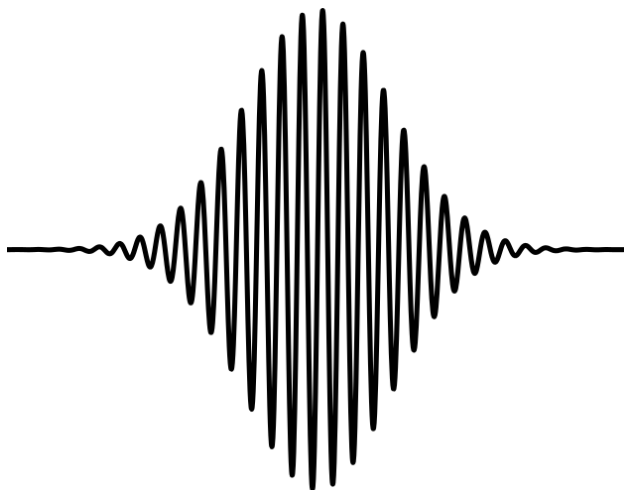
DENNÝ ENERGETICKÝ VÝDAJ /PRÍJEM DOSPELÉHO ČLOVEKA

8 400 000 J



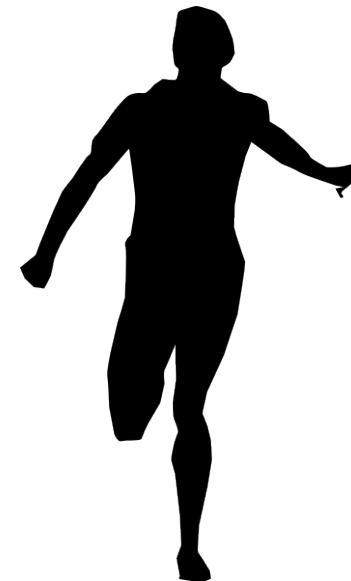
LASEROVÝ
IMPULZ
NAJVÝKO-
NNEJŠIEHO
LASERU

~ 250 J

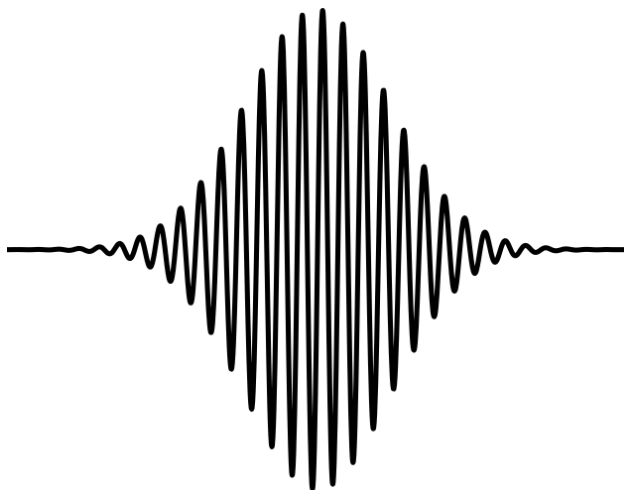


ENERGIA - POROVNANIE

DENNÝ ENERGETICKÝ VÝDAJ /PRÍJEM DOSPELÉHO ČLOVEKA
8 400 000 J



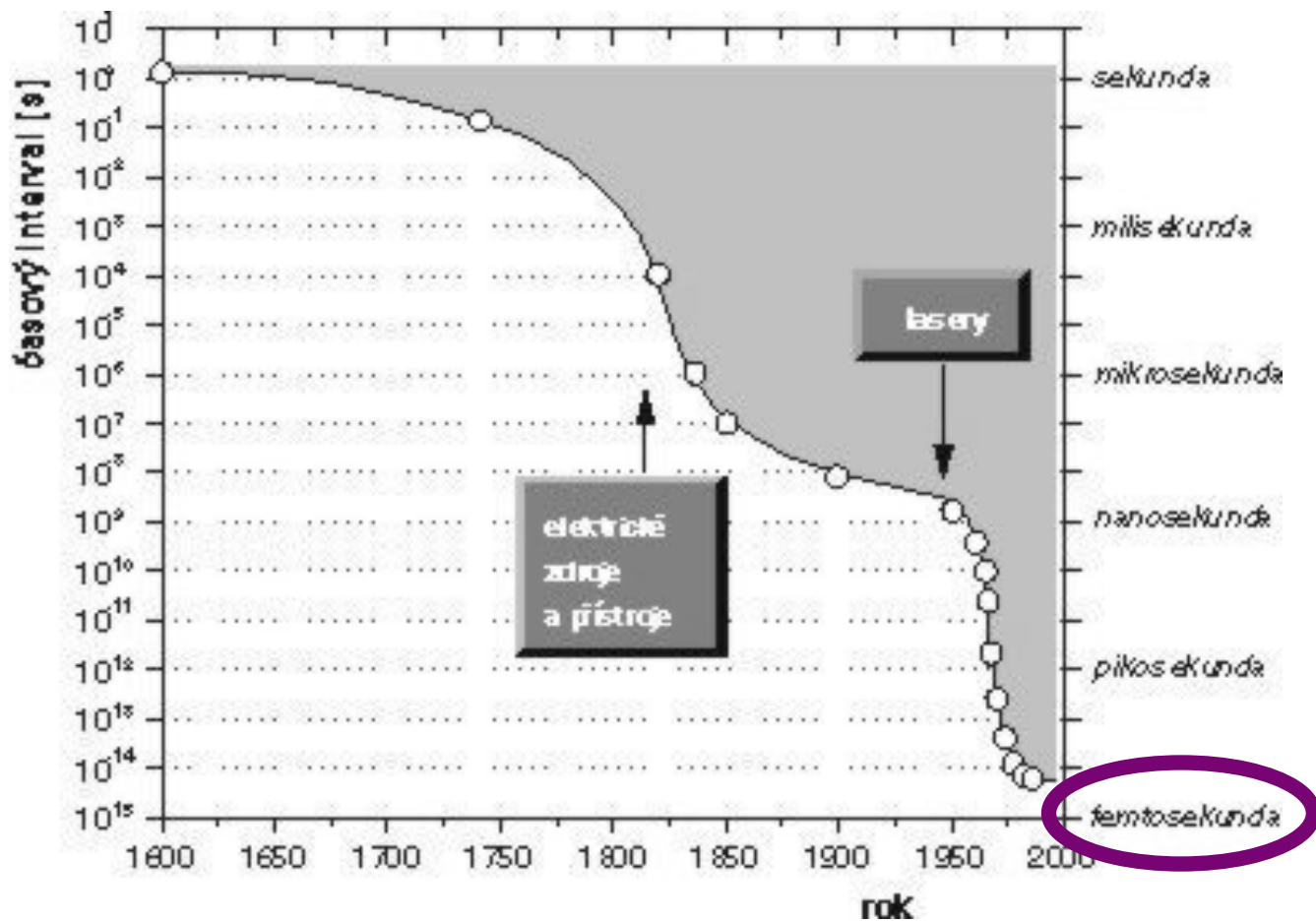
LASEROVÝ
IMPULZ
NAJVÝKO-
NNEJŠIEHO
LASERU
~ 250 J



VÝKON=ENERGIA/ČAS

**LASEROVÉ IMPULZY
SÚ ULTRAKRÁTKE**

ULTRAKRÁTKE LASEROVÉ IMPULZY

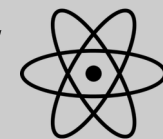


Dnešné lasery dosiahli impulz trvajúci desiatky attosekúnd (10^{-18} s)

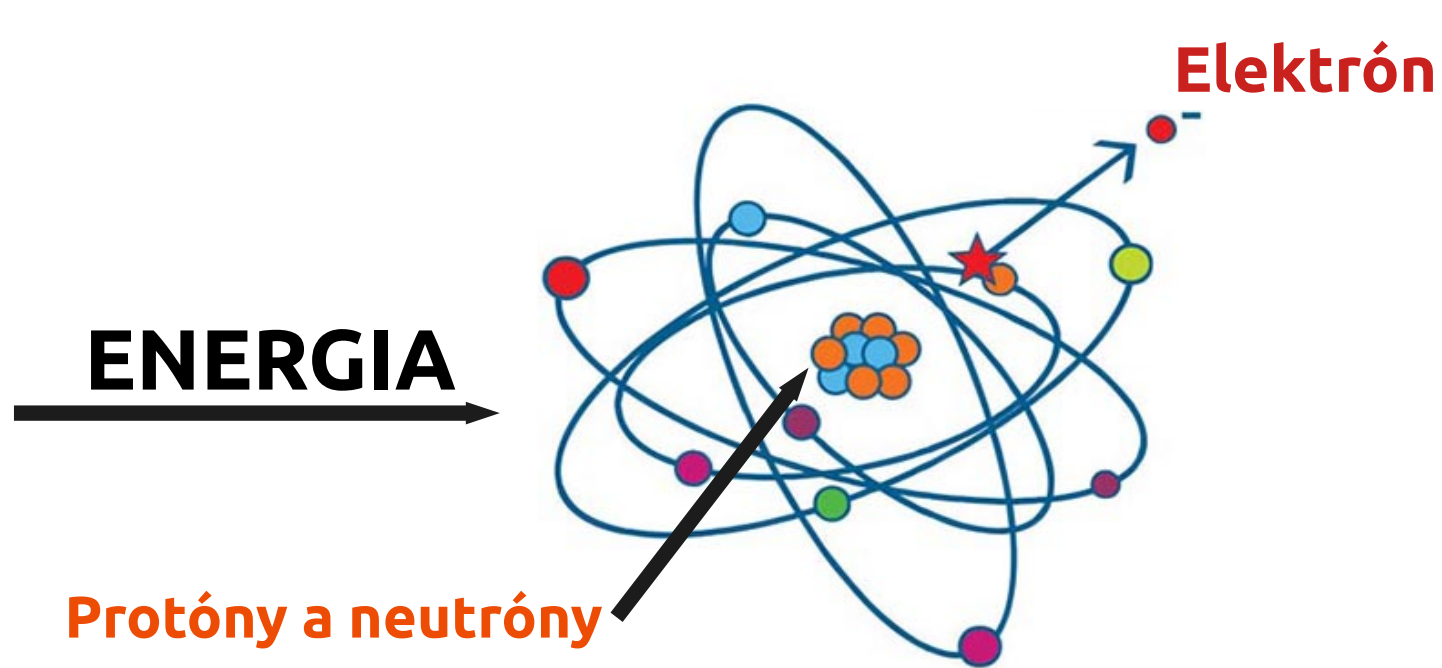
435 Ps = 4.35×10^{17} s:
vek vesmíru



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



INTERAKCIA VYSOKOINTENZÍVNEHO LASERU S LÁTKOU

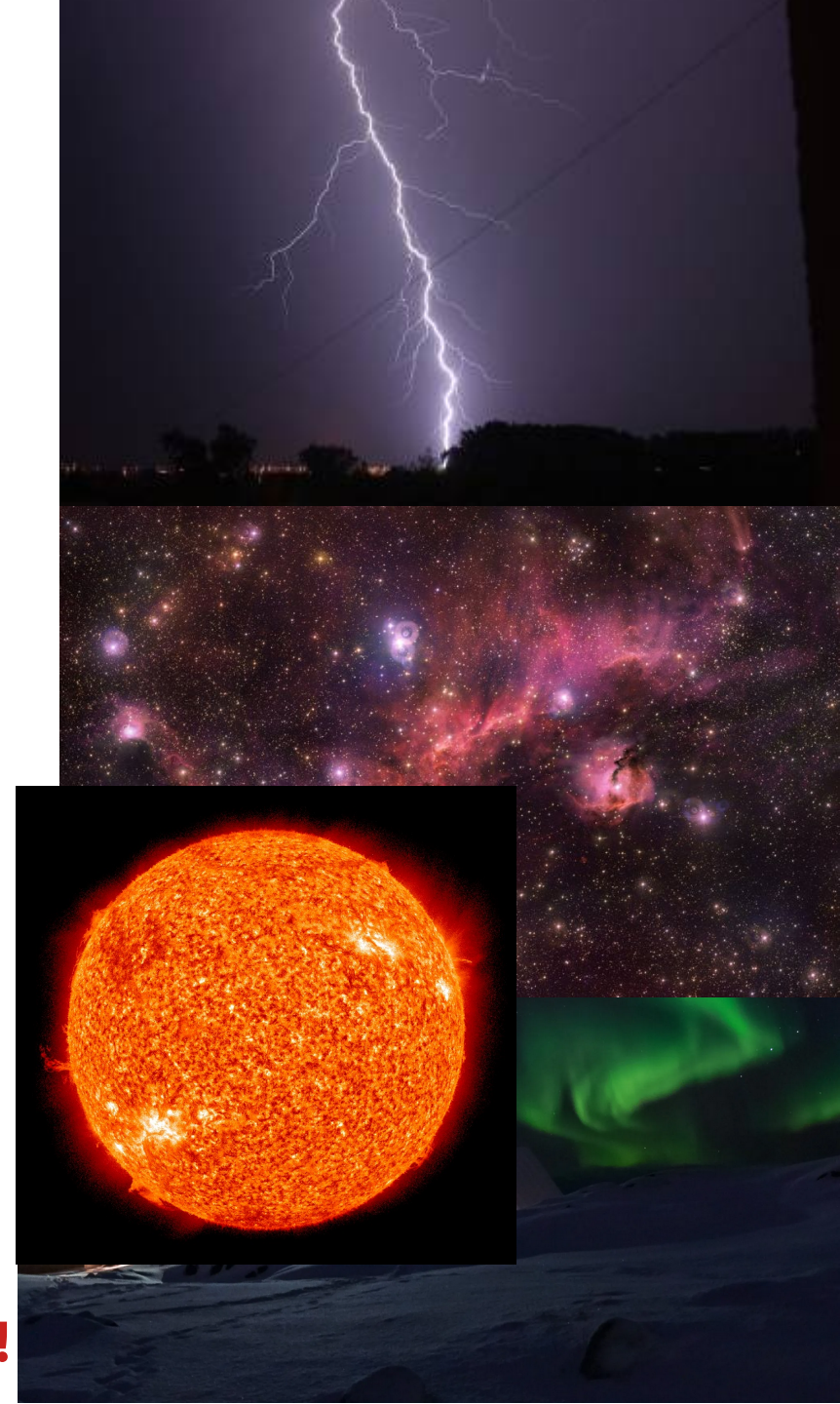
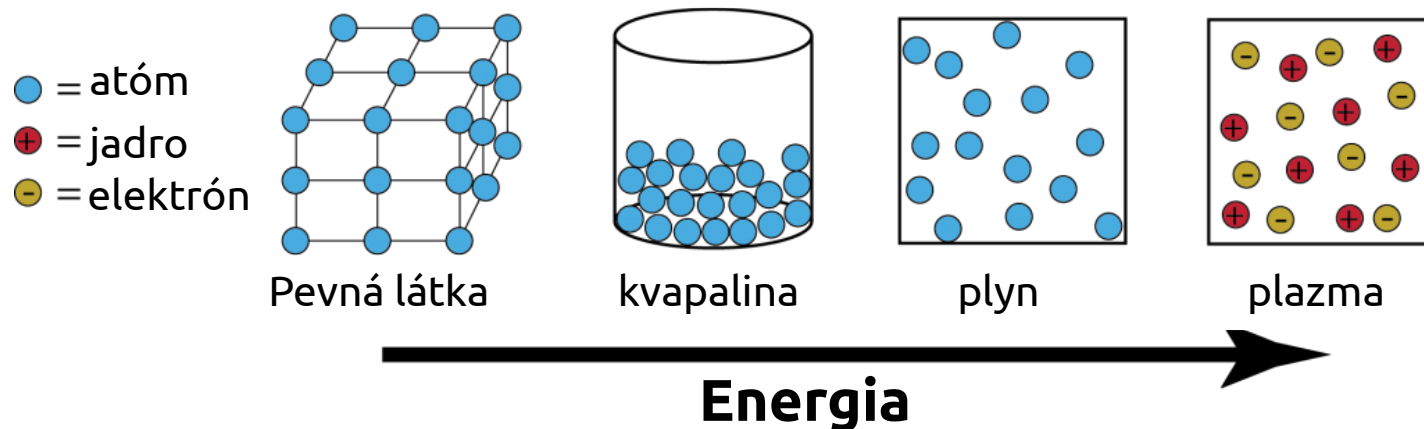


- Atómy sa skladajú z protónov, neutrónov a elektrónov
- Pri dodaní energie sa môžu elektróny odtrhnúť z atómového obalu, nastáva **ionizácia**

Lasere s intenzitou $6,4 \times 10^{16}$ W/cm² 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!

**VÝSKUM S
VYSOKOINTENZÍVNÝMI
LASERAMI**

ČO JE TO ČASTICOVÝ URÝCHĽOVAČ?

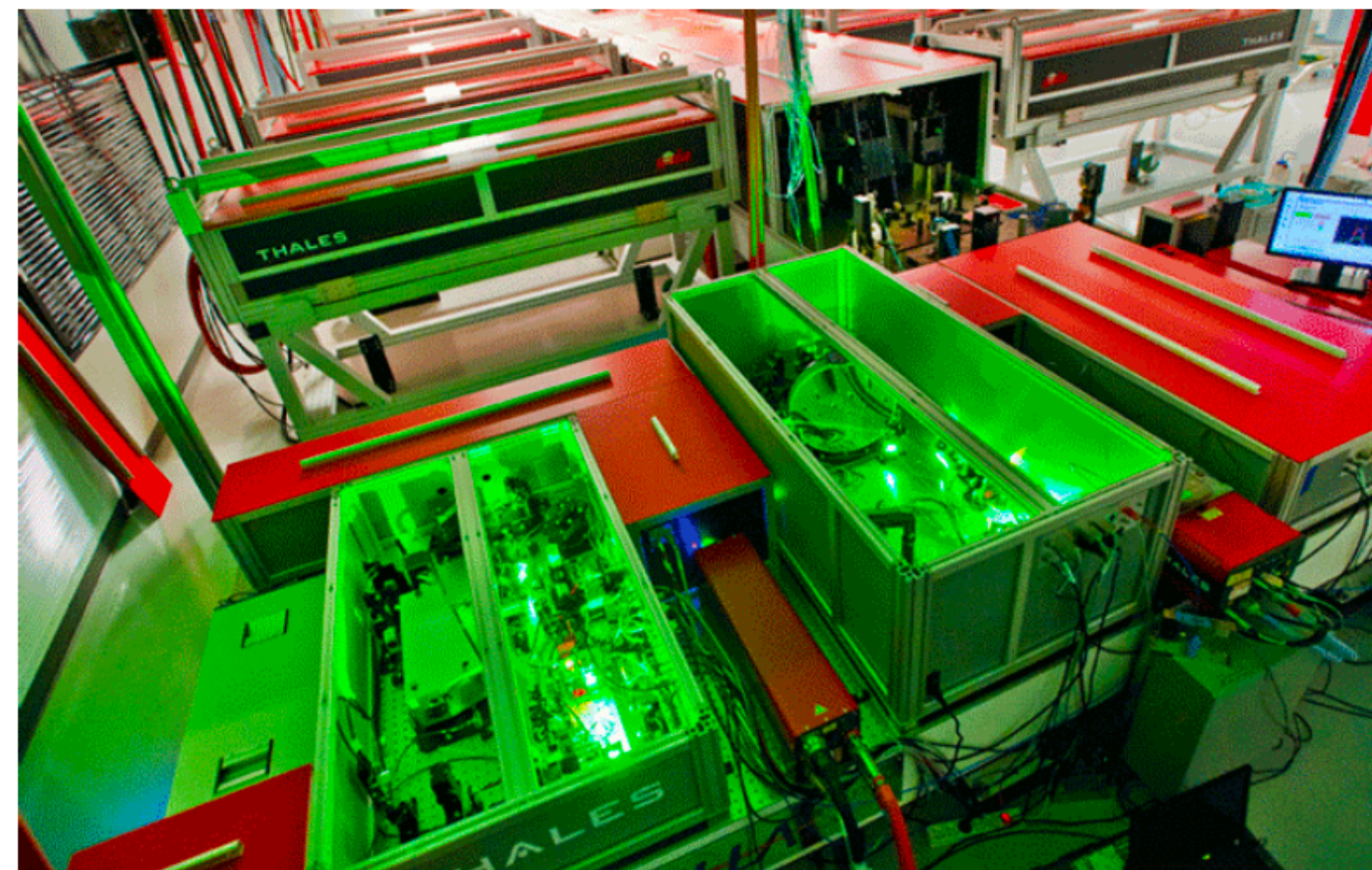
- Zariadenie, ktoré udeľuje elektricky nabitým časticiam vysokú rýchlosť
- Súčasné veľké urýchľovače: sústava po sebe idúcich elektród, v ktorých sa využíva striedavé napätie, sú veľmi dlhé
- Lasere dosiahnu rovnakú energiu na omnoho menšej škále!

Rádiofrek-
večný
lineárny
urýchľovač
SLAC Linac:
40 GeV
na 3 km

(už dnes
neoperuje)



Laserový urýchľovač BELLA
8 GeV na 20 cm!!!



*Oba urýchľovače sú v Kalifornii blízko San Francisca,
SLAC na Stanforde 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 energia
letiaceho komára

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



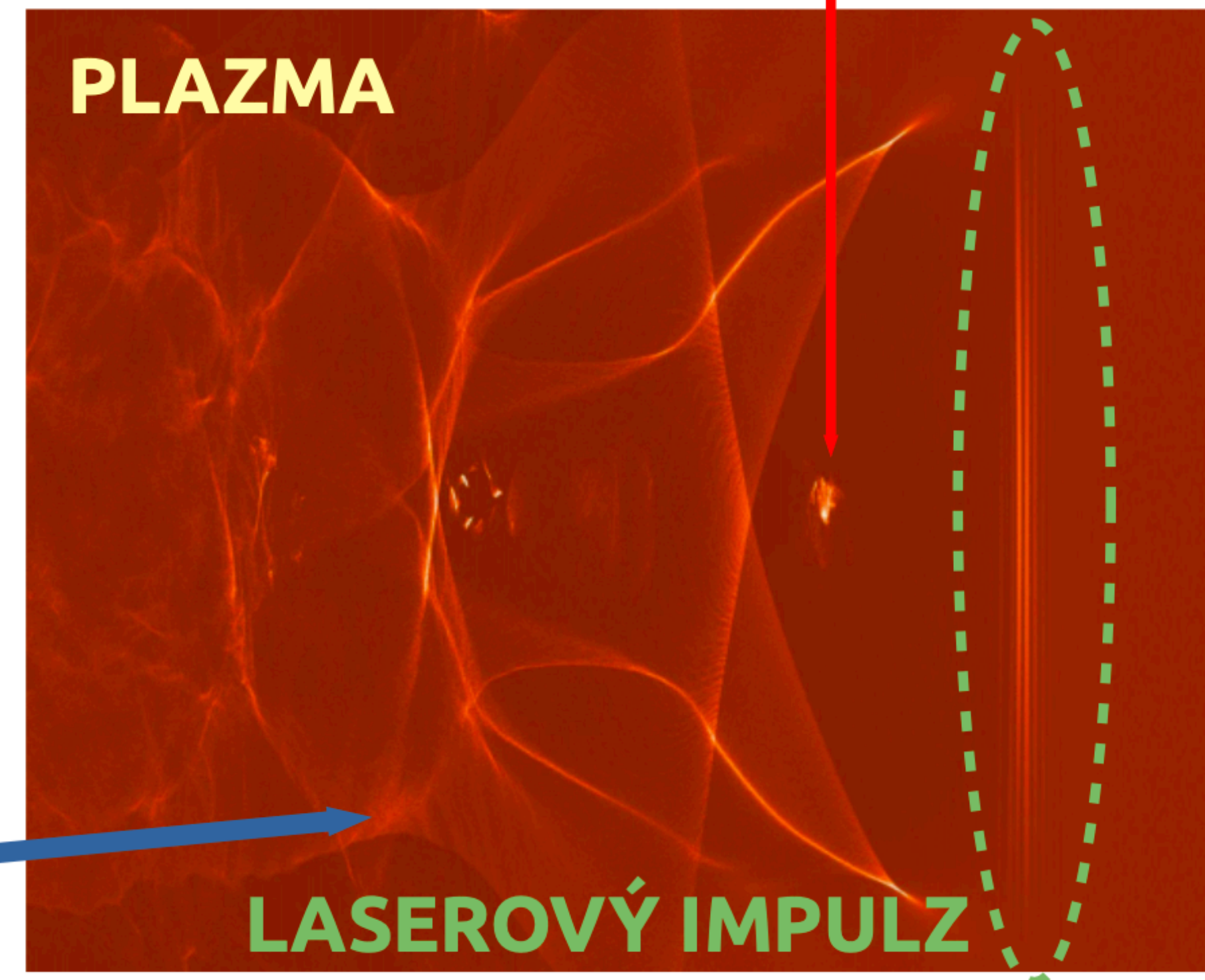
AKO MÔŽEME URÝCHĽOVAŤ ELEKTRÓNY LASEROM?

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**



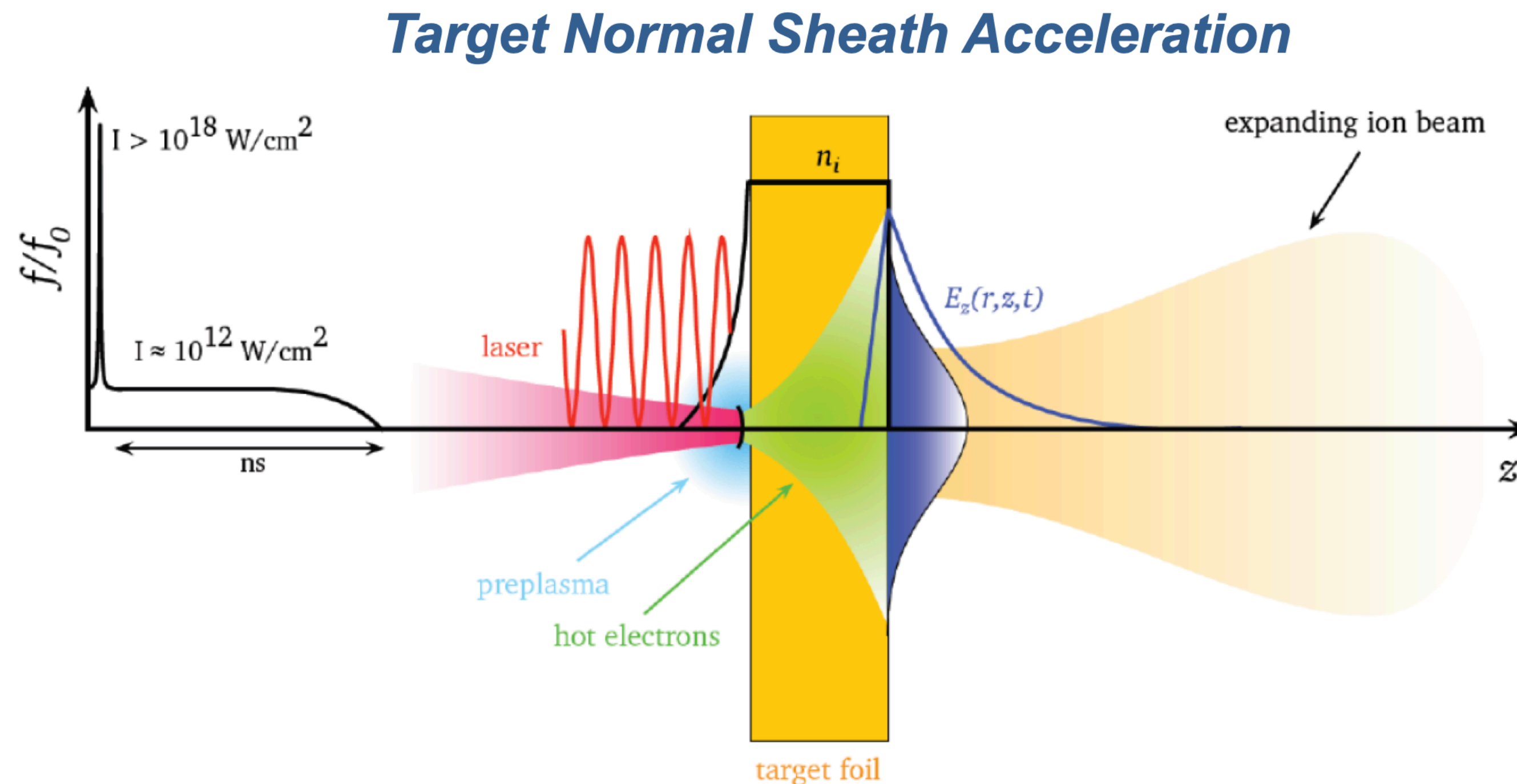
Urýchľovanie iónov

Najslubnejším mechanizmom generovania energetických iónov pomocou laserových impulzov je metóda TNSA (target normal sheath acceleration)

Laserový pulz dopadá na tenkú (niekoľko mikrometrov) fóliu, vytvorí oblak elektrónov na zadnej strane fólie, ktorá následne urýchľuje ťažké ióny na vysoké energie

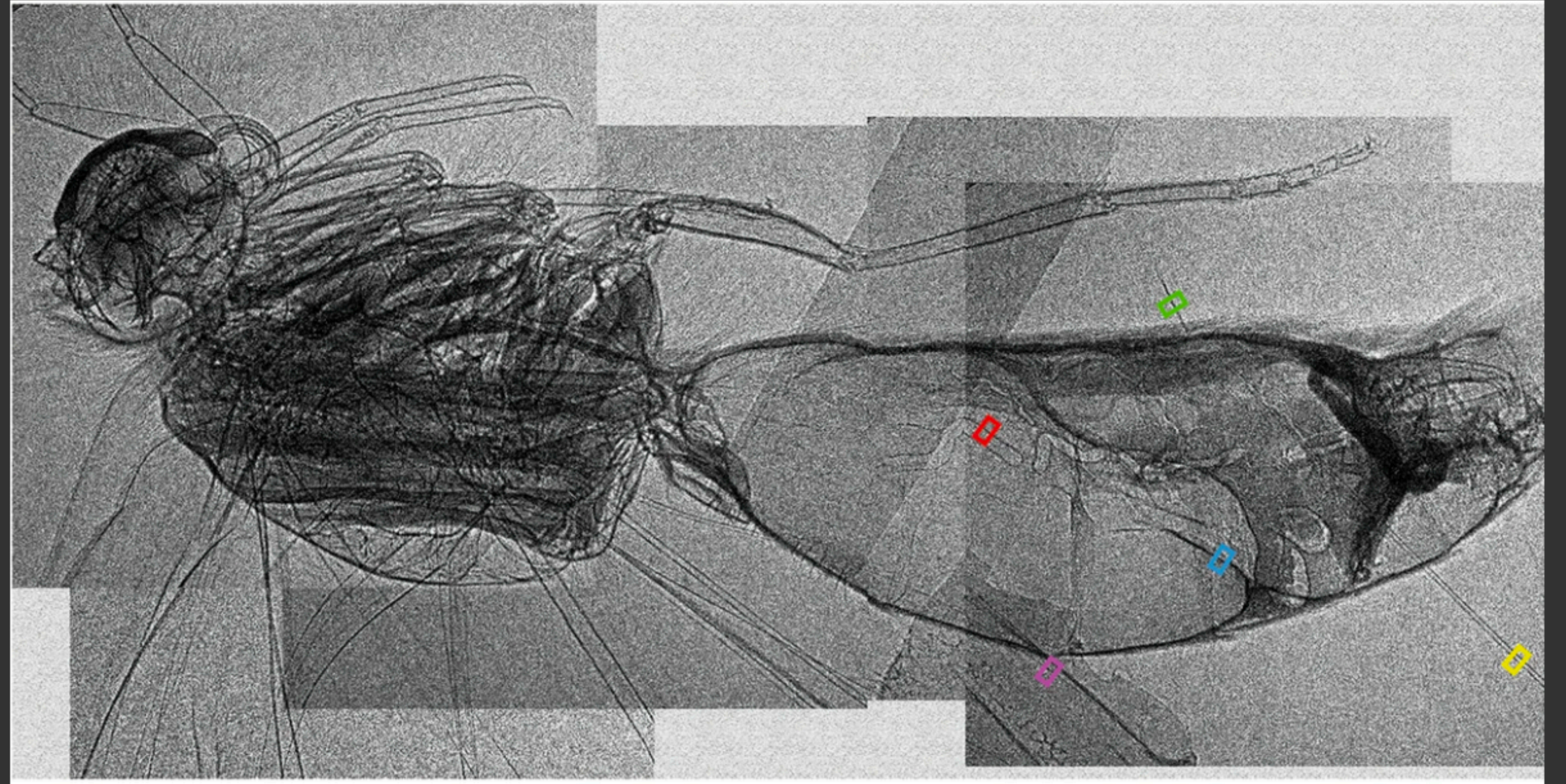
Veľký potenciál v radioterapii pre liečbu rakoviny

Súčasný rekord je vyše 100 MeV, pre medicínske účely je potrebných 200 MeV



GENERÁCIA RENTGENOVÝCH PULZOV

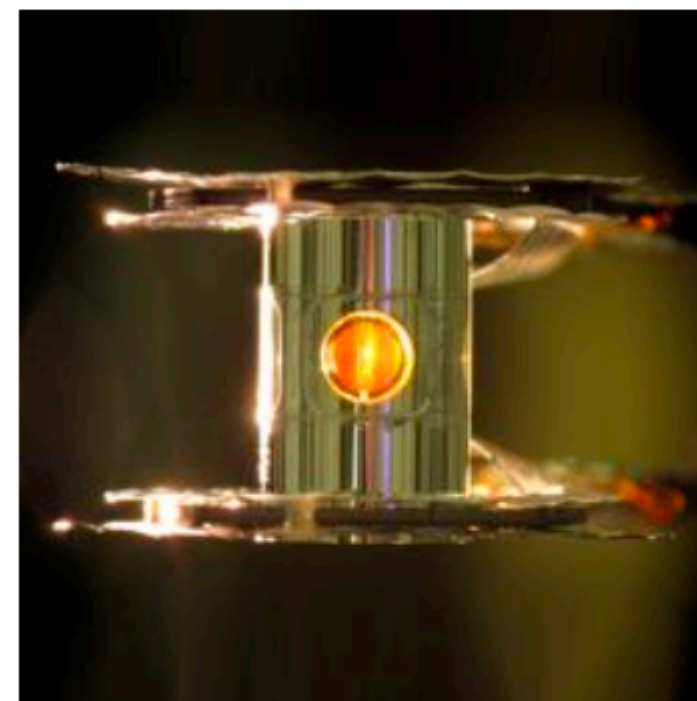
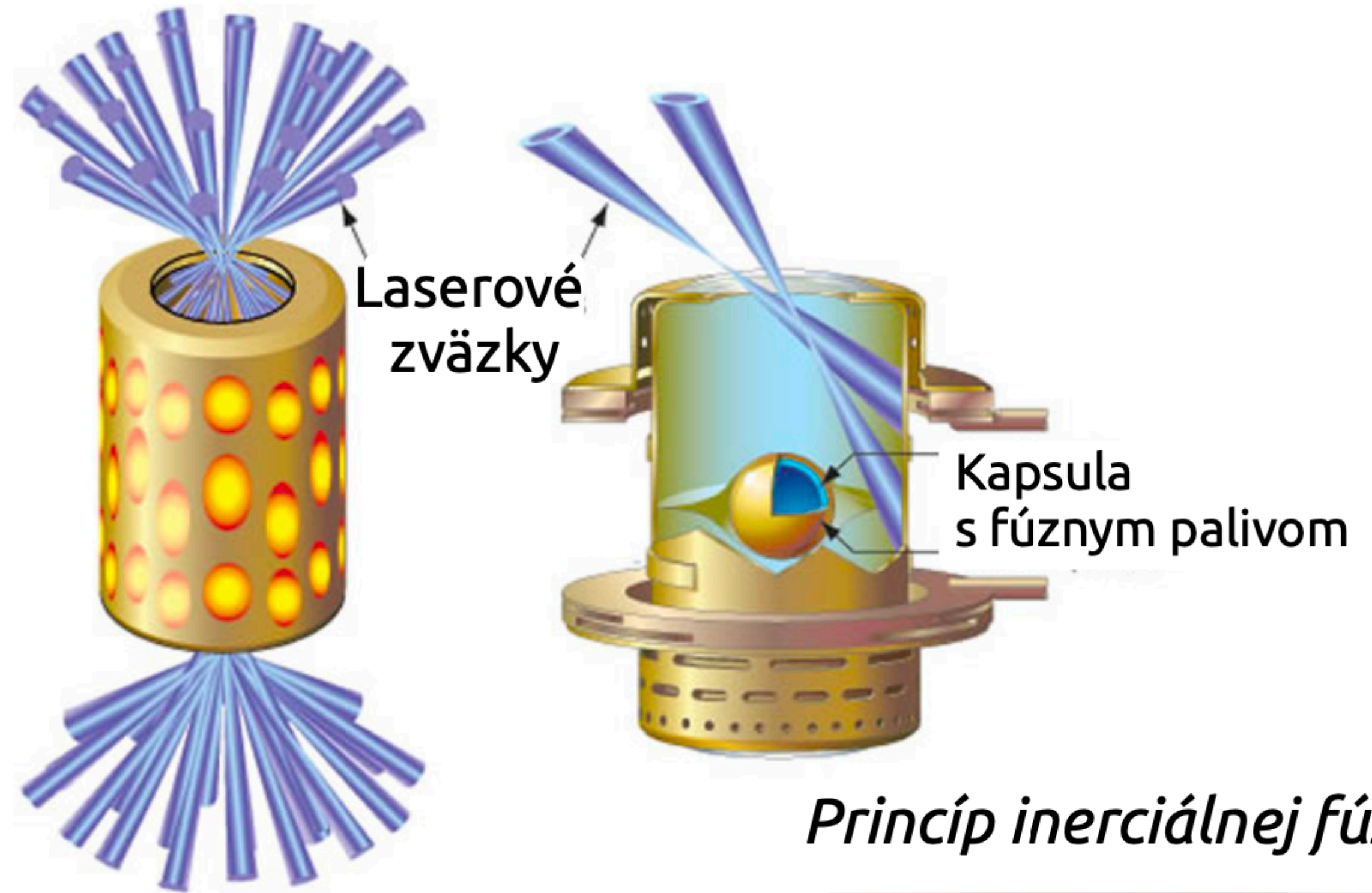
- Pomocou ožiarovania plynu laserom alebo laserom urýchlených elektrónov vieme generovať krátke UV-
rentgenových
- Narozdiel od klasických zdrojov (napr. nemocnice), je možné s laserami generovať kratšie rentgenové impulzy s rozmermi pár mikrometrov → nové možnosti aplikácií



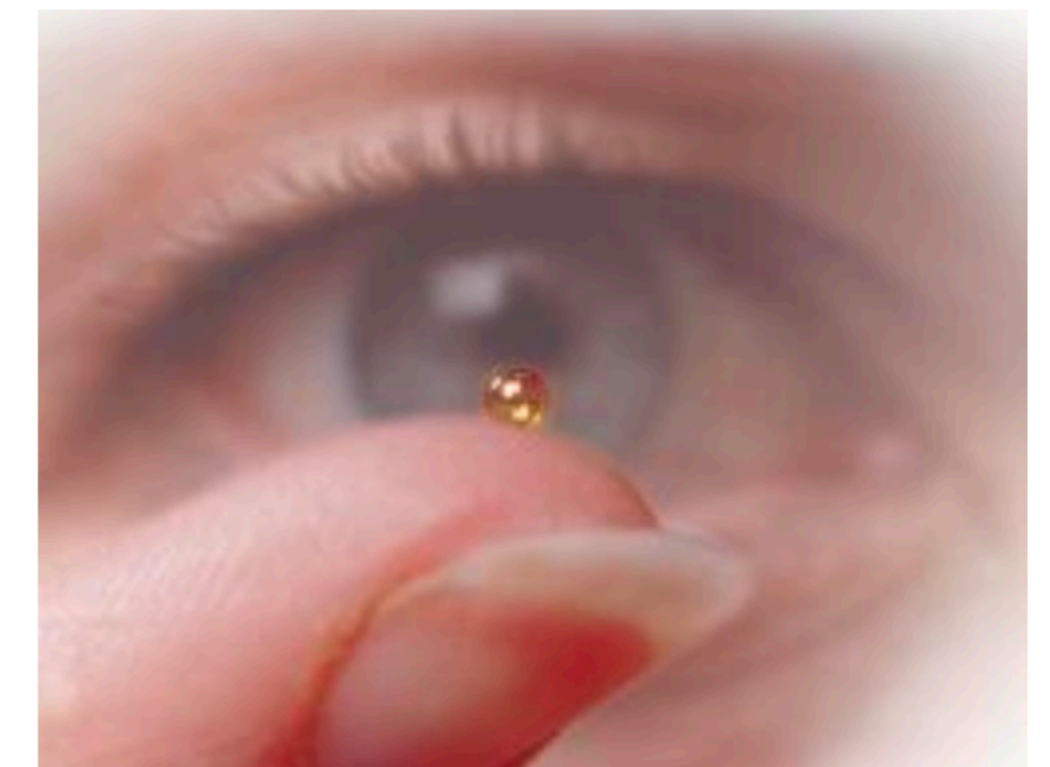
Zobrazenie motýľa s rozlíšením 5 mikrometrov s vysokým fázovým kontrastom pomocou rentgenového žiarenia generovaného vysokoenergetickými elektrónmi urýchlených laserom

INERCIÁLNI FÚZE

- Množstvo laserových paprskov užaruje zlatý dutý valec
- Atómy zlata získajú prebytočnú energiu, ktorú vyžarujú ako gamma fotóny
- Kapsula z vodíku vo vnútri dutiny je ožarovaná týmito fotónmi
- Vzniká výbuch fúzneho paliva
- Možná výroba energie v budúcnosti



Dutina (hohlraum s palivom)



Malá guľička fúzneho paliva

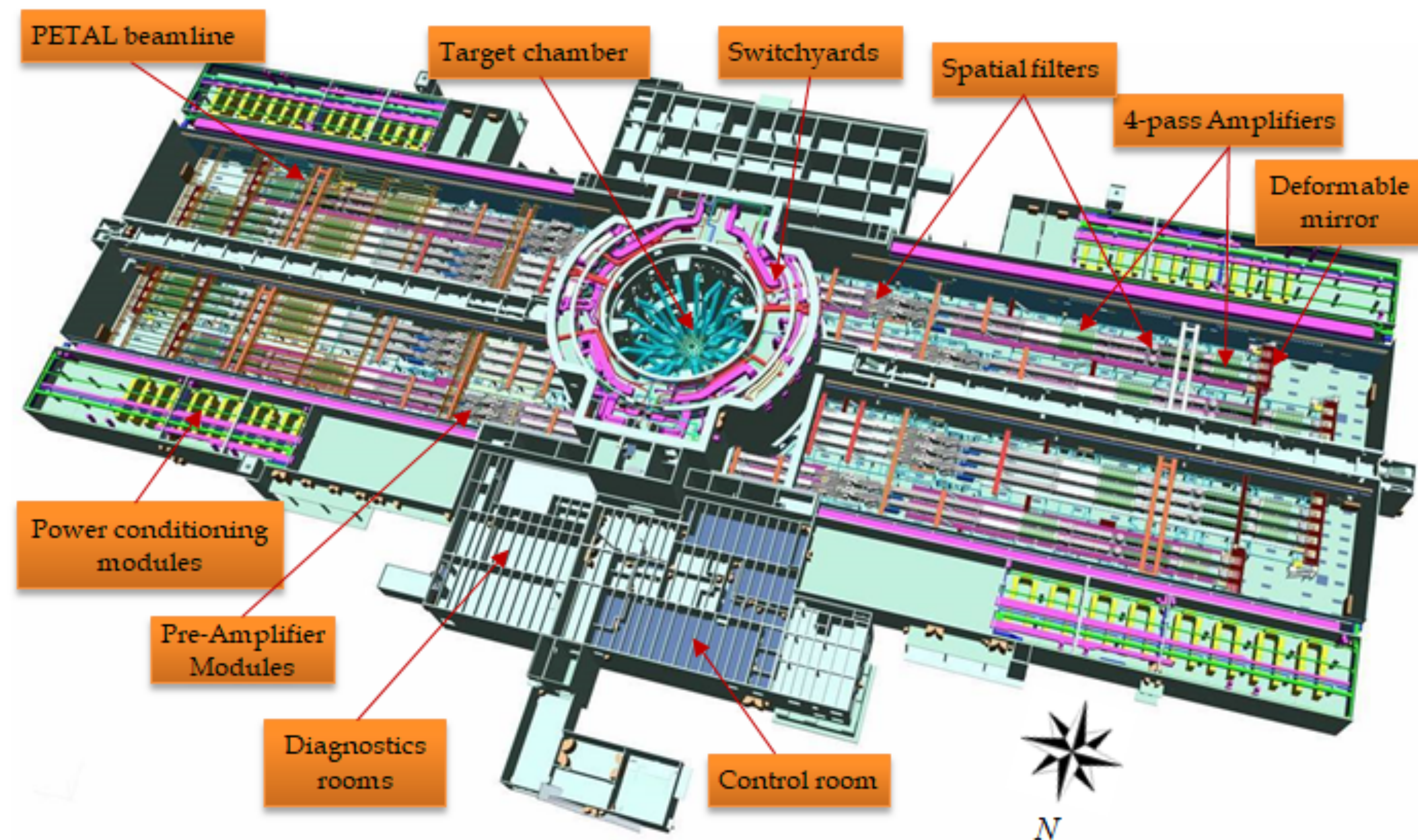
Lasere na interciálnu fúziu vo svete

National Ignition Facility (NIF)

Livermore, California
192 laserových zväzkov

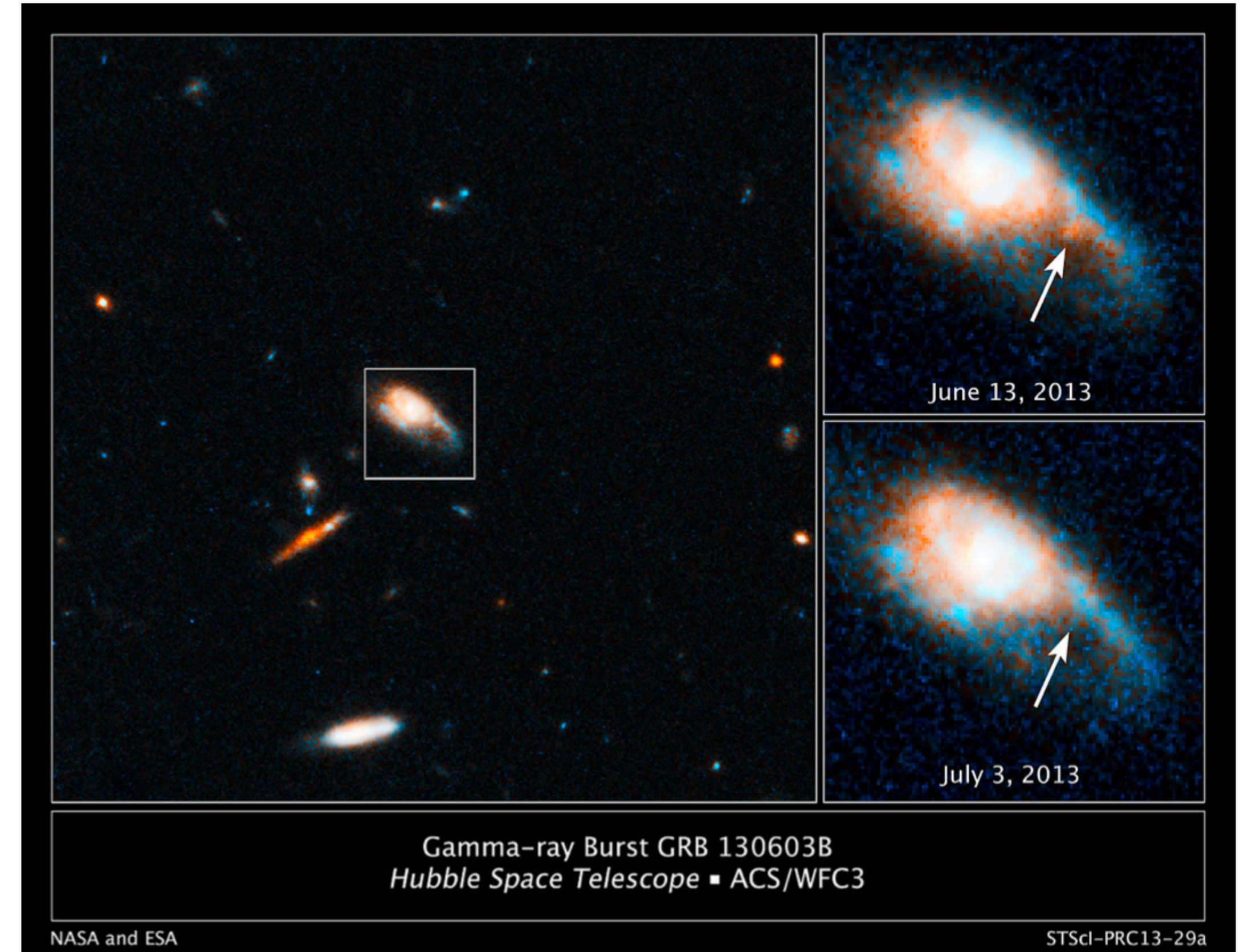


V Európe sa nachádza podobné zariadenie
neďaleko Borseaux s názvom Laser
MegaJoule (LMJ)



LABORATÓRNA ASTROFYZIKA

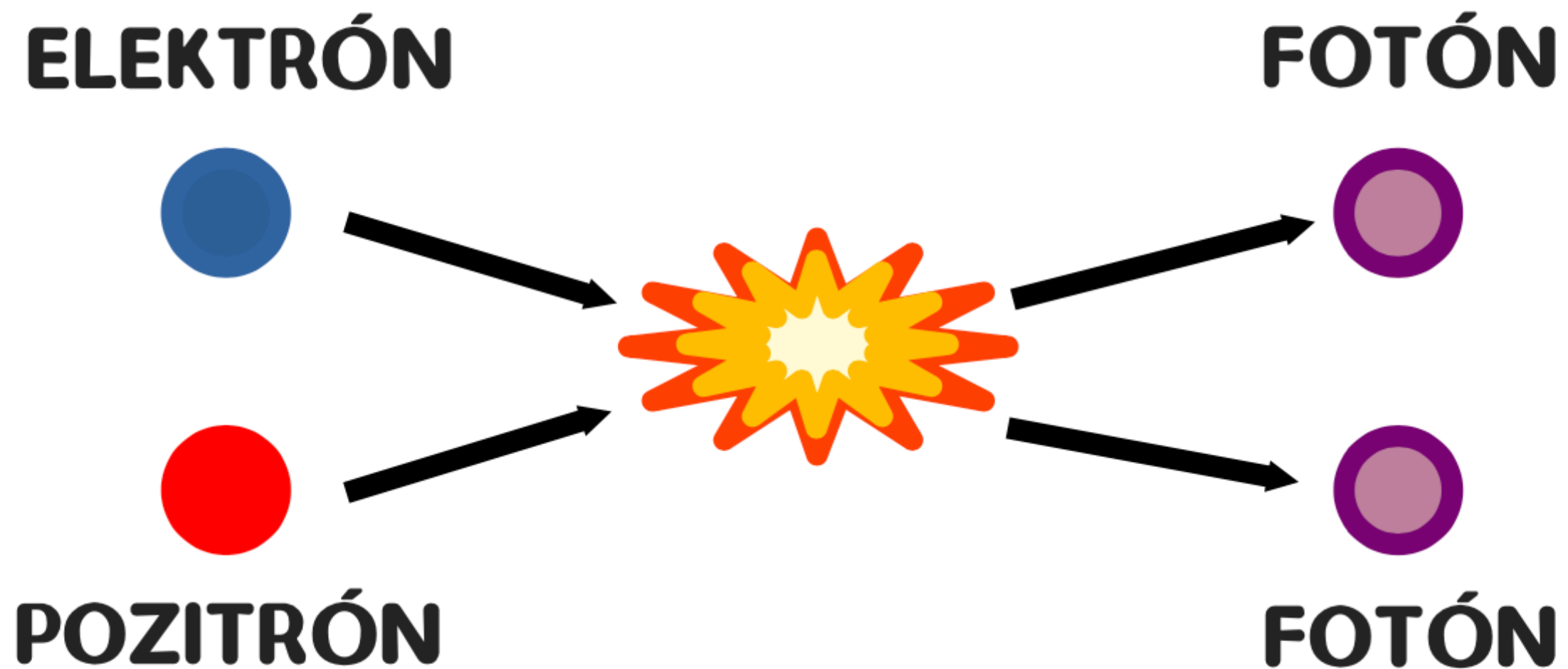
- Cieľom laboratórnej astrofyziky je napodobniť (časti) javov, odohrávajúcich sa vo vesmíre.
- Teoreticky vieme niektoré pozorované objekty vysvetliť, avšak príčinné javy pri ich vzniku nepozorujeme – v laboratóriu môžeme urobiť priame meranie a tak skontrolovať, či sú naše predpoklady správne.
- S vysokointenzívnymi laserami vieme niektoré javy vytvoriť v laboratóriu, napr. “ohnivé míčky”, ktoré obsahujú zmes veľmi energetických častíc a fotónov (anglicky fireballs).



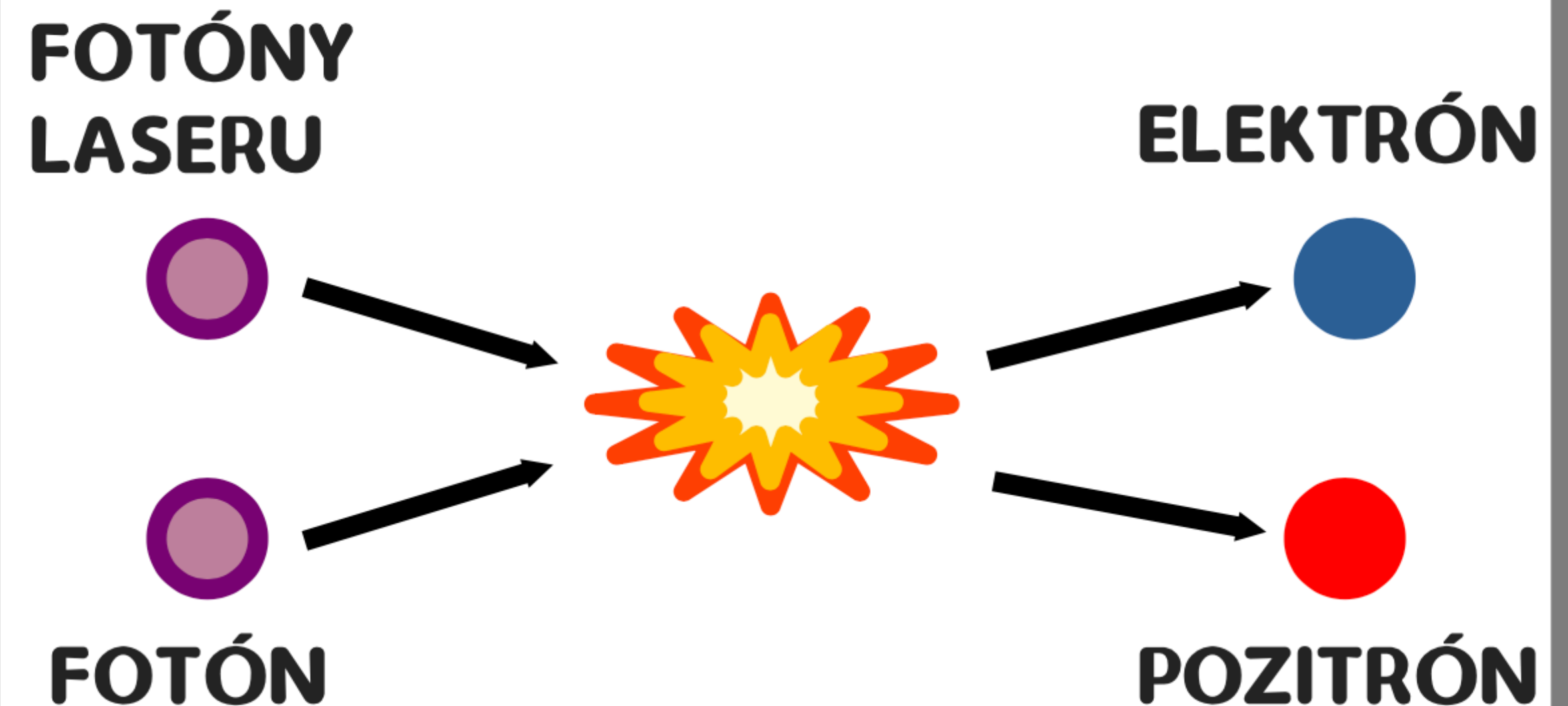
Vo vesmíre sú pozorované výtrysky gamma fotónov, ich pôvod nie je jasný. Jedno z možných vysvetlení môže byť zrážka čiernej diery a neutrónovej hviezdy, urýchlené elektróny zo zrážky vyžarujú tieto vysokoenergetické fotóny.

GENEROVANIE ELEKTRÓN POZITRÓNOVÝCH PÁROV (EXOTICKÁ FYZIKA)

Ak **elektrón** interaguje so svojou antičasticou **pozitronom**, hmota *anihiluje* → elektrón a pozitron zaniknú, vzniknú **2 vysoko energetické fotóny svetla**.



S vysokointenzívnymi laserami sme dnes schopní vyvolať opačný proces: **viacero fotónov z laseru interaguje s jedným vysokoenergetickým fotónom** -> vzniká **elektrón a pozitron!**



SLAC experiment E144

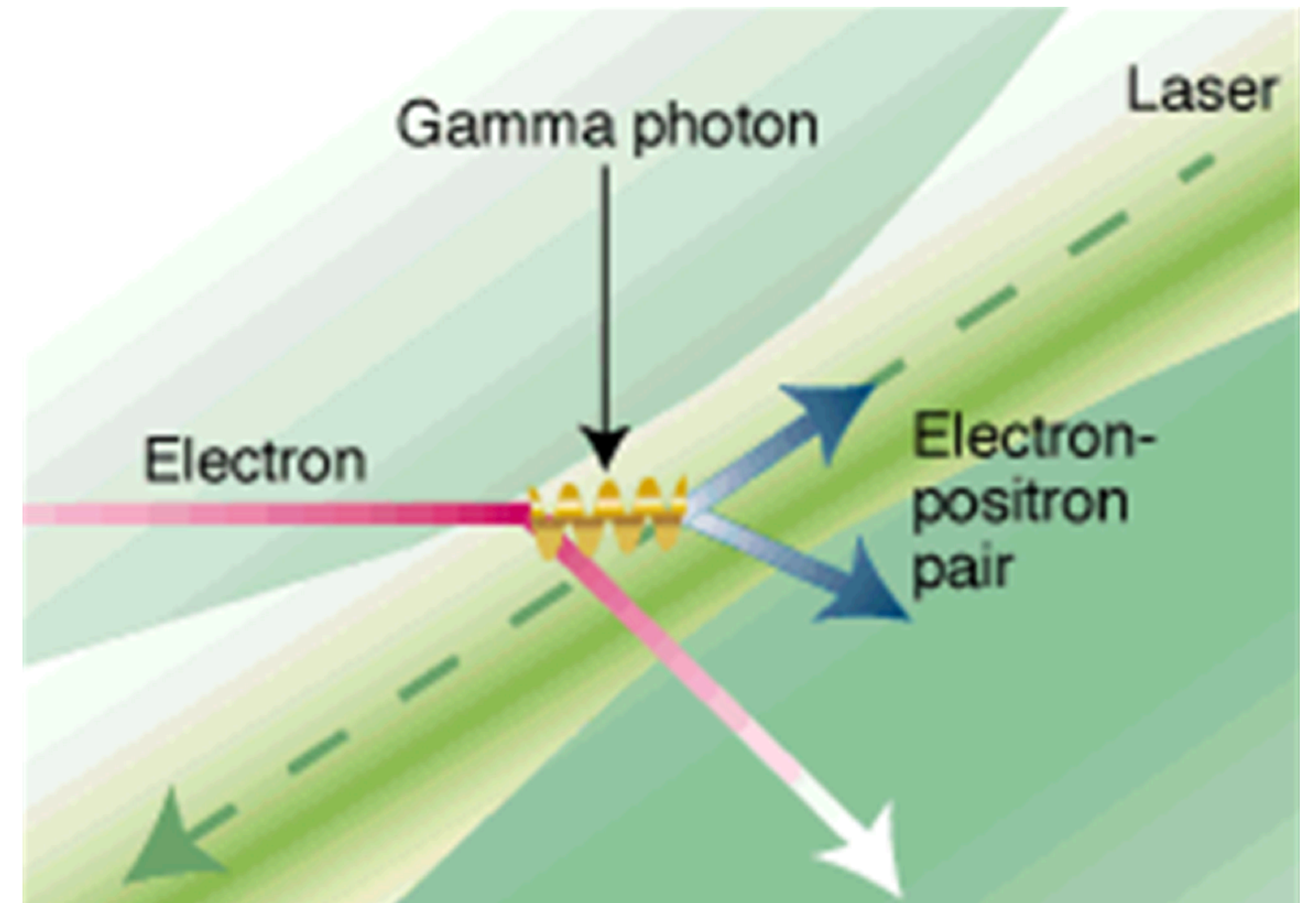
Experiment, pri ktorom prvý krát došlo k detekovaniu pozitronov vytvorených pomocou laseru

Elektrónový zväzok o energii niekoľko desiatok GeV urýchlený na lineárnom urýchľovači bol zrazený s intenzívnym laserovým pulzom

Pri zrážke došlo k vyžiareniu gamma fotónov, ktoré následne interagovali s laserovým pulzom

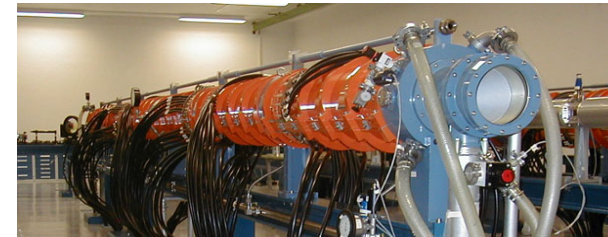
Pomocou javu, ktorý sa nazýva nelineárny Breit-Wheelerov proces došlo k vytvoreniu elektrón-pozitronových párov, ktoré boli následne detekované

fotón + fotón \rightarrow elektrón + pozitron
Generácia hmoty zo svetla



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 (PALS, ELI Beamlines, HiLASE,...)



Prague Asterix Laser System (PALS), Praha

Íodový laser
Energia 1 kJ
Dĺžka pulzu 400 ps
Výkon 2.5 TW
Vlnová dĺžka
1.315 μm
1 pulz/polhodina

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, Chandrashekar & Wang, Jyhpyng & 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

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

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, Chandrashekar & Wang, Jyhpyng & 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.

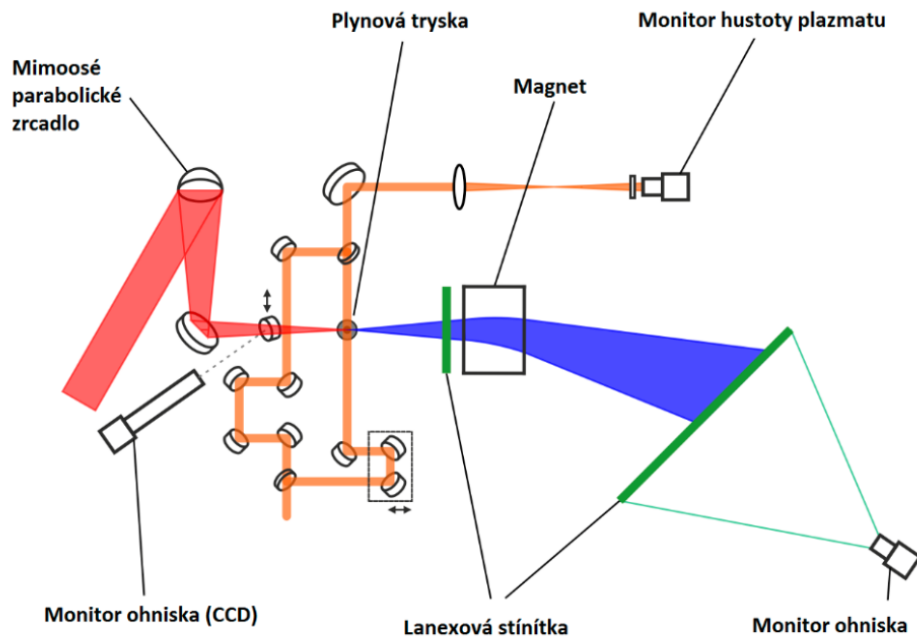
Obrázok anihilácie: Dr. Rebekah D'Arcy

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

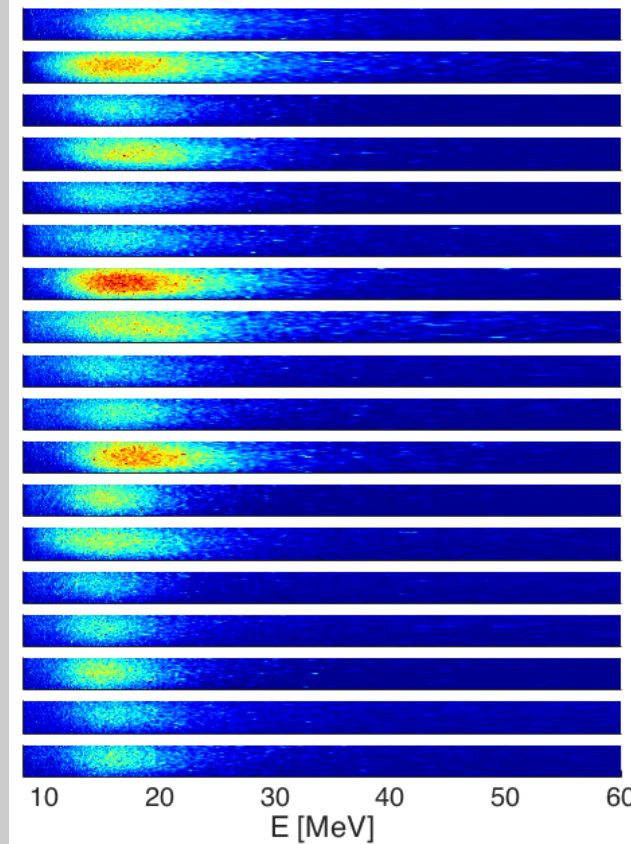
EXPERIMENT U NÁS NA ÚSTAVE FYZIKY PLAZMATU (2016)

Titanový-safírový laserový systém

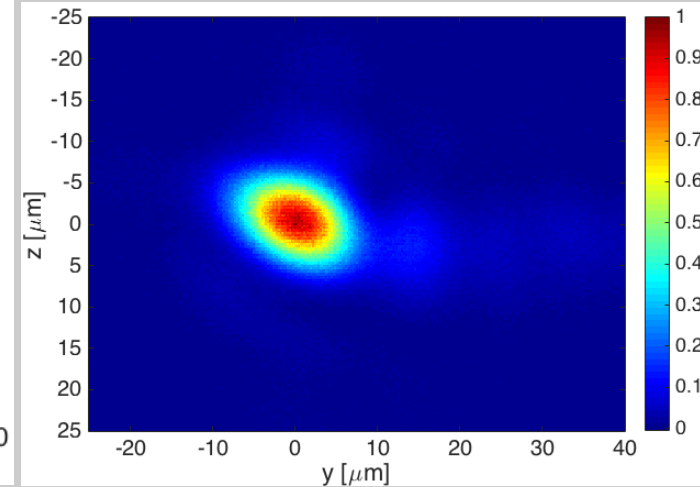
- 20 TW výkon, 1 J energie v impulzu, $\approx 5 \times 10^{18}$ W/cm²
- dĺžka impulzu 45 fs, priemer impulzu 11-14 μ m
- Strieľalo sa do suchého vzduchu (N₂ + O₂) s relatívne vysokou hustotou ($n_e \approx 5 \times 10^{19}$ cm⁻³)
- Stabilný zdroj 20 MeV elektrónov



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.