



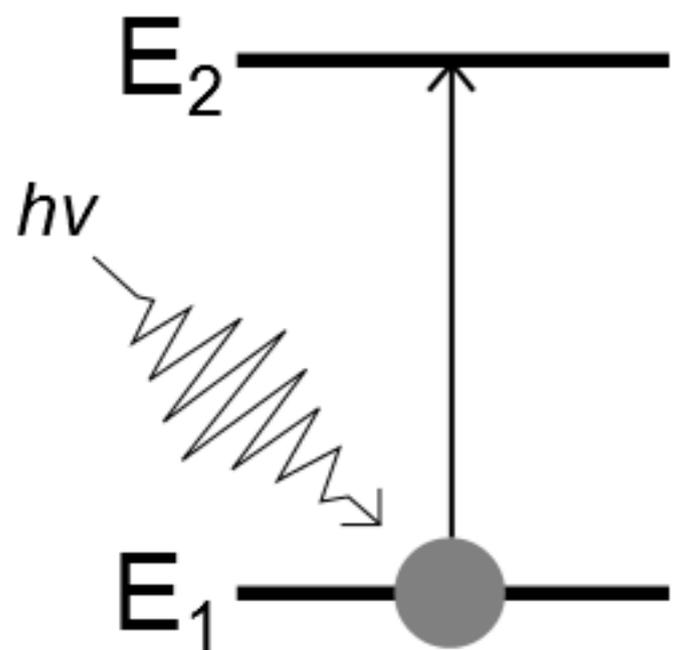
# Pregi e problemi dei materiali drogati con terre rare: ricerca, esperimenti ed applicazioni nella fotonica

Alberto Sottile  
Dipartimento di Fisica, Università di Pisa

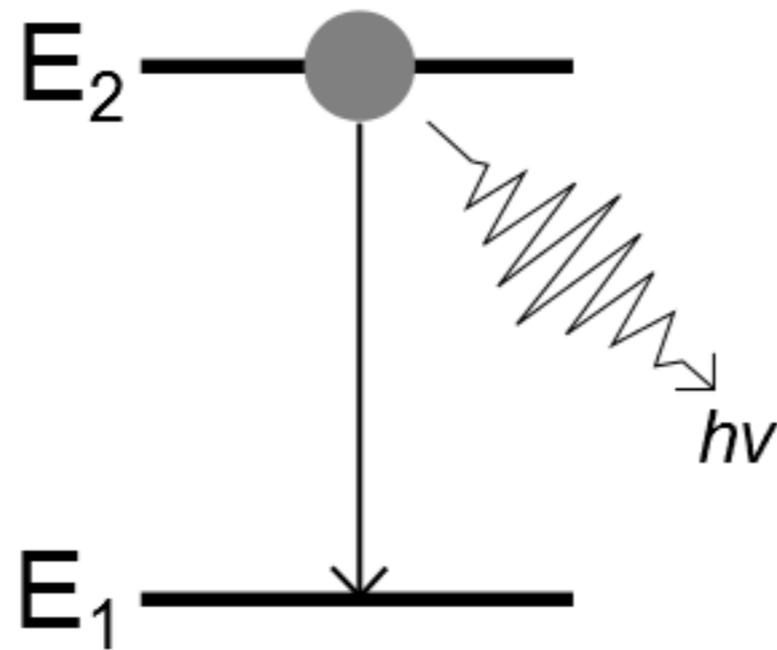
Pisa, 23 Aprile 2015

# Transizioni ottiche

Interazioni tra radiazione ed un sistema fisico



Assorbimento



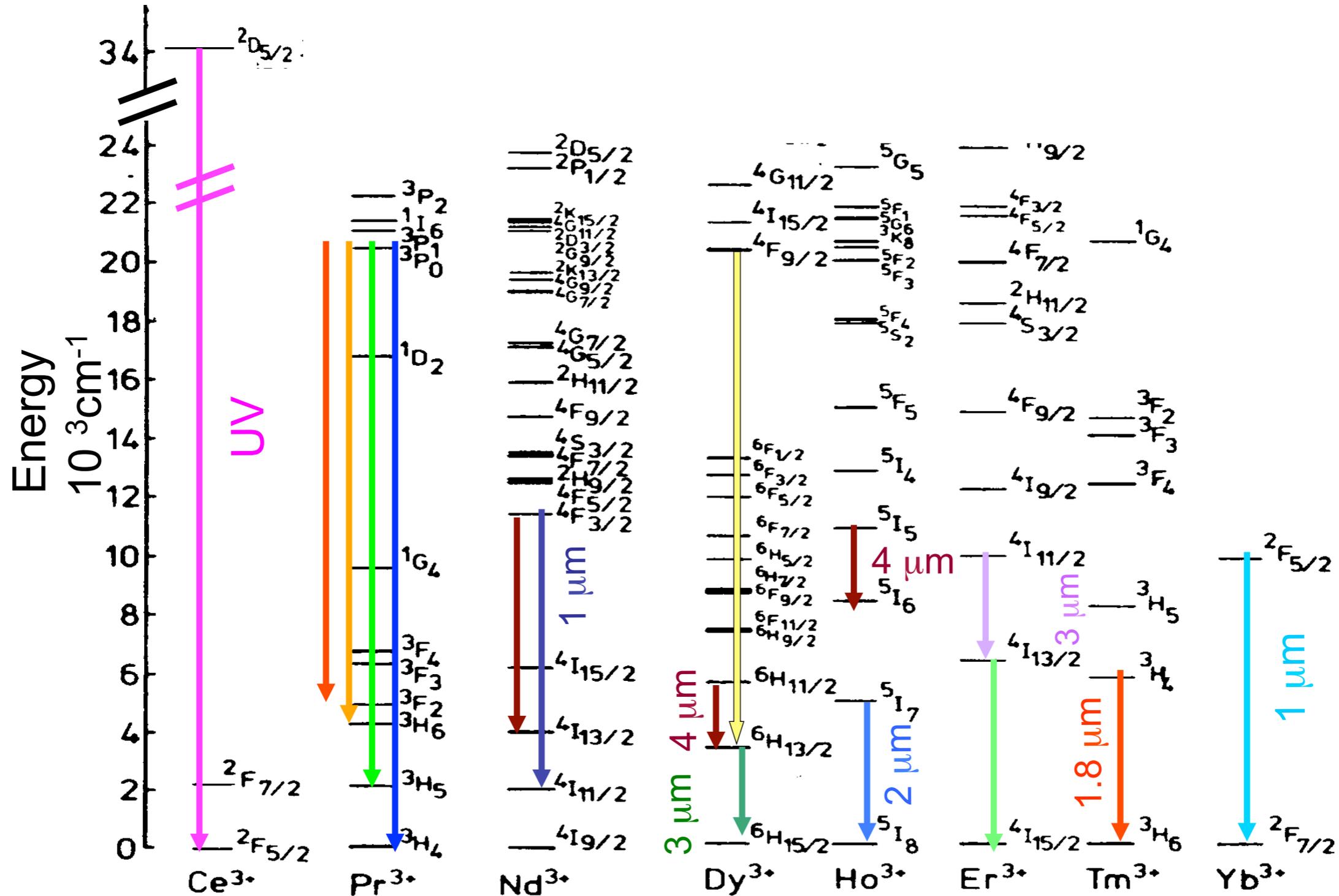
Emissione  
spontanea

- ▶ Energie permesse per le componenti del sistema
- ▶ Livelli a diverse energie interagiscono a diverse lunghezze d'onda
- ▶ Non si possono spostare



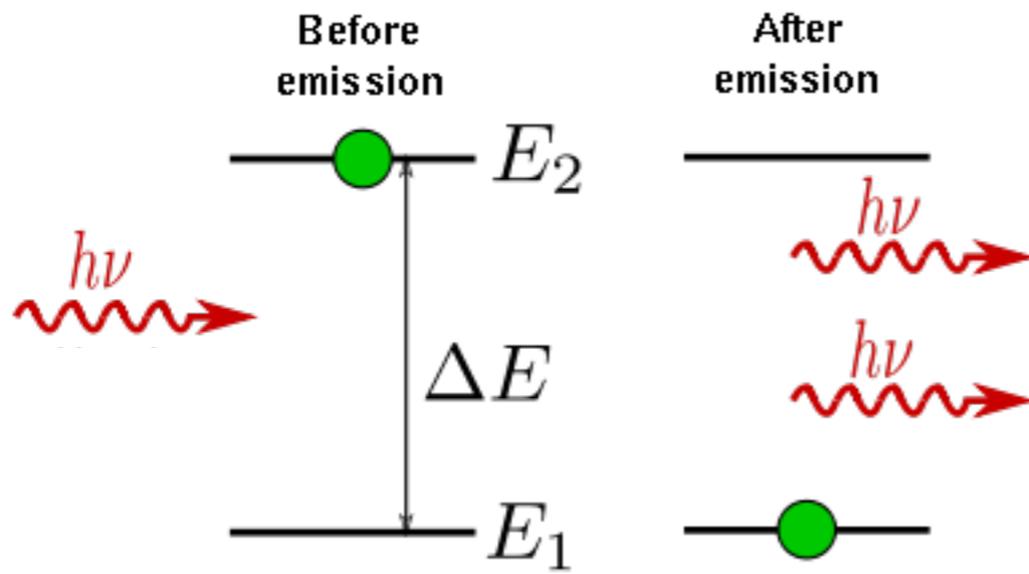
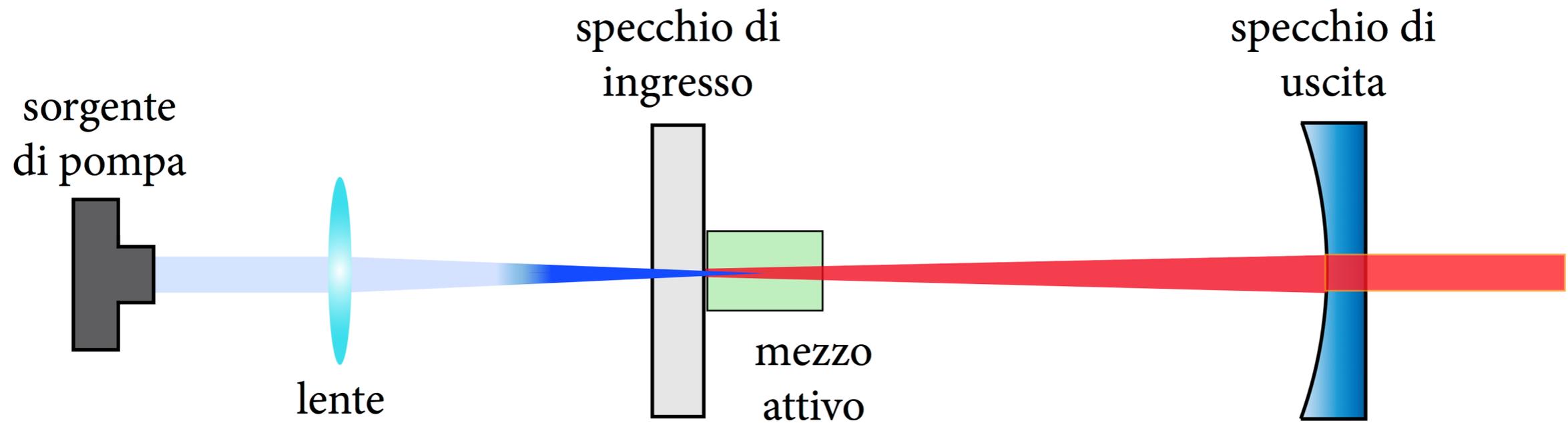
# Ioni trivalenti di terre rare

Tante transizioni accessibili nel visibile, nell'UV e nell'IR



# Laser a stato solido

Sorgenti di luce coerente e ad alta intensità

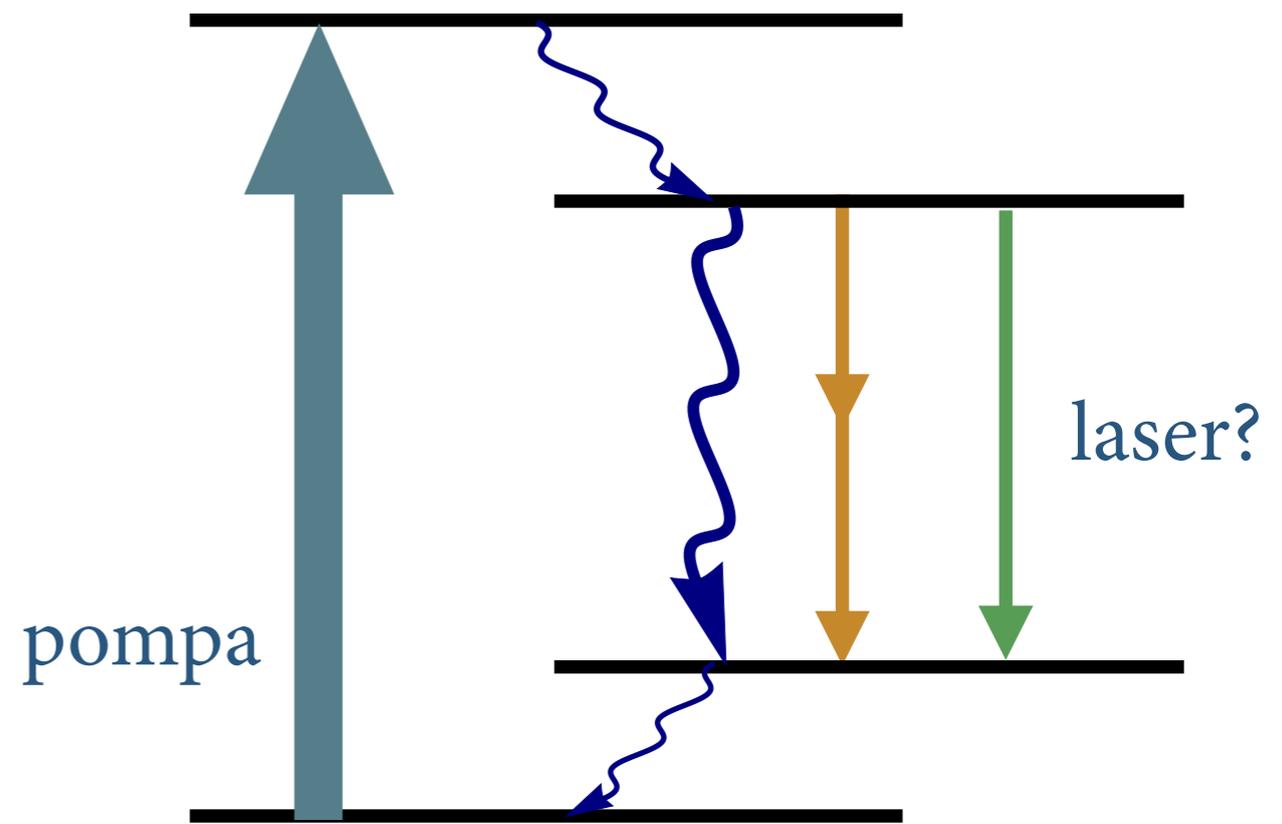
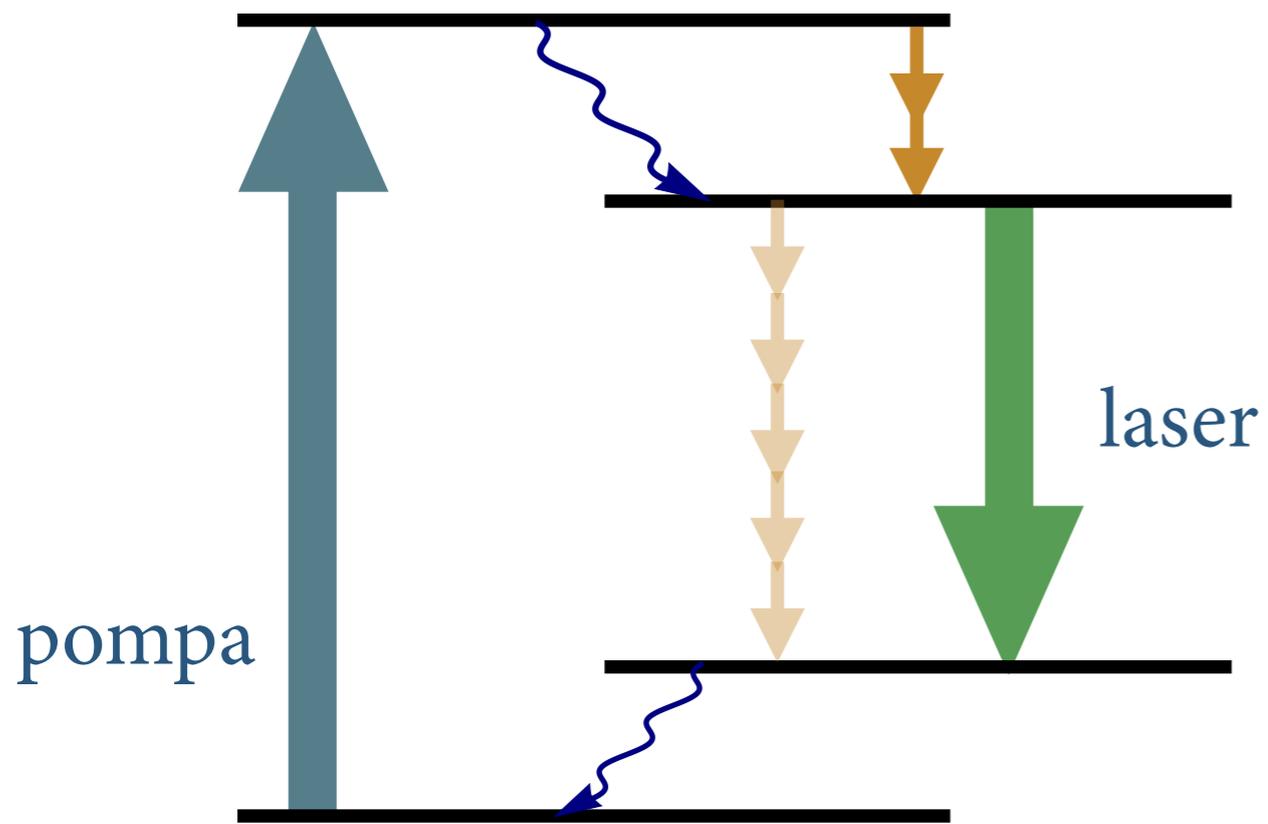


Emissione stimolata

- ▶ Basati sui livelli di ioni trivalenti di terre rare
- ▶ Richiedono inversione di popolazione tra due livelli

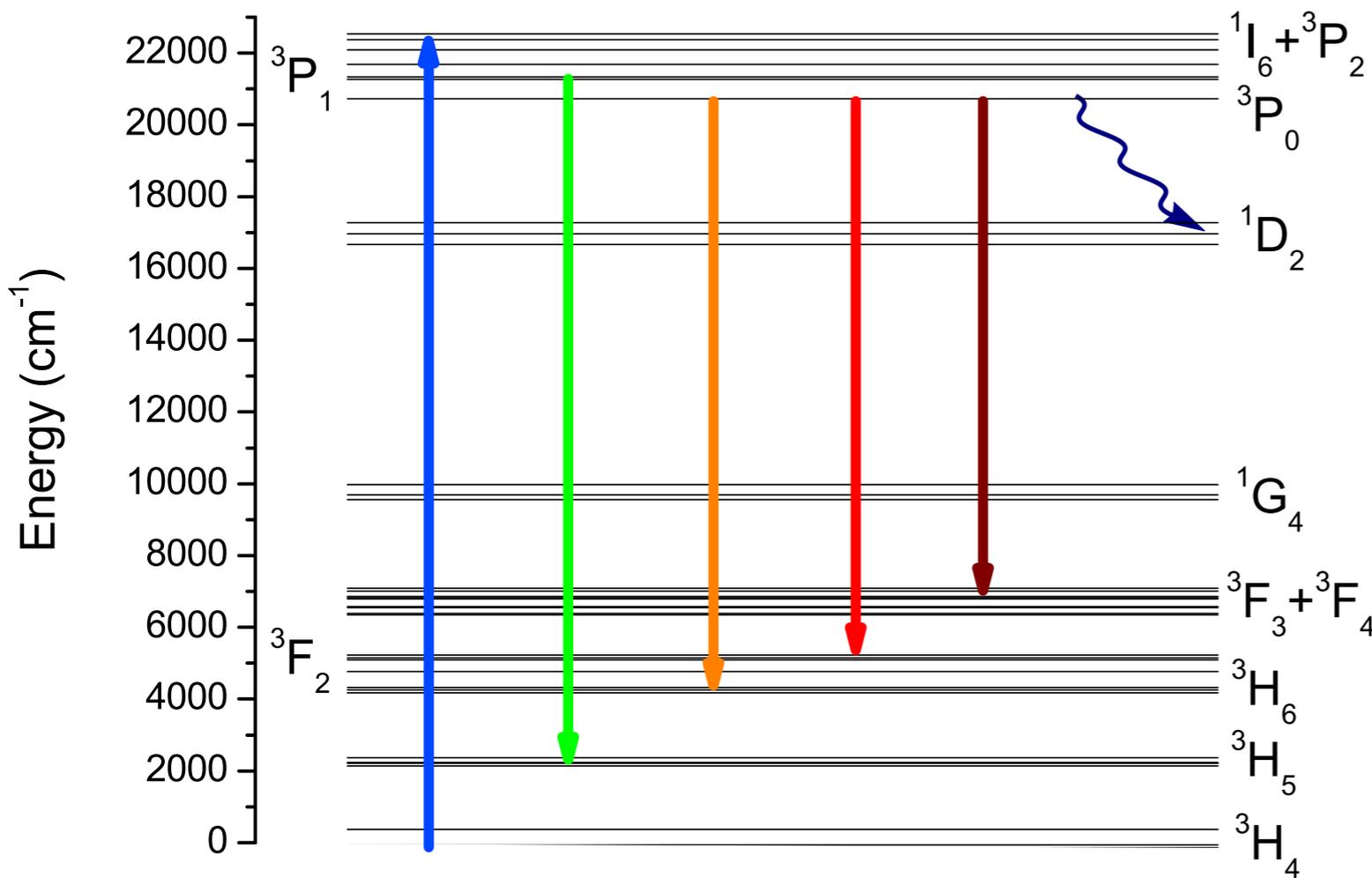
# Laser a stato solido

Schema di pompaggio ottico e decadimento fononico



# Laser a praseodimio (Pr)

Possibili transizioni laser in tutto il visibile



- ▶ Assorbimento adatto per diodi laser blu
- ▶ Sorgente di pompa per la metrologia a Sr
- ▶ Svuotamento del livello laser superiore
- ▶ Sensibile al materiale in cui gli ioni Pr sono inseriti

# Fluoruri monocristallini

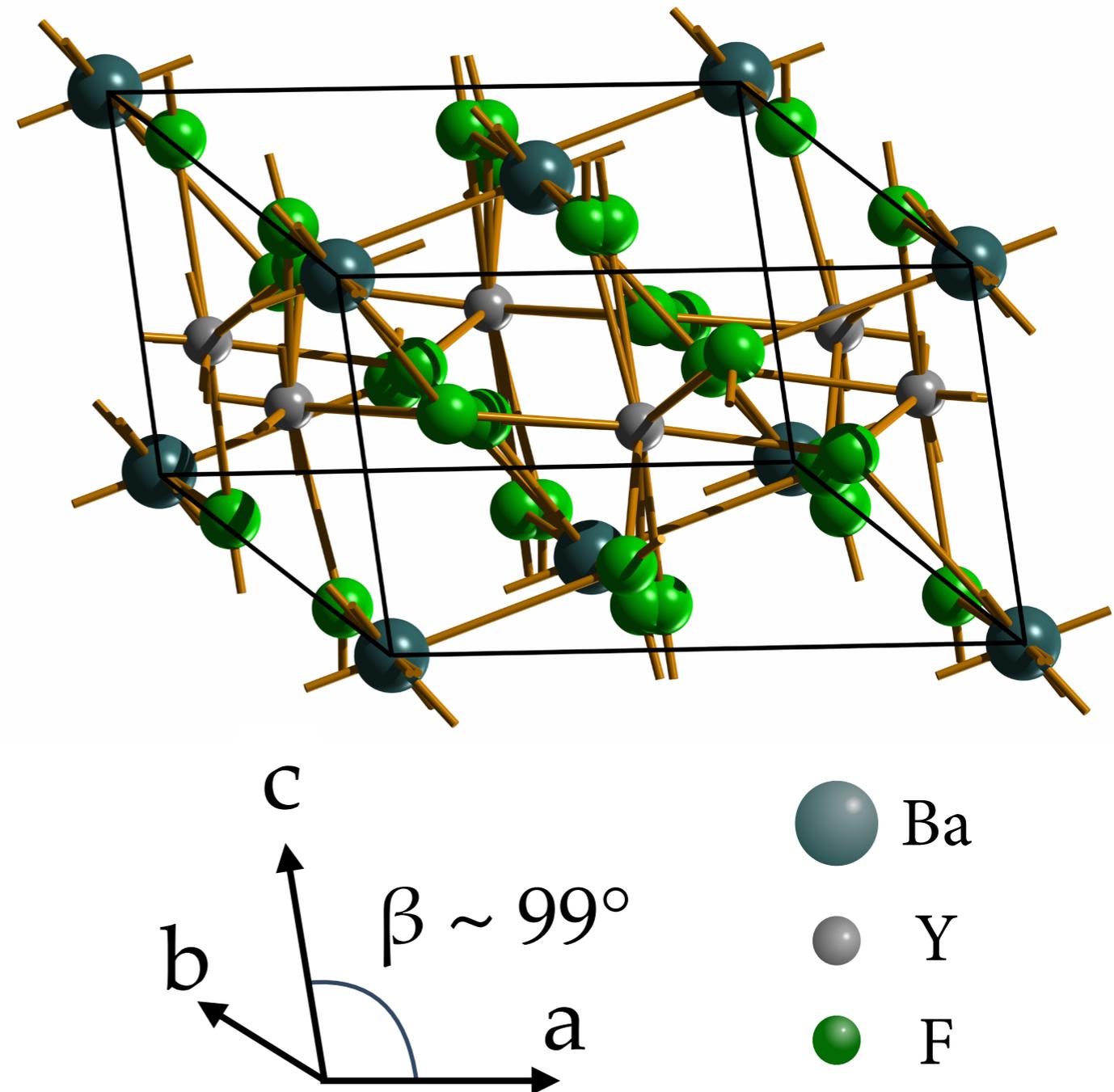
Eccellenti materiali per applicazioni ottiche e laser



es.  $\text{LiYF}_4$ ,  $\text{BaY}_2\text{F}_8$ ,  $\text{KY}_3\text{F}_{10}$

- ✓ Trasparenti dall'IR all'UV
- ✓ Non igroscopici e stabili
- ✓ Fononi di bassa energia

- ✗ Estremamente sensibili alla presenza di acqua
- ✗ Difficili da produrre



# Fluoruri monocristallini

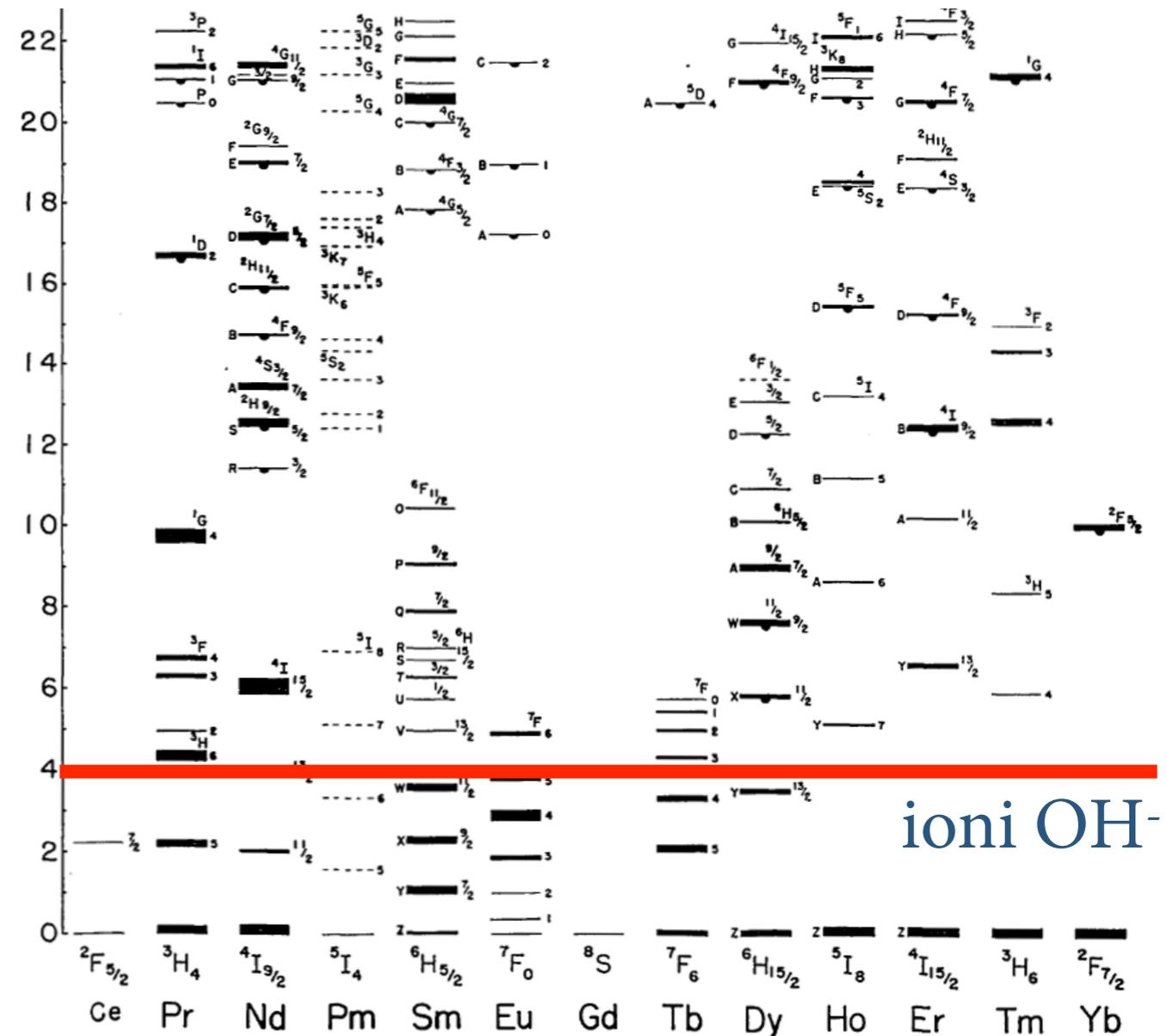
Eccellenti materiali per applicazioni ottiche e laser



es.  $\text{LiYF}_4$ ,  $\text{BaY}_2\text{F}_8$ ,  $\text{KY}_3\text{F}_{10}$

- ✓ Trasparenti dall'IR all'UV
- ✓ Non igroscopici e stabili
- ✓ Fononi di bassa energia

- ✗ Estremamente sensibili alla presenza di acqua
- ✗ Difficili da produrre

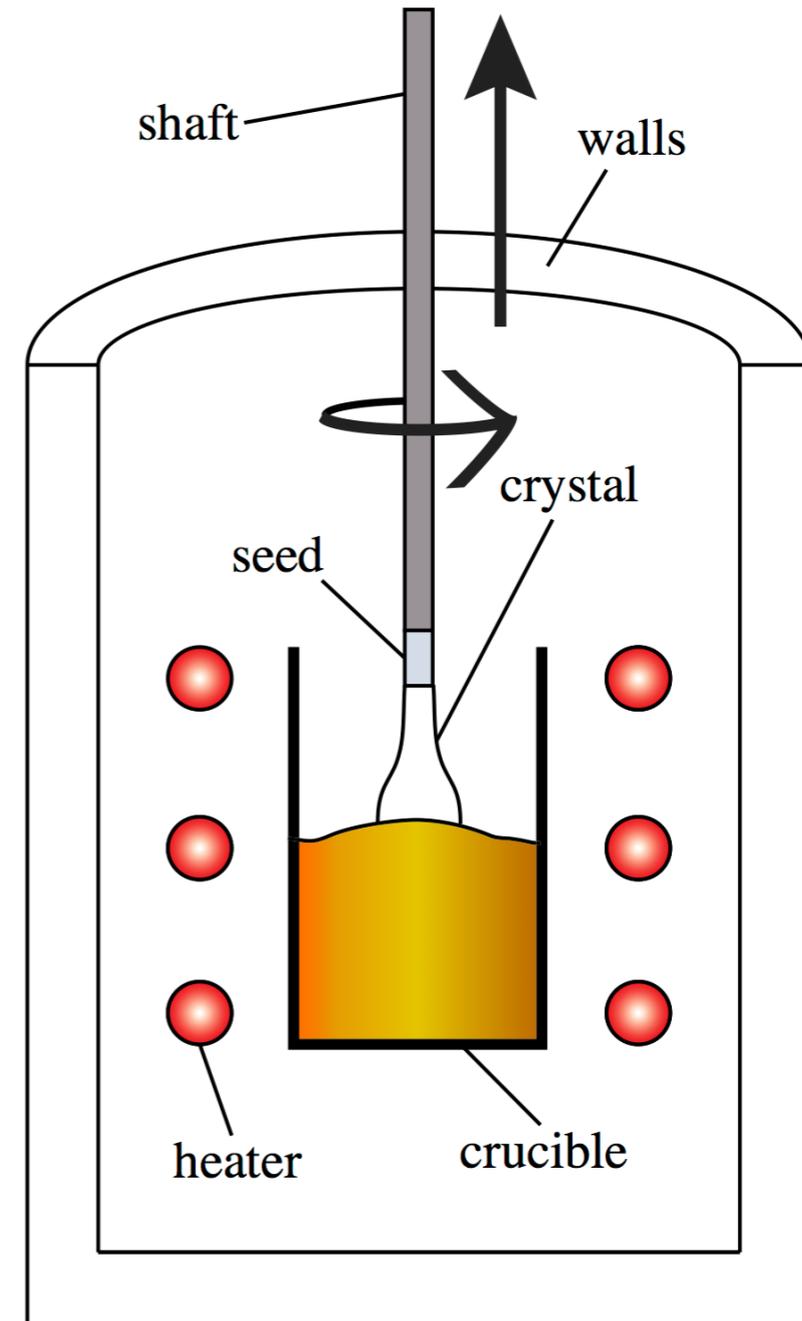


# Apparato di crescita

## Il metodo Czochralski

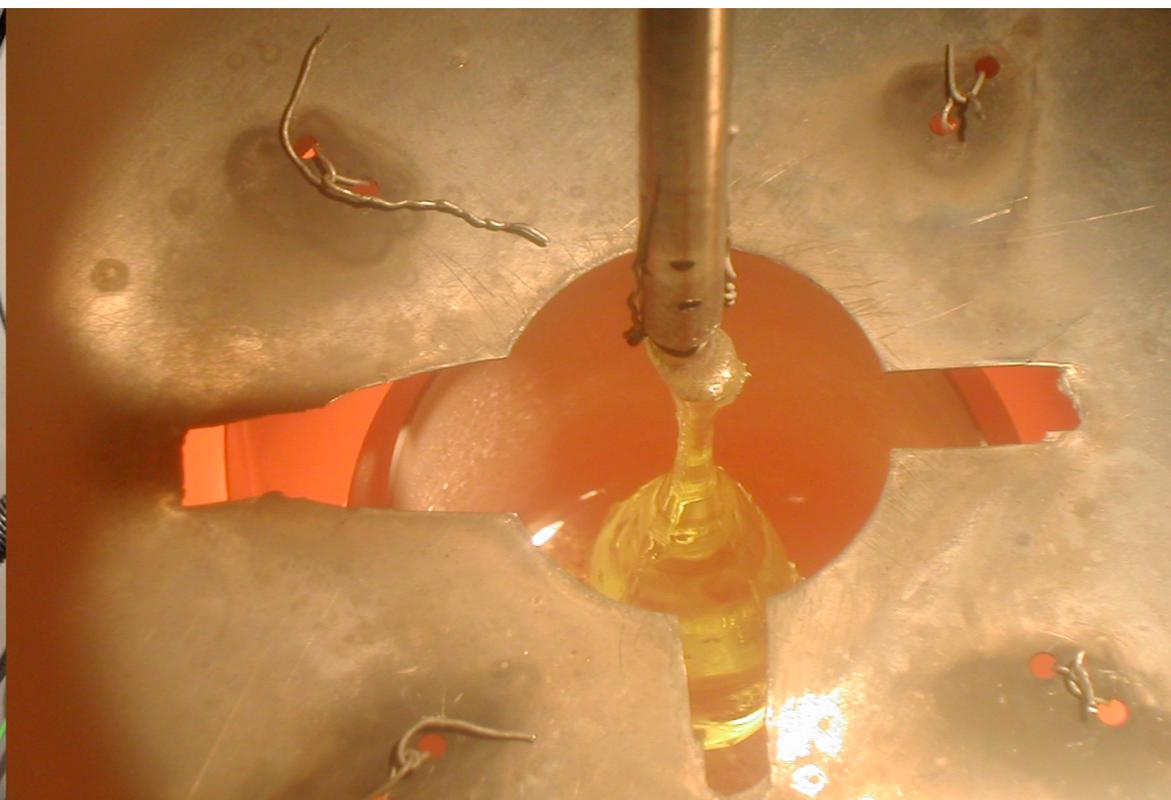
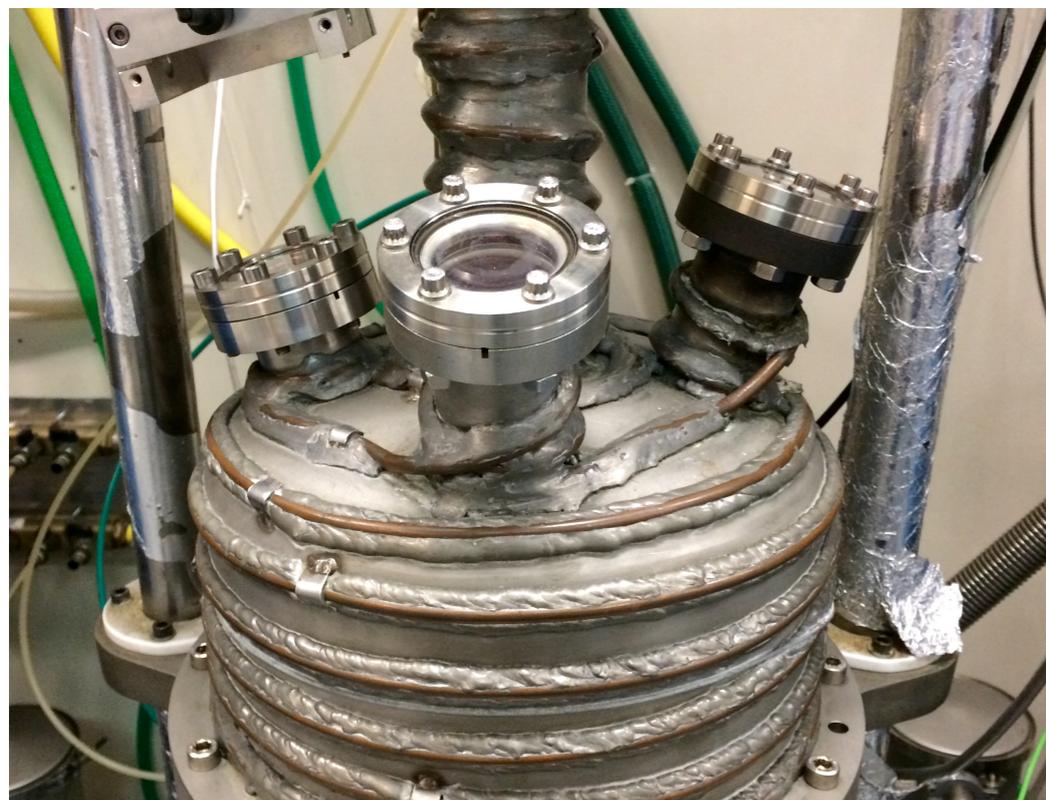


- ▶ Produce dei monocristalli
- ▶ I materiali sono tenuti in una fase sottoraffreddata
- ▶ Rotazione e tiraggio simultanei del cristallo in crescita lenta



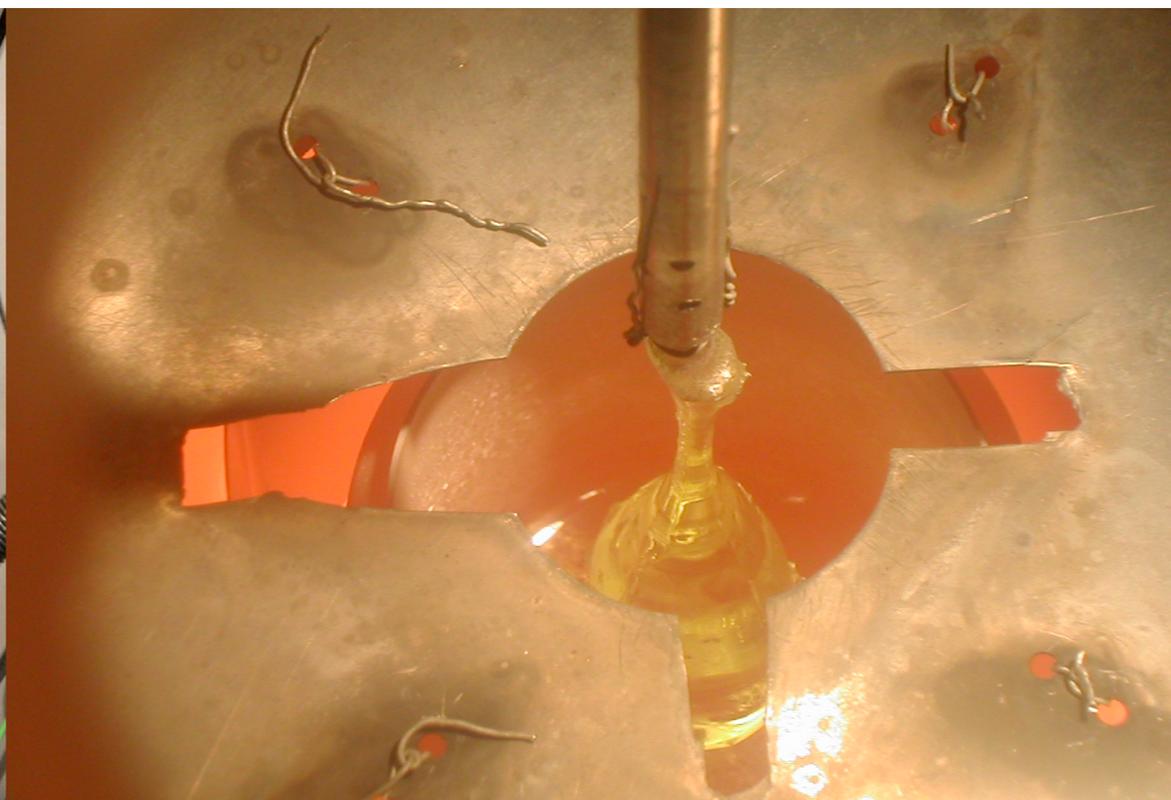
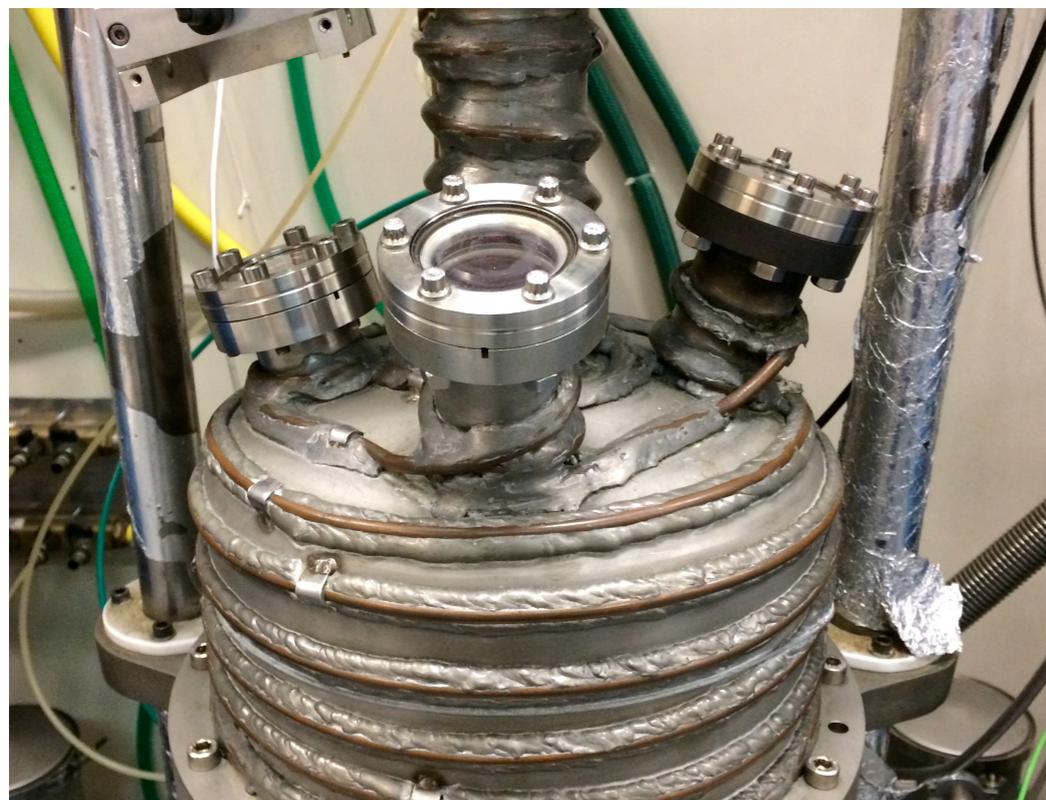
# Apparato di crescita

Disegnato per crescere efficientemente i fluoruri



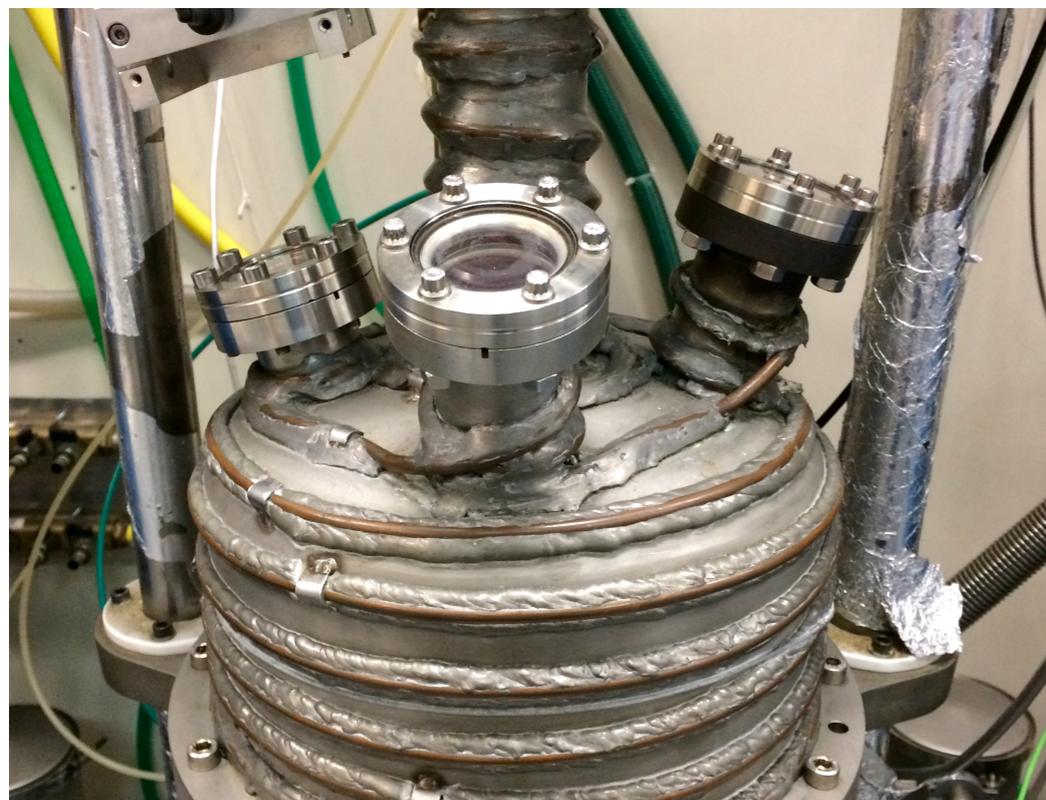
# Apparato di crescita

Disegnato per crescere efficientemente i fluoruri



# Apparato di crescita

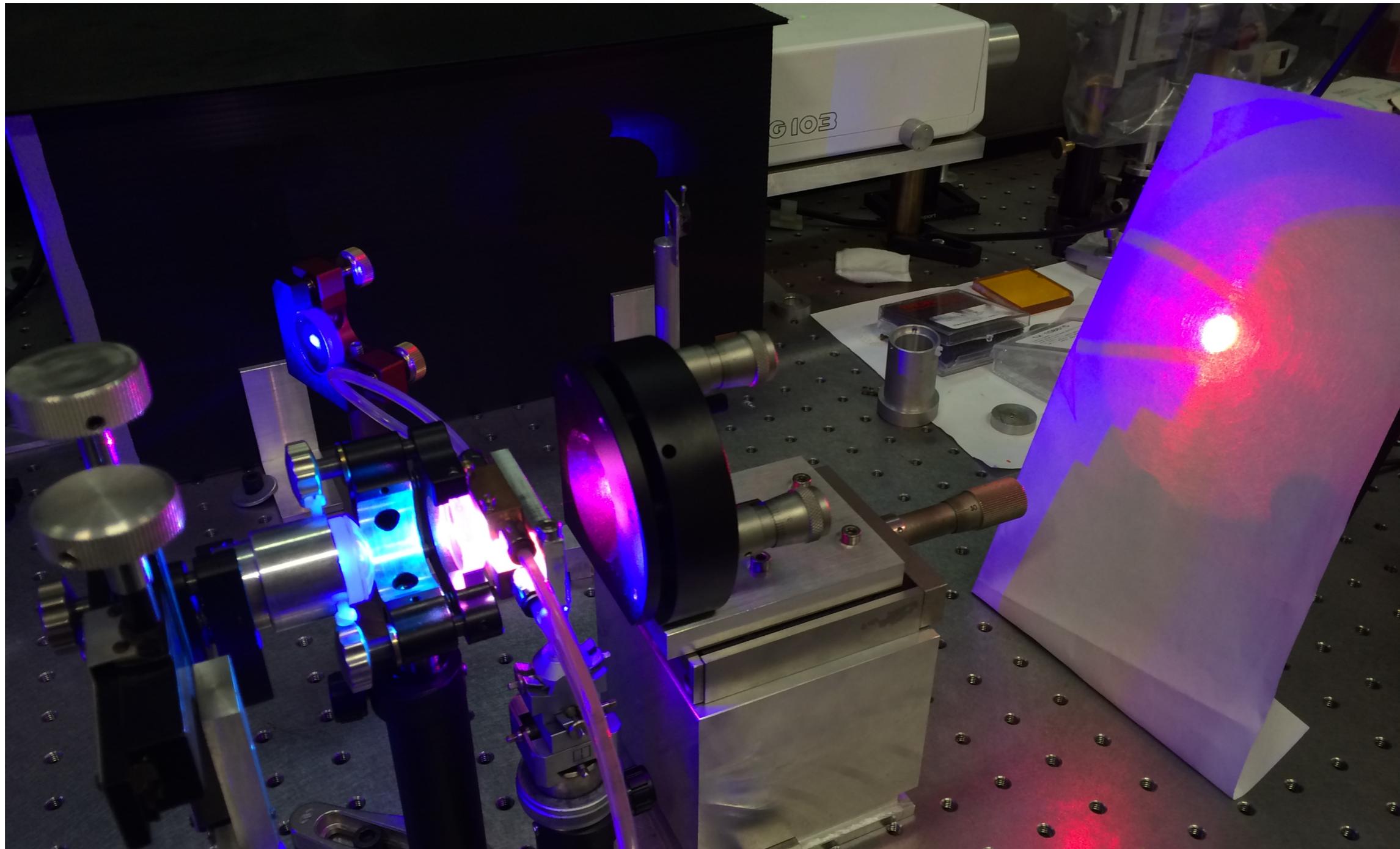
Disegnato per crescere efficientemente i fluoruri



- ▶ Sistema di vuoto e riempimento con gas inerte
- ▶ Lunghi tempi di preparazione
- ▶ Crescita lenta (0.5 mm/h)
- ▶ Controllo delle operazioni locale e remoto

# Laser Pr – risultati

Ottenuta emissione laser su tutte le righe visibili



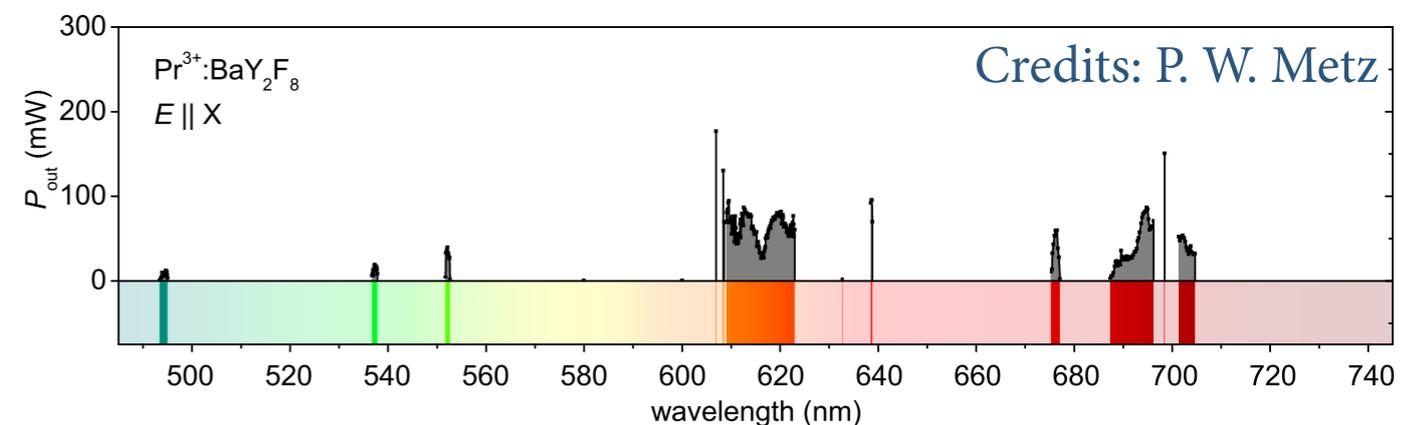
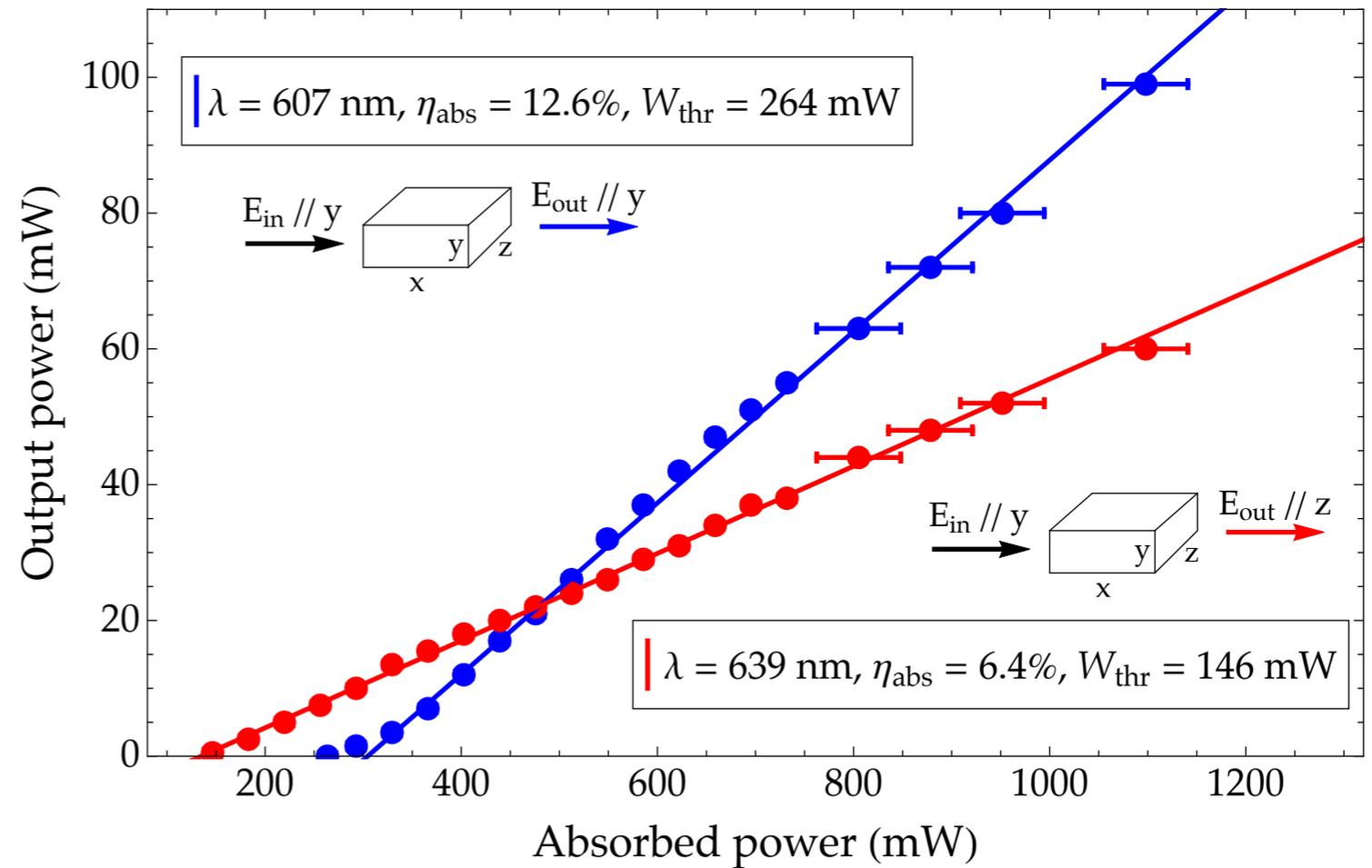
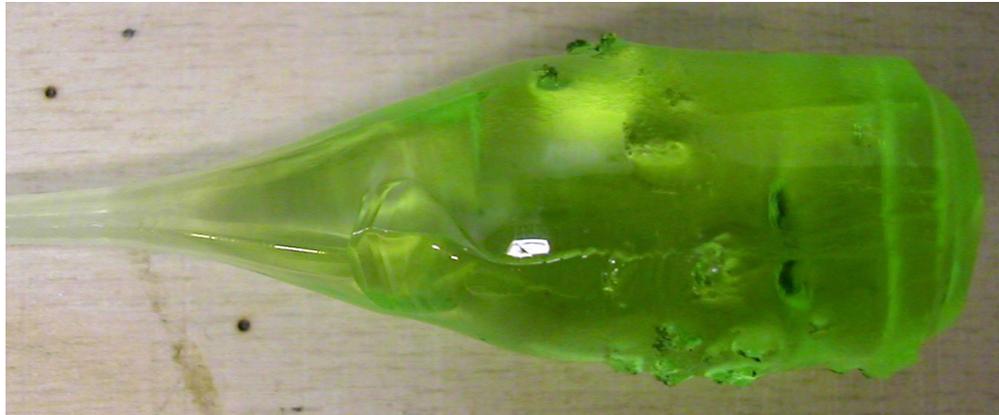
# Laser Pr – risultati

Ottenuta emissione laser su tutte le righe visibili



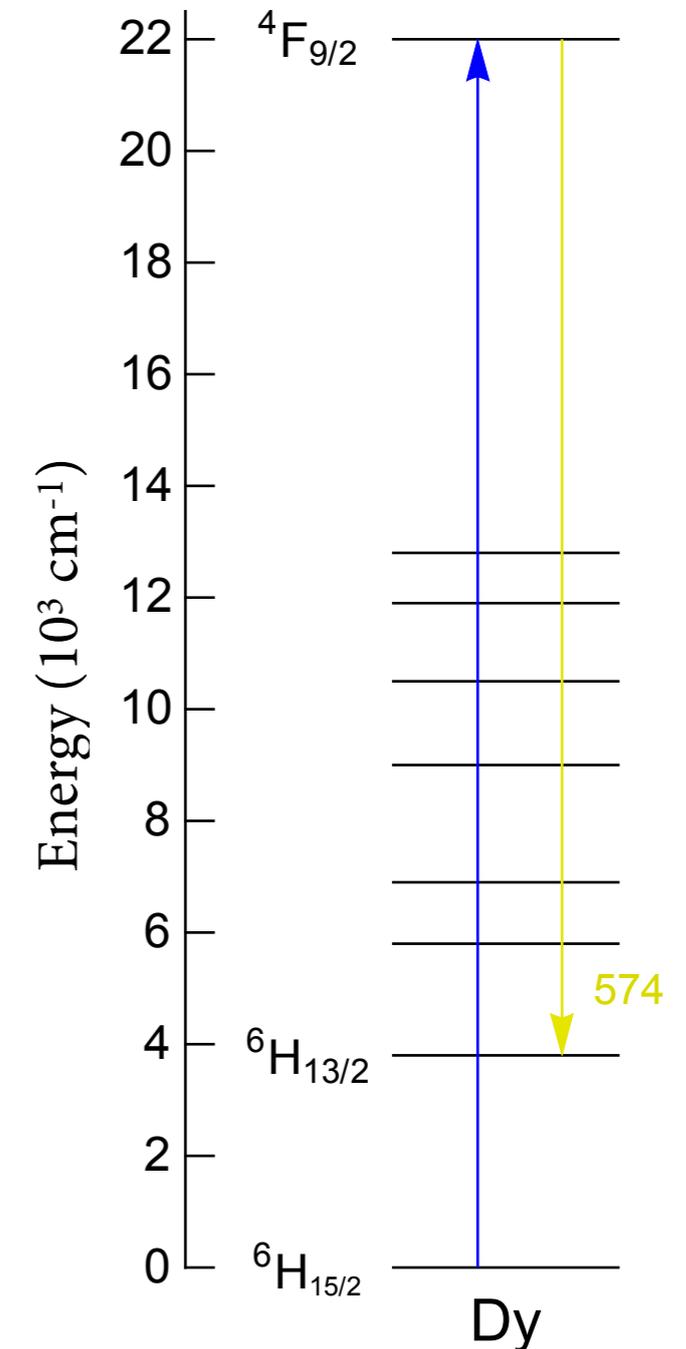
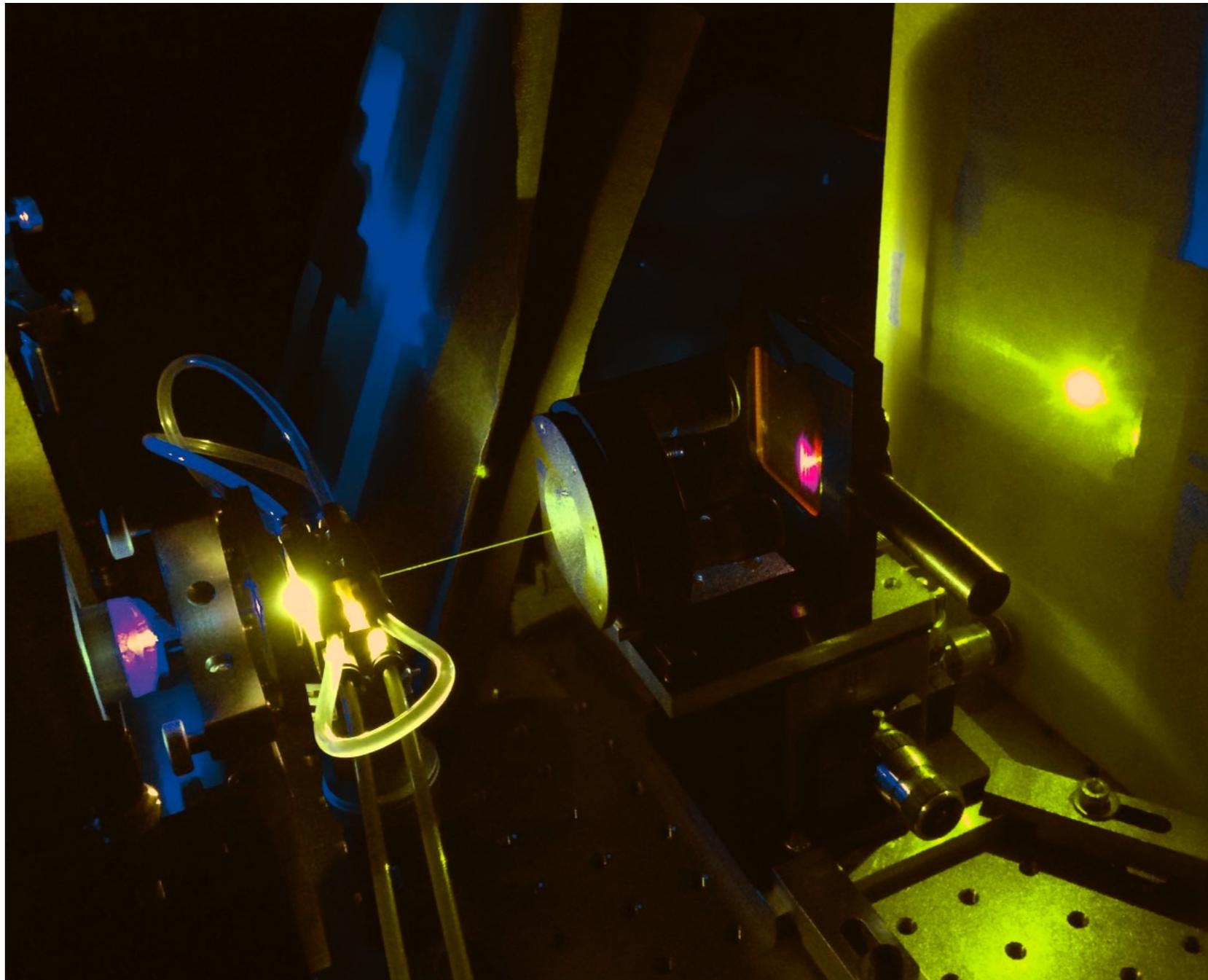
# Laser Pr – risultati

Ottenuta emissione laser su tutte le righe visibili



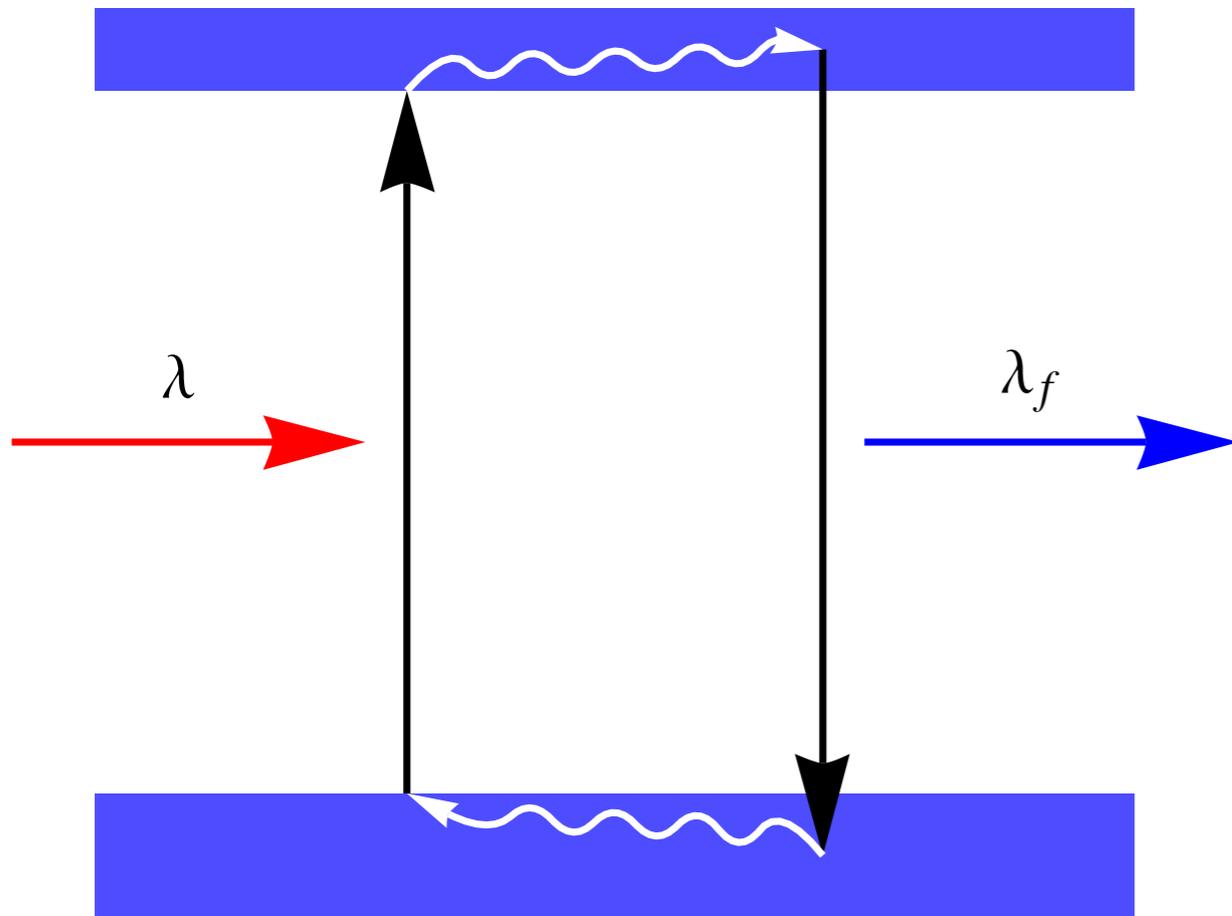
# Laser Dy-Tb

Sorgente di pompa per la metrologia ad Yb



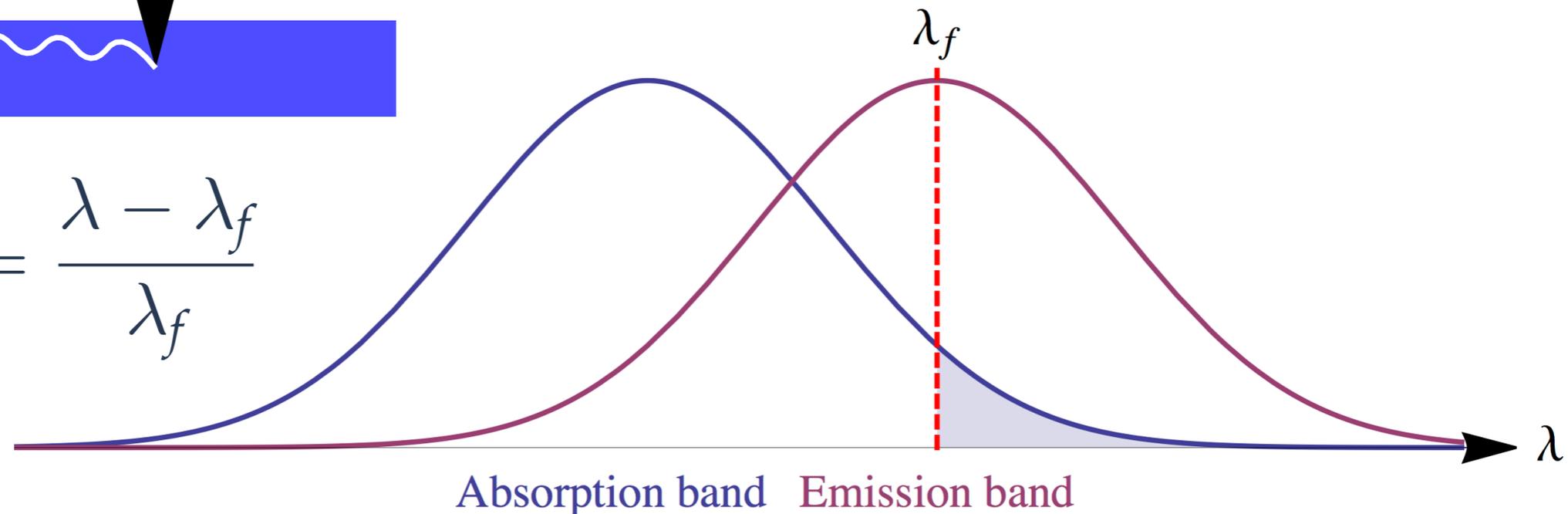
# Raffreddamento ottico

Usare i fotoni per assorbire energia termica dal cristallo



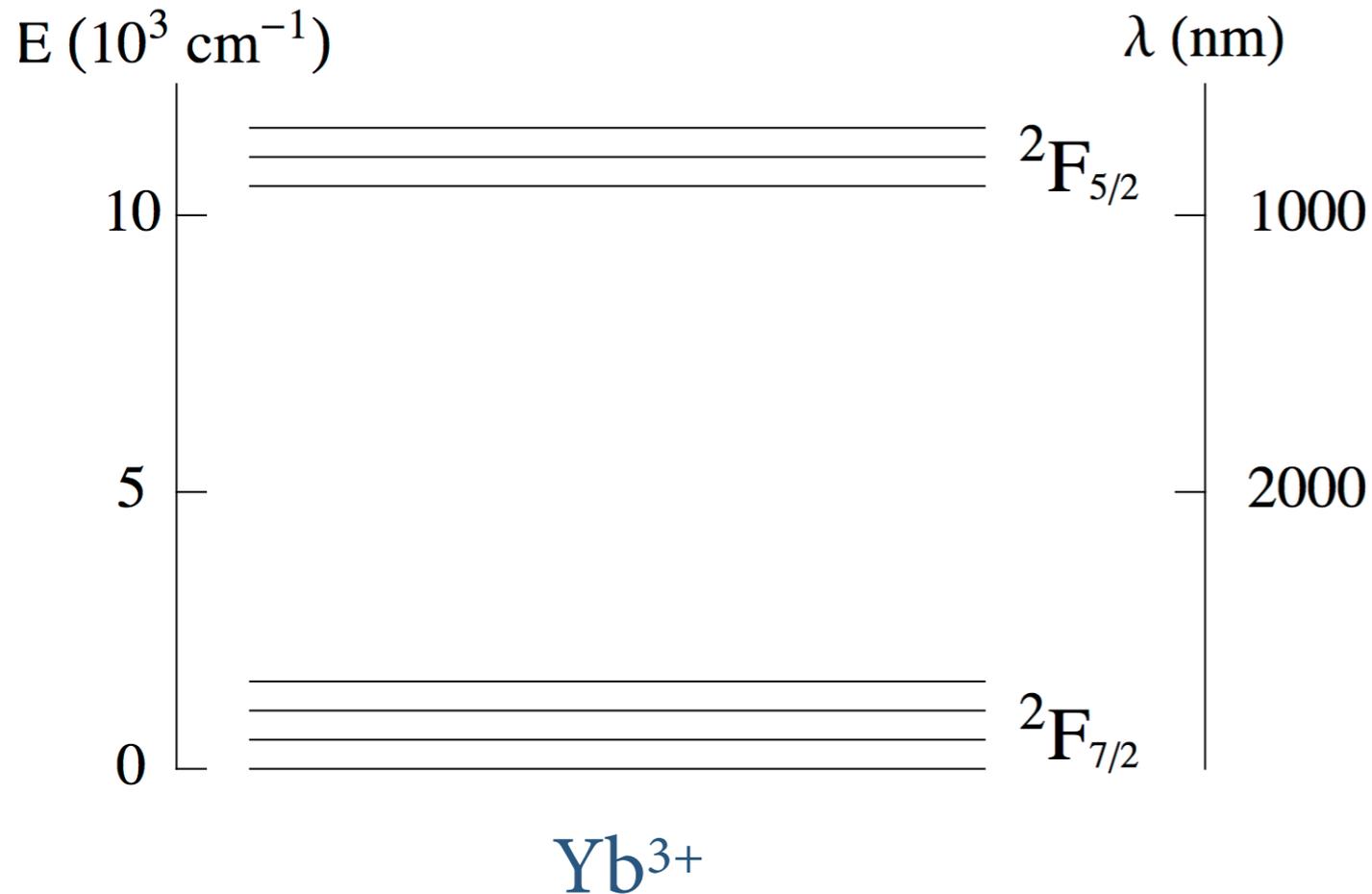
- ▶ L'emissione ottica è in media ad energia più alta dell'assorbimento
- ▶ Impiegabile per refrigeratori senza parti in movimento

$$\eta_c = \frac{P_{cool}}{P_{abs}} = \frac{\lambda - \lambda_f}{\lambda_f}$$



# Raffreddamento ottico

## Livelli dell'itterbio come base per un refrigeratore



- ▶ Grande sovrapposizione tra emissione e assorbimento
- ▶ Assenza di livelli superiori
- ▶ Grande separazione tra i due livelli del sistema

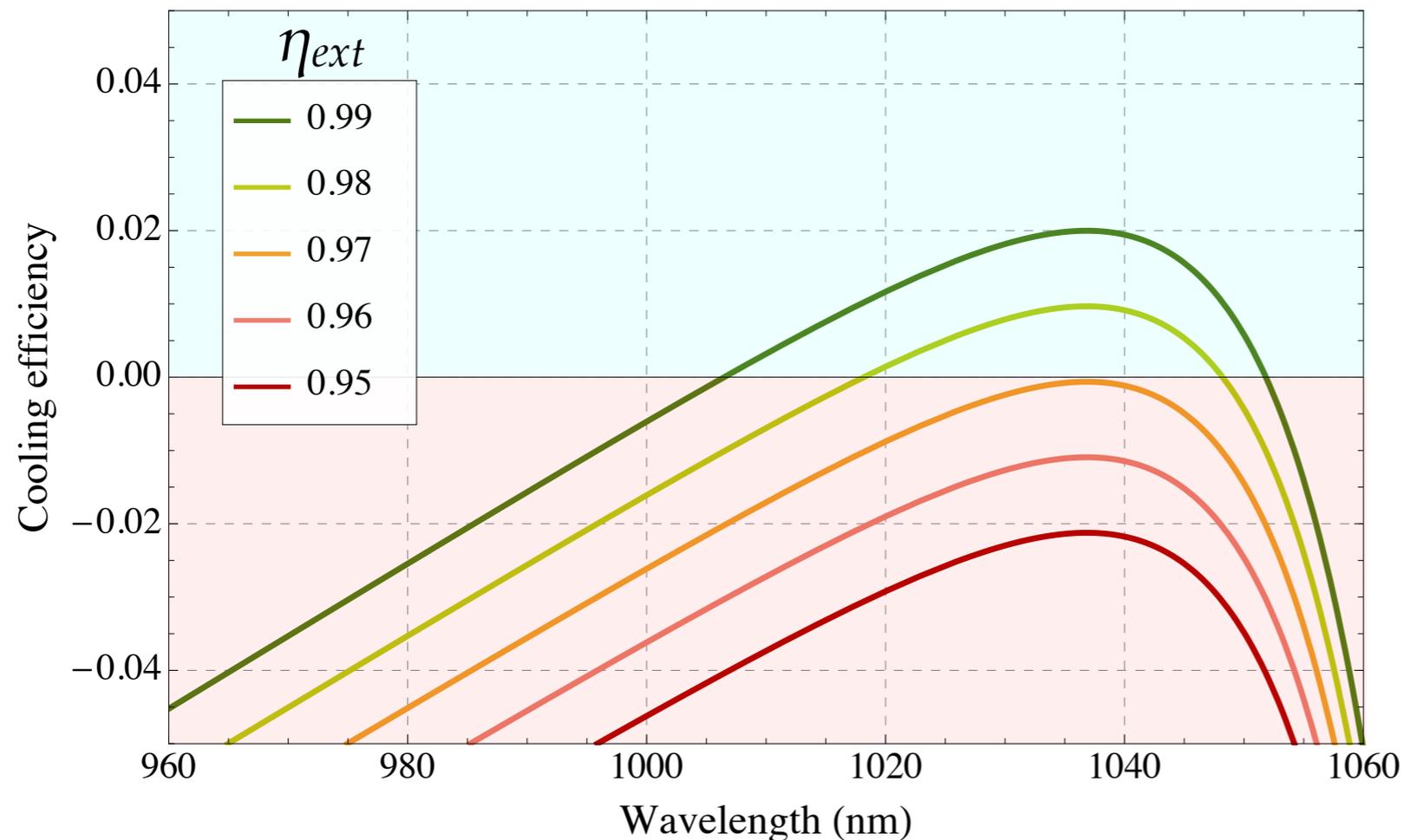
# Raffreddamento ottico

Non tutti i sistemi che riemettono luce raffreddano



$$\eta_c = \eta_{ext} \eta_{abs} \frac{\lambda - \lambda_f}{\lambda_f}$$

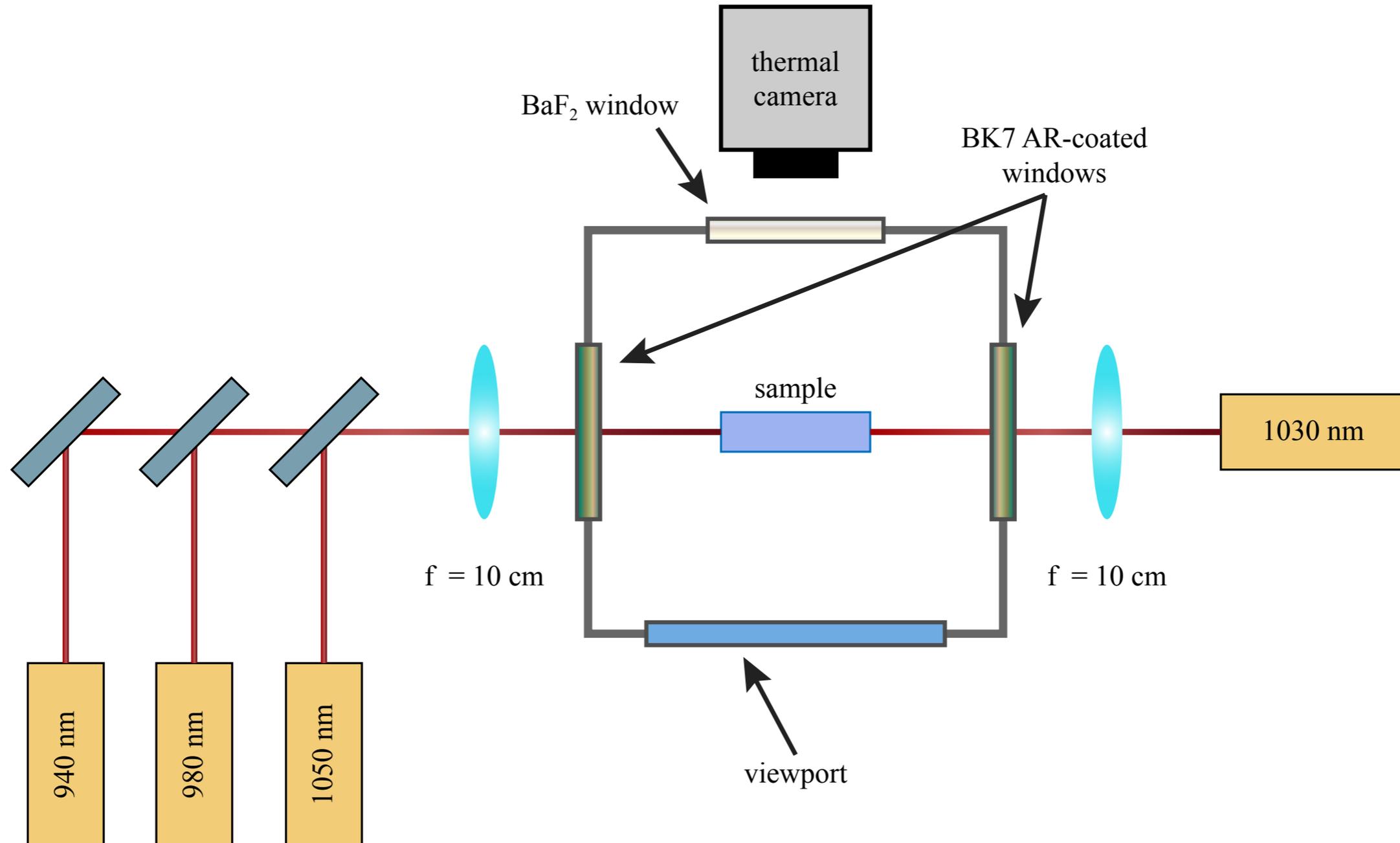
$$\eta_{ext} = \frac{\text{fotoni uscenti}}{\text{fotoni assorbiti}}$$



- ▶ Servono efficienze maggiori del 97%
- ▶ Richiesta purezza al livello delle 10 ppm
- ▶ Determinare le impurezze nel cristallo

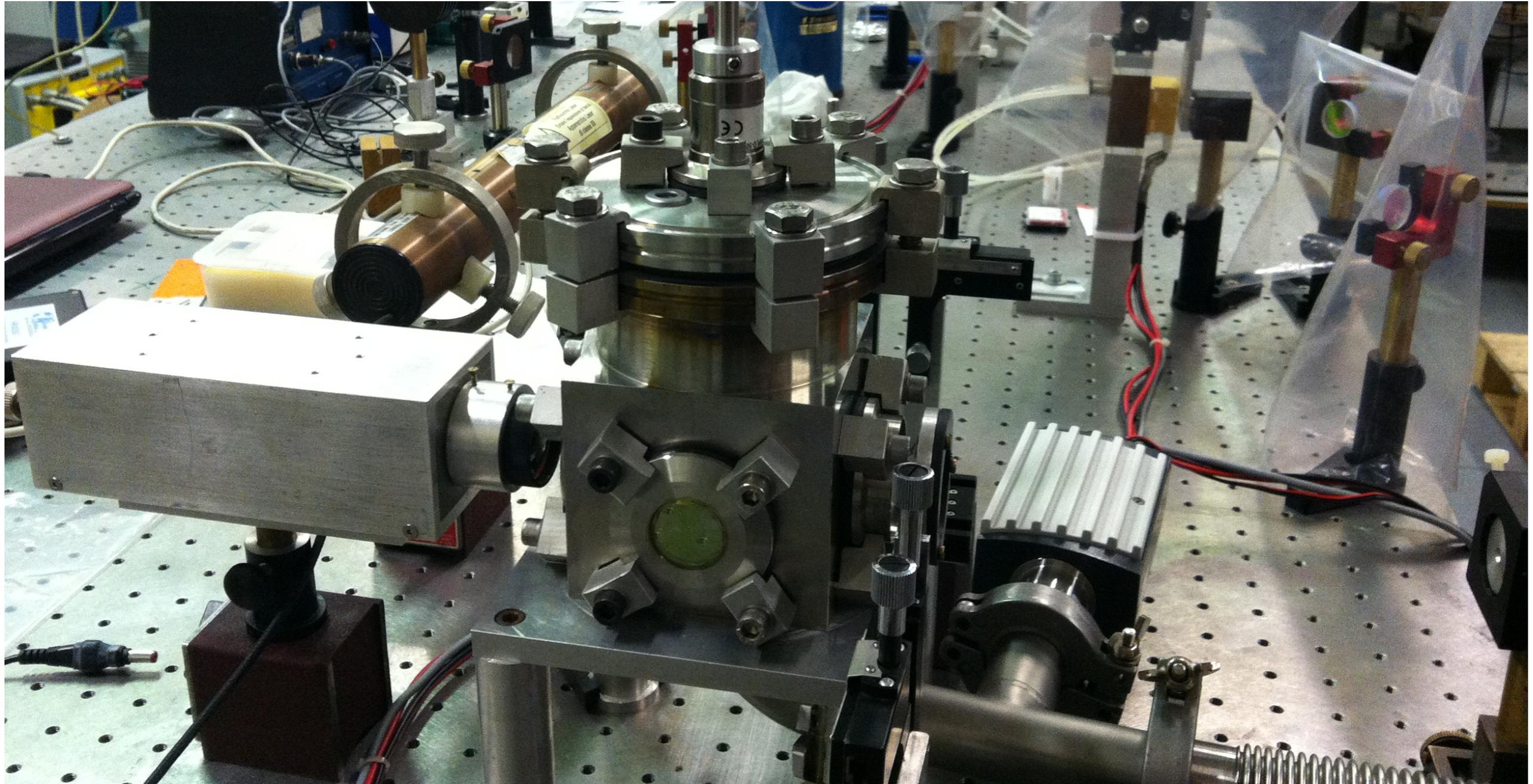
# Raffreddamento ottico

Isolamento termico tra il cristallo e l'ambiente



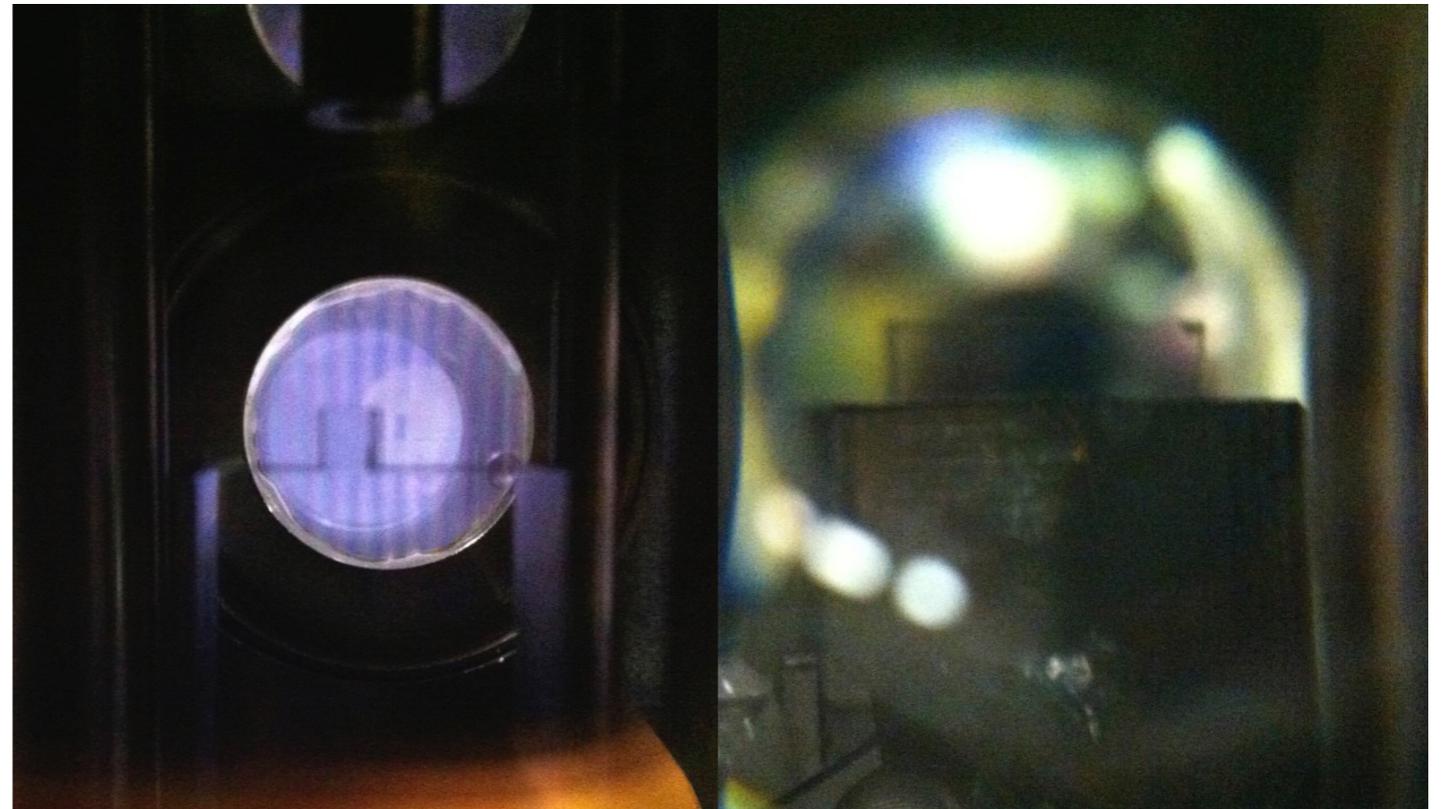
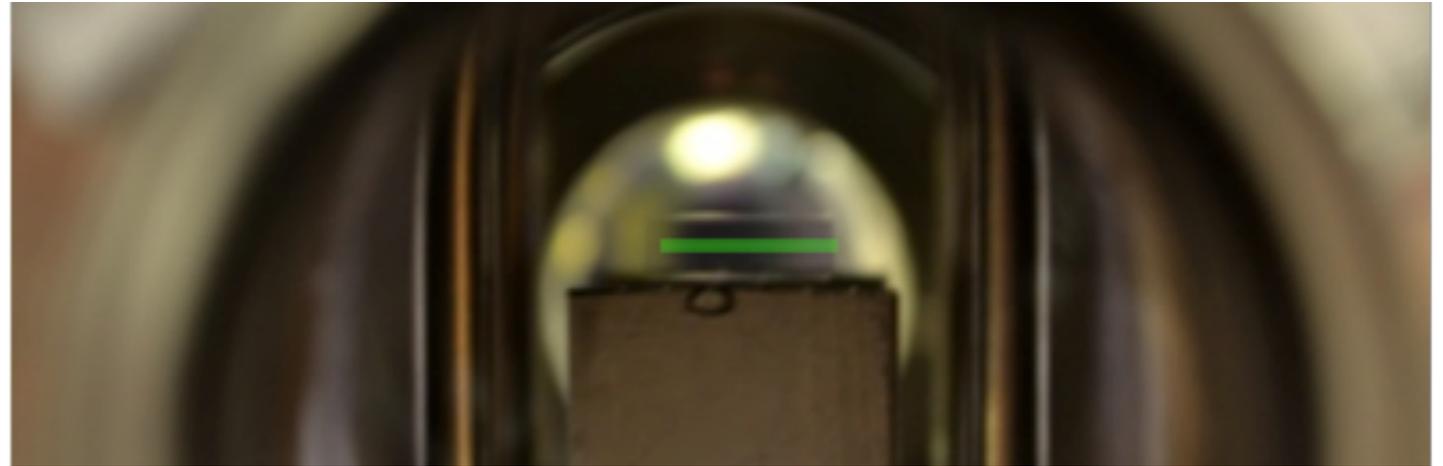
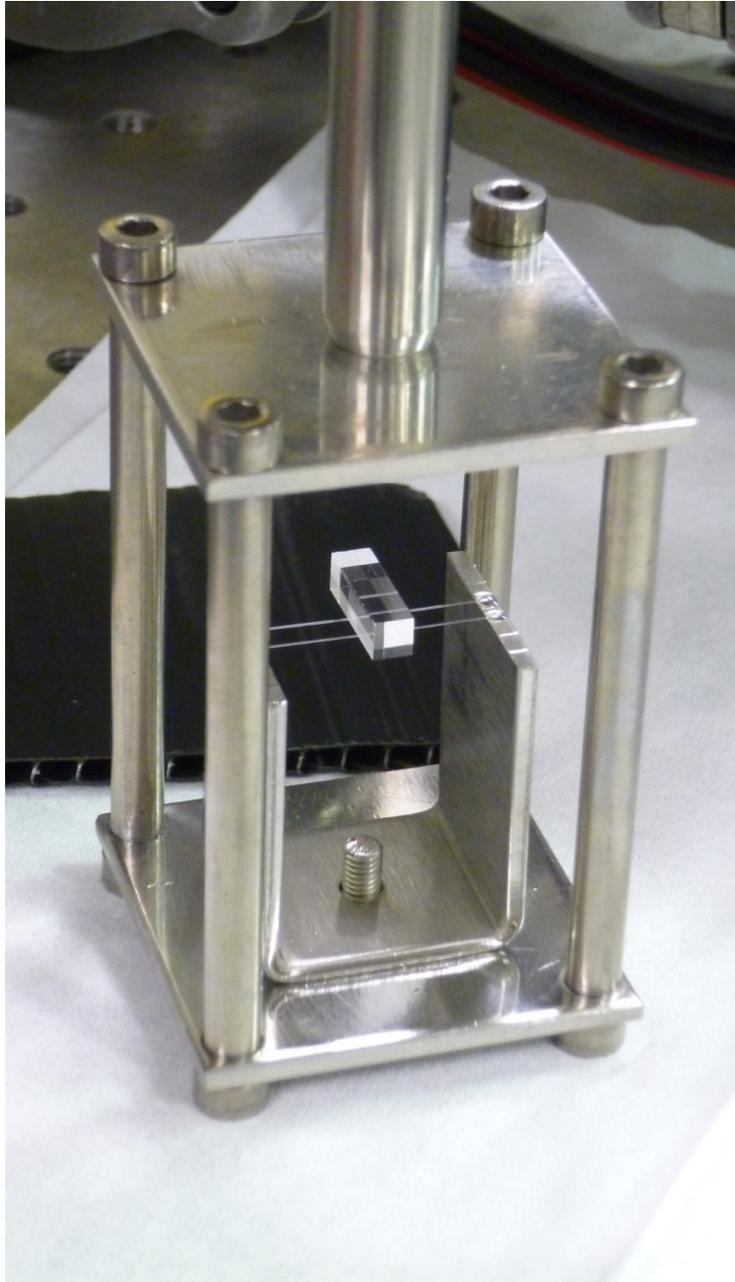
# Raffreddamento ottico

Isolamento termico tra il cristallo e l'ambiente



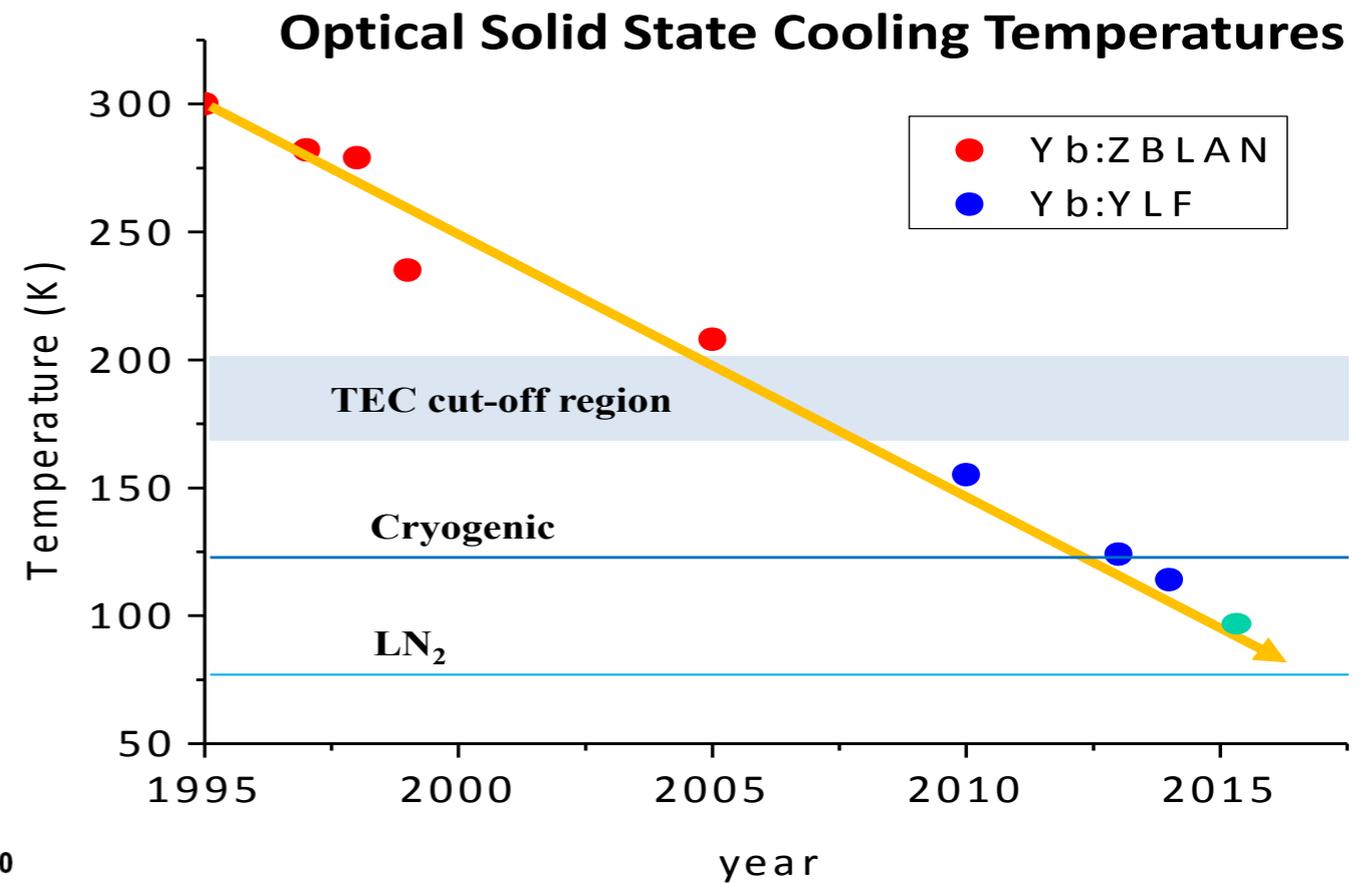
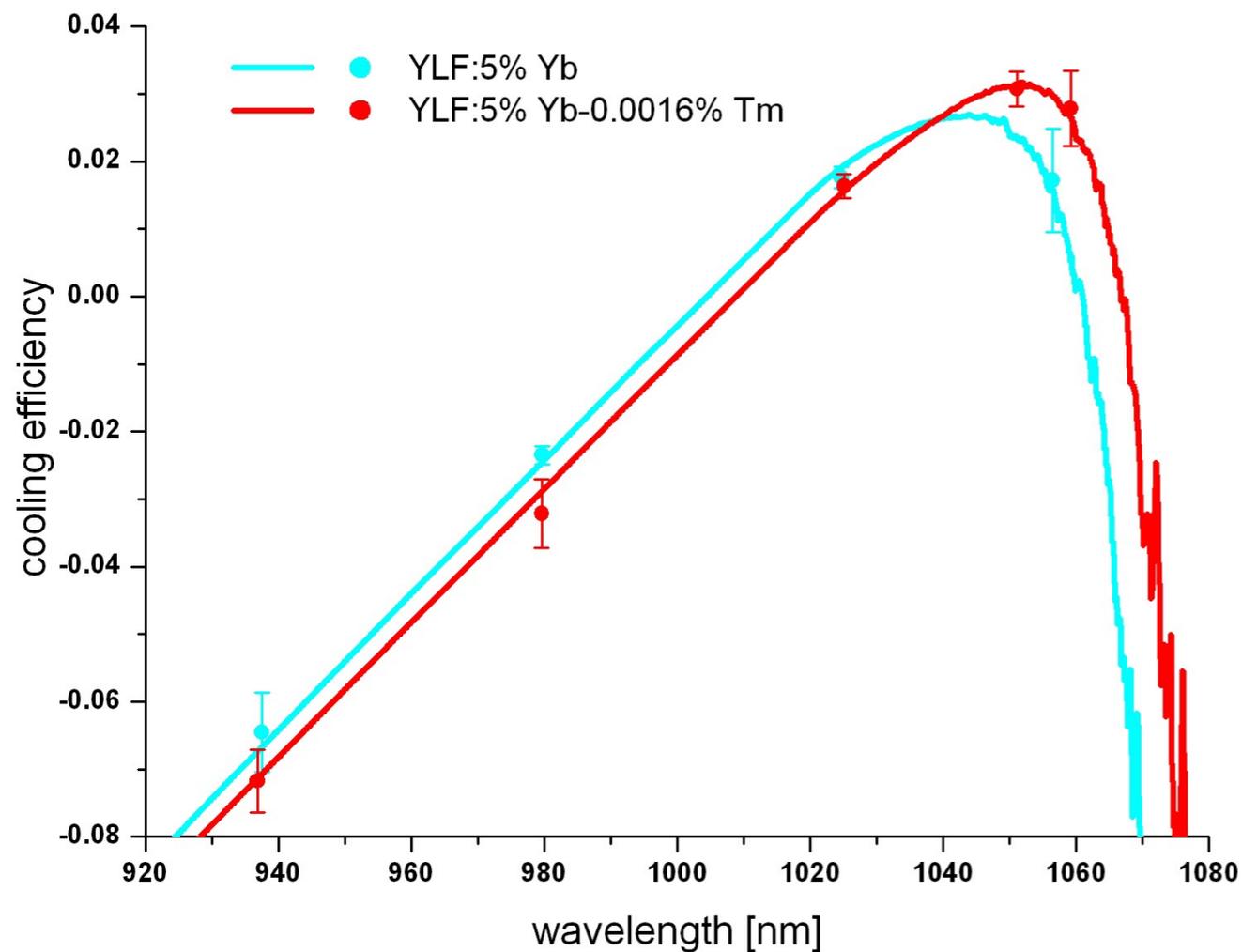
# Raffreddamento ottico

Isolamento termico tra il cristallo e l'ambiente



# Cooling Yb – risultati

Raggiunti i 99 K - record di salto termico di 194 K



● co-drogaggio Yb-Tm

## Crescita di cristalli per applicazioni fotoniche

A. Sottile\*, D. Parisi, E. Favilla, S. Veronesi, Z. Zhang, A. Di Lieto and M. Tonelli

## LASER COOLING OF MONOCRYSTAL

Azzurra Volpi, Giovanni Cittadino, Alberto Di Lieto, Mauro Tonelli

Laser cooling can be defined as a process by which a physical system cools down upon interaction with laser light. Lasers directly lower the energy contained in a given internal degree of freedom of the system.

## Rivelatori a conteggio quantistico per la fisica di frontiera

A. Volpi, A. Di Lieto, M. Tonelli

Esperimento DORELAS—In collaborazione con C. Braggio, A. Borghesani, G. Carugno (INFN Padova)

La disponibilità di monocristalli a base di fluoro di elevatissima qualità ottica drogati con ioni trivalenti di terre rare apre la strada allo sviluppo di innovativi rivelatori a stato solido ad alta sensibilità nella regione di energia tra 10 meV e 0.5 eV, basati sul principio della dop-

# Grazie per l'attenzione

Prof. Mauro Tonelli

Prof. Alberto Di Lieto

Stefano Veronesi

Daniela Parisi

Elena Favilla

Azzurra Volpi

Zhonghan Zhang

Giovanni Cittadino

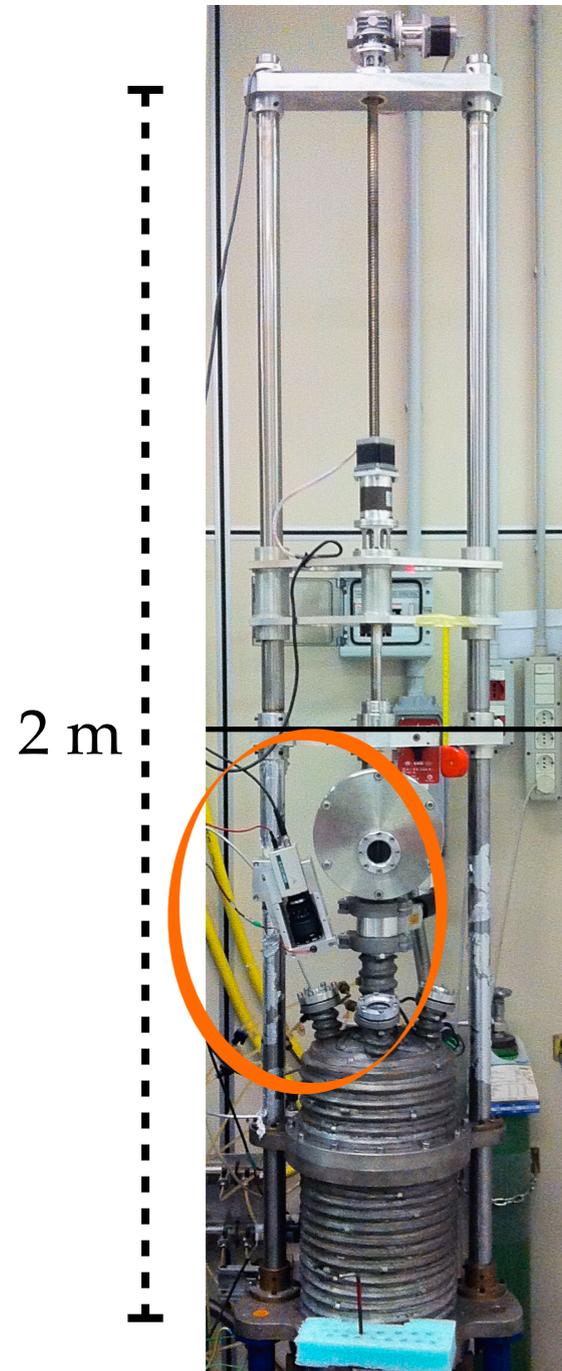
Giacomo Bolognesi

John T. Thomas

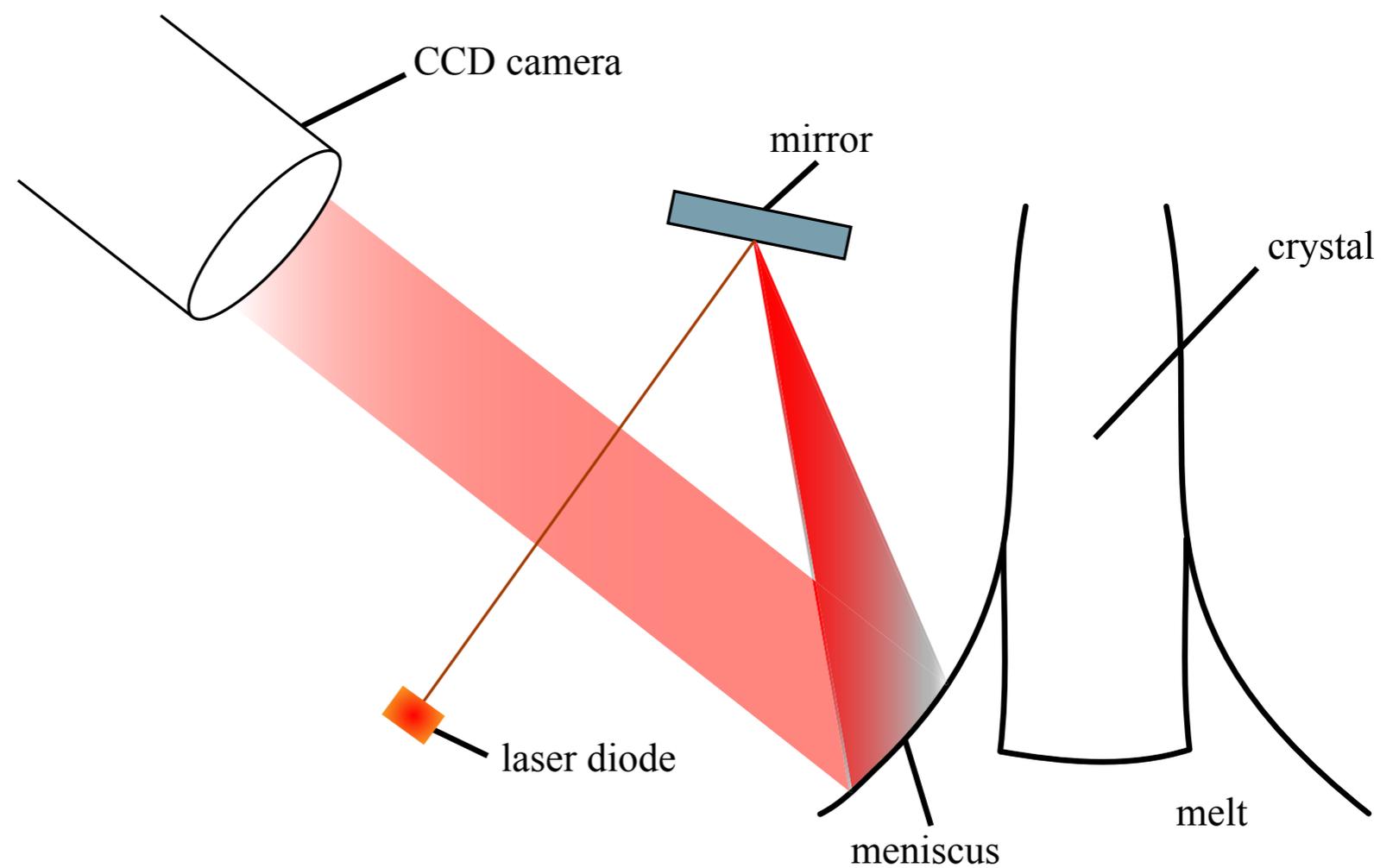
Ilaria Grassini

Alessandro Masetti

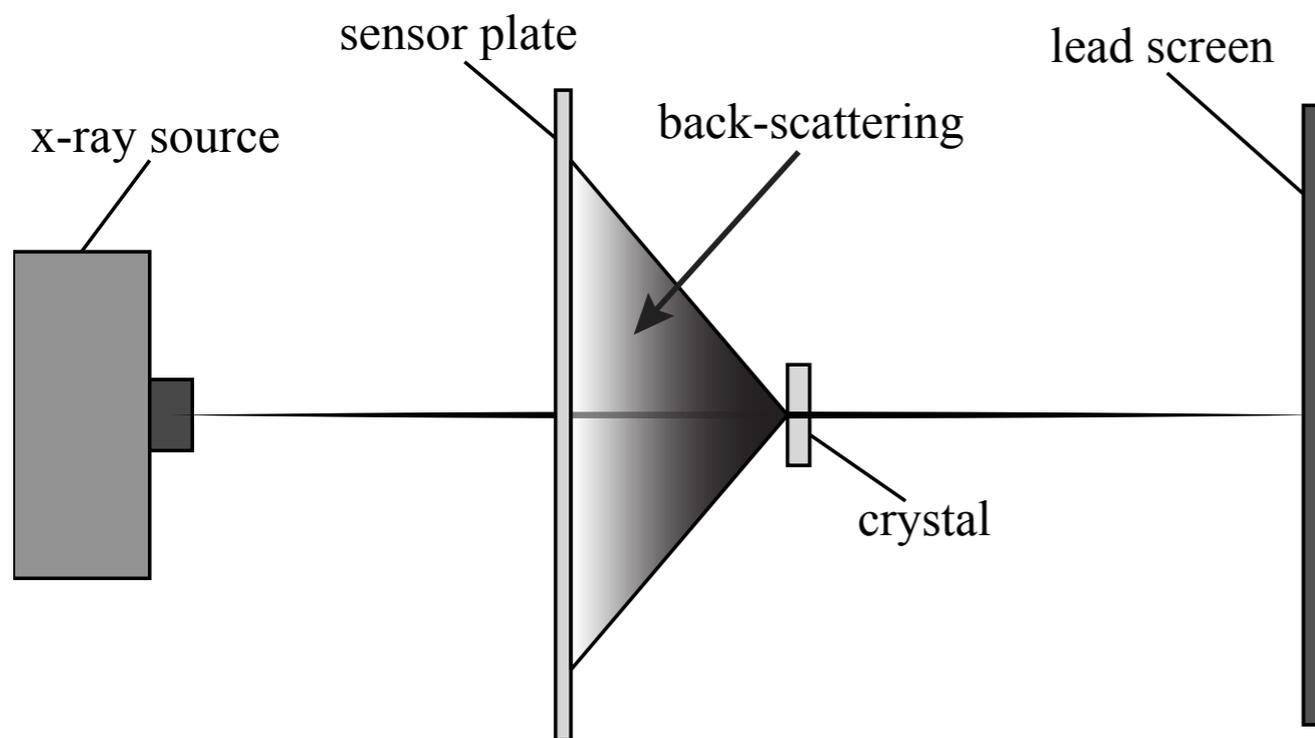
Fabio Torri



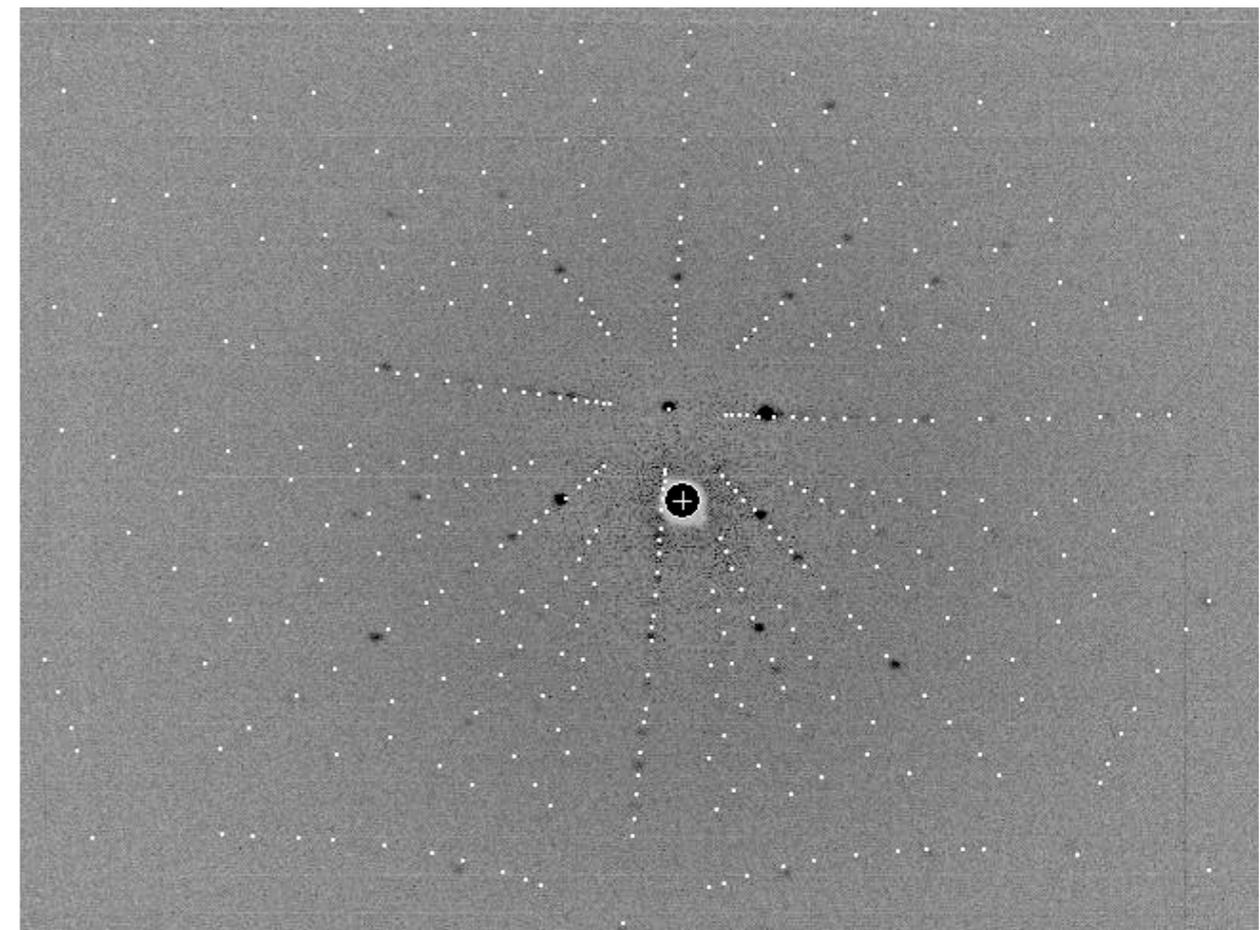
### Sistema di controllo del diametro

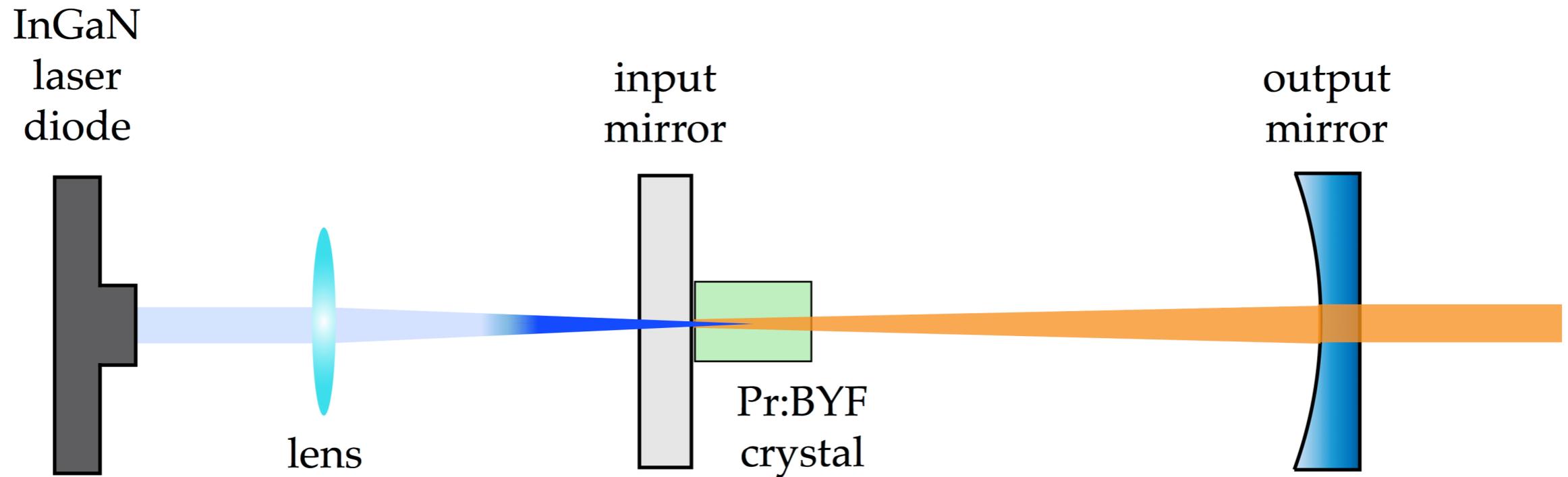


Scheme of the system



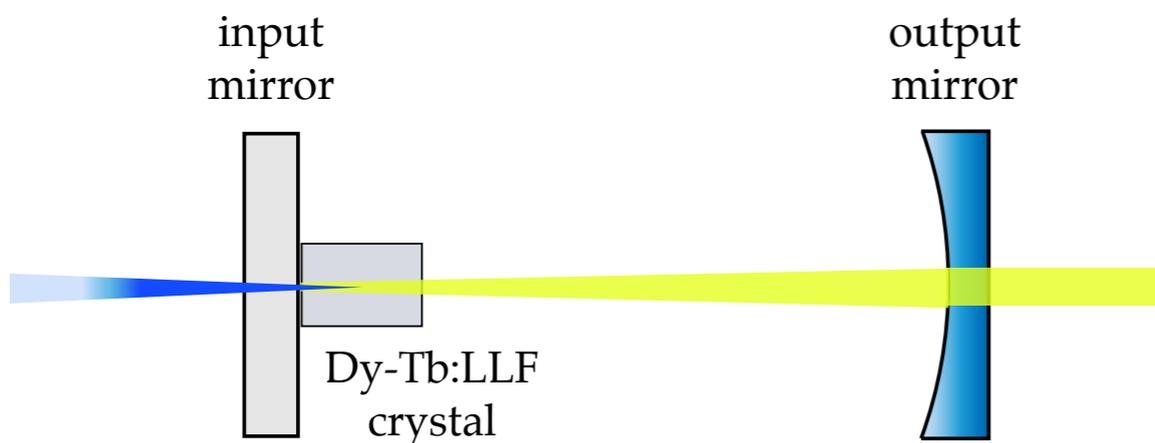
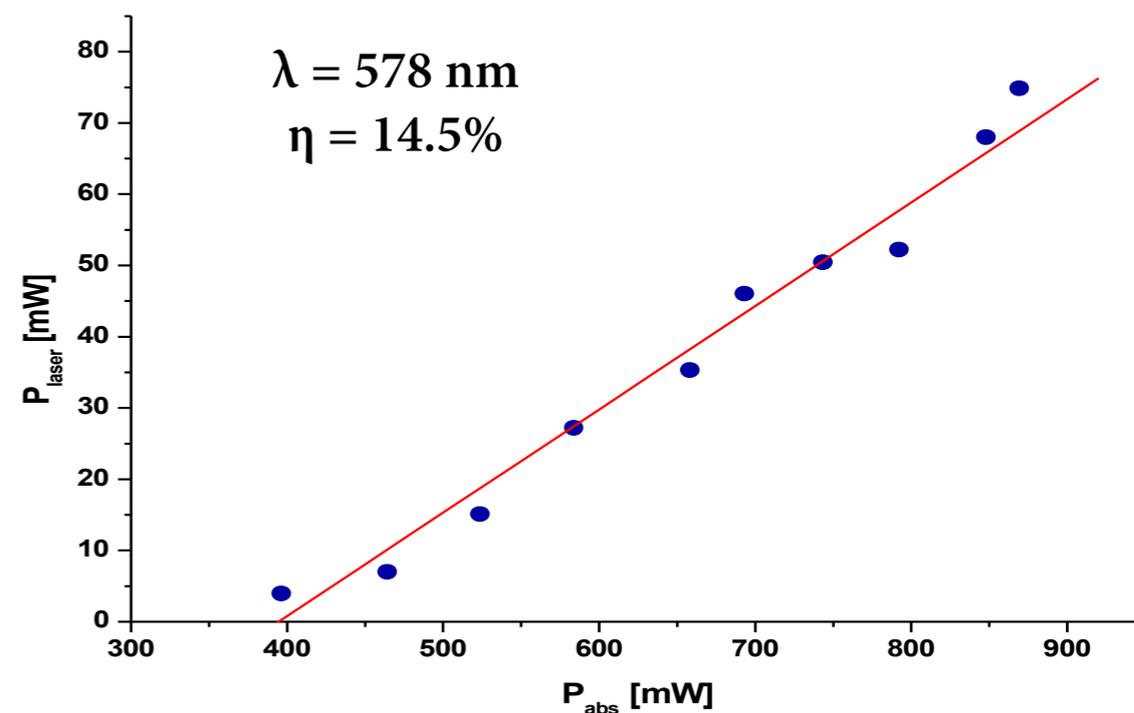
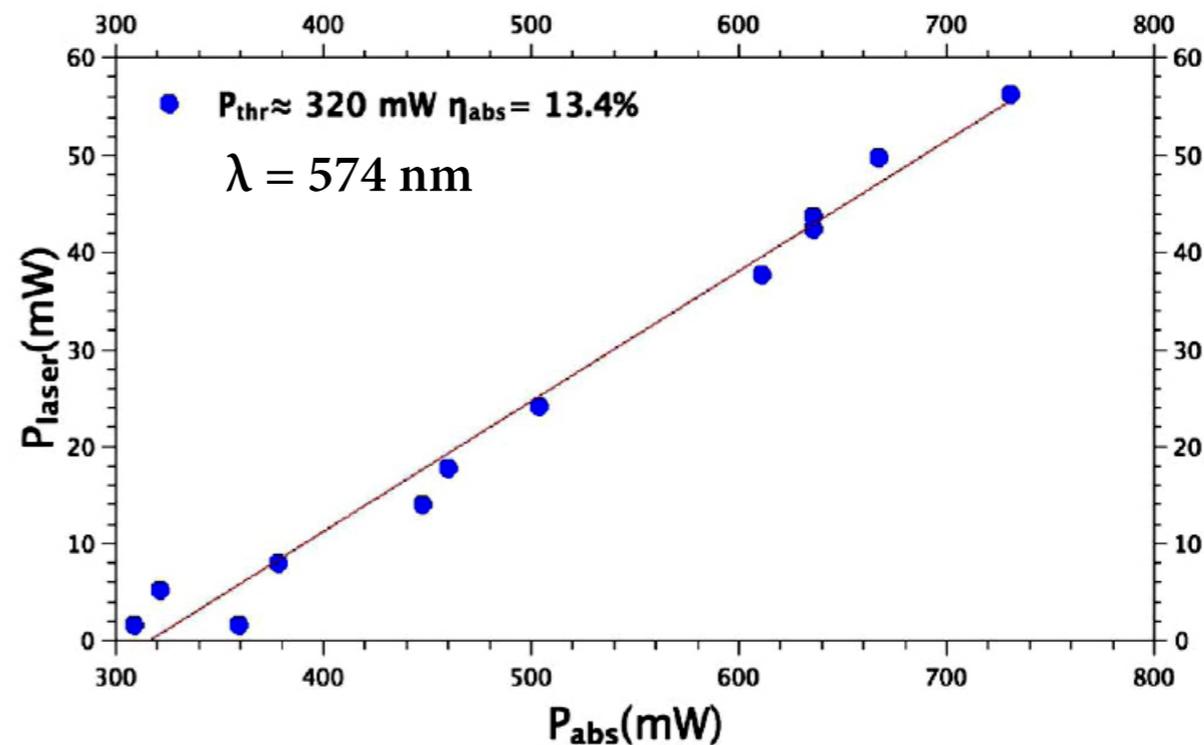
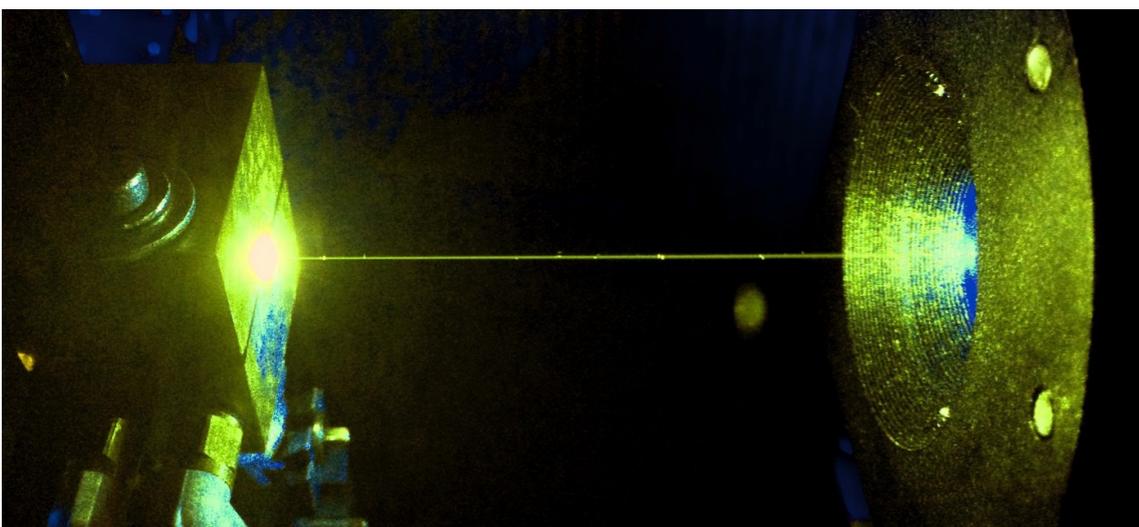
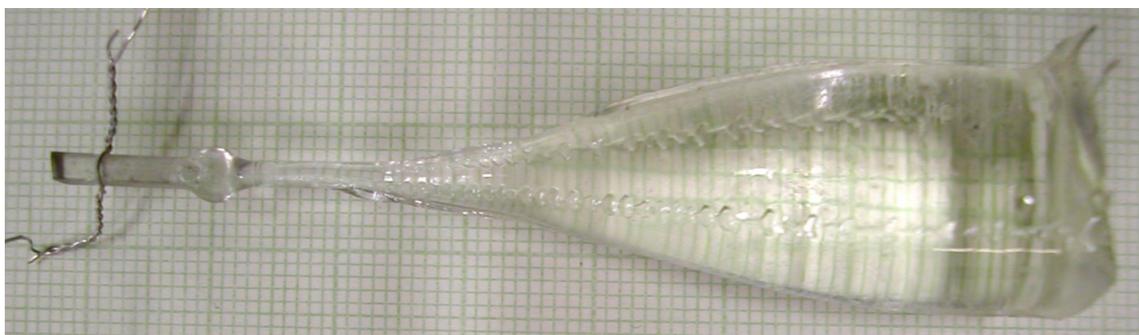
Acquired diffractometry



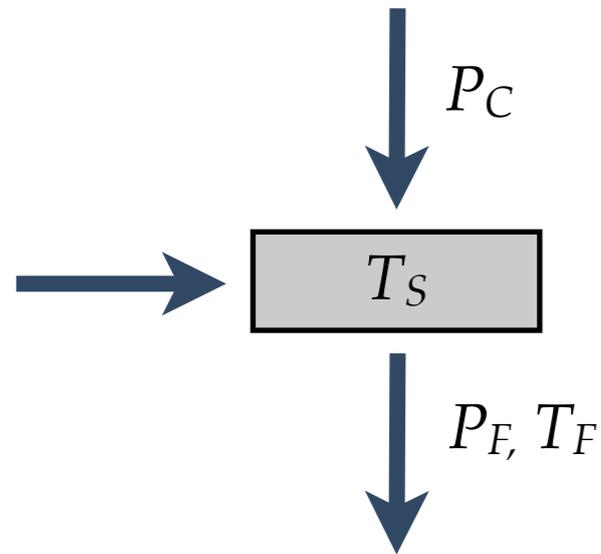


# Extra

## Laser Dy-Tb a 574 nm per la metrologia a Yb



## Bilancio dell'entropia nel raffreddamento ottico



Energy conservation

$$P_F = \eta_{abs} P_L + P_C$$

Cooling efficiency

$$P_C = \eta_c \eta_{abs} P_L$$

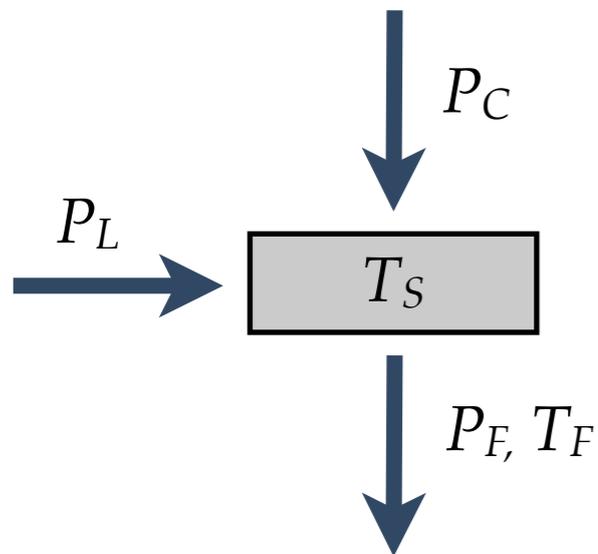
The entropy of the laser is negligible ( $T_L \rightarrow \infty$ )

The entropy must increase, thus the entropy flux  $\Delta\psi = \frac{P_F}{T_F} - \frac{P_C}{T_S} > 0$

This causes a limitation on the fluorescence temperature

$$T_F < \frac{1 + \eta_c}{\eta_c} T_S \approx 10000 \text{ K}$$

which corresponds to a minimum divergence  $\delta > 20 \text{ mrad}$



$$\Delta\psi = \frac{P_F}{T_F} - \frac{P_C}{T_S} > 0 \quad \longrightarrow \quad T_F < \frac{1 + \eta_c}{\eta_c} T_S \approx 10000 \text{ K}$$

The flux temperature of the fluorescence radiation is

$$k_B T_F = \frac{\bar{n} h c / \lambda}{(1 + \bar{n}) \log(1 + \bar{n}) - \bar{n} \log \bar{n}}$$

$$\text{with } \bar{n} = \frac{\lambda^5}{2 h c^2} \frac{P}{\pi A \Delta\lambda \sin^2(\delta)}$$

$$\lambda \sim 1000 \text{ nm} - \Delta\lambda \sim 60 \text{ nm}$$

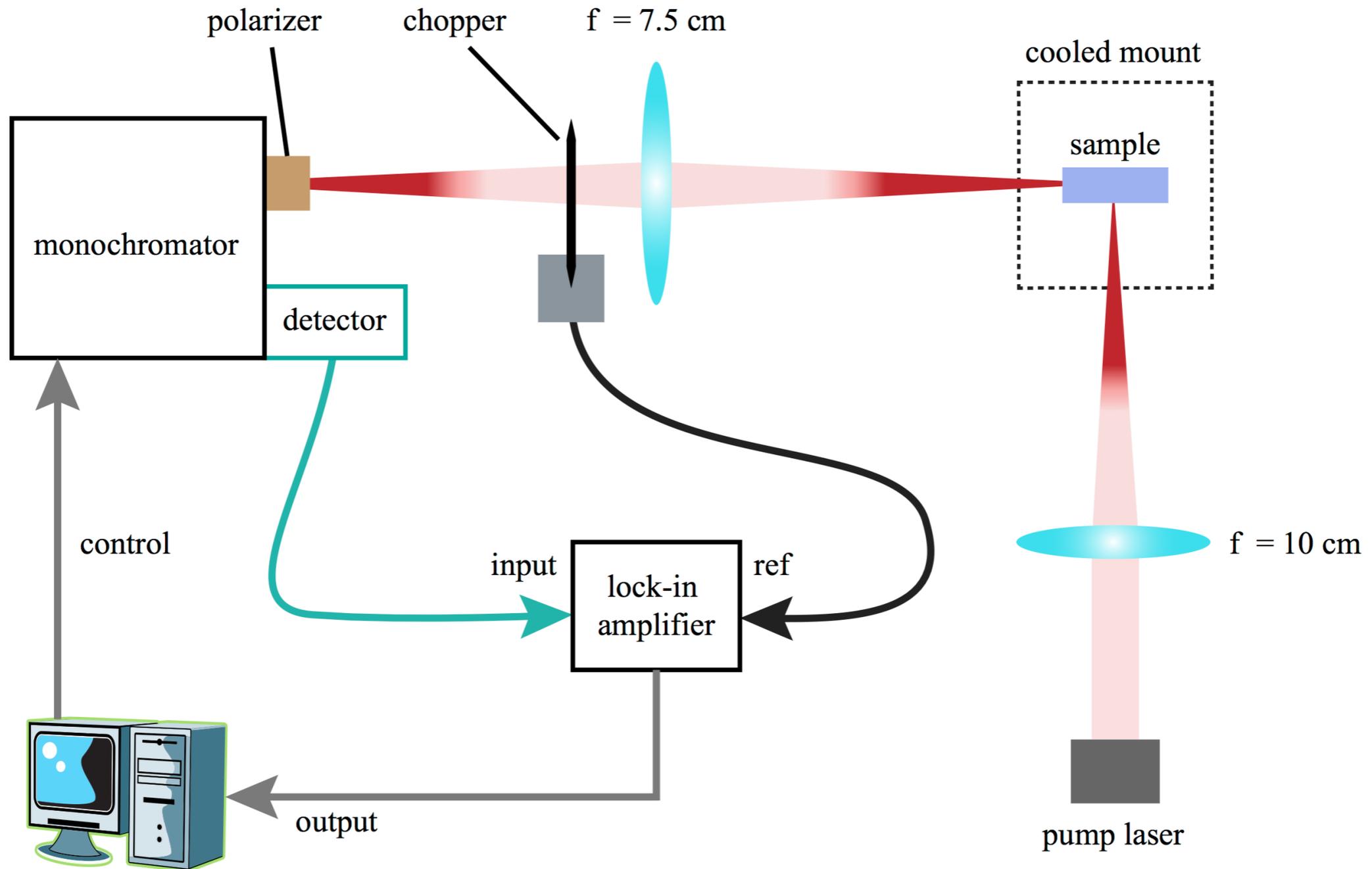
$$P \sim 1 \text{ W} - A \sim 120 \text{ mm}^2$$

which corresponds to a minimum divergence  $\delta > 20 \text{ mrad}$

The temperature of the fluorescence in real systems is  $\sim 1600 \text{ K}$

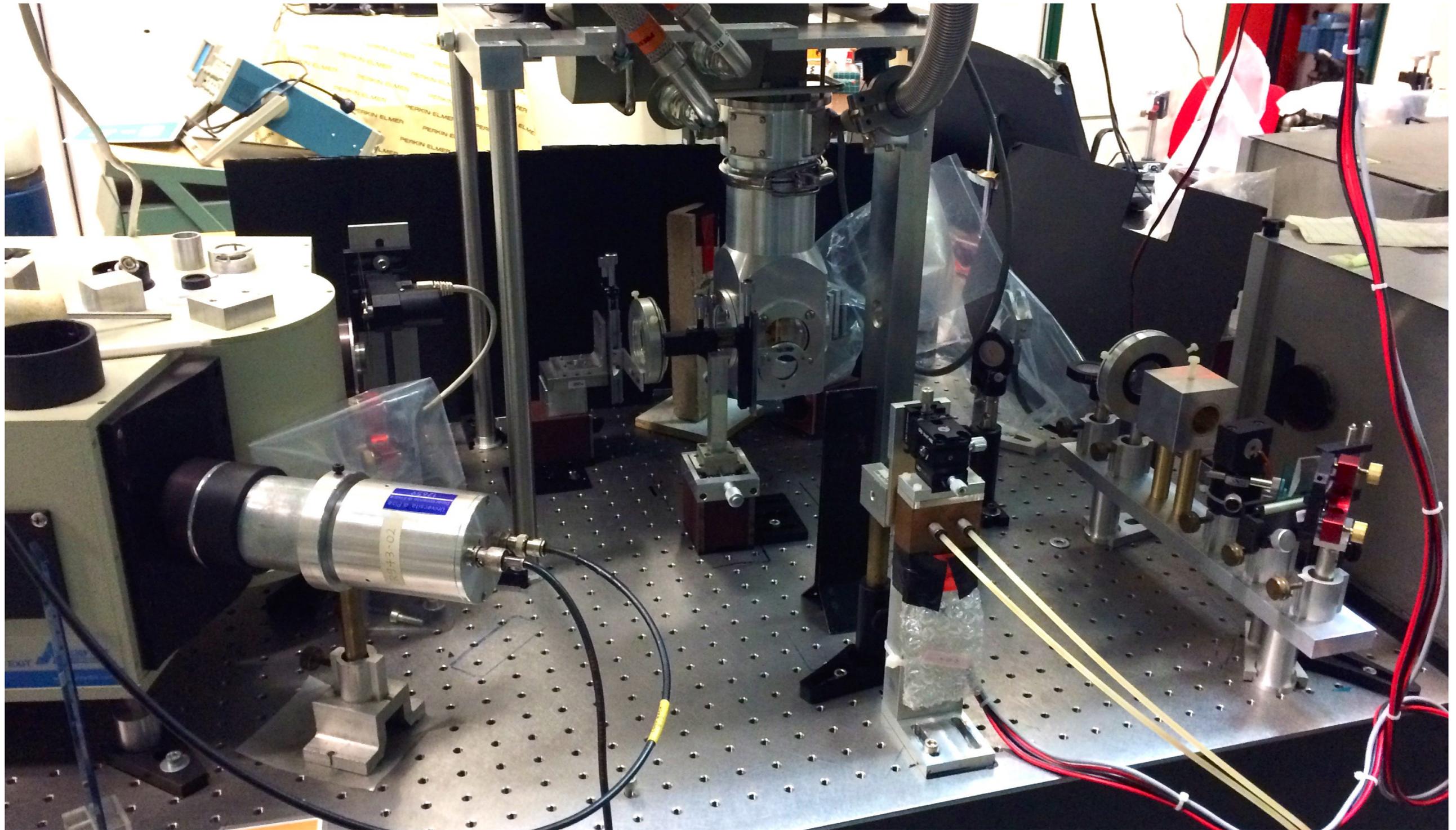
# Extra

## Misura di fluorescenza per individuare le impurità



# Extra

## Misura di fluorescenza per individuare le impurità

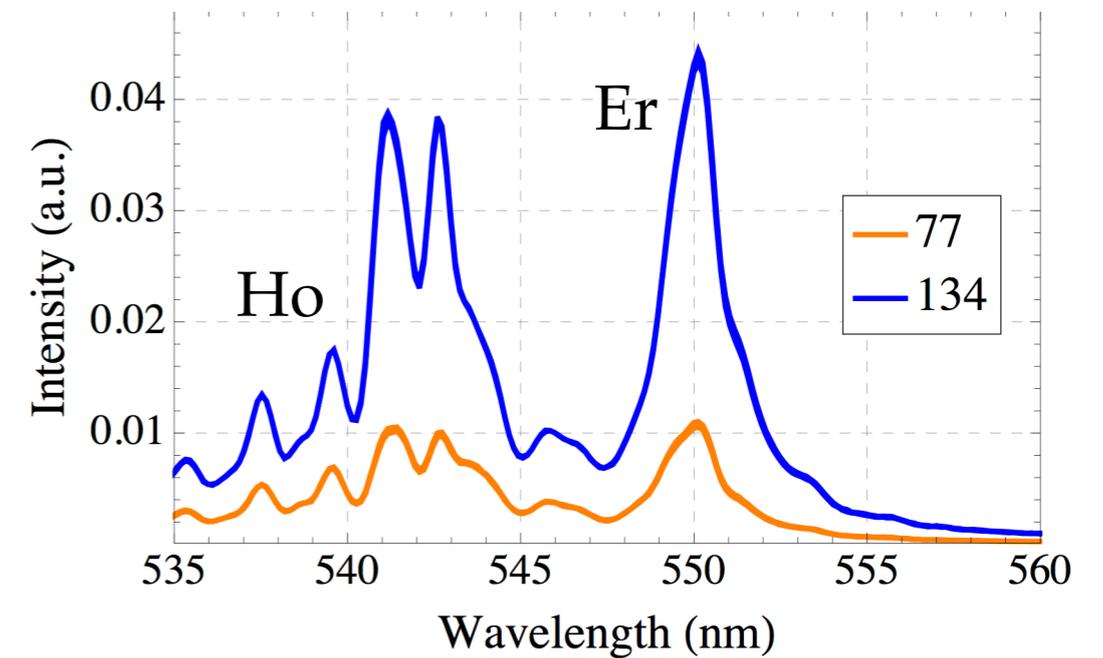


## Misura di fluorescenza per individuare le impurità

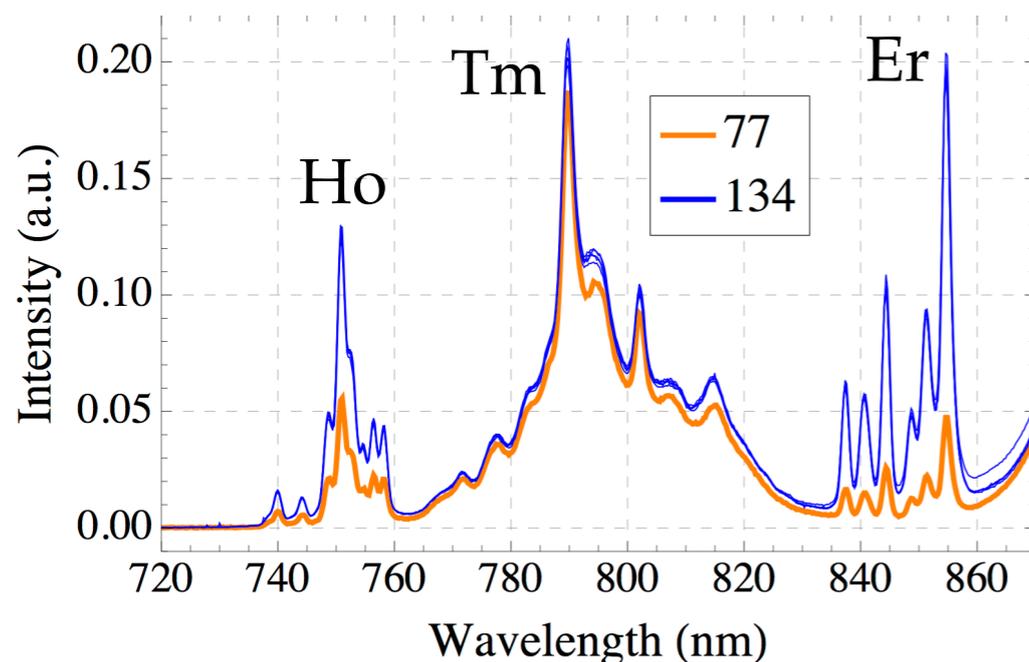
### Mass spectrometry

	Sample no. 77	Sample no. 134
Element	Conc. (ppm)	Conc. (ppm)
Erbium	$0.25 \pm 0.05$	$1.1 \pm 0.2$
Holmium	$0.39 \pm 0.08$	$0.72 \pm 0.04$
Thulium	$1.4 \pm 0.6$	$0.7 \pm 0.3$

### Green emission



### Infrared emission



### Peak and amount ratios

	Green	Infrared	Elemental
Erbium	4.7	4.3	$4.4 \pm 1$
Holmium	2.6	2.3	$1.8 \pm 0.4$
Thulium	n.a.	1.1	$0.5 \pm 0.3$