

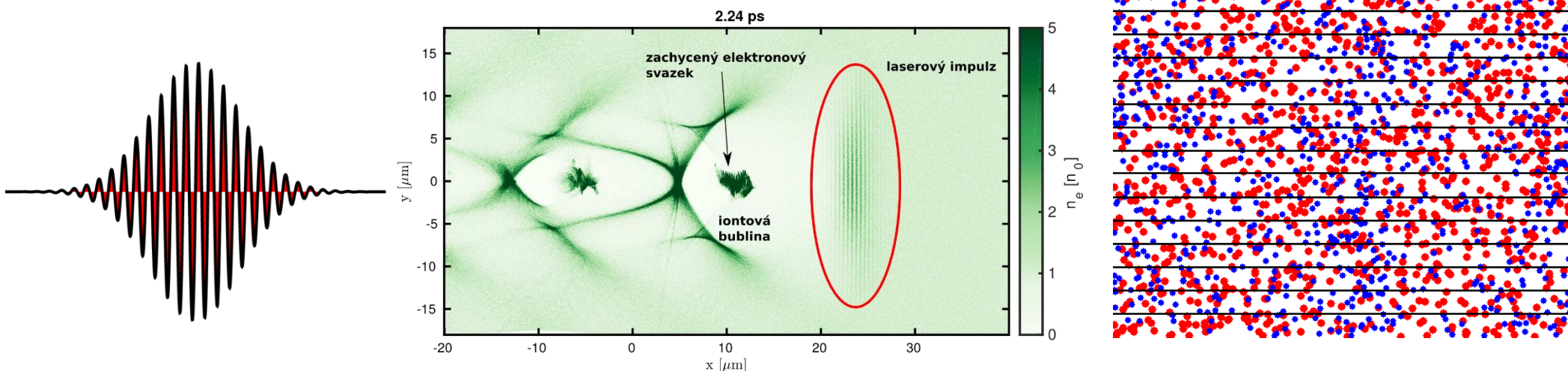
URYCHLOVÁNÍ ELEKTRONŮ V LASEROVÉM PLAZMATU

VOJTĚCH HORNÝ
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
28. KVĚTNA 2020, GÖTEBORG



OBSAH PREZENTACE

1. Vysvětlení základních pojmů
2. Jaké urychlovače elektronů známe a k čemu jsou dobré?
3. Analogické příklady bližší běžnému světu
4. Jak funguje plazmový urychlovač?
5. Aplikace: nové zdroje rentgenového světla!



URYCHLOVÁNÍ A SPECIÁLNÍ TEORIE RELATIVITY

- Klasická fyzika

$$E(v) = m_e c^2 + \frac{1}{2} m_e v^2$$

- Speciální teorie relativity

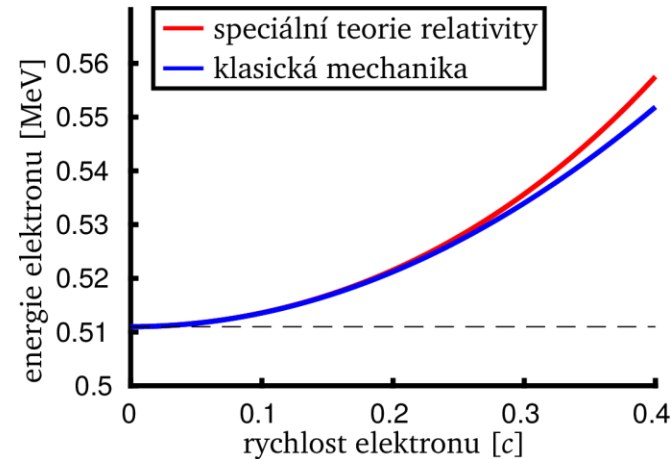
$$E(v) = \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- Hmotnost elektronu

$$m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

- Rychlost světla ve vakuu

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$



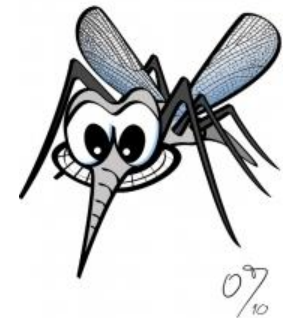
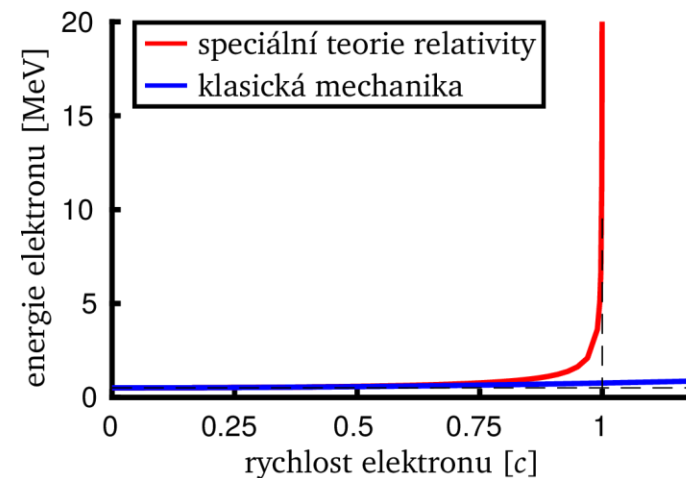
$$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ TeV} =$$

$$1\,000 \text{ GeV} =$$

$$1\,000\,000 \text{ MeV}$$

je přibližně energie
letícího komára.

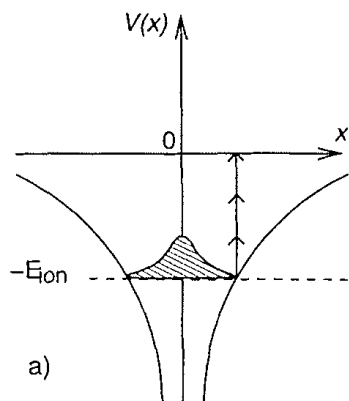


Obrázek: Ondřej Daněk,
oandd.cz

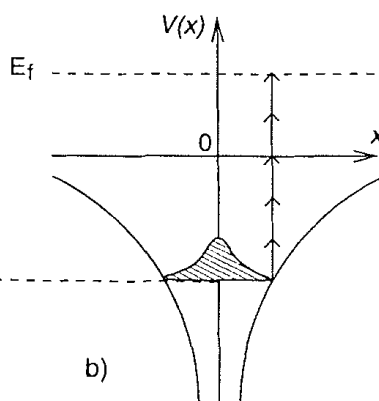
IONIZACE ELEKTRONŮ V POLI LASERU

- Elektrony jsou vyraženy z elektronových obalů atomů plynu působením intenzivního laserového impulsu.
- Ionizační potenciál vodíku je 13,6 eV.
- Energie fotonu z laserového impulsu o vlnové délce 800 nm je 1,55 eV. Může tedy laserový impuls ionizovat atomy plynu?

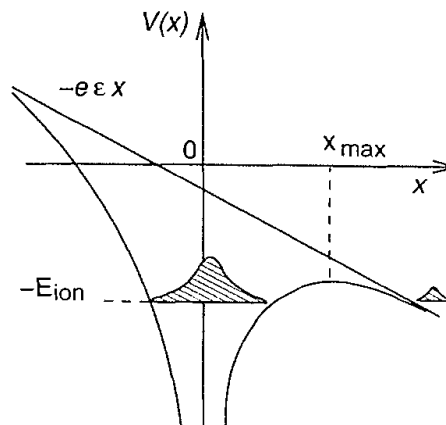
Multifotonová
ionizace



Nadhraniční
ionizace



Tunelová
ionizace

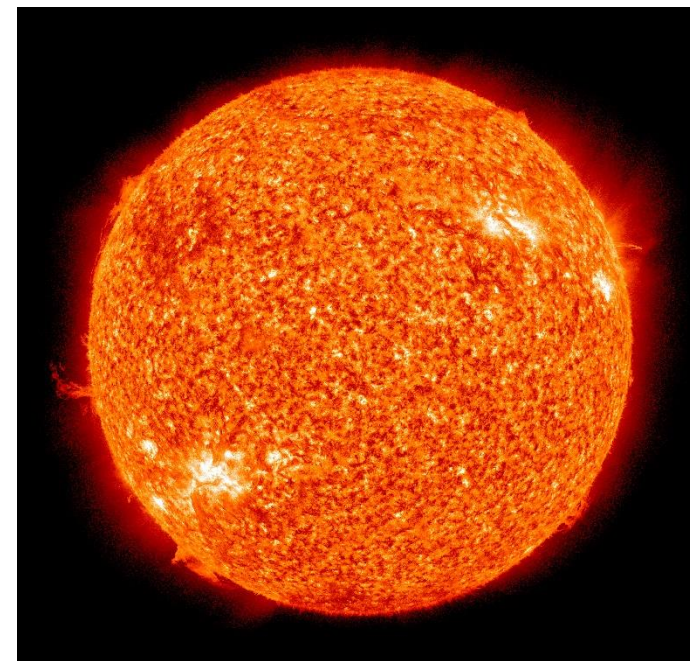


$$I > 10^{10} \text{ W/cm}^2$$

$$I > I_a = 3,5 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$$

Pro srovnání

Intenzita záření na povrchu
Slunce je $6,4 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$.



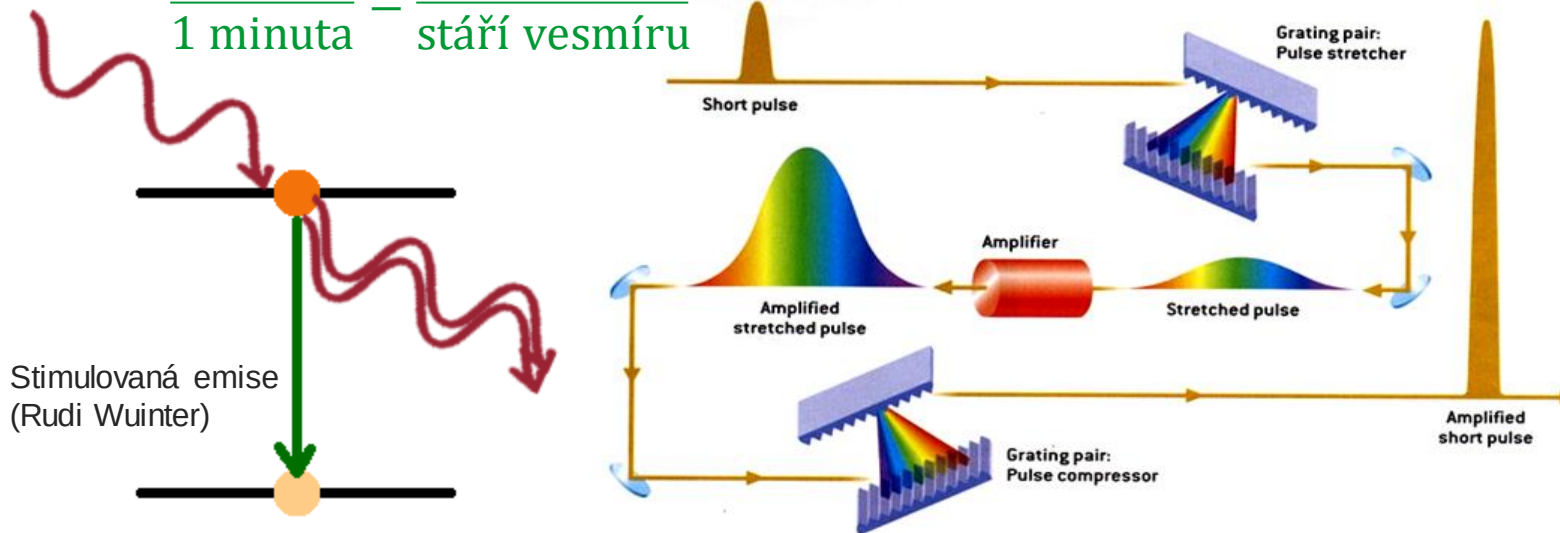
Obrázek: NASA's Solar Dynamics Observatory

ULTRAKRÁTKÝ ULTRAINTENZIVNÍ LASEROVÝ IMPULZ

- LASER = zesilování světla stimulovanou emisí záření
- Objevitel: Theodor Maiman (1960)
- Technika zesilování CPA: Gérard Morou (1985)
- Ultrakrátké impulzy takřka výhradně z titan-safírového krystalu.
- Velké toky energie vyžadují důvtipná technická řešení.



$$\frac{10 \text{ fs}}{1 \text{ minuta}} = \frac{1 \text{ minuta}}{\text{stáří vesmíru}}$$



Chirped pulse amplification (GIST)

Typické parametry

Energie: 5 J

Délka: 25 fs (7,5 μm)

Velikost ohniska: 15 μm

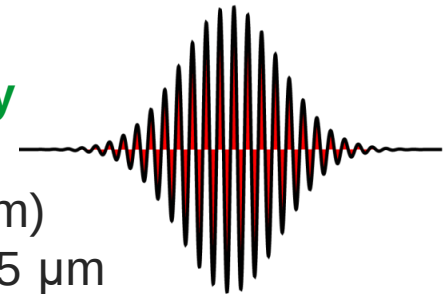
Vlnová délka: 800 nm

Výkon: 80 TW

Max. intenzita: $1,5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$

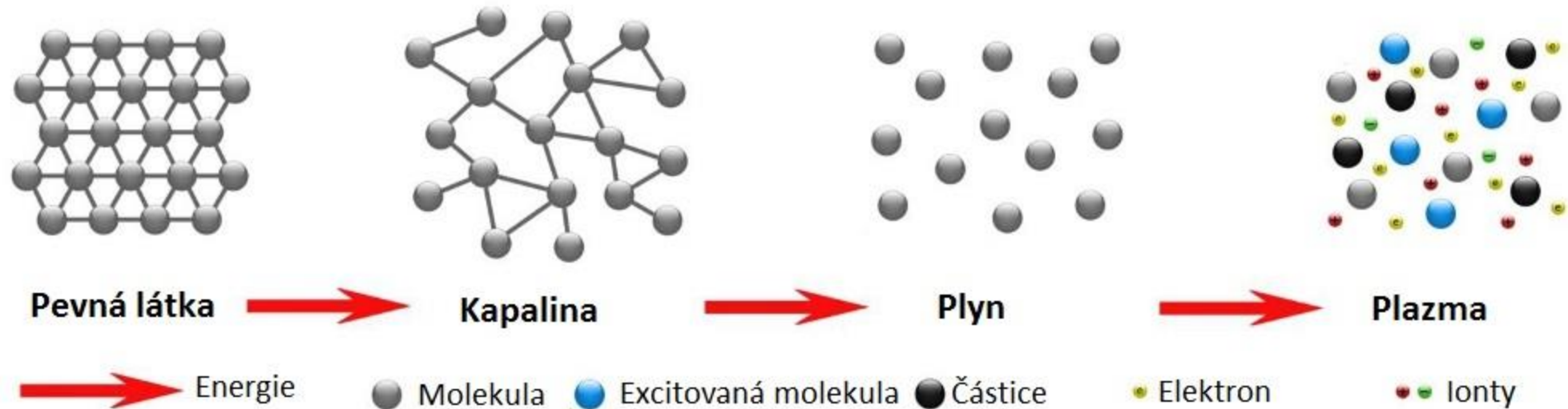
Pro srovnání

Výkon Temelína: 1GW



PLAZMA

- Plazma je podobné plynu, tvoří je však zejména nabité částice.
- Tvoří se, když se plynu dodá dostatečné množství energie.
- Proto je plasma čtvrtým skupenstvím hmoty.

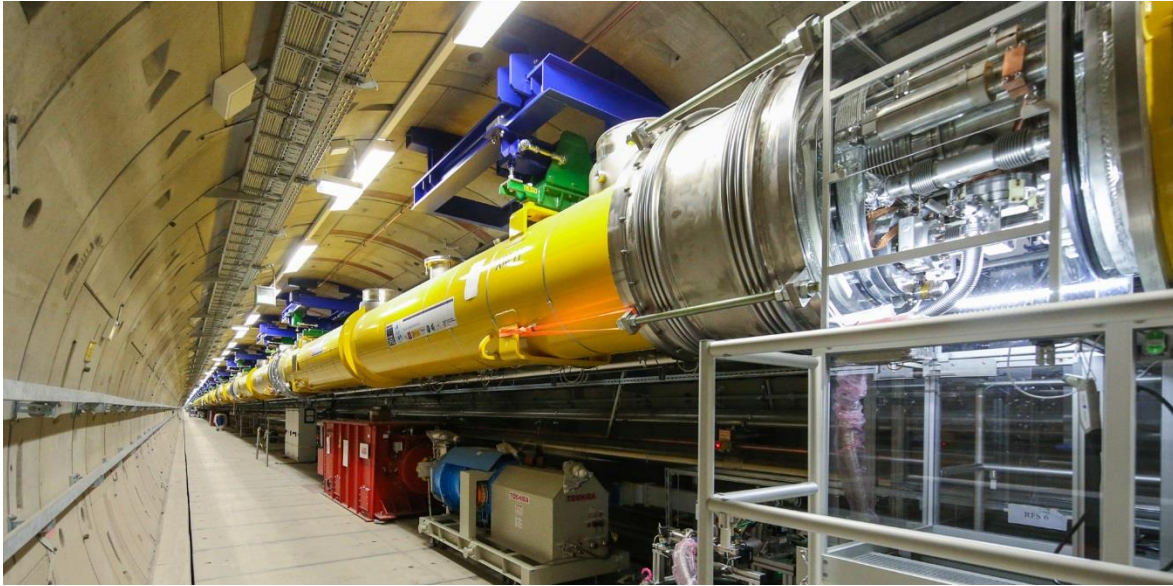


- Plasma je vodivé, jeho chování je značně neintuitivní.

SOUČASNÉ A BUDOUCÍ URYCHLOVAČE

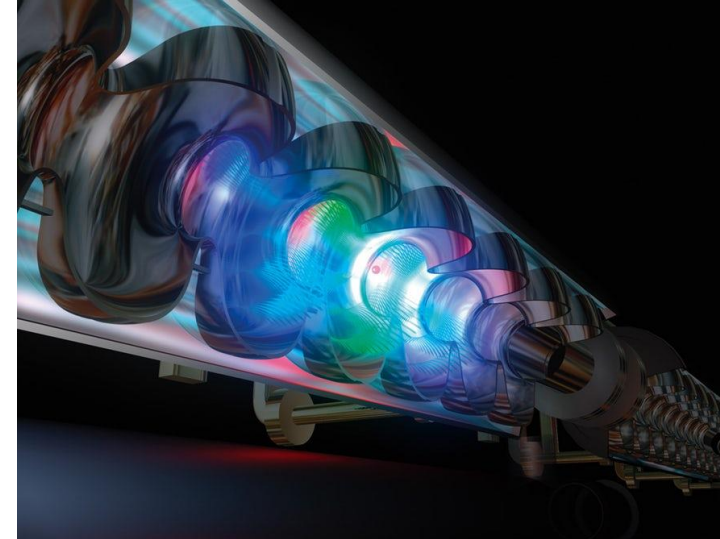
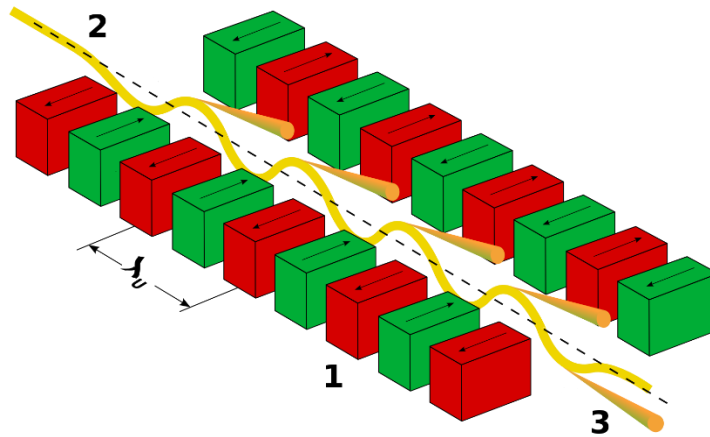
Jméno	Druh částic	Rozměry	Max. energie	Aplikace
Large Hadron Collider (Švýcarsko)	Protony a ionty	27 km kruhový	13 TeV	Částicová fyzika
SLAC (USA)	Elektrony a pozitrony	3.2 km lineární	50 GeV	Částicová fyzika, ultrarychlé rentgeny
European XFEL (Německo)	Elektrony	2.1 km lineární	17.5 GeV	Ultrarychlé 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

URYCHLOVAČE JAKO ZDROJ KRÁTKÝCH RENTGENOVÝCH IMPULZŮ

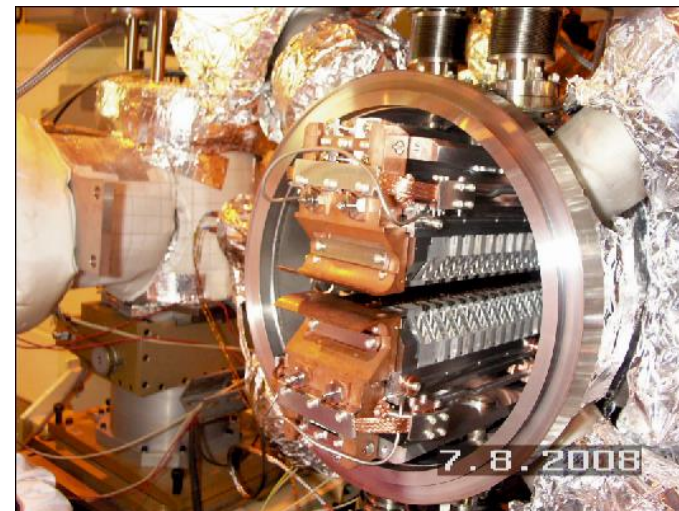


Tunel Evropského laseru na volných elektronech, xfel.eu

Undulátor iniciuje vyzáření rentgenového záření, Wikipedia.org



Vizualizace elektromagnetických polí pro urychlování elektronů v supravodivých rezonátorech pro nový urychlovač International Linear Accelerator (ILC)
Grafika: DESY, Hamburk



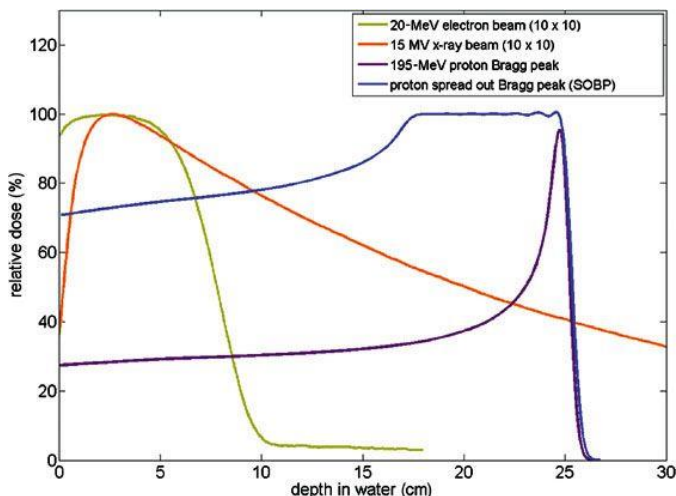
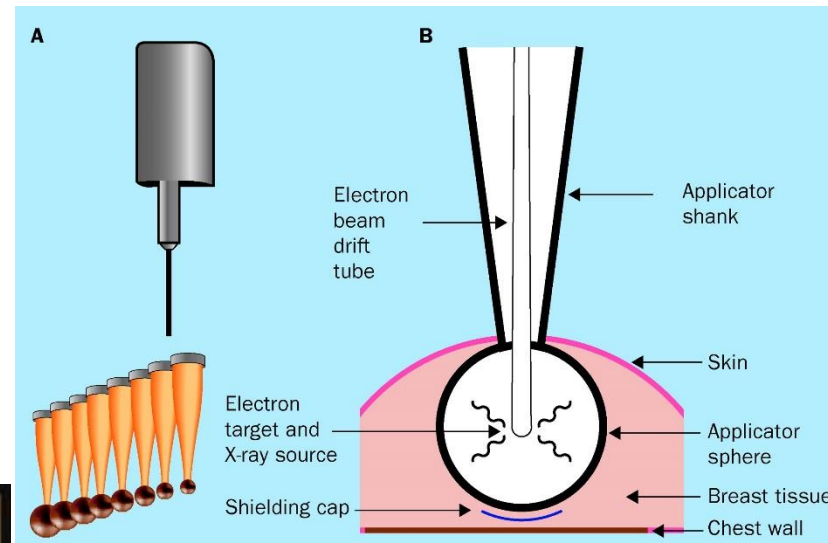
Instalace kryogenního undulátoru v podmínkách vakua.
The European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble, Švýcarsko
Z dizertační práce KITEGI, Charles. *Development of a cryogenic permanent magnet undulator at the ESRF*. 2008. PhD Thesis. Université Joseph-Fourier-Grenoble I.

SOUČASNÉ URYCHLOVAČE PRO MEDICÍNSKÉ ÚČELY



Nový urychlovač
v jihlavské
nemocnici,
Jihlavské listy,
8.12.2015

Gloi AM. Gamma
Putty dosimetric
studies in electron
beam. J Med Phys
2016;41:169-76



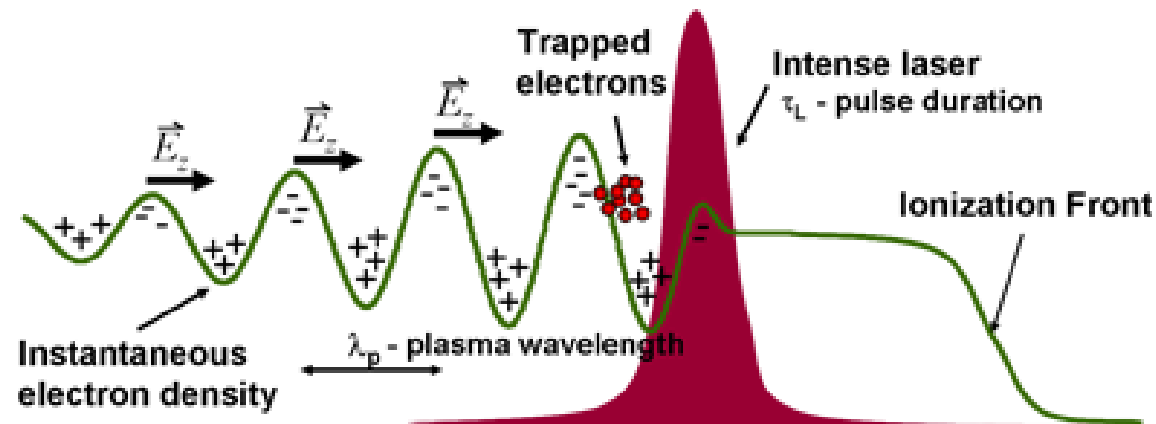
Terapie rakoviny prsu.
VAIDYA, Jayant S., et al.
Intraoperative
radiotherapy for breast
cancer. *The lancet
oncology*, 2004, 5.3: 165-
173.

Dr. Moustafa Abdou, askhematologist.com

ELEKTRON V POLI LASERU

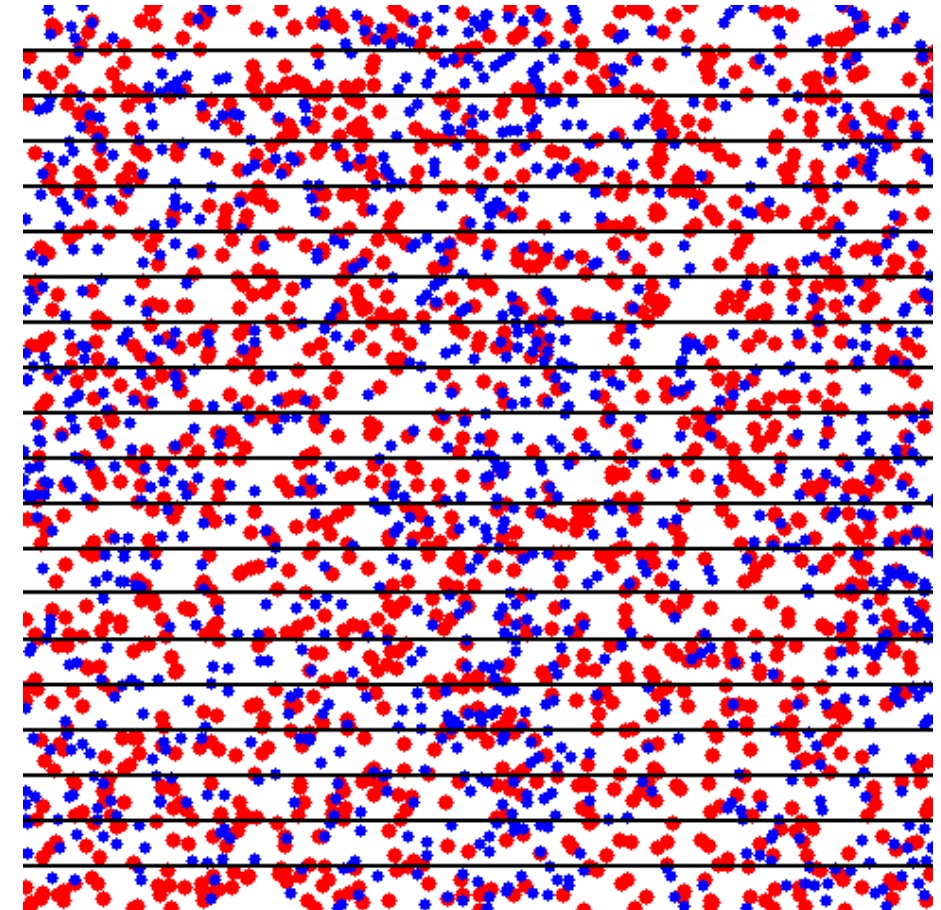
Ponderomotorická síla

- působí na všechny nabité částice
- vypuzuje je z oblasti vysoké intenzity
- je úměrná směru změny intenzity laserového svazku
- lehké elektrony reagují okamžitě, těžké setrvačné ionty si ji ani nestačí všimnout.
- za laserovým svazkem proto vzniká elektronová plazmová vlna (brázdová vlna)



Obrázek: Michigan Engineering Center for Ultrafast Optical Science

Elektronová plazmová vlna elektrony a ionty



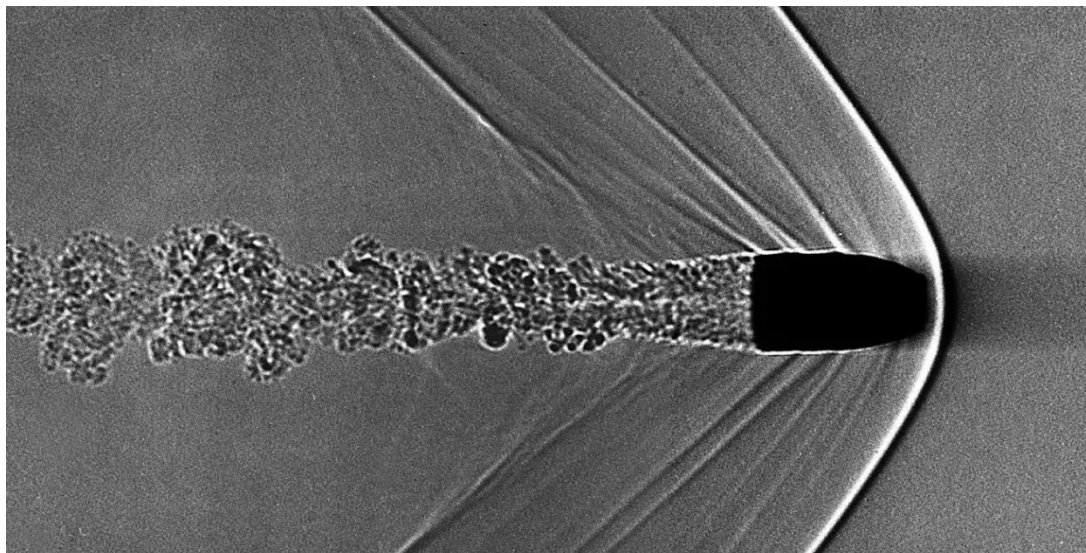
Animace: Andris Vaivas,
Švédský ústav pro vesmírnou fyziku, Uppsala

BRÁZDOVÁ VLNA ZA LODÍ

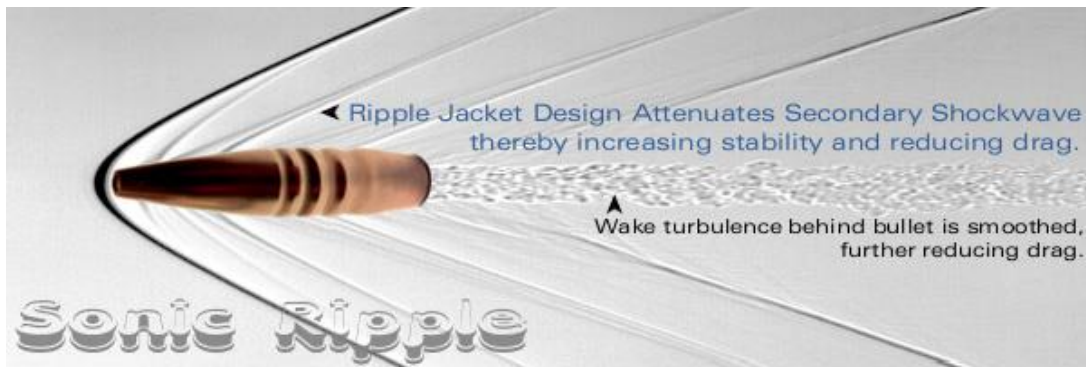


Zdroje: Lile Crump, Wikiwaves.org, video z kanálu shpaget1 na YouTube

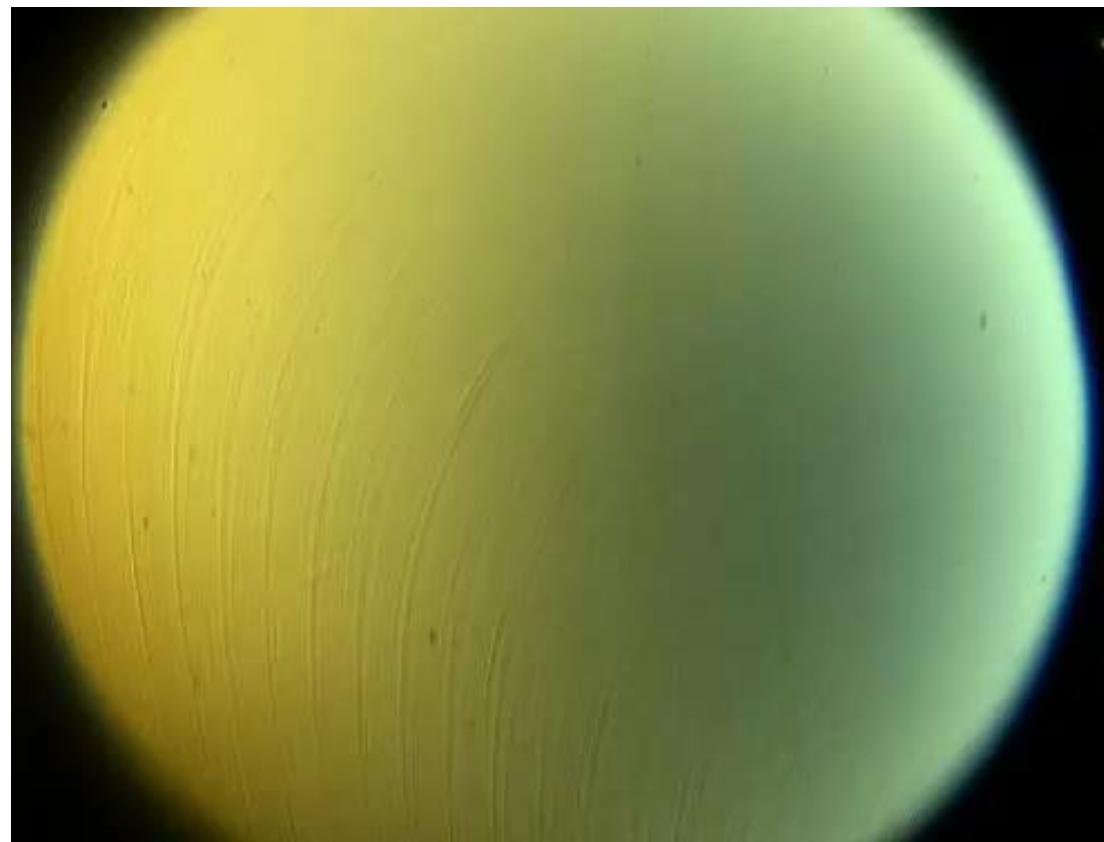
BRÁZDOVÁ VLNA ZA LETÍCÍ KULKOU



Zdroj: Wikipedia.org - Bullet bow shockwave



Zdroj: Blog AccureShooter.net



Zdroj: Wikipedia.org - Bullet bow shockwave

BRÁZDOVÁ VLNA ZA ULTRAKRÁTKÝM ULTRAINTENZIVNÍM LASEROVÝM IMPULZEM

VOLUME 43, NUMBER 4

PHYSICAL REVIEW LETTERS

23 JULY 1979

Laser Electron Accelerator

T. Tajima and J. M. Dawson

Department of Physics, University of California, Los Angeles, California 90024

(Received 9 March 1979)

An intense electromagnetic pulse can create a weak of plasma oscillations through the action of the nonlinear ponderomotive force. Electrons trapped in the wake can be accelerated to high energy. Existing glass lasers of power density 10^{18} W/cm^2 shone on plasmas of densities 10^{18} cm^{-3} can yield gigaelectronvolts of electron energy per centimeter of acceleration distance. This acceleration mechanism is demonstrated through computer simulation. Applications to accelerators and pulsers are examined.

Collective plasma accelerators have recently received considerable theoretical and experimental investigation. Earlier Fermi¹ and McMillan² considered cosmic-ray particle accelera-

the wavelength of the plasma waves in the wake:

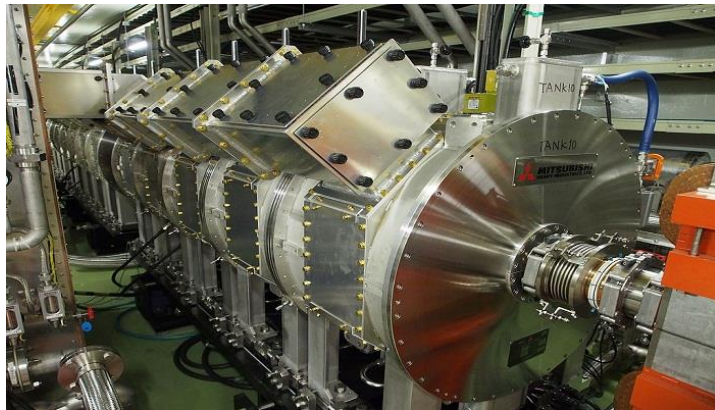
$$L_t = \lambda_w / 2 = \pi c / \omega_p. \quad (2)$$

An alternative way of exciting the plasmon is to

BRÁZDOVÁ VLNA ZA ULTRAKRÁTKÝM ULTRAINTENZIVNÍM LASEROVÝM IMPULZEM

standardní radiofrekvenční urychlovače

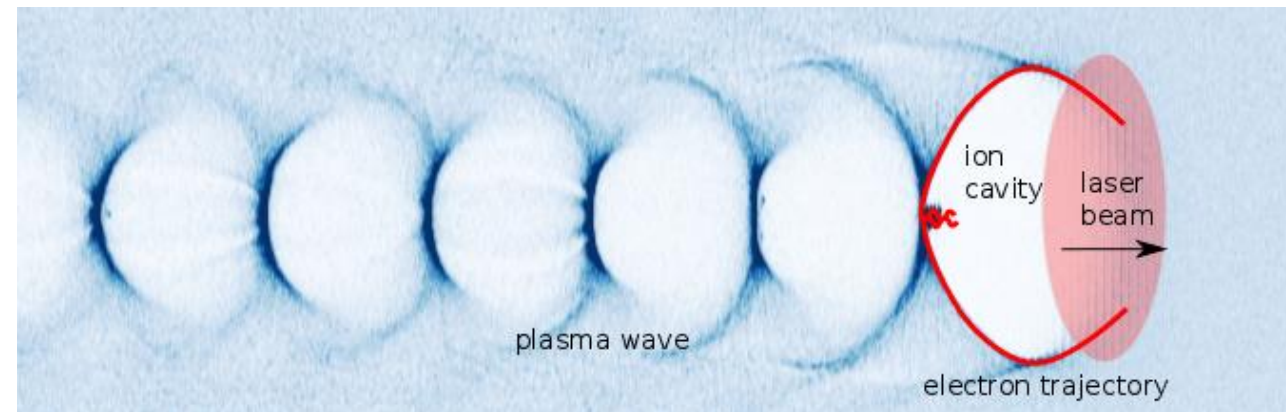
- existuje horní limit urychlujícího napětí daný dielektrickým defektem urychlující komory
- tento limit je řádově 100 MV/m
- lineární urychlovače jsou proto obrovské
- tedy i nákladné na výstavbu i provoz
- náročné technologické požadavky (vakuum ve velkém prostoru, často kryogenní chlazení)
- je to zvládnutá technologie, snadná laditelnost, opakovatelnost, monoenergetické svazky



Global E-beam Accelerator Market 2017, TechAnnouncer

urychlovače v laserovém plazmatu

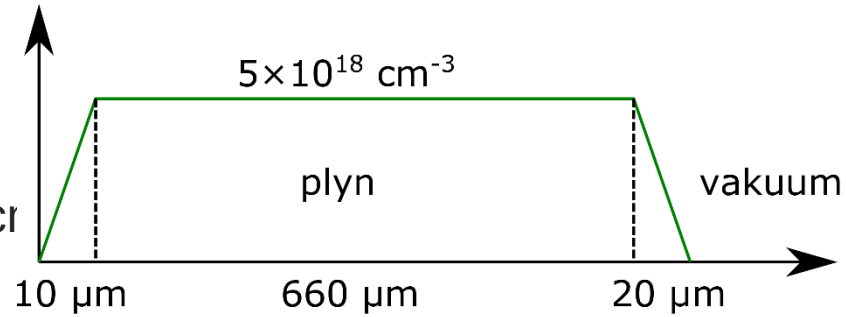
- plazma umí udržet velmi velká pole, klidně i 100 GV/m
- urychlovací vzdálenost je tedy až 1 000× kratší, tedy mm až cm
- 50TW laserový systém není až tak nákladný ani dnes, neřkuli při výrobě ve velkém
- celý urychlovač i s laserovým systémem by se mohl vejít na (velký stůl)
- je to nová technologie, mnoho praktických problémů je třeba překonat



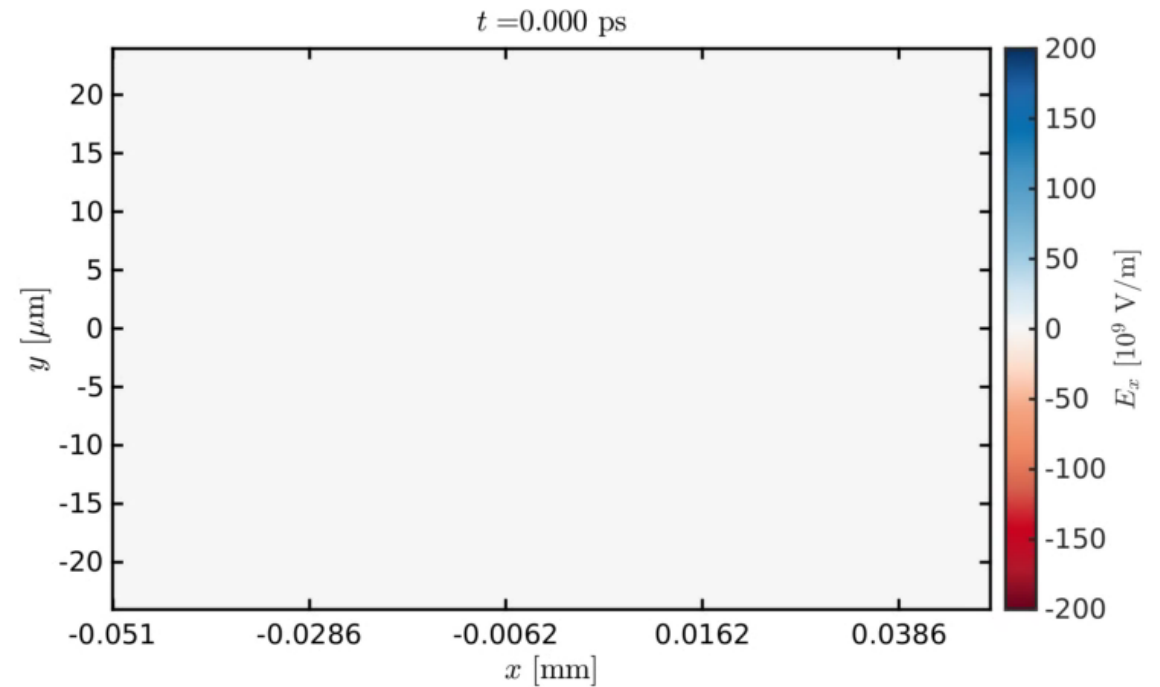
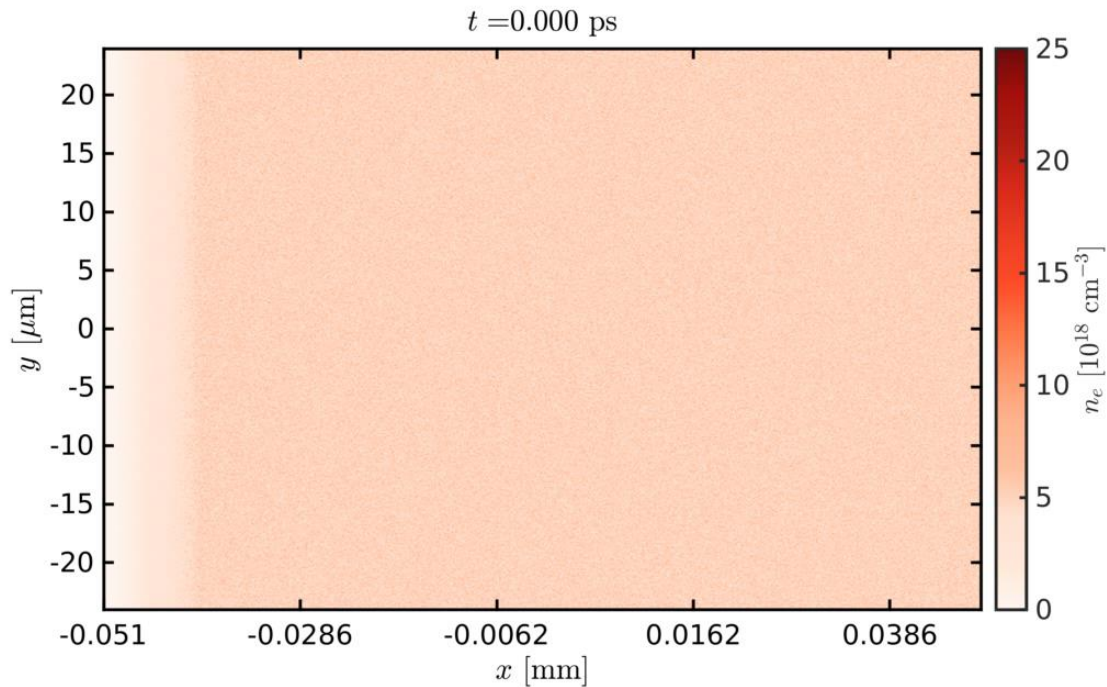
LINEÁRNÍ REŽIM

Parametry

- délka pulsu: 25 fs
- vlnová délka: 800 nm
- intenzita v ohnisku: $3,34 \times 10^{18}$ W/cm²
- průměr ohniska: 19 μm



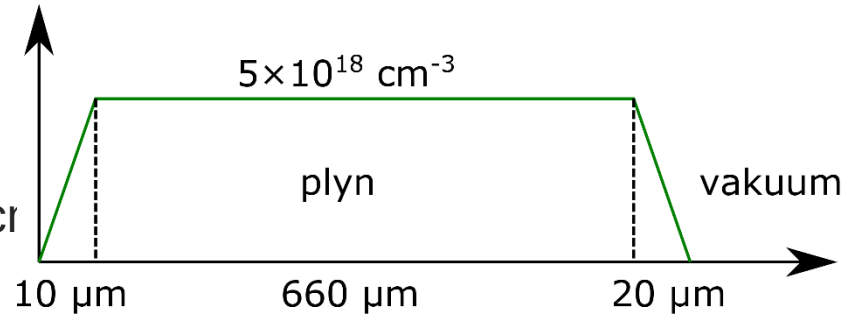
Vytvoří se plazmová vlna, nezachytí se však žádné elektrony. Potřebujeme surfaře.



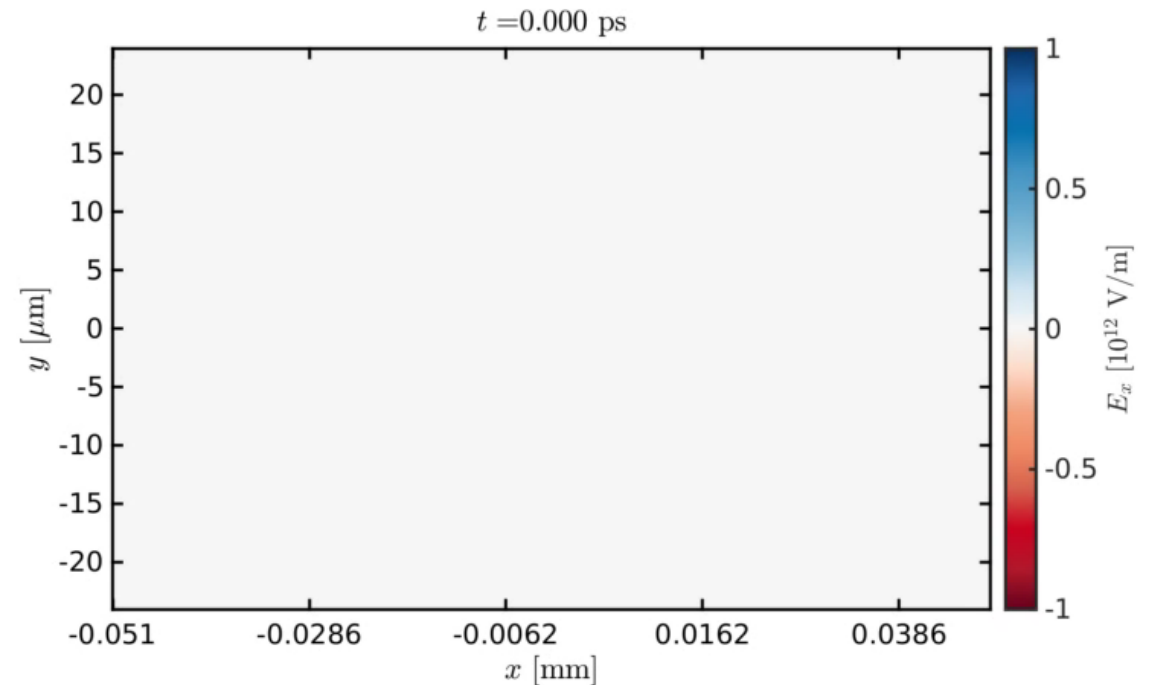
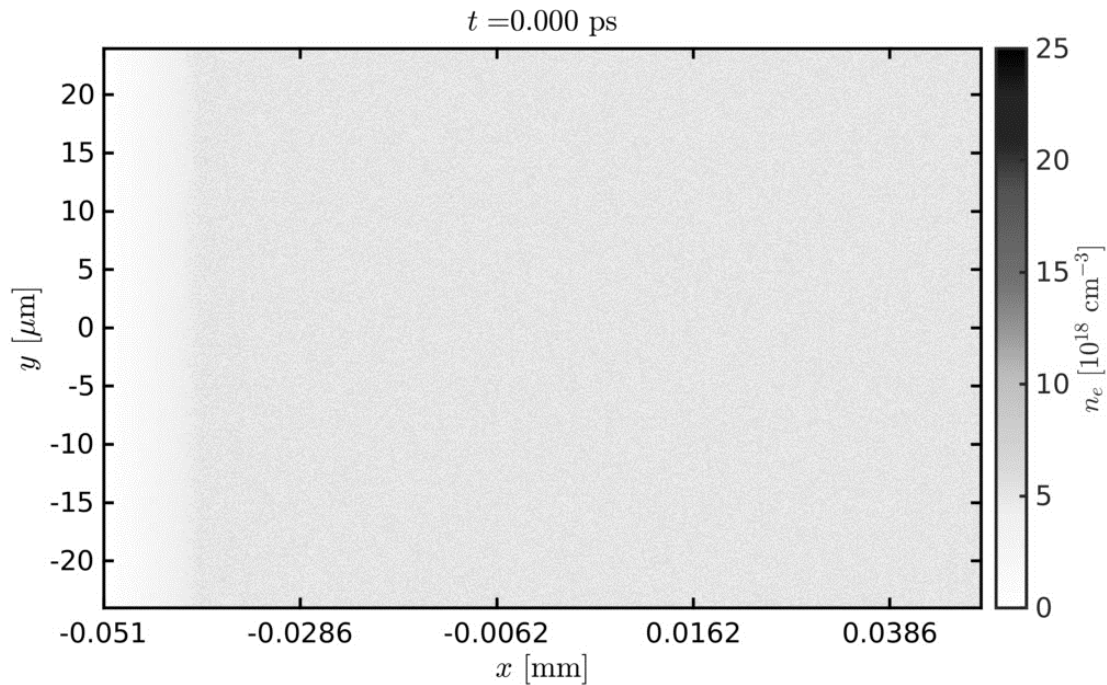
NELINEÁRNÍ REŽIM

Parametry

- délka pulsu: 25 fs
- vlnová délka: 800 nm
- intenzita v ohnisku: $3,41 \times 10^{19}$ W/cm²
- průměr ohniska: 19 μm



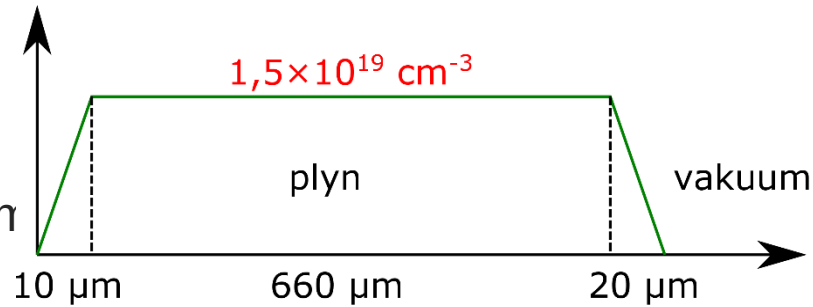
Vytvoří se plazmová vlna, elektrony se zachytí až ve druhé bublině.
Neurychlí se tolik.



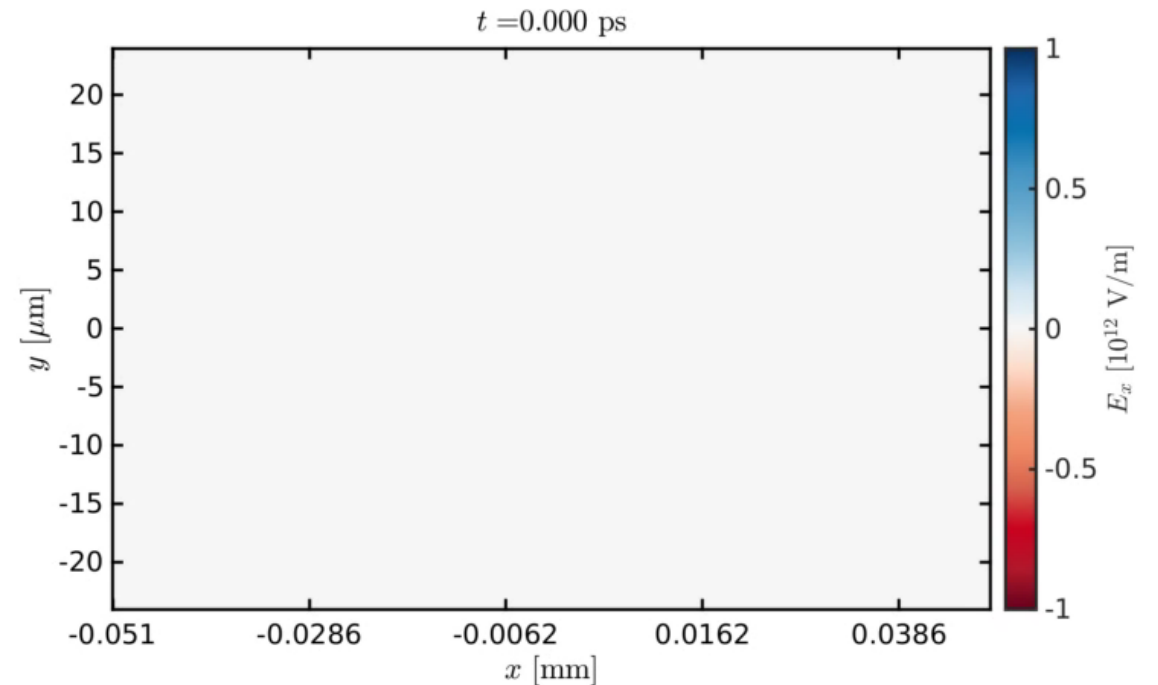
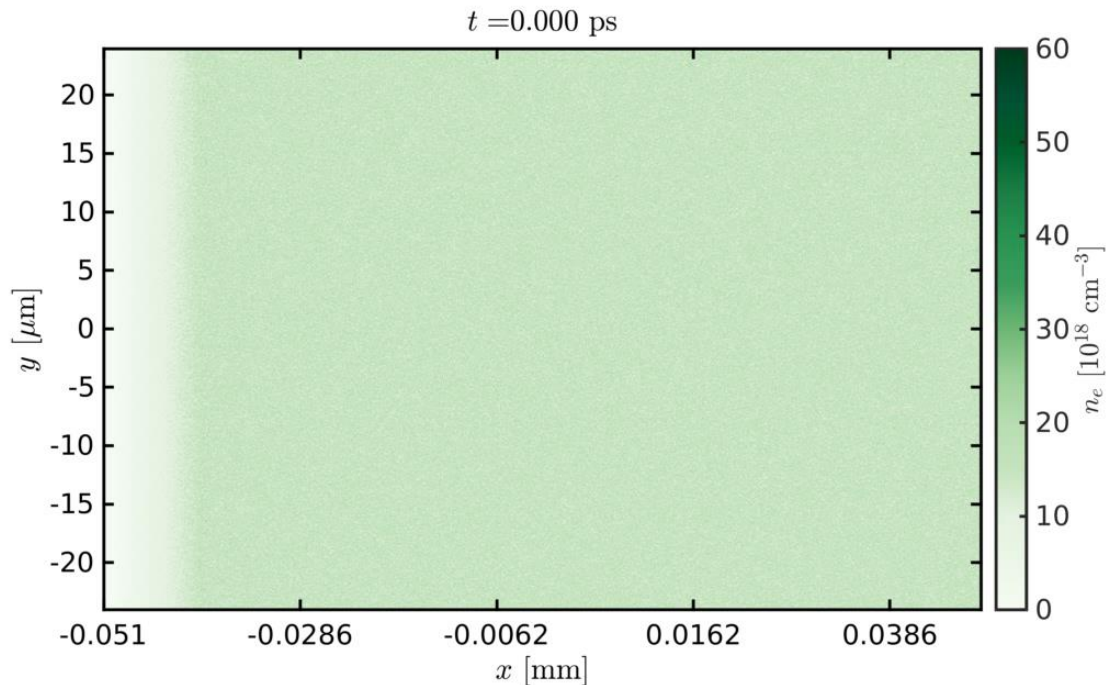
NELINEÁRNÍ REŽIM S VLASTNÍ INJEKCÍ

Parametry

- délka pulsu: 25 fs
- vlnová délka: 800 nm
- intenzita v ohnisku: $3,41 \times 10^{19}$ W/cm²
- průměr ohniska: 19 μm



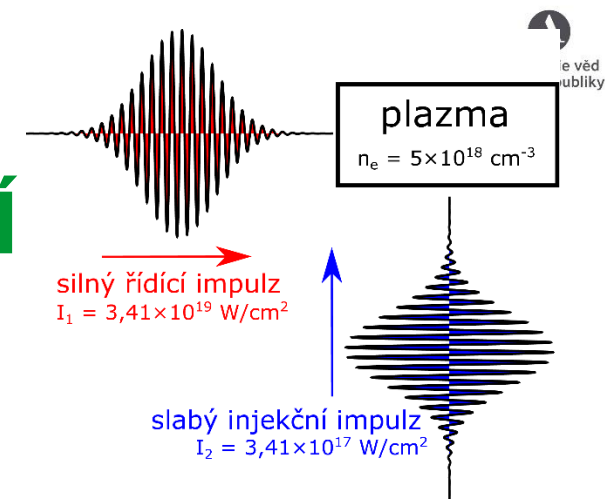
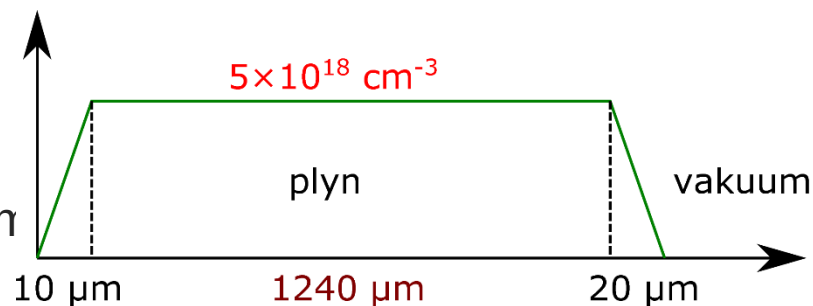
Dynamický vývoj první bubliny vede k masivní injekci elektronů!
Energetické spektrum je však velmi široké!



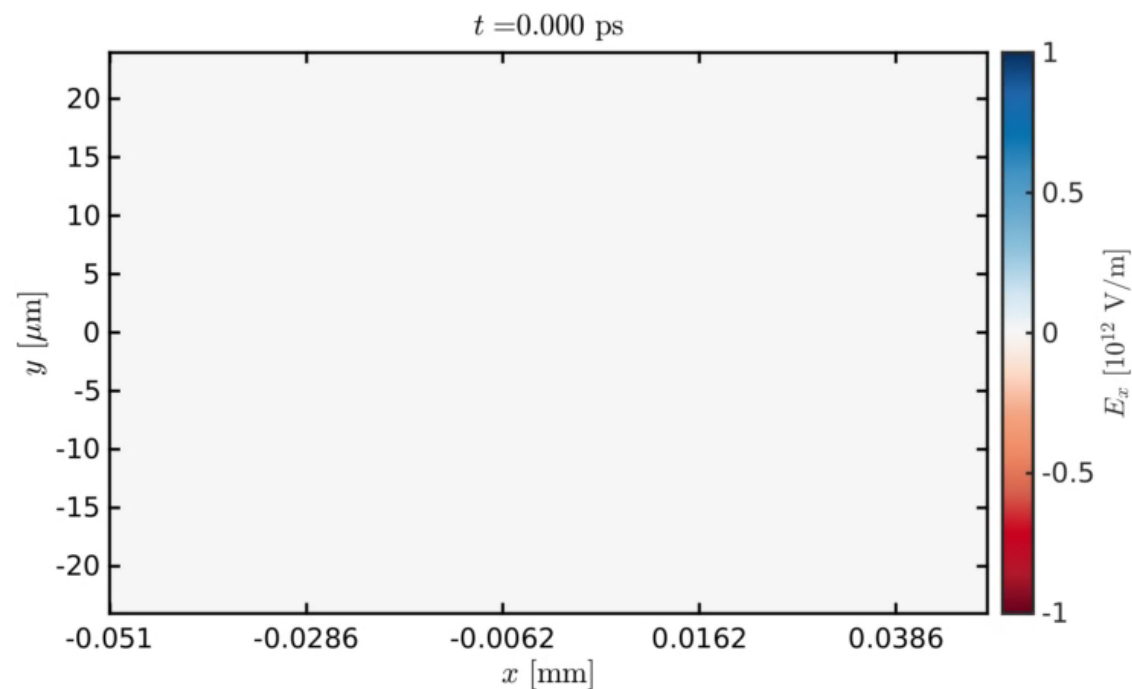
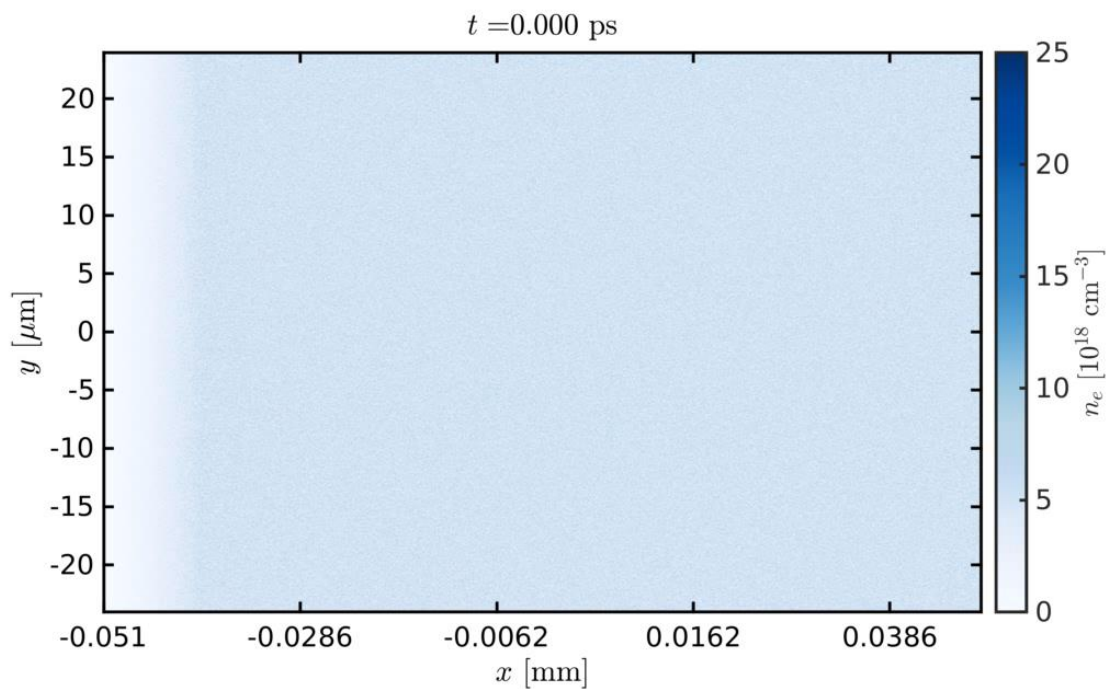
NELINEÁRNÍ REŽIM S OPTICKOU INJEKCÍ

Parametry

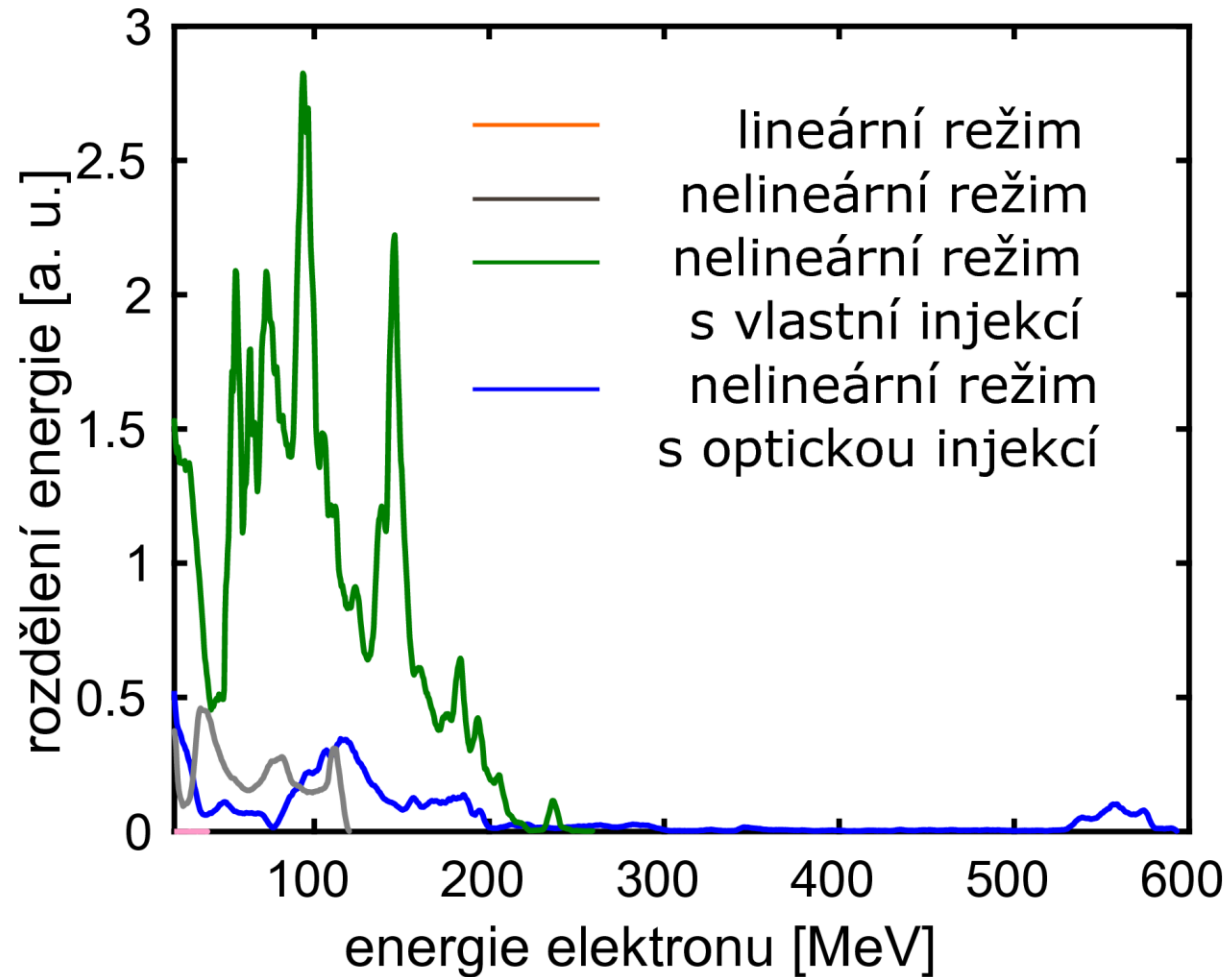
- délka pulsu: 25 fs
- vlnová délka: 800 nm
- intenzita v ohnisku: $3,41 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$
- průměr ohniska: $19 \text{ } \mu\text{m}$



Horný, V., Petržílka, V., Klimo, O., & Krůs, M. (2017). *Physics of Plasmas*, 24(10), 103125.

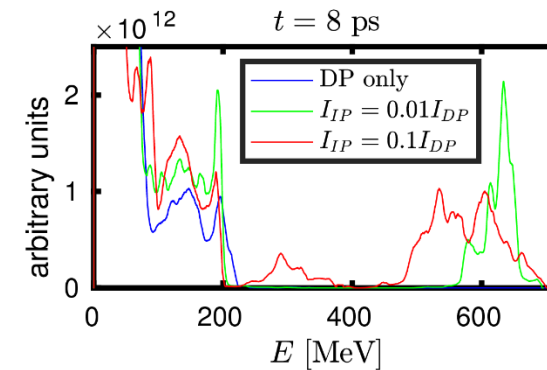


ENERGETICKÁ SPEKTRA



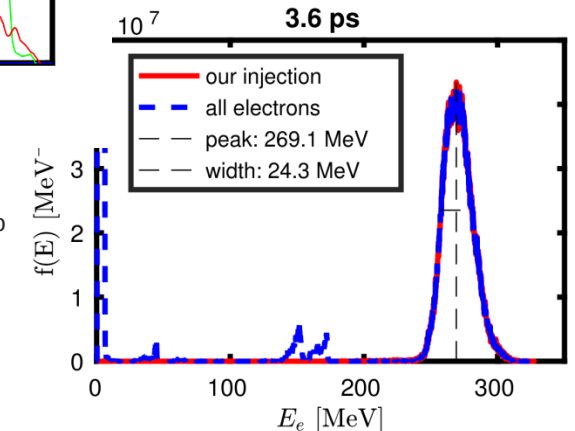
Spektra uvedena vždy na konci plazmatu, tj. pro lineární, nelineární a nelineární režim s vlastní injekcí v čase 2,32 ps (0,7 mm), u optické injekce v čase 4,45 ps (1,33 mm).

Lepší spektra z náročnějších simulací



Horný, V., & Krus, M. Optical injection into the laser wakefield accelerator by co-propagating weaker pulse. European Conference on Plasma Physics, Belfast, 2017.

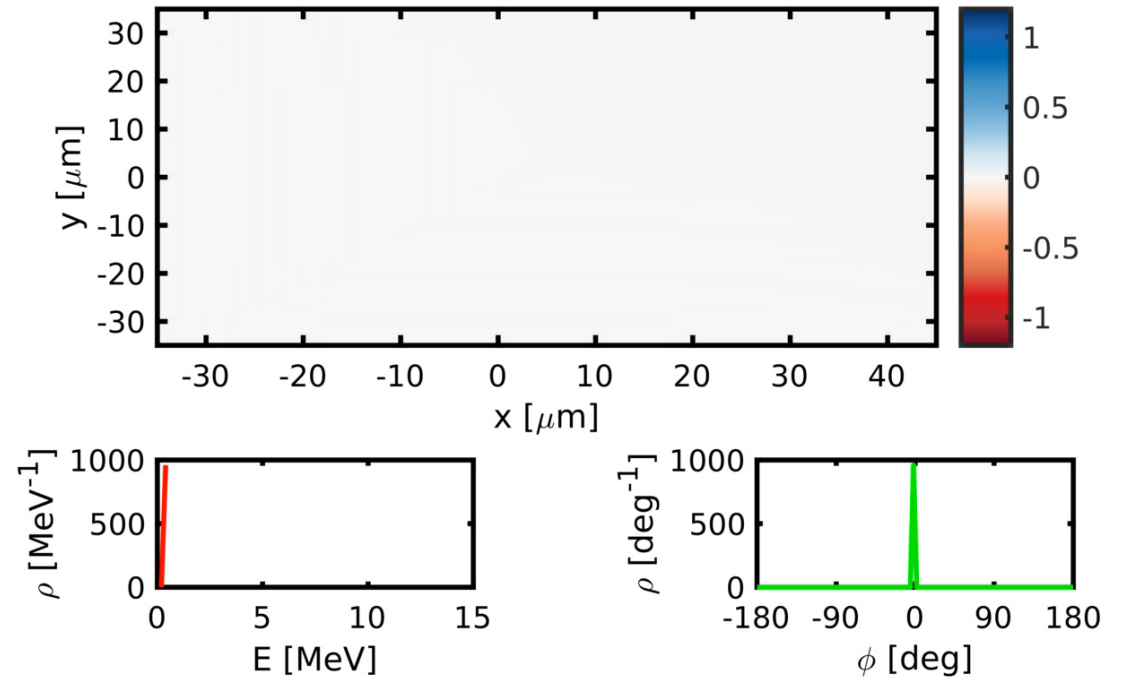
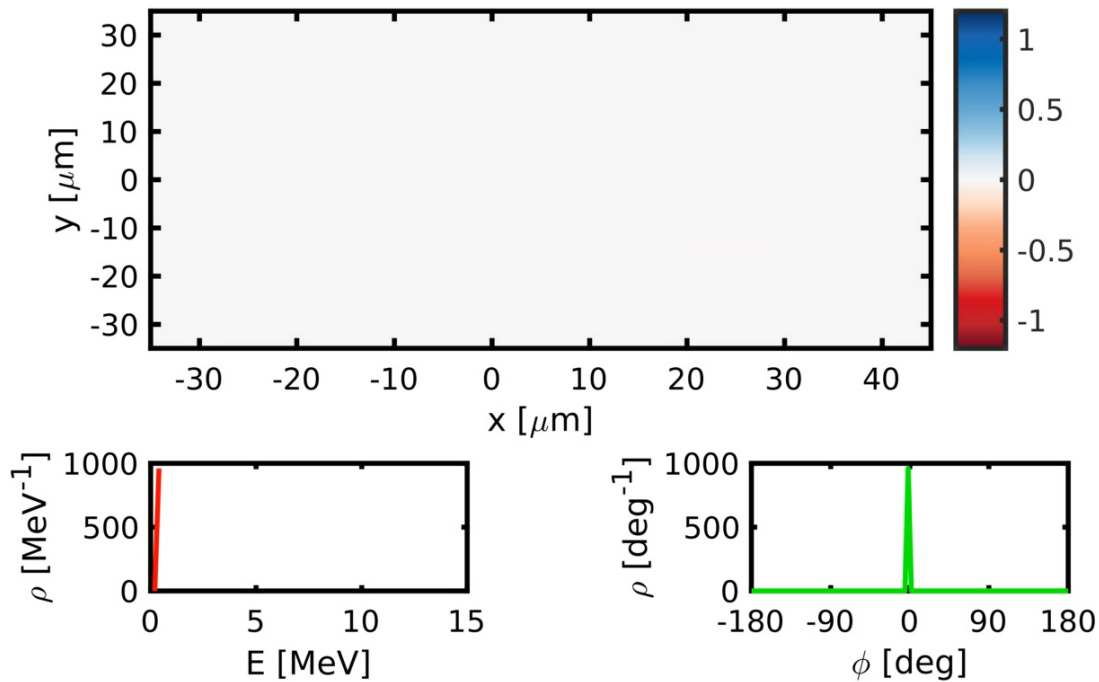
Horný, V., Petřílka, V., Klimo, O., & Krůs, M. (2017). Short electron bunches generated by perpendicularly crossing laser pulses. *Physics of Plasmas*, 24(10), 103125.



JAK FUNGUJE NAŠE OPTICKÁ INJEKCE?

Pouze hlavní svazek

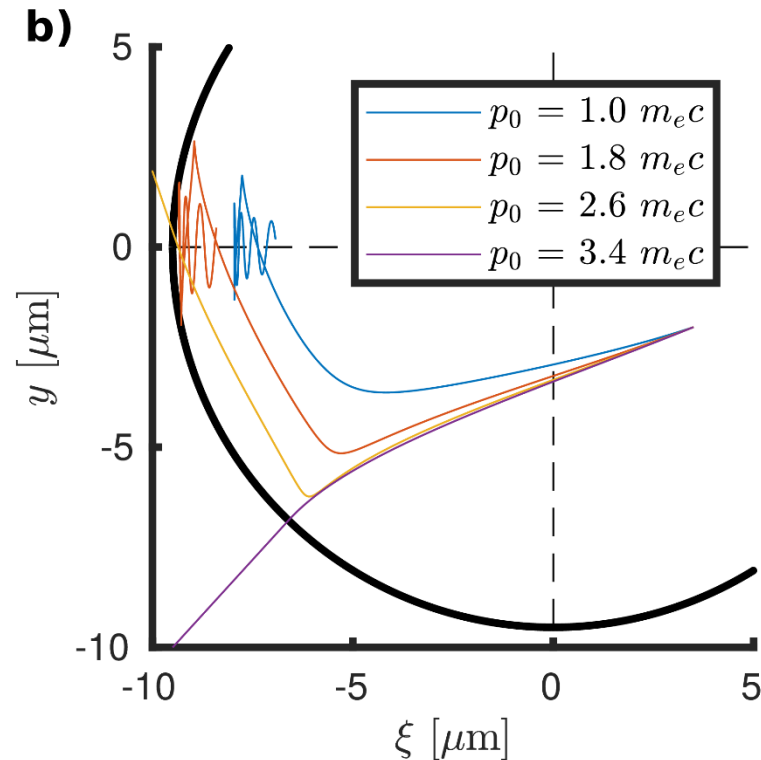
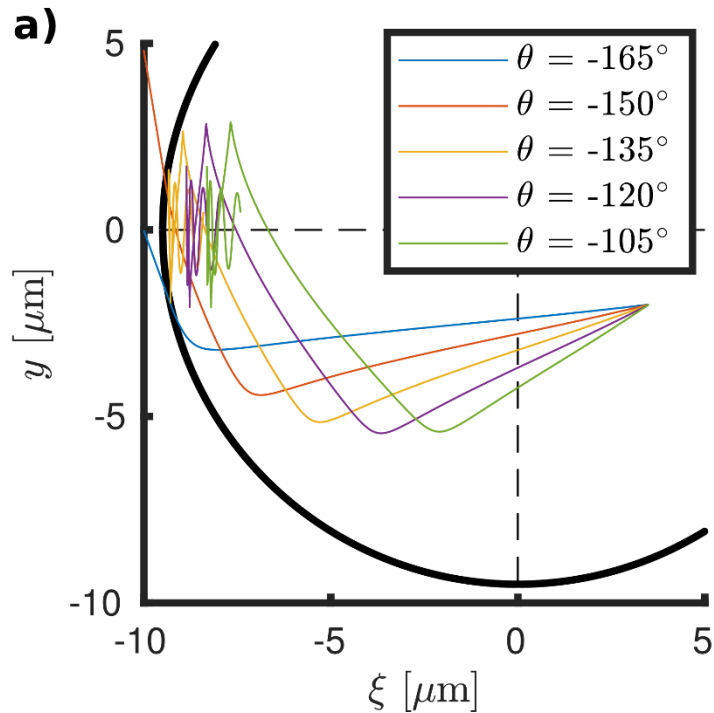
Hlavní a 100× slabší injekční svazek



Animace výsledků řešení pohybových rovnic elektronu ve vakuu v přítomnosti polí jednoho a dvou laserových impulzů. Navzdory velmi malému rozdílu ve vstupních podmínkách se výsledky liší výrazně.

JAK FUNGUJE NAŠE OPTICKÁ INJEKCE?

V plazmatu je za laserovým svazkem plazmová vlna, na kterou část elektronů naběhne, udrží se na ní a tak se urychlí!



NUMERICKÉ SIMULACE

Plasma je popsáno jako sada výpočetních makročástic, které nahrazují zpravidla tisíce až miliony fyzických částic.

Příklad

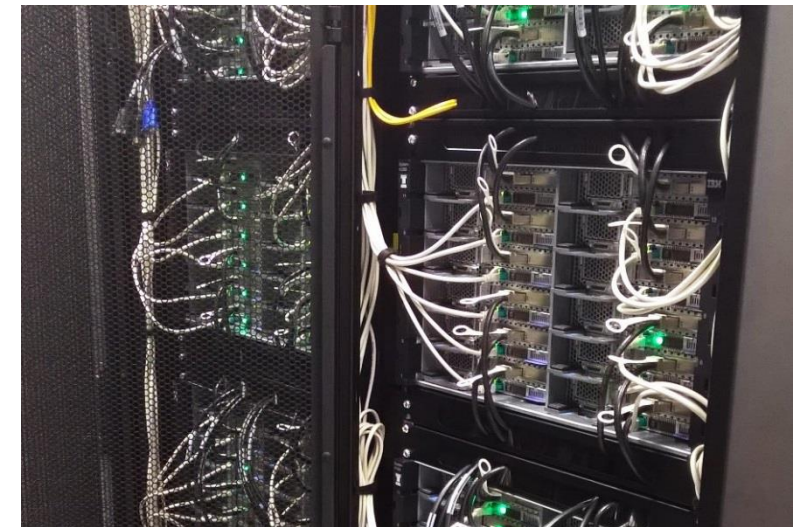
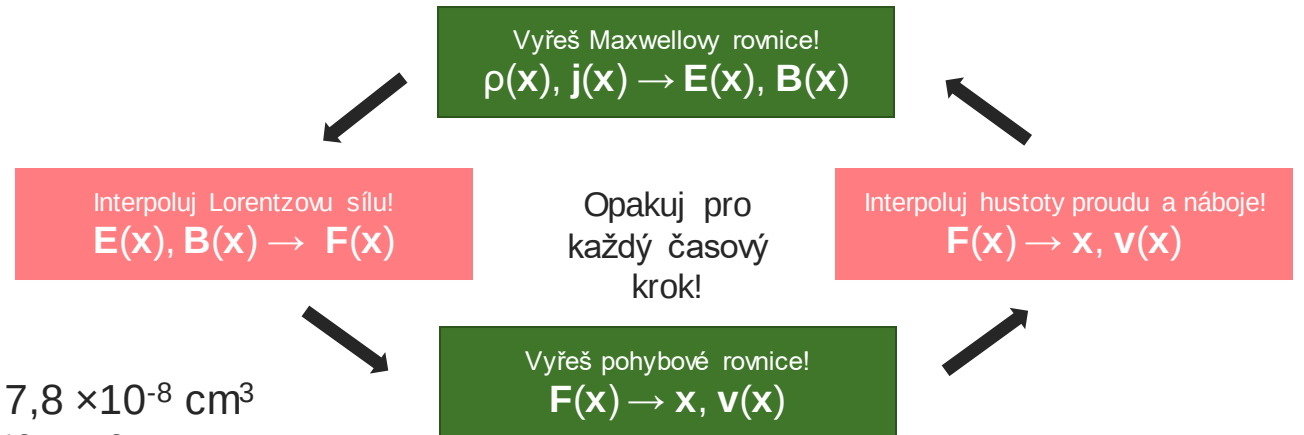
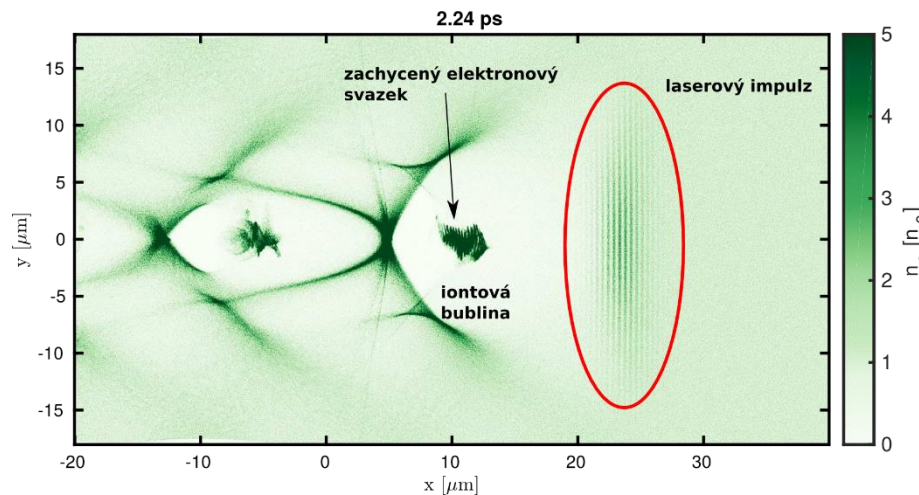
Simulujeme box o objemu $V = 60 \mu\text{m} \times 36 \mu\text{m} \times 36 \mu\text{m} = 7,8 \times 10^{-8} \text{ cm}^3$ s plazmatem o hustotě elektronů a protonů $n_e = n_p = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

Počet částic: $N = (n_e + n_p) \times V = 7,8 \times 10^{11}$.

Každé částici uložíme celkem 6 souřadnic polohy a hybnosti v typu double, tj. po 2 bajtech. Celkem bychom tedy potřebovali **9,4 TB** operační paměti. Zatím nemožné!

3D simulace uvažující vývoj dvou miliard výpočetních makročástic po dobu 8 ps, tj. šíření ve 2,4 mm plazmatu, trvá např. 24 hodin na 480 výpočetních jádrech.

Vygeneruje se cca 1 TB dat.

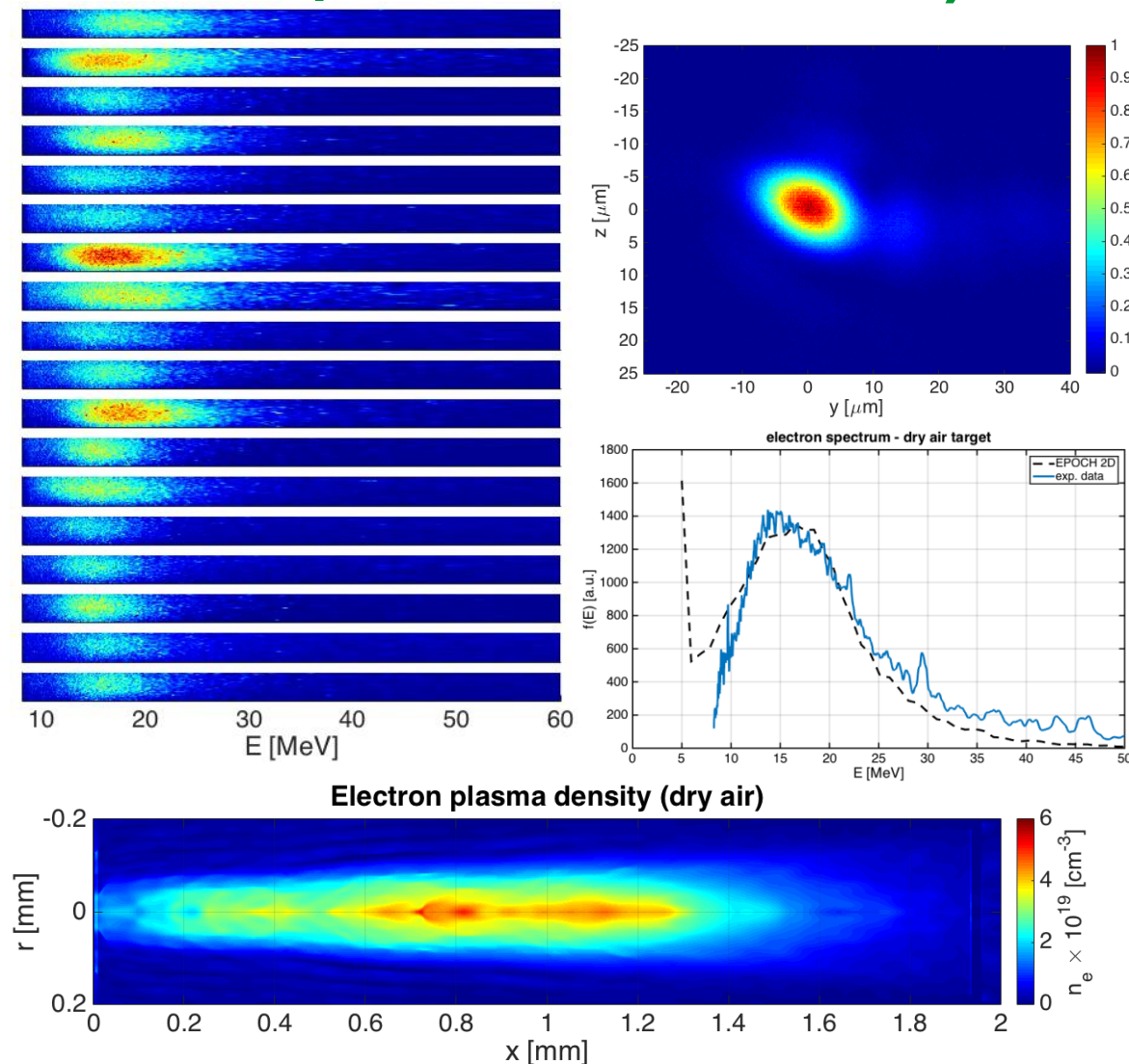
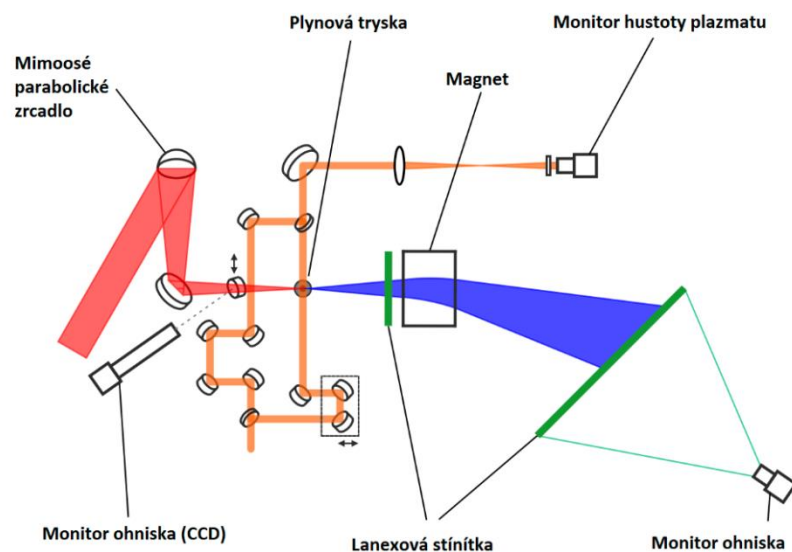


Výpočetní klast ECLIPSE v majetku laserového centra ELI Beamlines v Dolních Břežanech disponuje 84 výpočetními nódy po 16 jádrech.

EXPERIMENT V NAŠÍ LABORATOŘI (LISTOPAD 2016)

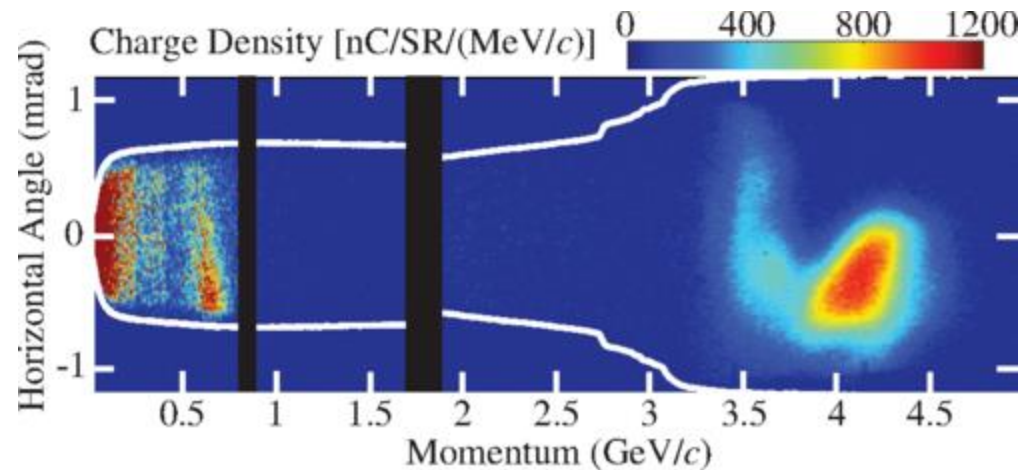
Titanový-safírový laserový systém

- 20 TW výkon, 1 J energie v impulzu, $\approx 5 \times 10^{18}$ W/cm²
- délka impulzu 45 fs, průměr ohniska 11-14 μm
- terč ze suchého vzduchu ($\text{N}_2 + \text{O}_2$) o relativně vysoké hustotě ($n_e \approx 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)
- **stabilní** zdroj 20MeV elektronů

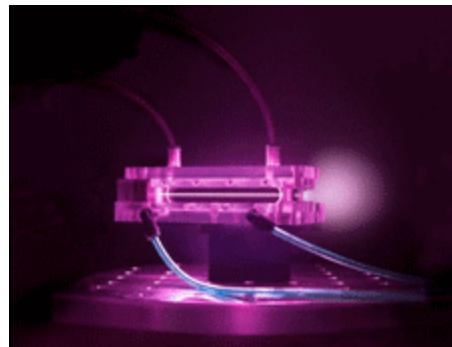


SOUČASNÝ STAV EXPERIMENTŮ VE SVĚTĚ

Honba za nejvyšší energií



9 cm dlouhá kapilára, ve které je pomocí výpoje vytvořen plazmový kanál, kterým se šíří plazmová vlna urychlující elektrony. Barevně upraveno.. LBNL photo by Roy Kaltschmidt.

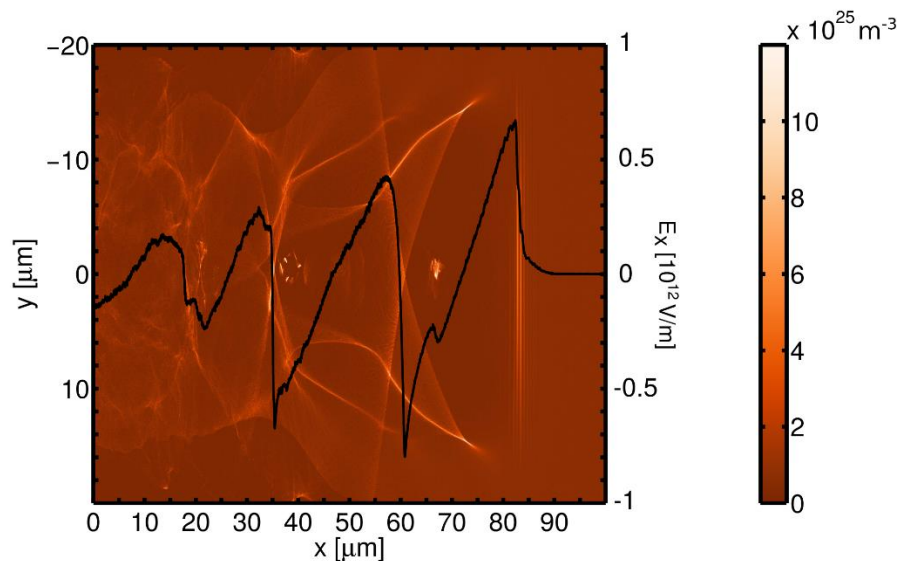


Optimalizace generovaných svazků

- oddělení procesů injekce a urychlení
 - optická, ionizační, hustotní skok
- energetický rozptyl stále v řádu %
 - pro některé aplikace třeba nižší
- nejistá reprodukovatelnost
 - variace ve tvaru pulsu, průběhu hustoty terče, role náhodných jevů
- obtížná laditelnost
- vylepšování diagnostických metod
 - interferometrie, stínografie, spektroskopie
- demonstrace vysokofrekvenčního běhu

URYCHLOVÁNÍ ELEKTRONŮ V LASEROVÉM PLAZMATU

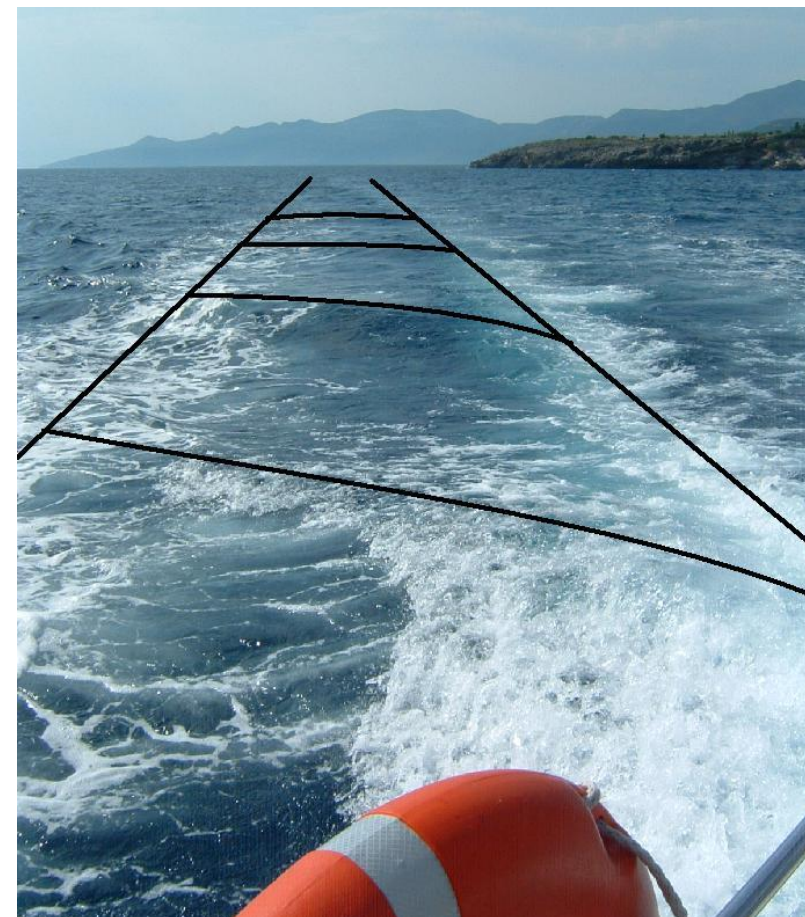
Urychlování elektronů na brázdové vlně v laserovém plazmatu je rozumnou alternativou ke standardním radiofrekvenčním urychlovačům.



D. Mašlárová, výzkumný úkol, ČVUT, 2017.

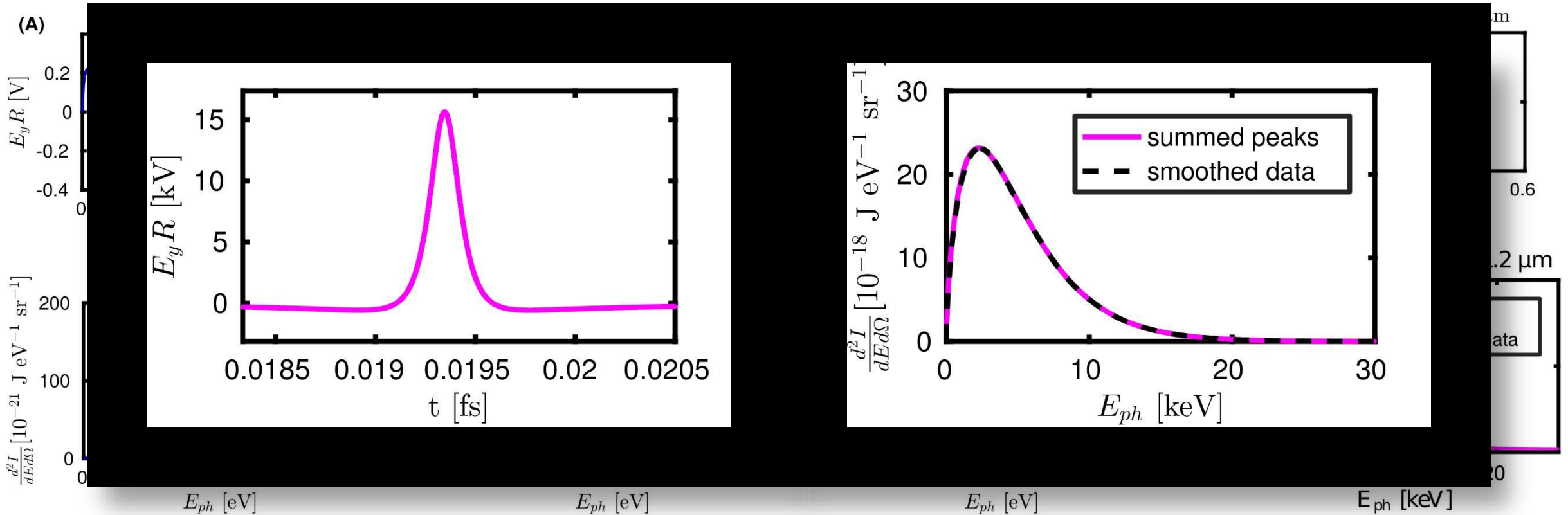


Obálka Nature, 30. září 2004



ZÁŘENÍ POHYBUJÍCÍHO SE ELEKTRONU

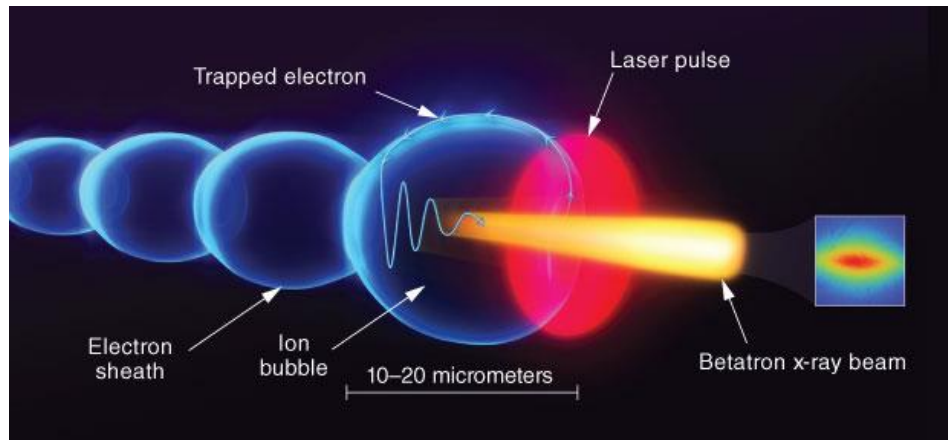
Nahoře: Elektron s danou energií se pohybuje po skoro-sinusové trajektorii.
Dole: Odpovídající spektrum rentgenového záření na ose.



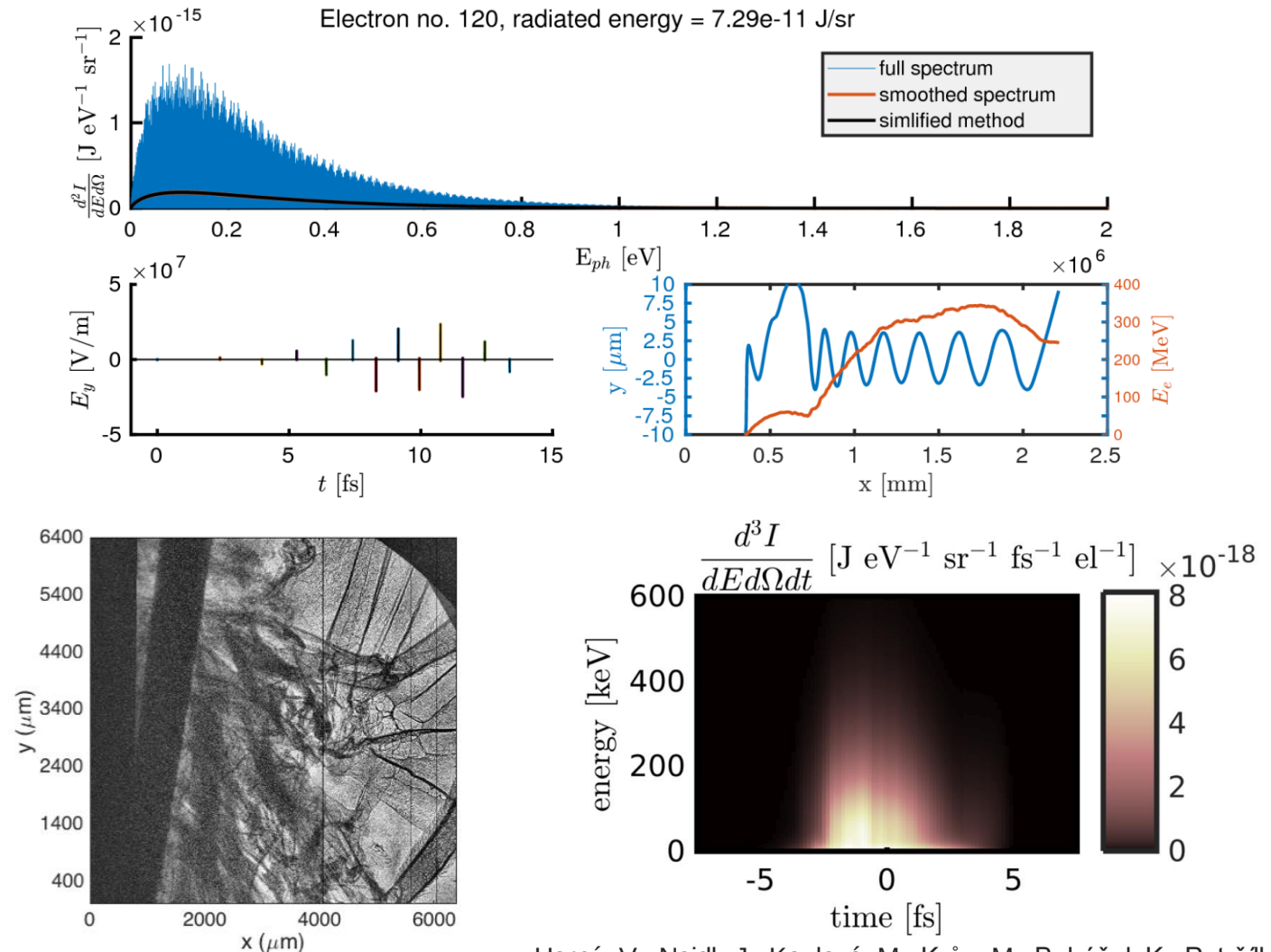
ULTRAKRÁTKÉ RENTGENOVÉ IMPULZY

Betatronové záření

- urychlovaný elektron osciluje také v příčném směru
- změna rychlosti nabité částice je spojeno s vyzářením EM záření
- velmi rychlý elektron vyzařuje velmi energetické rentgenové záření
- velmi krátká doba trvání – možný nový výzkum
- fázové přechody, chemické reakce na fs škále



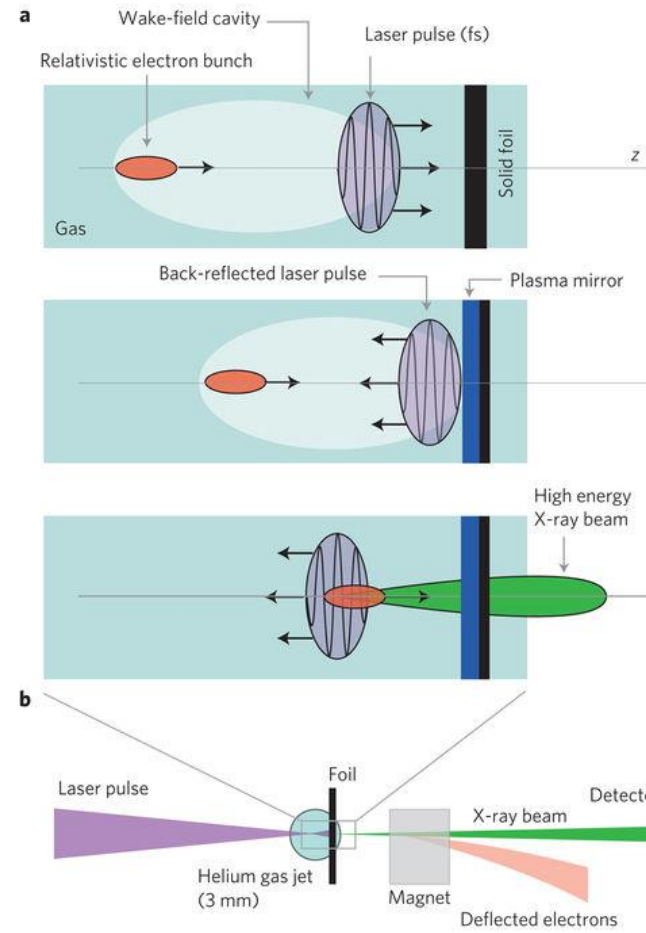
Vizualizace: F. Albert, *Lawrence Livermore National Laboratory*



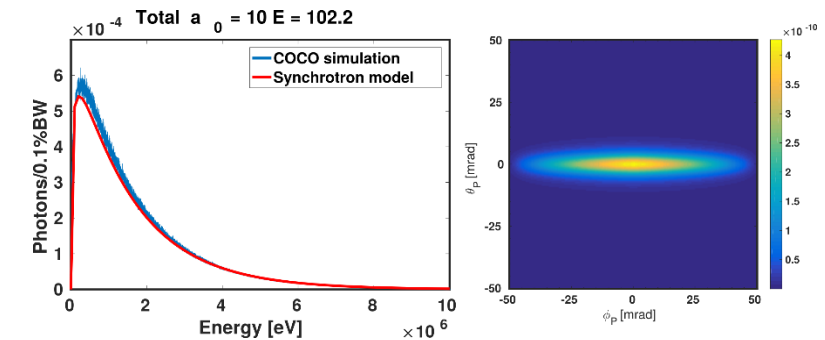
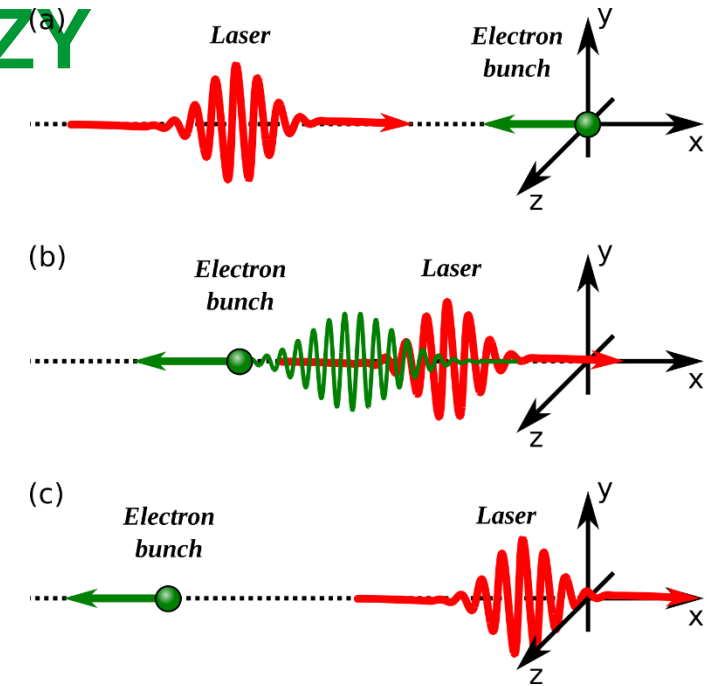
ULTRAKRÁTKÉ RENTGENOVÉ IMPULZY

Inverzní Comptonův rozptyl

- urychlený elektronový svazek se srazí s laserovým svazkem
- ten jej rozvlní, což má za následek vyzaření velmi tvrdého rentgenového světla (energie až v MeV oblasti)
- v praxi interaguje elektronový svazek s laserovým impulzem, kterým byl urychlen
- produktem jsou krátké impulzy tvrdého rentgenového světla – i v řádu MeV.



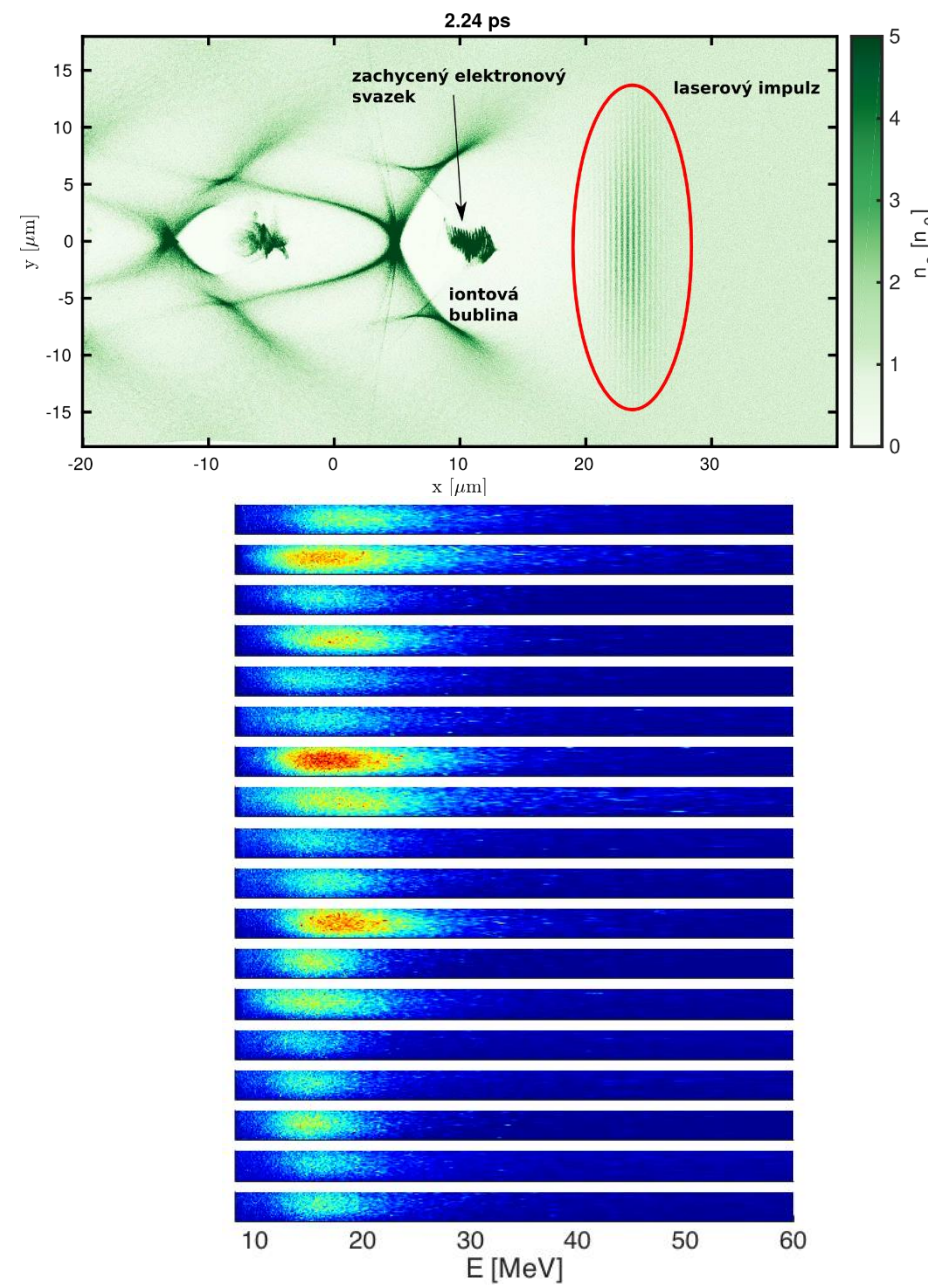
Ta Phuoc, K., et al. "All-optical Compton gamma-ray source." *Nature Photonics* 6.5 (2012): 308-311.



Diplomová práce T. Kerepecký, ČVUT, 2017.
Simulace srážky elektronu o energii 102 MeV a laserového svazku o intenzitě $2,1 \times 10^{21} \text{ W/cm}^2$

CO ŘÍCI ZÁVĚREM?

1. Urychlování elektronů v laserovém plazmatu je rozumnou alternativou ke standardním radiofrekvenčním urychlovačům!
 - mnohem menší velikost, cena, tedy lepší dostupnost
2. Jde o slibně se rozvíjející se technologii!
3. Urychlené elektrony či sekundárně generované rentgenové světlo mohou být použity v medicíně, průmyslu i základním výzkumu.
4. Česká republika se plnohodnotně podílí na světovém výzkumu!
 - Budme na to hrdí!



DĚKUJI VÁM ZA POZORNOST!



Ing. Vojtěch Horný
Chalmers tekniska högskola
vojtech.horny@chalmers.se