

Alberto Bacci , Vittoria Petrillo ,Luca SerafiniINFM-MI Carlo Benedetti, <u>Paolo Tomassini ,</u>Giorgio Turchetti, INFN-BO Massimo Ferrario ,LNF

NUOVO SCHEMA DI ACCELERAZIONE MULTI-GEV CON LWFA IN INIEZIONE ESTERNA

Outlook

- Motivazioni per lo studio di uno schema LWFA+external inj.
- Recenti modifiche al codice Ofluid
- Scelta dei parametri
- Simulazione 1 (e-beam "reale", 3.5 μm long.)
- Simulazione 2 (e-beam riscalato , 2.5 μm long.)
- Conclusioni

Iniezione esterna: vantaggi e svantaggi (...rispetto all'autoiniezione) <u>SVANTAGGI</u>

- Lunghezza del bunch piu' elevata rispetto a all'autoiniezione -> lunghezze di accelerazione
- AD UNA MACCHINA ACCELERATRICE SI RICHIEDE FLESSIBILITA' E RIPETIBILITA' : LWFA con bunch iniettato dall'esterno può essere quindi un valido schema per la costruzione di un ACCELERATORE LWFA [c'e' pero' il problema del JITTER]

Limiti imposti dalla lunghezza del bunch

 La lunghezza (rms) del bunch / e' il parametro primario poiche' per avere un fascio ragionevolmente monocromatico (5%) e' necessario [<u>ma non sufficiente...]</u> che

λp> (30-40)/

Tuttavia il campo accelerante e' dato in prima approssimazione da

$$E_{z}[V/cm] \cong \frac{a_{0}^{2}}{\sqrt{1+a_{0}^{2}}} \sqrt{n_{e}[cm^{-3}]}$$

e scala come (1/λ_p) quindi a parita' di lunghezza di accelerazione e intensita' del laser <u>l'energia raggiunta e'</u> inversamente proporzionale alla lunghezza del bunch.

Compressione del bunch?

- E' stata testata in modo intensivo la possibilita' di comprimere longitudinalmente il bunch con l'onda di plasma PRIMA della fase di accelerazione [P. Tomassini et al., 2005]
- Con le specifiche attuali dell'iniettore <u>NON e'</u> <u>pero' possibile implementare questo</u> <u>schema</u> perche' l'energia del bunch e' troppo elevata [occorre E<10MeV]

Il bunch iniettato

- Sono stati valutati svariati bunches con energie e lunghezze diverse. Con il limite di corrente a 1KA ci siamo concentrati su due bunches ultracorti
- Lunghezza /=3.5-2.5micron rms
- Carica 20-13pC.

- Emittanza trasversa normalizzata o.6mm.mrad in entrambe le direzioni trasverse
- Energia 150MeV

Il codice di simulazione

- Non e' al momento possibile eseguire simulazioni PIC2D (e tanto meno 3D) a causa della lunghezza di accelerazione della scala di una decina di centimetri [simulazioni del genere impiegano mesi con migliaia di CPU]
- Nel sistema di coordinate [ξ=k₀(z-ct), ζ=k₀r] l'evoluzione spazio-temporale del plasma e del bunch e' <u>quasistatica</u>, e' quindi possibile risolvere le equazioni di campo e del moto delle particelle nella QSA
- Le simulazioni sono state eseguite con il codice Ofluid2 [P.Tomassini,2005-2009]



- QSA FLUIDO nel sistema di coordinate
 [ξ=k₀(z-ct), ζ=k₀r]
- 2D CILINDRICO
- Nonlineare

- Veloce (gira su un portatile) e accurato
- Testato con ALaDyn in regime LWFA+self-inj
- <u>Ofluid->QFluid2 Inserito il modulo di</u> <u>evoluzione autoconsistente dell'impulso</u>.



- In QFluid1 l'impulso aveva una dinamica preimpostata -> in QFluid2 il laser evolve in modo <u>autoconsistente</u> in QSA
- Sono risolte le eq. di Maxwell per la componente "veloce" centrata sulla <u>prima armonica</u> del campo E.M. includendo gli effetti nonlineari (nonlinear steepening, self focusing, self-modulation...) e l'erosione dell'impulso
- E' in fase di implementazione il modulo che determina la ionizzazione del gas durante il passaggio dell'impulso

Goals delle simulazioni

- Miglior compromesso tra qualita' del fascio e energia
- Si accetta un energy spread del 2% rms e un'emittanza normalizzata inferiore a 1 mm.mrad
- Energia sopra i 2 GeV

 Con la lunghezza del bunch di 3.5micron rms la lunghezza d'onda di plasma deve essere piu' grande di 110 micron.

Questo fissa la densita' massima del plasma in

$$n_0 = (1.1 \cdot 10^{21} / \lambda_p^2) cm^{-3} \approx 1 \cdot 10^{17} cm^{-3}$$

Rationale della scelta dei



Rationale della scelta dei



a

- Il profilo di densita' trasverso deve essere a canale per guidare l'impulso laser e compensare l'effetto defocalizzante della diffrazione con quello focalizzante di una lente positiva
- Dalla teoria dell'evoluzione delle funzioni di inviluppo il *matching* perfetto si ottiene per un profilo di densita' parabolico con

$$n = n_0 \left(1 + \frac{\Delta n}{n_0} \frac{r^2}{w^2} \right); \quad \frac{\Delta n}{n_0} = \frac{4}{(k_p w)^2}$$

 Assumeremo che il guiding avvenga per 10-20cm [WP Leemans eta al. Nature Physics (2006)

- Le dimensioni trasverse del bunch devono essere accuratamente regolate in modo da minimizzare le oscillazioni sotto l'azione delle forze focalizzanti che aumentano considerevolmente l'emittanza per effetti nonlineari
- Purtroppo le dimensioni trasverse del matched beam per i parametri in esame sono di circa 1 micron, ben al di sotto dei 3-6 micron minimi del bunch iniettato.



 Per risolvere il problema <u>si inietta il beam nel</u> <u>plasma quando l'impulso laser non e' ancora</u> <u>focalizzato completamente</u>. Le crescenti forze focalizzanti comprimono adiabaticamente il bunch fino alle dimensioni trasverse ottimali





 Effetti di dephasing. La lunghezza di dephasing e' stimabile come

$$L_d \approx \frac{1}{2} \lambda_p \gamma_p^2 \approx 0.5m$$

Il dephasing *non* e' dunque dominante per lunghezze di accelerazione <(10-15)cm

> Il limite all'energia raggiungibile e' dato dall'effettiva possibilita' di guidare l'impulso e dalla sua dinamica nonlineare

- E' necessario tuttavia compensare lo scivolamento di fase dovuto all'aumento di λ_p durante la fase di iniezione adiabatica causato dagli effetti nonlineari
- Possiamo avvalerci del controllo della velocita' di fase dell'onda di plasma tramite scelta del profilo longitudinale di densita' per minimizzare l'energy spread del bunch

- La dinamica dell'impulso laser, tuttavia, impone un limite alla lunghezza di accelerazione efficace..
- L'impulso ha una potenza inferiore (ma comunque vicina) a quella critica per il selffocusing,

$$P_c[TW] \cong 1.7 \cdot 10^{-2} \left(\frac{\lambda_p}{\lambda_0}\right)^2 \approx 400TW$$

Come vedremo in seguito **la pump-depletion** comincia a farsi sentire dai 10-15 cm in poi.

 Il controllo della velocita' di fase dell'onda si ottiene profilando adeguatamente la densita' del plasma



RISULTATI



- SIMULAZIONE 1: Bunch iniettato "reale" simulato da Alberto Bacci utilizzando ASTRA in accoppiamento con un codice genetico per l'ottimizzazione dei parametri.
- SIMULAZIONE 2: Bunch ottenuto dal precedente scalando le dimensioni longitudinali e la carica di un fattore 1/1.5 [E' IN CORSO UN NUOVO RUN DI OTTIMIZZZAZIONE DEI PARAMETRI PER OTTENERE UN BUNCH "REALE" DI LUNGHEZZA 2-2.5 µm]

PARAMETRI della SIMULAZIONE1

 <u>Bunch "reale"</u>: 2opC, 150MeV, 0.6 mm.mrad, 3.0 μm rms trasversi, 3.5 μm rms longitudinali [circa



Simulazione 1





Simulazione 1





Simulazione 1 Envelope





Simulazione 1/2: Evoluzione





Simulazione 1/2 Evoluzione dell'impulso



- Il guiding con il profilo di densita' trasverso fornito dalla teoria lineare e' perfetto (hopping trascurabile).
- Il self-focusing e' trascurabile.

- La pump-depletion e' del 10% su 16cm [in accordo con le stime analitiche]
- E' presente un forte steepening che aumenta sensibilmente l'intensita' nella fase finale dell'accelerazione.



Simulazione 1 slice analysis



Slice thickness 400nm





Simulazione 1 slice analysis <



PARAMETRI della SIMULAZIONE2

- Bunch "Riscalato": 13pC, 15oMeV, 0.6 mm.mrad, 3.0 μm rms trasversi, 2.4 μm rms longitudinali [circa 1KA di corrente di picco]
- Laser: 7J in 35fs, w₀=32.5 μm, w_{0_inj}=135 μm, guidato su 30 ZR.
- Plasma: Profilo di densita' crescente tra o.6 e17 cm⁻³ e o.8e17 cm⁻³, "tapered channel" per il guiding dell'impulso. Lunghezza di accelerazione circa 15cm.
- <u>Numerica</u>: Window mobile a v=c, campionamento a 46punti/ λ_p e 26 punti/w. Bunch campionato con 40000 particelle

Simulazione 2







Simulazione 2 Envelope







Simulazione 2 Slice analysis

Fluid





Simulazione 2 slice analysis



Conclusioni

- L'upgrade di Qfluid (modulo di evoluzione dell'impulso laser) ha reso completamente autoconsistente il codice all'interno della validita' dell'approssimazione quasistatica in 2D-cilindrico.
- L'accelerazione FWFA+ext.inj puo' essere utilizzata con successo per accelerare bunches sopra i 2GeV preservando l'emittanza e accettando un energy spread globale inferiore all' 1-2% rms
- Dalla slice analysis emerge che il bunch ha delle ottime qualita' sulla scala sub-microscopica [X FEL?]
- Lo schema sperimentale e' meno "challenging" di quanto ci si aspettava pochi mesi fa [e-bunch iniettato generabile con le specifiche di SPARC, canale di plasma pochissimo taperato].
- Il jitter di fase e-bunch/laser sembra essere il fattore limitante nella riproducibilita' dei risultati [analisi statistica del jitter in corso]







n₀ = 151e15 1/cm³, Pos: 0 $10^2 \,\mu$ m, σ_z:2.51 μ m



n₀ = 151e15 1/cm³, Pos: 0 $10^2 \,\mu$ m, σ_z:2.51 μ m



 $n_0 = 151e15 \ 1/cm^3$, Pos: $0 \ 10^2 \ \mu m$, σ_z :2.51 μm





- Con una degradazione della qualita' globale del fascio fino a 5% il jitter accettabile e' +-20fs
- Accettando una degradazione fino a 10-13% il jitter sale a +-30fs