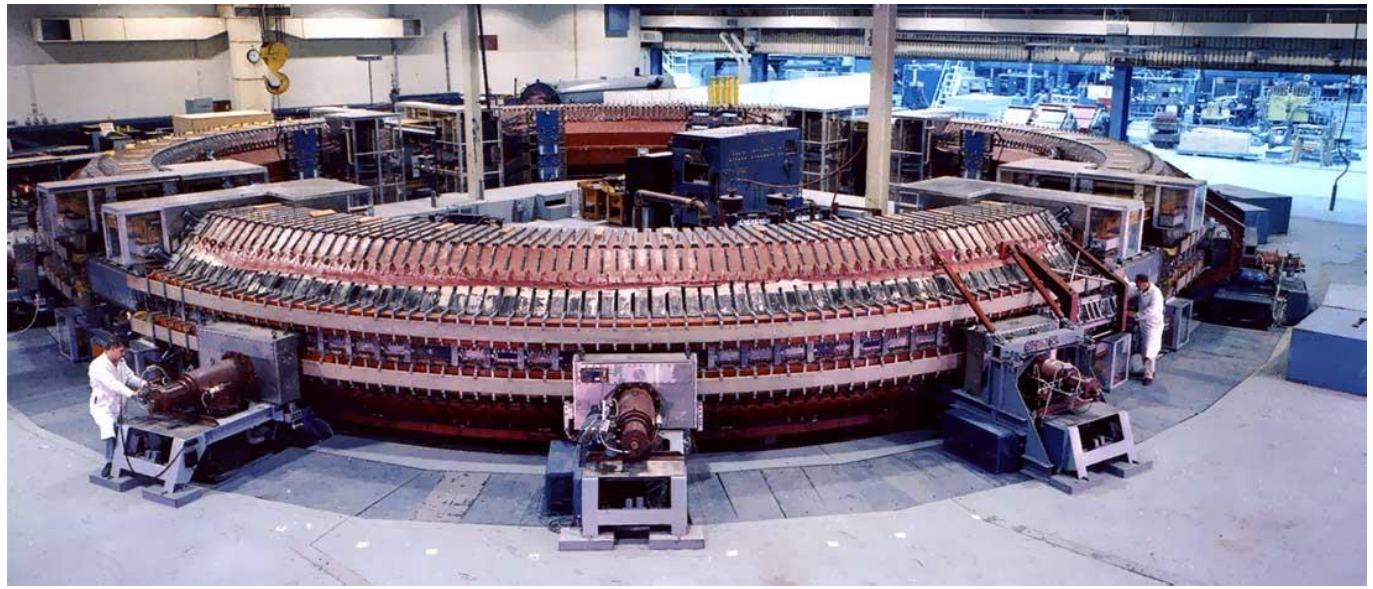
Chlazení femtosekundových elektronových svazků

Urychlování elektronů plazmovou vlnou

- první klasické (radiofrekvenční) urychlovače s malými rozměry
  - stolní, malá hala
    - cyklotrony
    - synchrotrony
      - energie: desítky MeV

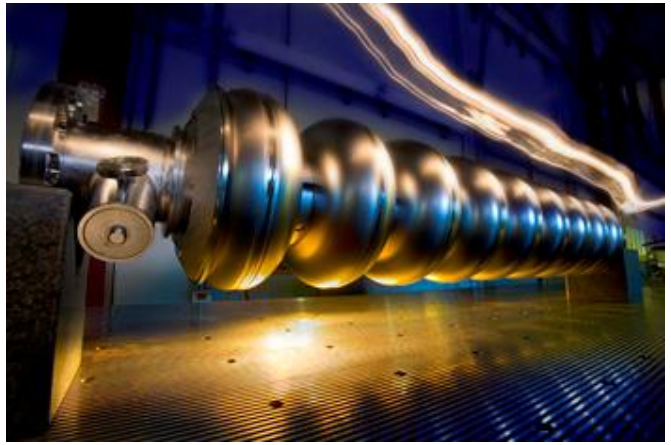
Urychlování elektronů plazmovou vlnou

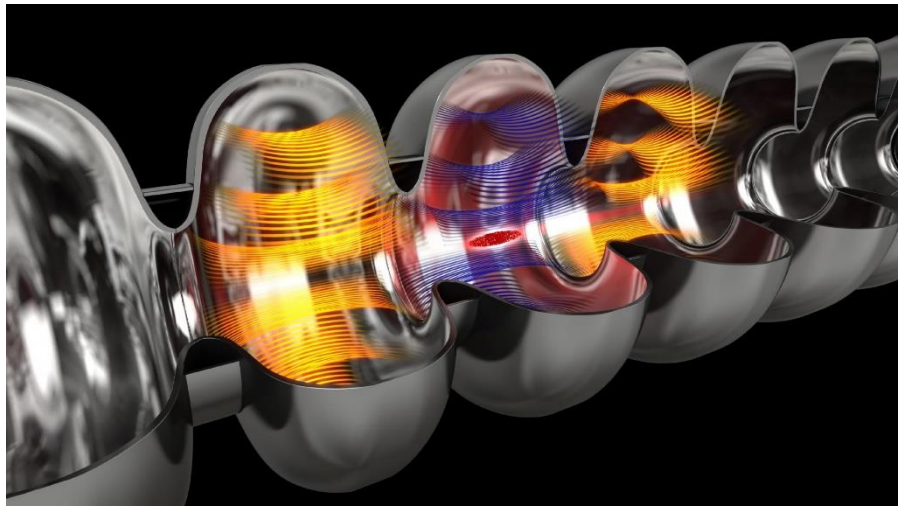
- první klasické (radiofrekvenční) urychlovače s malými rozměry
  - stolní, malá hala
    - cyklotrony
    - synchrotrony
      - energie: desítky MeV
- synchrotrony pro fyziku vysokých energií
  - částicová a subjaderná fyzika
    - Tevatron 1 TeV (1 km v průměru)
    - LHC 7 TeV (4,3 km v průměru, obvod 27 km)
    - ILC 1 TeV (dlouhý 50 km)



Urychlování elektronů plazmovou vlnou

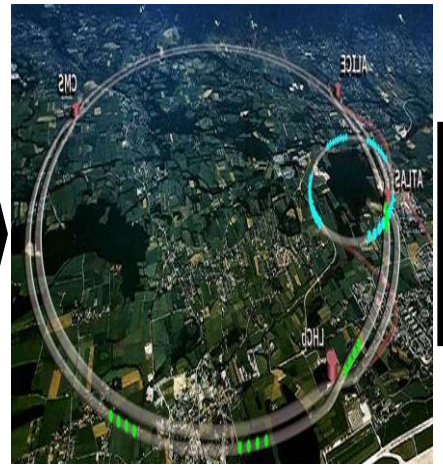
- radiofrekvenční urychlovače
  - elektromagnetická vlna (MHz, GHz)
    - podélné elektrické pole
  - supravodivé (10 MV/m)
  - normálně vodivé (100 MV/m)
    - průraz urychlovací dutiny
  - cm struktura

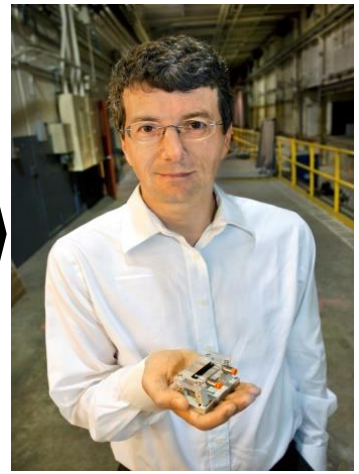




- laser
  - elektrické pole (TV/m)
  - příčné elektrické pole
    - nevhodné pro urychlování
  - nm struktura

- plazmová vlna
  - vytvořena laserem či svazkem částic
  - podélné elektrické pole (100 GV/m)
  - lineární vlna
  - nelineární vlna (bublina)
  - µm struktura
    - femtosekundové svazky (injekce svazku přímo z plazmatu)





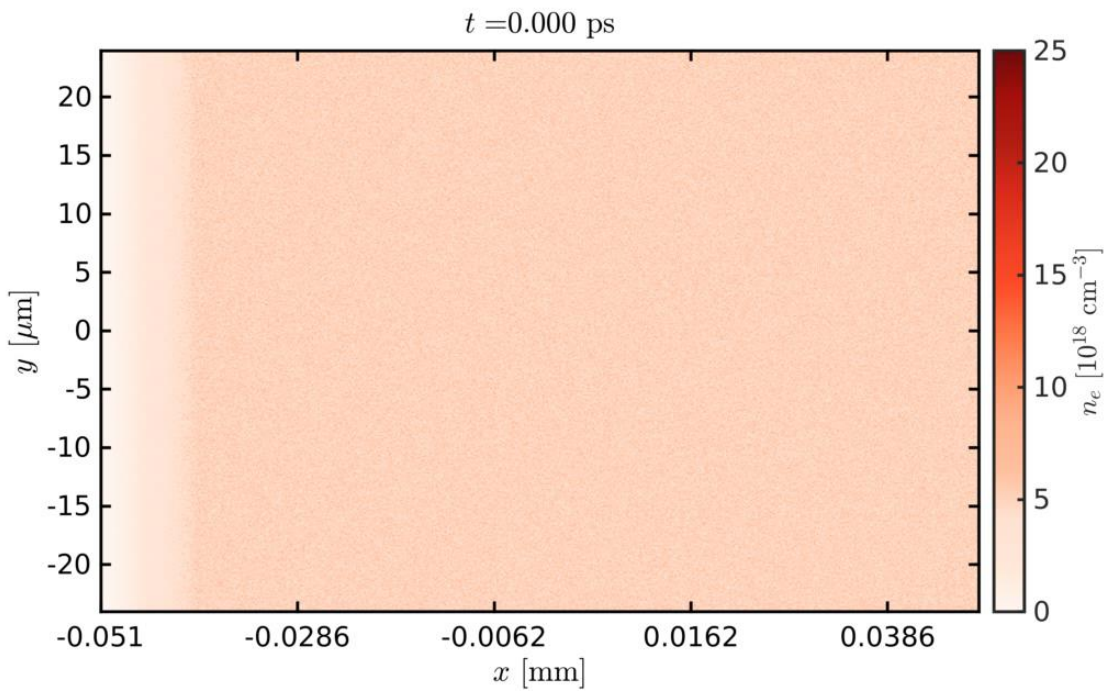
Urychlování elektronů plazmovou vlnou

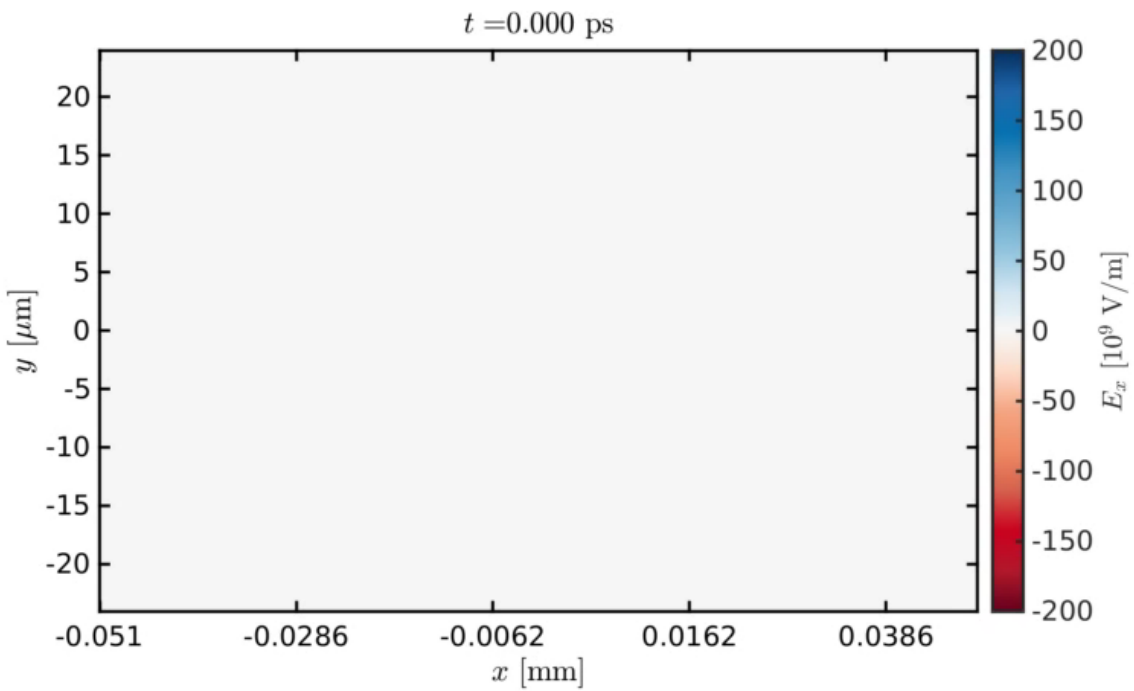
- elektrické pole plazmové vlny
  - úměrné hustotě plazmatu

$$E_0 = 0.96\sqrt{n_e[\mathrm{cm}^{-3}]}.$$

$$\lambda_p[\mu\mathrm{m}] = \frac{3.34 \times 10^{10}}{\sqrt{n_e[\mathrm{cm}^{-3}]}}$$

  - lineární plazmová vlna





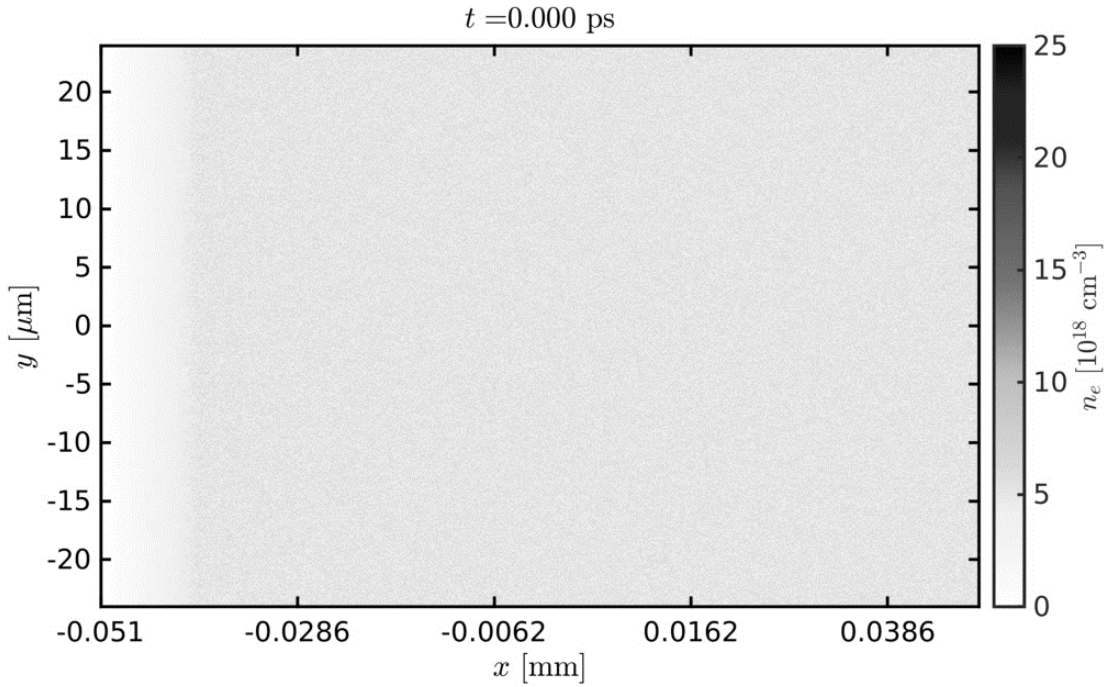
Urychlování elektronů plazmovou vlnou

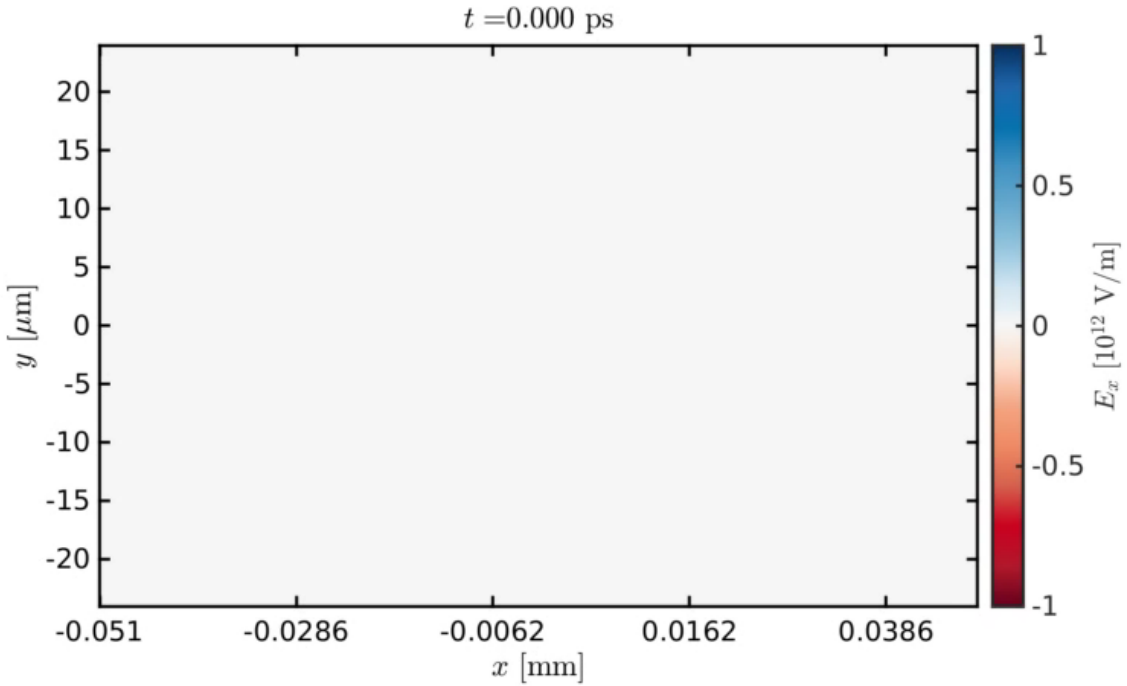
- elektrické pole plazmové vlny
  - úměrné hustotě plazmatu

$$E_0 = 0.96\sqrt{n_e[\mathrm{cm}^{-3}]}.$$

$$\lambda_p[\mu\mathrm{m}] = \frac{3.34 \times 10^{10}}{\sqrt{n_e[\mathrm{cm}^{-3}]}}$$

  - nelineární plazmová vlna

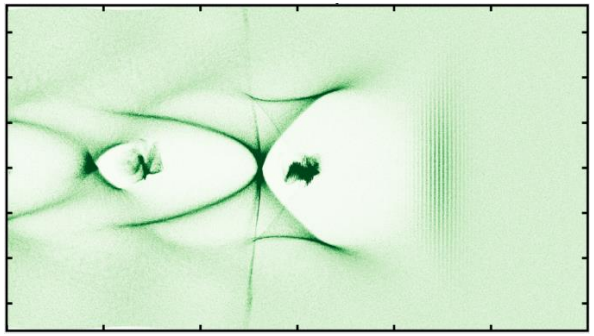


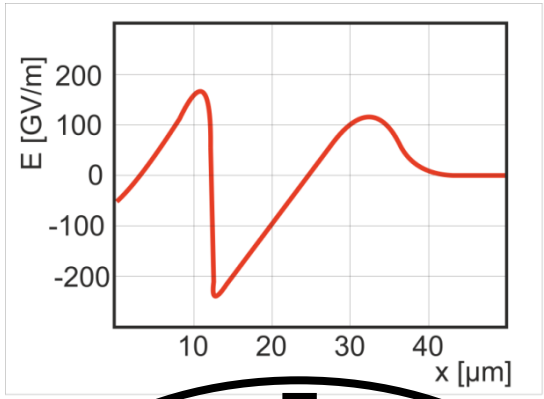


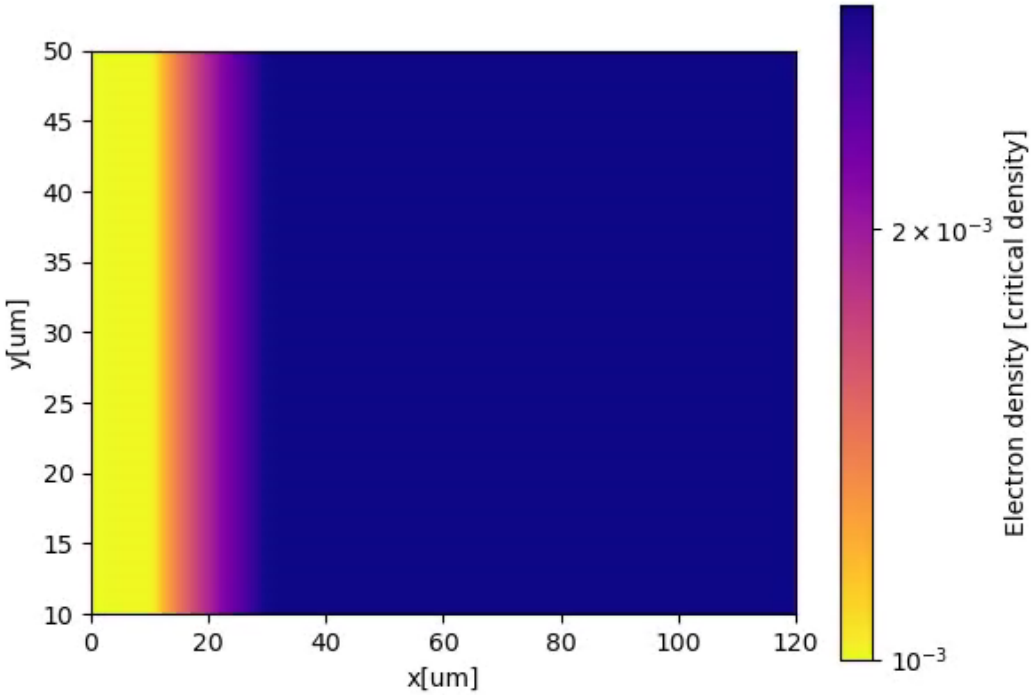
Urychlování elektronů plazmovou vlnou

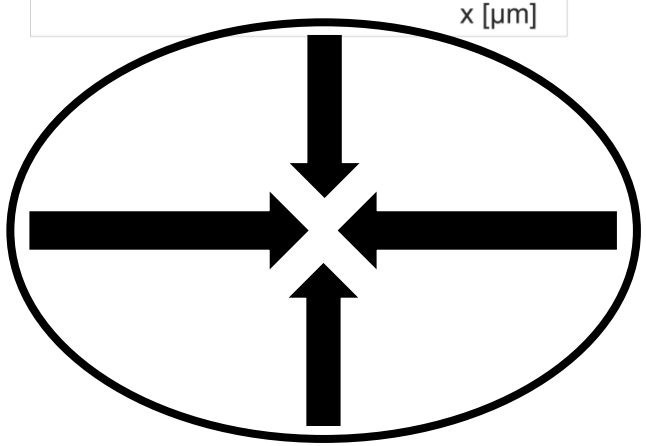
- nelineární plazmová vlna
  - bublina
  - fokusující pole uvnitř (pro záporně nabité částice)

  - schopná urychlit velký náboj
    - µC či mC (podobný náboj pouze indukční urychlovače)



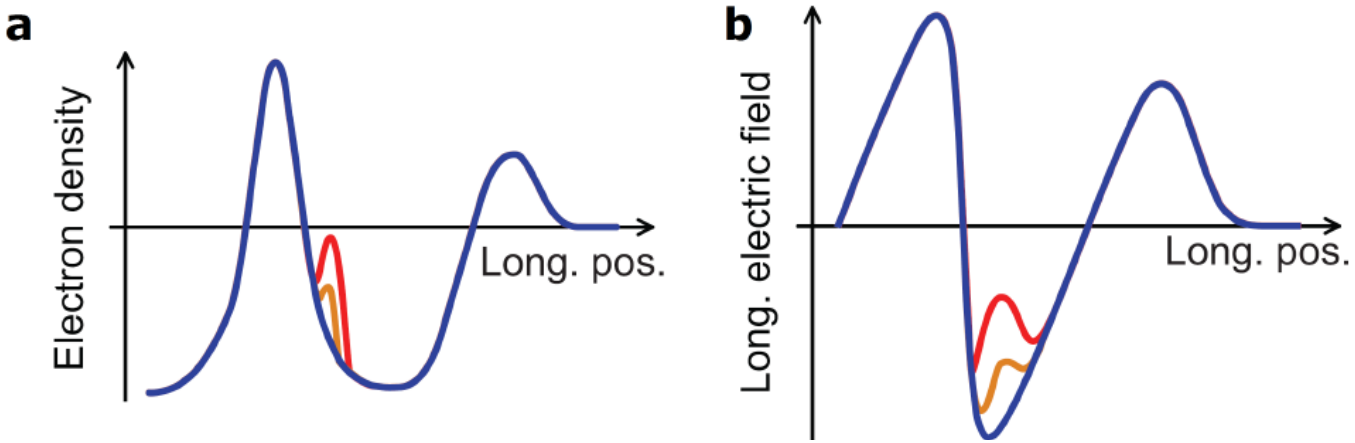


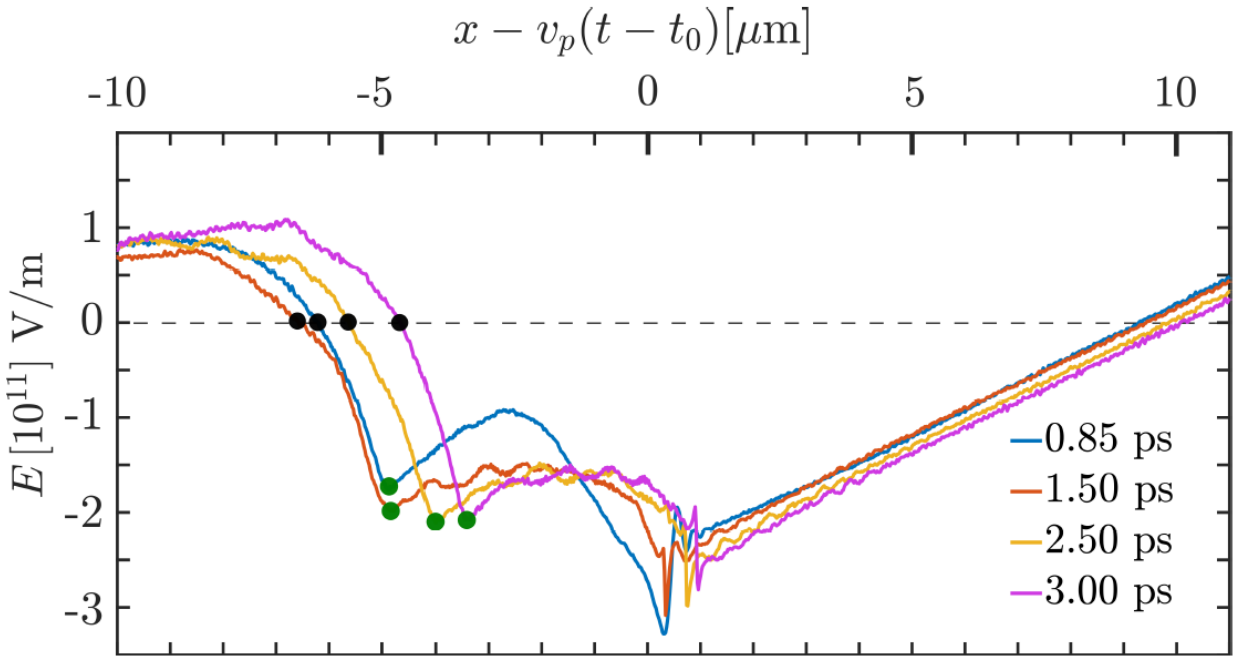




Urychlování elektronů plazmovou vlnou

- vliv zachycení svazku
  - zatížení urychlovače svazkem
  - efektivní brázdové pole svazku: 1GV/m/pC
    - může vynulovat pole bubliny
- vliv na energetický rozptyl svazku
  - podélnou i příčnou emitanci
    - emitance = objem fázového prostoru
  - ohřívání svazku

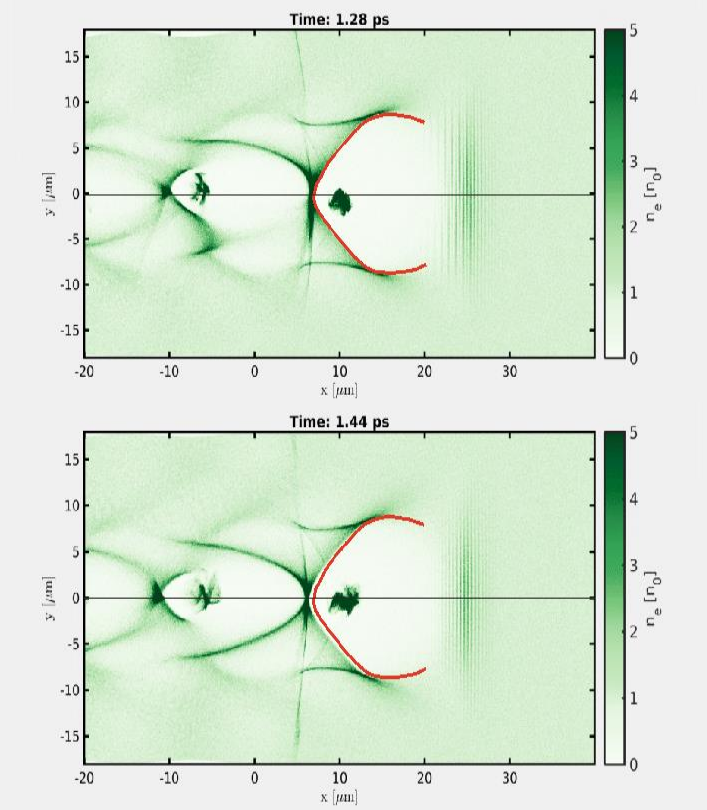




Chlazení svazků

- teplota svazku
  - z kinetické teorie plynů
  - neuspořádaný pohyb částic v klidové soustavě svazku
  - objem fázového prostoru (Liouvilleův teorém)

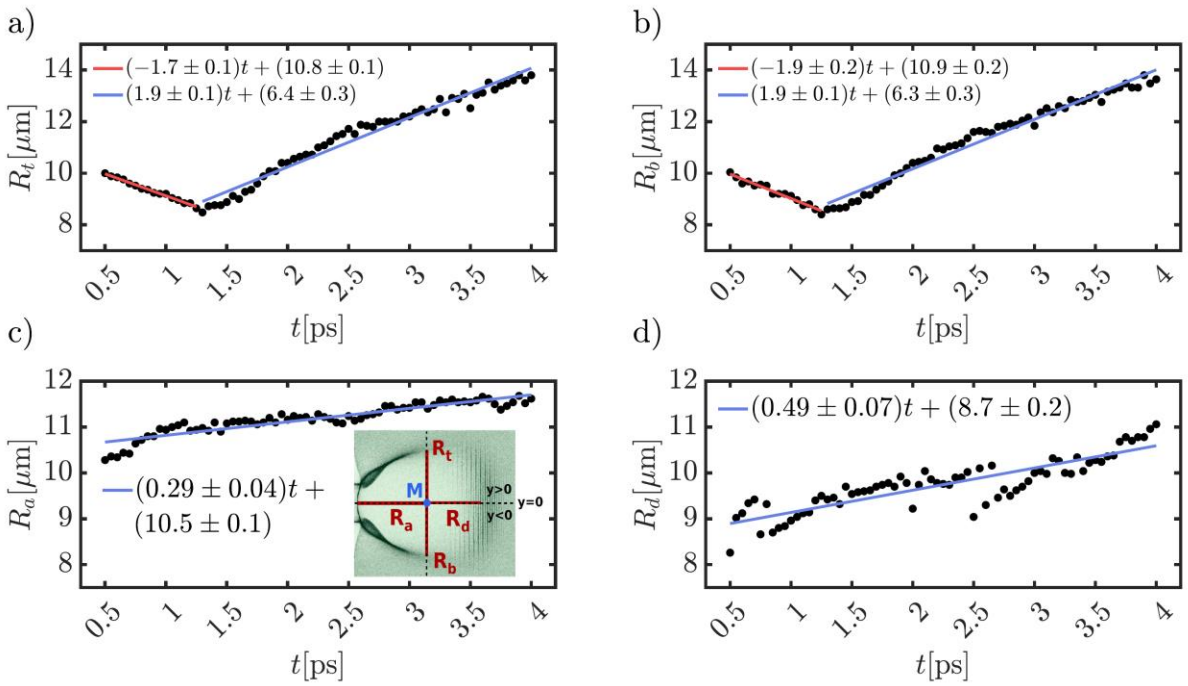
  - nenulová teplota při generaci svazku
  - nárůst teploty během urychlování:
    - prostorový náboj svazku
    - vzájemný rozptyl částic uvnitř svazku
    - interakce se zbytkovým plynem
      - srážky uvnitř plazmatu
    - vývoj bubliny
      - vliv evoluce budícího laserového impulzu
        - snížení/zvýšení ponderomotorické síly
        - eroze laserového impulzu (snížení intenzity laseru)
        - vyčerpání laseru (příliš energie přeneseno do plazmové vlny)
        - difrakce laseru



Chlazení svazků

- teplota svazku
  - z kinetické teorie plynů
  - neuspořádaný pohyb částic v klidové soustavě svazku
  - objem fázového prostoru (Liouvilleův teorém)

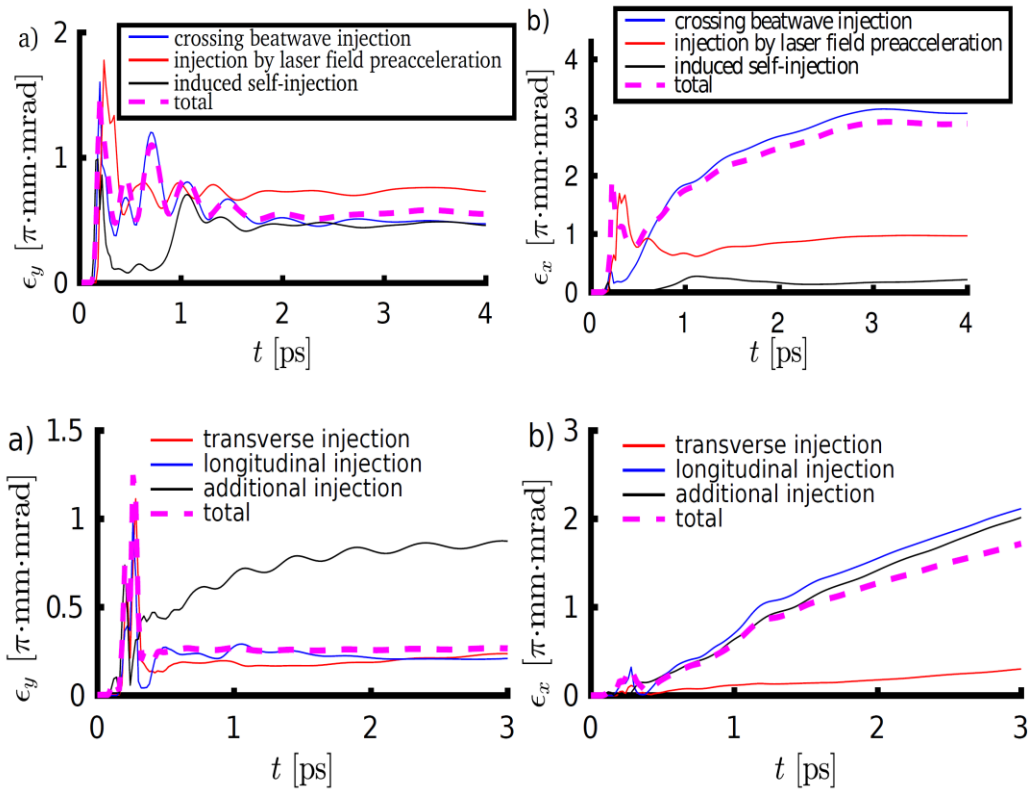
  - nenulová teplota při generaci svazku
  - nárůst teploty během urychlování:
    - prostorový náboj svazku
    - vzájemný rozptyl částic uvnitř svazku
    - interakce se zbytkovým plynem
      - srážky uvnitř plazmatu
    - vývoj bubliny
      - vliv evoluce budícího laserového impulzu
        - snížení/zvýšení ponderomotorické síly
        - eroze laserového impulzu (snížení intenzity laseru)
        - vyčerpání laseru (příliš energie přeneseno do plazmové vlny)
        - difrakce laseru



Chlazení svazků

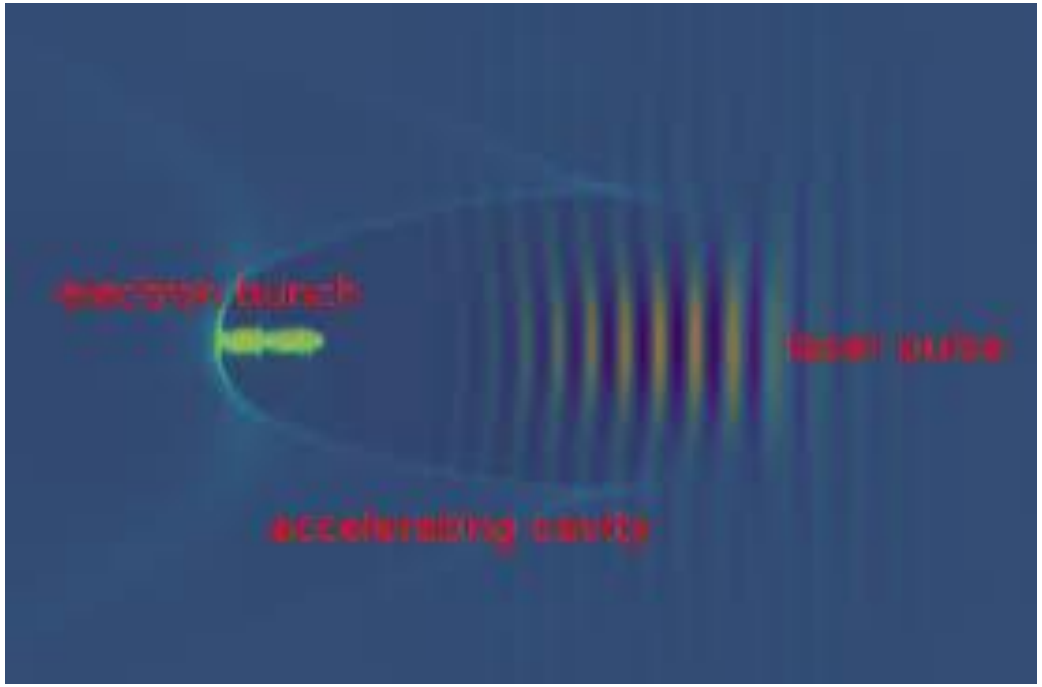
- teplota svazku
  - z kinetické teorie plynů
  - neuspořádaný pohyb částic v klidové soustavě svazku
  - objem fázového prostoru (Liouvilleův teorém)

  - nenulová teplota při generaci svazku
  - nárůst teploty během urychlování:
    - prostorový náboj svazku
    - vzájemný rozptyl částic uvnitř svazku
    - interakce se zbytkovým plynem
      - srážky uvnitř plazmatu
    - vývoj bubliny
      - vliv evoluce budícího laserového impulzu
        - snížení/zvýšení ponderomotorické síly
        - eroze laserového impulzu (snížení intenzity laseru)
        - vyčerpání laseru (příliš energie přeneseno do plazmové vlny)
        - difrakce laseru



Chlazení svazků

- interakce se zádí laserového impulzu
  - laserový impulz může vyplnit většinu bubliny
    - rozkmitává elektrony

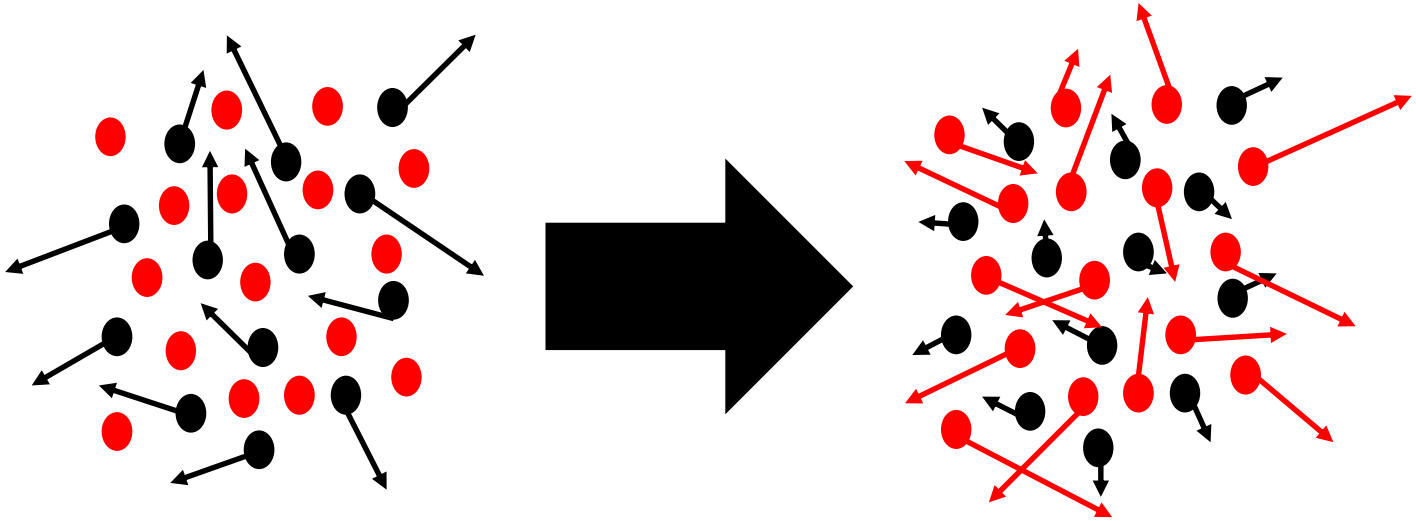


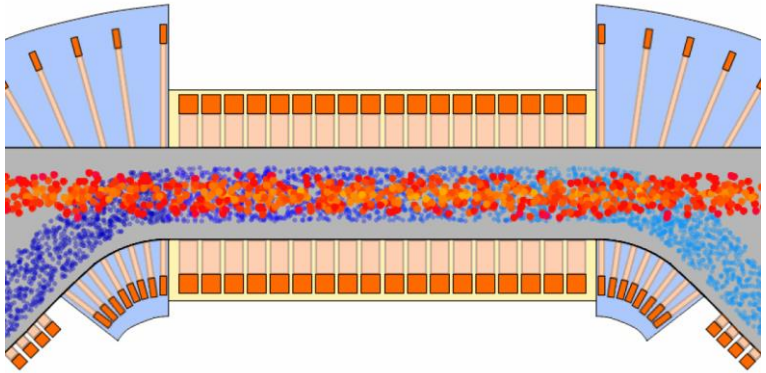
- chlazení:
  - snížení teploty = snížení objemu fázového prostoru
    - zvýšení účinnosti transportu svazku a fokusovatelnosti svazku

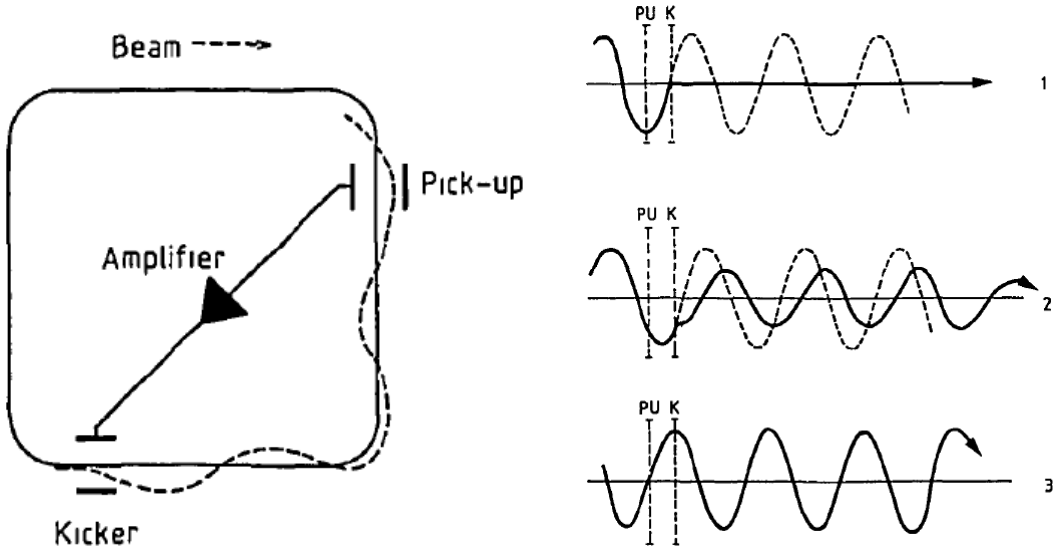
- klasicky se chladí zejména ionty a protony (antiprotony)

Chlazení svazků

- spontánní chlazení
  - u elektronů/pozitronů
  - emise synchrotronového záření
- elektronové chlazení
  - elektronový svazek s nízkou teplotou
  - výměna teploty s iontovým svazkem
- laserové chlazení
  - ionty (ne plně ionizované)
  - využívá se izotropie deexcitace iontu
- stochastické chlazení
  - statistický proces
  - efektivní pro horké svazky





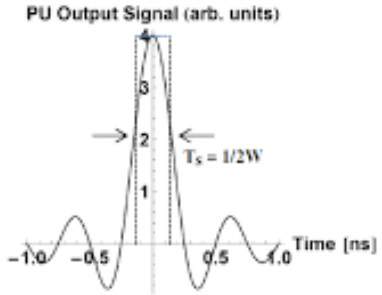


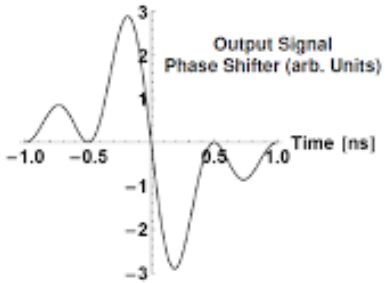
Stochastické chlazení

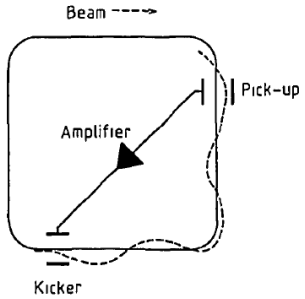
- sběrná elektroda (PICKUP)
  - šířka pásma přenášená do KICKERu
    - musí odpovídat délce a náboji svazku
      - 2 – 8 GHz (125 ps – 500 ps)
    - svazky dlouhé cca 3 ns

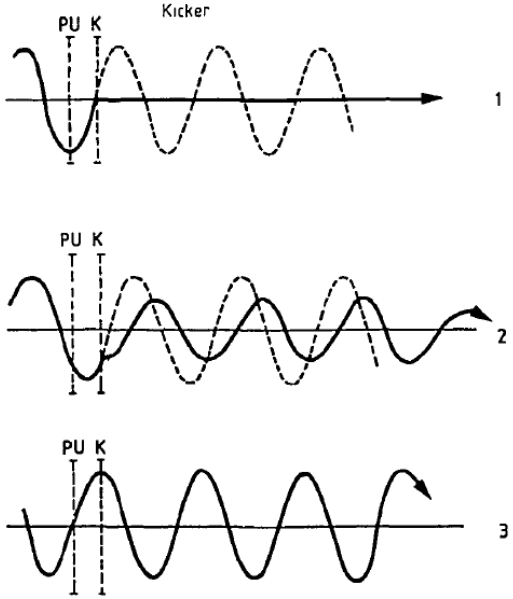
- na kruhových urychlovačích
  - doba chlazení: $\frac{1}{\tau} \approx \frac{W\sigma_s}{NC}$

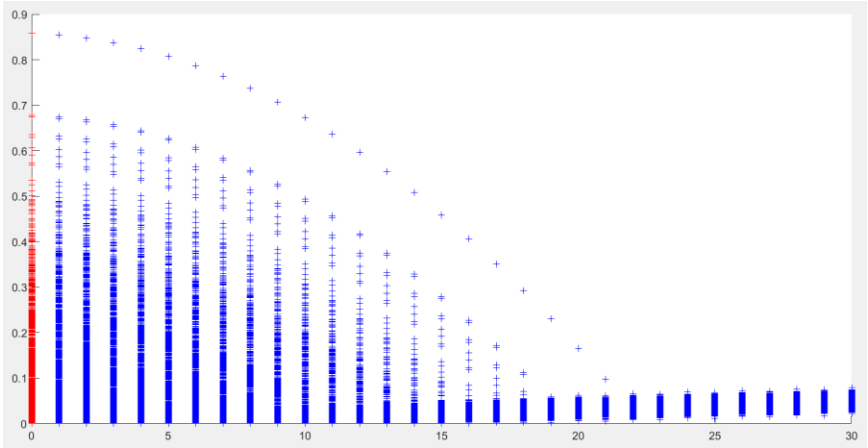
- optické vlnové délky
  - účinnější chlazení
  - širší pásmo
  - PICKUP a KICKER = undulátor
    - THz pásmo
    - vzorkování po 10 fs
  - pouze pro elektrony!

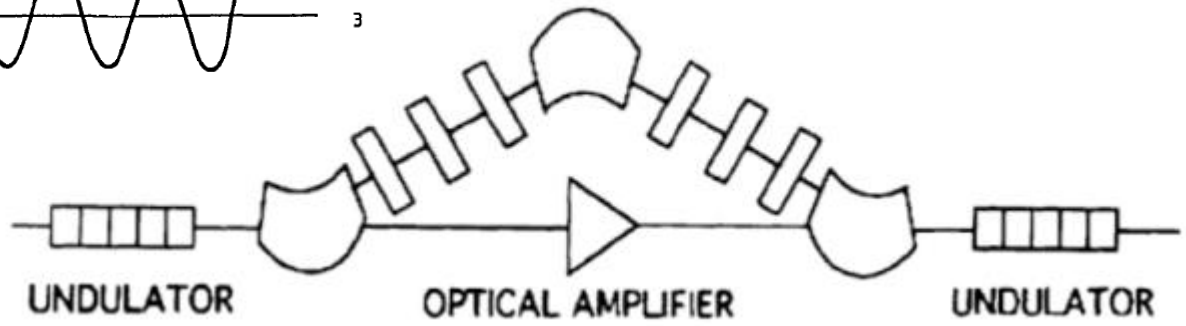






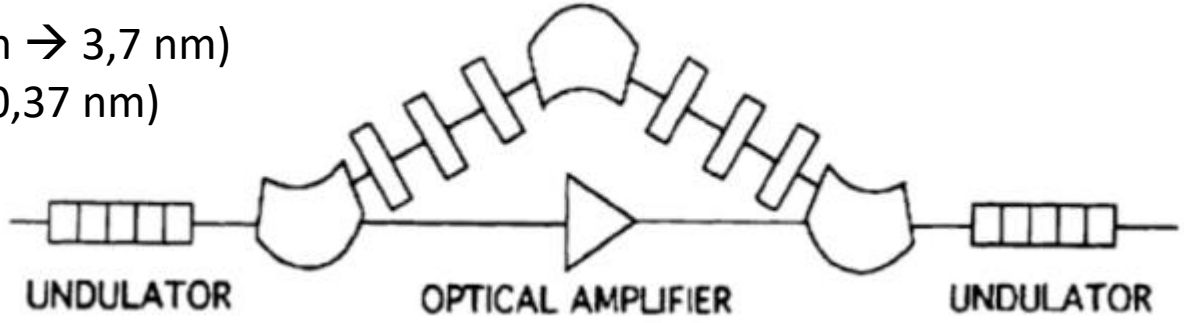






Stochastické chlazení

- femtosekundové svazky
  - šířka pásma: > 500 THz (500 nm → 370 nm, 50 nm → 3,7 nm)
    - vzorkování 5 PHz (50 nm → 37 nm, 5 nm → 0,37 nm)
  - PICKUP & KICKER → undulátor

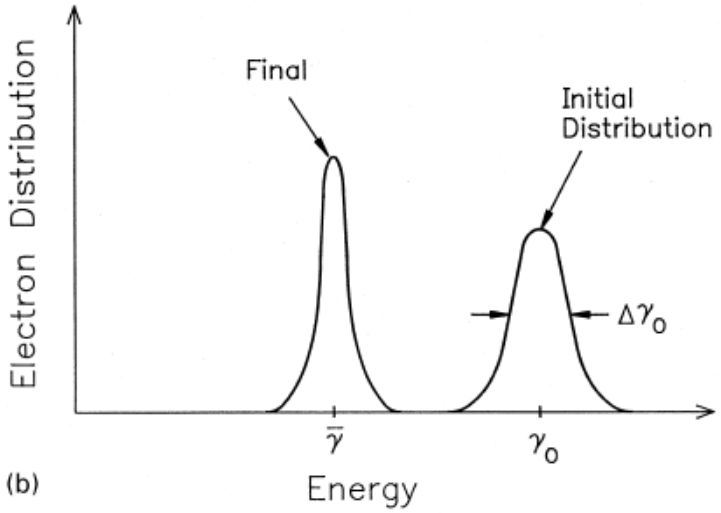
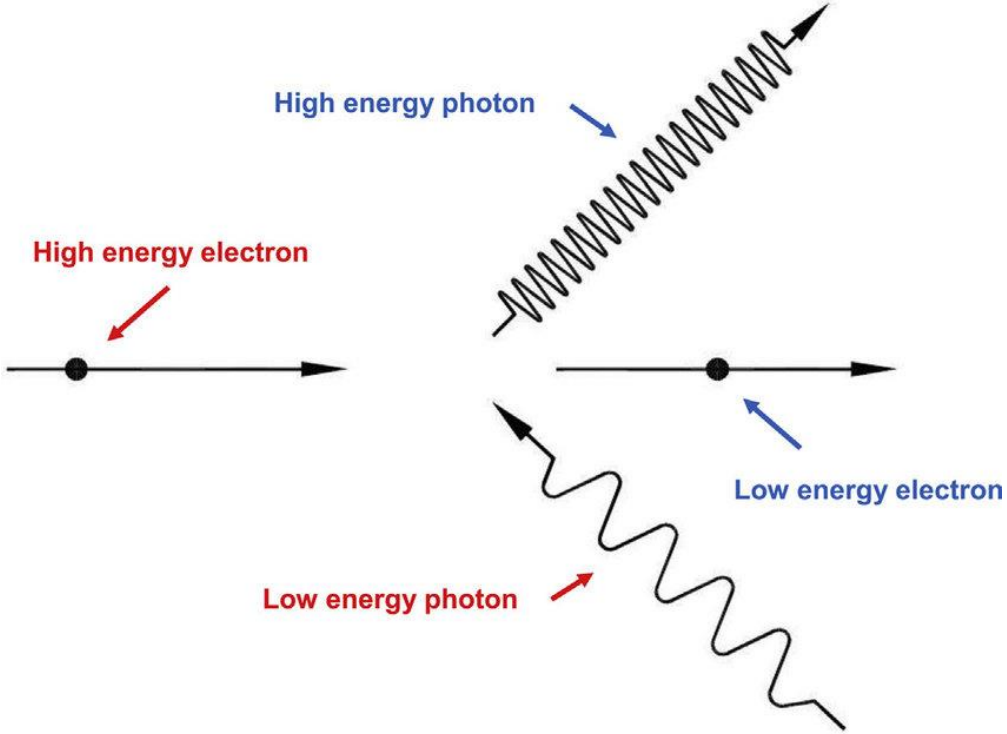


  - prakticky není možný klasický kruhový urychlovač
    - transportovatelnost svazku
      - zachování femtosekundových délek

  - lineární urychlovač
    - série několika chladících stanic
    - nutné velice účinné chlazení

  - undulátorové záření $\lambda_x = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2}(1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2\theta^2)$
    - nekoheretní
      - 5 nm → 100 MeV elektrony (pro klasické optické stochastické chlazení 10 MeV – 100 MeV)

Laserové chlazení

- není to klasické laserové chlazení iontů

- chlazení elektronových svazků
  - možné v jednom kroku
  - princip podobný klasickému elektronovému chlazení
    - výměna příčné hybnosti mezi fotony a elektrony
    - Thomsonův rozptyl
    - snížení konečné energie svazku
      - pro svazky s energií < 50 GeV
        - laser s vlnovými délkami 1 µm