



Accelerazione Laser-Plasma:

da Zero a 1 GeV in Pochi Centimetri

Nadejda Drenska, Riccardo Faccini, Silvia Martellotti,
Francesco Tani, Paolo Valente

Sapienza Università e INFN Roma



Le détecteur de Matisse ou the Matisse detector by G. Martinelli

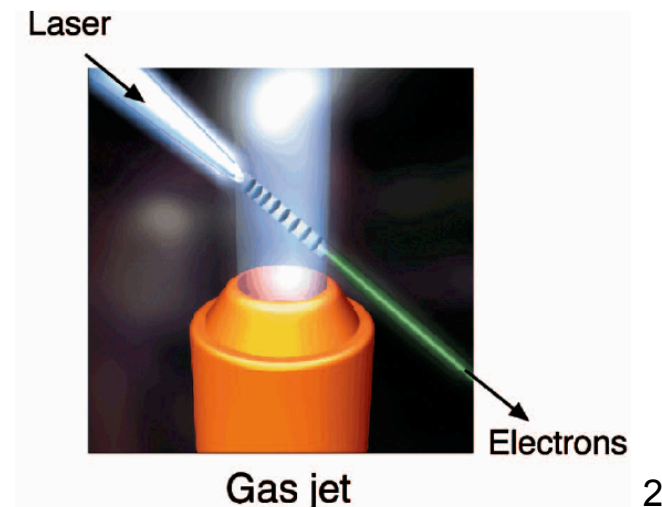
Interesse scientifico

Nuove tecniche di accelerazione

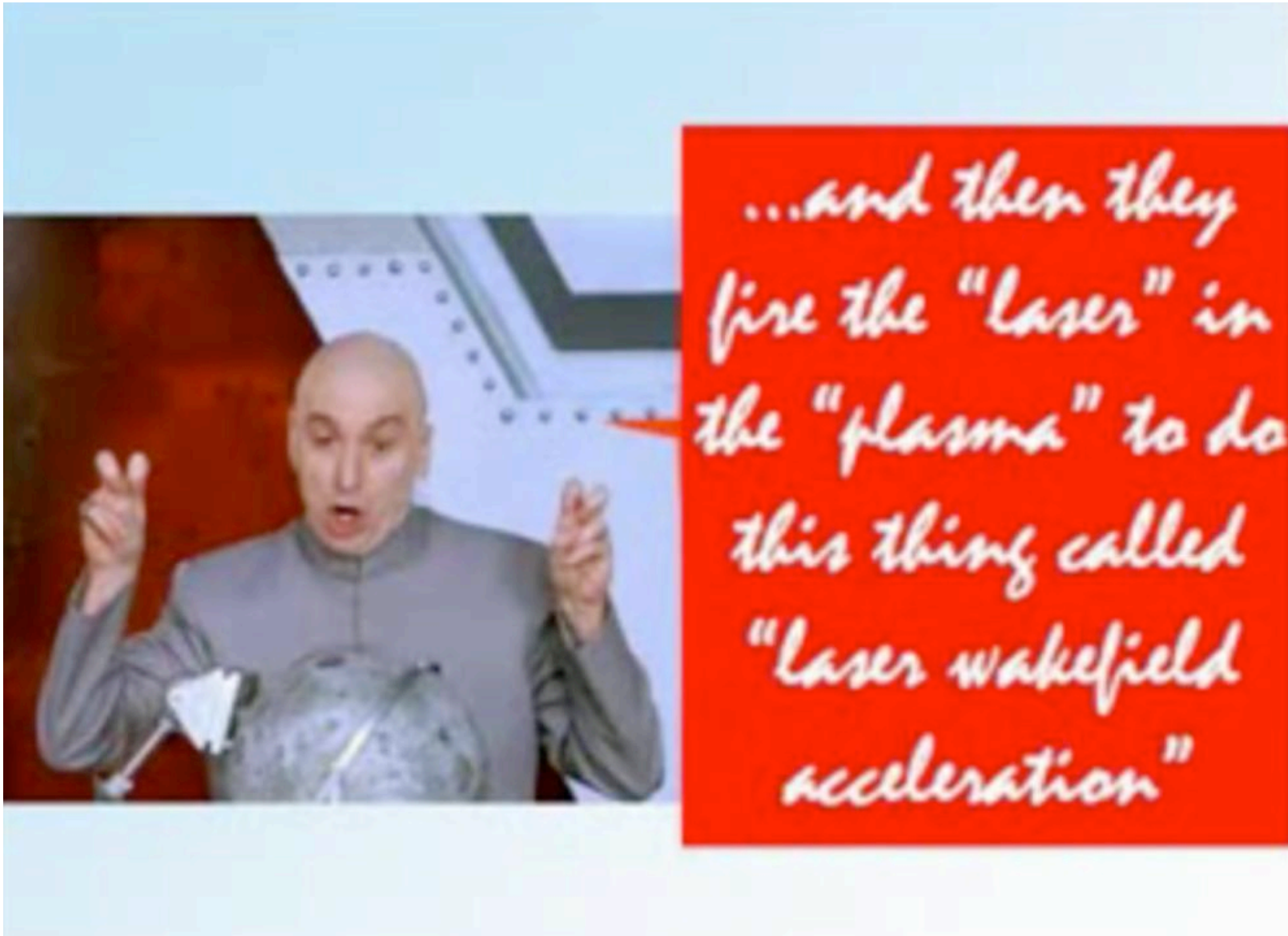
Energia \nearrow = Lunghezza \nearrow = \$\$ \nearrow

Cavità RF = 100 MeV/m a causa del Breakdown sulle pareti della struttura

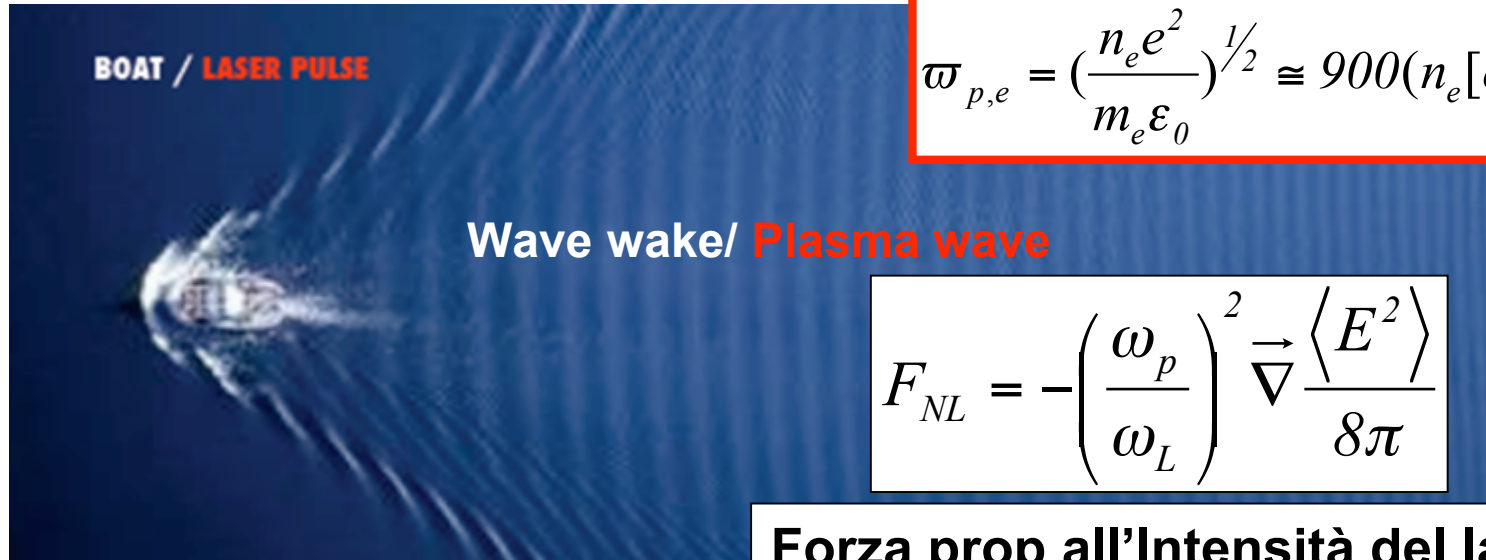
PRL 1979 – Tajima e Dawson
propongono di utilizzare impulsi
laser per generare onde di plasma
(LWF) lungo la scia del laser stesso.



Laser Wakefield Acceleration



Concetto di base

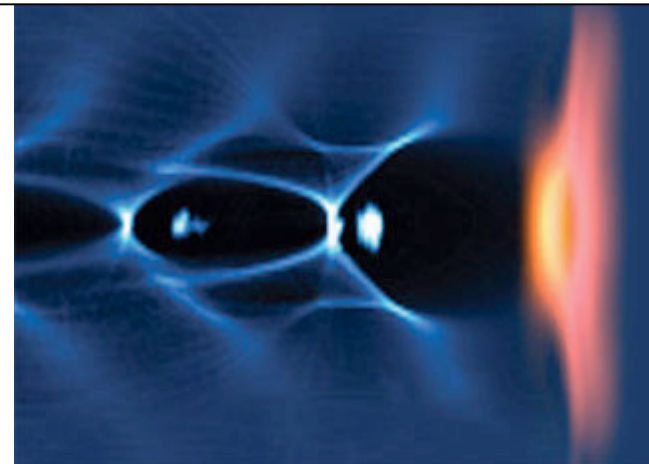
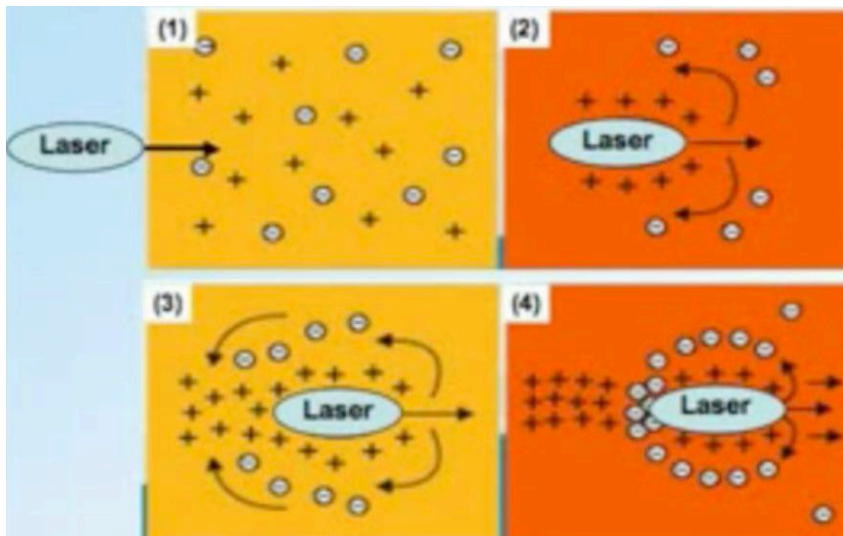


$$\omega_{p,e} = \left(\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0} \right)^{1/2} \cong 900 (n_e [cm^{-3}])^{1/2}$$

$$F_{NL} = - \left(\frac{\omega_p}{\omega_L} \right)^2 \vec{\nabla} \frac{\langle E^2 \rangle}{8\pi}$$

Forza prop all'Intensità del laser

Forza prop alla densità e⁻



Campo accelerante

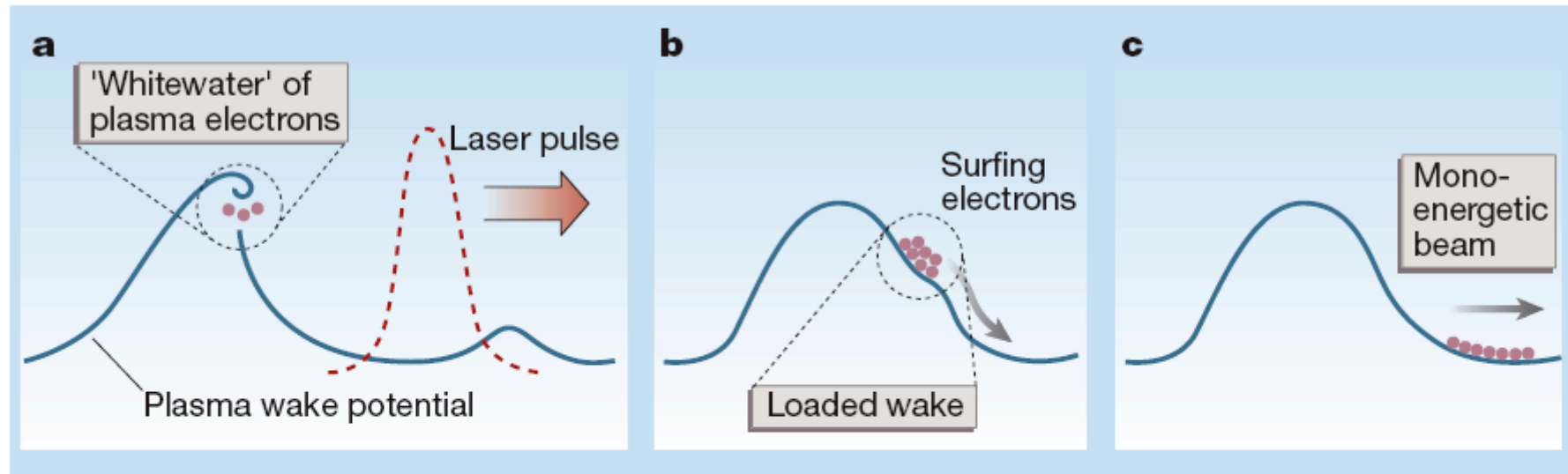


Figure 1 Wakefield acceleration. a, In a plasma excited by a laser pulse, the wake potential rises until it steepens and breaks. Electrons from the plasma are caught in the 'whitewater' and surf the wave. b, The load of the electrons deforms the wake, stopping further trapping of electrons from the plasma. c, As the electrons surf to the bottom of the wake potential, they each arrive bearing a similar amount of energy.

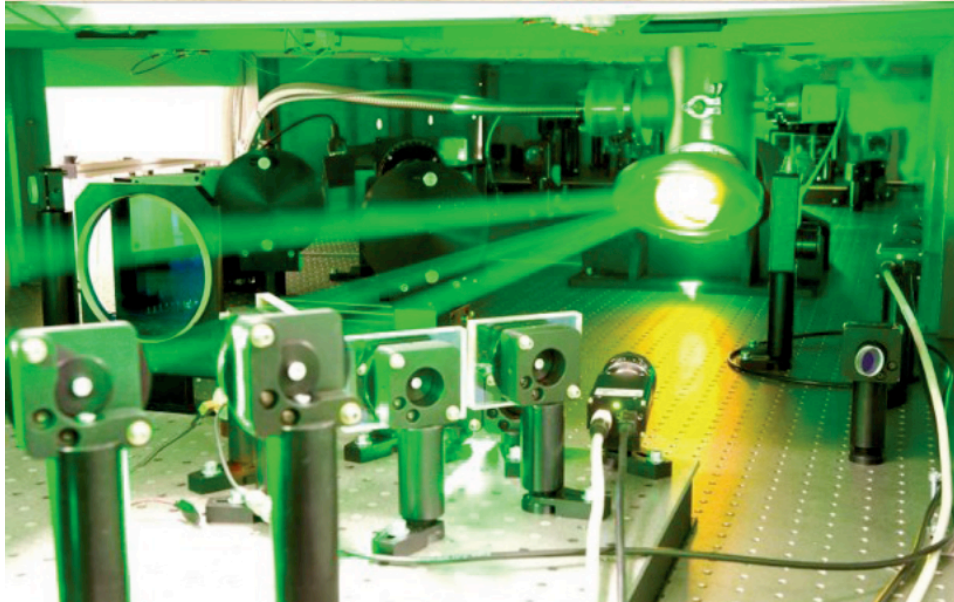
$$n \approx 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

$$\omega_p \approx 10^{13} \text{ Hz}$$

$$E = \frac{cm\omega_p}{e} \approx 100 \text{ GeV/m}$$



Laser & Plasma



$$\omega_{p,e} = \left(\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0} \right)^{1/2} \cong 900 (n_e [\text{cm}^{-3}])^{1/2}$$

Vicino infra-rosso 800nm

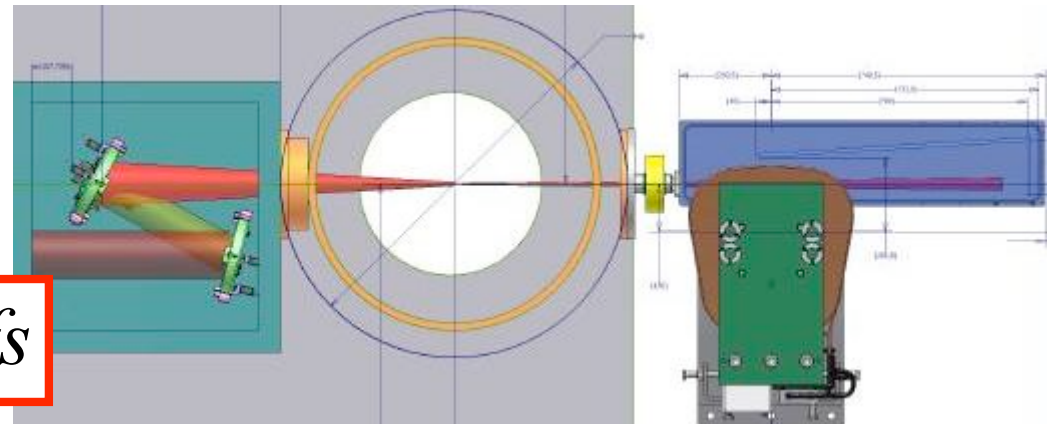
Impulsi ultra-corti <50 fs

Potenza di picco >100 TW

Intensità 10^{19} W/cm²

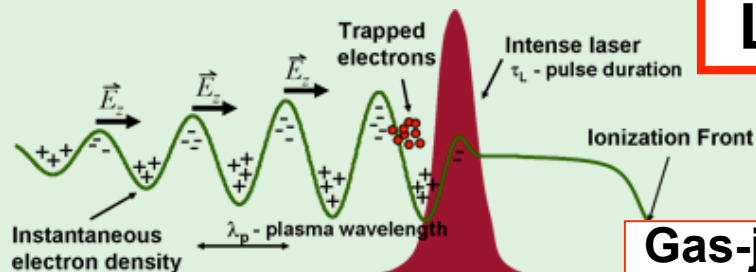
Plasma density $n_e = 10^{18}$ cm⁻³

$$\lambda_p \approx 10 \mu\text{m} \quad c\tau_L \approx \frac{\lambda_p}{2} \quad \tau_L \approx \text{fs}$$



Configurazioni Sperimentali

Plasma creato dal pre-pulse del laser

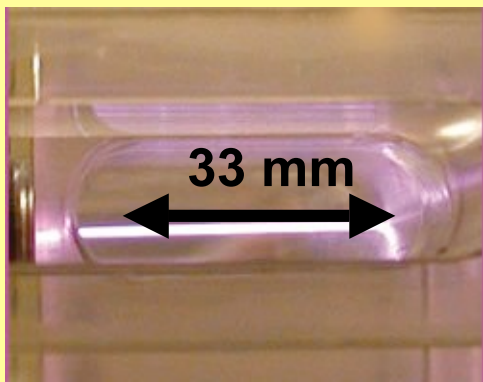


LOA

**Gas-jet 4mm
En >350 MeV**

Il pre-pulse ionizza il gas e l'impulso crea il wakefield accelerante

Capillari & scarica elettrica

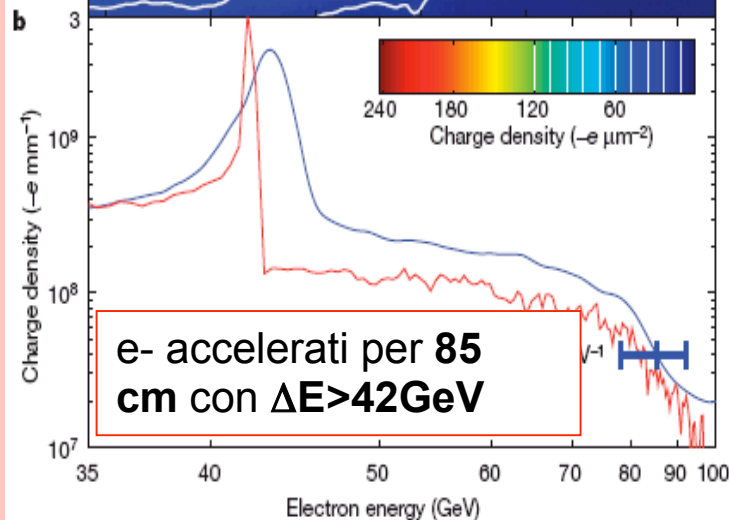
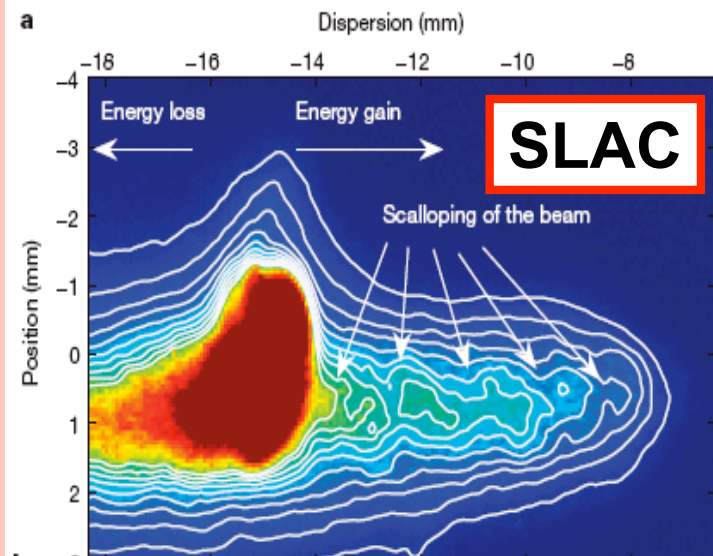


LOASIS

Uso del capillare come guida d'onda per il laser

e- a 1GeV in 33 mm

Wakefield creato dal fascio e-



PlasmonX@LNF

CARATTERISTICHE UNICHE: LINAC(**SPARC**) + Laser(**FLAME**)

NOVITA': INIEZIONE ESTERNA

FEL triggered
da un laser,
sincronizzazione
al fs

SPARC

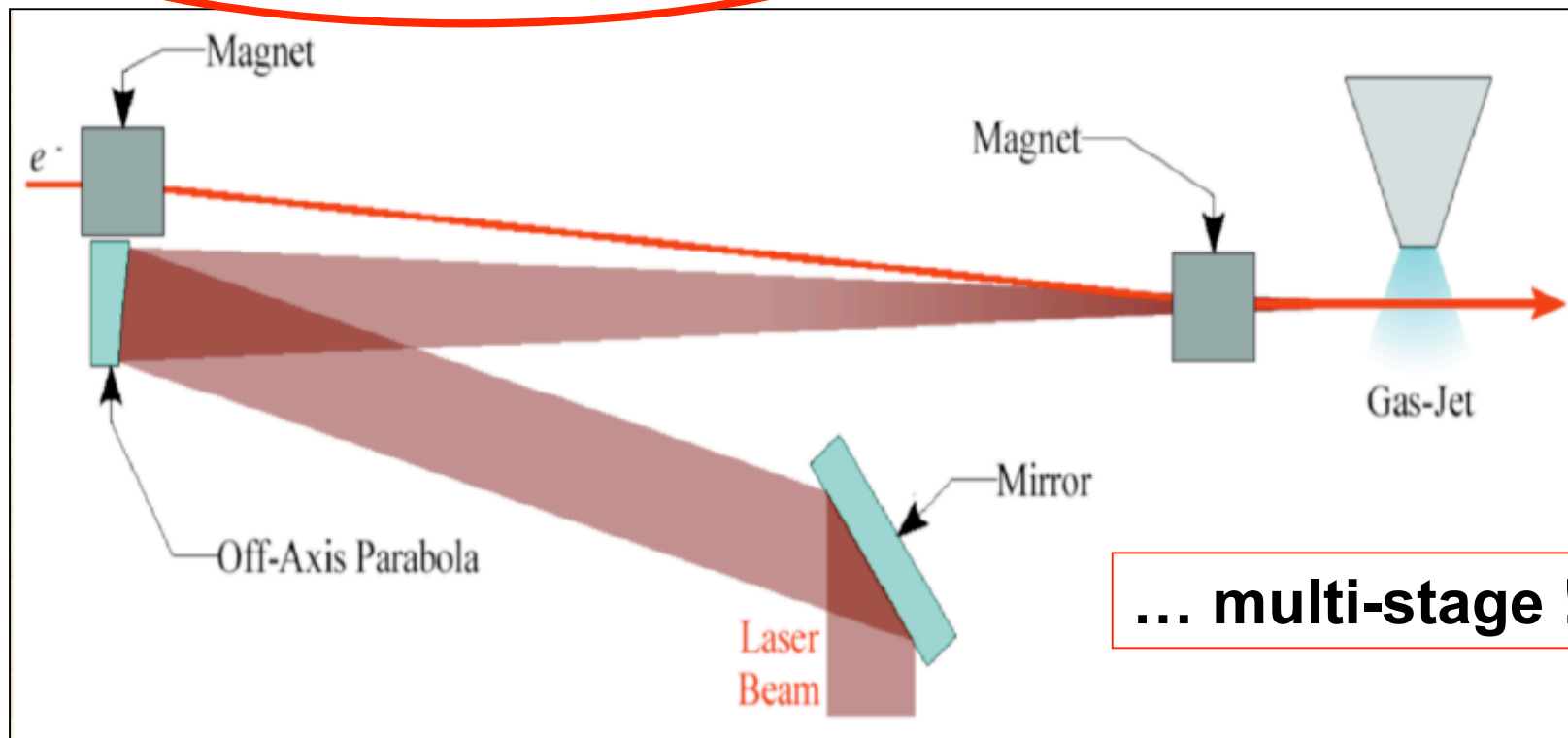
20 fs

800nm

300TW

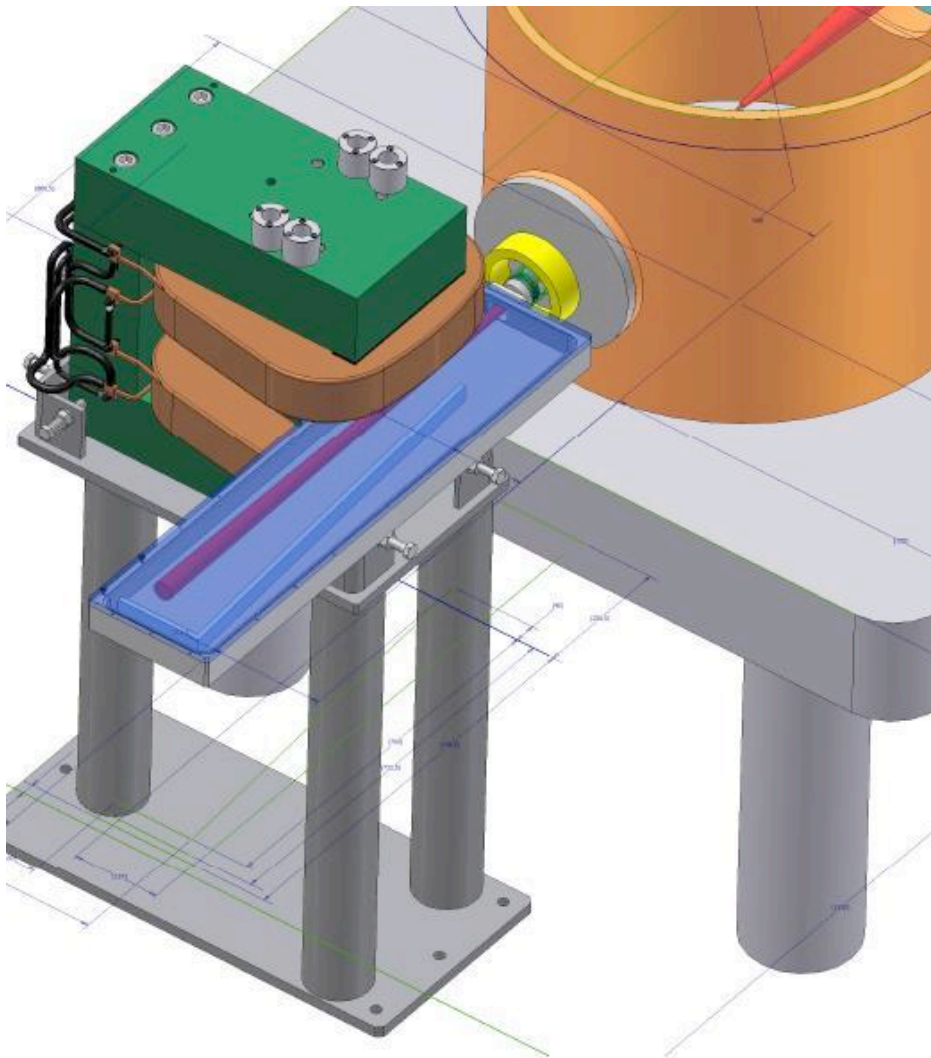
10Hz

FLAME



Prospettive

Gruppo PlasmonX di Roma:



Realizzare uno strumento in grado di misurare lo spettro degli e- prodotti

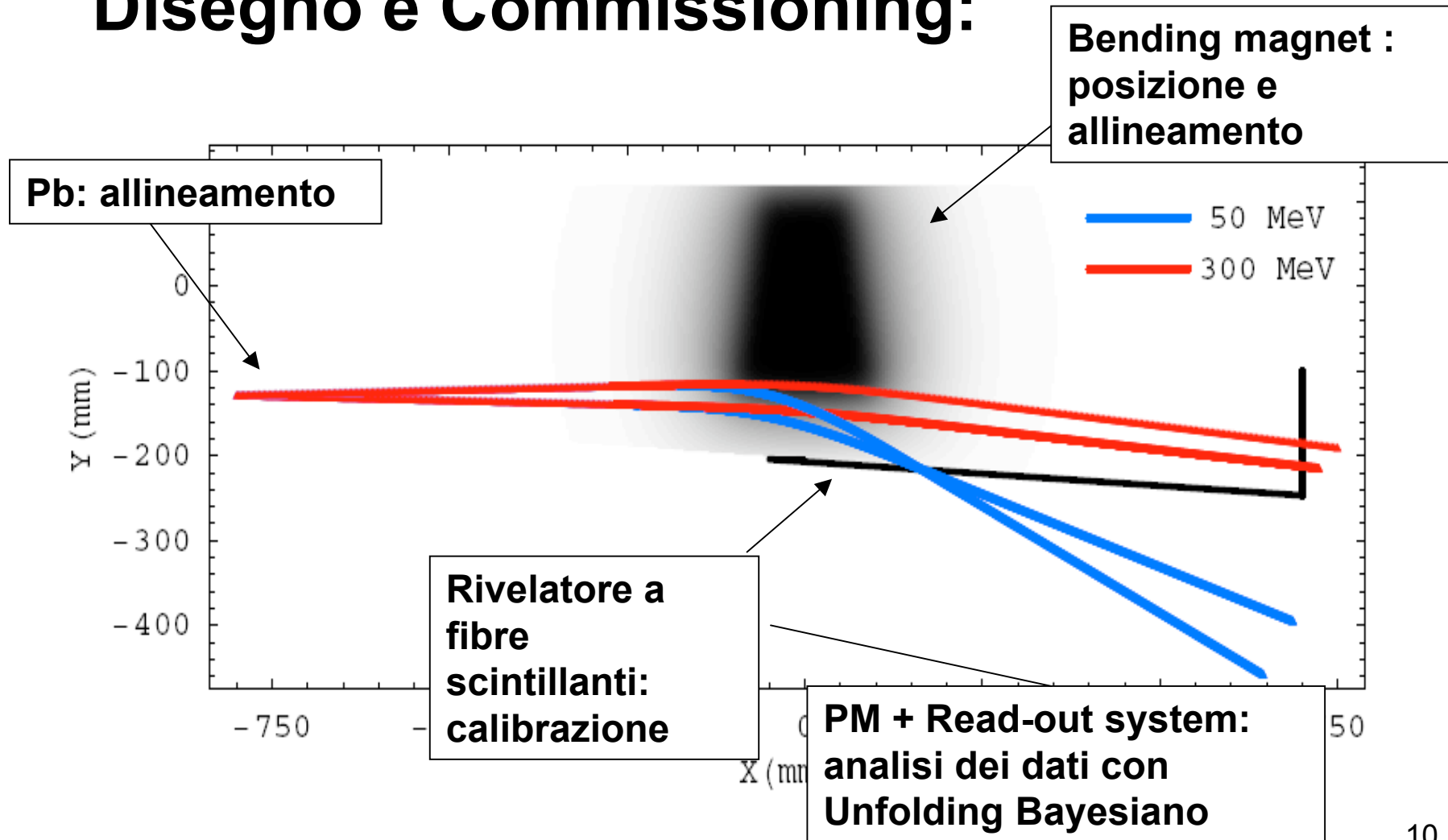
Altamente non convenzionale !

Sia nel campo dell'ottica non lineare che delle particelle.

- Range Energia: 10Mev --> 1GeV
- Risoluzione: <1% su largo range
- Fascio elettroni: 10^{10} particelle

Lo Spettrometro

Disegno e Commissioning:



Backup

Oscillazioni di Plasma(1)

Hp:

ioni fissi; $B=0$; modello 1D

$m\left(\frac{\partial v_e}{\partial t} + (v_e \cdot \nabla)v_e\right) = -eE$	1) Eq moto e-
$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot (n_e v_e) = 0$	2) Eq continuità
$\nabla \cdot E = 4\pi e(n_i - n_e)$	3) Eq Maxwell

0 → Equilibrio; 1 →

Perturbazione

$$n_e = n_0 + n_1 \quad v_e = v_0 + v_1 \quad E = E_0 + E_1$$

Quantità nulle
nell'approssimazione

$$\begin{aligned} \nabla n_0 = v_0 = E_0 &= 0 \\ \frac{\partial n_0}{\partial t} = \frac{\partial v_0}{\partial t} = \frac{\partial E_0}{\partial t} &= 0 \\ n_{0i} = n_{0e} \quad n_{1i} &= 0 \end{aligned}$$

Oscillazioni di Plasma(2)

Linearizzando le eq iniziali si ha:

$$m\left(\frac{\partial v_1}{\partial t} + (v_1 \cdot \nabla)v_1\right) = -eE_1$$

$$\frac{\partial n_1}{\partial t} + n_0 \nabla \cdot v_1 + v_1 \nabla \cdot n_0 = 0$$

$$\nabla \cdot E_1 = 4\pi e n_1$$

Assumendo andamento sinusoidale per le quantità oscillanti si deriva:

$$v_1 = v_1 e^{i(kx - \omega t)}$$

$$n_1 = n_1 e^{i(kx - \omega t)}$$

$$E_1 = E_1 e^{i(kx - \omega t)}$$

$$-i\omega m v_1 = -eE_1$$

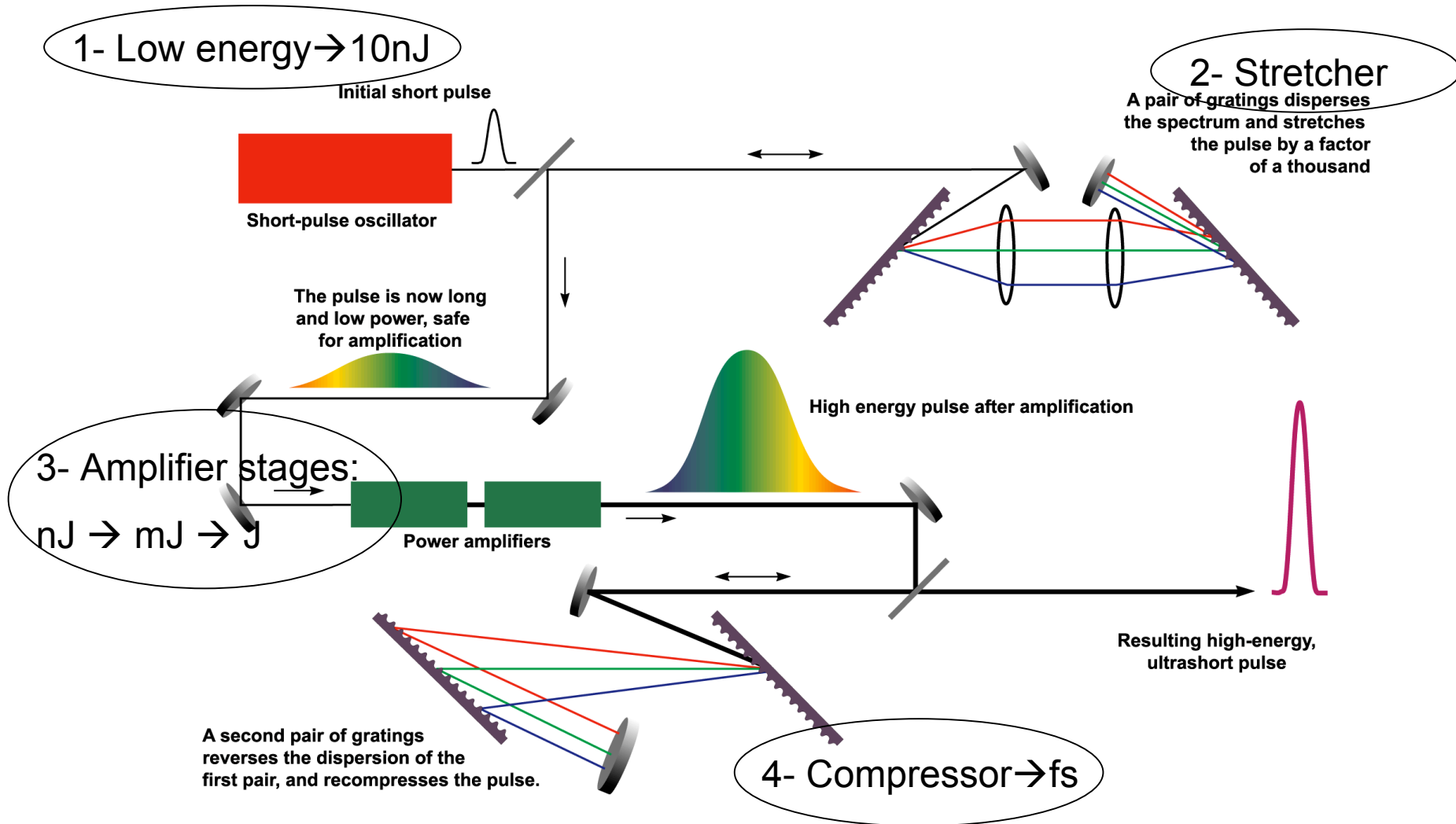
$$-i\omega n_1 = -n_0 i k v_1$$

$$i k E_1 = -4\pi e n_1$$

$$\omega^2 = \frac{4\pi n_0 e^2}{m}$$

Frequenza di oscillazione del plasma

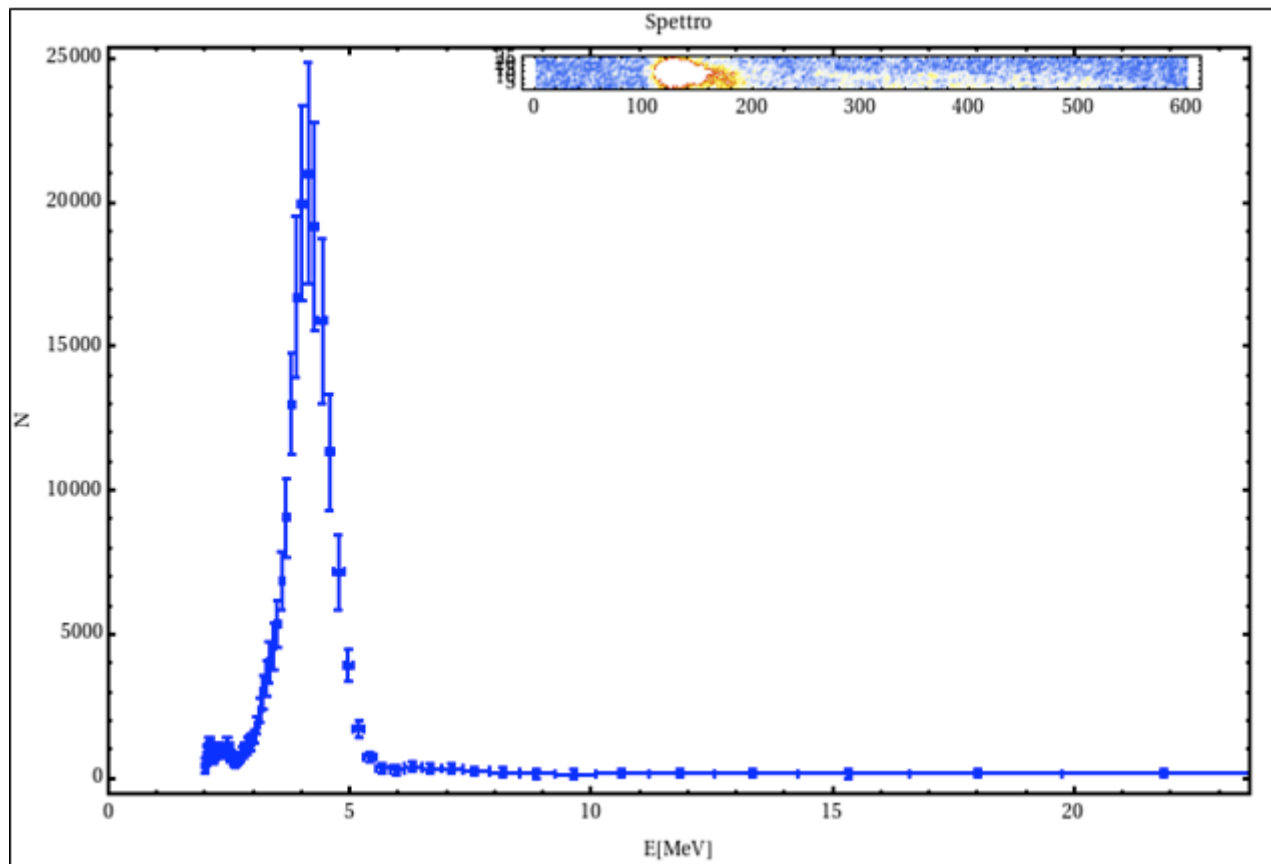
Che tipo di laser → Chirped Pulse Amplification



Oss: Allungando la durata temporale l'intensità W/cm^2 non danneggia le componenti ottiche!

Risultati sperimentali → Il primo esperimento Italiano
(Pisa)

Elettroni del plasma accelerati con laser



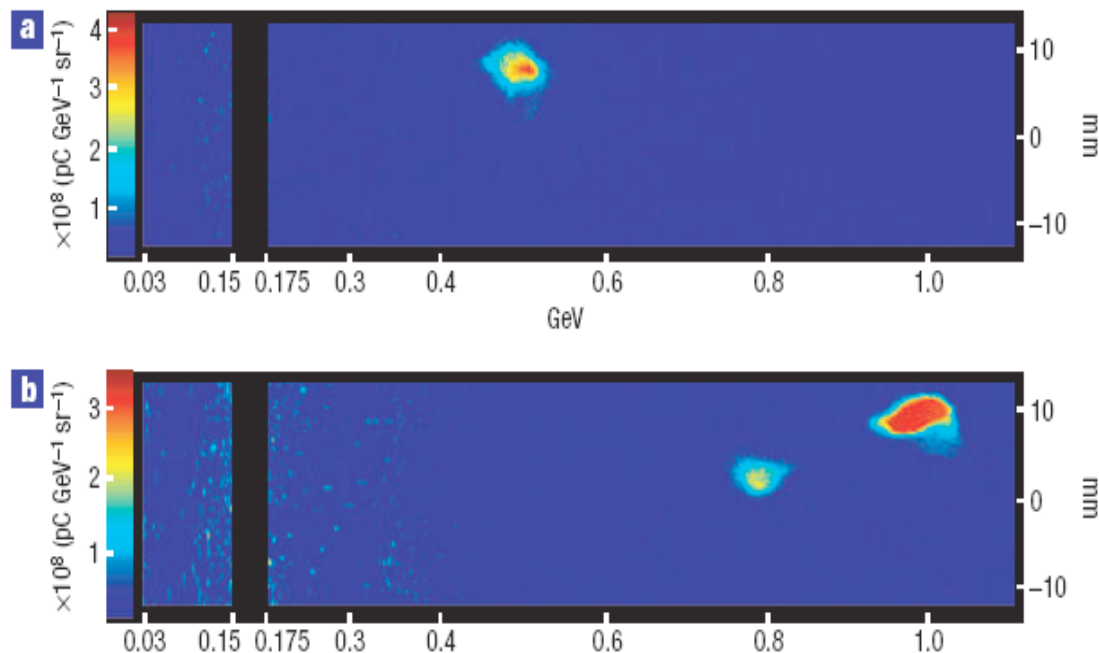
Risultati Sperimentali

GeV electron beams from a centimetre-scale accelerator

LOASIS

W. P. LEEMANS^{1*}, B. NAGLER¹, A. J. GONSALVES², Cs. TÓTH¹, K. NAKAMURA¹⁻³, C. G. R. GEDDES¹, E. ESAREY^{1*}, C. B. SCHROEDER¹ AND S. M. HOOKER²

	a	b
$P(TW)$	12	40
cap $\mu m \times mm$	225×33	310×33
Pulse(fs)	73	38
$n_e(cm^{-3})$	3.5×10^{18}	4.3×10^{18}
charge(pC)	50	30
$E(GeV)$	0.5	1.0
$\%E_{spread}$	5.6	2.5
div($mrad$)	2.0	1.6



Shot to shot fluctuation: $\pm 5\%$ in energy; $\pm 30\%$ in charge

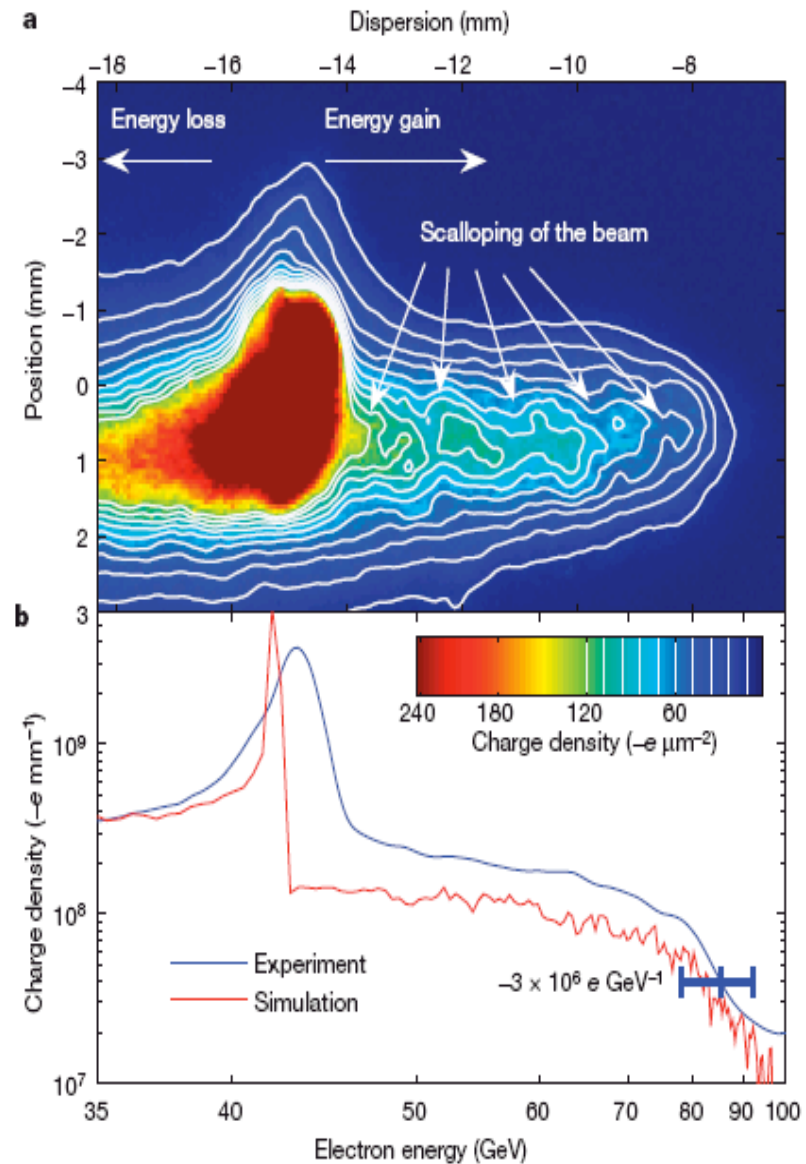
Electroni esterni accelerati con laser

SLAC

Energy doubling of 42 GeV electrons in a metre-scale plasma wakefield accelerator

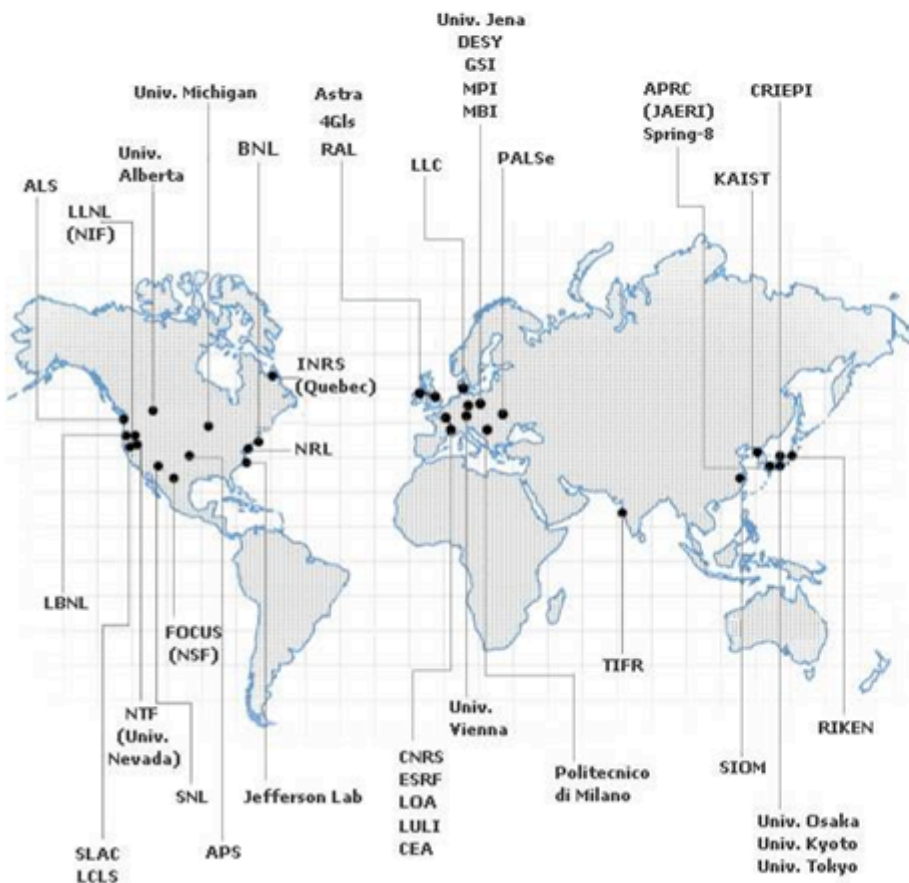
- 1- Wakefield creato dal fascio e- !!
- 2- parte del fascio perde energia
- 3- frazione di e- vengono accelerati per 85 cm con $\Delta E > 42 \text{ GeV}$

Campo accelerante $> 52 \text{ GeV/m}$!!



Stato dell'arte delle ricerche

E' tra i temi più investigati, a livello mondiale, nelle maggiori facilities esistenti



Le ricerche hanno portato alla produzione di:

PROTONI: energia massima 60 MeV (spettro termico)

ALTRI IONI: C - 90 MeV
F - 100 MeV
Pb - 430 MeV (+altri...)

N° particelle: $\sim 10^9$ - 10^{13}

Emittanza long.: $< 10^{-4}$ eV.s

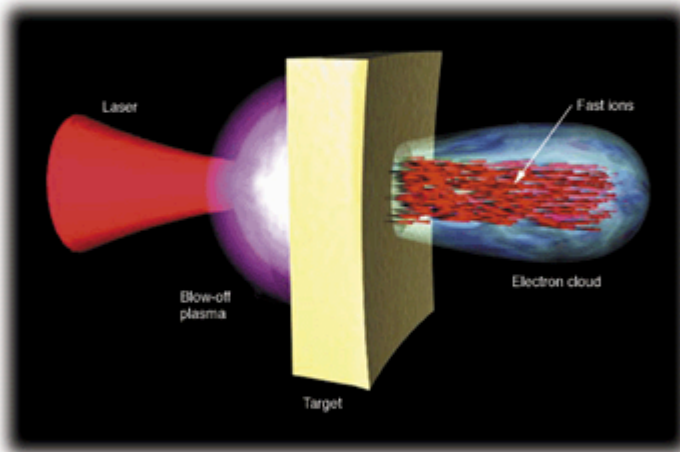
Emittanza trasv.: $< 10^{-8}$ m rad

Durata temporale pacchetto: \sim ps

...in una scala spaziale $\sim \mu\text{m}$

Accelerazione di ioni indotta da impulsi laser intensi

Se un impulso laser ultraintenso ultrabreve
colpisce la superficie di un film solido sottile
si osserva la produzione di popolazioni di ioni energetici
Target Normal Sheath Acceleration (TNSA)



Parametri fisici caratteristici del sistema

Laser – *energia:* 0,1-1000 J,
durata impulso: 10-1000 fs, *intensità* 10^{18} - 10^{21} W/cm²

Bersaglio solido – *tipo:* conduttori e isolanti,
spessore: 0,1-100 μ m

Ioni accelerati – protoni in condizioni ordinarie,
altri ioni in condizioni specifiche

Le ricerche (tema “hot” a livello mondiale) hanno portato alla produzione di:

PROTONI: energia massima **60 MeV** (spettro termico)

ALTRI IONI: C - 90 MeV; F – 100 MeV; Pb – 430 MeV (+altri...)

N° particelle: $\sim 10^9$ - 10^{13} ; Emittanza long.: $< 10^{-4}$ eV.s; Emittanza trasv.: $< 10^{-8}$ m rad; Durata temporale: \sim ps

...in una scala spaziale $\sim \mu$ m