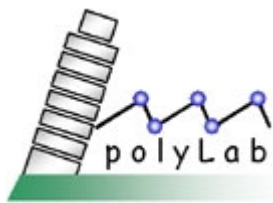
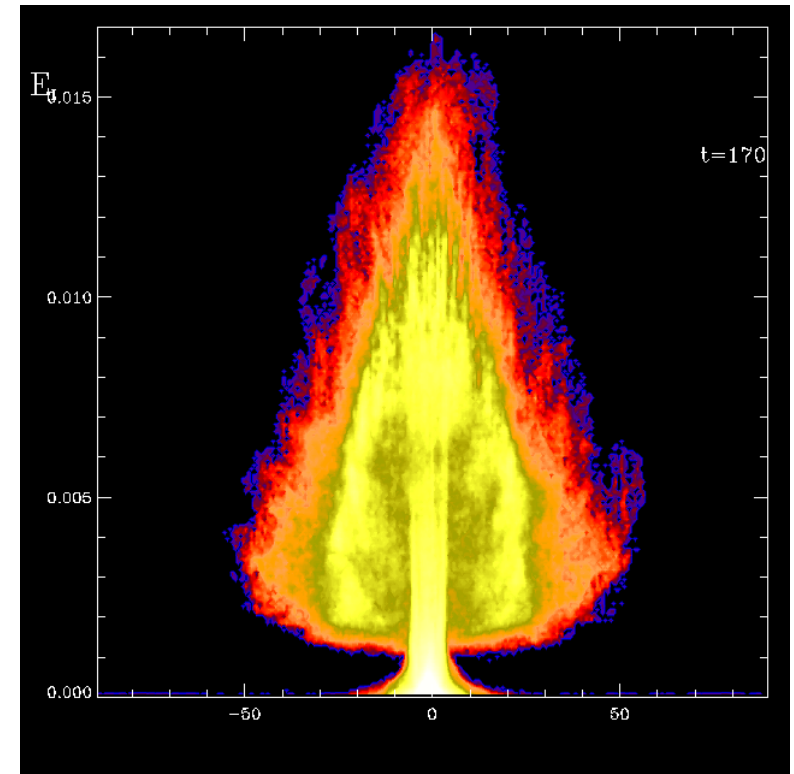


# Accelerazione di Ioni con Pressione di Radiazione Superintensa

Andrea Macchi

*polyLab, CNR-INFM, Pisa*

*INFN, sezione di Pisa e  
Dipartimento di Fisica "E. Fermi"  
Università di Pisa*



Società Italiana di Fisica,  
Congresso Nazionale, Pisa,  
Venerdì 28 settembre 2007

# 24 secoli di interazione laser-materia ad alta intensità...

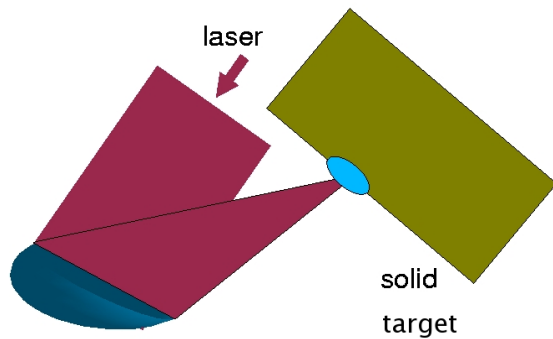


Archimede, III secolo A.C. (?)



Leonardo Da Vinci, XVI secolo D.C.

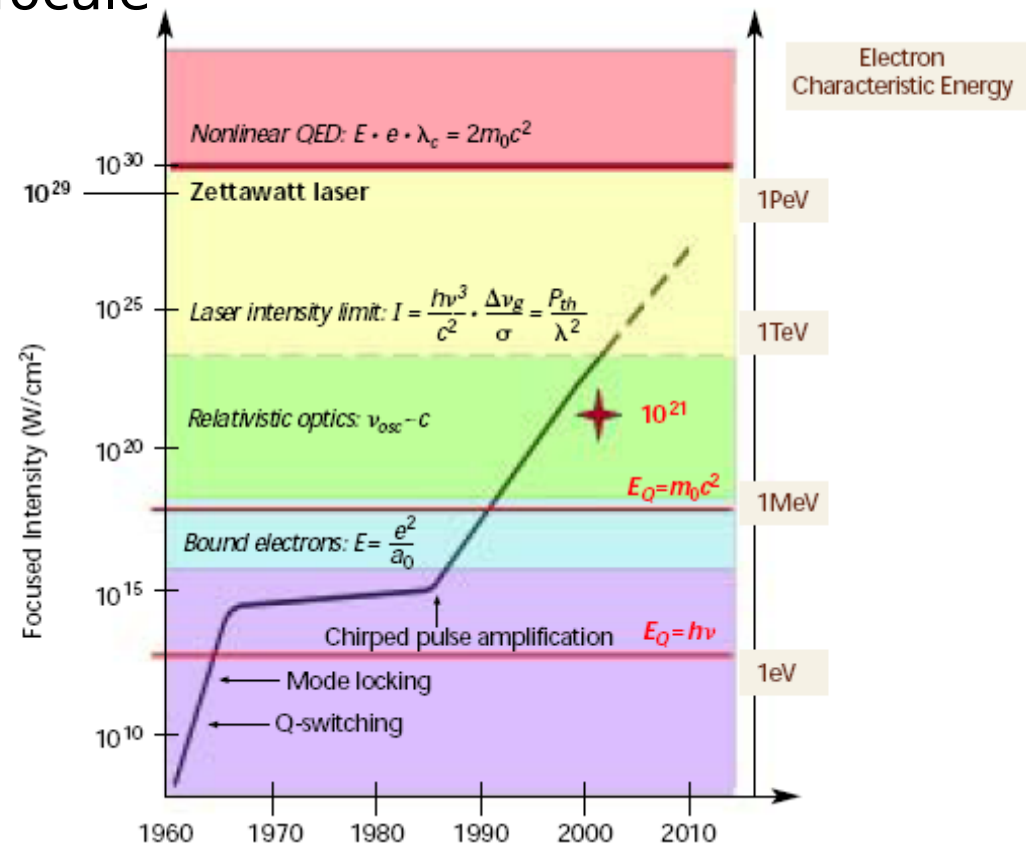
Il progresso dell'intensità nello spot focale (XX - XXI secolo D.C.)



Record attuale:

$10^{21} \text{ W/cm}^2$

(Center for Ultrafast Optical Science, University of Michigan, 2005)



# 24 secoli di interazione laser-materia ad alta intensità...

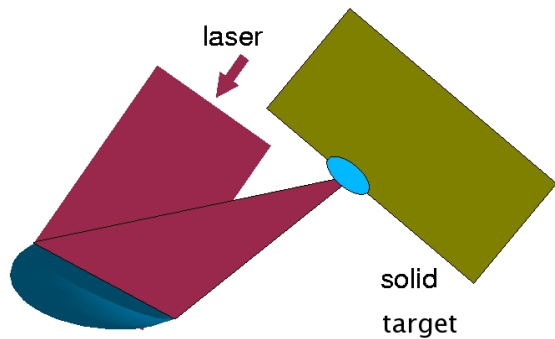


Archimede, III secolo A.C. (?)



Leonardo Da Vinci, XVI secolo D.C.

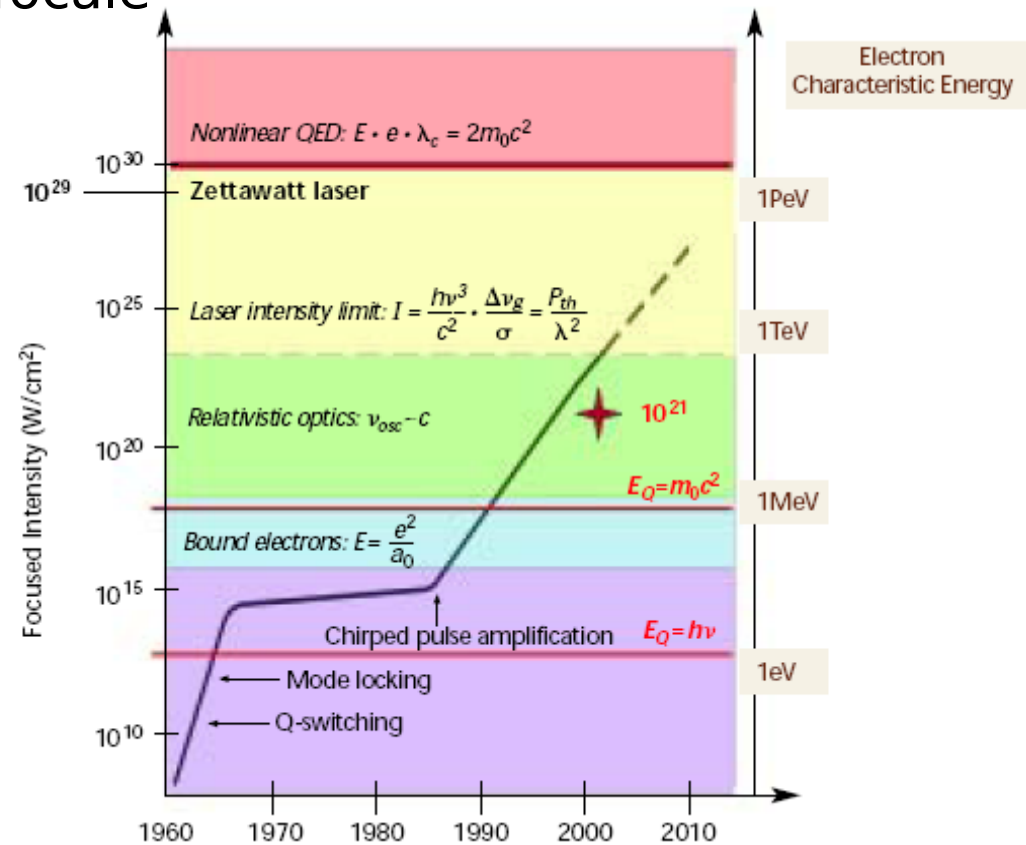
Il progresso dell'intensità nello spot focale (XX - XXI secolo D.C.)



Pressione equivalente

(su uno specchio perfetto):

$$P_{\text{rad}} = 2I/c \approx 2 \times 10^{11} \text{ atm}$$



L'uso di  $P_{\text{rad}}$  per  
accelerare la  
materia ha  
suggerito  
applicazioni “visionarie”...

## INTERSTELLAR VEHICLE PROPELLED BY TERRESTRIAL LASER BEAM

By PROF. G. MARX

Institute of Theoretical Physics, Roland Eötvös University, Budapest

L'uso di  $P_{\text{rad}}$  per accelerare la materia ha suggerito applicazioni "visionarie"...

INTERSTELLAR VEHICLE PROPELLED BY TERRESTRIAL LASER BEAM

By PROF. G. MARX

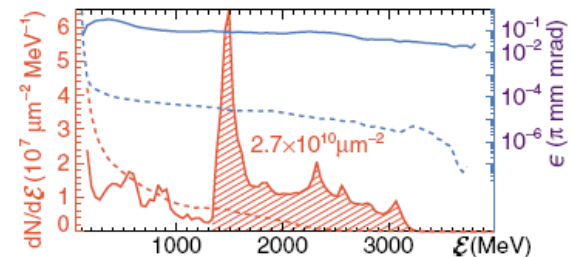
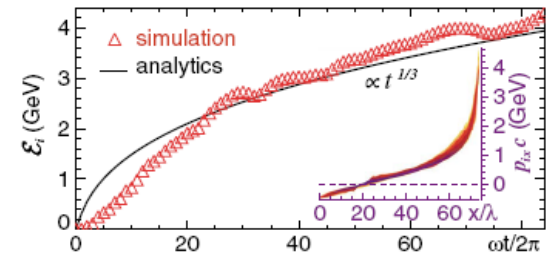
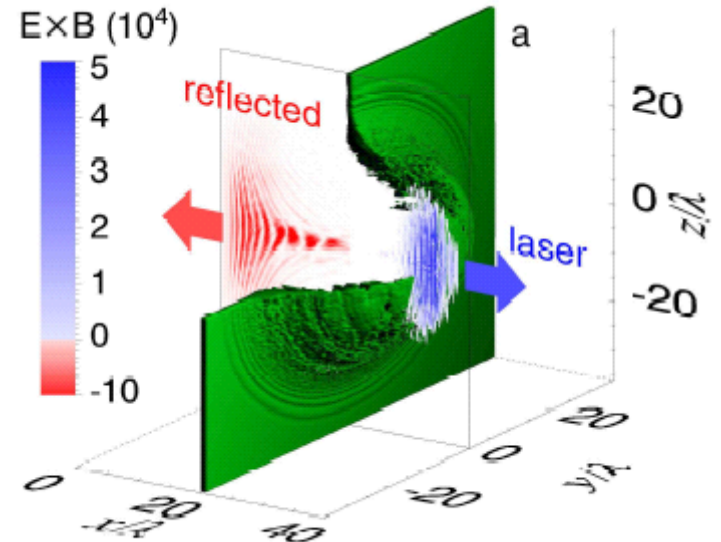
Institute of Theoretical Physics, Roland Eötvös University, Budapest

... aspettativa forse più realistica: accelerazione di ioni dominata da  $P_{\text{rad}}$  per  $I > 10^{23} \text{ W/cm}^2$ .

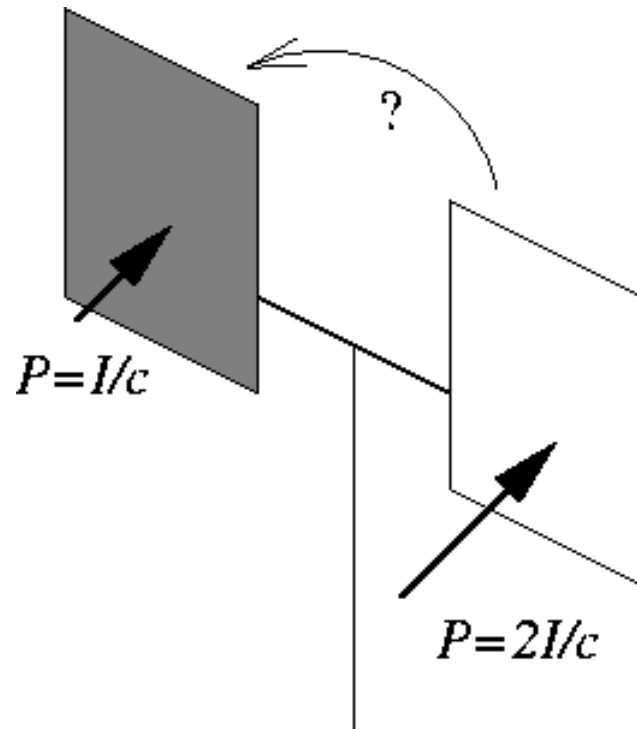
simulazioni PIC 3D:  
Esirkepov et al, PRL **92**, 175003 (2004)

Applicazioni possibili:

- adronterapia oncologica  
Malka et al, Medical Physics **31**, 1587 (2004)
- fusione inerziale  
Atzeni et al, Nuclear Fusion **42**, L1 (2002)
- fisica delle particelle  
Terranova et al, Nucl.Inst.Meth. A **558**, 430 (2006)



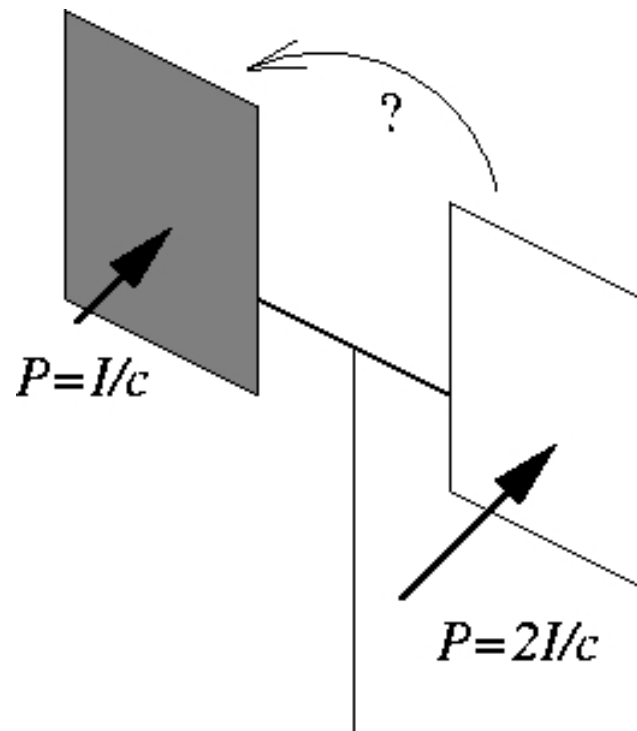
# Massimizzare l'effetto della Pressione di Radiazione: l'esempio del "mulino ottico" (radiometro Solare)



Il mulino gira in direzione **opposta** a quella attesa (basandosi su  $P_{rad}$ ) a causa del riscaldamento della faccia **nera** (assorbente) che aumenta la **pressione termica** del gas circostante (vuoto imperfetto!)



# Massimizzare l'effetto della Pressione di Radiazione: l'esempio del “mulino ottico” (radiometro Solare)

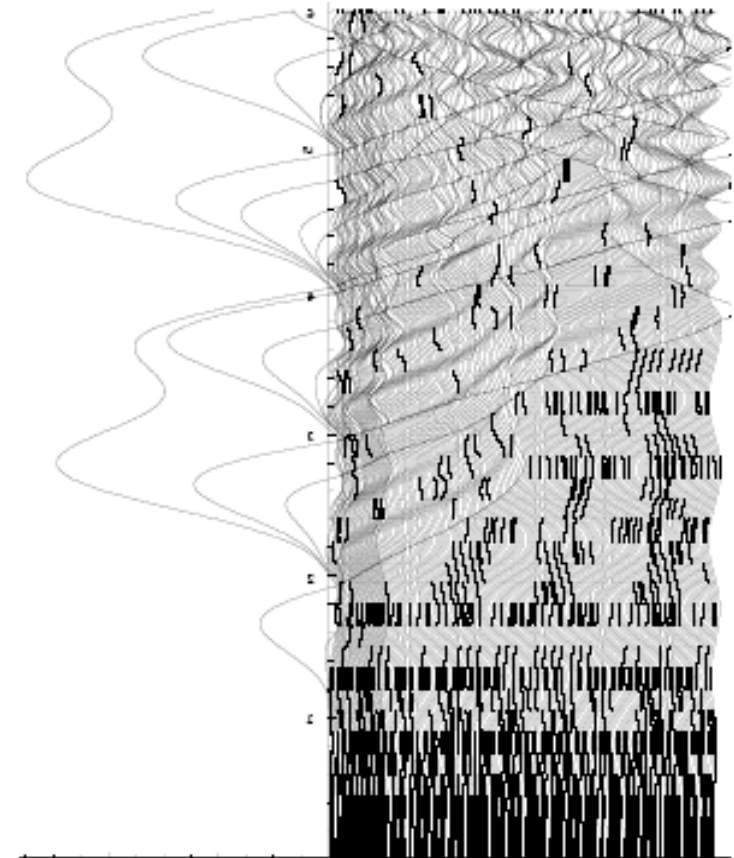
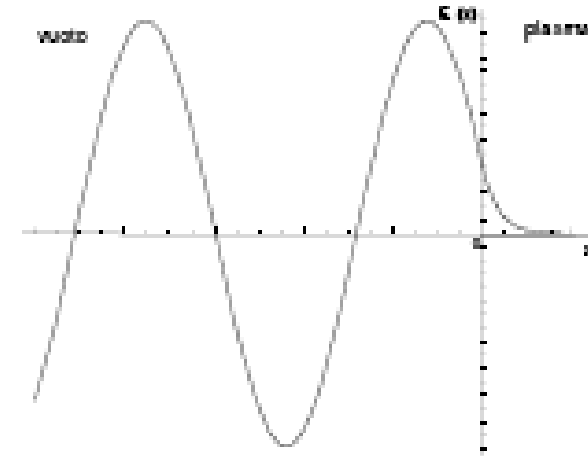
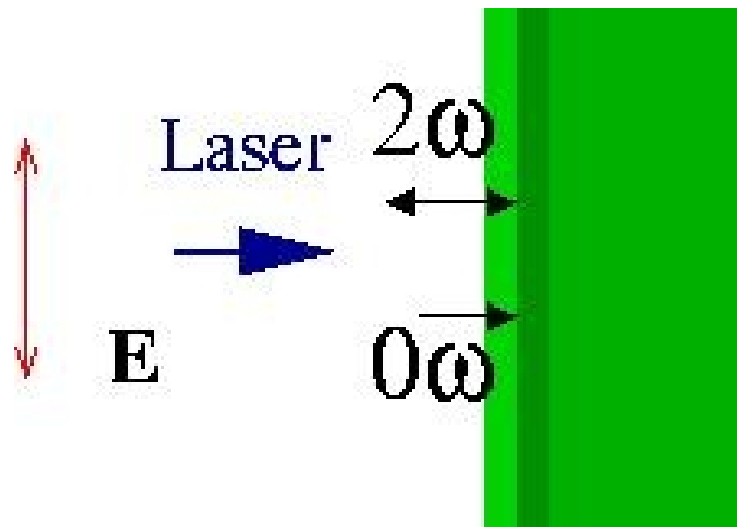


Il mulino gira in direzione **opposta** a quella attesa (basandosi su  $P_{rad}$ ) a causa del riscaldamento della faccia **nera** (assorbente) che aumenta la **pressione termica** del gas circostante (vuoto imperfetto!)

Nell'irraggiamento ad alta intensità di un bersaglio (plasma) a densità solida, il “riscaldamento” avviene per assorbimento di energia da parte degli **elettroni**

# Come inibire il “riscaldamento” elettronico

**Oscillazioni forzate** degli elettroni attraverso l'interfaccia plasma-vuoto ( $L \ll \lambda$ ) guidate dalla componente a  $2\omega$  della forza  $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$  sono **non-adiabatiche** e causano l'accelerazione di elettroni



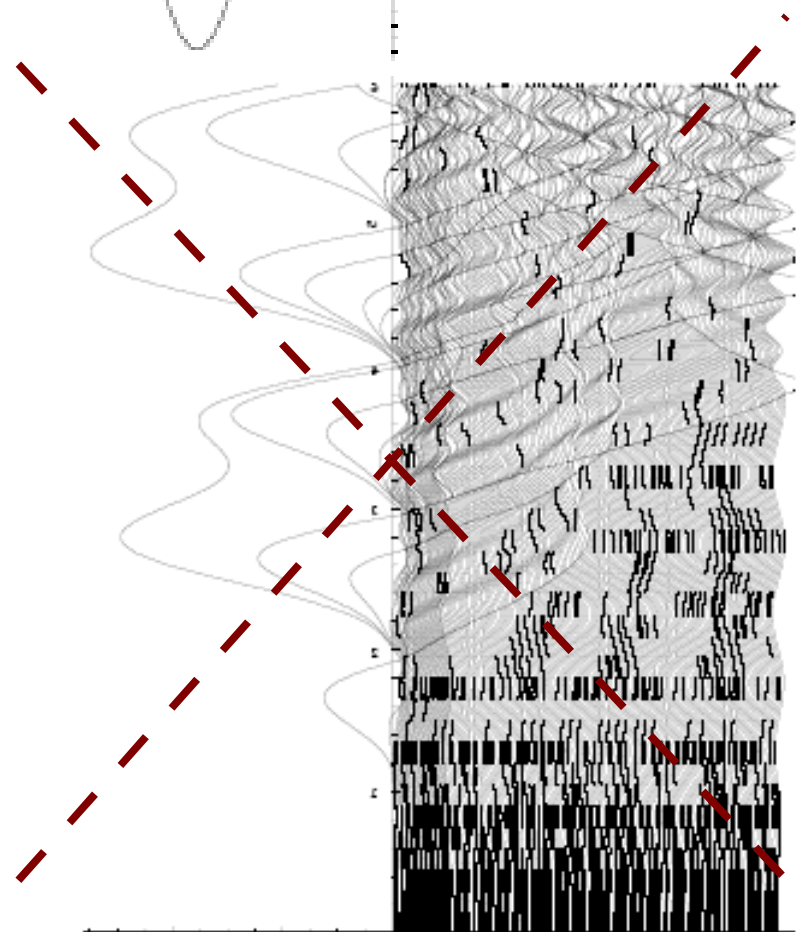
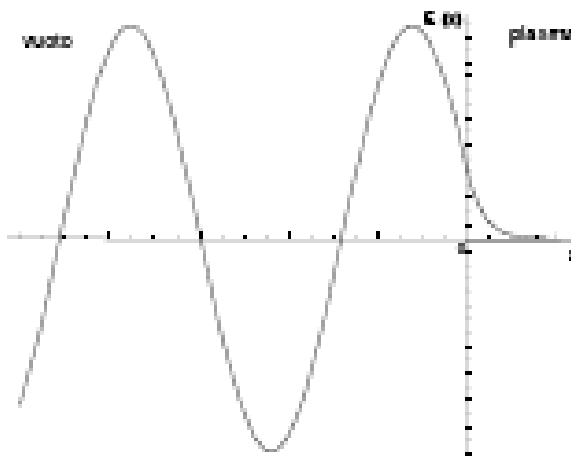
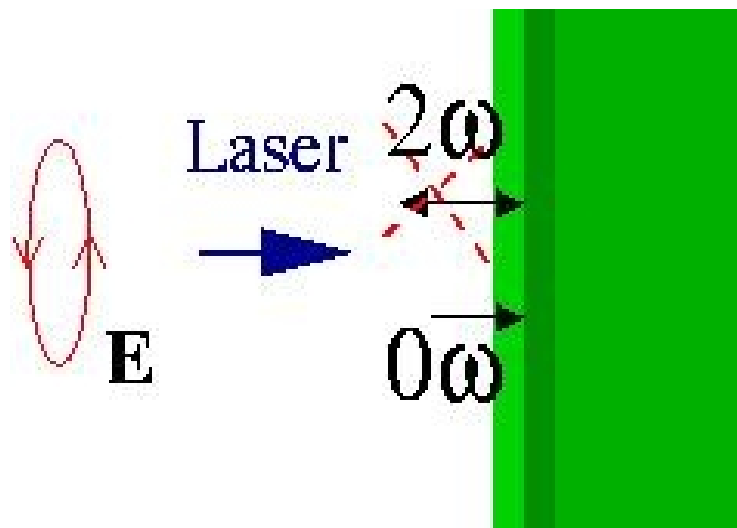


# Come inibire il “riscaldamento” elettronico

Per **polarizzazione circolare**,  
la componente a  $2\omega$  della forza  $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$   
è nulla:

- **inibizione** dell'accelerazione di elettroni
- **accelerazione “diretta” degli ioni**

(ovvero “**dominanza**” della  
**Pressione di Radiazione**)



A.Macchi, F.Cattani, T.V.Liseikina, F. Cornolti,  
Phys.Rev.Lett **94**, 165003 (2005)

S. Tuveri, tesi di Laurea, 2006

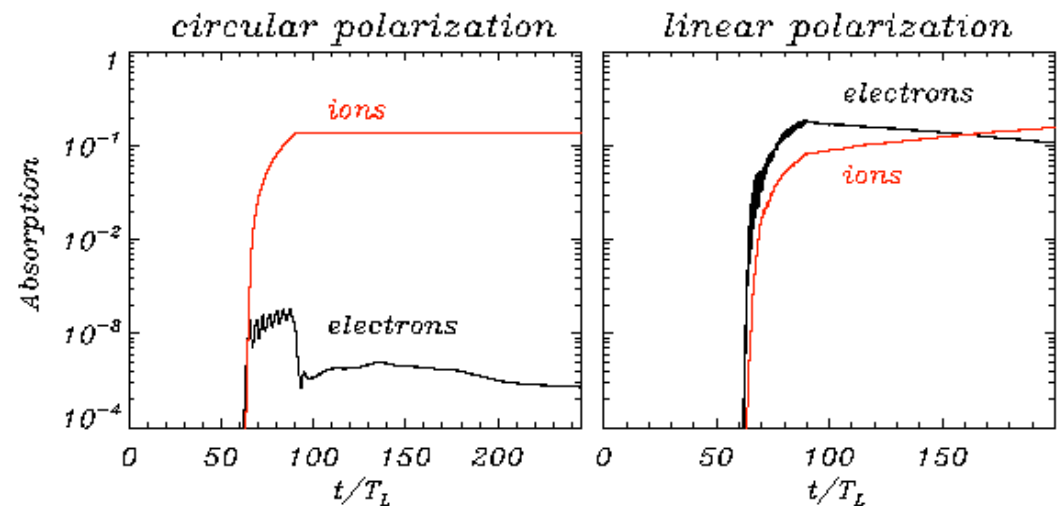
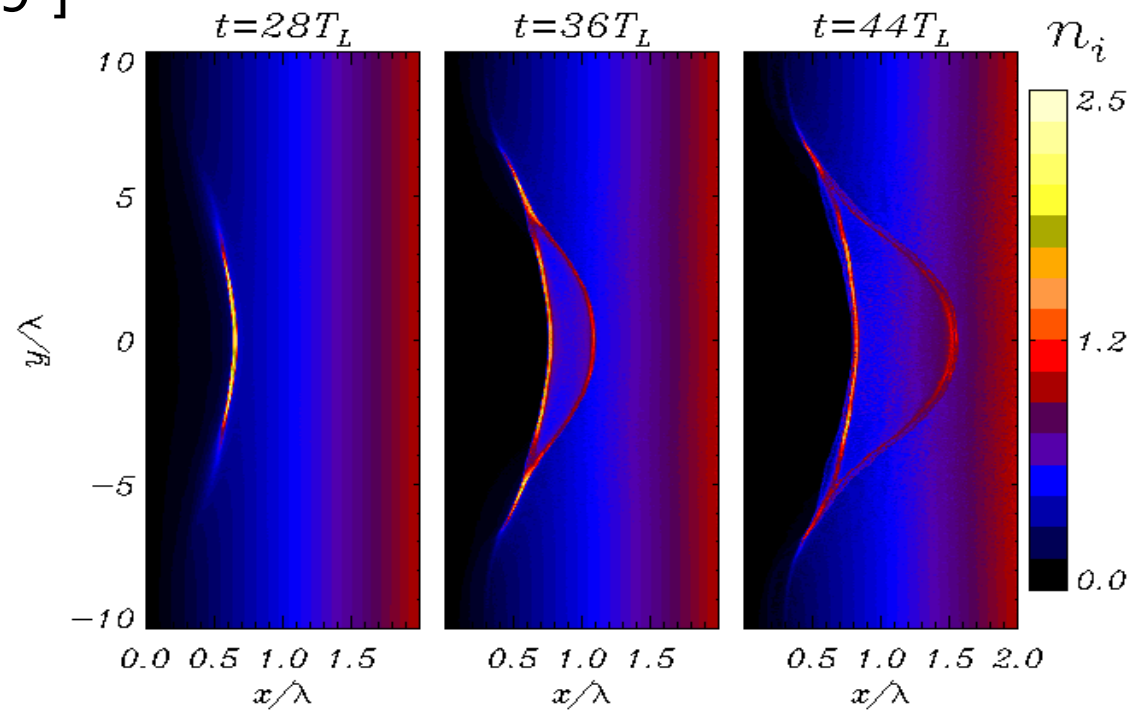
# Accelerazione di ioni con Polarizzazione Circolare

[Macchi et al, Phys.Rev.Lett. **94**, 165003 (2005);  
Liseikina, Macchi, arXiv:0705.4019 ]

Simulazioni PIC 1D e 2D

Caratteristiche:  
alta efficienza (>10%),  
alto numero di ioni,  
alta collimazione (<5°),  
energie 1-10 MeV,  
spettro "stretto";

Possibile produrre un  
singolo impulso ultrabreve  
di ioni usando impulsi laser  
al femtosecondo.



# Accelerazione di ioni con Polarizzazione Circolare

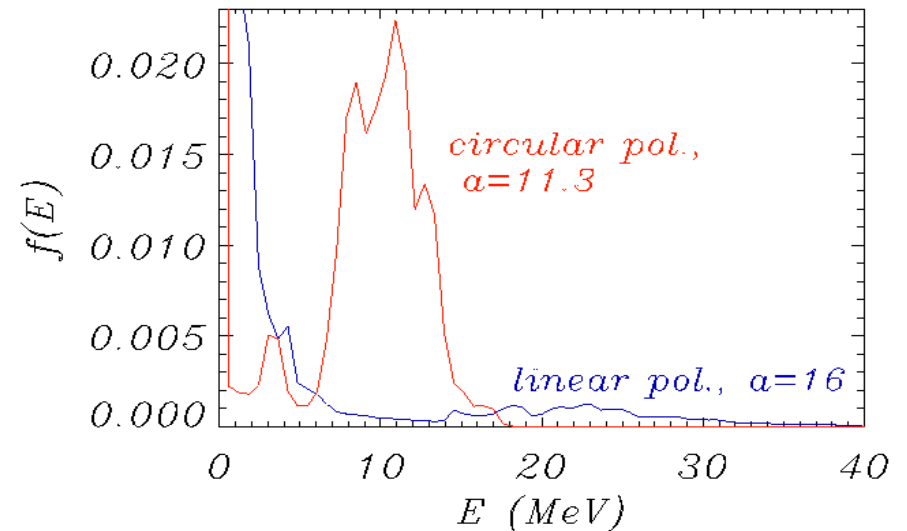
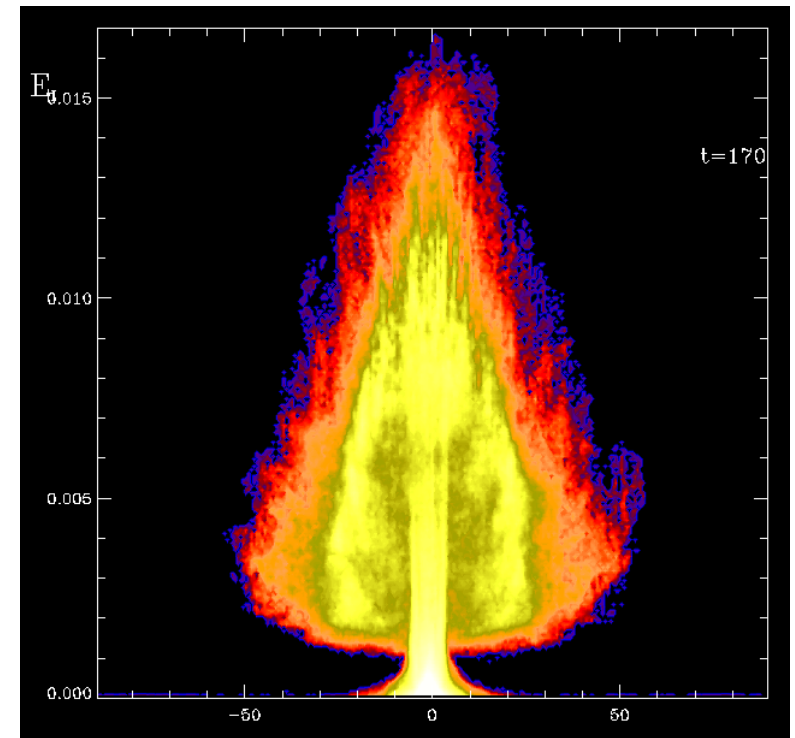
[Macchi et al, Phys.Rev.Lett. **94**, 165003 (2005);  
Liseikina, Macchi, arXiv:0705.4019 ]

Simulazioni PIC 1D e 2D

Caratteristiche:

alta efficienza ( $>10\%$ ),  
alto numero di ioni,  
alta collimazione ( $<5^\circ$ ),  
energie 1-10 MeV,  
spettro "stretto";

Possibile produrre un  
singolo impulso ultrabreve  
di ioni usando impulsi laser  
al femtosecondo.



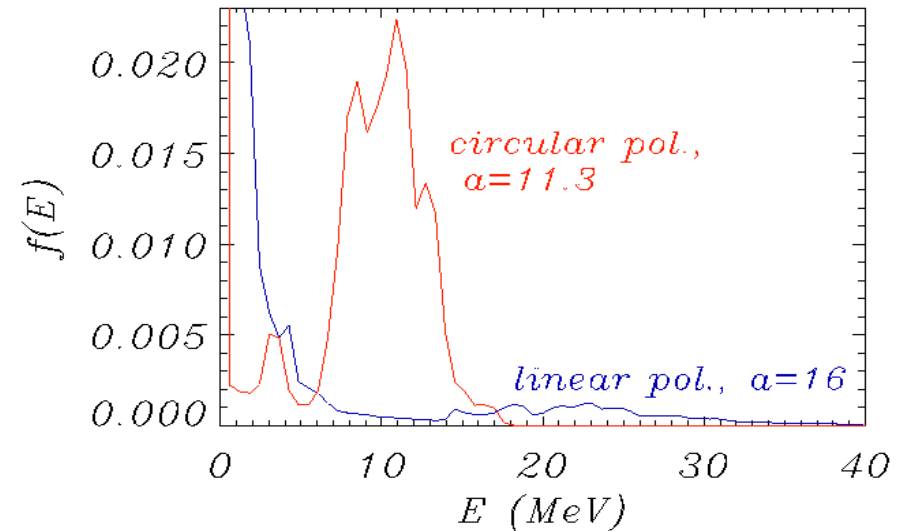
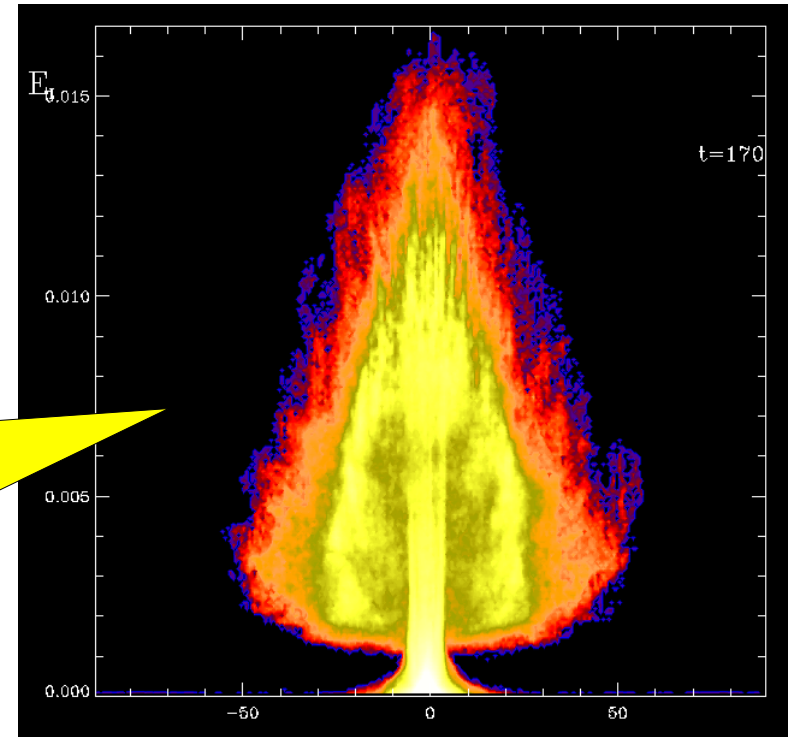
# Accelerazione di ioni con Polarizzazione Circolare

[Macchi et al, Phys.Rev.Lett. **94**, 165003 (2005);  
Liseikina, Macchi, arXiv:0705.4019 ]

## Simulazioni PIC 1D e 2D

Caratteristiche  
alta  
alto  
alta  
ene  
spe  
  
Pos  
sing  
di io  
al femtosecondo.

“L'albero di Natale” è un *contour plot* (da simulazioni 2D) dell'energia degli ioni in funzione dell'angolo di emissione, che evidenzia un'alta collimazione (dipendente dall'energia)

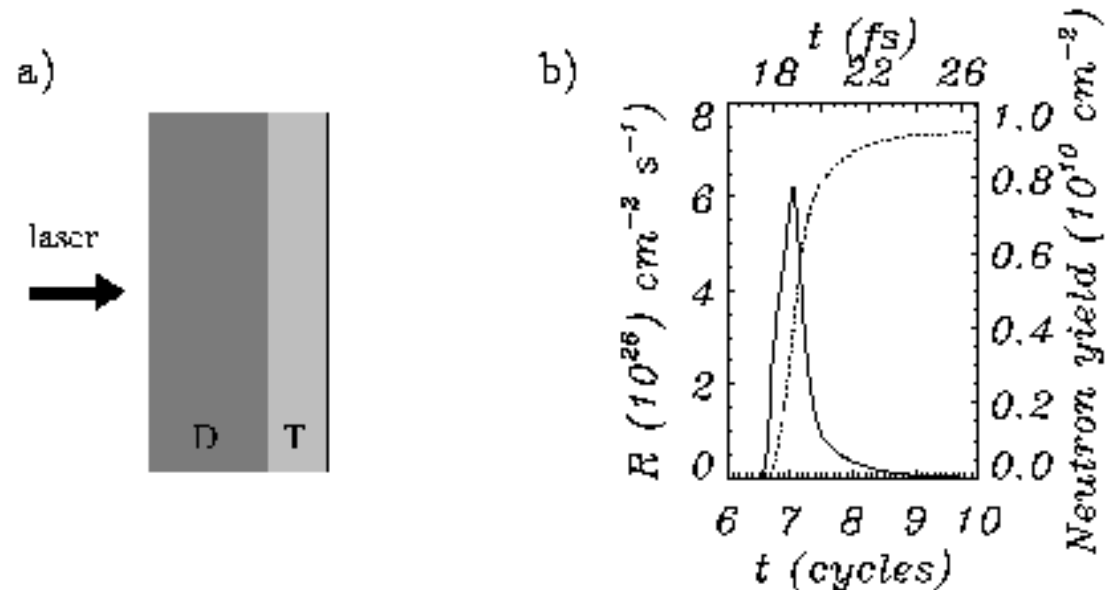
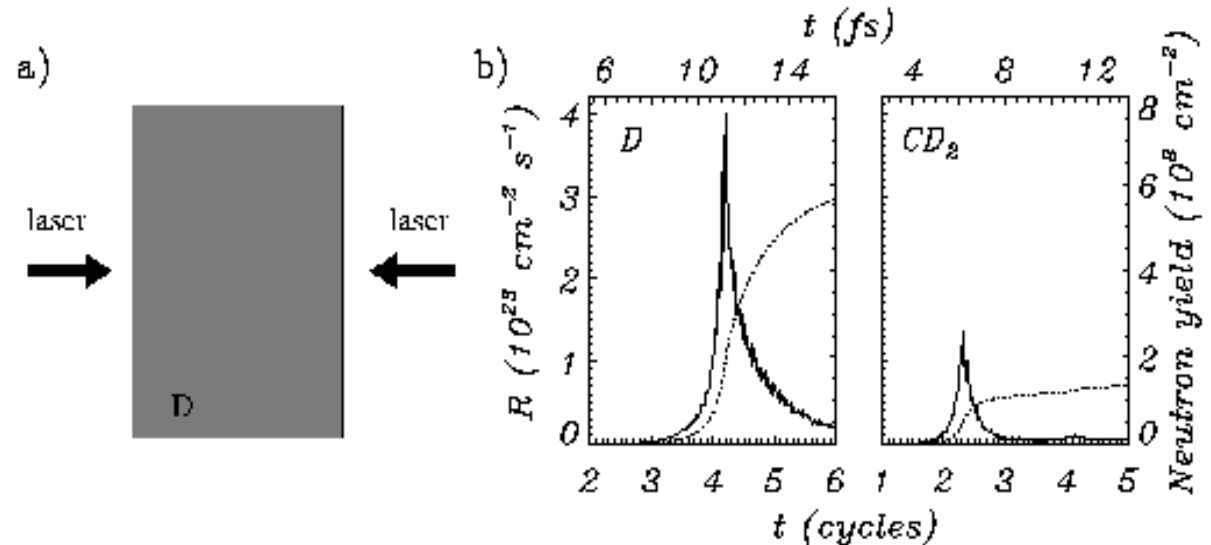


# Una possibile applicazione: sorgenti di neutroni

Inducendo reazioni di fusione nucleare in bersagli contenenti D or DT si potrebbe ottenere una **sorgente di neutroni con durata inferiore al femtosecondo**

[A. Macchi, Appl.Phys.B **82**, 337 (2006)]

Un mezzo per il controllo ultrabreve di processi nucleari o spettroscopia risolta nel tempo dei nuclei?



# Conclusioni

Lo studio teorico dell'accelerazione di ioni per mezzo di impulsi laser con polarizzazione circolare ha consentito:

- una migliore comprensione dei processi di accelerazione (gli effetti della pressione di radiazione sono separati dagli effetti “termici”)
- la formulazione di una proposta sperimentale per una sorgente di ioni di caratteristiche peculiari

Proposta di applicazione a bersagli ultrasottili (tempi di accelerazione elevati ...) per raggiungere

**GeV** di energia per con le intensità laser attuali;

Zhang et al, Phys.Plasmas **14**, 073101 (2007);

Robinson et al, arXiv:0708.2040

Il regime di accelerazione con Pressione di Radiazione potrebbe essere dominante negli esperimenti di **ELI** (*Extreme Light Infrastructure*, facility europea, intensità previste  $>10^{24}$  W/cm<sup>2</sup>)



## Hanno contribuito:

Federica Cattani, Francesco Ceccherini, Fulvio Cornolti,  
Tatiana V. Liseikina, Domenico Prellino

## Supporto:

PRIN 2005-2006 “Interazione Superintensa Laser-Plasma”

Iniziativa trasversale di Supercalcolo CNR-INFN e CINECA

## Per approfondire:

Danilo Giulietti e Andrea Macchi,  
“Laser Superintensi per Tutti”,  
Il Nuovo Saggiatore 23, n.3-4, 76 (2007)