

Il laser di alta potenza FLAME

OUTLINE

Il Laser:

Emissione Stimolata

Amplificazione

Mode-lock

Q-switch

Assorbitore saturabile

Catena laser e CPA – Chirped Pulse Amplification

Il laser FLAME

OUTLINE

Esperimenti che si possono fare con FLAME e risultati

Accelerazione di elettroni tramite Self injection

Accelerazione di protoni

Propagazione del laser in aria

Esperimenti che si possono fare accoppiando FLAME e SPARC e risultati

Thomson scattering

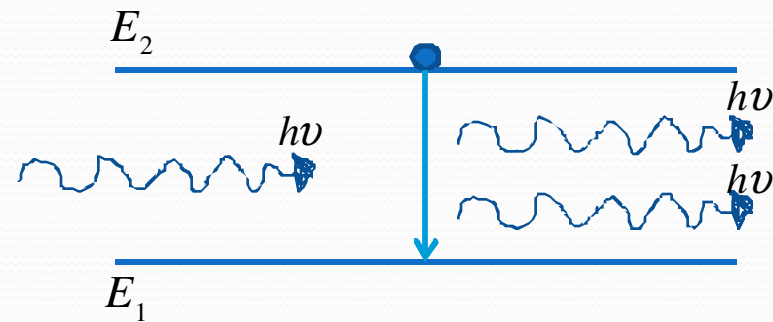
External injection

LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

L'acronimo LASER → Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

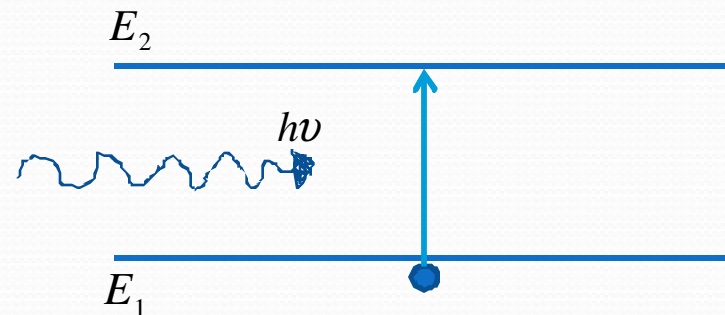
L'*emissione* è il processo per cui un atomo passa da un livello energetico superiore (E_2) ad uno inferiore ($E_1 < E_2$) quando su di esso incide un fotone di energia:

$$h\nu = (E_2 - E_1)$$



In questo caso, l'atomo emette un secondo fotone di uguale energia ($E_2 - E_1$) che si aggiunge a quello incidente.

Naturalmente, un atomo che passa da un livello di energia inferiore (E_1) ad un livello di energia superiore ($E_2 > E_1$) quando un fotone di energia ($E_2 - E_1$) incide su di esso, viene *assorbito*.



LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Il processo di emissione di fotoni da un mezzo è cosa assai comune in natura.

I corpi materiali, infatti, subiscono continuamente transizioni tra livelli energetici, assorbendo e emettendo fotoni. Queste transizioni sono dovute all'eccitazione termica e il processo che le causa si chiama *emissione spontanea*.

Si parla, invece, di *emissione stimolata* quando un atomo viene fatto passare, in maniera controllata, da un livello di energia superiore a uno inferiore.

Le differenze fondamentali tra il fotone emesso per emissione stimolata e quello emesso per emissione spontanea sono:

1. I fotoni stimolati emessi dai vari atomi hanno una relazione di fase fissa tra loro e con l'onda incidente; i fotoni spontanei, viceversa, sono emessi con fase casuale.
2. I fotoni stimolati sono emessi nella direzione dell'onda incidente, mentre quelli spontanei sono emessi in qualsiasi direzione.

Queste due differenze sono alla base delle caratteristiche di *coerenza* della radiazione laser.

LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Perché il processo di *emissione stimolata* sia di sola emissione, tutti gli atomi devono trovarsi in un livello energetico alto → c'è bisogno di fare una “*inversione di popolazione*”.

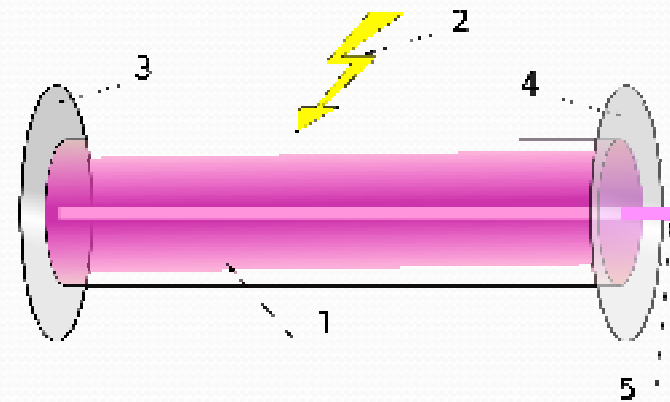
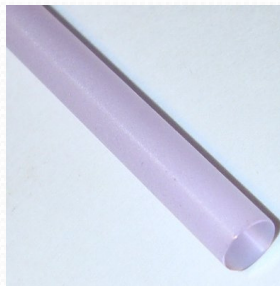
Un'inversione di popolazione viene fornita, all'interno di un opportuno mezzo, tramite un *pompaggio*.

Il pompaggio non è altro che un modo per eccitare tutti gli atomi del mezzo e portarli in un livello energetico alto (è un processo di quasi solo assorbimento).

Una volta che gli atomi sono tutti in un livello energetico alto, basterà che un fascio fotonico o un flash di luce incida sul mezzo per avere *emissione stimolata* e dunque *amplificazione*.

Amplificazione ottica con flash di luce

- 1) Mezzo ottico attivo (ex. rod Nd:YAG)
- 2) Flash di luce
- 3) Specchio
- 4) Specchio semiriflettente
- 5) Fascio laser in uscita



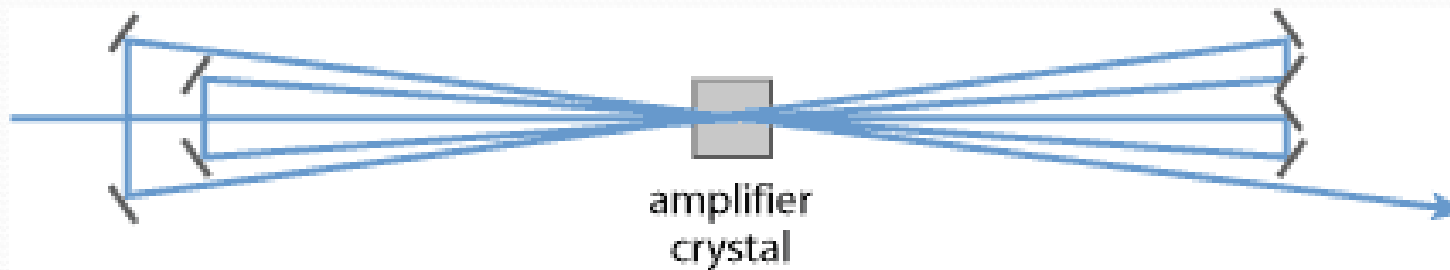
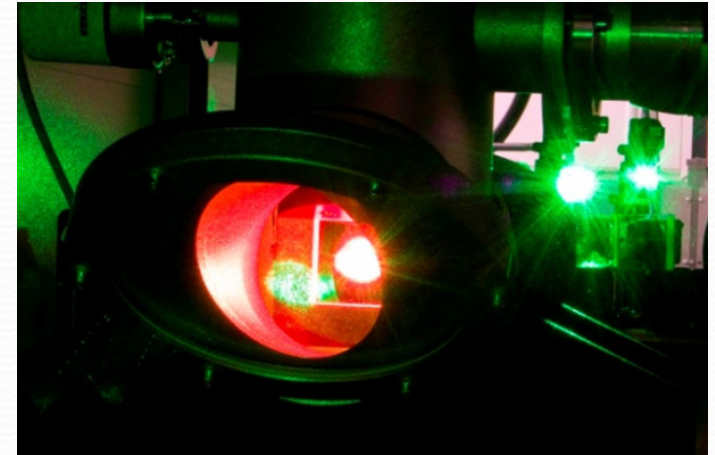
LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Amplificazione ottica: amplificatori multipasso

In questo caso, per l'inversione di popolazione, viene utilizzato un fascio di fotoni (ex. i fotoni emessi da un amplificatore con flash di luce).

Il mezzo attivo è un cristallo (ex. Titanio-Zaffiro).

Il mezzo attivo viene pompato da un "fascio di pompa" che "prepara" il cristallo per il passaggio del fascio "da amplificare" (il main o fascio principale).



Per ottimizzare il processo di amplificazione, il fascio principale viene fatto passare più volte attraverso il mezzo attivo!

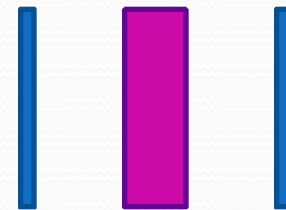
LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Due tecniche fondamentali sono utilizzate nella costruzioni di sistemi laser:

1. Mode-locking;
2. Q-switch.

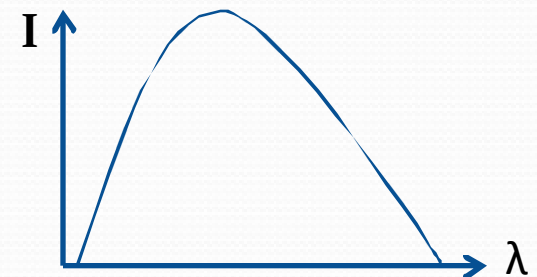
Mode-lock → oscillatore

Cavità risonante: due specchi uno di fronte all'altro e un mezzo attivo tra di loro; i fasci di fotoni, interferiscono tra di loro dando vita a onde stazionarie (o modi).



Fase scorrelata: ogni modo oscilla indipendentemente → interferenze costruttive o distruttive random → l'intensità del fascio che esce dalla cavità è mediata (*continuous wave* o CW).

Fase correlata: i modi interferiranno periodicamente in maniera costruttiva → dalla cavità esce un impulso luminoso a largo spettro e temporalmente breve [fs] → i modi sono “*mode-locked*”.



LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

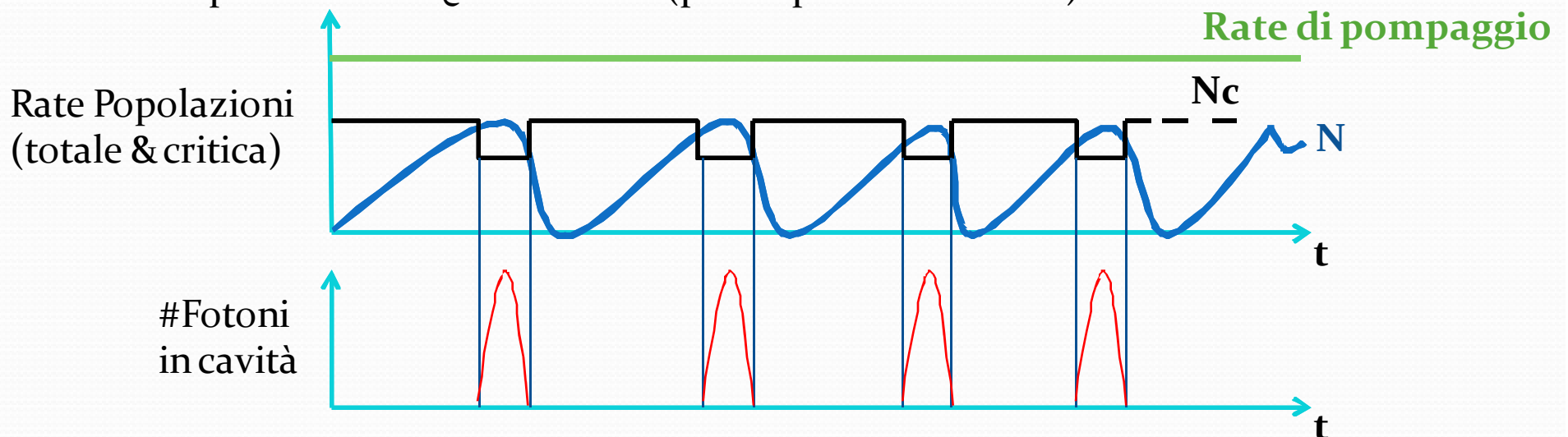
Q-switch o celle di Pockel

Il fattore Q di una cavità è definito come:

$$Q = \frac{\text{energia accumulata nella cavità}}{\text{variazione di energia nell'unità di tempo}}$$

Se la cavità ha poche perdite, Q è alto e viceversa.

Per ottenere impulsi brevi con alta potenza di picco, si mantiene il Q basso (alte perdite in cavità) e poi improvvisamente, tramite l'utilizzo di un interruttore, si fa variare rapidamente il Q della cavità (poche perdite in cavità).



LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Assorbitore saturabile

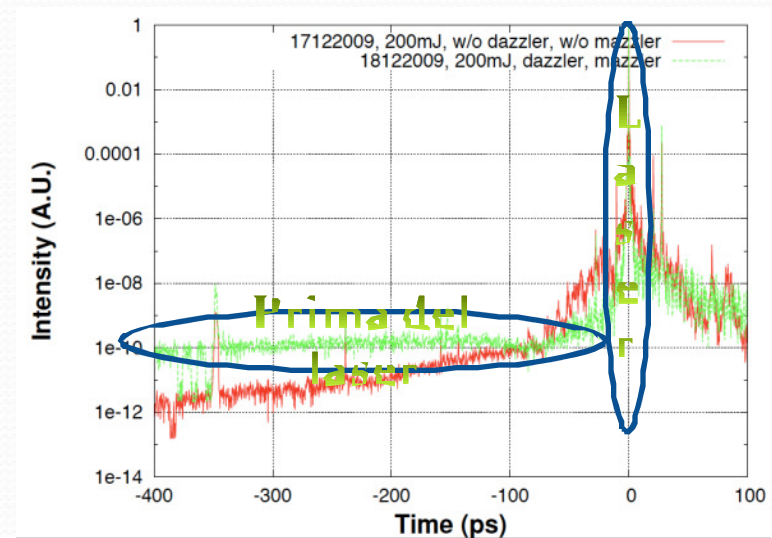
L'assorbitore saturabile è un dispositivo ottico la cui trasmissione varia al variare dell'intensità del fascio incidente.

Fascio di alta intensità: PASSA.

Fascio di bassa intensità: NON PASSA.

E' utilizzato per "pulire" il fascio uscito da una cella di Pockel e quindi a migliorare il *contrasto* del fascio laser.

$$\text{contrasto} = \frac{\text{intensità del fascio prima del main}}{\text{intensità del main}}$$



OUTLINE

Il Laser:

Emissione Stimolata

Amplificazione

Mode-lock

Q-switch

Assorbitore saturabile

Catena laser e CPA – Chirped Pulse Amplification

Il laser FLAME

Catena LASER

Pompa + mezzo attivo + cavità risonante
INPUT: 3.5W @ ≈ 630 nm
OUTPUT: 300mW @ 800 nm
REP.RATE: 80 kHz.

Pompa + mezzo arrivo + 3 celle di Pockel
INPUT: pochi μ J
OUTPUT: decine di μ J
Amplificatore multipasso a passo "variabile"

Due gratings

Oscillatore

Booster

Stretcher

Rigenerativo

*Cella di Pockel + pompa +
amplificatore + assorbitore saturabile*
INPUT: pochi nJ
OUTPUT: pochi μ J
REP.RATE: 10 Hz.

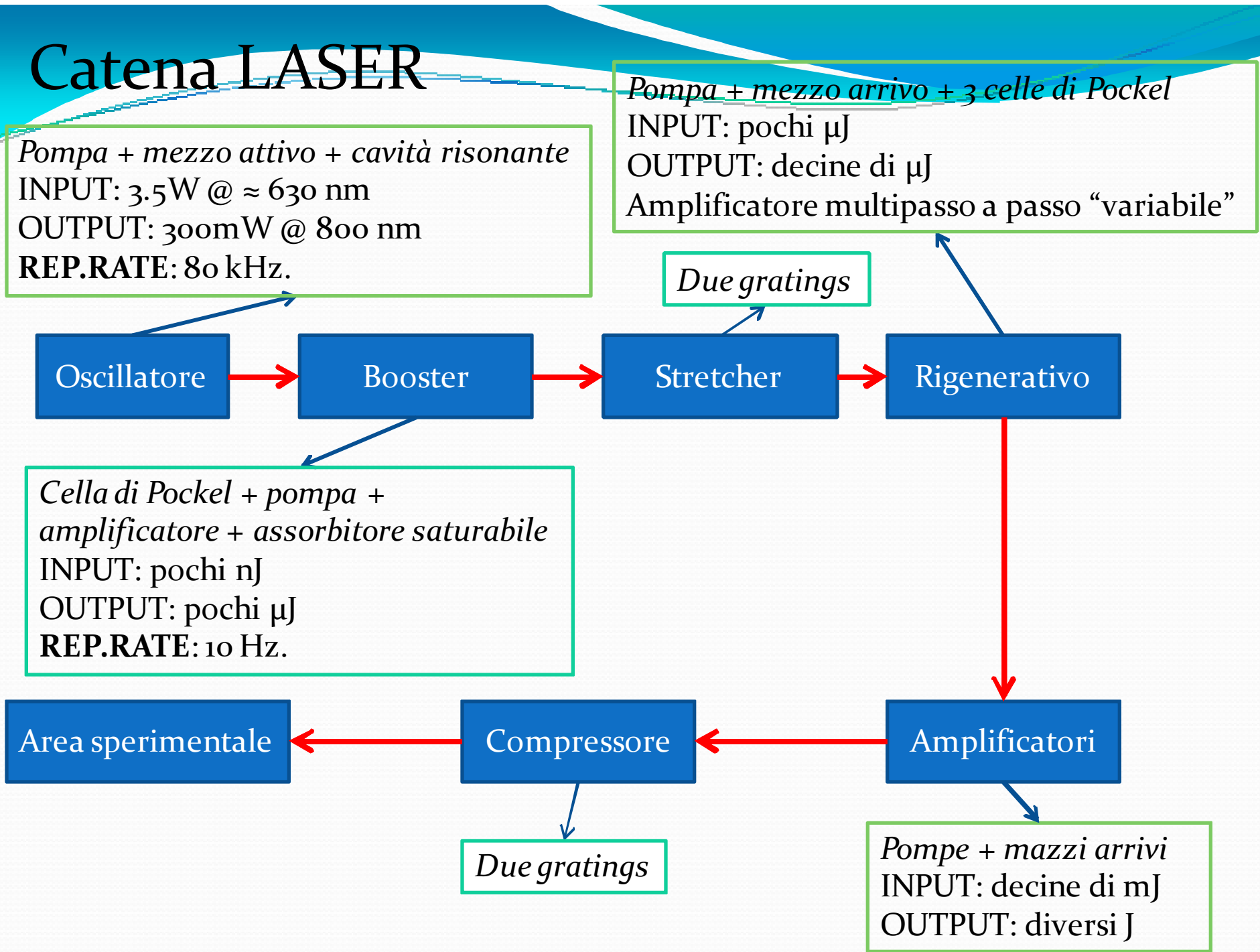
Area sperimentale

Compressore

Amplificatori

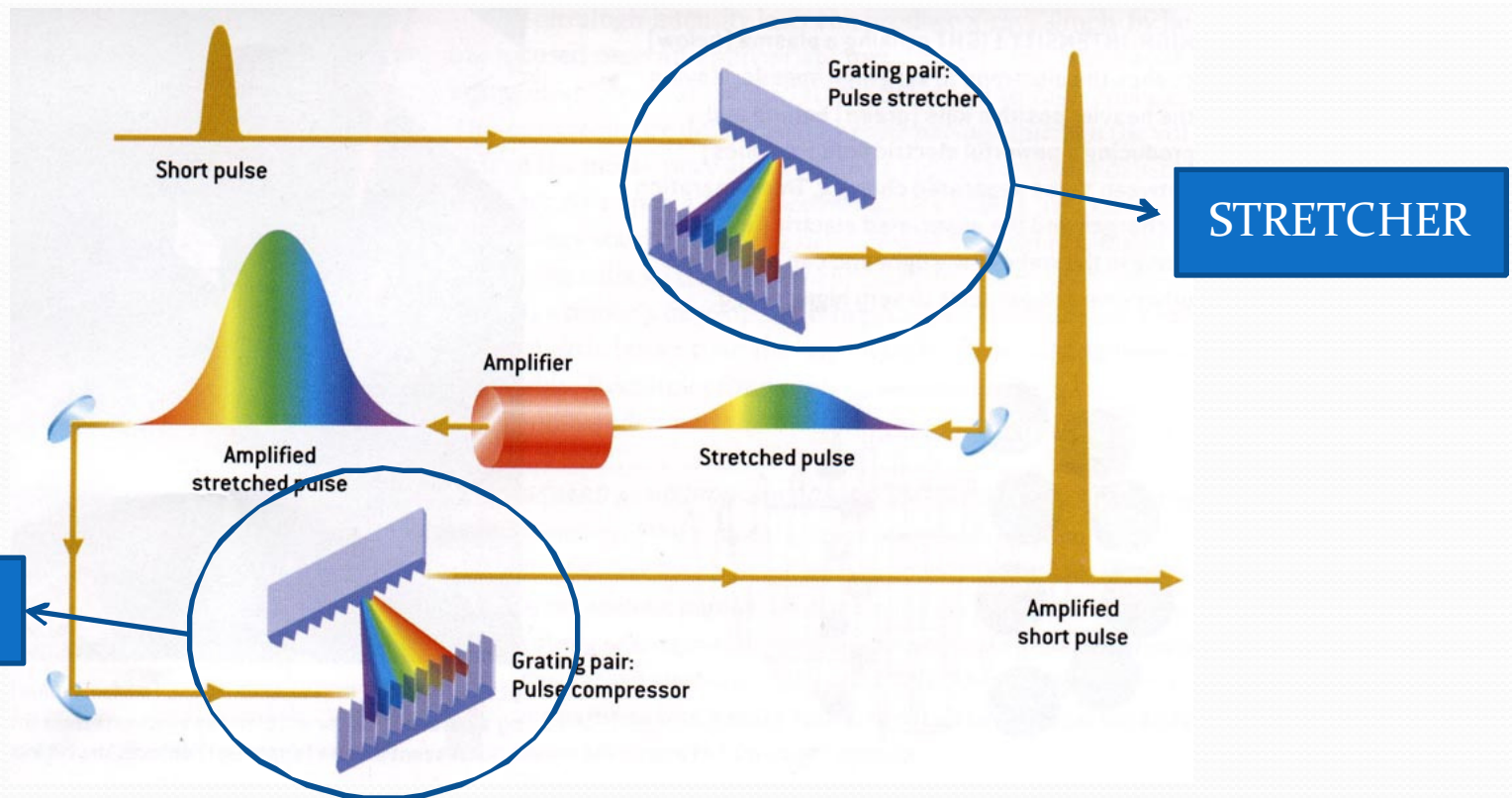
Due gratings

Pompe + mazze arrivi
INPUT: decine di mJ
OUTPUT: diversi J

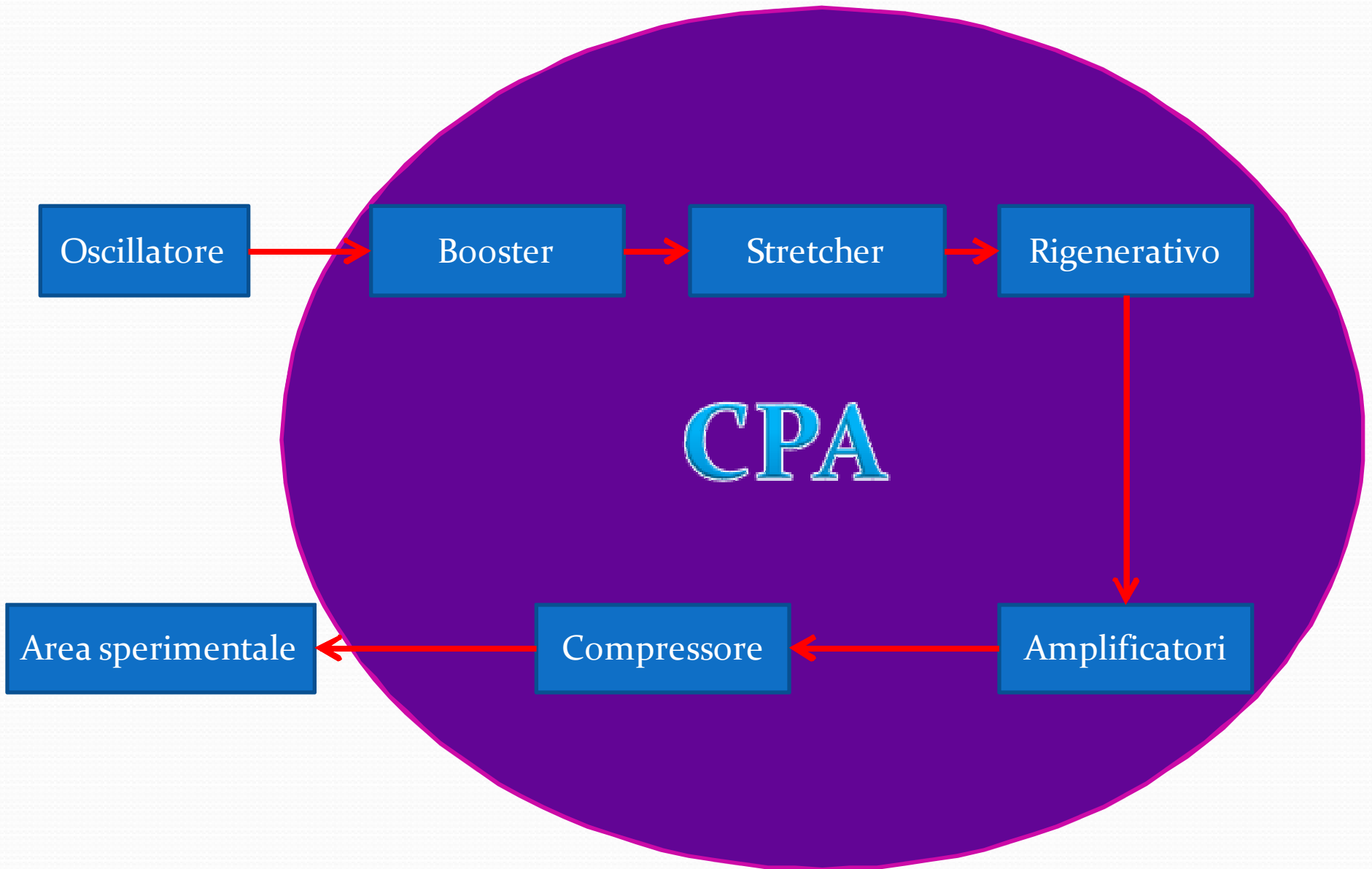


CPA: stretcher e compressore

La CPA - **C**hirped **P**ulse **A**mplification - è l'idea, semplice e geniale, suggerita nel 1985 da Strickland and Mourou, che si basa sulla manipolazione reversibile delle caratteristiche temporali del fascio laser e che permette di amplificare il fascio laser senza danneggiare le ottiche, ottenendo alte potenze e impulsi ultracorti.



Catena LASER



OUTLINE

Il Laser:

Emissione Stimolata

Amplificazione

Mode-lock

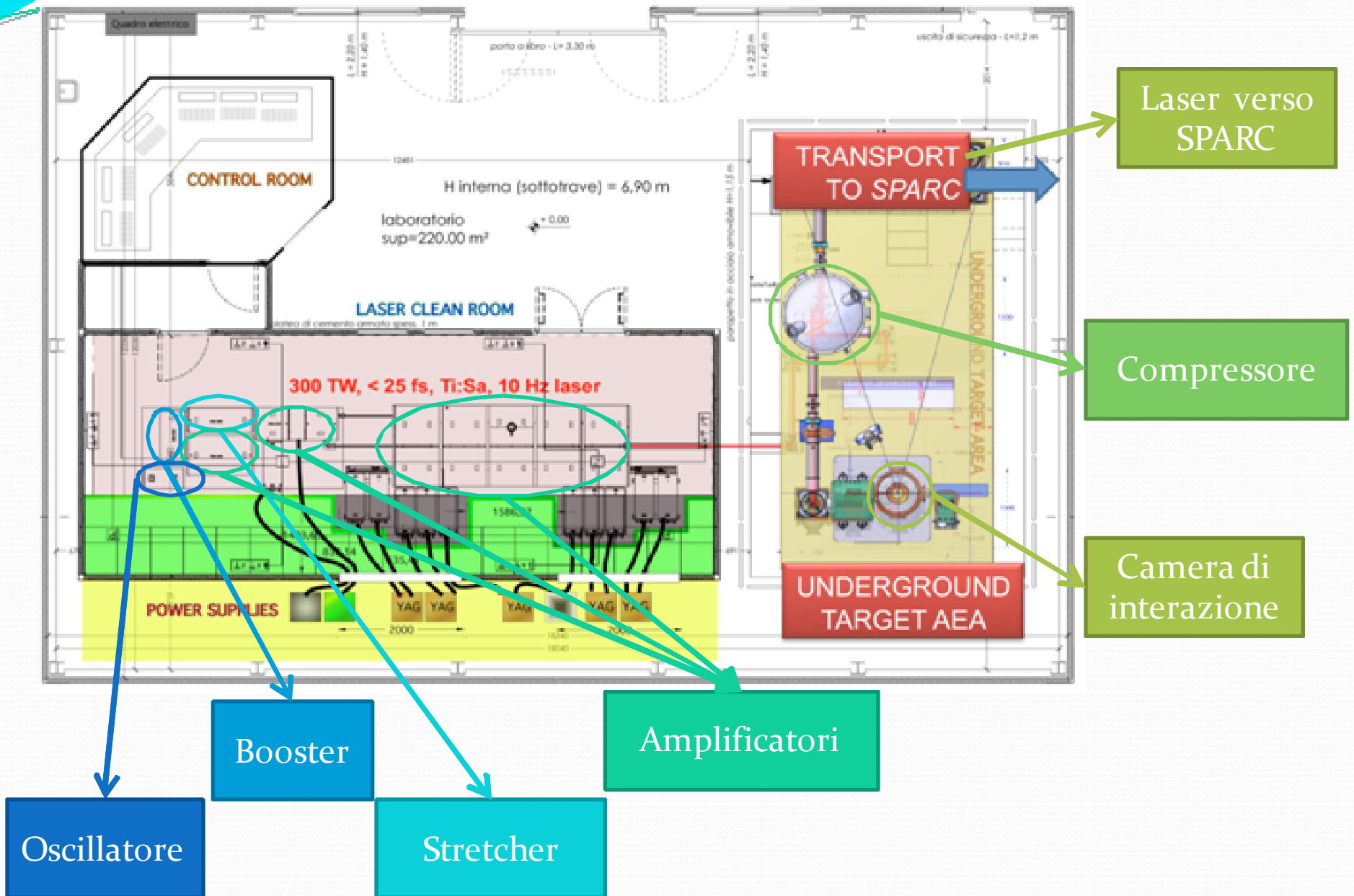
Q-switch

Assorbitore saturabile

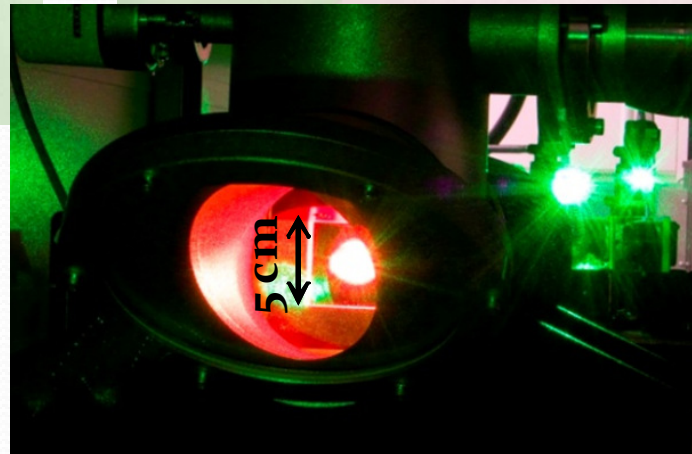
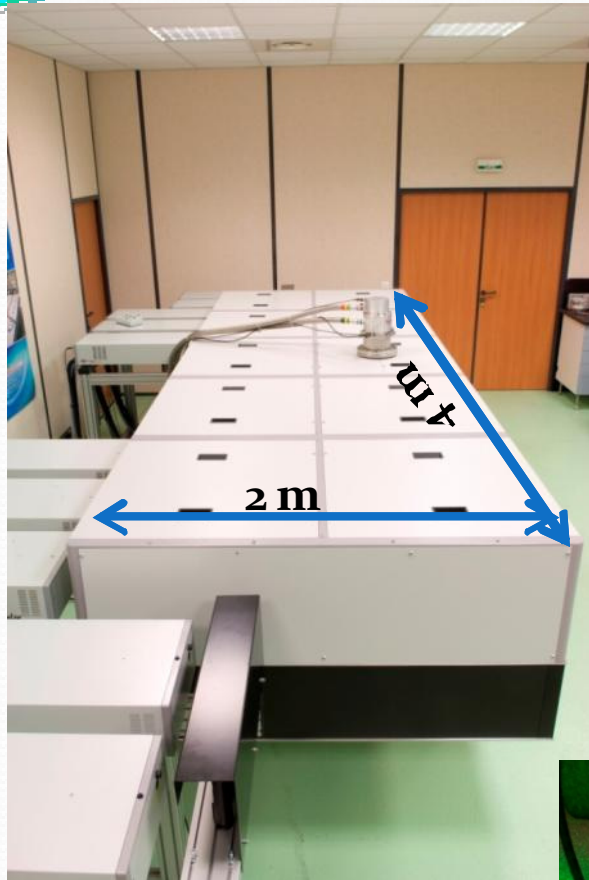
Catena laser e CPA – Chirped Pulse Amplification

Il laser FLAME

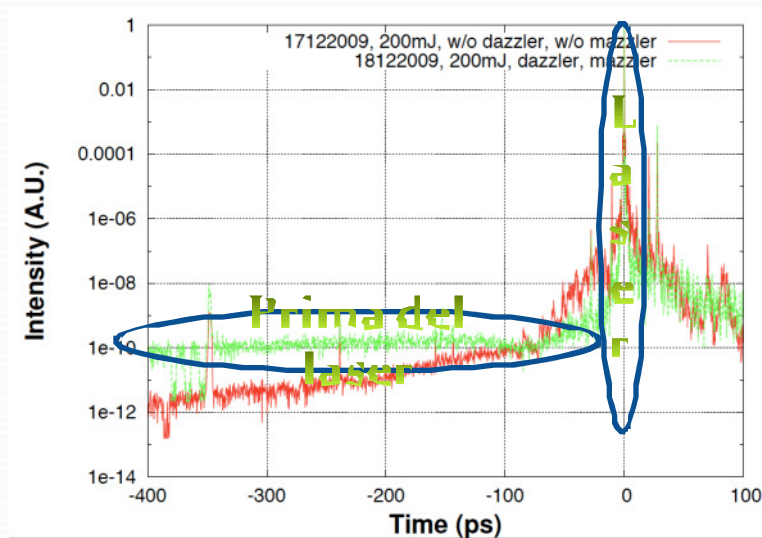
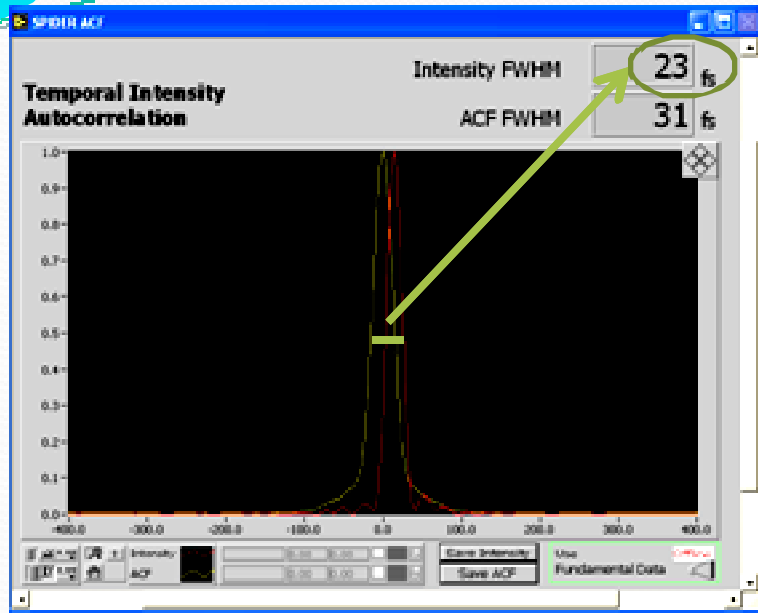
Il laser FLAME



Il laser FLAME



Il laser FLAME



CARATTERISTICHE DEL LASER:

Energia massima: 7J

Energia massima sul target: ~5J

Durata minima: 23 fs

Lunghezza d'onda: 800 nm

Larghezza di banda: 60/80 nm

Spot-size @ focus: 10 μm

Potenza massima: ~300 TW

Contrasto: 10^{10}

OUTLINE

Esperimenti che si possono fare con FLAME e risultati

Accelerazione di elettroni tramite Auto-iniezione

Accelerazione di protoni

Propagazione del laser in aria

Esperimenti che si possono fare accoppiando FLAME e SPARC e risultati

Thomson scattering

External injection

Definizione di plasma

“Il plasma è un gas quasi neutro di particelle cariche e neutre che esibiscono un comportamento collettivo”.*

Un gas è “quasi neutro”, quando è così neutro da poter affermare che la densità degli ioni è circa uguale alla densità degli elettroni che è circa uguale alla densità totale del plasma, ma non è abbastanza neutro da poter dire che le forze elettromagnetiche di interazione sono nulle.

Per “comportamento collettivo”, invece, si intende il comportamento che presentano le cariche quando cooperano nelle loro azioni. Un tipico esempio di comportamento collettivo è quello che esibiscono le particelle nel dar vita ad un'onda.

*FF Chen, *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2nd ed., Vol. 1, Plenum Press, New York, 1984

Definizione di plasma

Se si rompe la neutralità del plasma dislocando gli elettroni lontano dalla condizione di neutralità, si creerà nel plasma un campo elettrico che spinge gli elettroni nella loro posizione originale. Per fare ciò, gli elettroni inizieranno ad oscillare attorno alla posizione di equilibrio con una frequenza caratteristica nota come frequenza di plasma:

$$\omega_p = \left(4\pi n_0 e^2 / m_e \right)^{1/2}$$

Densità degli elettroni

Carica dell'elettrone

Massa a riposo dell'elettrone

Il campo tipico che il plasma può sostenere è:

$$E_0 = cm_e \omega_p / e \Rightarrow E_0 \approx 96 \sqrt{n_0} [cm^{-3}]$$

se $n_0 = 10^{18} cm^{-3} \Rightarrow E_0 \approx 96 GV/m$ → Campo accelerante

Laser wakefield accelerators

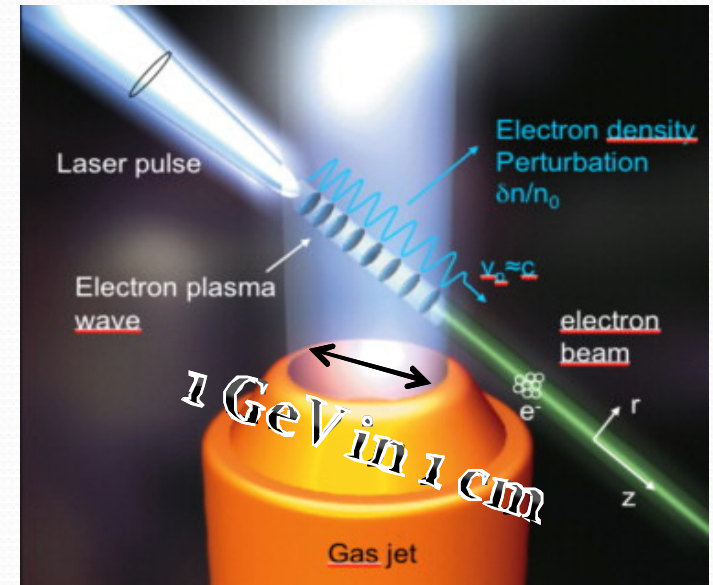
I Laser wakefield accelerators (LWFA) sono un nuovo tipo di acceleratori in grado di produrre campi acceleranti fino a 100 GV/m \rightarrow possibilità di avere acceleratori compatti in grado di accelerare particelle alla scala dei GeV in pochi centimetri.

PRO:

1. Costo delle facility;
2. Compattezza: parola chiave TABLE TOP!

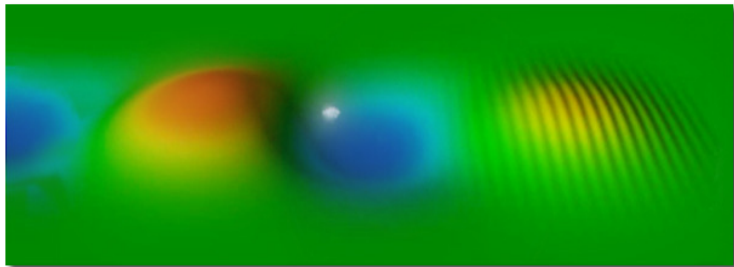
CONTRO:

1. Instabilità dei fasci accelerati \rightarrow necessità di studiare nuovi schemi di controllo del fascio;
2. Qualità dei fasci accelerati non ancora paragonabili ai fasci accelerati in maniera convenzionale \rightarrow ricerca in corso.



Teoria dei laser wakefield accelerators

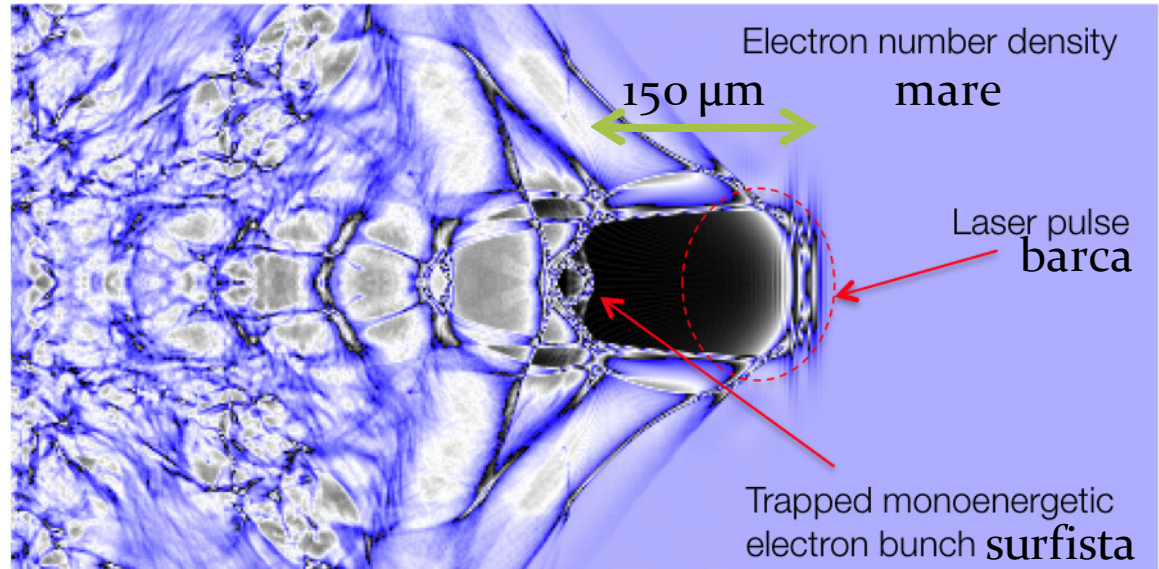
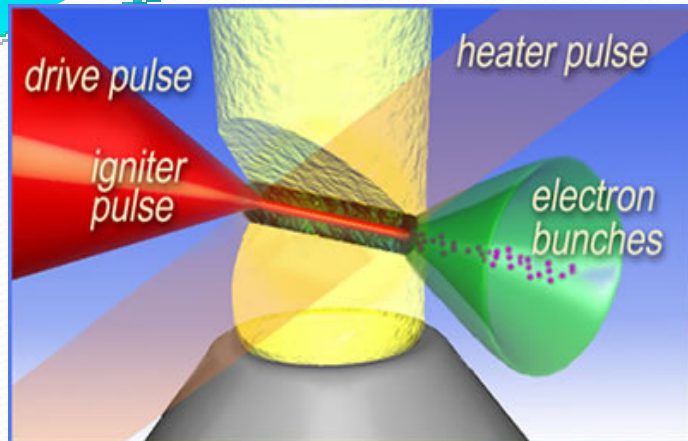
Il principio di funzionamento è concettualmente semplice: il passaggio della luce attraverso il plasma genera un'onda di plasma così come una barca genera un'onda passando sull'acqua. Gli elettroni possono “surfare” l'onda di plasma come un surfista nel mare, guadagnando energia dall'onda ed essere accelerati.



L'idea nasce nel 1979 da Tajima e Dawson*, prima dell'invenzione della CPA che è stata di fondamentale importanza per la costruzione di laser di alte energie e impulsi ultra corti.

*Tajima, T. & Dawson, J. M. , *Phys. Rev. Lett.* **43**, 267–270 (1979).

Teoria dei laser wakefield accelerators

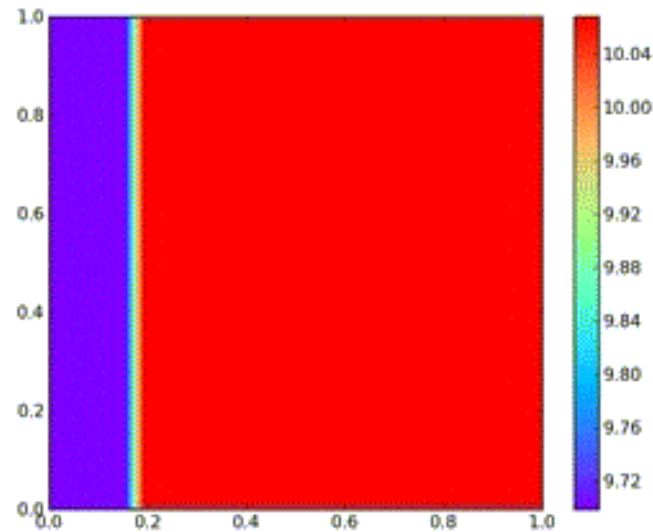


Per la ionizzazione →
Campo minimo: 10 GV/m



L'urto violento del laser con il gas dà vita a una bolla: equivalente a un tuffatore che arrivando violentemente in acqua, crea una bolla di aria dietro di sé!

Teoria dei laser wakefield accelerators

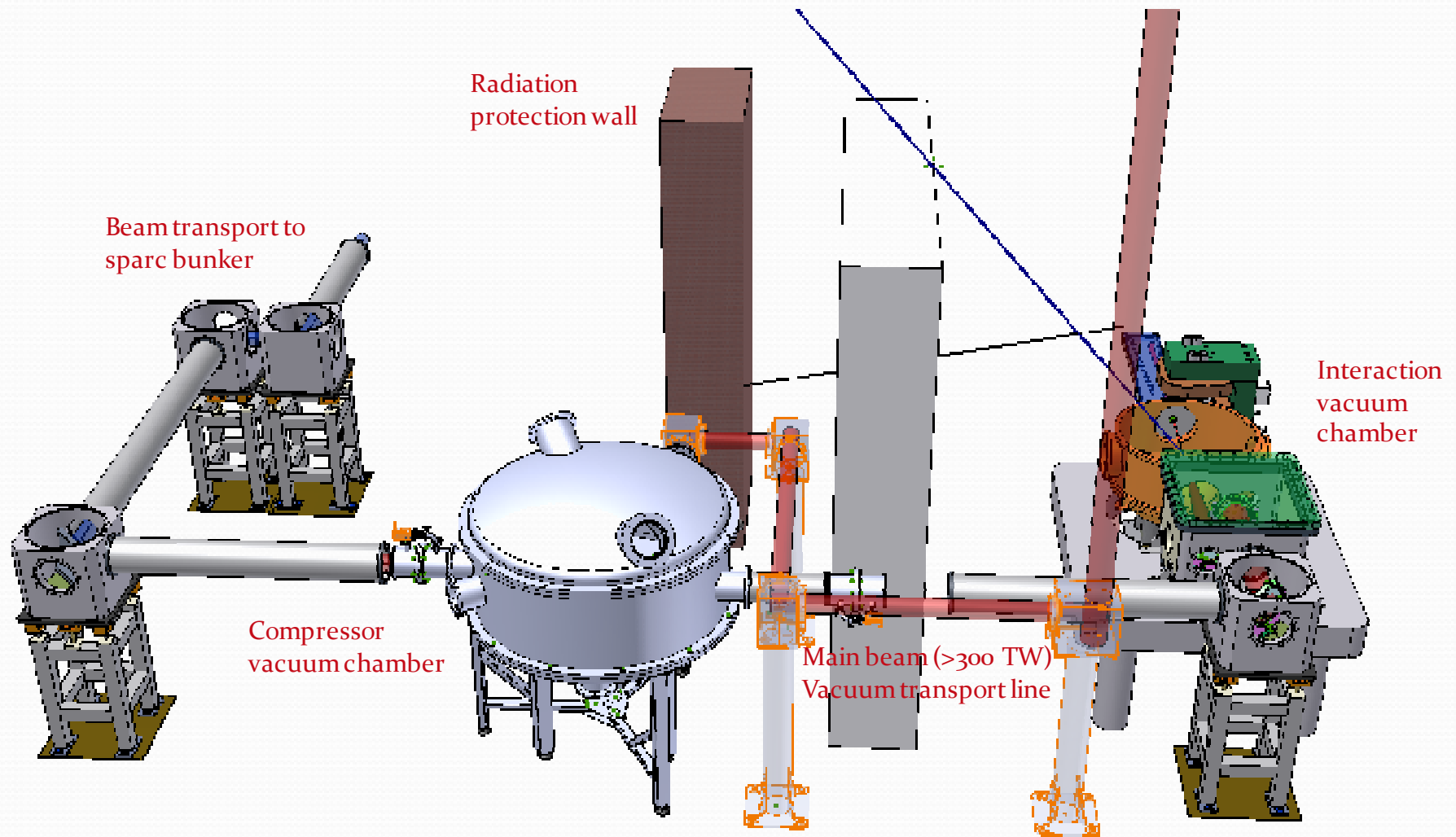


Siccome gli elettroni sono molto più leggeri degli ioni, si muovono molto più velocemente, inducendo la separazione di carica.

A mano a mano che il laser avanza, gli elettroni vengono spinti indietro verso il centro della bolla carica positivamente creata dagli ioni (che rimangono fermi perché più pesanti).

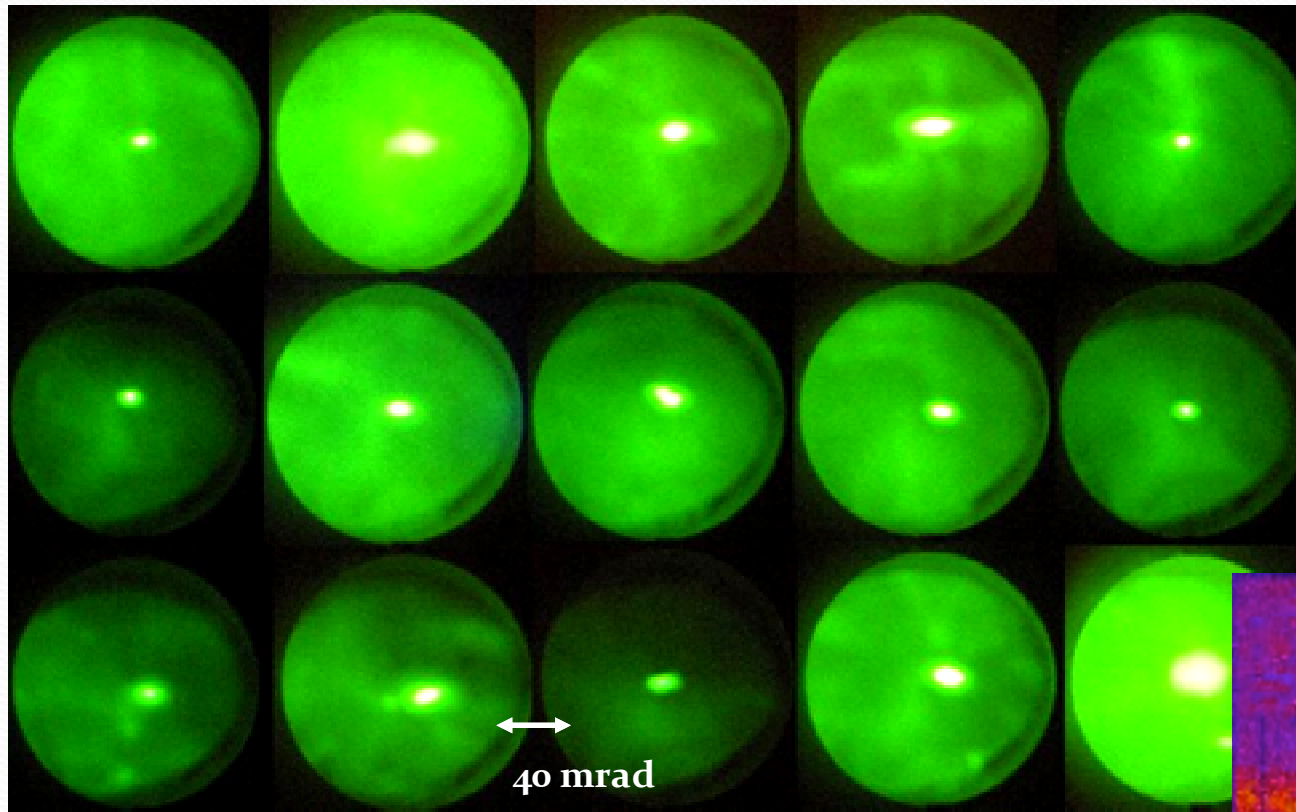
Entrando nella regione carica positivamente, gli elettroni prendono velocità e vengono accelerati.

FLAME target area

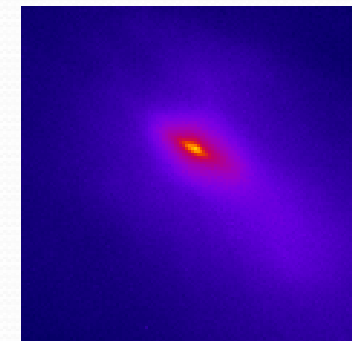


Accelerazione di elettroni da LWFA

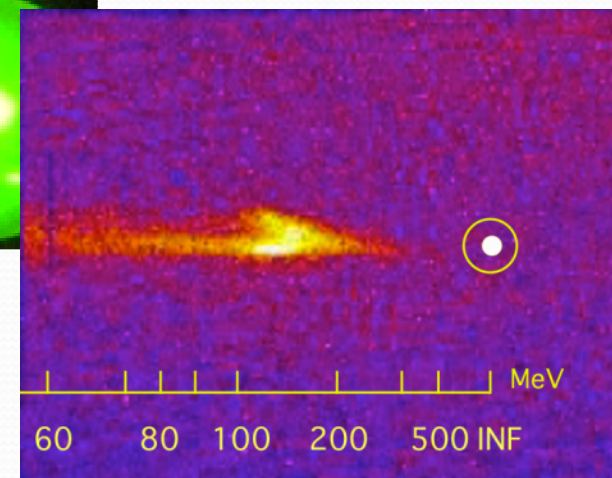
Tipici fasci di elettroni accelerati tramite interazione laser-plasma osservati @ FLAME.



Pointing



Energia →



OUTLINE

Esperimenti che si possono fare con FLAME e risultati

Accelerazione di elettroni tramite Self injection

Accelerazione di protoni

Propagazione del laser in aria

Esperimenti che si possono fare accoppiando FLAME e SPARC e risultati

Thomson scattering

External injection

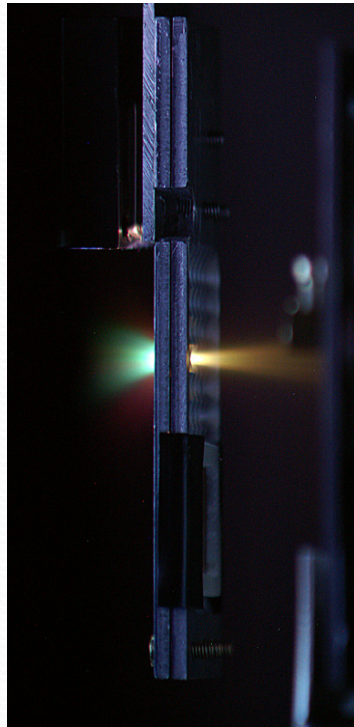
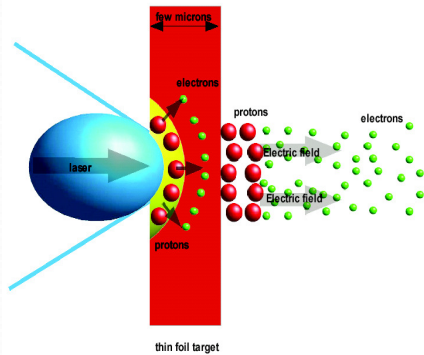
Accelerazione di protoni

L'obiettivo dell'accelerazione di protoni a SPARC è quello di accelerare ioni leggeri attraverso l'interazione di un fascio laser di alta potenza con una targhetta di metallo sottile ed in particolare di riuscire ad ottenere un fascio di protoni di alta qualità che possa essere iniettato in altre strutture acceleranti (post-accelerazione).

Il regime che si studia, è quello detto TNSA (**T**arget **N**ormal **S**heath **A**cceleration), così chiamato perché il fascio di protoni accelerato viaggia normale alla superficie della targhetta metallica.

La normale alla superficie della targhetta metallica solitamente non è la direzione del fascio laser e questo è dovuto principalmente al fatto che si vogliono evitare retro-riflessioni che potrebbero danneggiare la catena laser.

Accelerazione di protoni



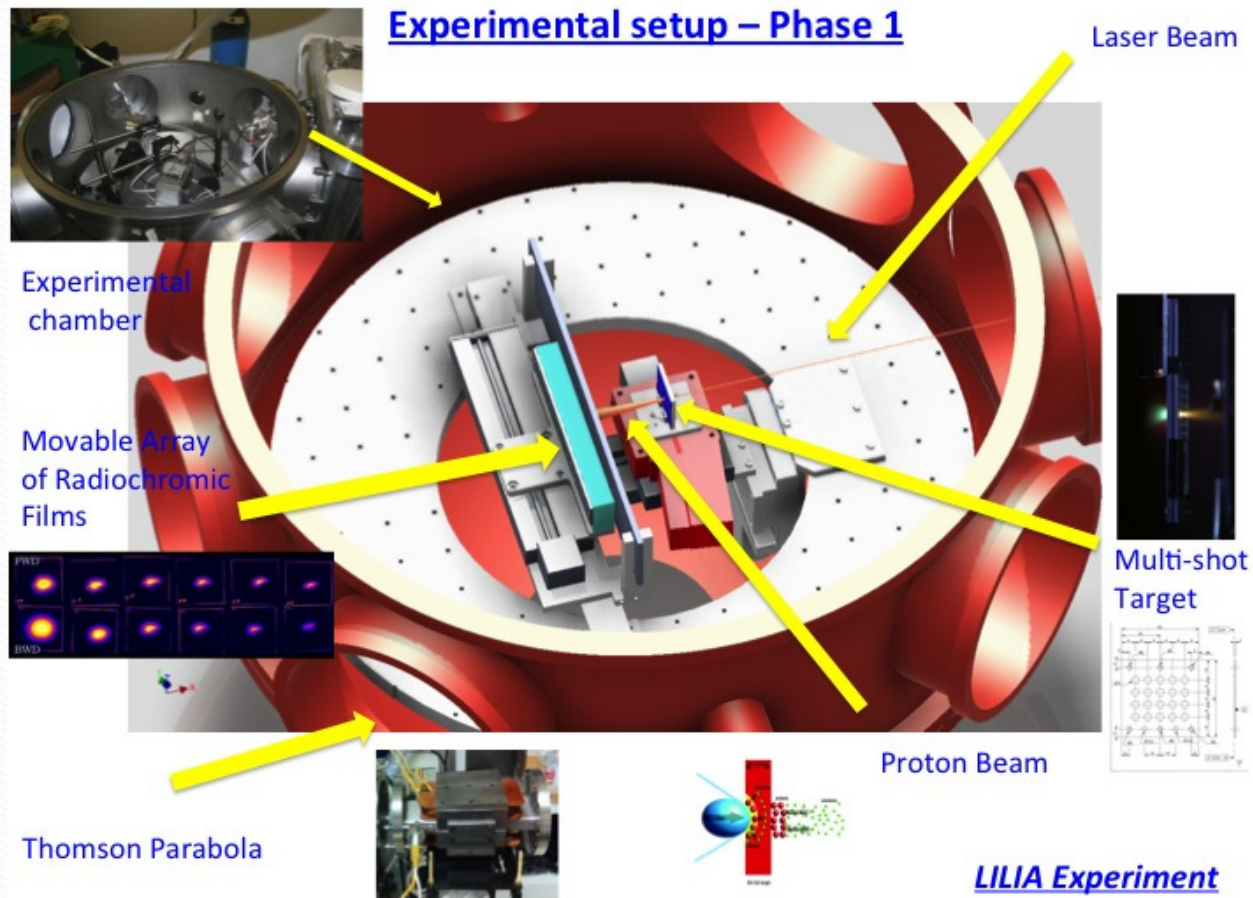
I protoni avendo una grande massa, non possono essere accelerati da un'onda di plasma veloce (come succede con gli elettroni) semplicemente perché sono troppo lenti.

L'unico modo di accelerare i protoni, è quello di usare gli elettroni come step intermedio per trasferire energia dal laser ai protoni.

Funzionamento: il fascio laser viene focalizzato sulla superficie di un target metallico sottile. Si forma un plasma sulla superficie del target ed elettroni relativistici di bassa energia vengono accelerati nella direzione normale alla superficie e si propagano fino alla superficie opposta del target.

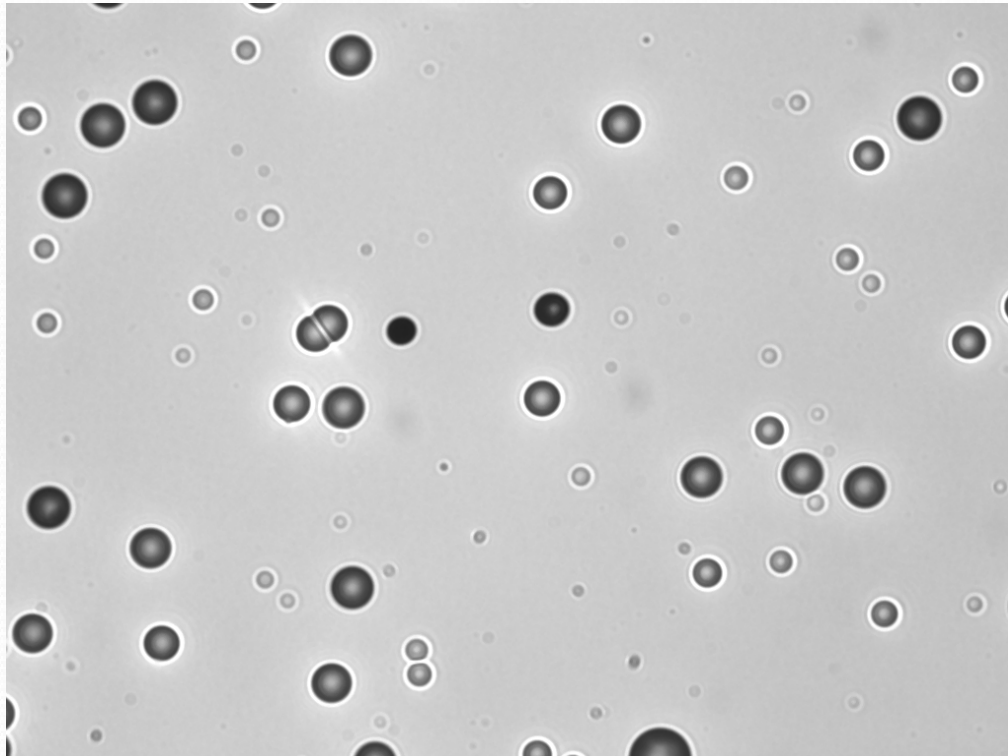
Gli elettroni, che ora sono confinati elettrostaticamente nella superficie di uscita del target, inducono una separazione di carica che è causa di un forte campo elettrostatico, capace di ionizzare velocemente gli atomi e accelerare gli ioni presenti sulla superficie di uscita del target.

Proton acceleration experiments

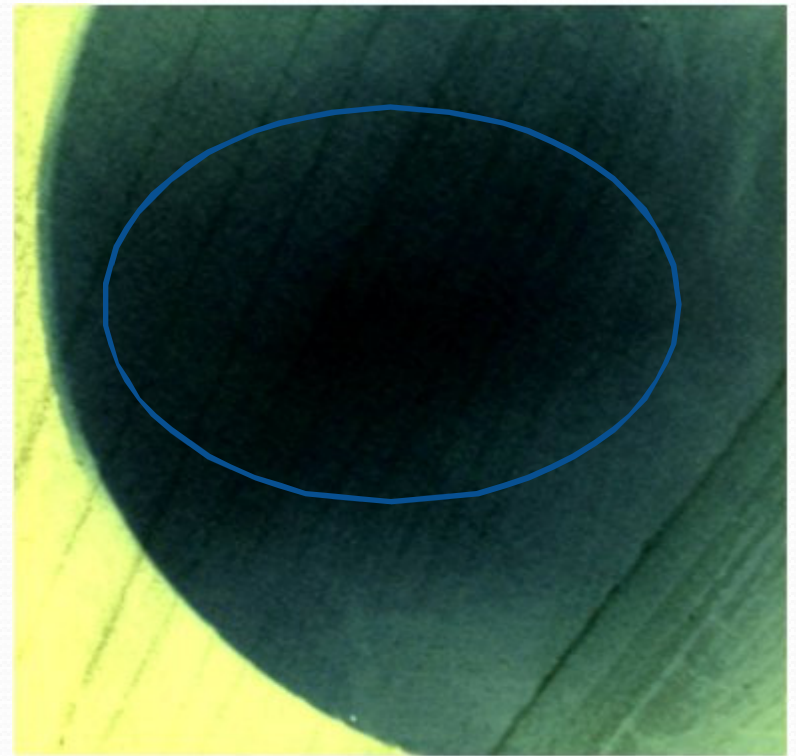


Proton acceleration experiments

Rivelatori di traccia CR-39 plastic polymer



Rivelatori EBT₃ gafchromic film



La massima energia stimata dei protoni accelerati è di circa 1.6 MeV (con 1 J sul target), misura confermata anche dall'analisi dei rivelatori di traccia CR-39.

OUTLINE

Esperimenti che si possono fare con FLAME e risultati

Accelerazione di elettroni tramite Self injection

Accelerazione di protoni

Propagazione del laser in aria

Esperimenti che si possono fare accoppiando FLAME e SPARC e risultati

Thomson scattering

External injection

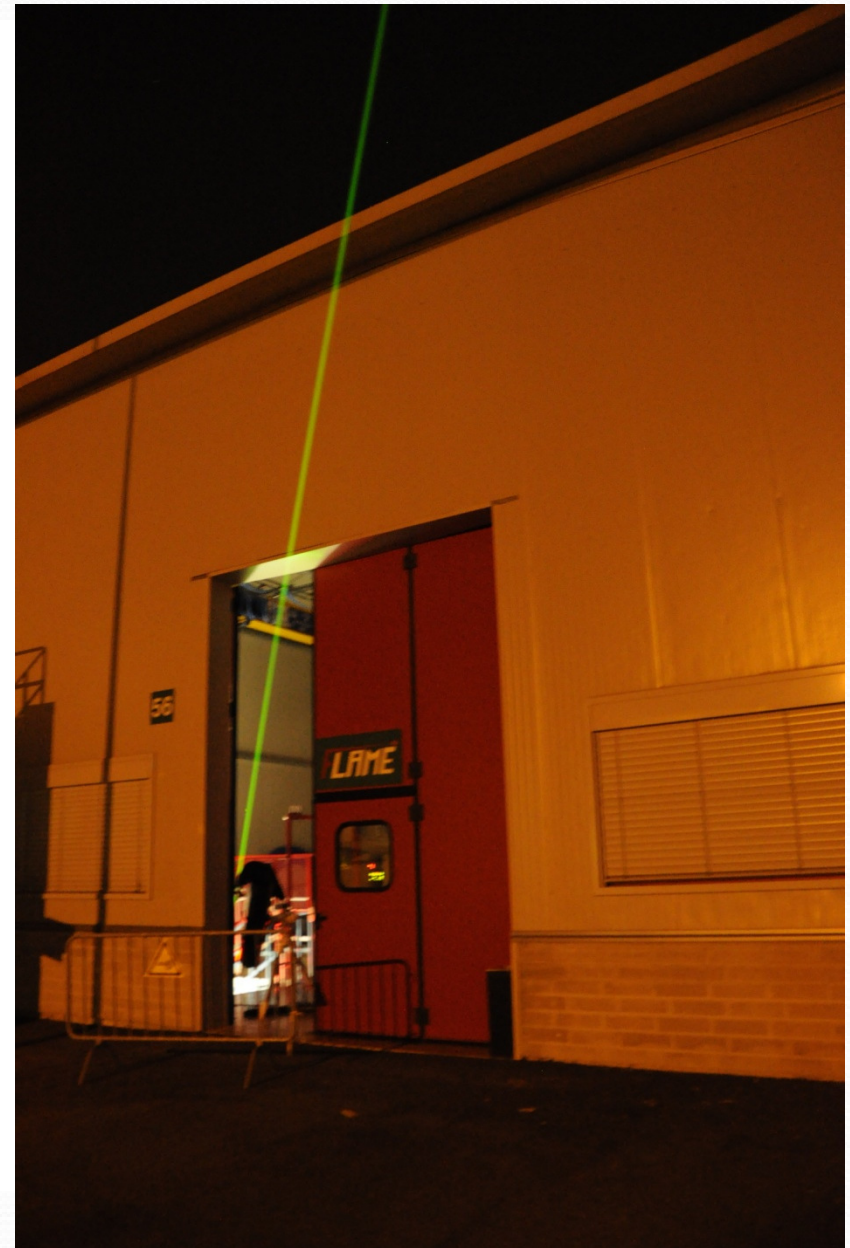
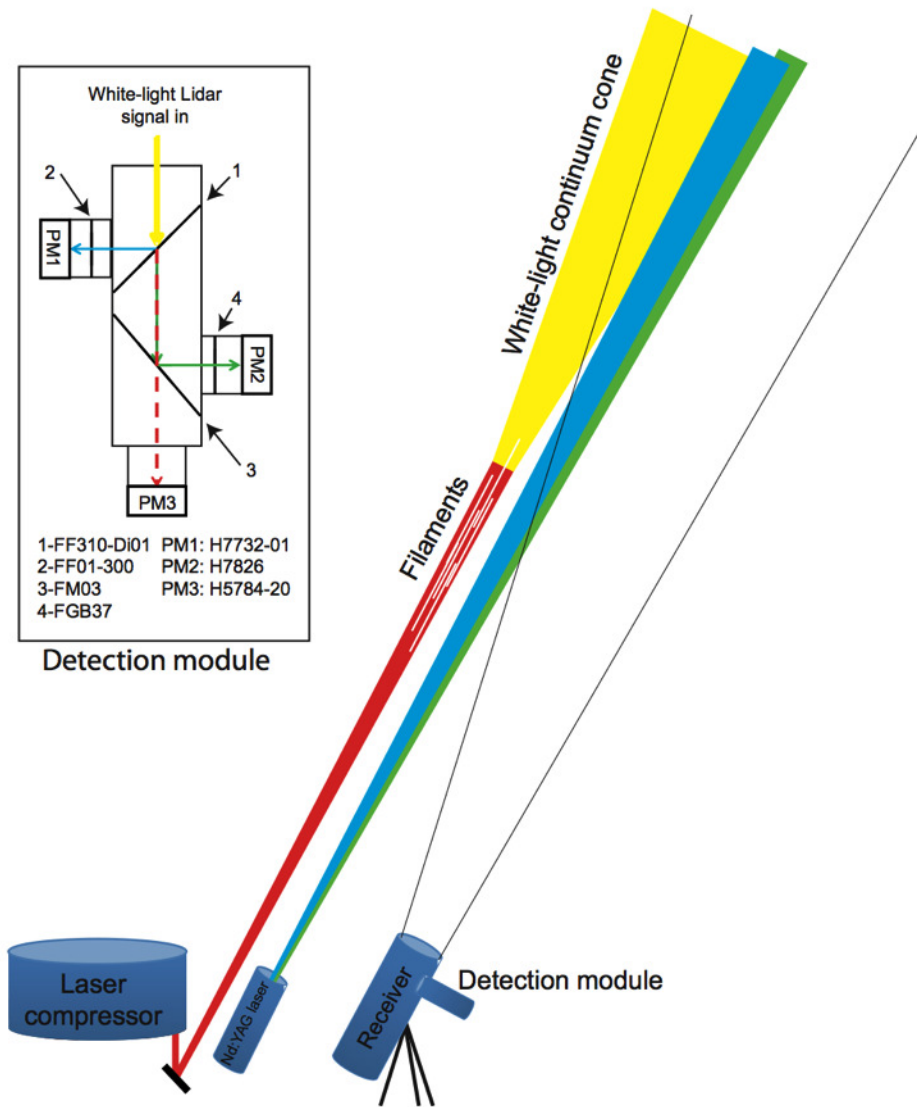
Propagazione del laser in aria

I laser di alta potenza sono comunemente usati nella ricerca atmosferica (LIDAR – *Light Detection and Ranging*) per misurare molti parametri atmosferici: l'altezza, lo spessore e la densità delle nuvole, le proprietà delle particelle delle nuvole, temperatura, pressione, vento, umidità, concentrazione di gas...

I laser di alta potenza che si propagano in aria, danno vita a linee di plasma, chiamate filamenti – dovute all'effetto lente di Kerr – che possono propagarsi in atmosfera per centinaia di metri controllando il chirp e la durata del fascio laser.

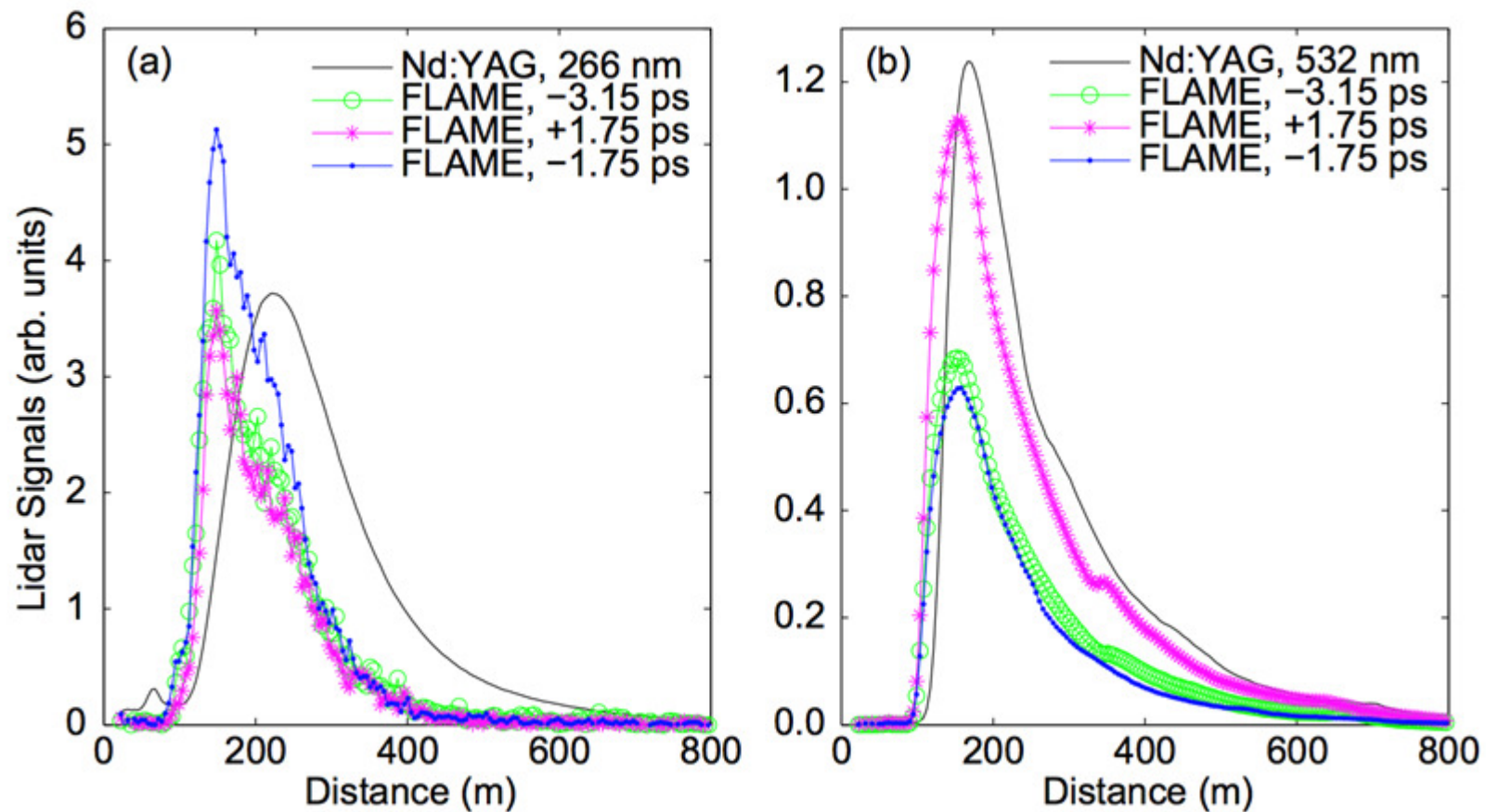
Dall'analisi della luce emessa dai filamenti di plasma, specie diverse possono essere rivelate ed analizzate, come incidenti industriali, perdite, incendi, così come in aerosol ignoti, dal momento che non richiede nessuna conoscenza a priori delle specie presenti in aria.

Propagazione del laser in aria



Propagazione del laser in aria

Luce di Backscattering (segnale LIDAR) dai filamenti di plasma.



Segnale di Backscattering dal LIDAR usato per stimare la massima lunghezza di propagazione dei filamenti per diversi parametri del laser.

OUTLINE

Esperimenti che si possono fare con FLAME e risultati

Accelerazione di elettroni tramite Self injection

Accelerazione di protoni

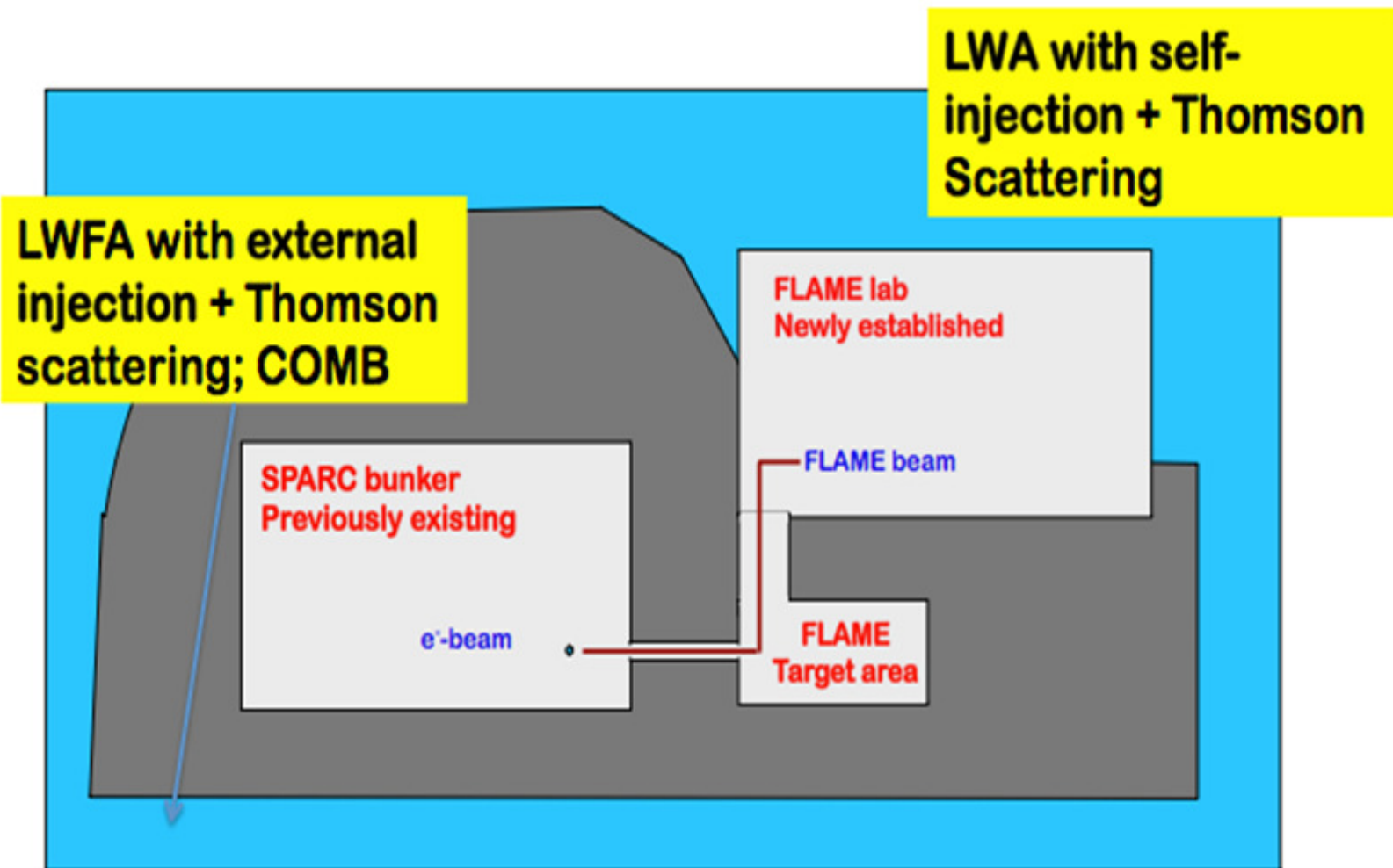
Propagazione del laser in aria

Esperimenti che si possono fare accoppiando FLAME e SPARC e risultati

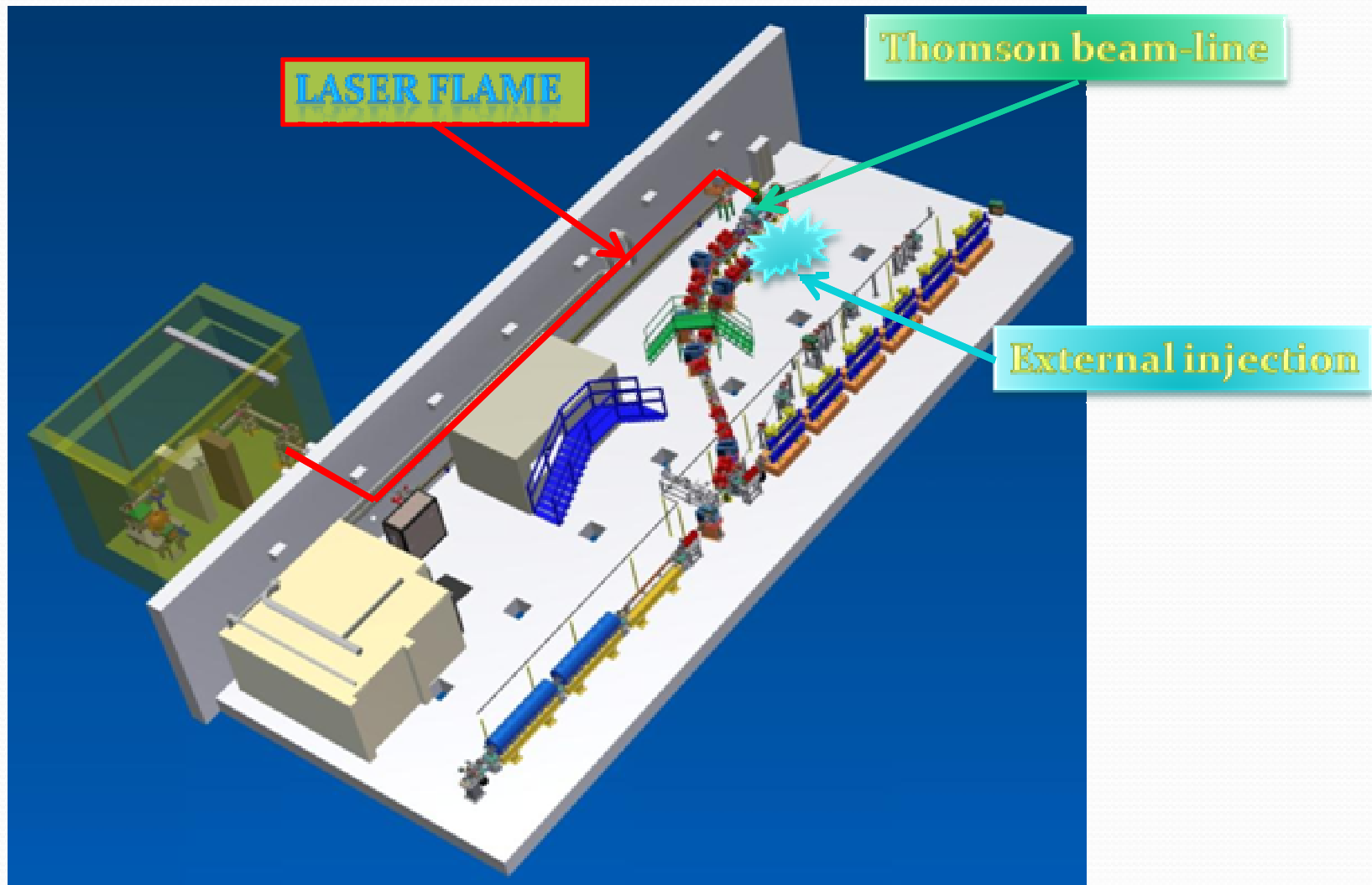
Thomson scattering

External injection

The FLAME laser into the SPARC bunker



The FLAME laser into the SPARC bunker



OUTLINE

Esperimenti che si possono fare con FLAME e risultati

Accelerazione di elettroni tramite Self injection

Accelerazione di protoni

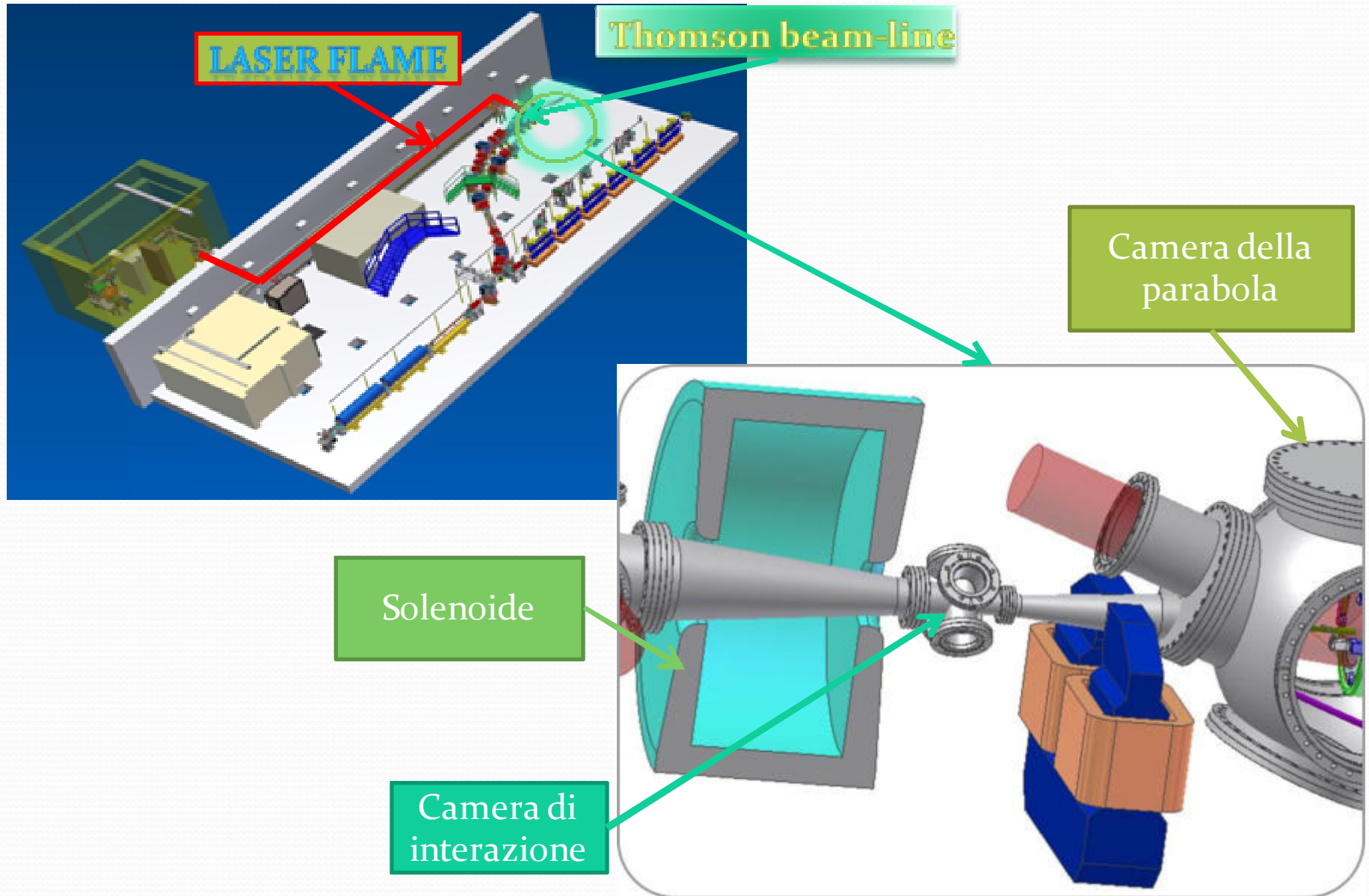
Propagazione del laser in aria

Esperimenti che si possono fare accoppiando FLAME e SPARC e risultati

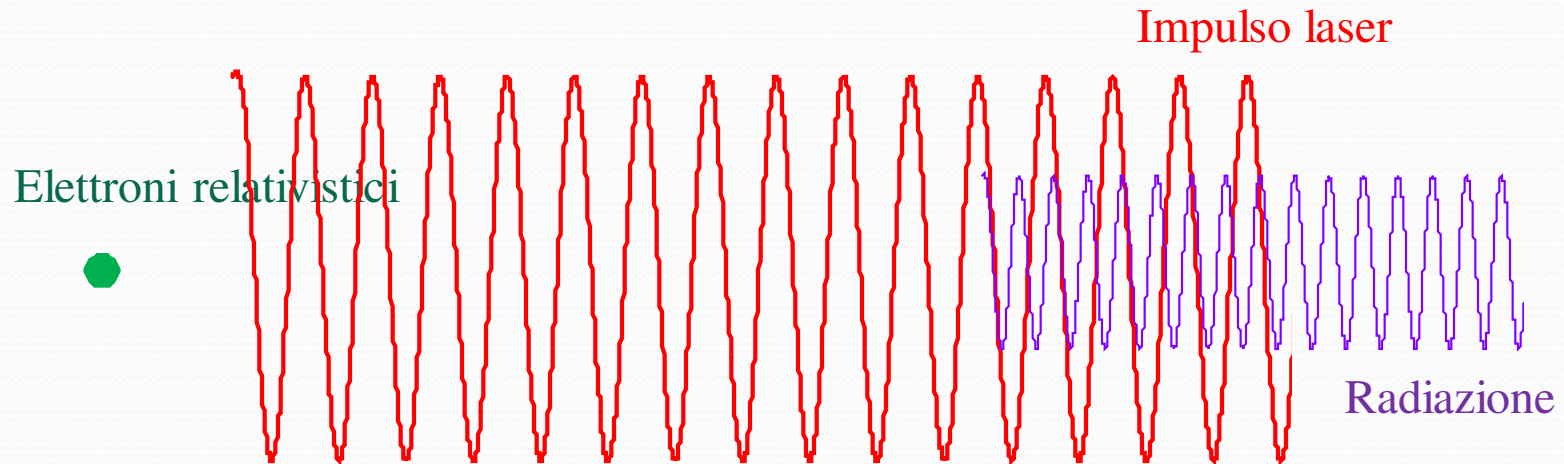
Thomson scattering

External injection

Thomson scattering @ SPARC_LAB



Thomson scattering @ SPARC_LAB



Il laser agisce come un ondulatore per il fascio di elettroni.

Collisione “testa a testa” → Radiazione sull’asse.

Thomson scattering @ SPARC_LAB

Fascio di elettroni

Energia: 50.6 ± 0.2 MeV

Energy spread: $0.39 \pm 0.025\%$

Emittanza: 4.82 mm mrad

Carica: 200 ± 20 pC

Durata: 3.1 ps

Spot-size: 89.1 ± 2.6 μm in x
 88.3 ± 3.2 μm in y

Laser beam

Energia: 2 J on target

Spot-size: 20 μm

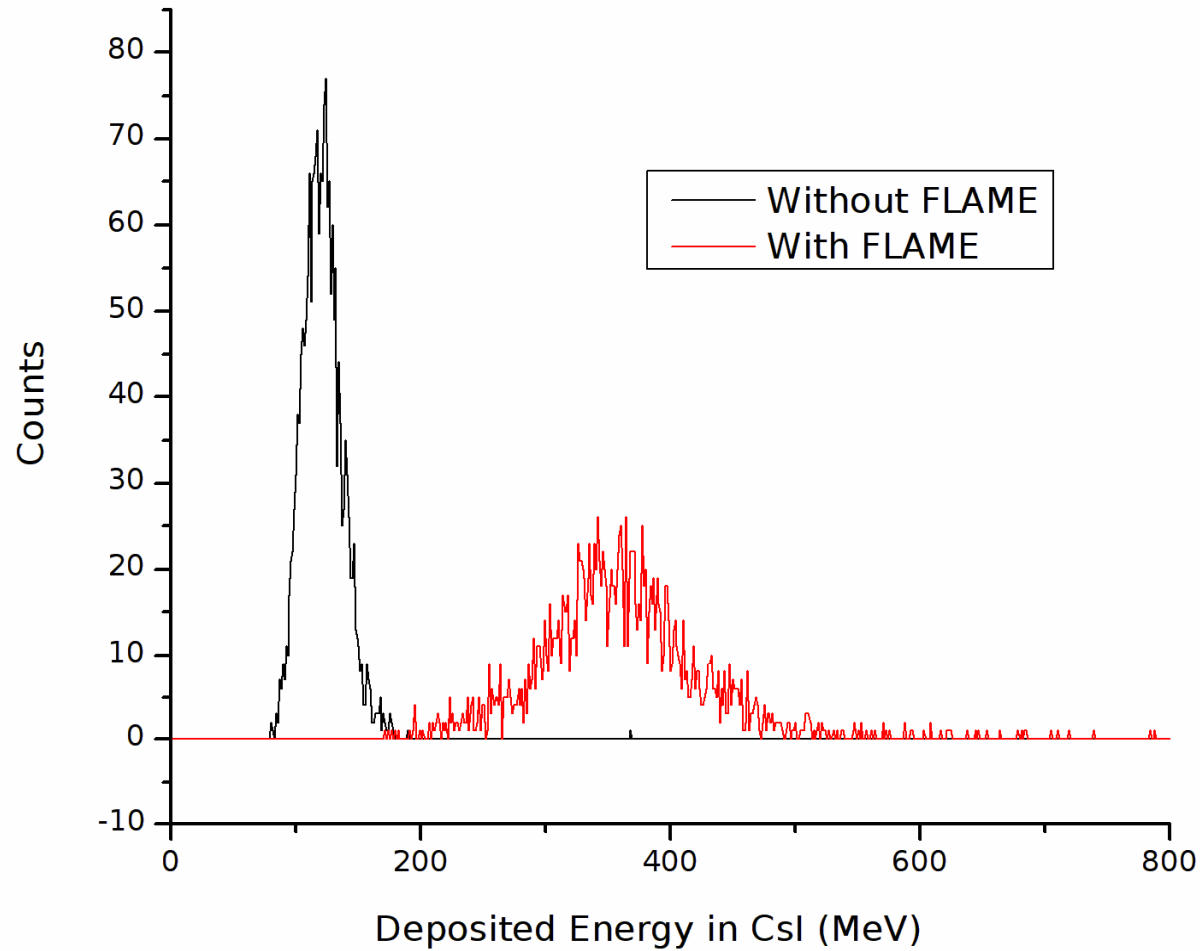
Durata: 300 fs

Lunghezza d'onda: 800 nm

Larghezza di banda: 60 nm

Contrasto: 10^8

Thomson scattering @ SPARC_LAB



OUTLINE

Esperimenti che si possono fare con FLAME e risultati

Accelerazione di elettroni tramite Self injection

Accelerazione di protoni

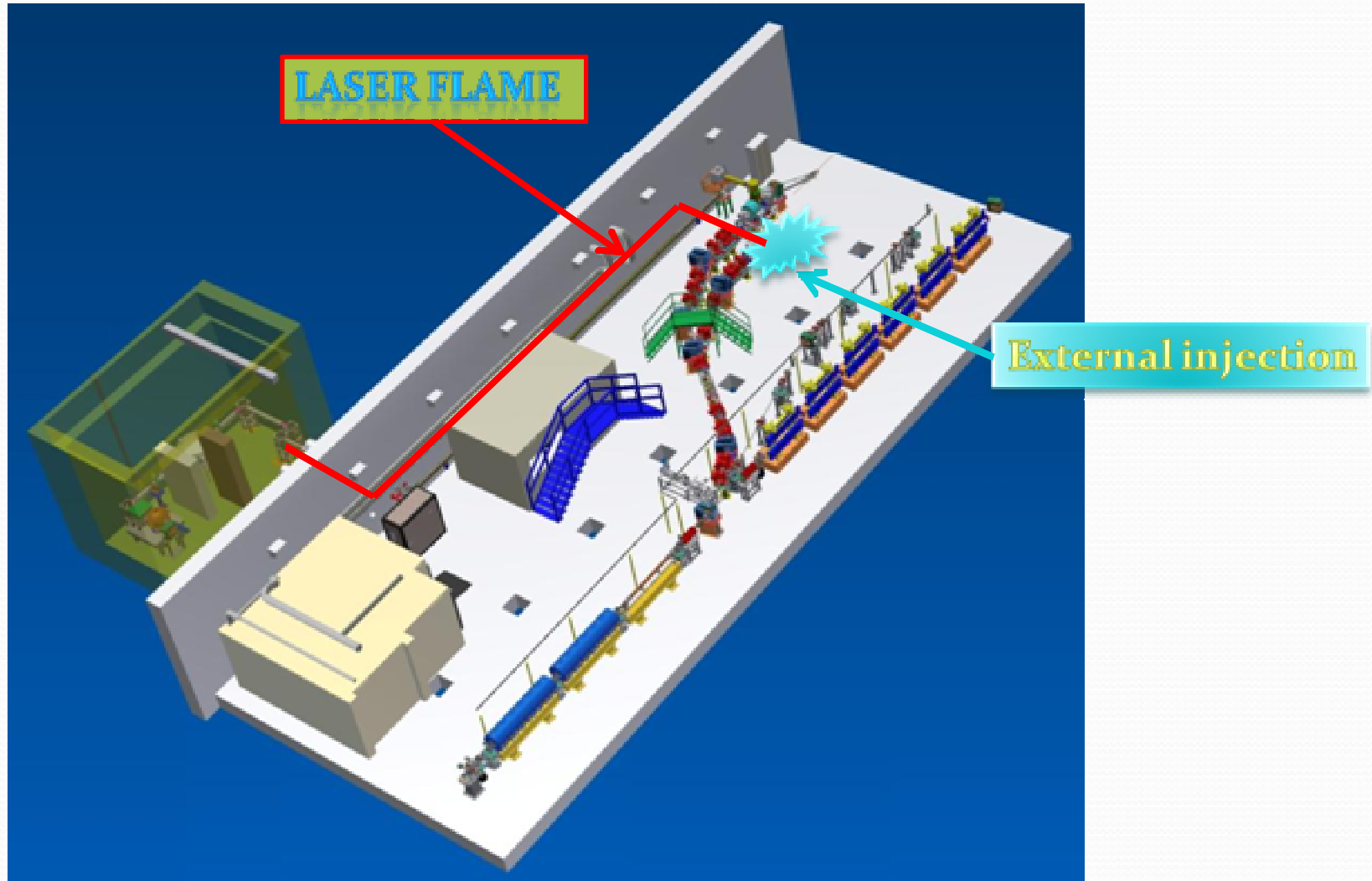
Propagazione del laser in aria

Esperimenti che si possono fare accoppiando FLAME e SPARC e risultati

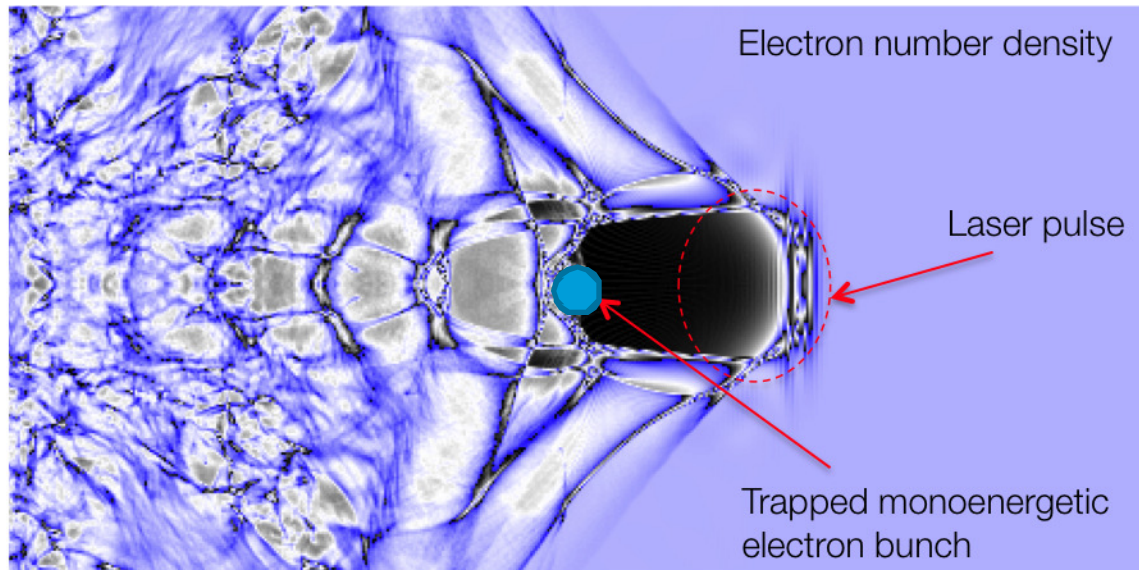
Thomson scattering

External injection

External injection



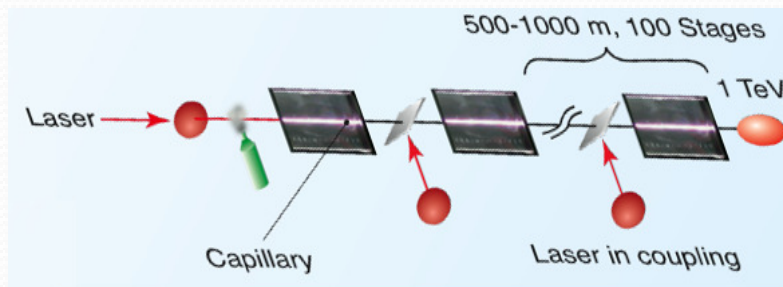
External injection



La ionizzazione del gas e la creazione del wakefield sono a cura del fascio laser.

Gli elettroni accelerati dal linac vengono iniettati, con la giusta fase, sulla cresta dell'onda di plasma per essere “post-accelerati”.

All'uscita ci si aspetta un fascio di elettroni di energia maggiore e con una qualità paragonabile agli elettroni di ingresso.



Altro vantaggio: un passo avanti per lo staging.

Conclusioni

Il Laser:

1. si basa sul principio di emissione stimolata;
2. per amplificare un fascio laser, bisogna pompare un mezzo attivo e poi stimolare l'emissione della radiazione;
3. Il mode-locking permette di avere fasci ultra-corti e a largo spettro (modi in fase);
4. Il Q-switching permette di cambiare la frequenza di ripetizione del fascio, nonché a "pulire" il fascio;
5. Un assorbitore saturabile, permette di avere fasci laser ad alto contrasto.

Catena laser:

1. Componenti di una catena laser;
2. CPA – ultra-short high-intense laser.

Esperimenti che si possono fare con l'uso del solo laser:

1. Accelerazione di elettroni tramite interazione laser-plasma;
2. Accelerazione di protoni da targhette metalliche sottili;
3. Trasporto del laser in aria per esperimenti atmosferici.

Esperimenti che si possono fare combinando il laser al LINAC:

1. Thomson scattering;
2. Iniezione esterna.



Grazie!