

Laserové urychlování plazmovou vlnou

David Grund

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT

15. ledna 2019

Zadání práce

Studium stability vzájemného zpoždění mezi dvěma laserovými impulzy pro realizaci dvoubublinového injektoru elektronového svazku

- Fyzika a technika laserového urychlování plazmovou vlnou
- Jednotlivá schémata injekce elektronových svazků
- Dvoubublinové injekční schéma
- Naměřit stabilitu vzájemného zpoždění mezi dvěma laserovými impulzy

Atom v poli intenzivního laseru I

- CPA: produkce vysoce intenzivních laserových impulsů
 - Časové prodloužení, zesílení, opětovné roztažení (zamezí poškození aktivního média)
- *Atomic intensity*: $I_a \approx 10^{16} \text{ W/m}^2 \rightarrow$ garance tvorby plazmatu
- Při $10^{10} \text{ W/m}^2 < I < I_a$: **multiphoton ionization**
 - Rozšíření klasického fotoefektu pro intenzivní záření
 - Absorpce n fotonů naráz, uvolnění e^-
- **Above-threshold ionization**
 - s fotonů navíc \rightarrow kinetická energie

$$E_f = (n + s)\hbar\omega - E_{ion} \quad (1)$$

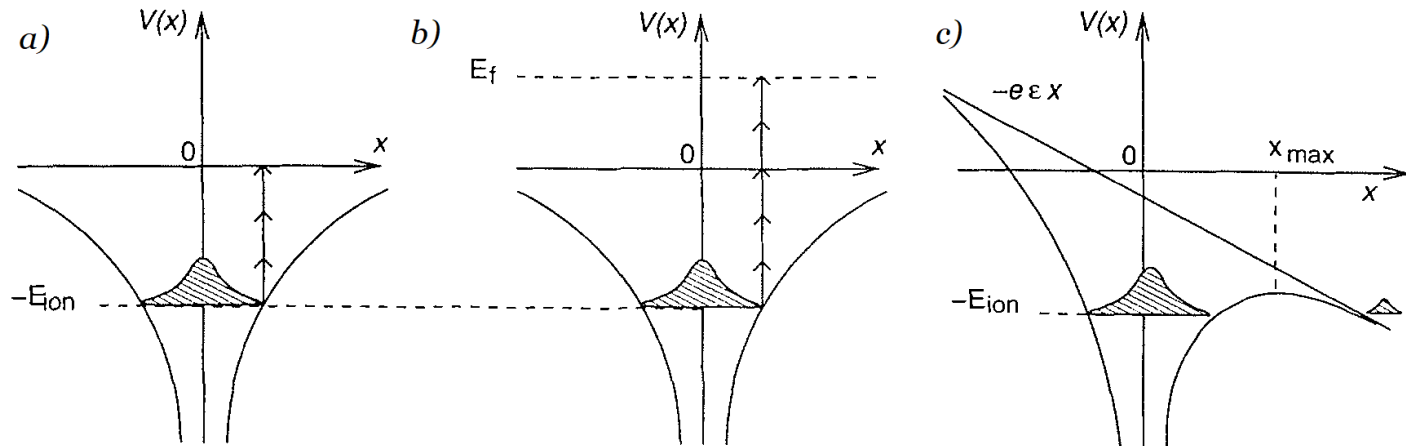
- **Tunelling ionization**

- Takové intenzity impulsů, že je přímo narušen („pokřiven“) elektrický potenciál jádra
- Gamma parametr

$$\gamma = \omega_L \sqrt{\frac{2E_{ion}}{I_L}} \quad (2)$$

- Pro $\gamma < 1$ (silná pole, velké vlnové délky): tunelová ionizace
- Pro $\gamma > 1$: multifotonová ionizace
- QM: potlačení bariéry, konečná pravděpodobnost protunelování elektronu, začíná hrát velkou roli už od $I \approx 10^{14}$ W/m²

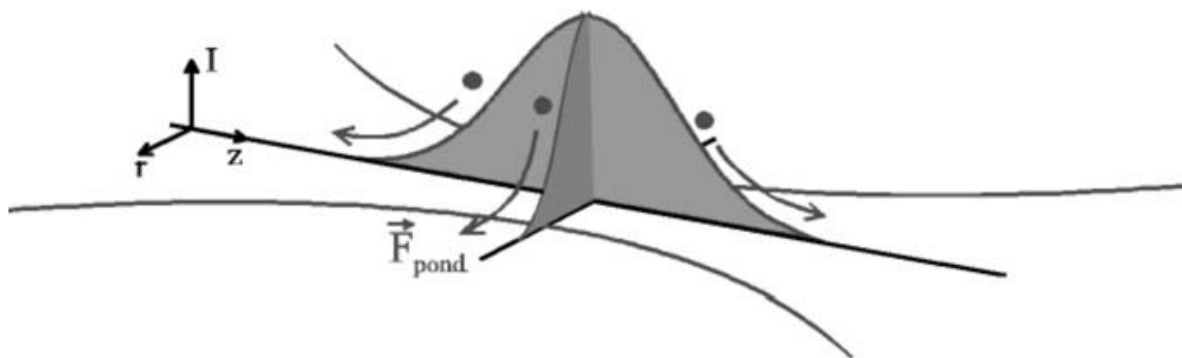
Způsoby ionizace



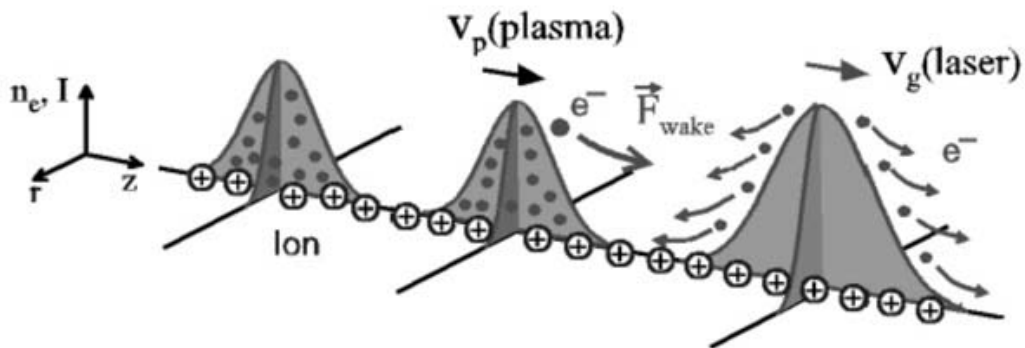
- a) Multifotonová
- b) Nadprahová multifotonová
- c) Tunelová

- Souhrnně **Laser-Plasma Acceleration (LPA)**
 - Lineární / nelineární režim dle velikosti a_0
 - Particle in Cell (PIC) simulace
- **Laser Wakefield Acceleration** (Tajima & Dawson, 1979)
 - Preionizované plazma
 - Krátký ($\lesssim 1$ ps), vysoce intenzivní laserový impuls ($\gtrsim 10^{17}$ W/m²) s délkou $L \sim \lambda_p$ v podkritickém plazmatu
 - Ponderomotorická síla vypuzuje elektrony z oblastí vysoké intenzity pole (u iontů efekt zanedbatelný)
 - Elektrony jsou pak zpětně přitahovány kladnými náboji
 - oscilace, vznik plazmové vlny
 - Při splnění $L < \lambda_p/2$ a dostatečné intenzitě laseru $a_0 \gg 2$
 - **bubble regime**

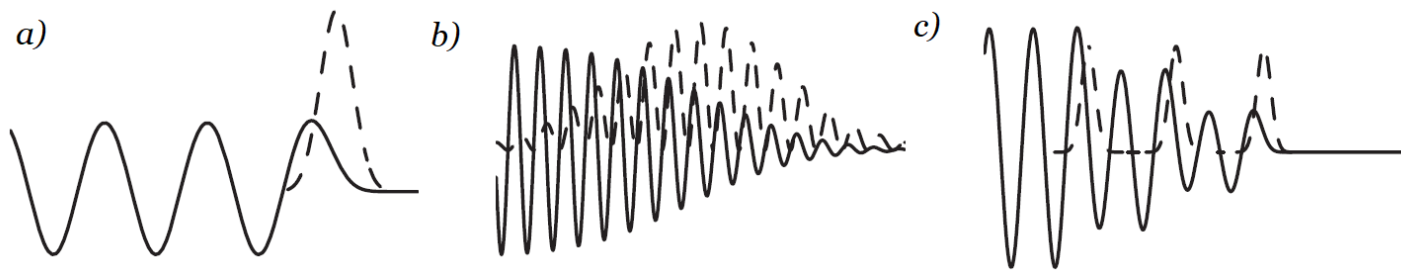
Ponderomotive force



Laser wakefield acceleration



- **Plasma beat wave acceleration (PBWA) → b)**
 - Rezonance dvou laserových frekvencí ω_1, ω_2 tak, že $\omega_1 - \omega_2 \approx \omega_p$
 - Beat wave = řetěz stejně širokých, rovnoměrně prostorově separovaných pulsů
- Tvorba plazmové vlny **řetězem impulsů → c)**
 - Možnost optimalizace šířek pulzů a jejich prostorové vzdálenosti k dosažení největší možné amplitudy plazmové vlny



Výhody:

- Možnost dosáhnout vysokých gradientů urychlovacího pole (100 MV/m vs řadově až stovky GV/m pro $n_0 \approx 10^{18}$)
- Možnost produkce extrémně krátkých elektronových svazků ($t < \lambda_p/c$, tj. < 100 fs)
- Kompaktní rozměry

Omezení:

- **Electron dephasing:** elektron začne být po určité době vlnou zpomalován (dephasing length)
- Možnost laser-plazmových nestabilit

- Má přímý vliv na výslednou kvalitu urychleného svazku, např. na emitanci
- **Self-injection**
 - Z důvodu dynamického vývoje vlny; některé elektrony z povrchu bubliny proniknou do urychlující fáze vlny
 - Obtížné kontrolovat, nemusí být stabilní
 - Kontinuální self-injekce může vést ke zhroucení bubliny
- **Density down-ramp injection**
 - Využívá závislosti fázové rychlosti vlny na hustotě plazmatu:

$$v_p = \frac{c}{1 + \frac{\xi}{k_p} \frac{dk_p}{dx}} \quad (3)$$

- ξ = vzdálenost za laserovým pulzem, $\xi < 0$; $k_p = \omega_p/c$
- v_p klesá pro $\frac{dk_p}{dx} < 0 \Leftrightarrow \frac{dn}{dx} < 0$
- Při poklesnutí rychlosti může nastat injekce

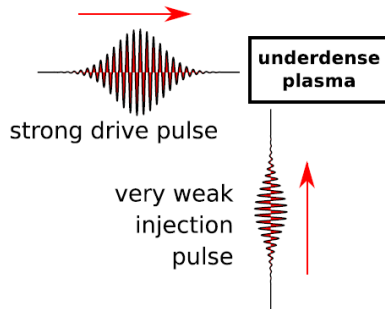
- **Ionization injection**

- Využívá mix plynů s vyšším a nižším protonovým číslem Z
- Do urychlovací fáze plazmové vlny se injektují elektrony z vnitřních energetických hladin

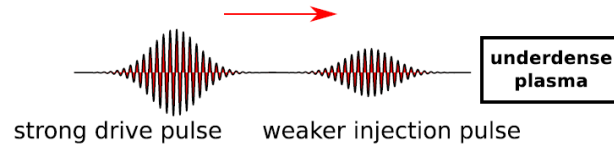
- **Optical injection**

- Využívá dodatečných impulzů, které dodávají elektrony hlavnímu, tvořícímu brázdovou vlnu (pump + injection pulses)
- kolineární: jdoucí ve stejném směru / proti sobě; kolmé impulsy

a) Orthogonally crossed pulses with perpendicular polarizations

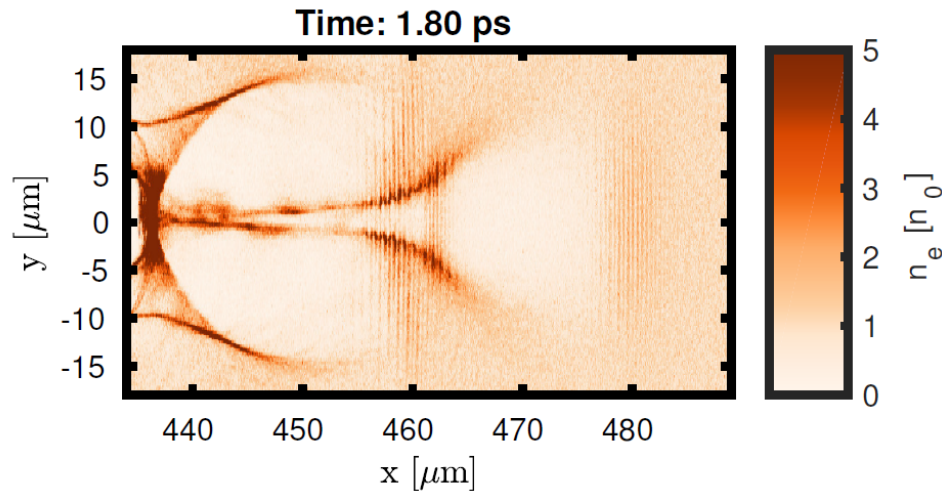


b) Injection by preceding pulse



Dvojbublinové schéma

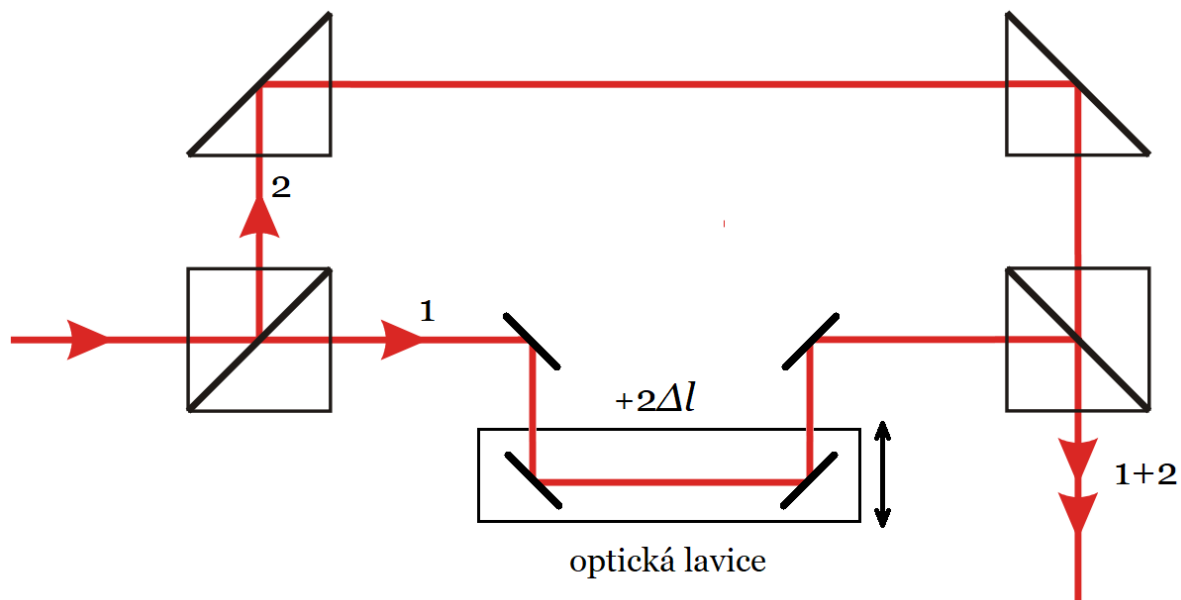
- Injektující puls: vlastní bublina, $a_0 \gtrsim 1,8$
- Lokalizace prvního pulzu: jeho elektronová slupka leží v oblasti self-injekce hlavního pulzu
- 2D PIC simulace, zpoždění mezi pulzy 75 fs:



- Potřeba pro realizaci injekce se dvěma za sebou jdoucími pulzy (injection by preceding pulse - IPP)
- Upravení Mach–Zehnderova interferometru
- Michelsonův interferometr nevhodný
- *Postup:*
 - Rozdělení ultrasekundového laserového impulzu do dvou po sobě jdoucích
 - Časová separace ≈ 65 fs; délky cca 25 fs
 - Nutné správné proložení optických drah!
 - Zesílení obou impulzů; ve vhodném poměru (injektující pulz slabší)
 - Zachování požadované časové separace?

Adaptovaný Mach-Zehnderův interferometr

- Optická lavice → rozdíl drah cca $20\ \mu\text{m}$



- P. Gibbon. *Short pulse laser interactions with matter: Chapter 2 - Interaction with Single Atoms*. London : Imperial College Press, 2005.
- E. Esarey, C. B. Schroeder, and W. P. Leemans. Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators. *Rev. Mod. Phys.*, 81:1229–1285, Aug 2009.
- H. Schworer. Particle acceleration with lasers. *S. Afr. j. sci.* [online]. 2008, vol.104, n.7-8, pp.299-304.