

# Besoins en instrumentation faisceau des accélérateurs laser plasma

Brigitte Cros

Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas, Orsay



université  
PARIS-SACLAY





- ➡ Contexte et état de l'art de l'accélération laser plasma (électrons)
- ➡ Paramètres typiques à mesurer et environnement (exemple d'Eupraxia)
- ➡ Types de diagnostics existant
- ➡ Objectifs et besoins des diagnostics à développer

# L'accélération laser plasma est un mécanisme prometteur pour des accélérateurs compacts

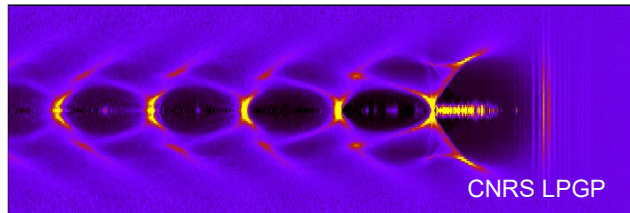


- ➔ Elle se caractérise par des **champs accélérateurs très élevés** 1-100 GV/m, et des échelles caractéristiques (taille des cavités accélératrice) réduites

RF  $\sim$  0.1 m



LPA  $<$  0.1 mm



- ➔ Les paramètres du laser (intensité) et du plasma (densité) déterminent les régimes d'accélération et permettent de réaliser **des sources compactes d'électrons relativistes** (entre 0.01 et 1 GeV) ou des **cavités accélératrices plasma** (entre 1 et 10 GV/m) dans lesquelles il faut injecter des particules relativistes

# Etat de l'art au niveau international



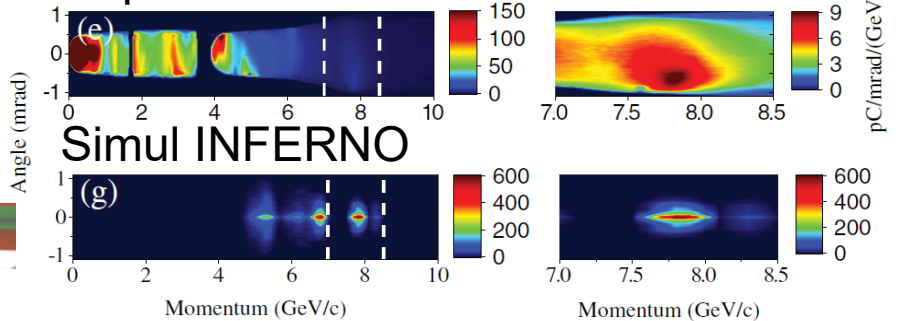
## 10GeV accelerator module

LBL, laser guiding in 20cm long cap discharge waveguide

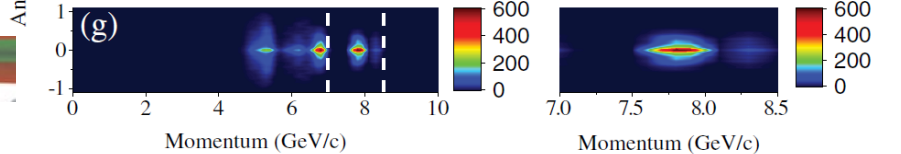


PRL 122, 084801 (2019)

## Experiment



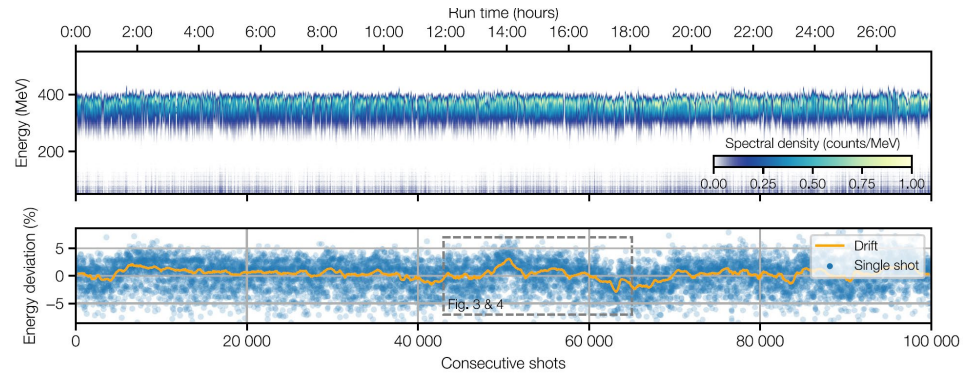
## Simul INFERNO



## 24 hour operation

DESY, LUX Laser plasma accelerator

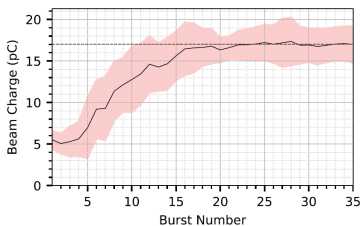
PRX 10, 031039 (2020)



PRL 126, 104801 (2021)

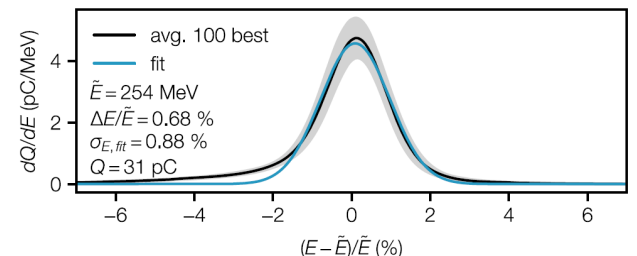
## Automated optimisation

Shaloo et al, Nat comm (2020) 11:6355



Optimised for charge

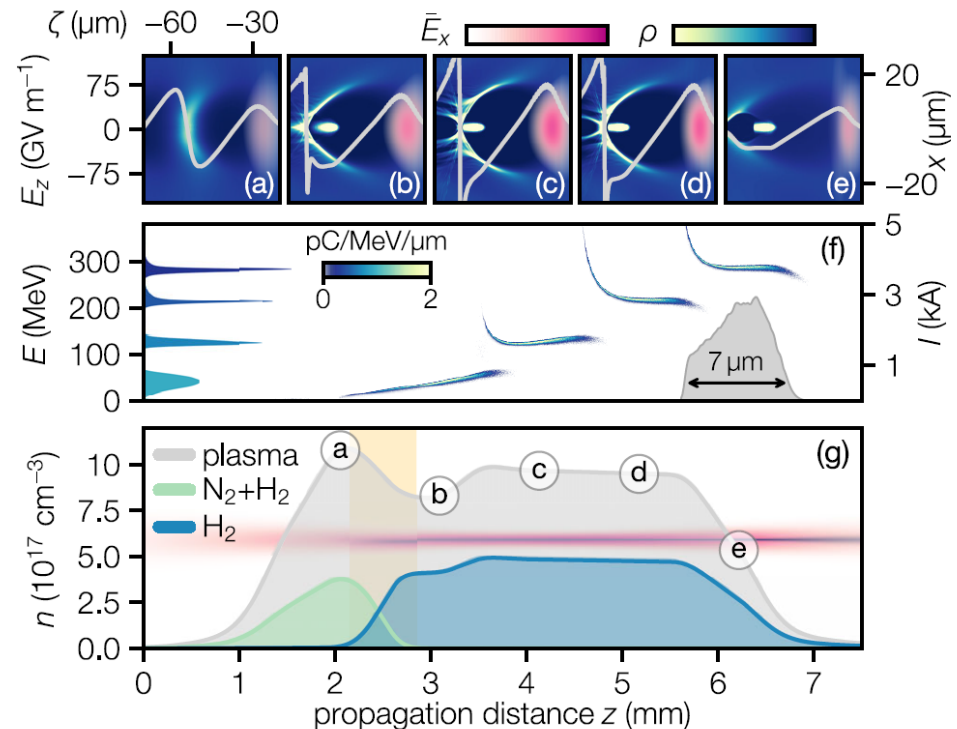
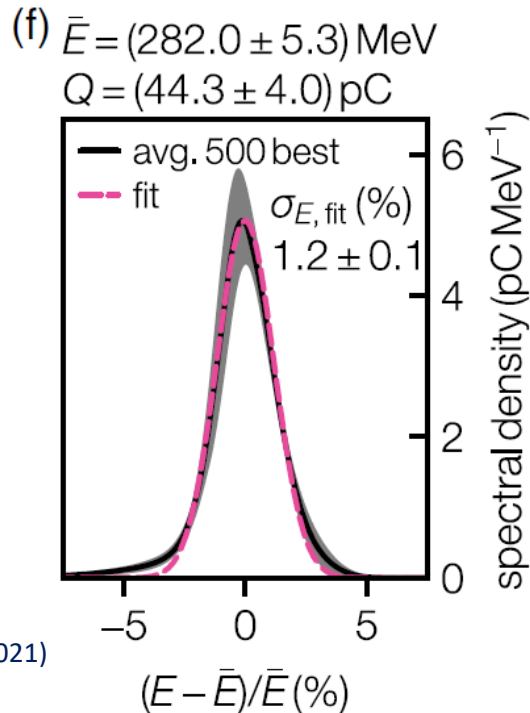
Optimised for small energy spread



# Optimisation of electron beam properties assisted by machine learning

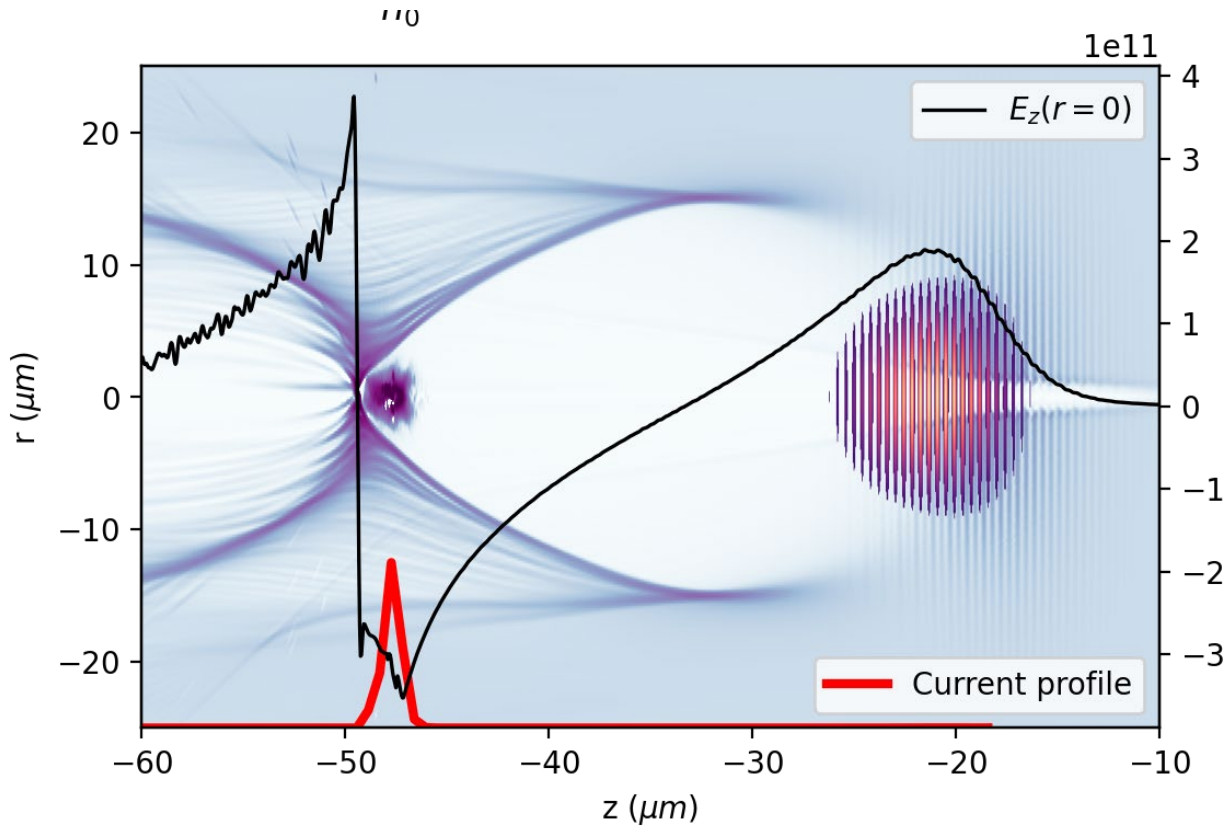


- Best beam properties demonstrated so far at DESY
- Agreement with simulations (injection and acceleration in the plasma)



- Good agreement with simulations: strong basis for accelerator design

# Paramètres caractéristiques de la source d'électrons



- ➔ Simulation du paquet d'électrons dans le plasma,
- ➔ Paramètres expérimentaux mesurés en dehors, après propagation dans le vide ou d'autres milieux

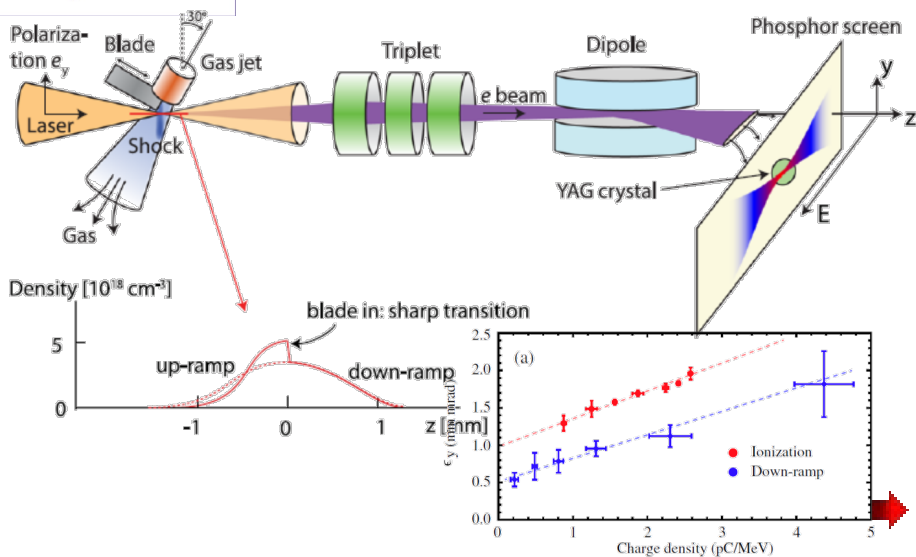
Simul. I Moulanier-LPGP

# Exemple de paramètres pour l'injecteur d'Eupraxia



<b>Quantity</b>	<b>Required value At injector exit</b>	<b>[range]</b>
Energy	[140 – 250 MeV]	
Charge	[30 – 100 pC]	
Bunch length	[3 – 8 fs]	
Repetition rate	[1 – 100 Hz]	
Total energy spread	[1 – 4 %]	
Transverse normalized emittance	1 mm.mrad	
Transverse beam size	[0.5 – 0.71 $\mu\text{m}$ ]	
Transverse emittance x	[0.1 – 1 mm mrad]	

# Type de diagnostics mis en oeuvre et limitations



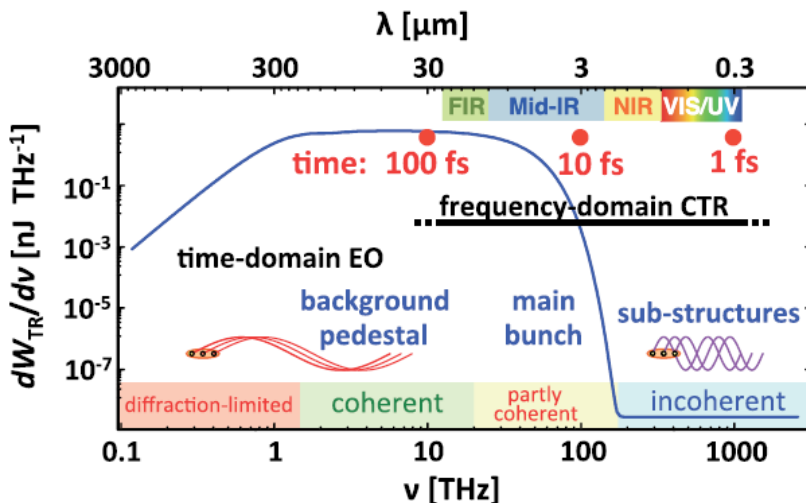
➔ Mesure **charge et énergie** des sources d'électrons (aimant+lanex ou yag + système optique de détection):

- Difficultés de calibration (pratiques)
- Faible résolution en énergie (quelques % au mieux)

➔ Mesure d'**émittance** après des lignes de transport sur certaines expériences

Barber et al., PRL 119, 104801 (2017)

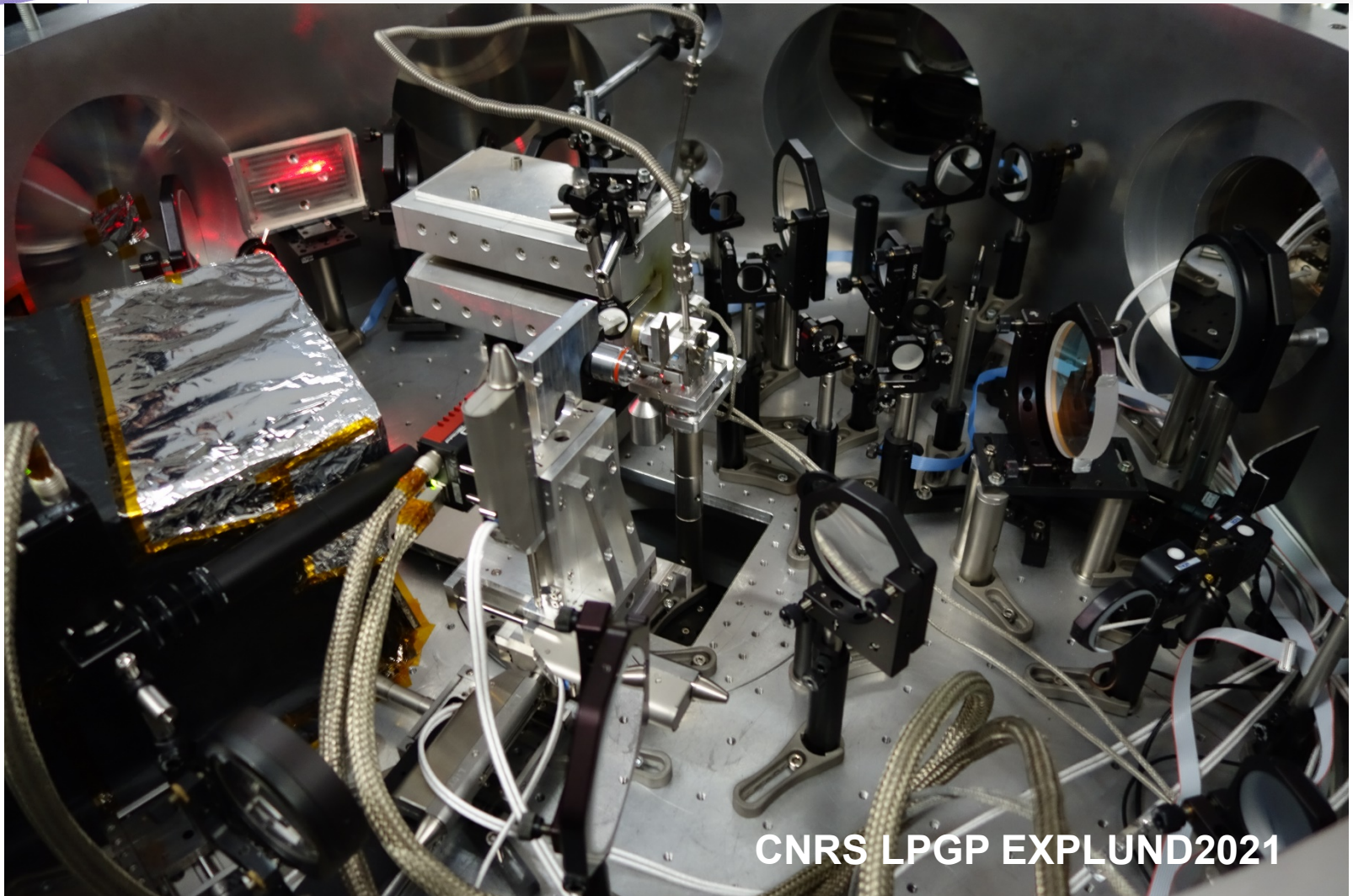
➔ Mesure de **durée** reste très difficile (structure temporelle du faisceau peut être complexe): Electro optique domaine temporel, OTR domaine spectral



Diagnostics for plasma-based electron accelerators Downer et al. REVIEWS OF MODERN PHYSICS, VOLUME 90, JULY-SEPTEMBER 2018



# Environnement expérimental typique actuel: Source d'électrons <300MeV au LLC

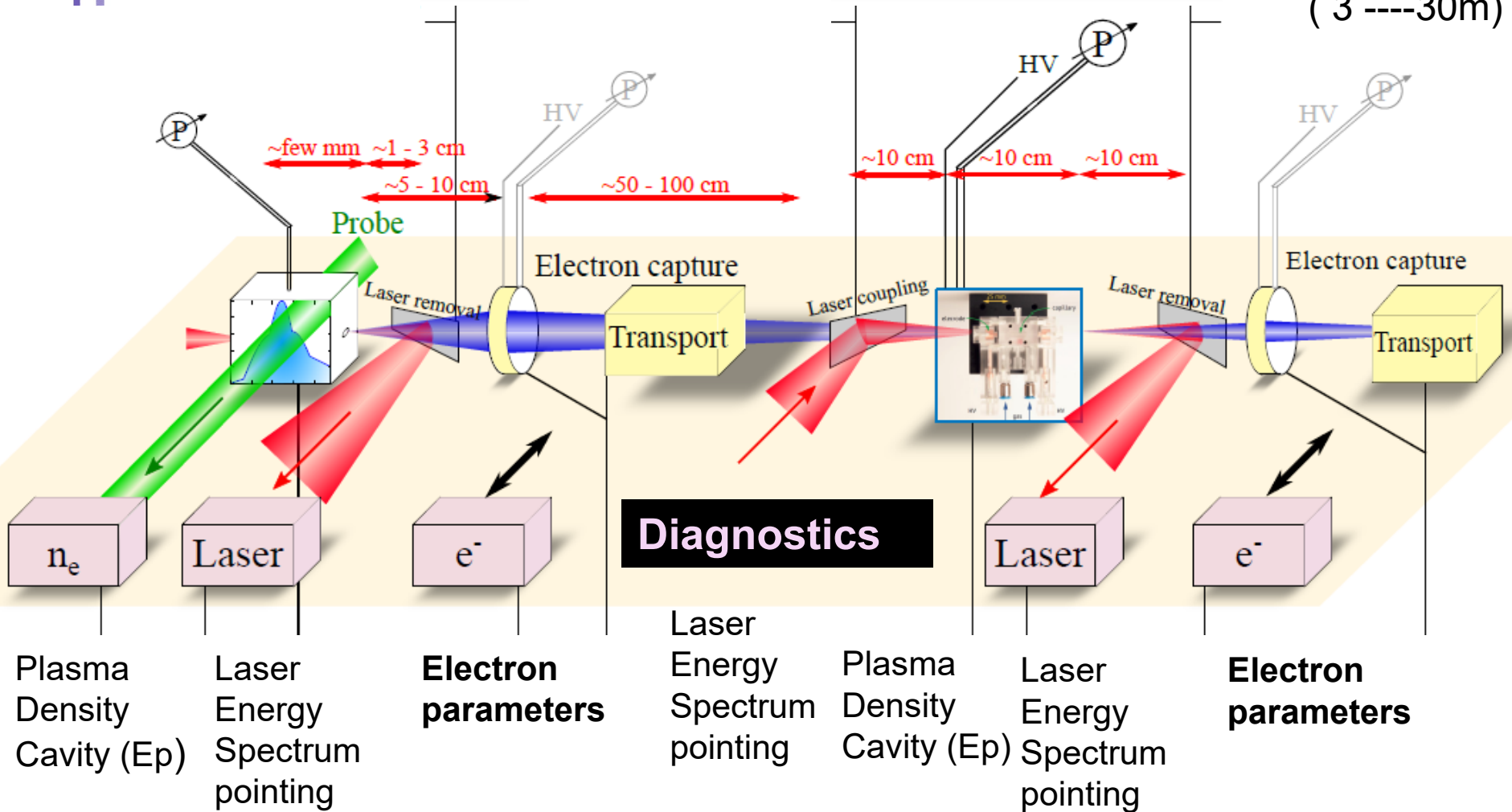


CNRS LPGP EXPLUND2021

# Environnement: exemple de conception de ligne accélérateur pour EUPRAXIA



( 3 ----30m)



# Besoins en diagnostics électrons



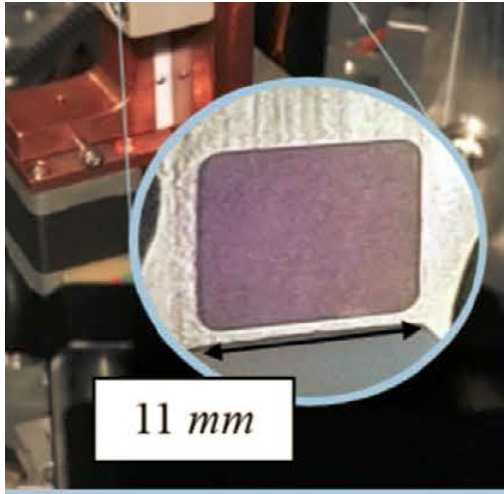
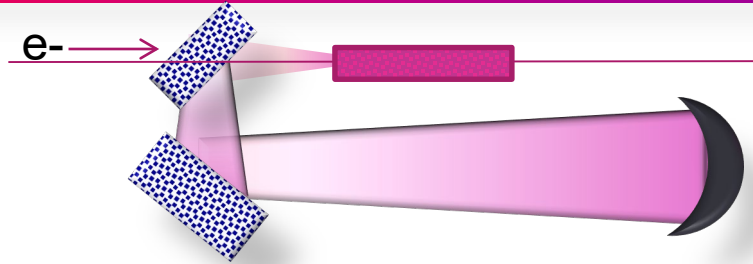
## Objectif des mesures:

- ✿ caractérisation précise des faisceaux accélérés (charge, énergie, durée, position)
- ✿ Alignement entrée ligne transport ou étage accélérateur (position espace, temps d'arrivée par rapport au faisceau laser): non perturbatif
- ✿ Polarisation (jamais mesurée)

## Contraintes générales:

- ✿ Monocoup (pour évaluer les fluctuations)
- ✿ Charge 1 à 100 pC par acquisition pour les pics haute énergie, charge totale peut aller jusqu'au nC d'électrons produits
- ✿ Résolution spatiale inférieure au micron (faisceaux focalisés)
- ✿ Résolution temporelle de l'ordre de la fs
- ✿ Environnement électromagnétique laser plasma

# Exemple: couplage du faisceau d'électrons sous vide et gestion du rayonnement laser



Poole 2016, SR  
Liquid crystal PM

## ► Enjeux:

- extraire et injecter les faisceaux d'e- sur une distance courte
- Préserver la qualité du faisceau

## ► Solutions envisagées:

- Coupler le laser et les faisceaux de particules en utilisant des miroirs : miroir plasma, à partir de ruban, de crystal ou de jet liquide

# Exemple: synchronisation du faisceau laser et des paquets d'électrons

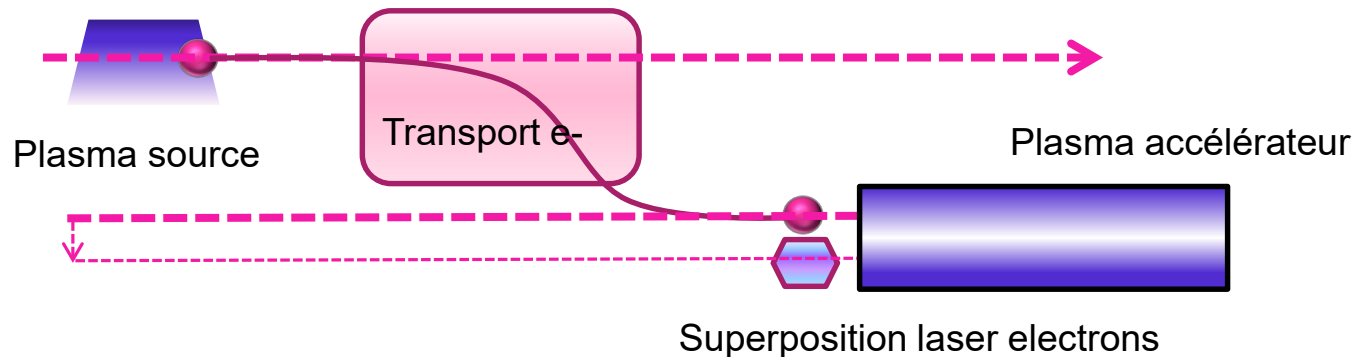


## ➡ Objectifs:

- ✿ Mesurer le retard laser et électrons
- ✿ Superposer les distributions spatiales à l'entrée du plasma

## ➡ Les méthodes envisagées doivent être

- Non destructives,
- Avec une résolution de l'ordre 1 fs et de quelques microns en transverse





- ➡ Besoin en diagnostics électrons fiables, calibrés, adaptés à l'environnement laser plasma
  - ✿ caractérisation des faisceaux accélérés (charge, énergie, durée, position)
  - ✿ Alignement entrée ligne transport ou étage accélérateur (position espace, temps d'arrivée par rapport au faisceau laser): non perturbatif
  - ✿ Polarisation (jamais mesurée)
  
- ➡ Comment utiliser au mieux l'expertise acquise sur accélérateurs conventionnels?

# Compléments

# European coordination: Eupraxia has fostered accelerator development



## The EuPRAXIA Project



- First ever international design of a **plasma accelerator facility**.
- Challenges addressed by EuPRAXIA since 2015:
  - How can plasma accelerators produce usable electron beams?
  - For what can we use those beams while we increase the beam energy towards HEP and collider usages?
- **CDR for a distributed research infrastructure** funded by EU Horizon2020 program. Completed by 16+25 institutes end 2019.
- Formed **next phase consortium** with 40 partners, 10 observers.
- **Applied to ESFRI roadmap update 2021** with government support in Sep 2020.
- **On the ESFRI roadmap since July 2021** <sup>EW</sup>.



**653 page CDR**  
240 scientists contributed

<http://www.eupraxia-project.eu/>

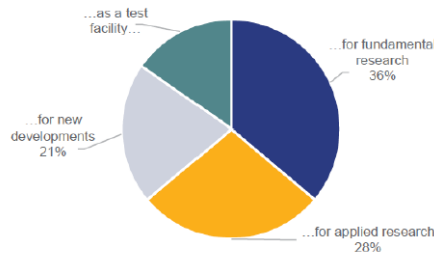
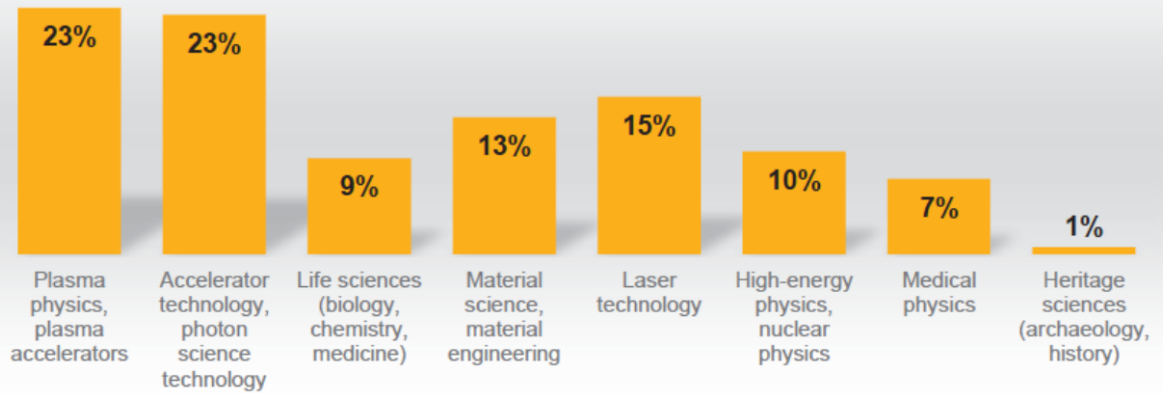


EuPRAXIA is designed to deliver at 10-100 Hz ultra-short pulses of

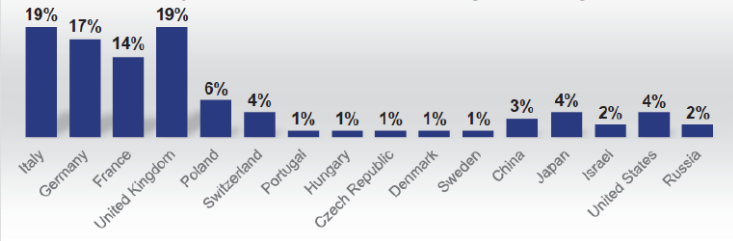
- Electrons (0.1-5 GeV, 30 pC)
- Positrons (0.5-10 MeV,  $10^6$ )
- Positrons (GeV source)
- Lasers (100 J, 50 fs, 10-100 Hz)
- Betatron X rays (5-18 keV,  $10^{10}$ )
- FEL light (0.2-36 nm,  $10^9$ - $10^{13}$ )

Expressions of interest from **95 research groups** representing several thousand scientists in total.

### Expressions of interest by scientific field

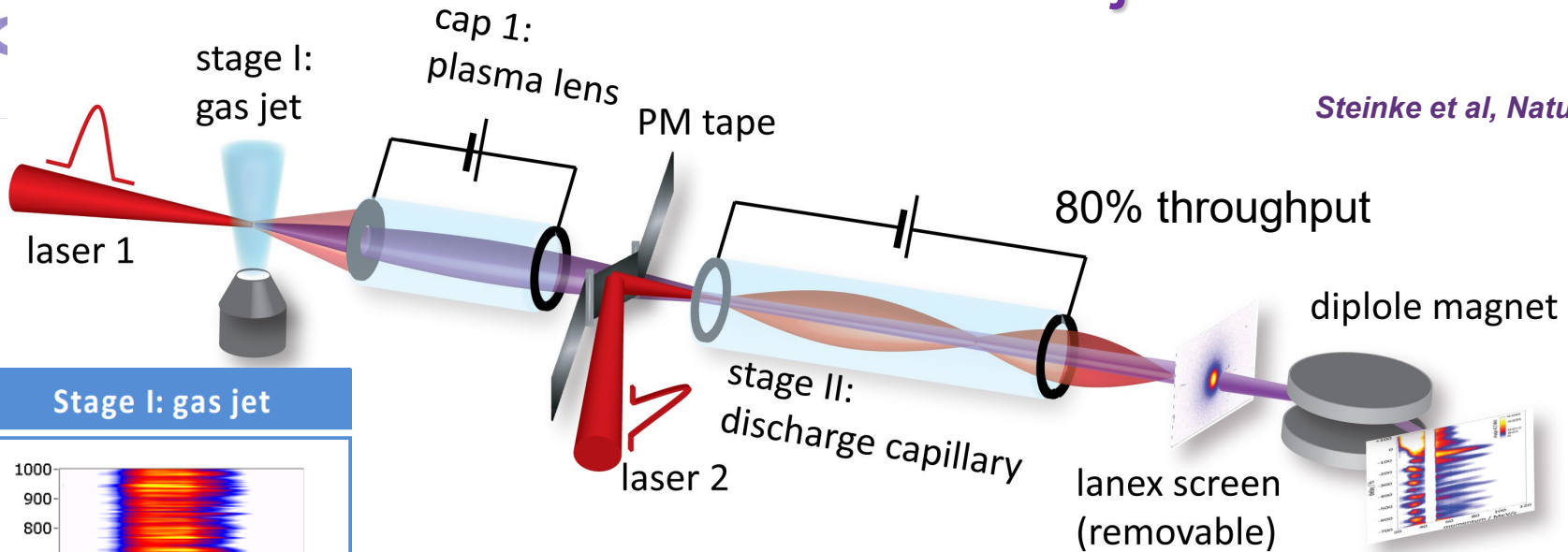


### Expressions of interest by country

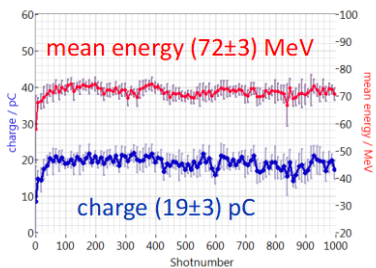
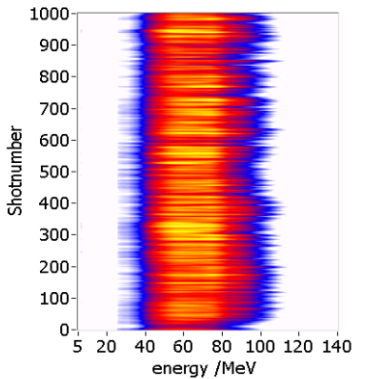


# Preliminary test of external electron injection at LBNL

Steinke et al, Nature (2016)



Stage I: gas jet



➔ Emphasizes the need to achieve a good beam quality for coupling the electron beam to the plasma

Stage I + II

