

Introduzione ai Plasmi Relativistici

Andrea Macchi

CNR/INO, Pisa

Dipartimento di Fisica "Enrico Fermi", Università di Pisa

www.df.unipi.it/~macchi/



A.A. 2010/11

Definizione e contesto

PLASMA: sistema a **molti corpi** (carichi)
in **interazione** (elettromagnetica) con campi esterni e autogenerati
dominato da **effetti collettivi** (descrizione di campo medio)

-- *RELATIVISTICO*: almeno una frazione significativa delle particelle
(tipicamente gli elettroni) ha energie dell'ordine di, o superiori
all'energia a riposo: $\mathbf{p}^2 \gtrsim m^2 c^2$

IN QUESTO CORSO: plasmi **classici**
(**no** plasmi degeneri, QED, quark-gluon plasma, ...)
peculiarità: sistema relativistico macroscopico

-- *PRINCIPALMENTE*: plasmi in interazione con
impulsi laser superintensi
peculiarità: sistema “**macroscopico**” **relativistico** di **laboratorio**

24 secoli di interazione luce-materia ad alta intensità...

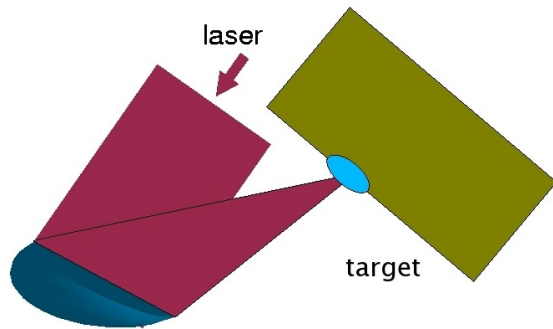


Archimede, III secolo A.C. (?)



Leonardo Da Vinci, XVI secolo D.C.

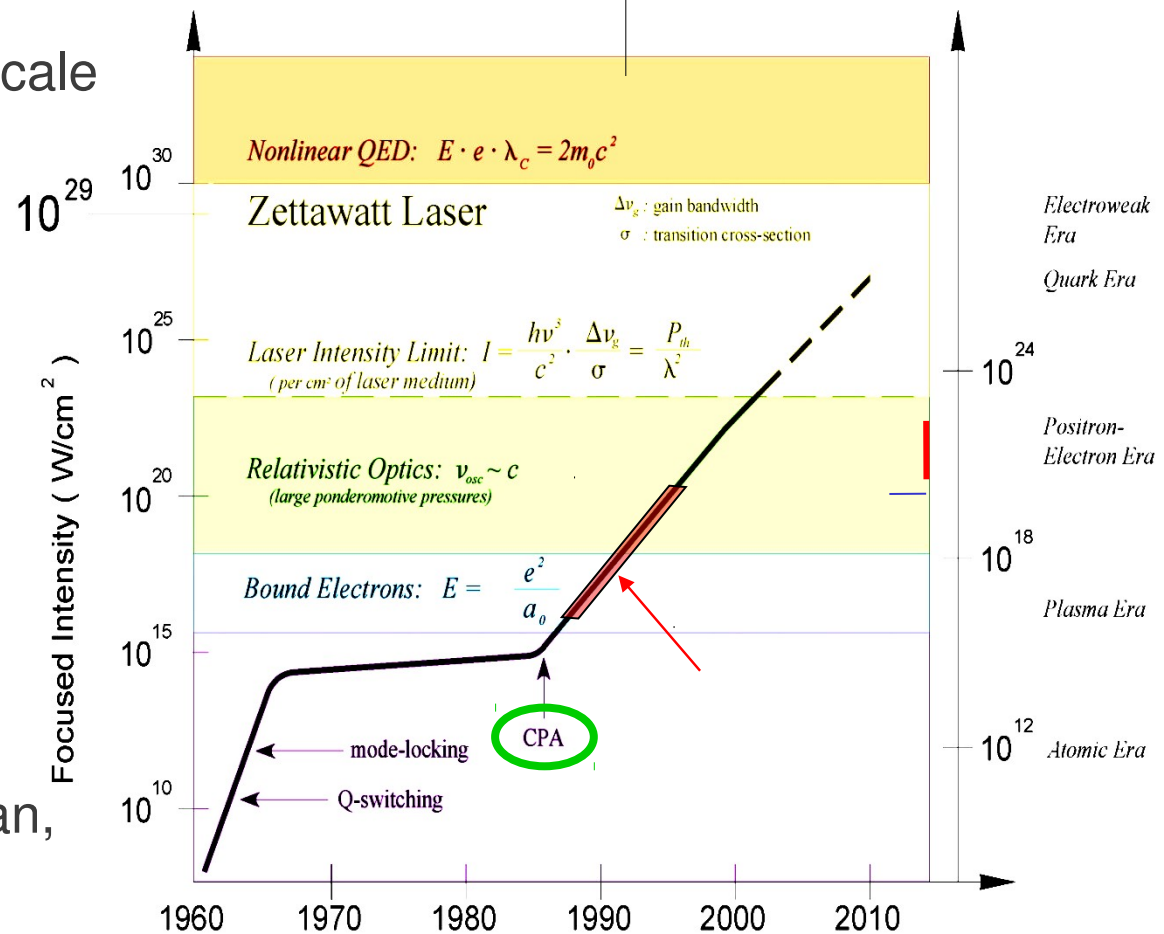
Progresso dell'intensità nello spot focale
(XX - XXI secolo D.C.)



Record attuale:

$$\sim 2 \times 10^{22} \text{ W/cm}^2$$

(Yanovsky et al, University of Michigan, Optics Express **16** (2008) 2109)



Dominio relativistico

$$m_e \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -e\mathbf{E}e^{ikx-i\omega t} + \text{c.c.}$$

$$\mathbf{v} = -i \frac{e}{m_e \omega} \mathbf{E} e^{ikx-i\omega t} + \text{c.c.}$$

$$\mathbf{J} = -en_e \mathbf{v} \propto \mathbf{E} e^{ikx-i\omega t} + \text{c.c.}$$

$$\frac{v}{c} = \frac{eE_0}{m_e \omega c} \equiv a_0, \quad E_0 \ll \frac{m_e \omega c}{e}$$

$$a_0 \ll 1$$

- risposta **lineare** dei mezzi

- effetti della forza magnetica magnetica **trascurabili**

$$a_0 = 0.85 \left(\frac{I \lambda^2}{10^{18} \text{ W cm}^{-2} \mu\text{m}^2} \right)^{1/2}$$

$$a_0 \gg 1$$

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = -e\mathbf{E}e^{ikx-i\omega t} + \text{c.c.}$$

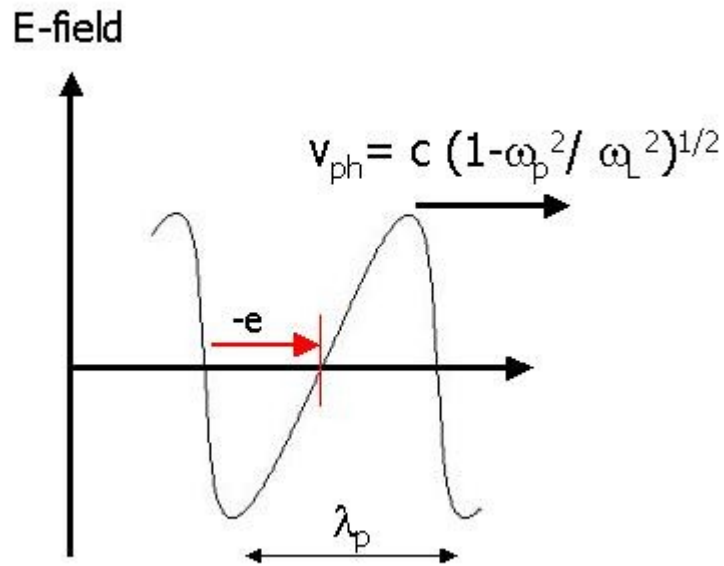
$$\mathbf{p} = -i \frac{e}{\omega} \mathbf{E} e^{ikx-i\omega t} + \text{c.c.}$$

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{p}c}{\sqrt{m_e^2 c^2 + \mathbf{p}^2}} \approx \mathbf{E} e^{ikx-i\omega t} + \text{c.c.}$$

- risposta **nonlineare** dei mezzi

- effetti della forza magnetica magnetica **non trascurabili**

Applicazioni 1: accelerazione di elettroni



Plasma wave γ -factor

$$\gamma_{ph} = (1 - v_{ph}^2 / c^2)^{-1/2} = \omega_p / \omega_L$$

Maximum particle energy

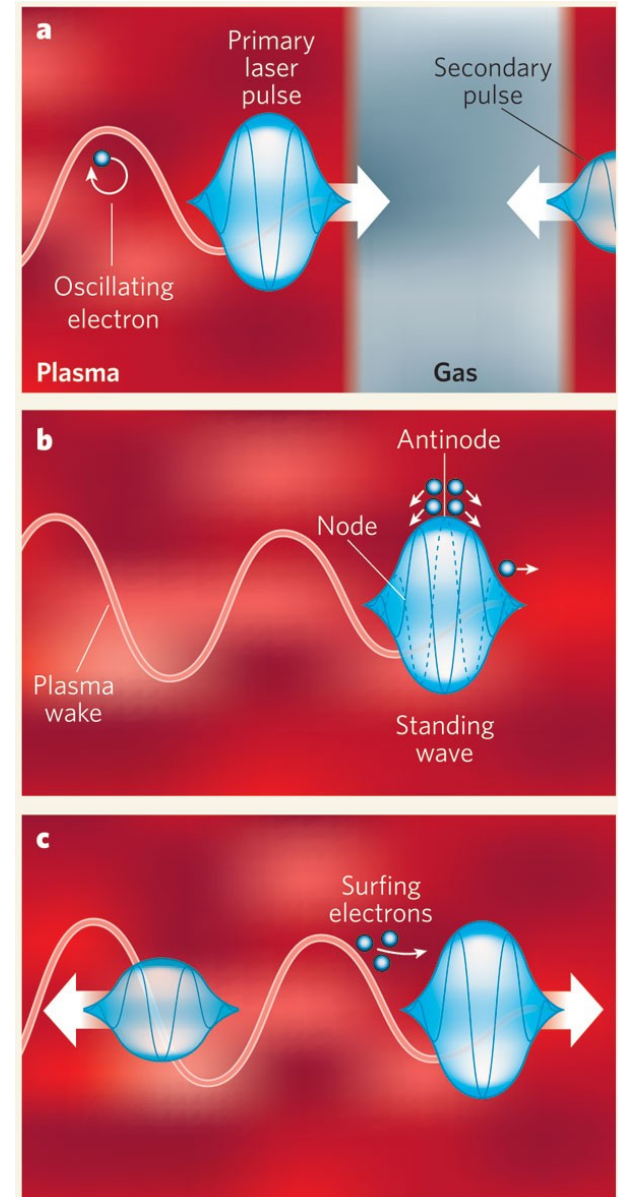
$$W_{max} = e E_{max} L_d$$

Dephasing length

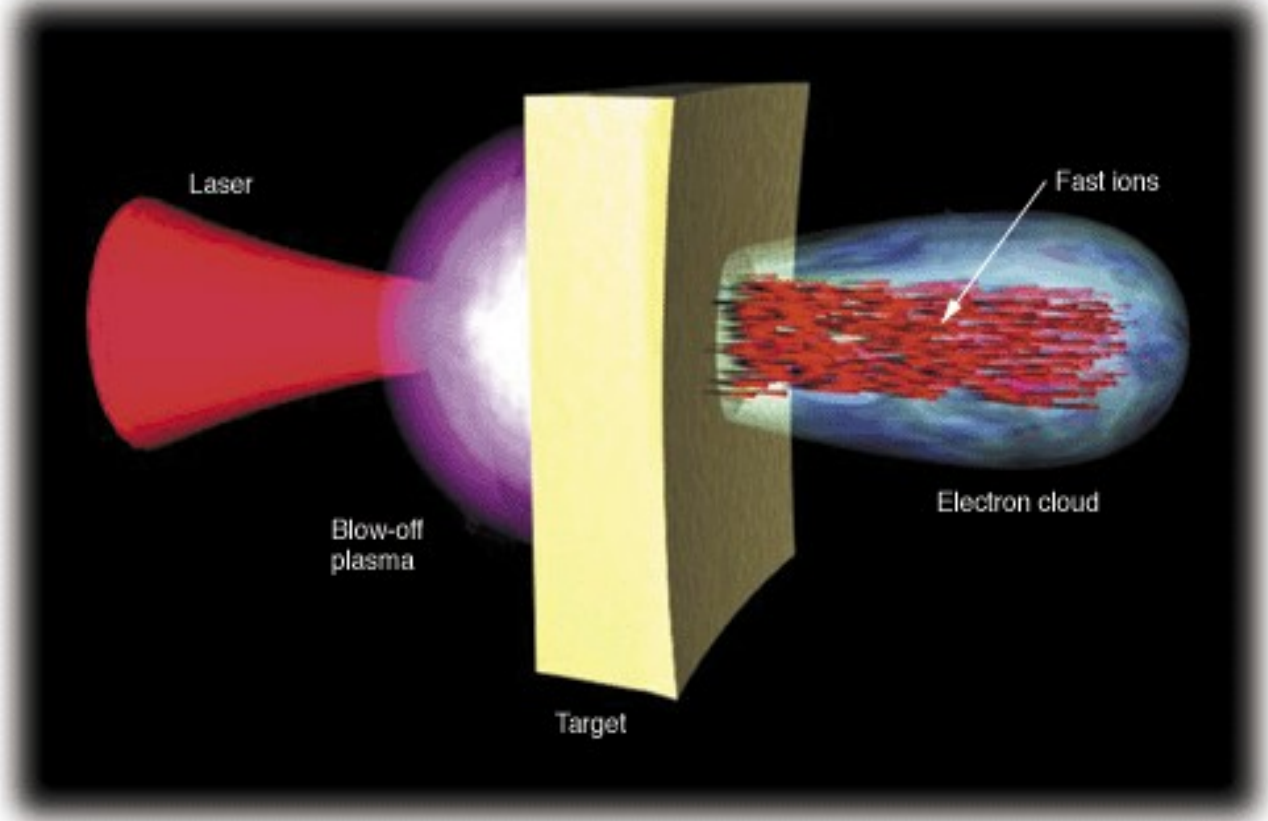
$$L_d \approx \gamma_{ph}^2 \lambda_p$$

principio fisico: “surf” degli elettroni su un'onda di plasma longitudinale con velocità di fase

creazione dell'“onda perfetta”:
“scia” di un impulso laser



Applicazioni 2: accelerazione di ioni

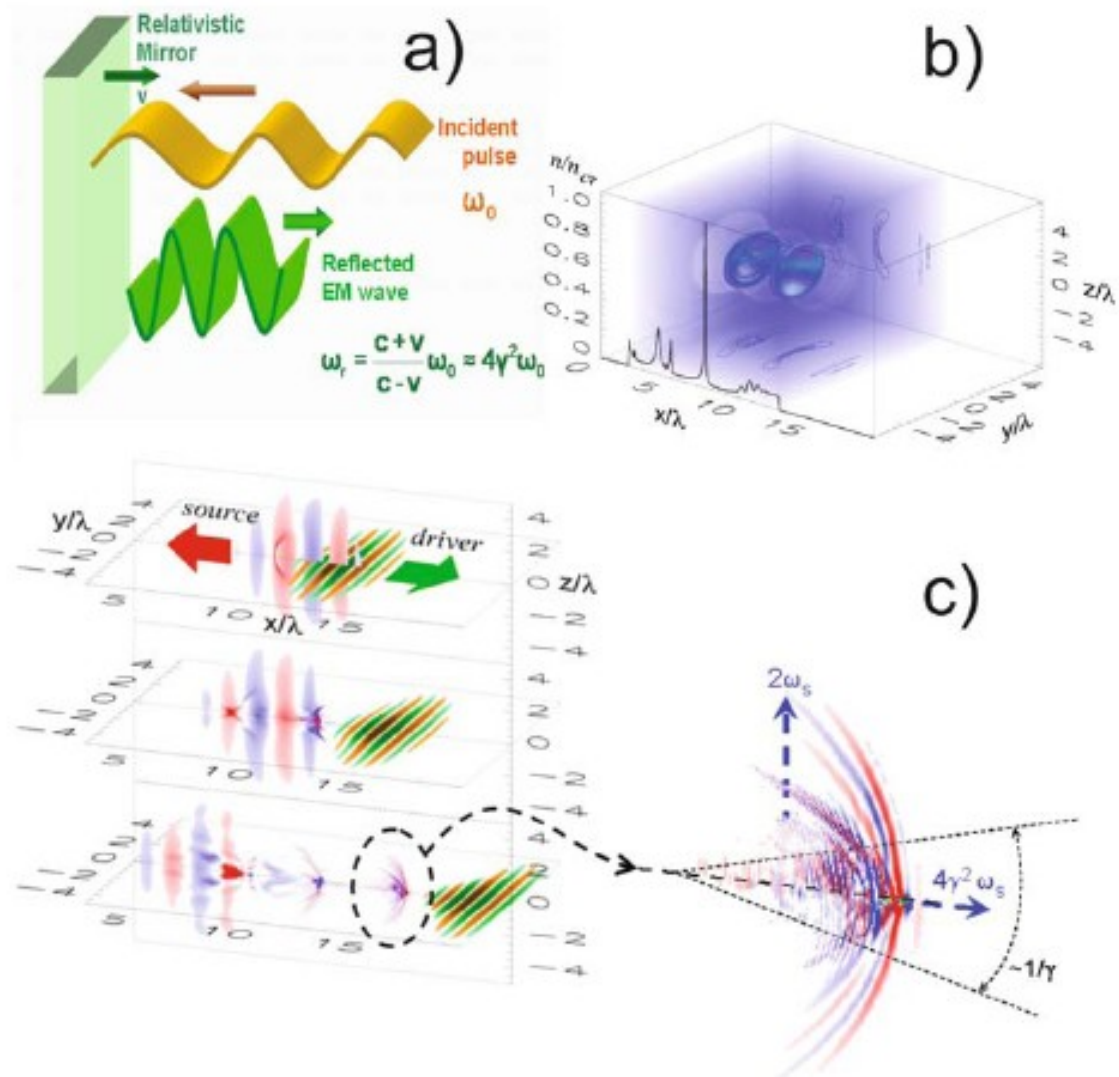
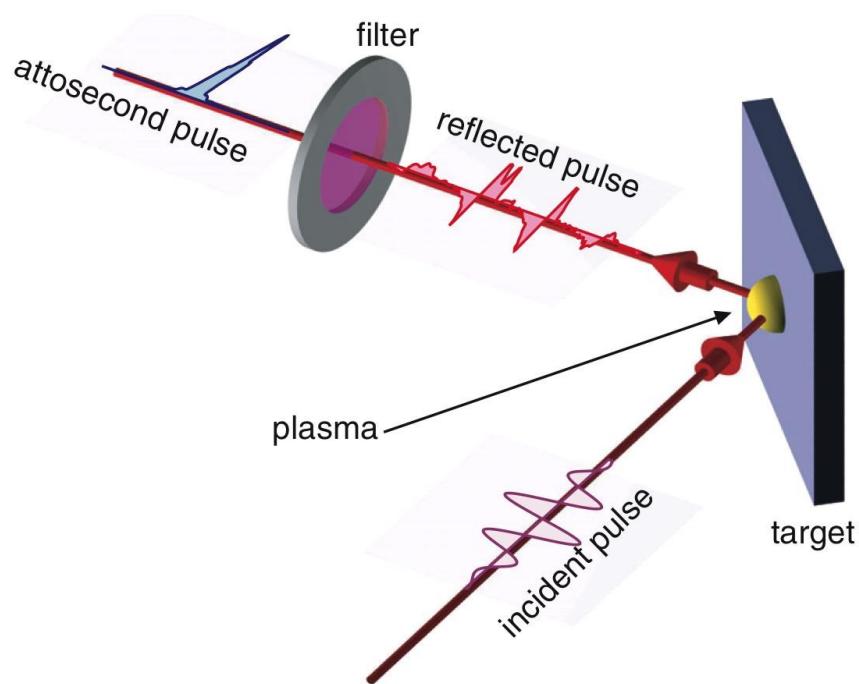


molto studiata in bersagli solidi dal 2000 in poi (“casuale” scoperta sperimentale)

Due principi fisici allo studio:

- Espansione di un plasma relativistico
- Accelerazione per pressione di radiazione

Applicazioni 3: “relativistic engineering”



Idea: “**controllo coerente**” della dinamica laser-plasma (e.g. “*moving mirrors*”) per creare/modificare impulsi di radiazione EM

(**atto/zeptosecondi, alte armoniche, impulsi XUV...**)

Applicazioni 4: Fusione Nucleare

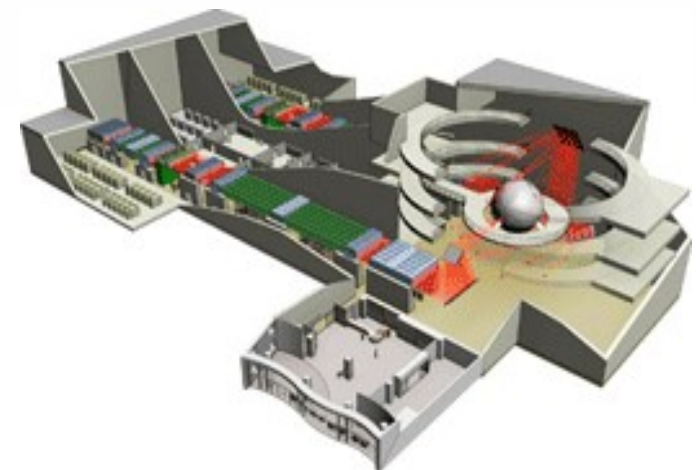
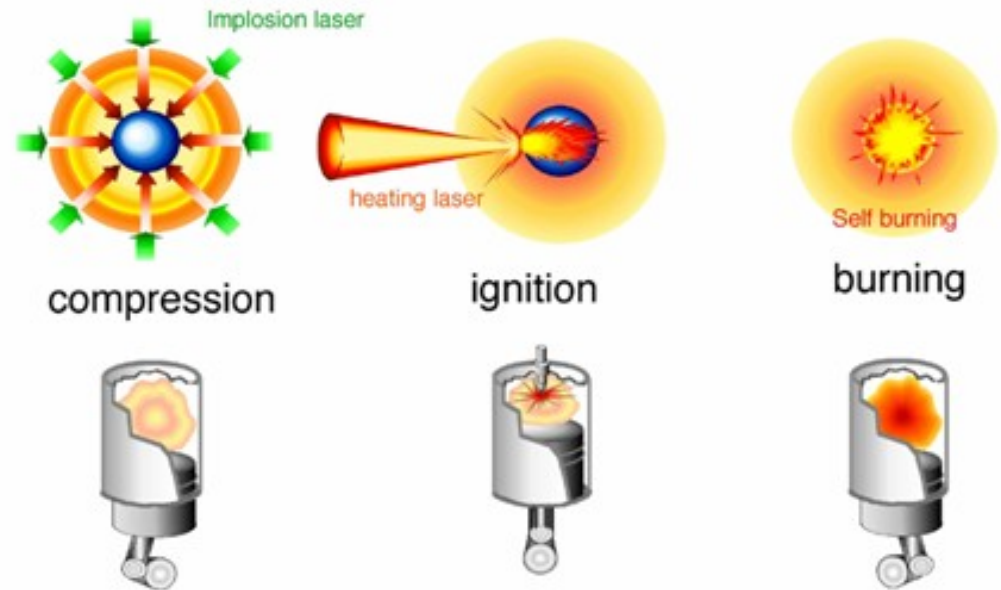
Principio: confinare un plasma a $n=10^{23} \text{ cm}^{-3}$ per $>10^{-9} \text{ sec}$ comprimendo il combustibile (principalmente usando fasci laser)

Idea: un fascio laser superintenso come “scintilla” per passare da un regime “diesel” ad uno “a scoppio”

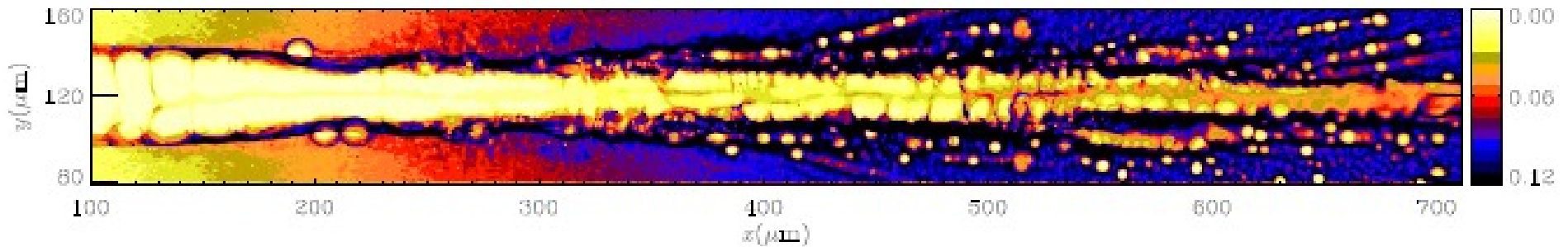
Fisica coinvolta: generazione, trasporto, interazione di elettroni/ioni di alta energia in materia densa

Esperimento giapponese (FIREX) in fase avanzata di sviluppo

Proposta europea: **HiPER**
High Power laser Energy Research facility

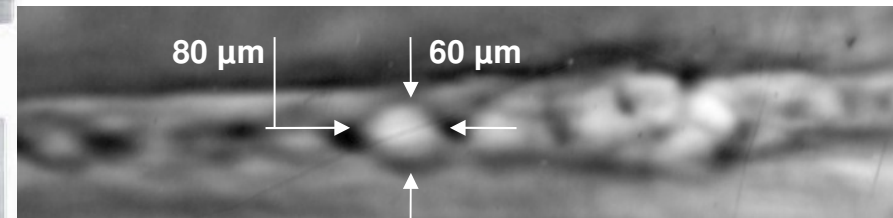
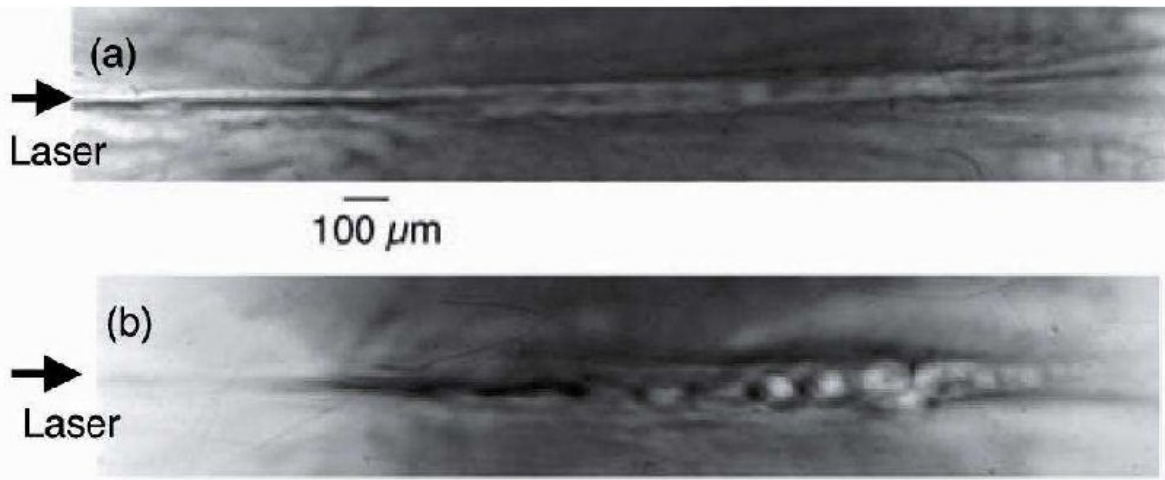


Fisica di base: autorganizzazione e strutture coerenti



Varietà di fenomeni e strutture osservate in “esperimenti numerici” (i.e. simulazioni di interazione laser-plasma su “larga scala”):
solitoni, cavitoni, vortici magnetici, filamenti, ...

Possibilità recente di **osservazioni sperimentali** con **risoluzione spaziale e temporale** (tecnica “*proton probing*”)



“Astrofisica di laboratorio”

S.V.Bulanov et al, Eur. Phys. J. D **55** (2009) 483

Esempio di plasmi relativistici in oggetti astrofisici “esotici”:

Magnetosfera delle Pulsar

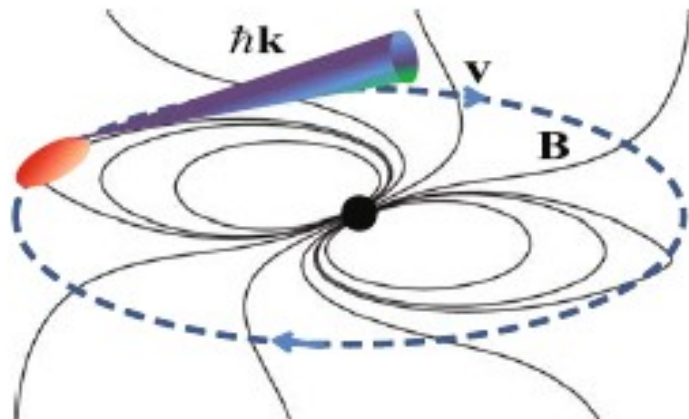


Fig. 14. (Color online) Schematic pulsar magnetosphere, according to reference [135]. A rotating relativistic electron lump emits electromagnetic radiation by the antenna mechanism.

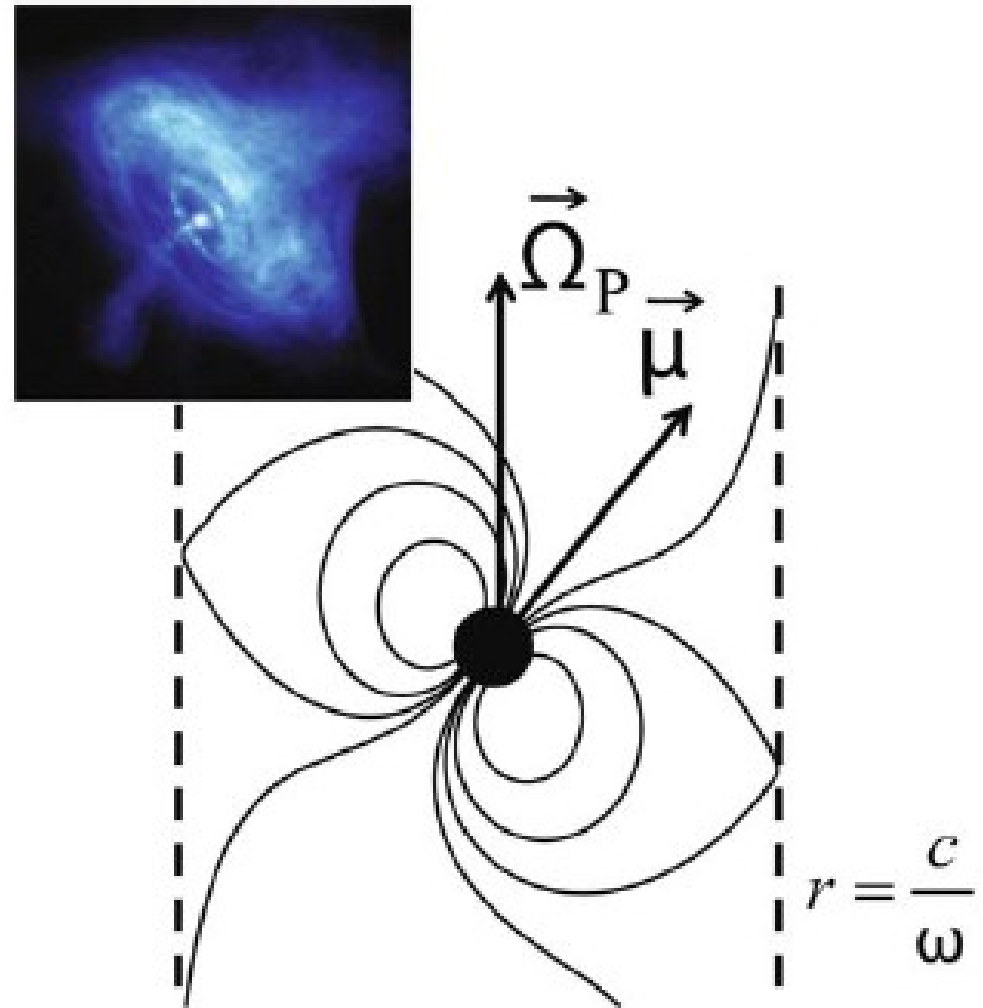


Fig. 4. (Color online) Pulsar magnetosphere. The inset: the Crab pulsar [72].

“Astrofisica di laboratorio”

S.V.Bulanov et al, Eur. Phys. J. D **55** (2009) 483

Shocks e accelerazione di ioni per effetto della pressione di radiazione

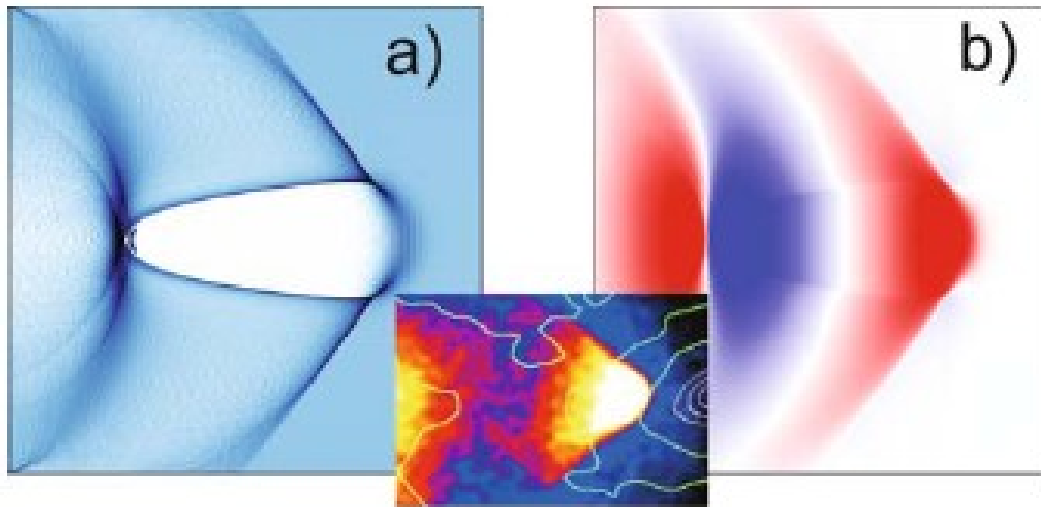


Fig. 6. (Color online) 2D PIC simulations show that the electrons pushed away by the ponderomotive pressure of the laser pulse form the “bow wave” [49,50]. The electron density distribution (a) clearly shows the ‘swallow-tail’ formation during the wake wave breaking in the first period of the wave behind the laser pulse. The wakefield (the x -component of the electric field) is excited by the laser pulse in an underdense plasma (b). Inset: the bow wave formed by colliding galaxies in the bullet cluster [73].

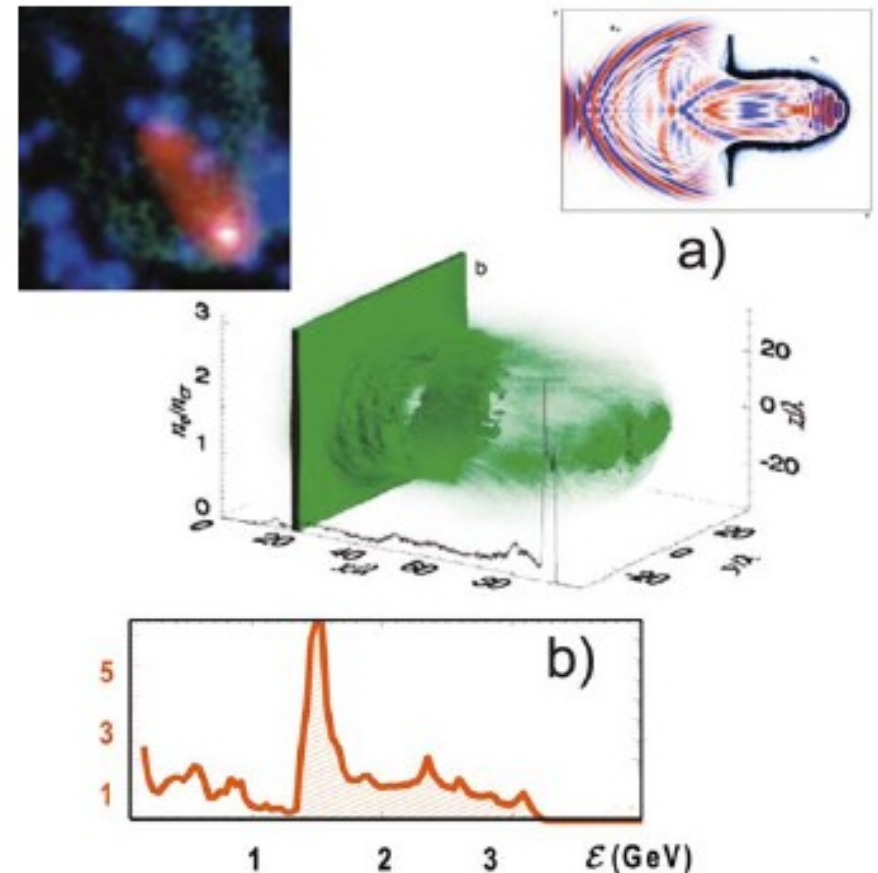


Fig. 7. (Color online) Results of 3D PIC simulations of the PPDA ion acceleration regime. (a) The electromagnetic pulse forms a cocoon confining the EMW energy. The right inset shows a cocoon seen in the plasma density and an EMW distribution obtained with the 2D PIC simulation. In the left inset we see a cocoon formed by the Black Widow pulsar (Pic. NASA). (b) Quasi-monoenergetic ion spectrum.

“Astrofisica di laboratorio”

S.V.Bulanov et al, Eur. Phys. J. D **55** (2009) 483

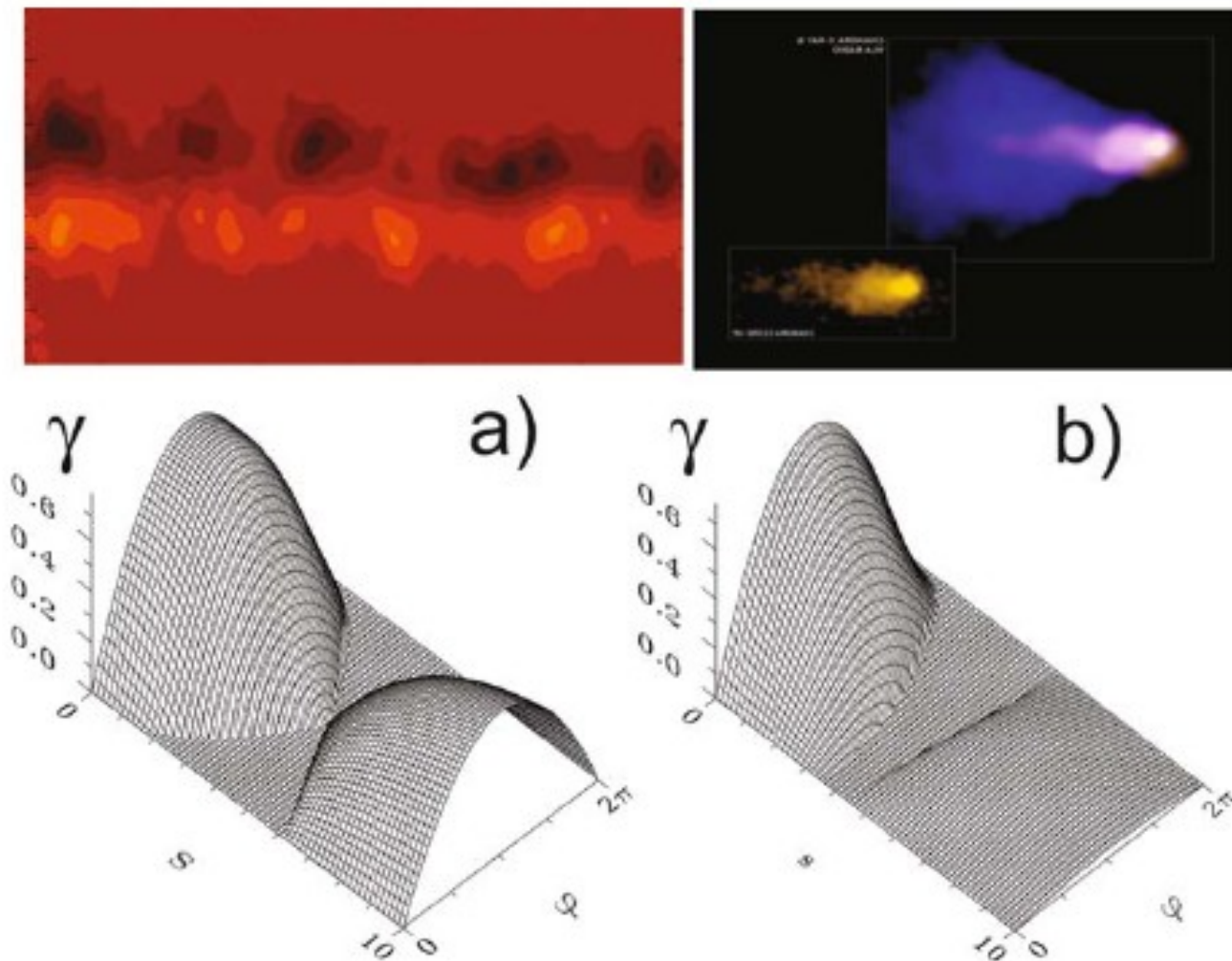


Fig. 13. (Color online) Instability growth rate on s and q for the vortex row described within the framework of the Euler (a) and Hasegawa-Mima (b) approximations. Left inset: the vortex row seen in the magnetic field patch distribution in a plasma behind the laser pulse. Right inset: the Mouse pulsar (NASA/CXC/SAO, Chandra image of G359.23-0.82 pulsar) [125].

Teoria di base

Sistema Vlasov-Maxwell (notazione non covariante)

$$\frac{df_a}{dt}(\mathbf{x}, \mathbf{p}, t) = \frac{\partial f_a}{\partial t} + \dot{\mathbf{x}}_a \frac{\partial f_a}{\partial \mathbf{x}} + \dot{\mathbf{p}}_a \frac{\partial f_a}{\partial \mathbf{p}} = 0, \quad a = (e, i)$$

$$\dot{\mathbf{p}}_a = q_a(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad \dot{\mathbf{x}}_a = \frac{\mathbf{p}_a}{m_a \gamma_a},$$

$$\rho(\mathbf{x}, t) = \sum_{a=e,i} q_a \int d^3 p f_a, \quad \mathbf{J}(\mathbf{x}, t) = \sum_{a=e,i} q_a \int d^3 p \mathbf{v} f_a,$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{B}, \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{J} + \partial_t \mathbf{E}$$

Questa descrizione statistica (equazioni cinetiche o del trasporto per la funzione di distribuzione) è spesso troppo complicata: è necessario sviluppare **modelli** (approssimati) efficaci

Plasmi e simulazione numerica

“Plasma physics is just waiting for bigger computers”

Una descrizione statistica del plasma che si avvicini a parametri “realistici” richiede ben presto l'utilizzo di **supercalcolatori**

Tra i primi 10 progetti previsti per l'ultima versione di **ROADRUNNER**

(il supercomputer più potente del mondo:

>1 Petaflop

= 10^{15} operazioni/secondo)

due riguardano applicazioni di fisica dei plasmi



Referenze

P. Mulser and D. Bauer, “High-Power Laser-Matter Interaction” (Springer, 2011)

P. Gibbon, “Short Pulse Laser Interactions with Matter: An Introduction” (Imperial College Press, 2005)

G. Mourou, T. Tajima, S. V. Bulanov, “Optics in the relativistic regime”, Rev. Mod. Phys. **78** (2006) 309-371

S. V. Bulanov et al, “Relativistic Laser-Matter Interaction and relativistic laboratory astrophysics”, Eur. Phys. J. D **55** (2009) 483

P. Shukla et al, Phys. Rep. **138** (1986) 1-149

...