

# **3<sup>o</sup> Convegno Nazionale “La Fisica del Plasma in Italia”**

L'AQUILA, 20-22 MAGGIO 2002

## **Approcci PIC nelle simulazioni per laser plasmi**

T.LISSEIKINA, A. MACCHI

*Dipartimento di Fisica, Universita' di Pisa*

## Simulazioni PIC per laser-plasmi

$E = |\vec{E}|$  - ampiezza del campo elettrico dell'impulso,  $\omega$  - frequenza

$$v_e \sim c \iff a_e = \frac{eE}{m_e \omega c} \approx 1$$

$\lambda = 1 \mu m$ , plasma di idrogeno

$$a_e \sim 1 \iff I \sim 2 \cdot 10^{19} \text{ W/cm}^2$$

Per un ione

$$a_i = eE / (m_i \omega c) \sim 1 \iff I \sim 7 \cdot 10^{24} \text{ W/cm}^2$$

Nei plasmi:

$$v_i \sim 1 \iff a_h \equiv \frac{eE}{\sqrt{m_e m_i} \omega c} \equiv \sqrt{\frac{m_e}{m_i}} a_e \sim 1 \iff I \sim 3.6 \cdot 10^{21} \text{ W/cm}^2$$

Impulsi laser brevi e  $a_e \sim 1 \implies$  codice relativistico, ioni immobili

*generazione di "wake field", accelerazione degli elettroni e generazione di "solitoni" nella scia dell' impulso laser, "transverse wake wave breaking", l'auto focalizzazione dell'impulso laser, instabilita' superficiali ..*

Impulsi lunghi o  $a_e \gg 1 \implies$  codice relativistico, ioni mobili

*depletion dell'impulso laser, accelerazione degli ioni ad energie relativistiche..*

## Codice PIC

Il sistema di equazioni Vlasov-Maxwell per un plasma non collisionale:

$$\left. \begin{aligned} \frac{df_\alpha}{dt} &= \frac{\partial f_\alpha}{\partial t} + \vec{v} \cdot \frac{\partial f_\alpha}{\partial \vec{r}} + \vec{F}_\alpha \cdot \frac{\partial f_\alpha}{\partial \vec{p}} = 0 \\ \vec{F}_\alpha &= q_\alpha \cdot \left( \vec{E} + \frac{1}{c} \vec{v} \times \vec{B} \right) \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \frac{d\vec{p}_j}{dt} &= \vec{F}(\vec{r}_j) \\ \frac{d\vec{r}_j}{dt} &= \vec{p}_j / \gamma_j \end{aligned}$$

$\vec{j}, \rho$  - sorgenti per equazioni di Maxwell accoppiate.

• Maxwell solver locale  $\equiv$  FDTD method

$$(\vec{E}^{n+1} - \vec{E}^n) / \tau = \nabla^+ \times \vec{B}^{n+\frac{1}{2}} - \vec{J}^{n+\frac{1}{2}}$$

$$(\vec{B}^{n+\frac{1}{2}} - \vec{B}^{n-\frac{1}{2}}) / \tau = -\nabla^- \times \vec{E}^n$$

$$\nabla^+ \cdot \vec{E}^n = \rho^n \iff (\rho^{n+1} - \rho^n) / \tau + \nabla^+ \cdot \vec{J}^{n+\frac{1}{2}} = 0$$

$$\nabla^- \cdot \vec{B}^{n+\frac{1}{2}} = 0$$

Proprieta' del codice:

• Conservazione di massa e carica

• Buona conservazione di energia e di momento

• Equazione di continuita' soddisfatta (!)

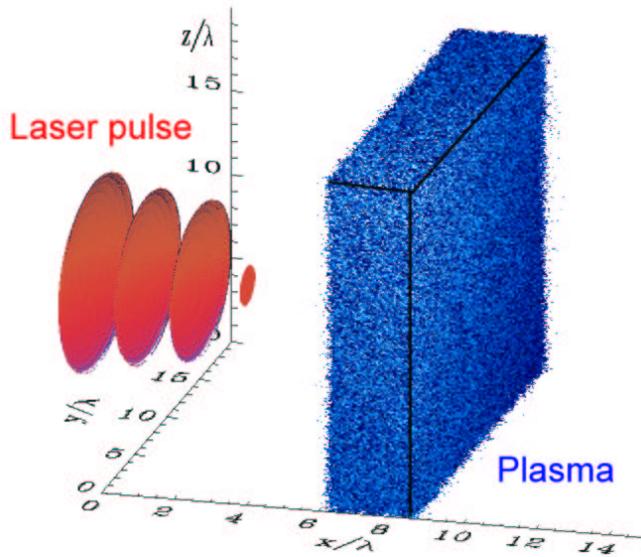
• Lo schema "leap-frog" per equazioni di Newton-Lorentz

$$(\vec{u}^{n+\frac{1}{2}} - \vec{u}^{n-\frac{1}{2}}) / \tau = \frac{q}{m} [\vec{E}^n(\vec{r}^n) + \vec{u}^n / \gamma^n \times \vec{B}^n(\vec{r}^n)]$$

$$(\vec{r}^{n+1} - \vec{r}^n) / \tau = \vec{u}^{n+\frac{1}{2}} / \gamma^{n+\frac{1}{2}}$$

*J. Villasenor, O. Buneman, Comp.Phys.Comm (69,306),(1992)*

*T. Zh. Esirkepov, Comp.Phys.Comm (135,144),(2001)*



## Parallelizzazione

Geometria semplice cartesiana,  
Griglia spaziale rettangolare 2D o 3D

==>

Parallelizzazione “tradizionale”:

- partizione della griglia spaziale in domini rettangolari identici
- assegnazione di ogni dominio ad un processore
- minimizzazione delle comunicazioni fra processori
- **load balancing ???**

*J.W.Eastwood et al, Comp. Phys. Comm (87,155), (1995)*

*V.Vshivkov et al, Program. Comput. Software (23,87),(1997)*

### Esempi:

*2D3V* codice, ioni mobili.

$2000 \times 800 = 1.6 \cdot 10^6$  punti (griglia spaziale *2D*)

$4.1 \cdot 10^7$  particelle (16 + 16 particelle per una cella)

*3D3V* codice, ioni mobili.

$300 \times 300 \times 400 = 3.6 \cdot 10^6$  punti (griglia spaziale)

$6.4 \cdot 10^7$  particelle (8 + 8 particelle per cella)

10 ore di calcolo su 32 processori di CRAY T3E

~ 20 Gbt di memoria

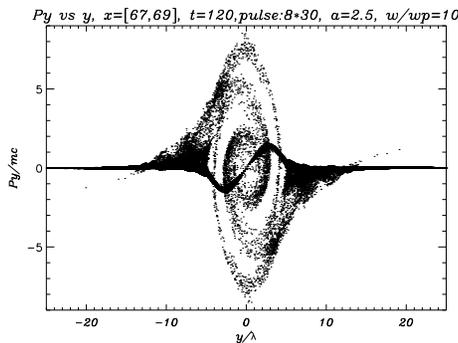
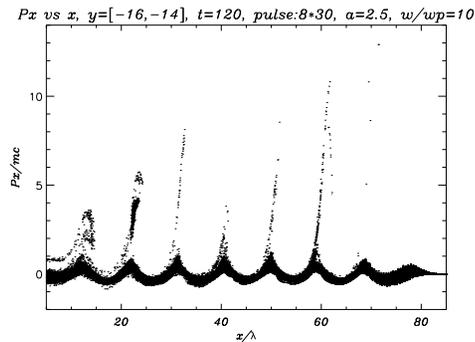
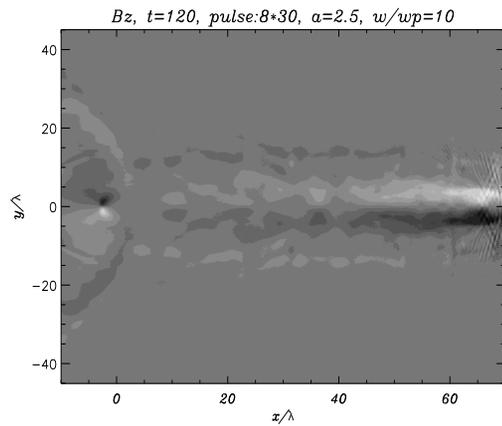
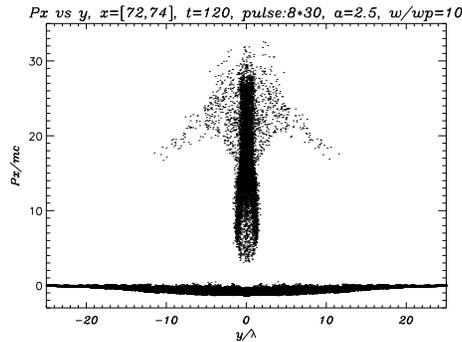
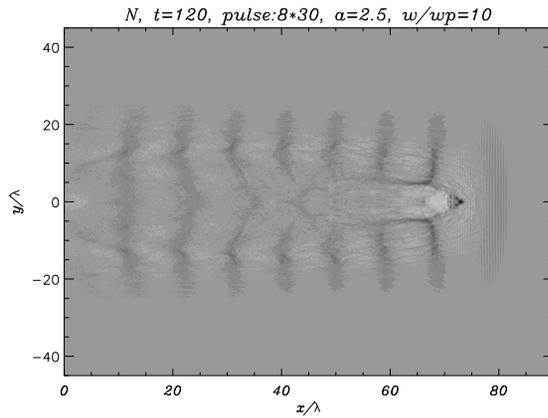
# Interazione di un impulso laser di intensita' moderata con plasmi sottodensi(2D)

Codice 2D3V, ioni immobili

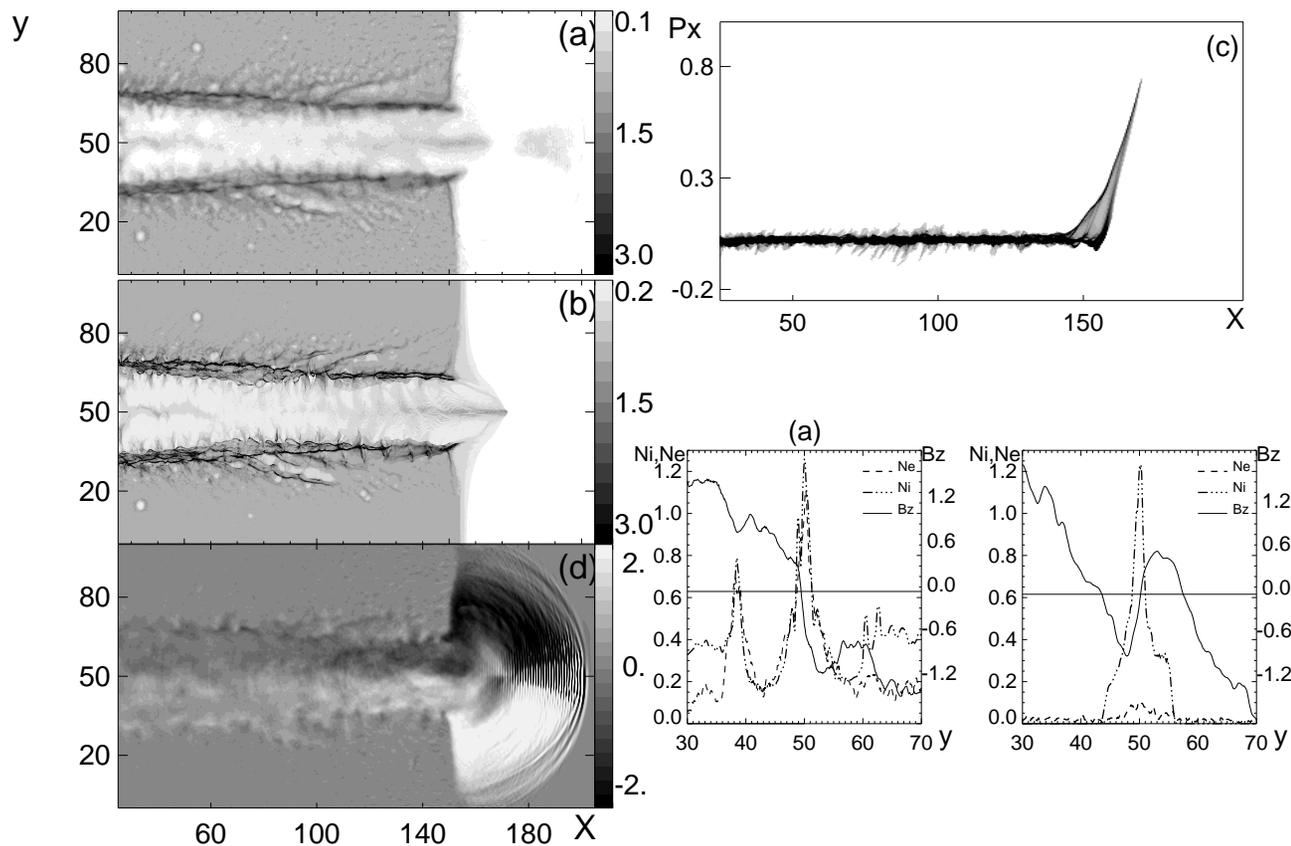
Generazione di strutture di piccola scala, transverse wake wave breaking, accelerazione degli elettroni nella scia dell'impulso laser

*T.Liseikina et al*

*PRE (60,5991) (1999)*



## Interazione di un impulso laser super intenso con plasmi sottodensi (2D)



Codice 2D3V, ioni mobili

Formazione di canale in plasma,  
l'autofocalizzazione dell'impulso,  
generazione di "solitoni" nella  
scia dell'impulso, accelerazione  
degli ioni ad energie relativis-  
tiche, collimazione di ioni ac-  
celerati

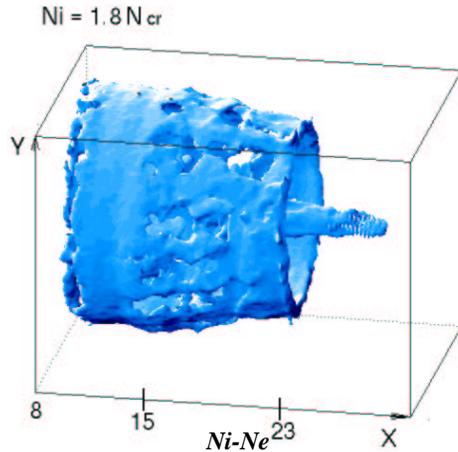
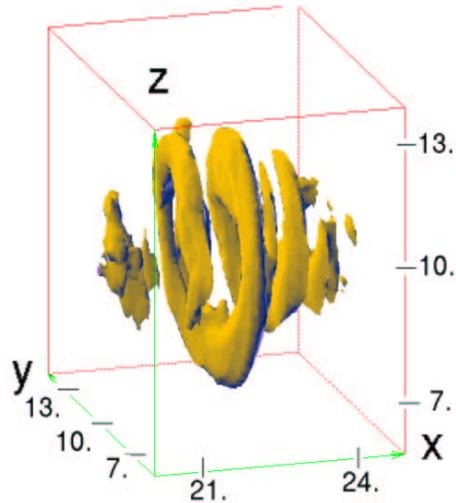
*F.Pegoraro et al.*

*IEEE Trans. Plasma Sci. (2000)*

*Y.Sentoku et al.*

*PRE (62,7271) (2000)*

# Interazione di un impulso laser super intenso con plasmi sottodensi (3D)

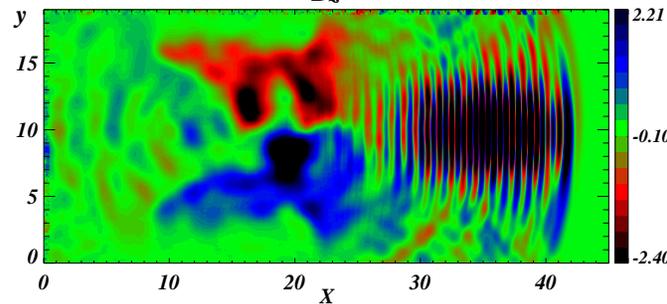
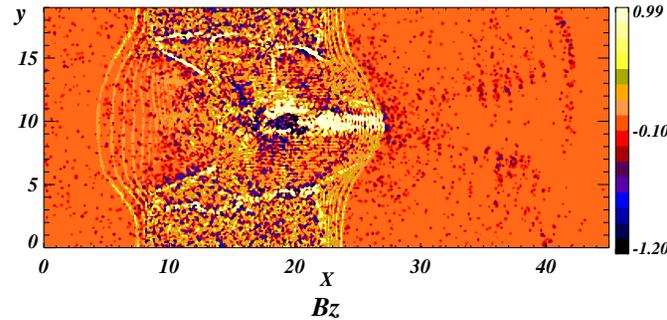
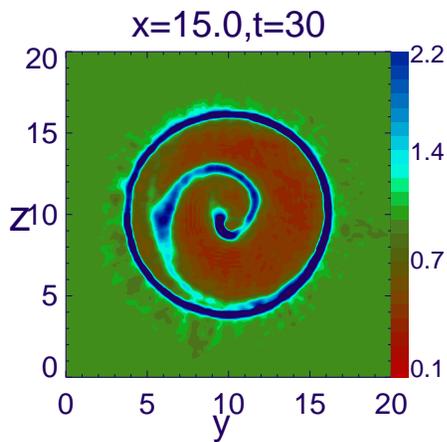


Codice 3D3V

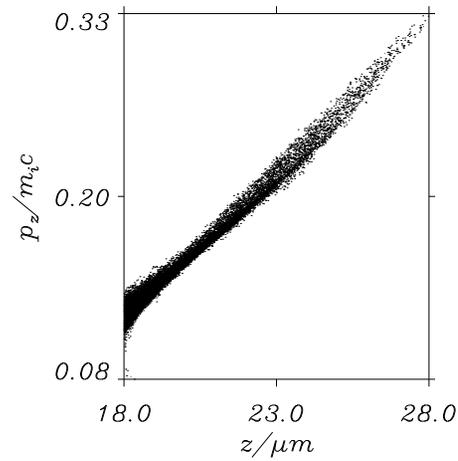
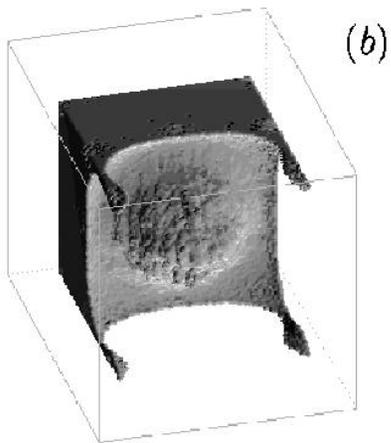
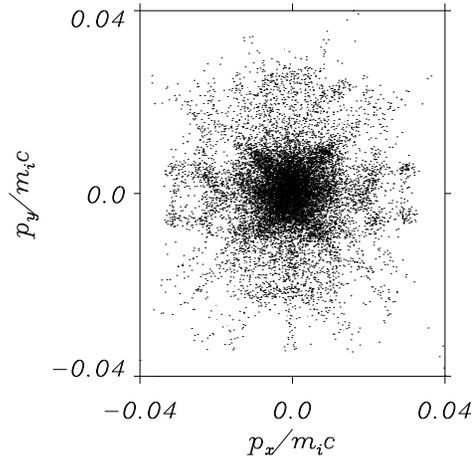
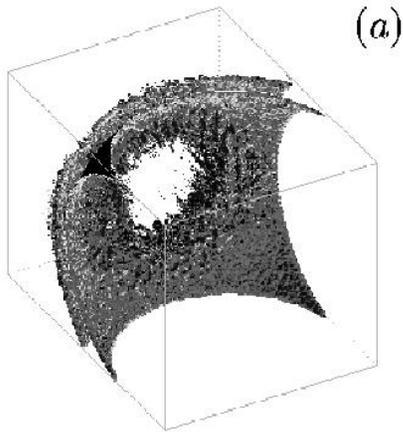
L'auto modulazione dell'impulso laser, formazione di canale, filamentazione della densità, generazione di fascio di ioni accelerati

*F.Pegoraro et al.*

*IEEE Trans. Plasma Sci. (2000)*



# Interazione di un impulso laser super intenso con un bersaglio sferico (3D)



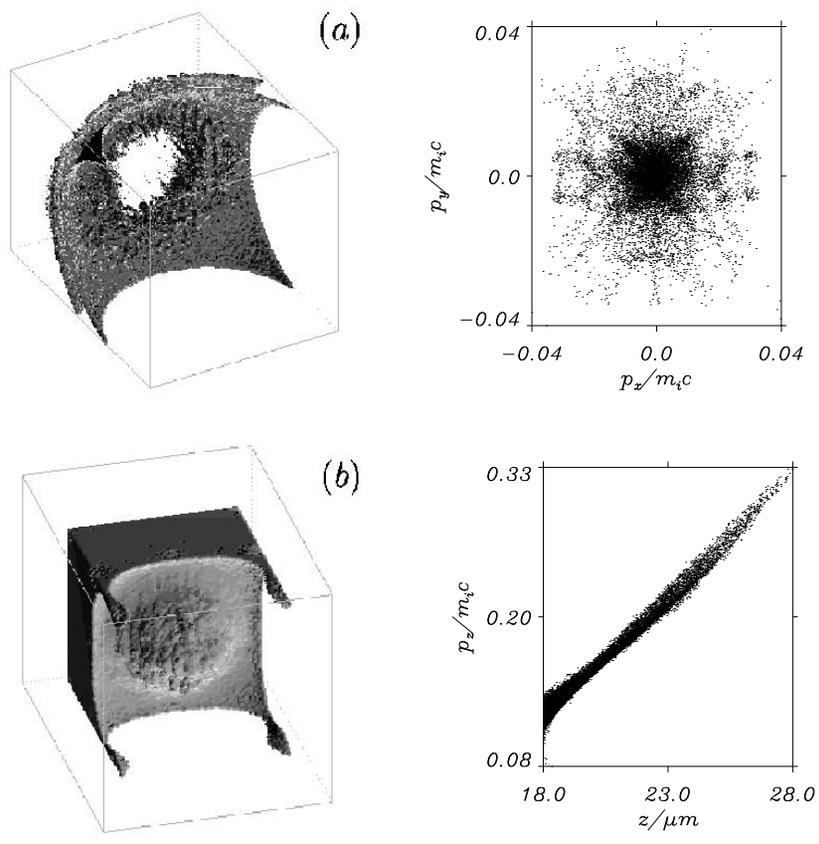
Codice 3D3V, ioni mobili

Scegliendo in modo appropriato la forma del bersaglio si ottiene una effettiva accelerazione di ioni e la collimazione di fascio di ioni nella zona del centro geometrico del bersaglio stesso

*H.Ruhl et al.*

*Plasma Physics Reports (27,363)*  
*(2001)*

# Interazione di un impulso laser super intenso con un slab di plasma sovradensità e con un bersaglio sferico (3D)

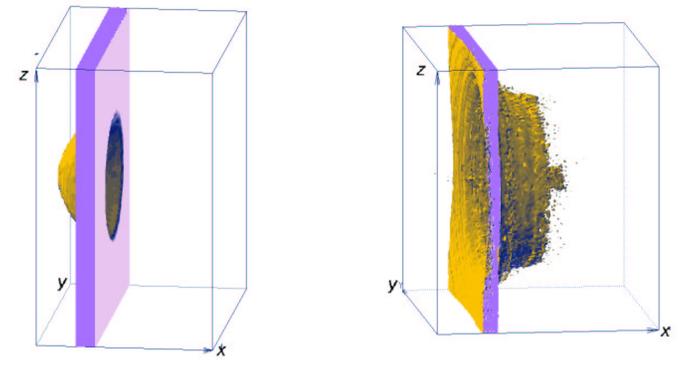


Codice 3D3V, ioni mobili

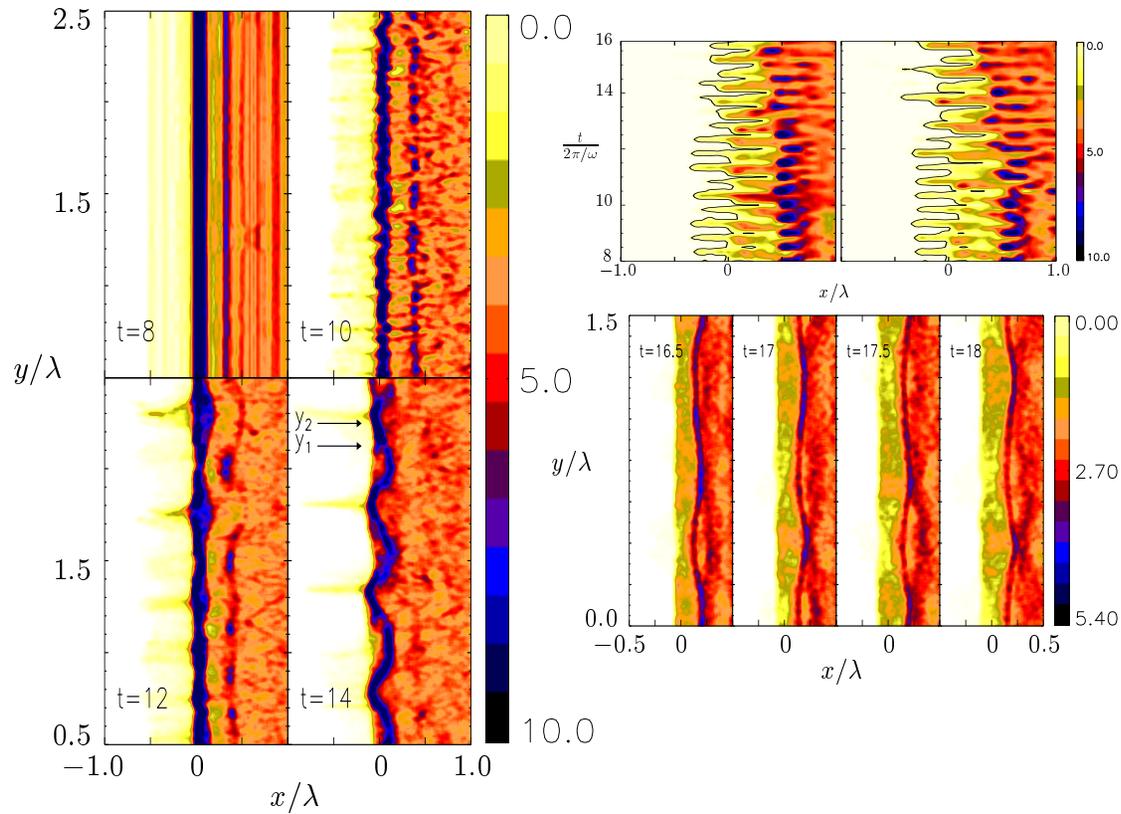
Scegliendo in modo appropriato la forma del bersaglio si ottiene una effettiva accelerazione di ioni e la collimazione di fascio di ioni nella zona del centro geometrico del bersaglio stesso

*H.Ruhl et al.*

*Plasma Physics Reports (27,363) (2001)*



## Interazione di un impulso laser intenso con plasmi sovradensi (2D)



Codice 2D3V, ioni immobili.

Instabilita' parametriche superficiali.

*A.Macchi et al. PRL (87) (2001)*

**vedi il poster di A.Macchi**