UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE,
FISICHE E NATURALI

Introduzione al corso
Lab. di Fisica dei Laser I

Simone Cialdi

Outline dell'introduzione

Il LASER

- Esempi di LASER
- Caratteristiche principali dei LASER
- Confronto tra un LASER e una lampadina
- Struttura del corso

Informazioni sulla sicurezza e regolamenti

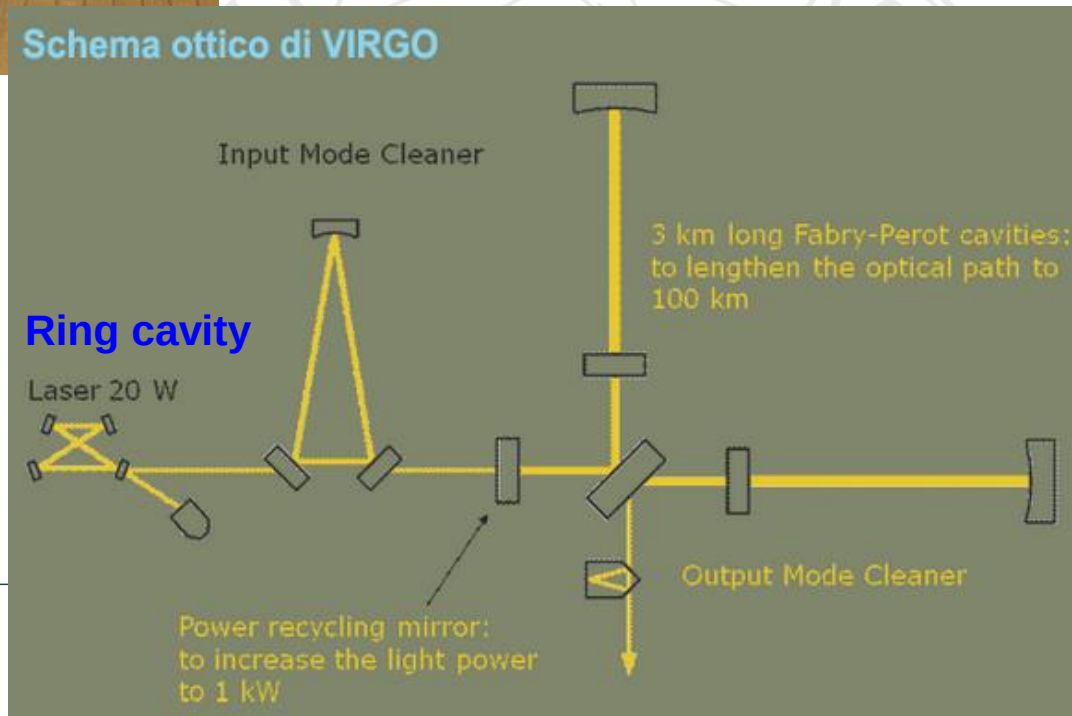
Laser “monocromatici” per applicazioni interferenziali

Rivelatore di onde gravitazionali VIRGO (vicino a Pisa)

In questo caso contano la coerenza spaziale e la coerenza temporale.

L’unico rumore ammesso per quanto riguarda il laser è il rumore dello stato di vuoto

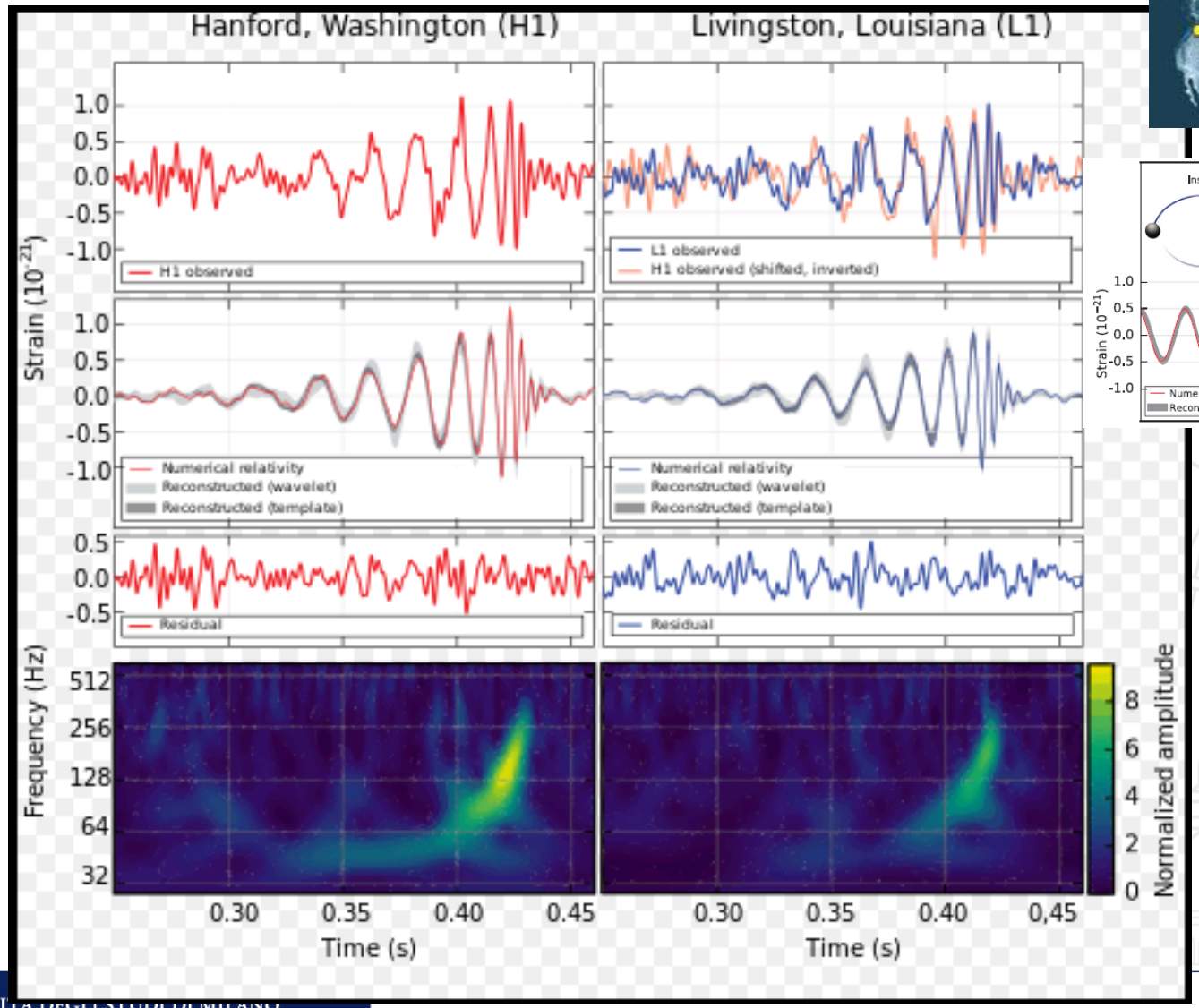
Si tratta di un interferometro di Michelson con due cavità risonanti che aumentano la lunghezza effettiva da 3km a circa 100km. L’onda gravitazionale produce una variazione del tempo di round trip della luce equivalente a **10^{-18}m**. L’intervallo di frequenze interessante è tra 100Hz e 1kHz.

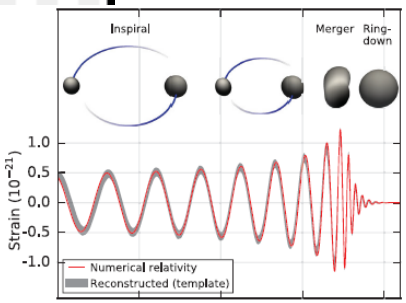


Prima osservazione diretta di un'onda gravitazionale

Osservata il 14 settembre 2015 e annaunciata l'11 febbraio 2016

$$\frac{\delta l}{l} \rightarrow$$



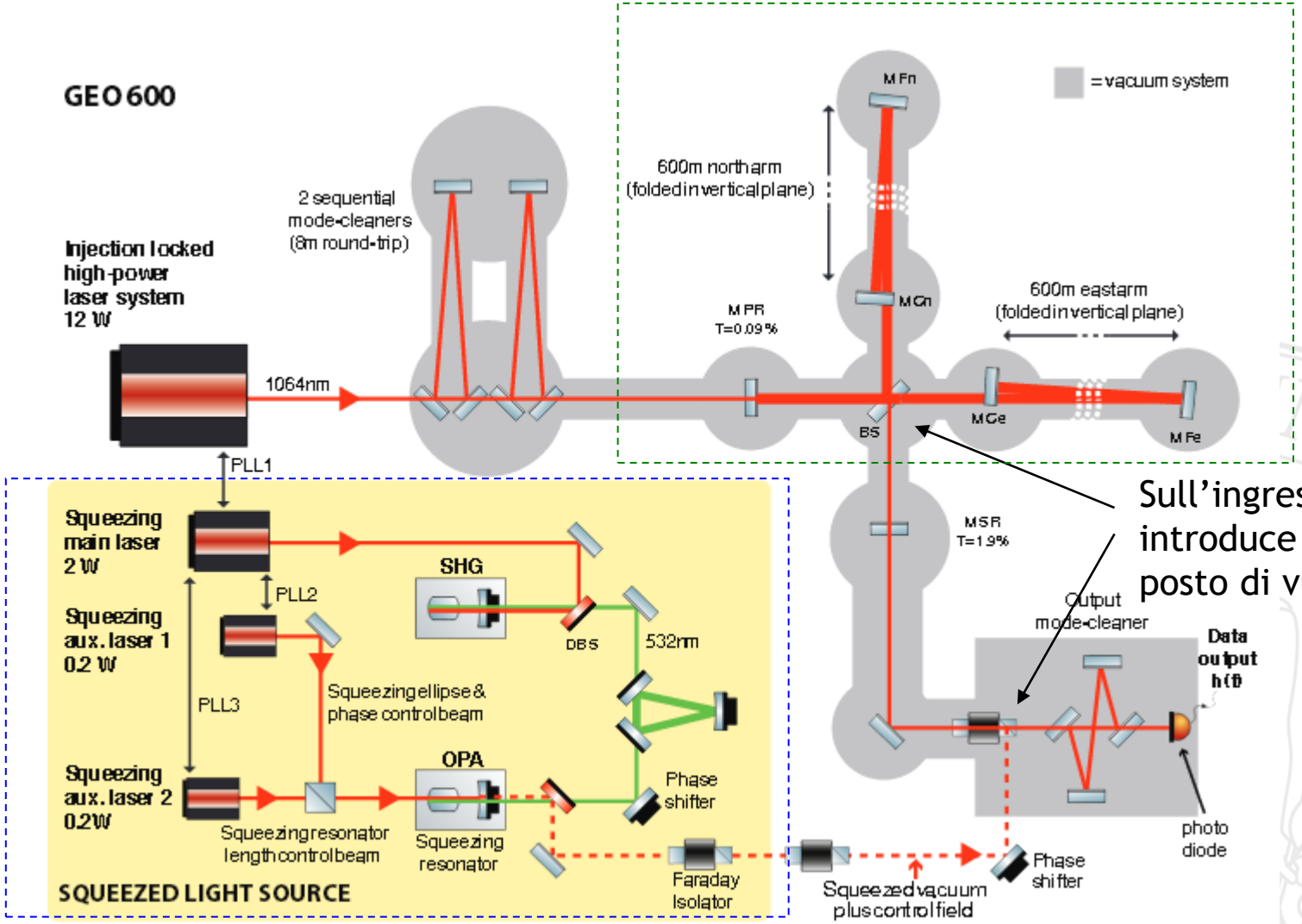


Phys . Rev. Lett. 116 (6) 061102

Radiazione con rumore inferiore a quello del vuoto

Rivelatore di onde gravitazionali GEO600(http://www.geo600.org)

Interferometro

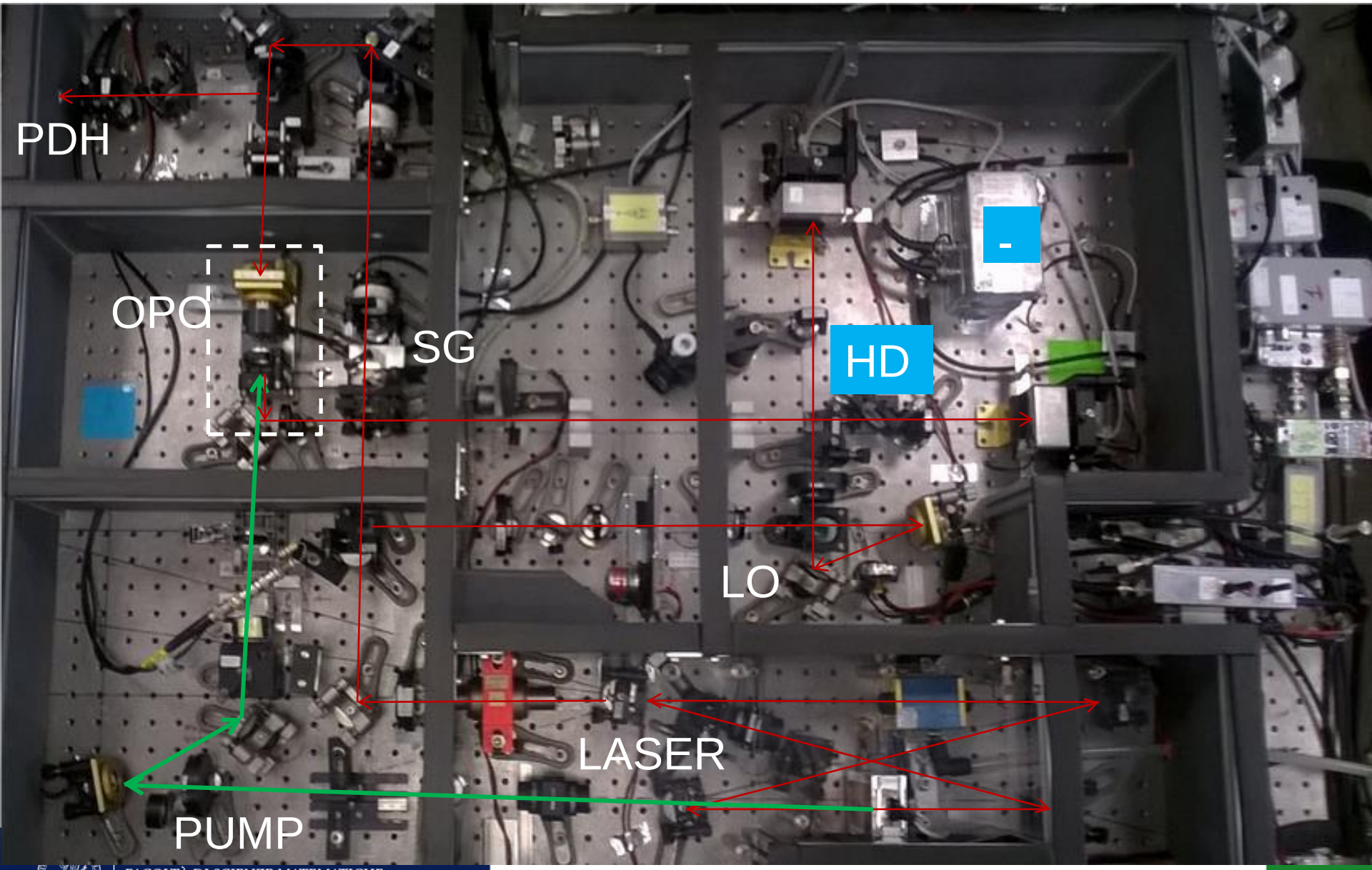


Sull'ingresso 2 del BS si introduce vuoto squeezed al posto di vuoto normale

Sistema laser per la generazione di vuoto squeezed

Nature Physics 7, 962-965 (2011)

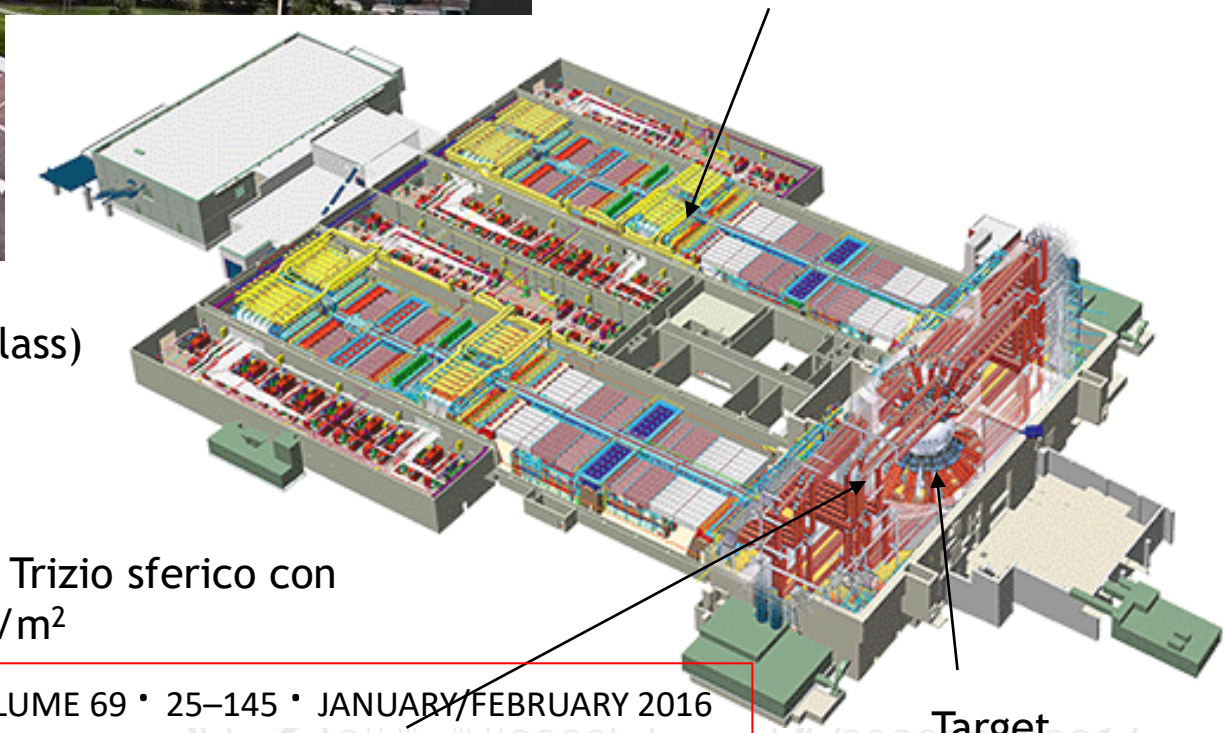
Generatore di stati squeezed del lab. QO di Milano



Il laser con gli impulsi più energetici al mondo

Applicazione: fusione a confinamento inerziale

L'amplificatore è formato da lastre di Nd:Glass pompate da circa 8000 Flash-Lamp (circa 300MJ)



Energia **2.05MJ** (192 LASER Nd:Glass)

Lunghezza impulsi: circa 10ns

Potenza: 190TW

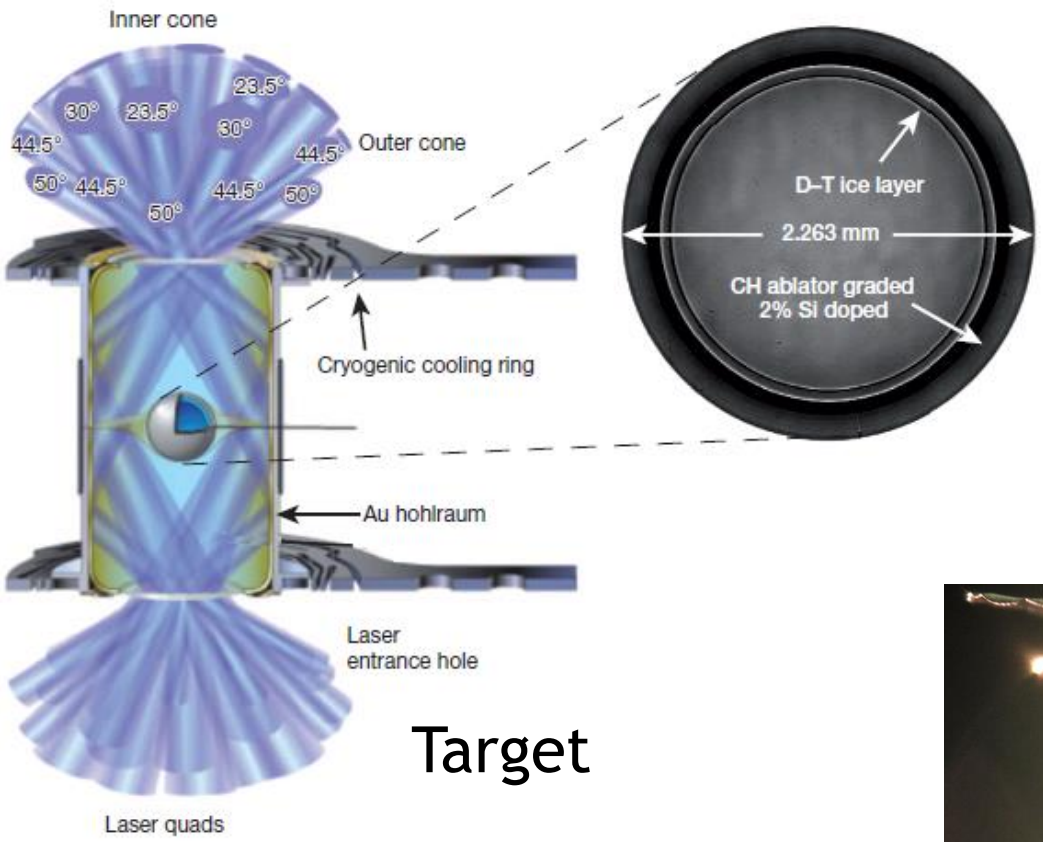
Intensità (bersaglio di Deuterio e Trizio sferico con diametro di circa 2mm): $6 \cdot 10^{19} W/m^2$

FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY • VOLUME 69 • 25–145 • JANUARY/FEBRUARY 2016

Target

Triplicazione di armonica con cristalli non lineari KDP (da **1053nm** a **351nm**)

Risultato raggiunto dal NIF



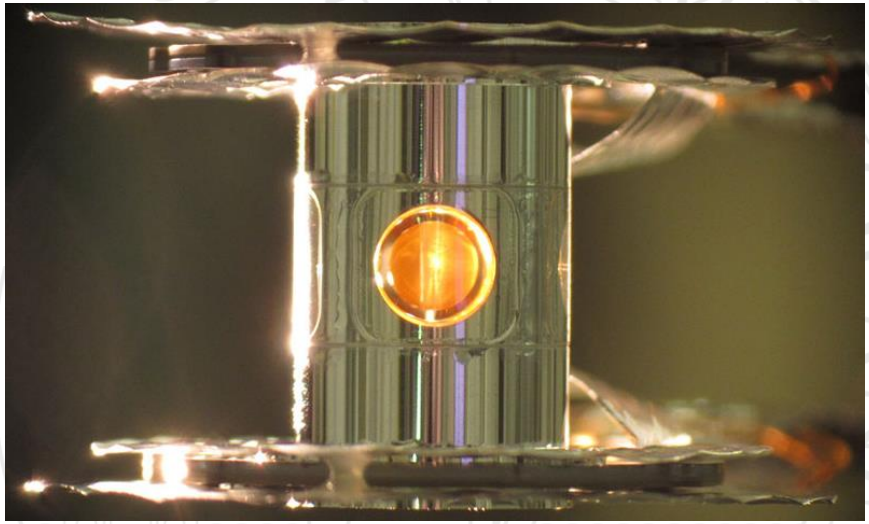
Target

300MJ di energia per pompare gli amplificatori

2.05MJ è l'energia degli impulsi

Gli impulsi entrano nella cavità di Au e vengono prodotti raggi X

Parte dell'energia di questi intercetta il bersaglio D-T creando pressioni e temperature elevatissime (150Gbar e 100 milioni di gradi)



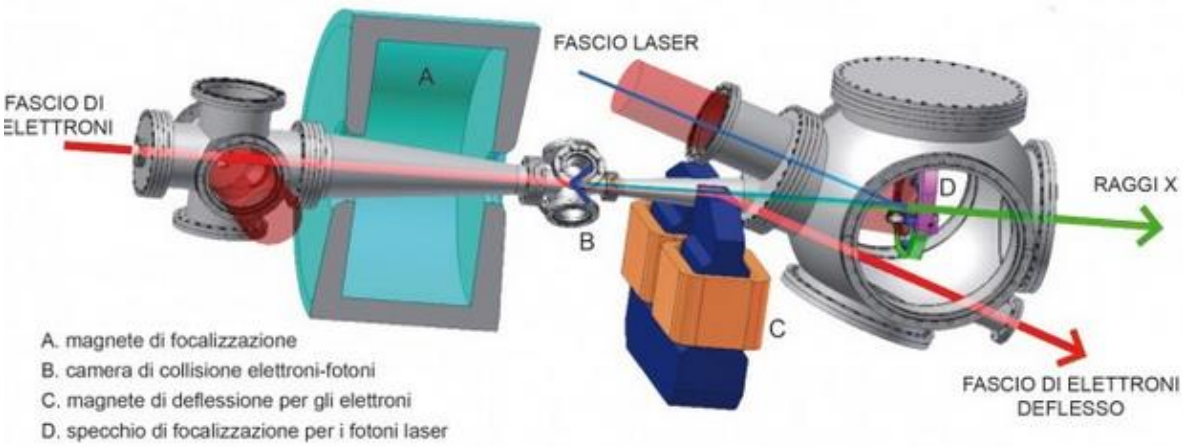
Energia impulsi: **2.05MJ**

Energia prodotta per fusione:**3.15MJ**

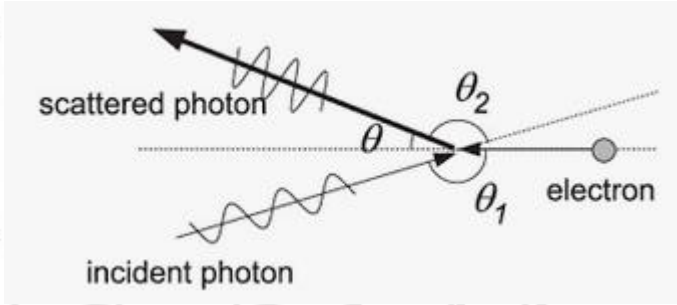
(0.875 kWh – 750g TNT)

Laser ad impulsi brevissimi per produzione di X

Esperimento Thompson presso SPARClab (Laboratori Nazionali INFN Frascati)



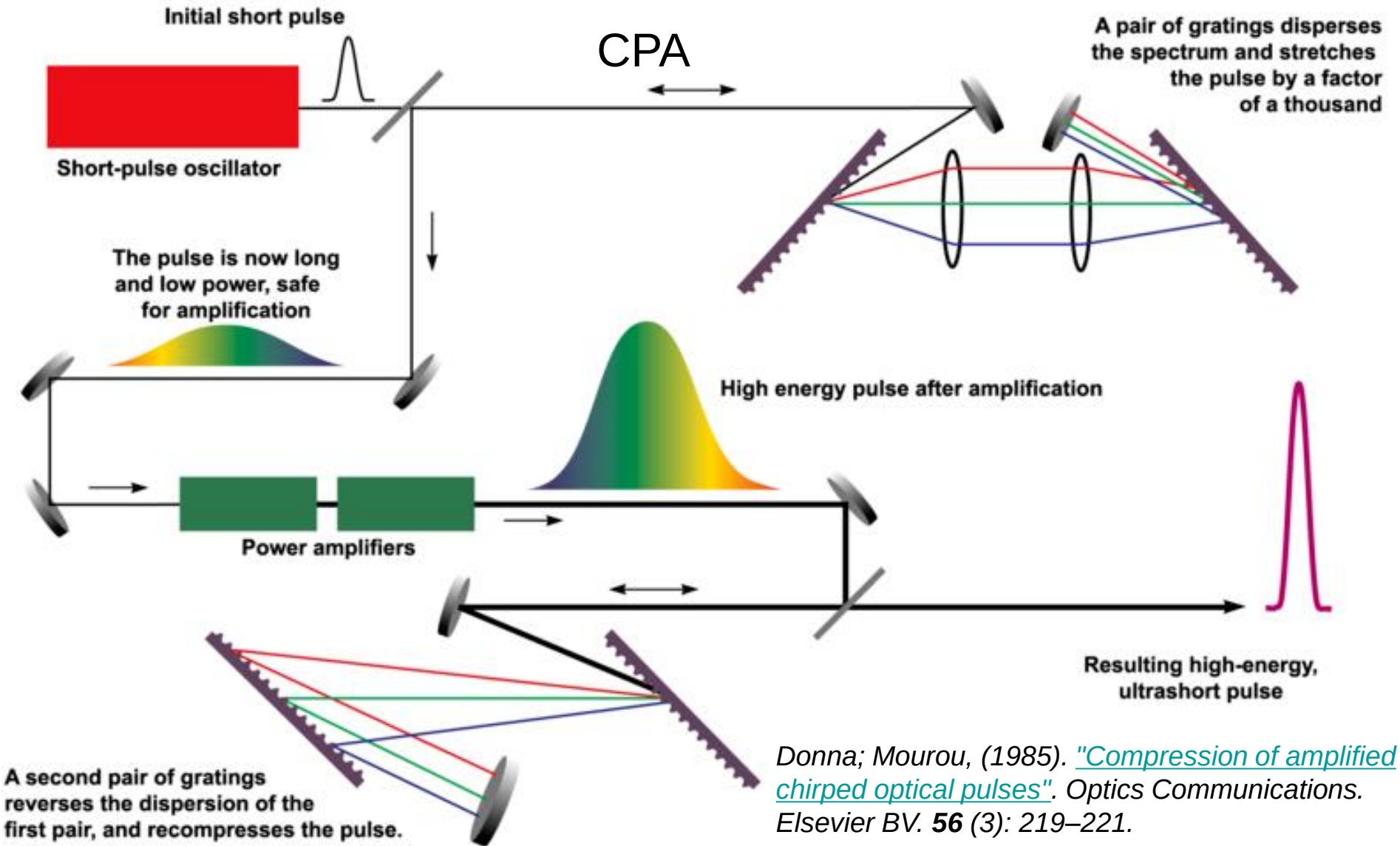
Si fanno collidere impulsi di fotoni con impulsi di elettroni e vengono prodotti impulsi di raggi X



L'impulso laser viene prodotto dal laser FLAME è ha le seguenti caratteristiche

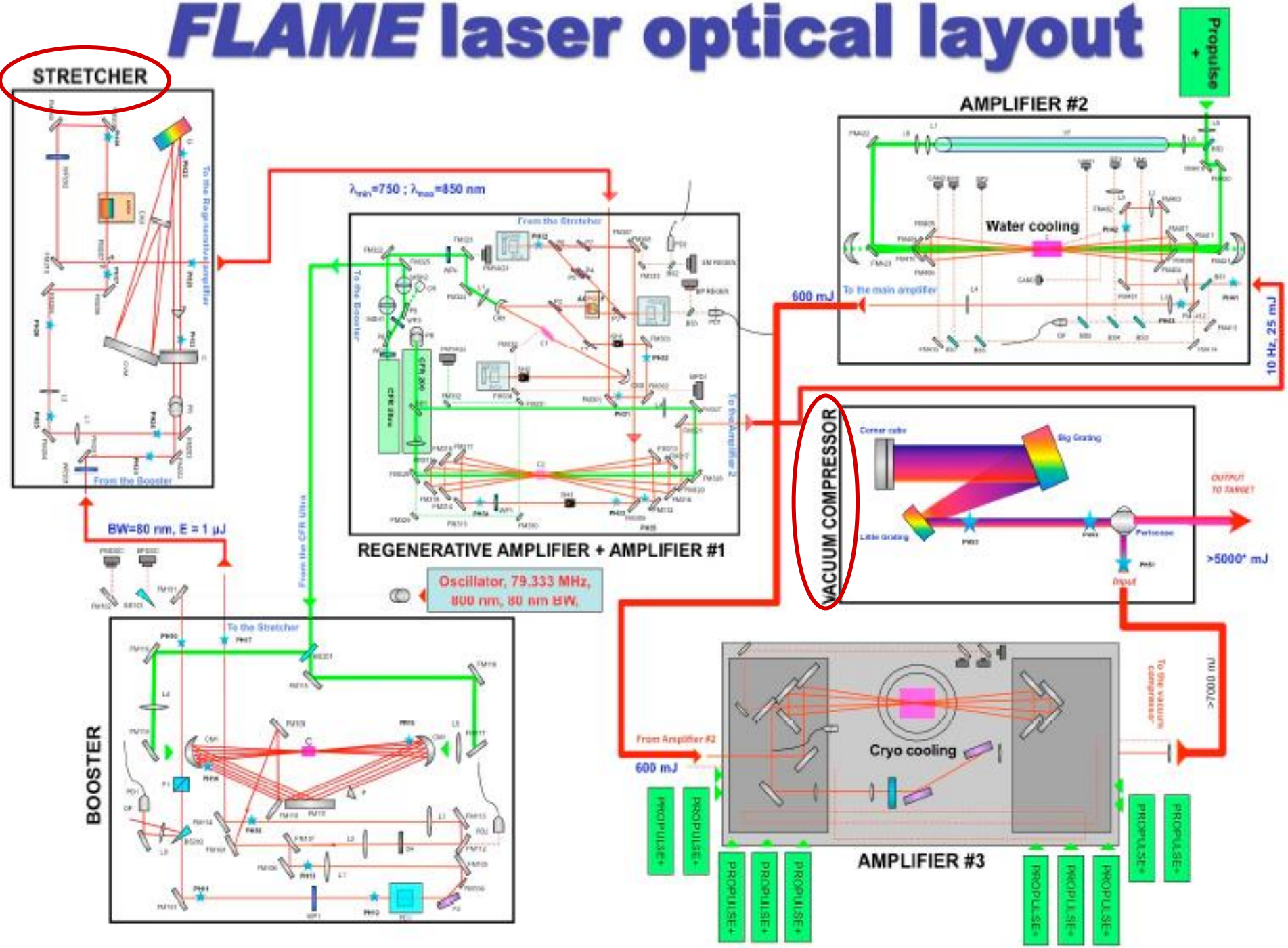
Repetition Rate	10 Hz
Energy (after compression)	up to 6 J (typ. exp. 5.6J)
Wavelength	800 nm
Pulse duration	down to 20 fs (typ.23 fs)
Peak power	up to 300 TW

I laser potenti ad impulsi brevissimi (fs) sono basati sulla tecnologia CPA (**Chirped pulse amplification**), e l'oscillatore che sta alla base funziona con la tecnica del **Mode-Locking**



Donna; Mourou, (1985). "Compression of amplified chirped optical pulses". Optics Communications. Elsevier BV. ***56*** *(3): 219–221.*

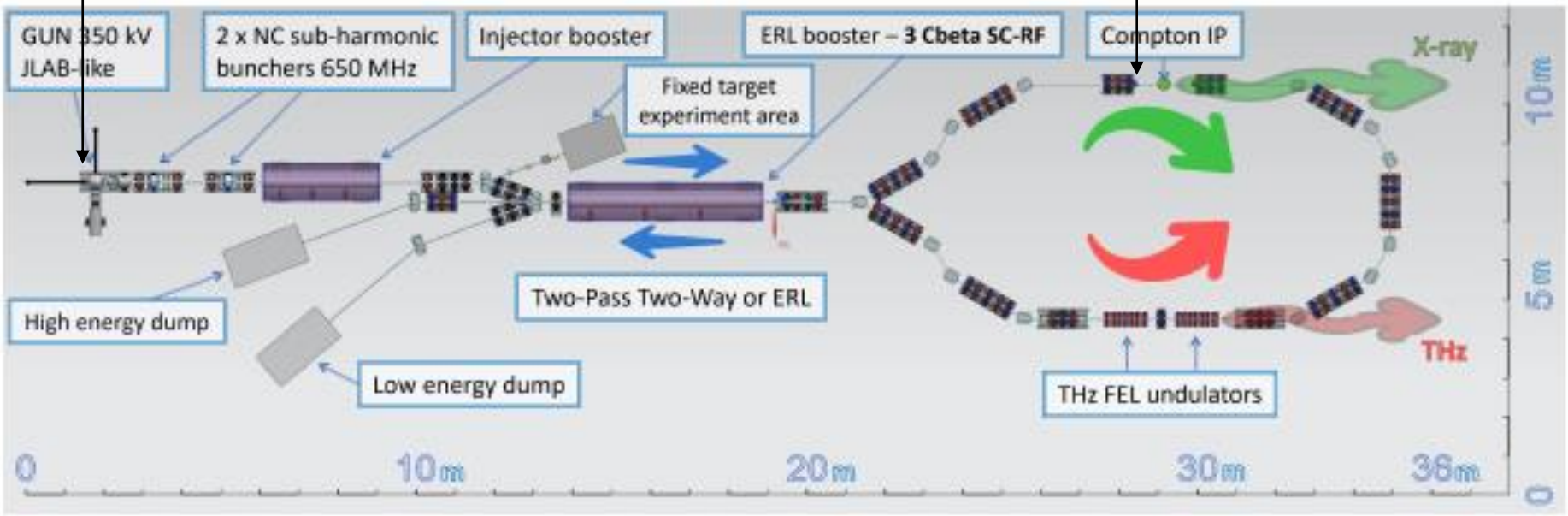
FLAME laser optical layout



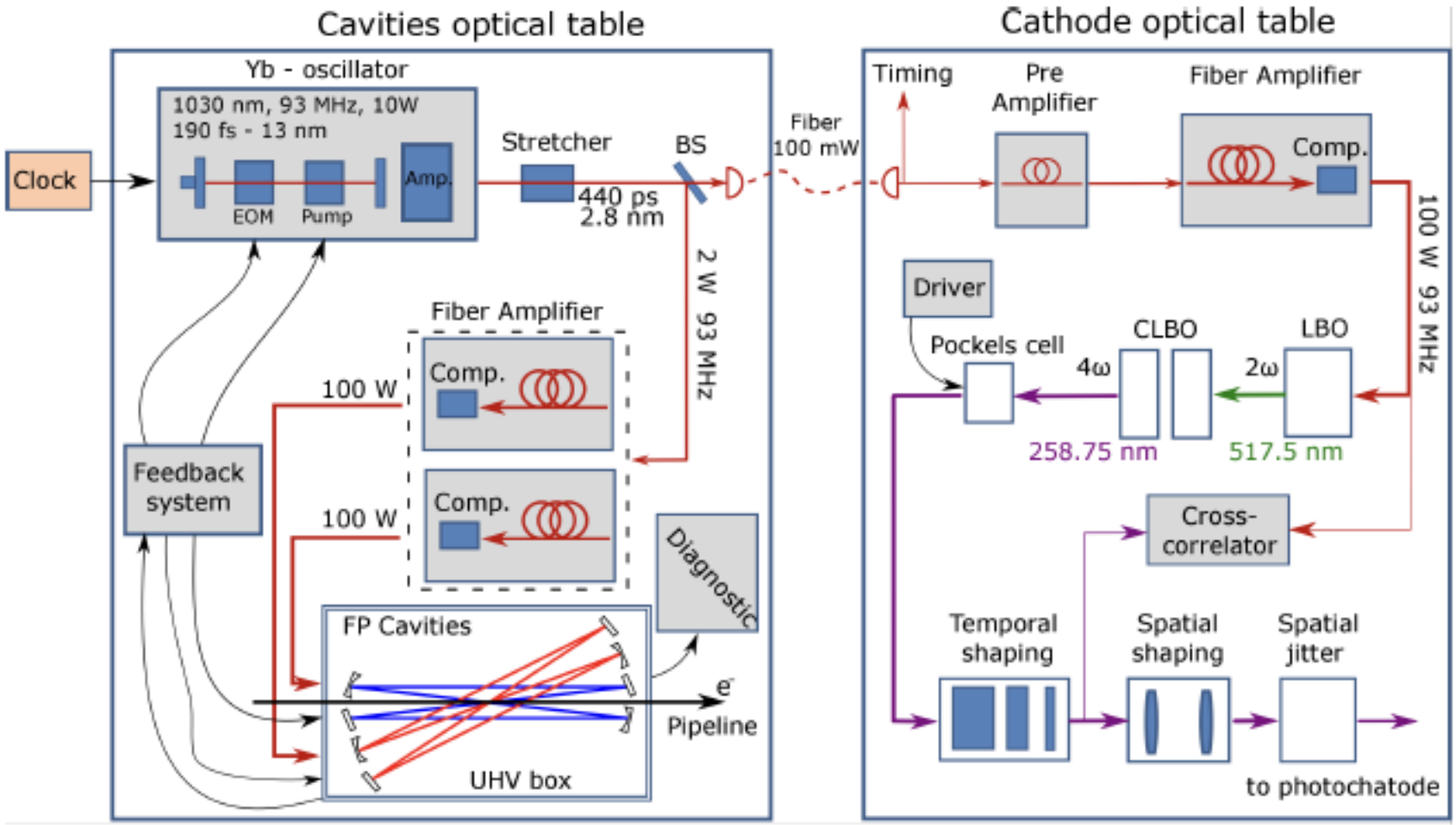
Sistema laser del progetto

Genera i pacchetti di elettroni per fotoemissione per mezzo di impulsi a 258nm

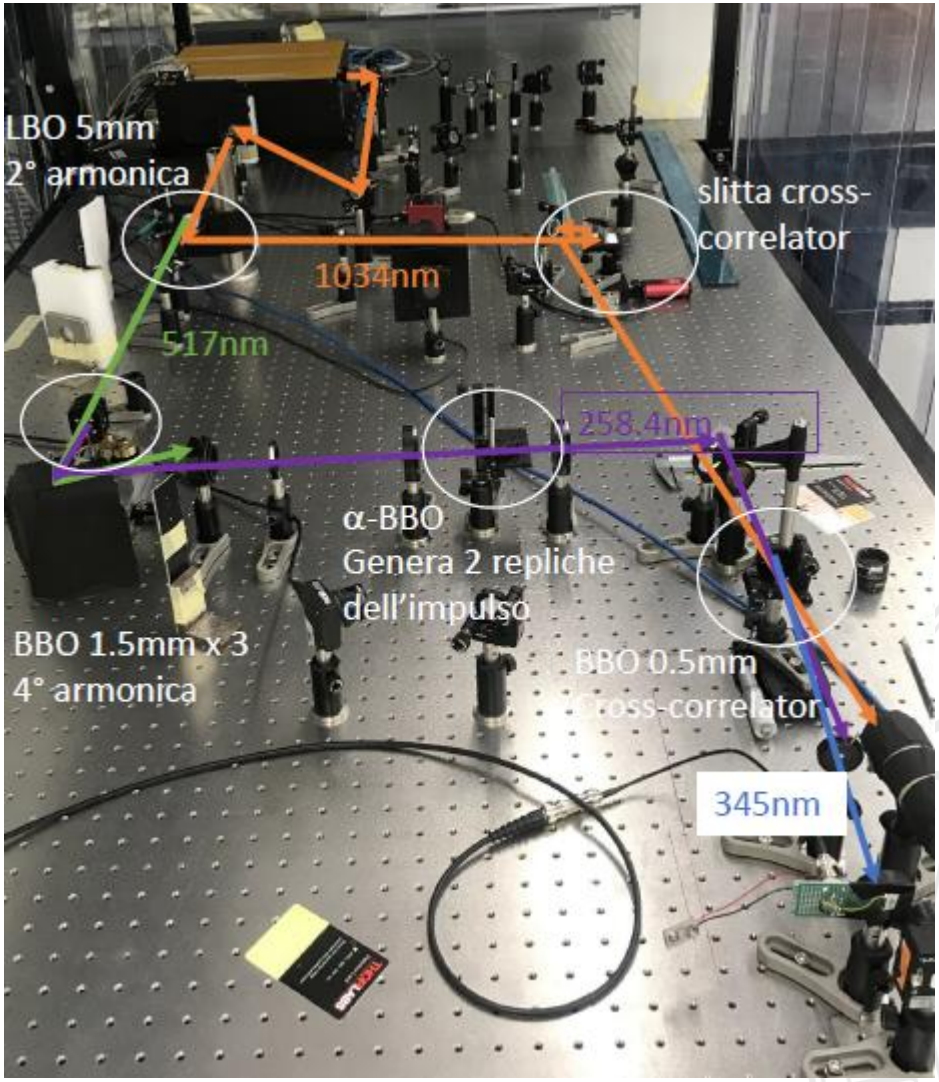
Produce gli impulsi IR per la generazione di raggi X via Compton-backscattering

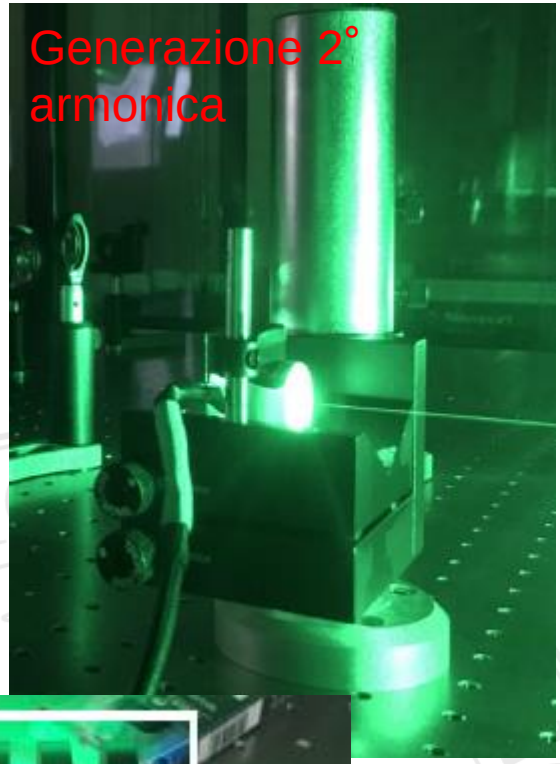


Schema laser progetto Brixsino



Generazione di radiazione visibile a UV partendo da IR (ottica non lineare) Progetto Brixsino

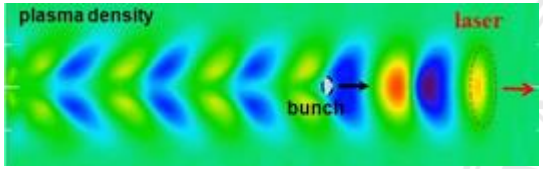


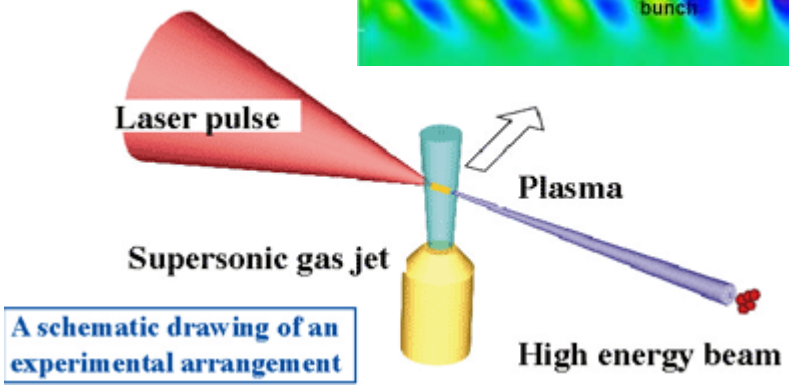


Plasma acceleration

RF-cavity (E≤100MV/m) → 1TeV /10km

Campo di plasma (100GV/m)





A schematic drawing of an experimental arrangement

Bella laser (LBNL)
10PW (1Hz, <100fs)
10^{20}W/cm^2

Tre tipi di tecnologie LASER:

monocromatico basato su Ring Cavity (onde gravitazionali), impulsi ultrabrevi con tecnologia basata su Mode-Locker (generazione di raggi X, acelerazione a Plasma), impulsi di alta energia con tecnologia basata su Q-switch

I LASER hanno svariate applicazioni ma alla base le tecnolgie impiegate sono queste e le vedremo nel dettaglio durante il corso.

Caratteristiche principali del LASER

LASER =

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

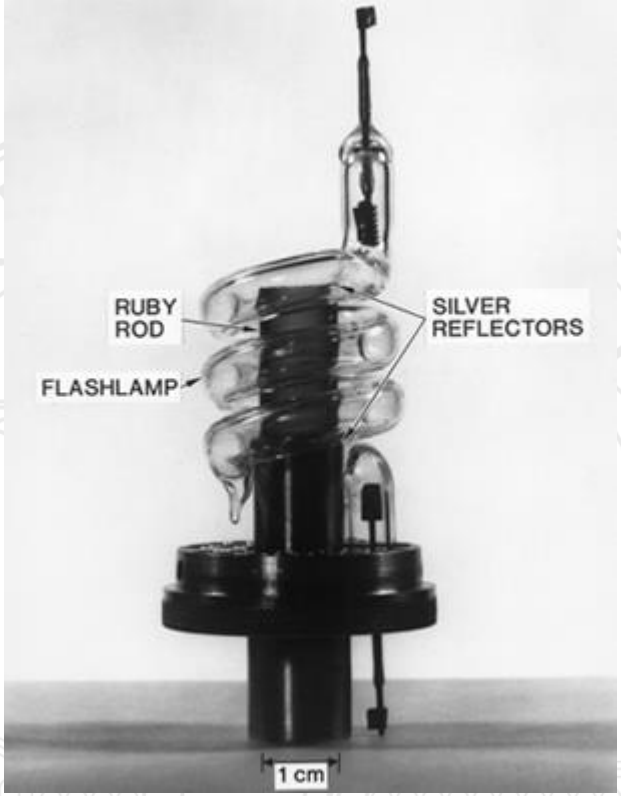
Monocromaticità

Coerenza

- ***Spaziale***
- ***Temporale***

Direzionalità e Brillanza

Capacità di generare impulsi brevi



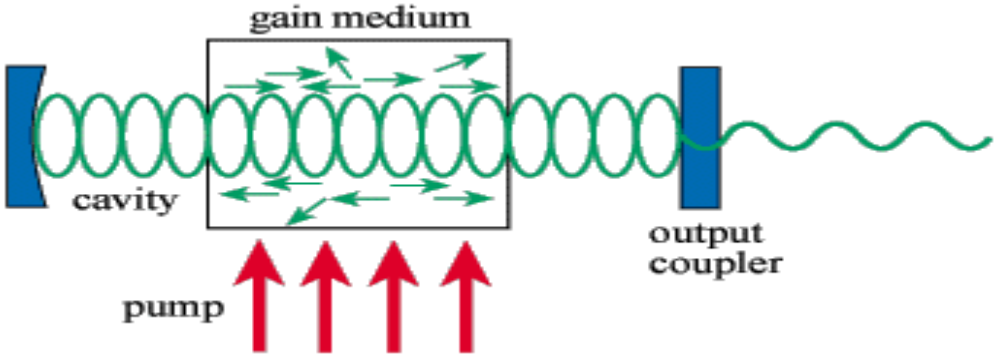
Theodore H. Maiman

1960 il primo LASER

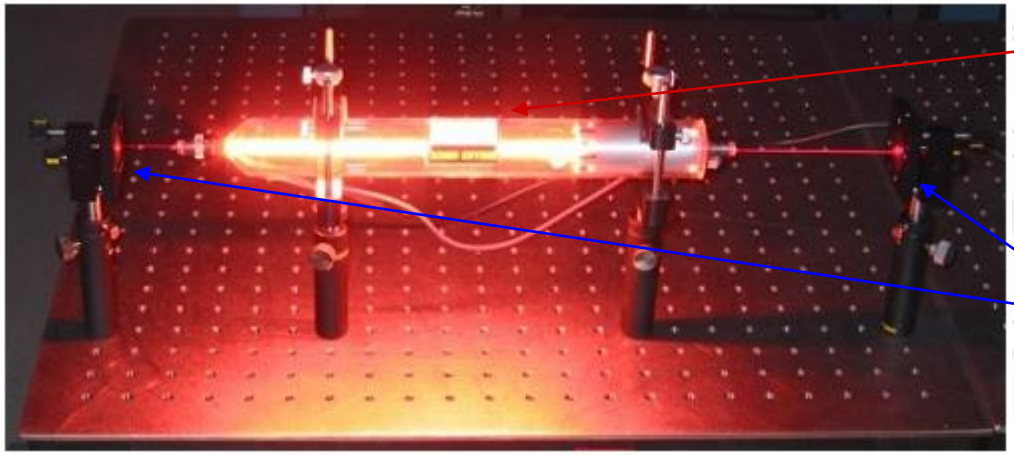
Monocromaticità

$$\nu_n = \frac{c}{\lambda_n} \qquad \lambda_n = \frac{2L}{n}$$

Frequenza dei modi longitudinali della cavità



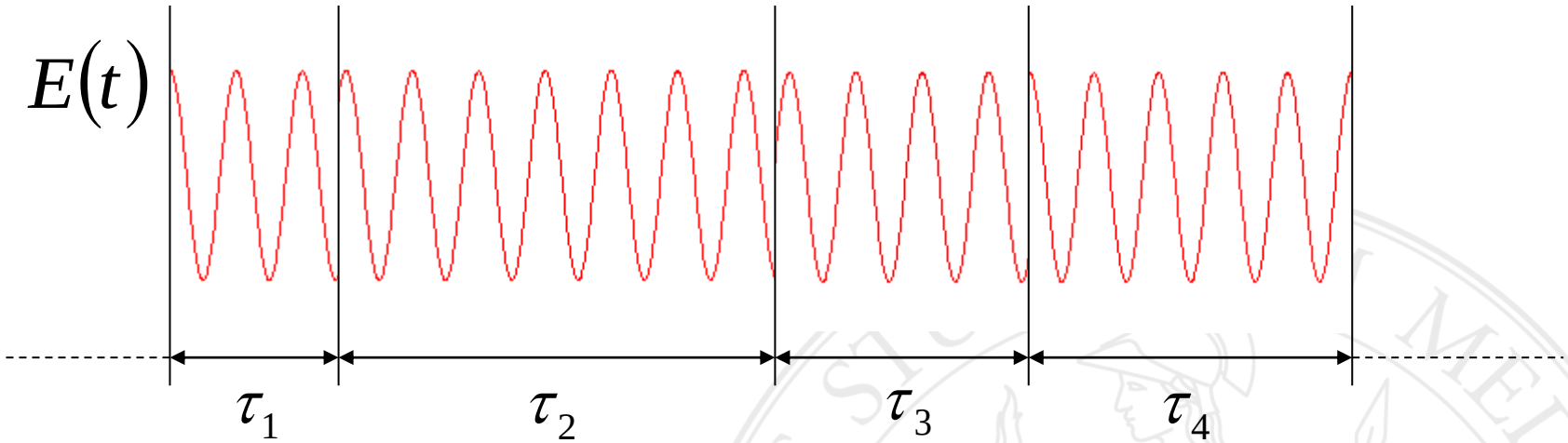
Laser He:Ne



La cavità formata dai due specchi ha i suoi modi oscillanti (onde stazionarie). Il laser può funzionare solo su questi modi oscillanti. Se selezioniamo solo uno di questi modi il laser produce una radiazione "quasi" monocromatica. Inoltre, è la cavità e non il mezzo attivo che determina le caratteristiche spaziali del fascio laser.

Coerenza temporale

Ci possiamo immaginare la radiazione di un laser come una successione di onde di lunghezza t_i separate da salti di fase casuali



Tempo di coerenza (tempo medio tra due salti di fase)

$$\tau_c = \int p(\tau)\tau\, d\tau$$

Funzione di distribuzione degli intervalli temporali t

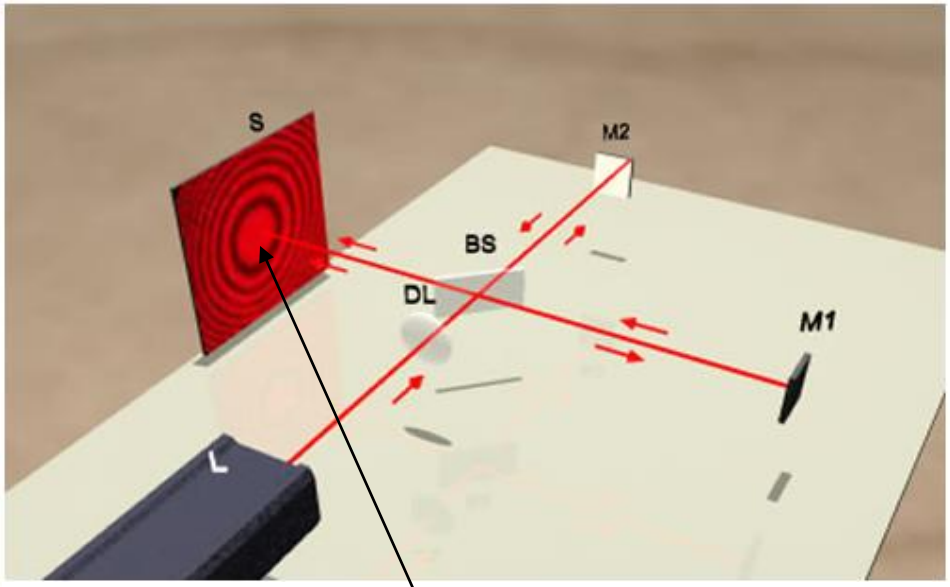
He-Ne $\tau_c \approx 0.3ns$ $(10cm)$

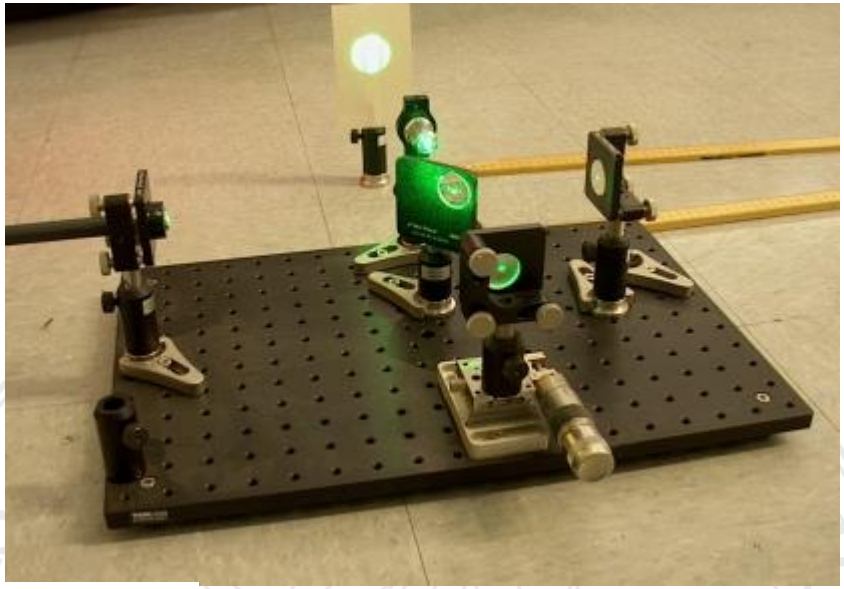
Laser a diodo $\tau_c \approx 1ps$ $(0.3mm)$

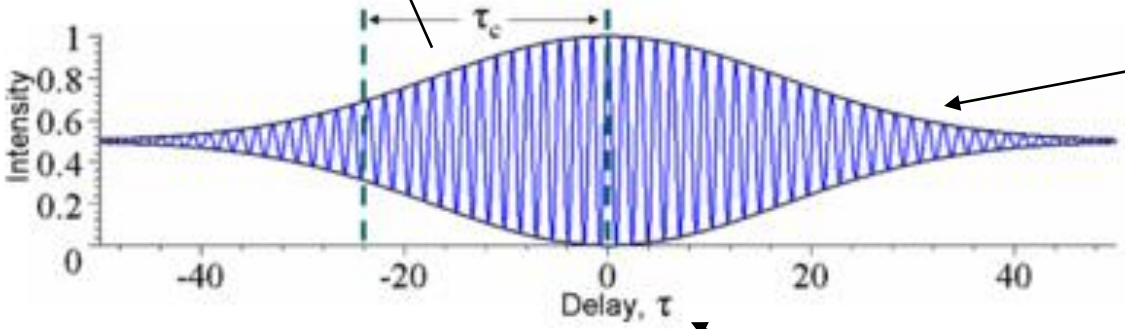
Il tempo di coerenza è inversamente proporzionale alla larghezza spettrale della radiazione

Misura della Coerenza temporale (Interferometro di Michelson)

Prima separo la radiazione con un beam splitter e poi rimetto insieme i due fasci dopo che questi hanno fatto due percorsi diversi: **vedo le frange di interferenza solo se la differenza di cammino è più piccola della coerenza temporale**







La visibilità delle frange diminuisce all'aumentare del delay time tra i due percorsi

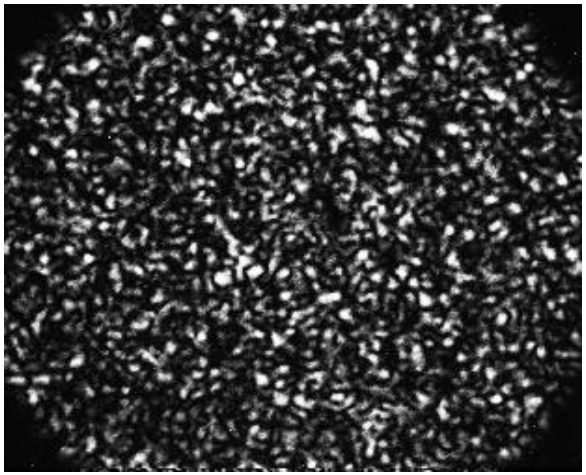
Differenza tra i due percorsi

Coerenza spaziale

Laser spot

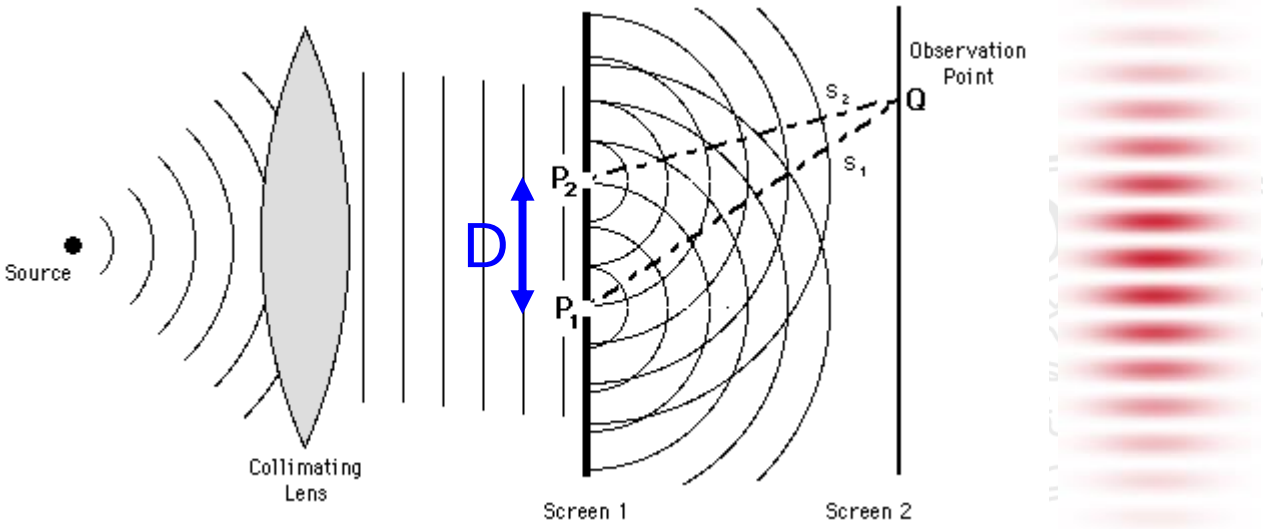
La fase è la stessa
lungo tutto il profilo

Sorgente termica (Lampadina, Sole …)



La fase cambia casualmente
tra speckles diverse

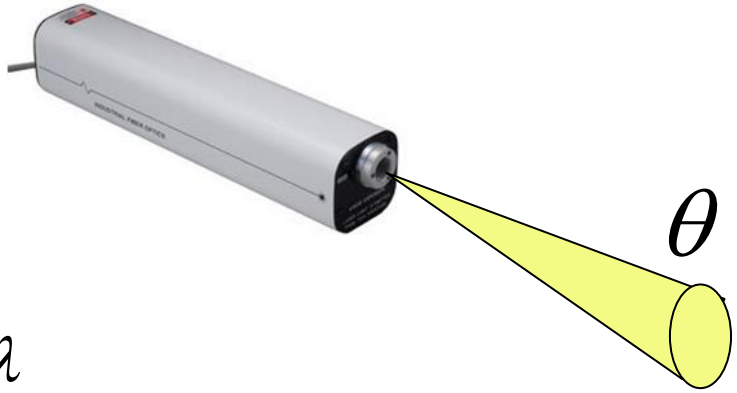
Misura della Coerenza spaziale (Interferometro di Young)



Vedo le frange solo se la distanza D è più piccola rispetto alla coerenza spaziale: se la distanza D è maggiore della coerenza spaziale tra i due punti P1 e P2 abbiamo una fluttuazione casuale della fase e quindi non possiamo vedere frange di interferenza.

Direzionalità e Brillanza

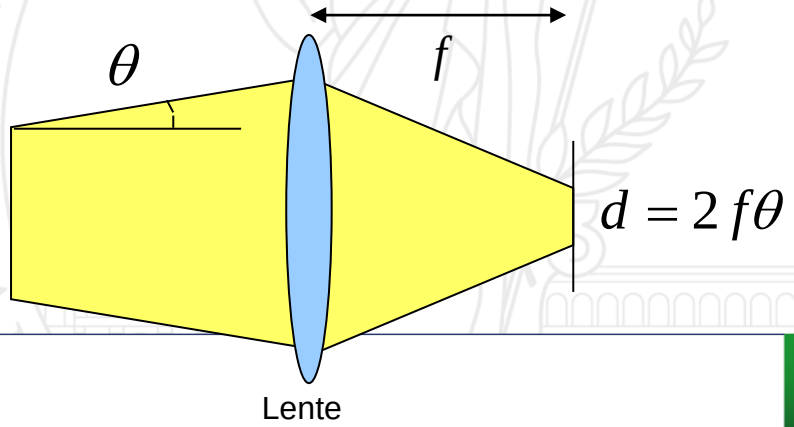
L'angolo di diffrazione è inversamente proporzionale alla coerenza spaziale (nel caso del laser è la dimensione totale dello spot, mentre nel caso di radiazione termica è la dimensione della speckle)



$$\theta \propto \frac{\lambda}{\sqrt{S_c}}$$

Area di coerenza spaziale

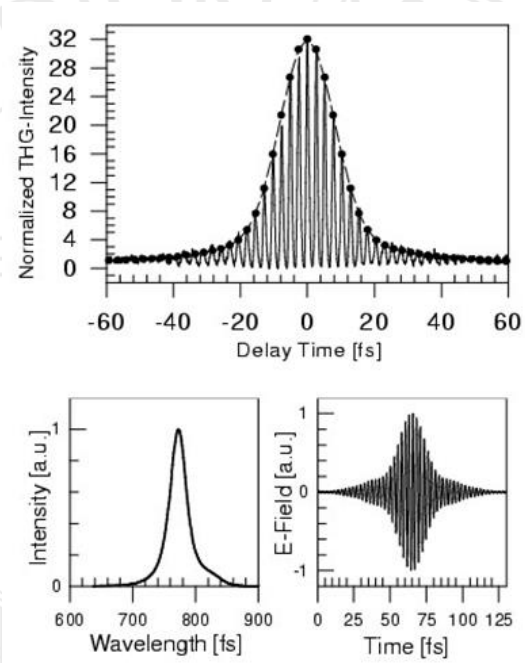
Un'area di coerenza grande implica la possibilità di focalizzare su aree molto piccole (ciò permette di ottenere intensità elevatissime con radiazione LASER)



Generazione di impulsi brevi

$$\tilde{A}(\omega) \propto e^{-\frac{\omega^2}{\Delta\omega^2}} \longrightarrow A(t) = \int \tilde{A}(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \propto e^{-\frac{\Delta\omega^2 t^2}{4}}$$

Se un laser produce una radiazione con uno spettro molto largo e se le componenti di questo spettro sono in fase tra loro (mode-locking) si possono ottenere impulsi molto stretti.



$$Ti : Al_2O_3 \qquad \Delta t = 35\, fs$$

Confronto tra un laser e una sorgente termica

Un piccolo laser He:Ne

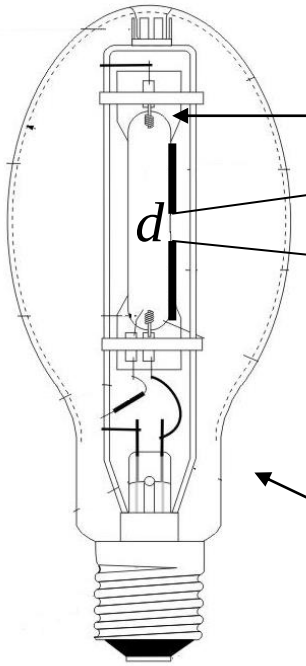
Spot del laser

λ=633 nm P=1mW w_o=1mm

Una potente lampada a vapori di Hg

$$\lambda_{peak} = 546nm$$

$$P = 10W$$



filtro

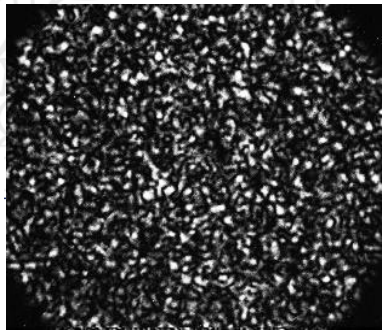
Il punto è redere confrontabili la **coerenza temporale e spaziale*** della lampada e del laser

lente

apertura D

$$B = 95 \frac{W}{cm^2 sr}$$

brillanza



* La radiazione di una sorgente termica è caratterizzata da speckles, per avere una buona coerenza spaziale ne dobbiamo selezionare solo una

Confronto tra un laser e una sorgente termica

Per rendere confrontabili le aree di coerenza devo selezionare una piccola parte della radiazione uscente dalla lampada…

$$D_{coerente} \cong 0.32 \frac{\lambda f}{d}$$

$$A = \pi \frac{d^2}{4}$$

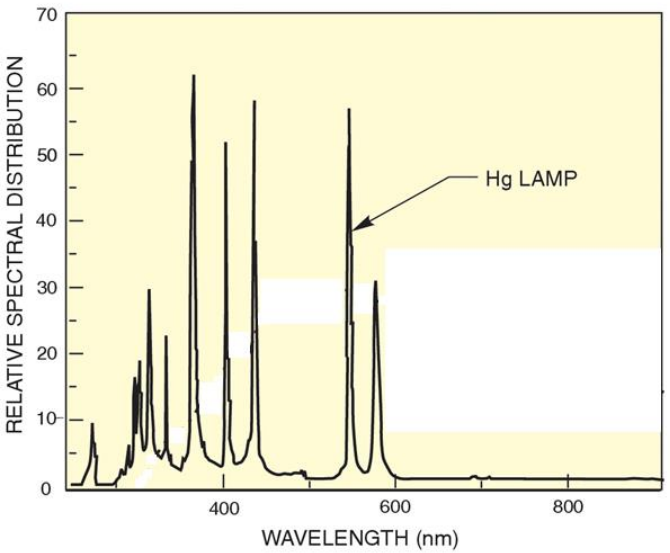
$$\Omega = \frac{\pi}{4} \frac{D^2}{f^2}$$

$$P_{out} = B \cdot A \cdot \Omega \approx 10^{-8} W$$

Potenza che si ottiene selezionando una singola speckle

Per rendere confrontabili le larghezze spettrali e quindi i tempi di coerenza devo selezionare una piccola parte dello spettro della lampada

P_{out} = *regime di fotoconteggio*



Tipi di LASER

http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_laser_types

Laser a Stato Solido:

- Nd:YAG ($Y_3Al_5O_{12}$) 1064 nm ; Nd:YLF ($YLiF_4$) 1053 nm ; Nd:Glass (1053 nm) ; Cr:Al_2O_3 (694 nm) ; Yb:YAG (1035nm)
- Tm:Ho:YAG (2091nm) ; Er:YAG (2940nm) ; Yb:Er:Glass (1540 nm)
- Cr:$BeAl_2O_4$ (700-820nm) ; Ti:Al_2O_3 (660-1180nm) ; Cr:$LiSrAlF_6$ (780-1010nm)

Diodo Laser:

- InGaAlP/GaAs (720-850nm)
- AlGaAs/GaAs (1200-1650nm)
- InGaAsP/InP (900-1100nm)
- InGaAs/GaAs (630-700nm)
- InGaN (405 nm)

DYE laser:

- 3,3' diethyl thiatricarbocyanine iodide (810nm)
- Rhodamine 6G (590nm)
- Coumarin (400-500nm)

Laser a Gas:

- He-Ne (633 nm)
- He-Cd (416nm, 325nm)
- Ar^+ (514.5nm, 488nm)
- Vapori di Rame (510nm, 578nm)
- Excimer : ArF (193nm), KrF(248nm), XeF (351nm), XeCl (309nm)
- CO2 (10.6 μm, 9.6μm)
- CO (5 μm)

Esempi di diodi laser

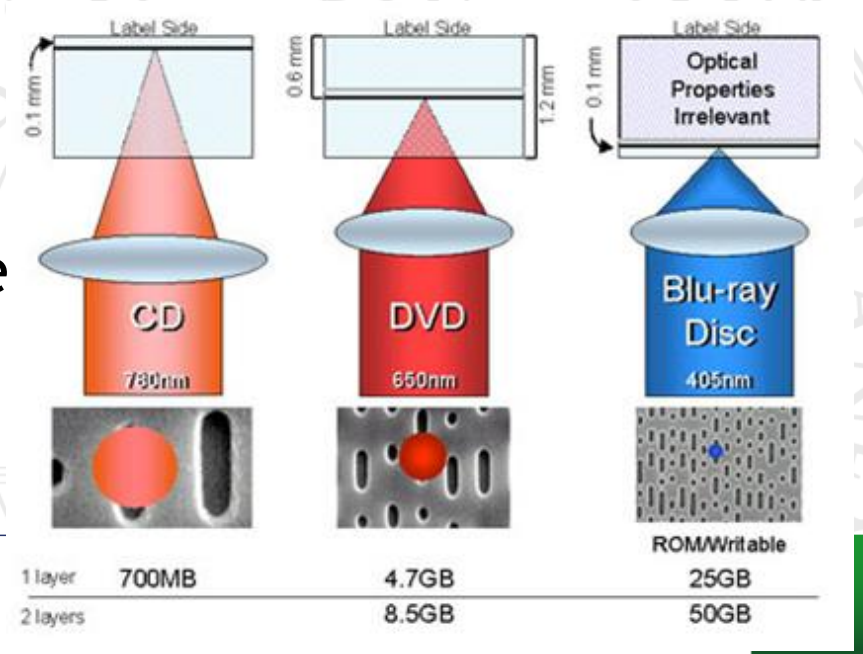
Diodo Laser

Diodo laser accoppiato in fibra

$$w_f = \frac{\lambda f}{\pi w}$$

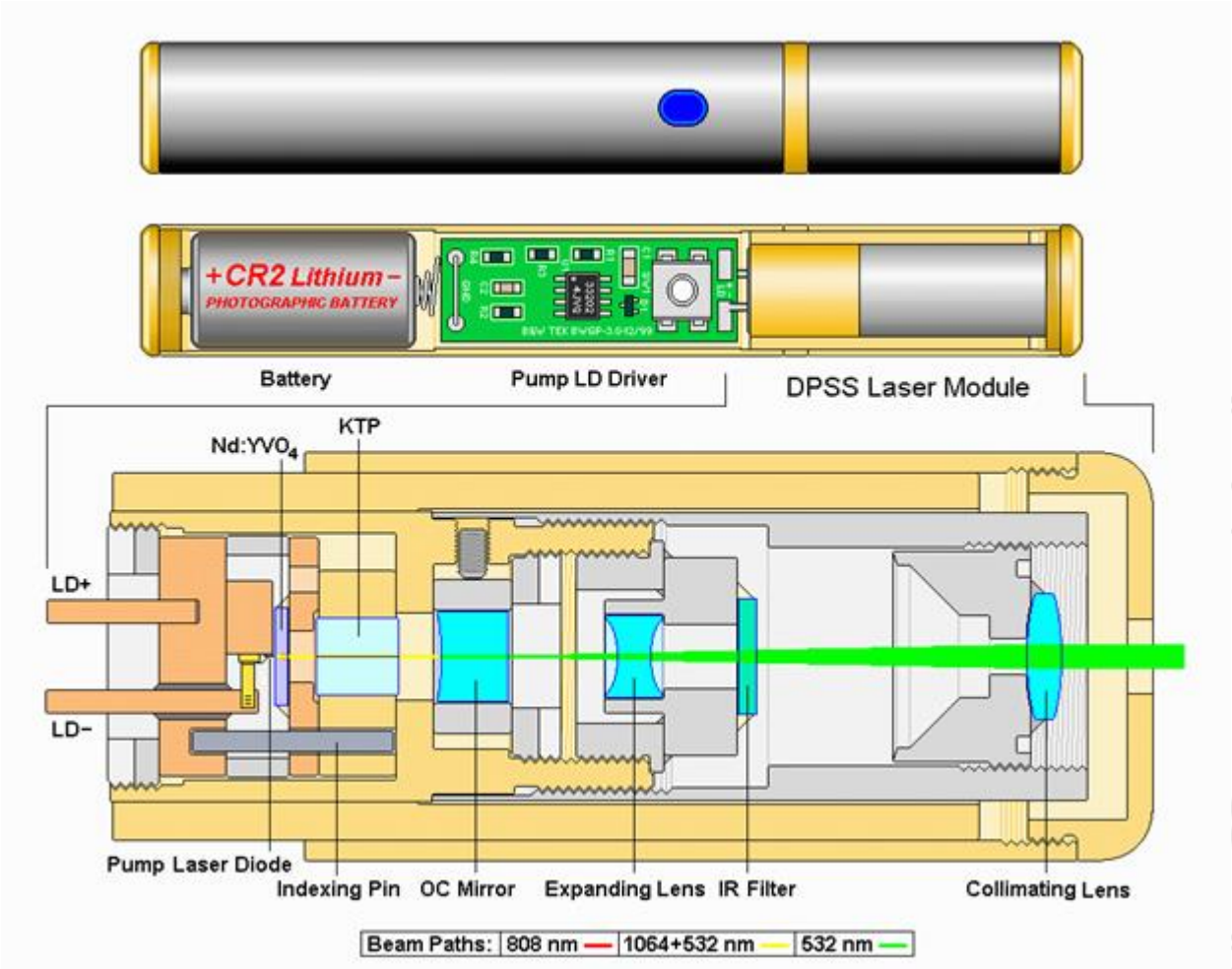
Dimensione dello spot nel fuoco della lente (diminuisce al diminuire della λ)

Applicazione comune



Esempio di un piccolo sistema LASER

Green pointer



Laser a stato solido pompato da un laser a diodo + generazione di seconda armonica

Programma del corso

Equazioni del laser

Allineamento di una cavità e misura della potenza

Teoria della cavità ottica

Misura del FSR e della focale termica tramite battimenti tra modi

Caratteristiche spettrali dei laser

Confronto teoria esperimento con tre laser (Nd:YAG, Argon, Ti:Sa)

Oscillazioni di rilassamento

Misura delle oscillazioni di rilassamento e funzionamento in singolo modo

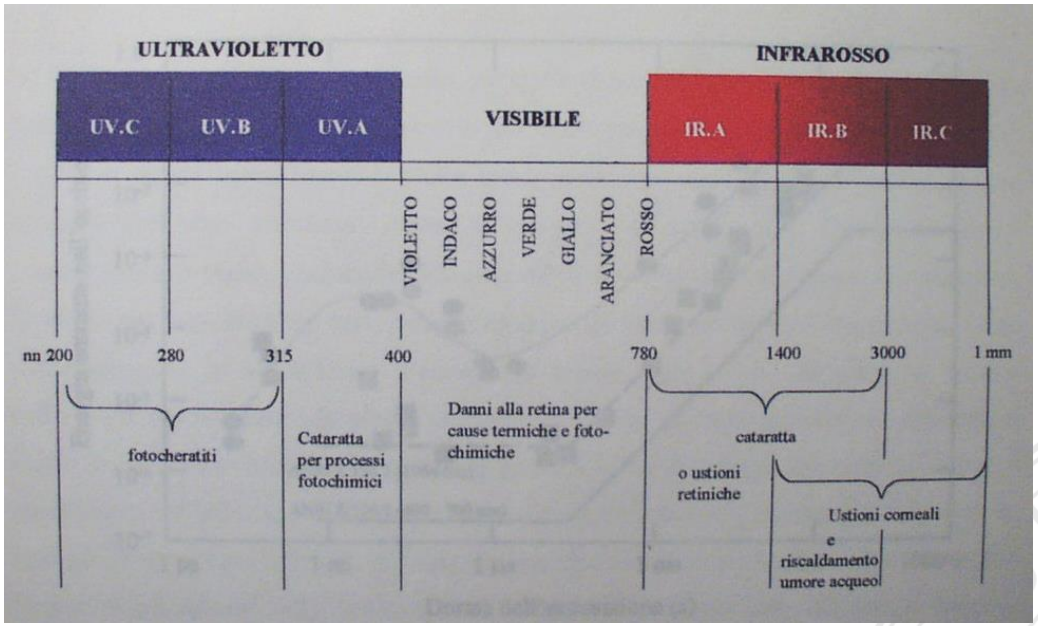
Teoria del Q-switch

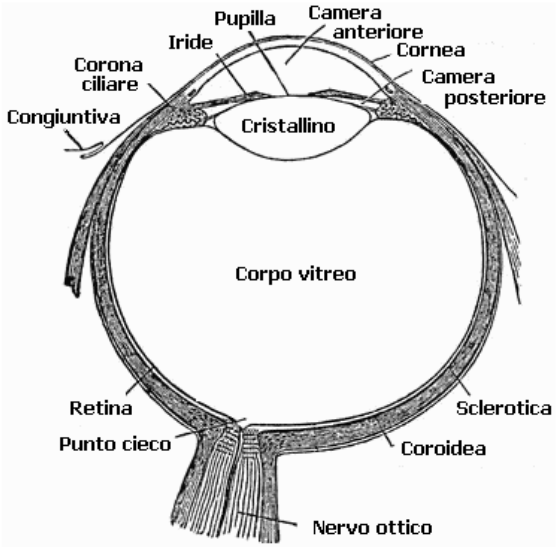
Nd:YAG funzionante in Q-switch 10ns

Teoria del Mode-locking

Laser mode locked in fibra 100fs e misura con autocorrelatore

Info sulla sicurezza

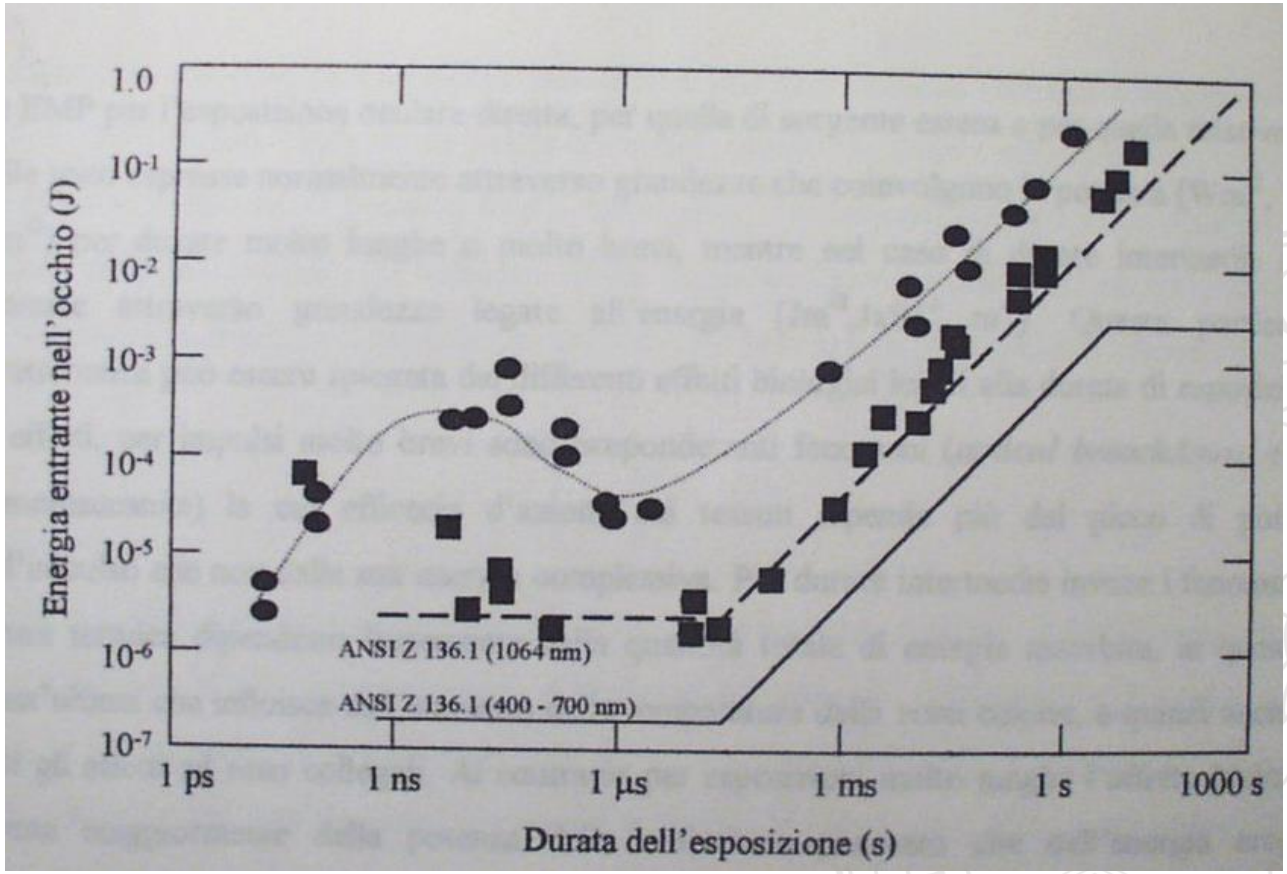




100 nm - 280 nm	lontano ultravioletto (UV-C)
280 nm - 315 nm	medio ultravioletto (UV-B)
315 nm - 400 nm	vicino ultravioletto (UV-A)
400 nm - 760 nm	visibile
760 nm - 1400 nm	vicino infrarosso (IR-A)
1400 nm - 3000 nm	medio infrarosso (IR-B)
3000 nm - 1 mm	lontano infrarosso (IR-C)

Esposizioni massime permesse (EMP)

Caso di un laser CW



Esempio:

laser He-Ne 633 nm da 2mW.

In 1s di esposizione entrano nell'occhio circa 2 mJ di energia che è circa il limite di esposizione.

Quindi anche un piccolo laser He-Ne è pericoloso.

Esposizioni massime permesse (EMP)

Caso di un laser impulsato:

La norma CEI 76-2 stabilisce che le EMP nel caso dei laser impulsati sono determinate utilizzando la più restrittiva della prescrizioni dei punti a) b) e c):

a) L'esposizione a ciascun impulso del treno non deve superare la EMP per un impulso singolo

b) L'irradiamento medio per un treno di impulsi di durata T non deve superare la EMP per un singolo impulso di durata T

c) L'esposizione a ciascun impulso non deve superare la EMP per un impulso singolo moltiplicato per il numero totale N di impulsi presenti nel treno durante il tempo di esposizione, elevato alla potenza -1/4

Esempio: Nd:YAG impulsato. 10nJ a impulso (ogni impulso è lungo 100ps) con rep. rate 100MHz. La potenza media è 1W quindi in 1s di esposizione abbiamo 1J che è circa 2 ordini di grandezza al di sopra dei limiti !

Occhiali di protezione

Gli occhiali di protezione devono avere la densità ottica di sicurezza alla lunghezza d'onda di interesse.

L'energia che arriva sull'occhio data la densità ottica D è :

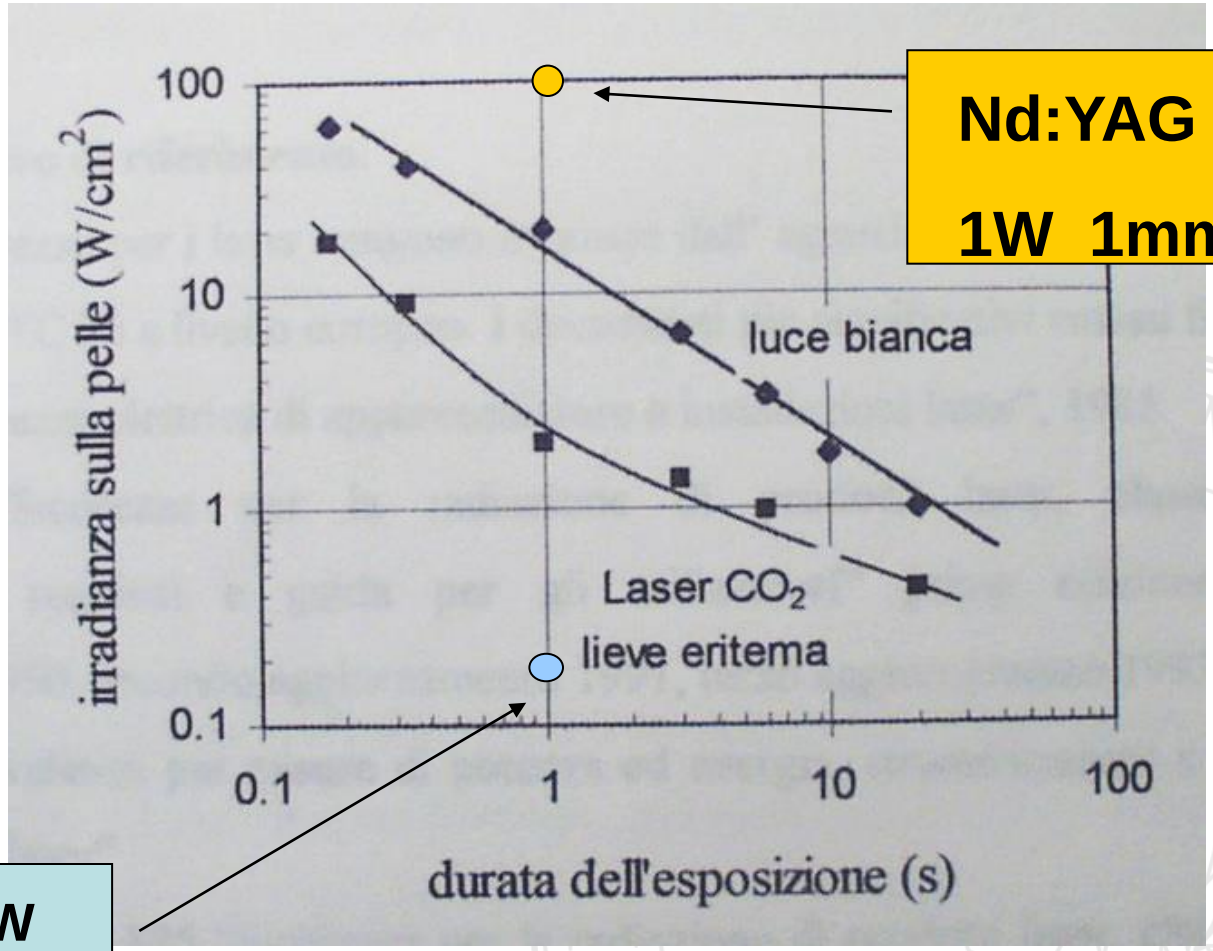
$$E = E_{laser} 10^{-D}$$

Quindi la densità ottica richiesta è:

$$D = \log\left(\frac{E_{laser}}{EMP}\right)$$

Si trova solitamente: $D \geq 3$

Soglia per gli eritemi



Nd:YAG

1W 1mm²

He-Ne 2mW

1 mm²

Classificazione dei LASER

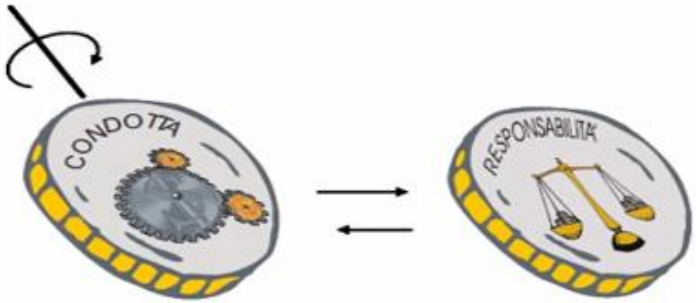
Sicuri

Classe I	E < EMP
Classe II	$\Delta T<0.25s$ E<EMP $\Delta T>0.25s$ P=1mW
Classe III A	Classe II x 5
Classe III B	CW P<500mW
Classe IV	Oltre

Esercizio di fatto dei poteri

Le posizioni di garanzia

principio dell'effettività



PRINCIPIO DELL' EFFETTIVITÀ
è responsabile chi:
- doveva e poteva fare ma non ha fatto
- non doveva fare ma ha fatto

POSIZIONI DI GARANZIA
Datore di lavoro
Dirigente
RADL

Sovrapposizione di
RUOLI ACCADEMICI
RUOLI GESTIONALI

Individuazione/consapevolezza
POSIZIONE DI GARANZIA

Articolo 299 - Esercizio di fatto di poteri direttivi
Le posizioni di garanzia relative ai soggetti di cui all'articolo 2, comma 1, lettere b), d) ed e), gravano altresì su colui il quale, pur sprovvisto di regolare investitura, eserciti in concreto i poteri giuridici riferiti a ciascuno dei soggetti ivi definiti.

Importanza dell'organigramma gerarchico funzionale con attribuzione di competenze

RESPONSABILE delle ATTIVITA' DIDATTICHE e/o di RICERCA in LABORATORIO

RADRL

Ai sensi dell'art. 2 comma 5 del D.M. 363/98

si intende per responsabile delle attività didattica e/o di ricerca in laboratorio

il soggetto che, individualmente o come coordinatore di gruppo, svolge attività didattiche e/o di ricerca in laboratorio

Gli organi di gestione delle strutture universitarie di cui al punto 2) citato, **secondo regole proprie**, individuano, mediante delibere, fra il personale dipendente dell'Università afferente alla struttura, i suddetti responsabili.

Gli stessi organi individuano, altresì, l'ambito e le attività di didattica e di ricerca entro le quali si configura la responsabilità dei soggetti indicati al comma precedente.

PREPOSTO «DI FATTO»

Chiunque abbia assunto, in qualsiasi modo, posizione di preminenza rispetto agli altri lavoratori, così da poter loro impartire ordini, istruzioni o direttive sul lavoro da eseguire, deve essere considerato, per ciò stesso, tenuto a norma del Decreto del Presidente della Repubblica 27 aprile 1955, n. 547, articolo 4, all'osservanza ed all'attuazione delle prescritte misure di sicurezza ed al controllo del loro rispetto da parte dei singoli lavoratori".

(Corte di Cassazione – Penale Sezione IV – Sentenza n. 19553 del 18 maggio 2011 (u. p. 27 gennaio 2011) – Pres. Marzano – Est. Foti – P.M. Monetti – Ric. N. G.

PREPOSTO «DI FATTO»

Il preposto di fatto è una figura che non necessita di nomina in quanto **chiunque abbia prevalenza (per anzianità, competenza, esperienza...) sugli altri lavoratori** presenti nel luogo di lavoro può essere ritenuto preposto di fatto.

La responsabilità, per quanto gli attiene, rimane in capo al preposto di diritto, al dirigente e al DdL.

In caso di assenza (es. lezione, esami, convegni, riunioni), il RADRL deve accertarsi che il personale che lascia in laboratorio sia informato, formato e addestrato per operare in sicurezza, ossia che abbia le competenze per operare anche senza la sorveglianza diretta del preposto di diritto (RADRL).

In caso contrario, in mancanza di questi presupposti, il preposto di diritto dovrebbe non consentire l'accesso al laboratorio e lo svolgimento di attività in sua assenza.

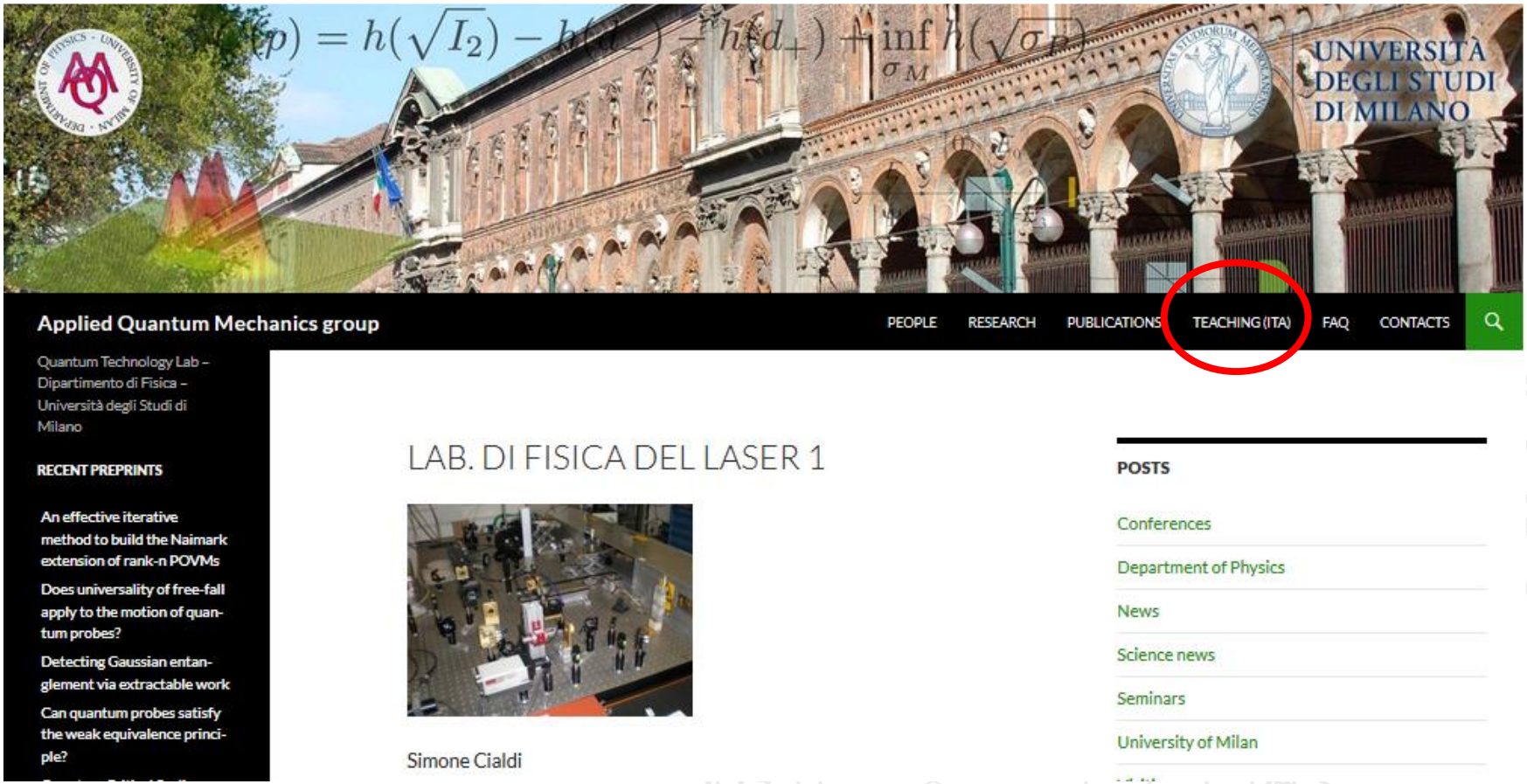
Testi Consigliati

- ***Principles of Lasers***, Orazio Svelto

- ***Lasers***, A. E. Siegman

- ***Solid-State Laser Engineering***, W. Koechner

Internet:
- http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html

Lezioni del corso

http://sites.unimi.it/aqm