



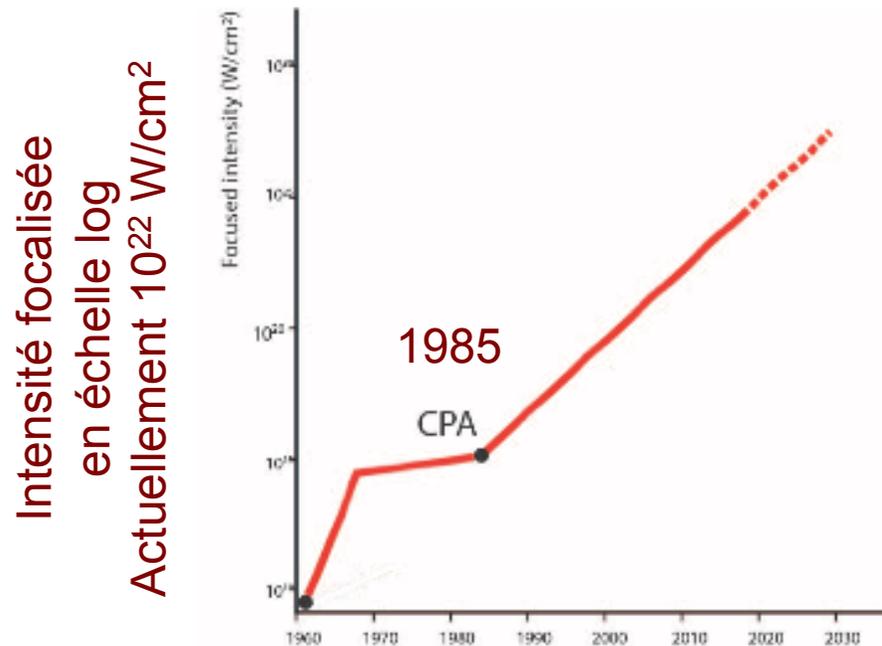
# La lumière extrême et ses applications Au sein de Paris Saclay: contexte et perspectives

*Sophie Kazamias*  
*Professeur LPGP-LAL-Laserix*



# La lumière extrême est d'actualité ...

La technique CPA a valu le prix Nobel 2018 à Mme Strickland et M. Mourou

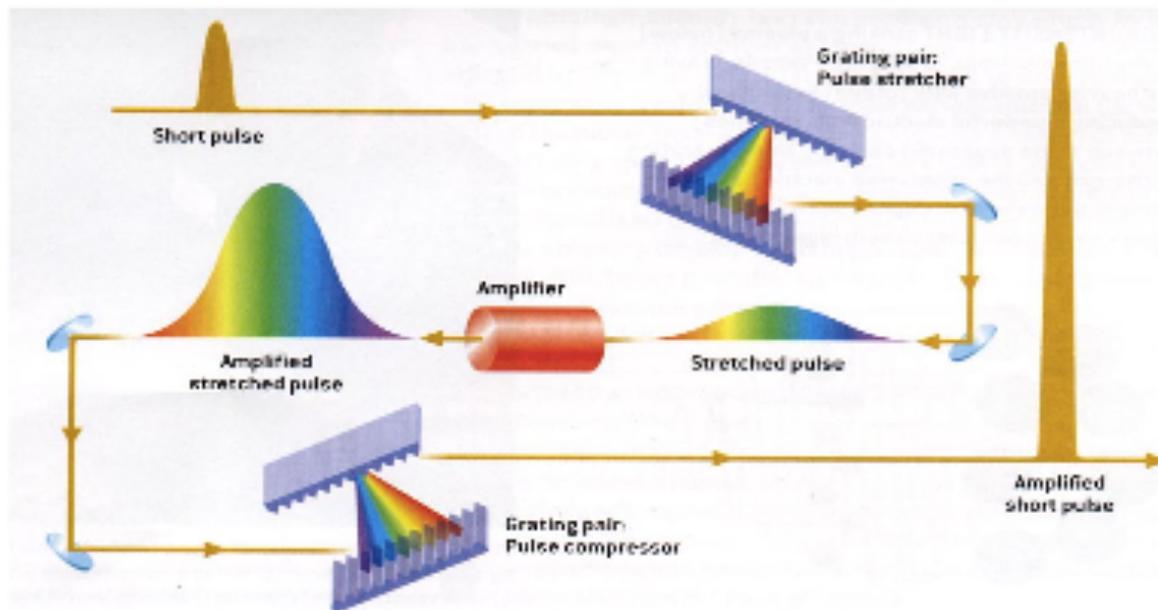


**Figure 3.** The history of pulsed laser technology in terms of peak intensity. After an initial increase in intensity during the 1960s, as described in the text, only an incremental increase occurred during more than a decade. The invention of the CPA technique for optical pulses by Strickland and Mourou in 1985 [45] dramatically changed the situation. The values on the y-axis are indicative because the intensity depends on how sharply the laser beam is focused.

Figure extraite du document du site de l'académie Nobel

# La lumière extrême est d'actualité...

## Principe du CPA: durée courte/large spectre



**Figure 5.** The standard CPA configuration. The chirp is illustrated with colours. Initially the gain medium (amplifier) was Nd:glass, whereas today, another common gain medium is Ti:sapphire. (Reproduced from Center for Ultrafast Optical Science, University of Michigan in Ann Arbor.)

*Figure extraite du document du site de l'académie Nobel*

# Deux infinis...

---

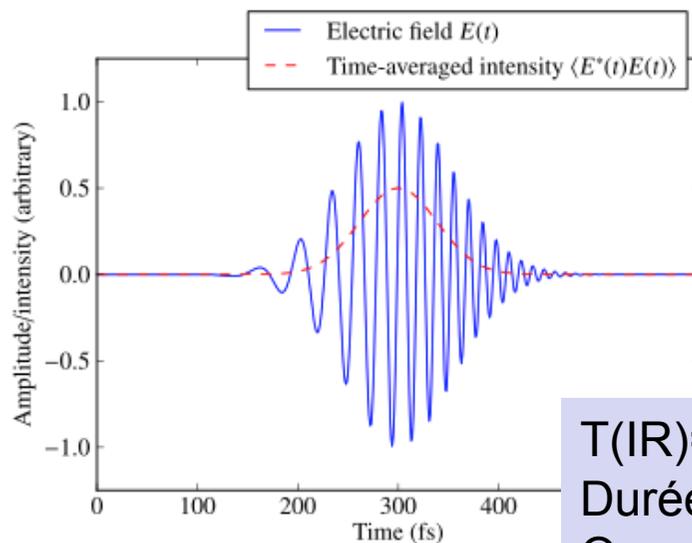
## Infiniment court et infiniment intense



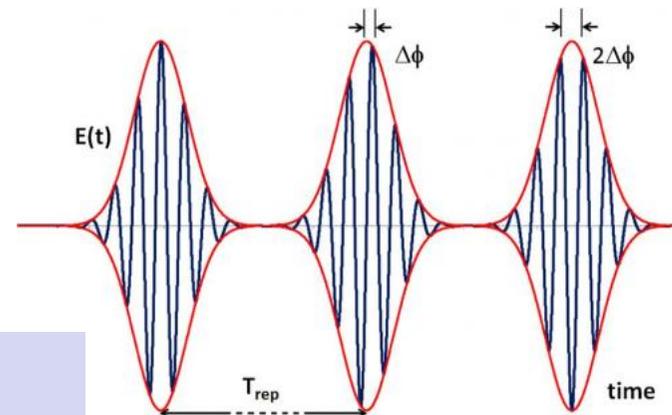
# Quelques ordres de grandeur « extrêmes »

$$\text{puissance} = \frac{\text{énergie}}{\text{durée}} = 1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$$

$$\text{Intensité} = \frac{\text{puissance}}{\text{unité de surface}} = 10^{18} \text{ à } 10^{21} \text{ W / cm}^2$$



$T(\text{IR}) = 2,6 \text{ fs}$   
Durée ultime IR: qq fs  
On mesure et on contrôle  
La phase de la porteuse!



# Le champ électrique lumineux

*Première orbite de Bohr:  $E=5.10^{11}$  V/m*

*Energie de liaison: 13,6 eV*

*Temps caractéristique:*

$$\frac{\hbar}{E_H} \approx qq 10^{-17} s \approx qq 10 \text{ as}$$

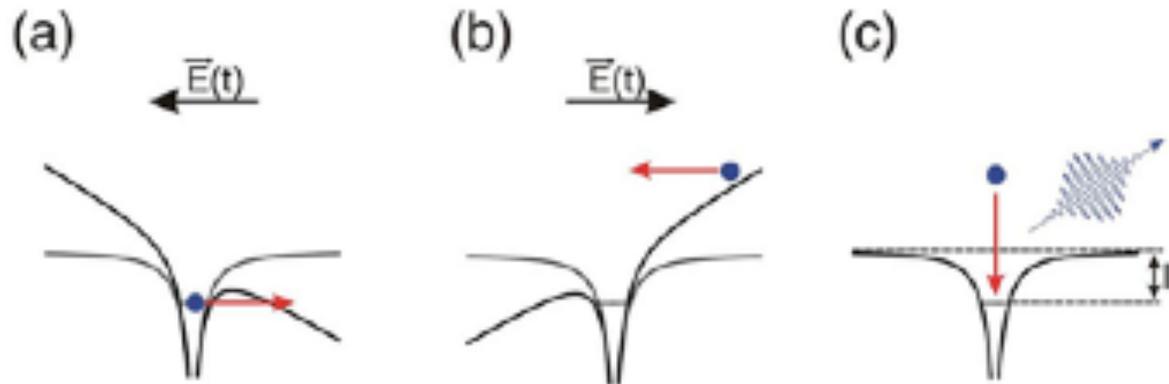
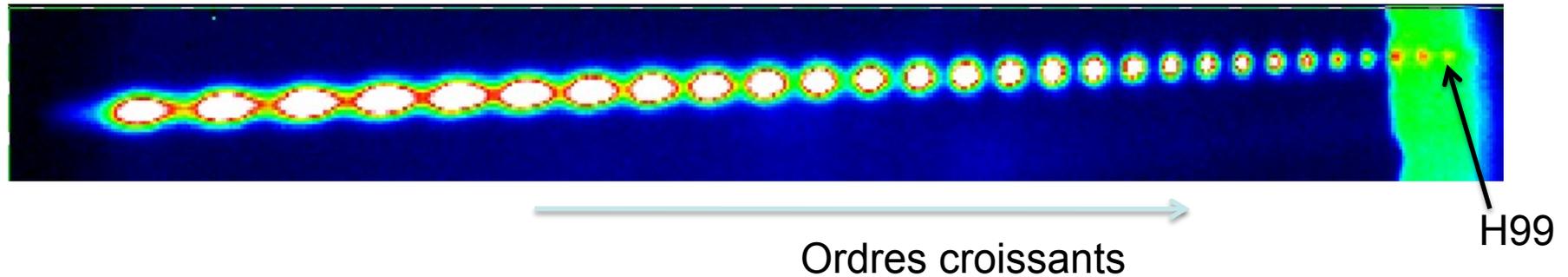
$$\textit{Intensité} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c E^2 \Rightarrow E = \sqrt{\frac{2I}{\varepsilon_0 c}} = 27,7 \sqrt{I}$$

Le champ du laser s'écrit  $E(t)\vec{u}_x = E_0 \cos(\omega t)\vec{u}_x$

Le potentiel s'écrit  $V(x) = -exE_0 \cos(\omega t)$

Premiers effets non linéaires dès que I dépasse qq  $10^{12}$  W/cm<sup>2</sup>

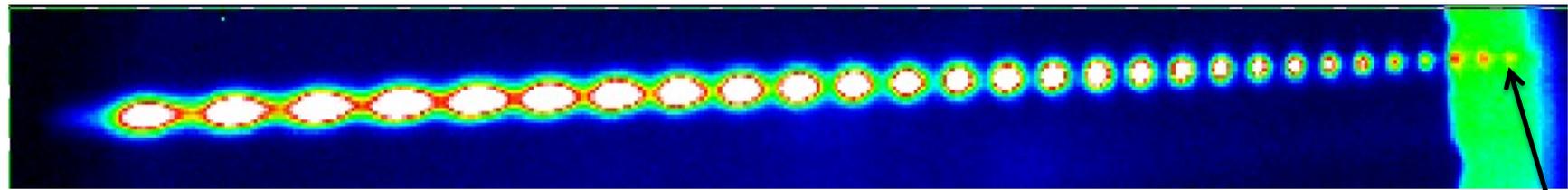
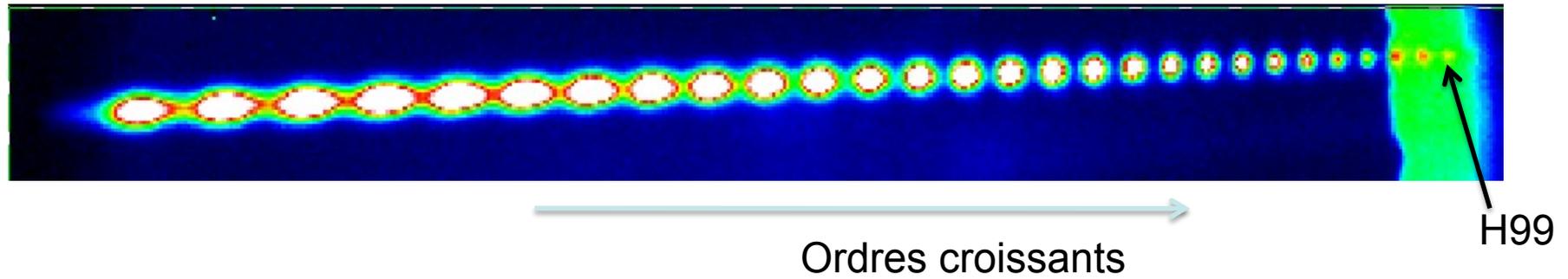
# La génération d'harmoniques d'ordres élevés



Le taux d'ionisation varie comme  $\exp(-1/E)$  = probabilité de franchissement de barrière tunnel par unité de temps

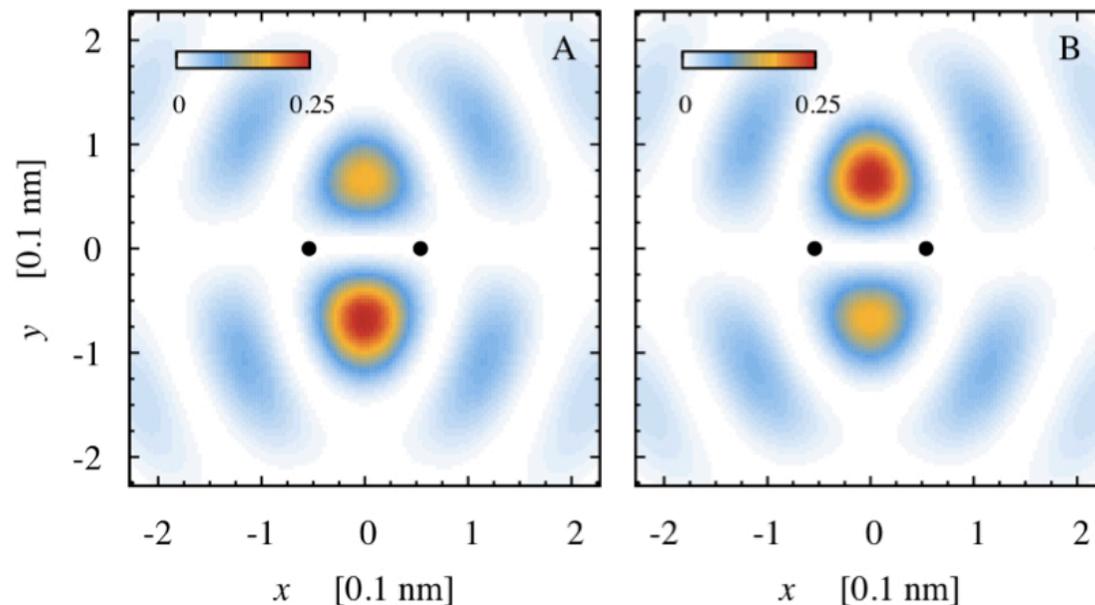
Première source de lumière à atteindre le régime attoseconde: 1 as =  $10^{-18}$ s

# La génération d'harmoniques



# L'extrêmement court: le régime attoseconde

1,5 fs = 1/2 période optique IR =  $10^{-15}$  s = la polarisation du laser se renverse  
La sonde harmonique dure 300 as =  $3 \cdot 10^{-16}$  s

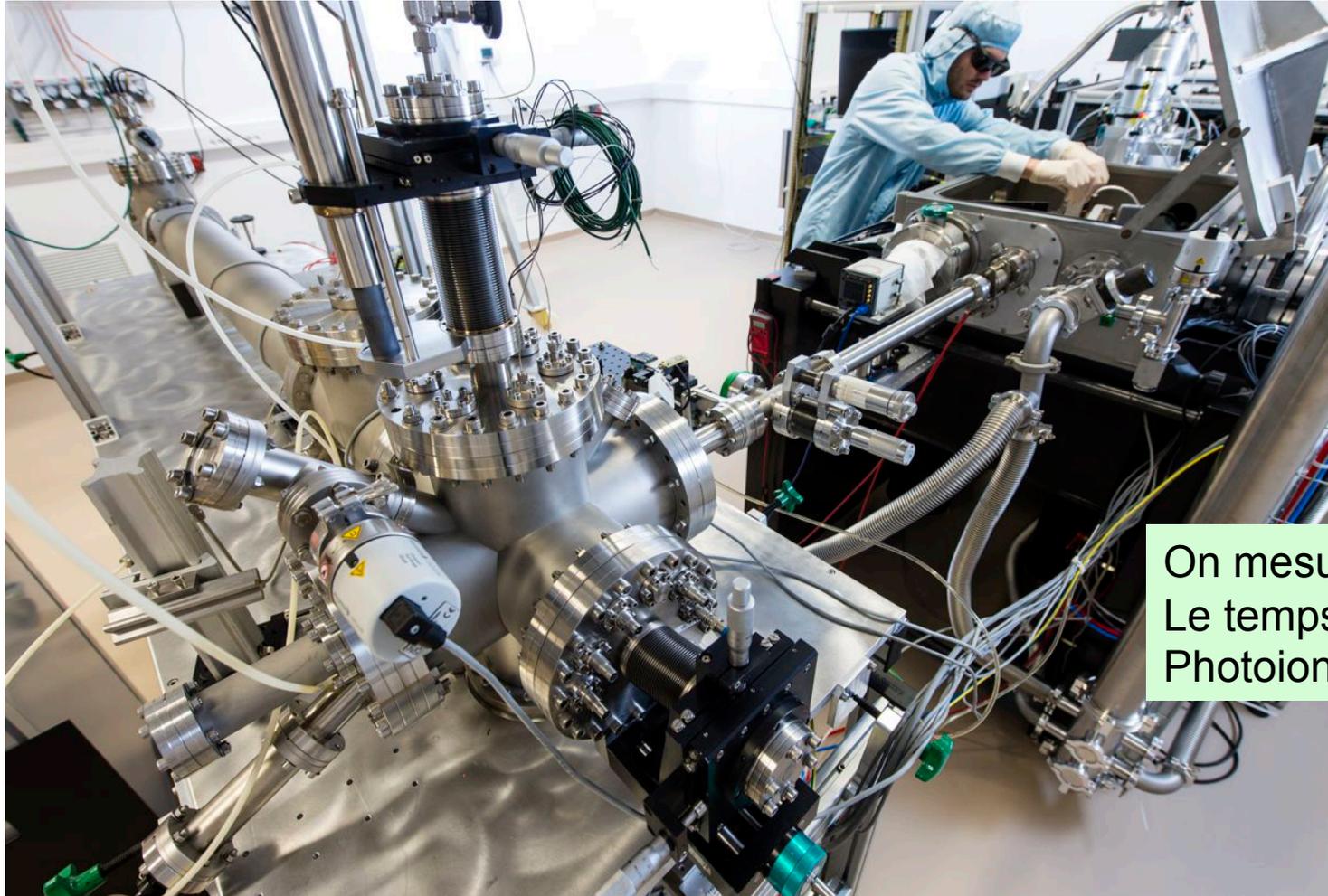


*Reconstruction de la fonction d'onde, à deux instants séparés de  $1500 \pm 300$  as, permettant de visualiser le déplacement d'un "trou" dans la densité électronique produit par l'interaction de la molécule de diazote avec le laser intense. Les points noirs indiquent la position des atomes dans la molécule. © Nature Physics*

Collaboration CEA/CNRS/UPMC, équipex Attolab

L'ISMO entre autre est un collaborateur régulier d'attolab mais aussi LPS, Soleil etc.<sup>9</sup>

# L'extrêmement court: le régime attoseconde



Collaboration CEA/CNRS/UPMC, équipex Attolab

L'ISMO entre autre est un collaborateur régulier d'attolab mais aussi LPS, Soleil etc<sup>1</sup><sub>0</sub>

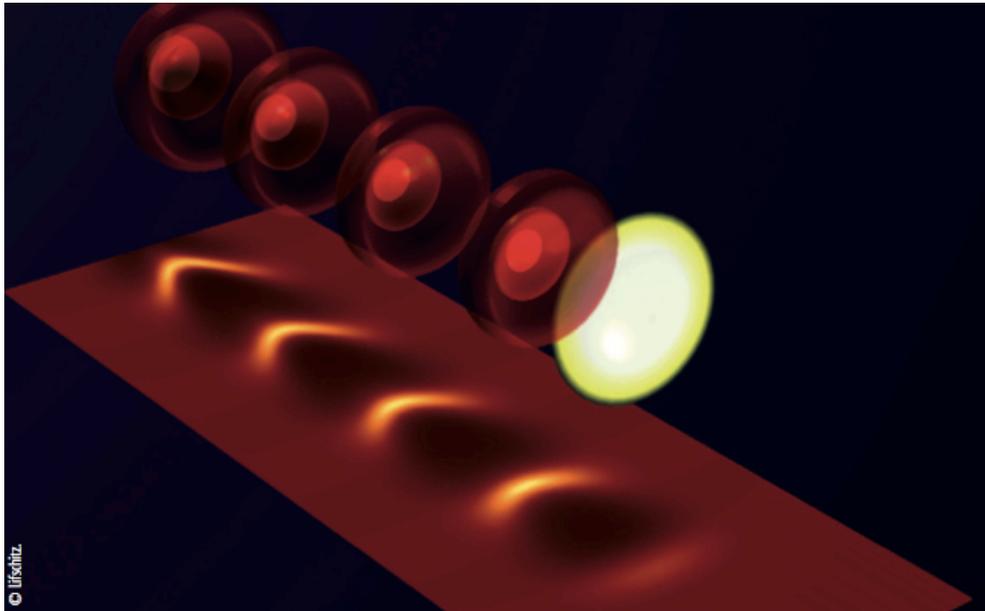
# Le champ électrique lumineux:

## qq ordres de grandeur plus tard...

- L'ionisation de la matière devient certaine en qq fractions de fs
- L'énergie cinétique moyenne acquise par un électron dans le champ du laser dépasse l'énergie de masse de l'électron: on **entre dans le régime relativiste en moins d'un cycle optique**
- Les particules sont soumises à des forces très importantes dont la force pondéromotrice 
$$\vec{F} = -\vec{\nabla} U_p$$
- Une physique extrêmement riche, non linéaire, couplée, physique des plasmas chauds

**Des sources de particules et de rayonnement aux caractéristiques « extrêmes »**

# L'accélération laser plasma: électrons

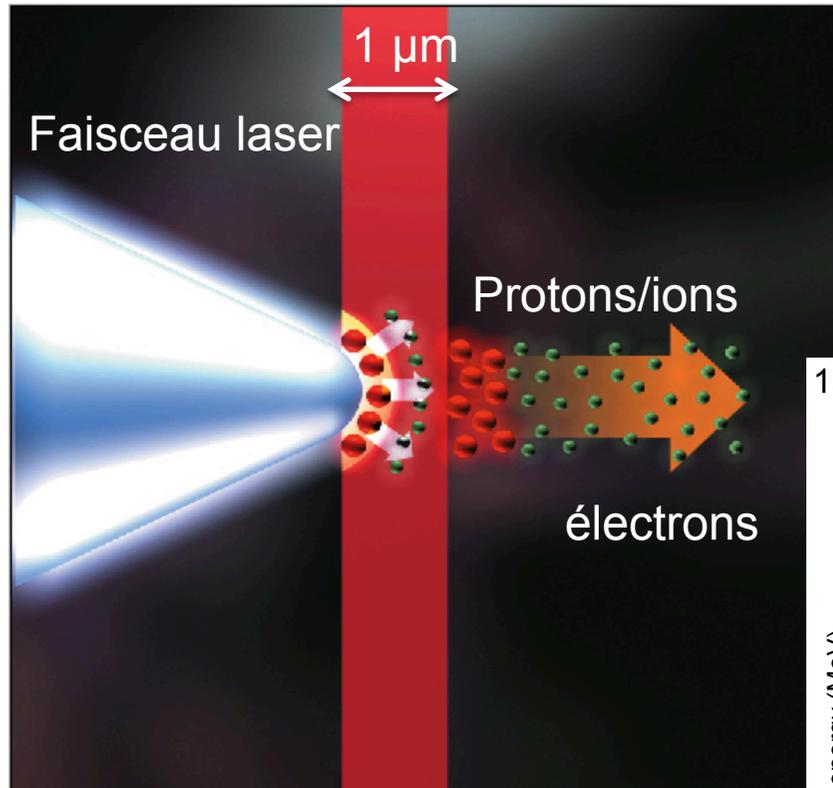


- Les électrons sont accélérés  
Dans une onde de sillage  
Relativiste à l'intérieur d'un plasma
- Les records actuels: **qq GeV avec  
Un laser PW**
- Efforts concentrés sur l'amélioration  
De la stabilité, la monochromaticité,  
L'énergie max, la charge, l'émittance

**EUPRAXIA (A. Chancé)->FEL**

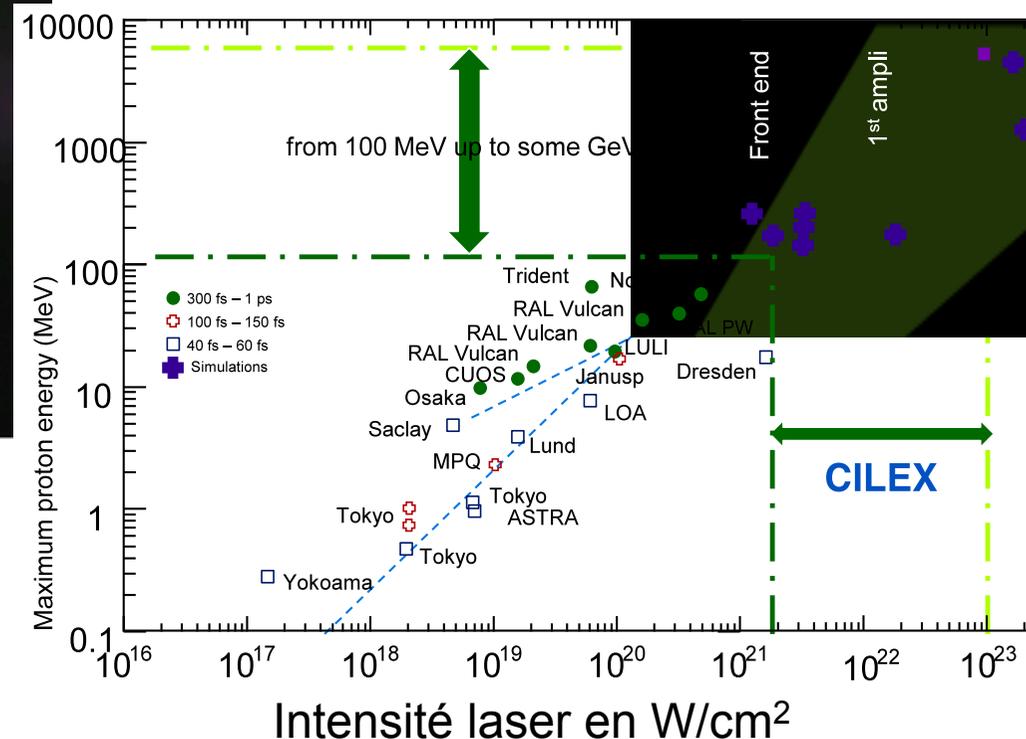
LOA,LPGP, LULI,LLR,LIDYL,LAL

# L'accélération laser plasma: ions

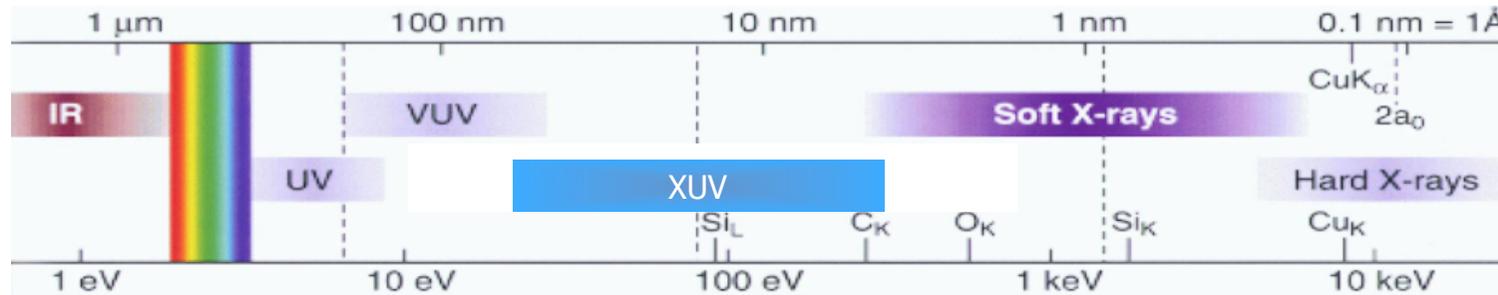


• Les processus physiques en jeu  
Sont plus complexes et variables  
Que pour les sources d'électrons

• Intérêt pour la protonthérapie,  
Les sources actuellement  
Démonstrées ne sont pas encore  
Envisageables pour des  
Thérapies (limitées à qq 10 MeV).



# Les sources de rayonnement: X/XUV/EUV



**Objectif:** créer une source brillante cohérente et de courte durée dans le domaine des courtes longueurs d'onde

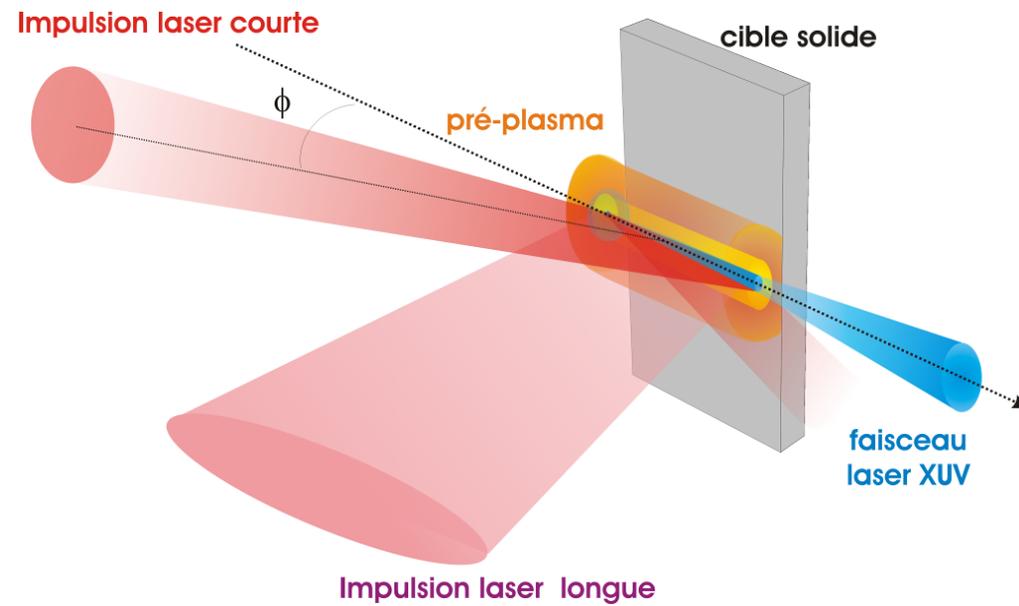
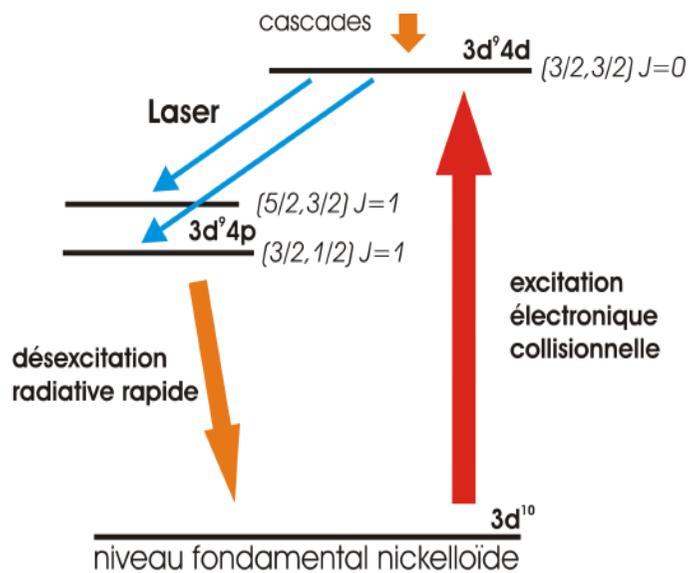
Complémentaire aux sources synchrotron: SOLEIL

**Intérêt:** sonder la matière, les plasmas à des échelles ultra-courtes  
Ps, fs vers as

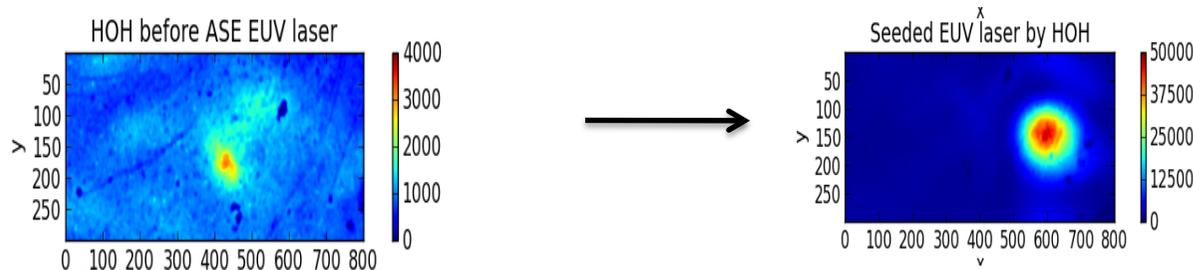
**Difficulté:** faire laser à courte longueur d'onde!  
Einstein 1917 compétition émission spontanée, émission Stimulée



# Principe de l'expérience laser X en cible solide



## Injection d'harmoniques, de l'oscillateur à l'amplificateur:



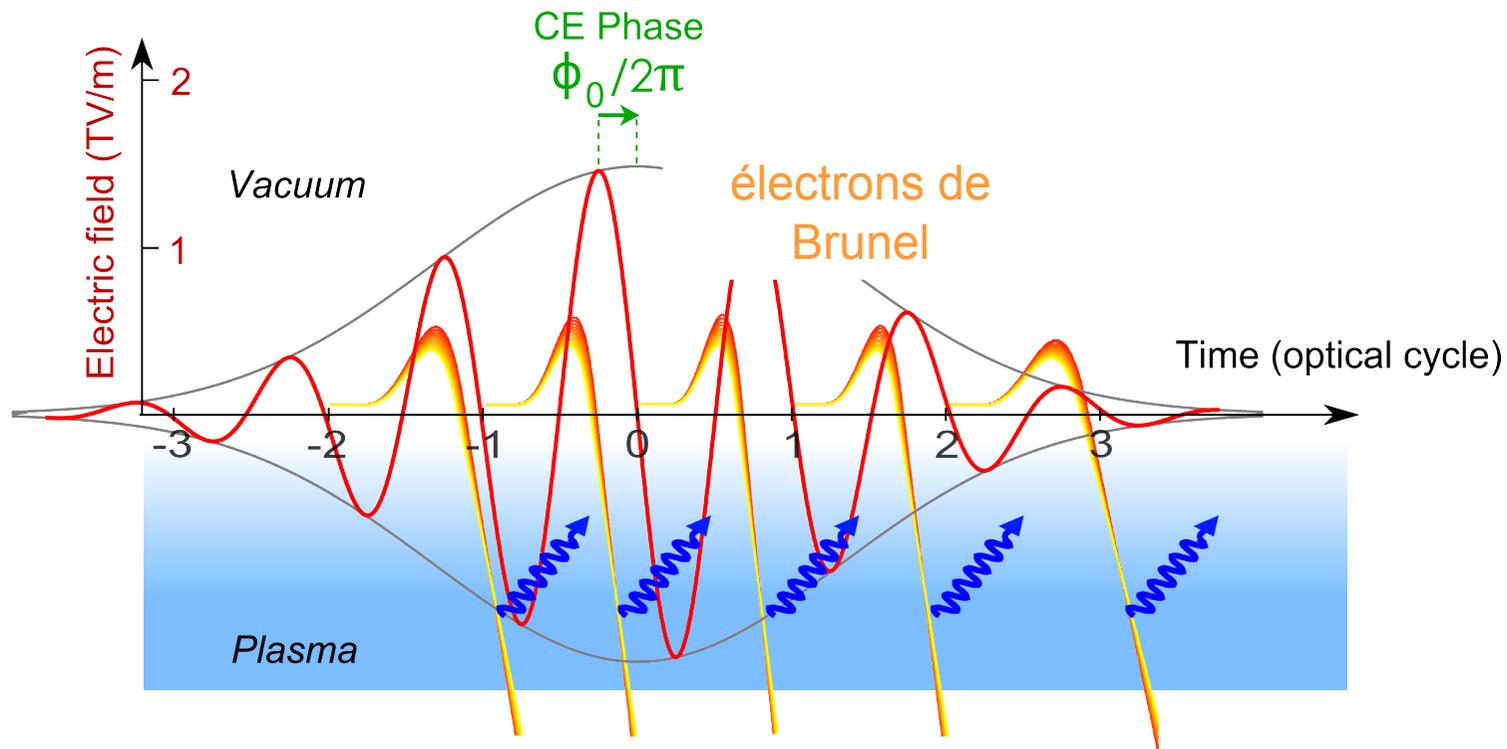
*Microjoule  
XUV, ps  
Qualité laser*

Collab. LPGP, ISMO

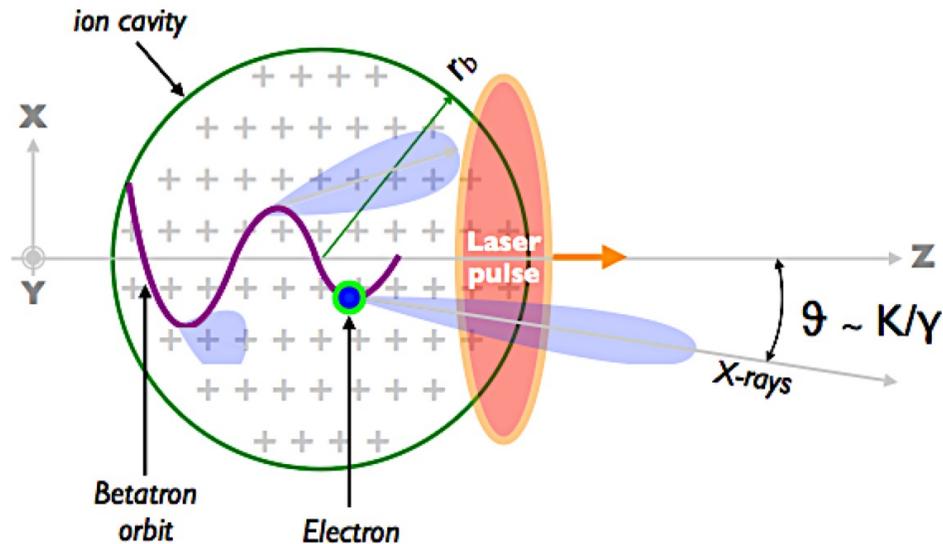


# Les harmoniques en cible solide

Oscillations relativistes de la surface d'un plasma créé par une cible irradiée par  
Un laser intense ou accélération des électrons de Brunel à l'interface vide/plasma  
=>harmoniques

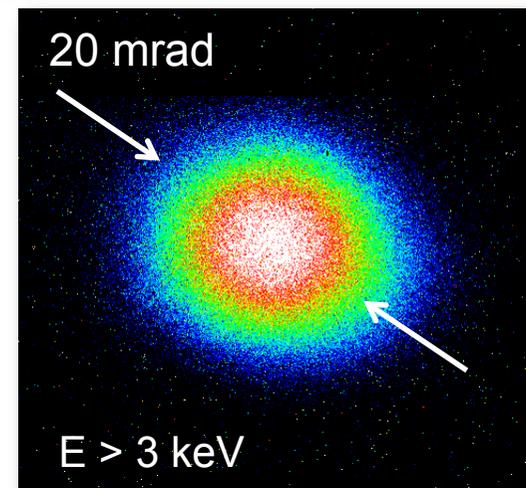
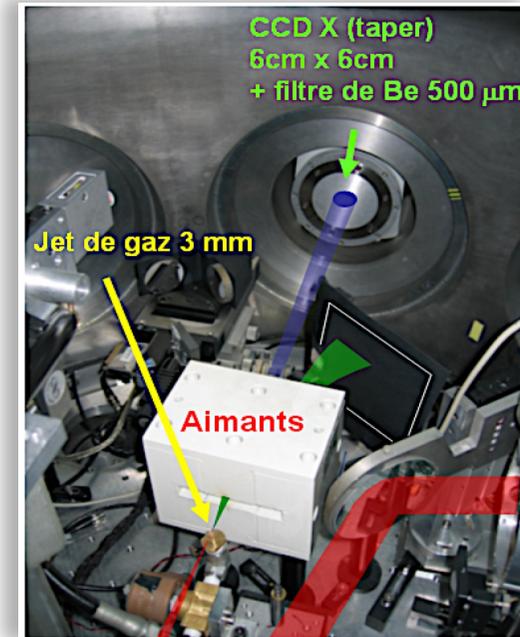


# Génération de rayons X par électrons relativistes



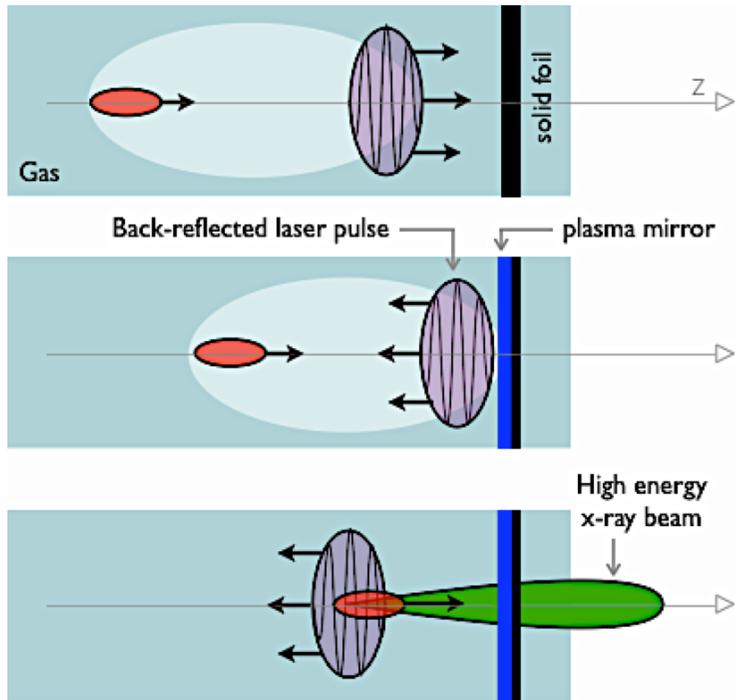
## Caracteristiques de la source:

- $10^5$  photons/tir/0.1% BW @ 1 keV
- divergence: 10's mrad
- Durée: 10's fs
- Spectre: 1-10 keV
- Taille de source: 1- 2 microns



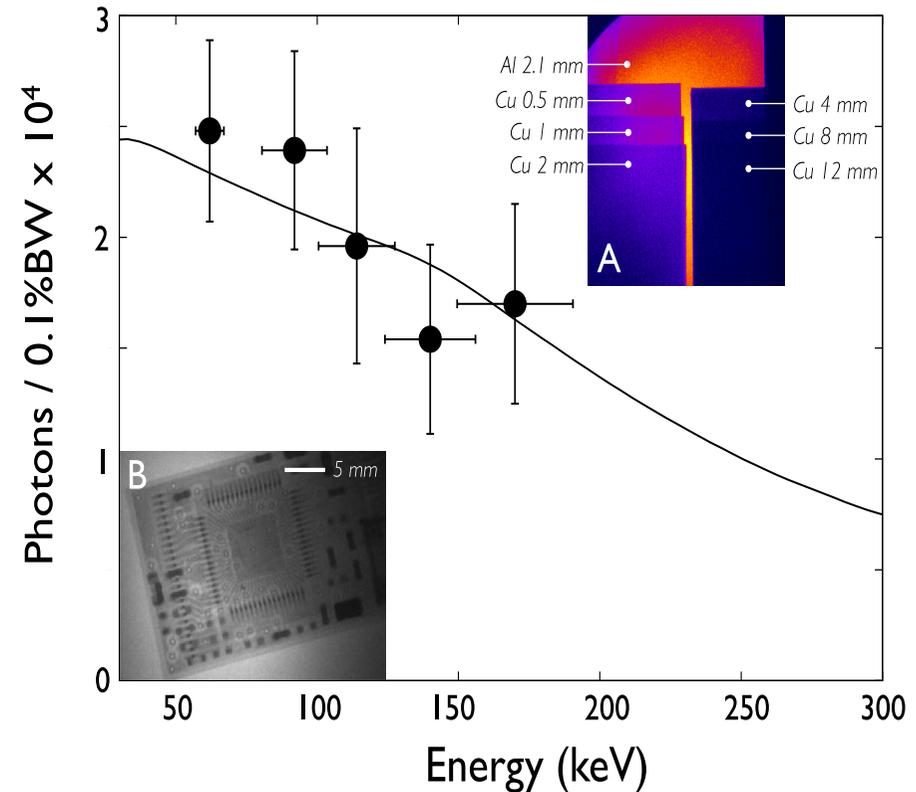
# Diffusion Compton femtoseconde

$$E_{\text{comp.}} = \gamma^2 \times E_{\text{laser}}$$



## Caractéristiques de la source:

- $10^5$  photons/tir/0.1% BW @ 1 keV
- divergence: 10's mrad
- Durée: 10's fs
- Spectre: 10-200 keV
- Taille de source : 1- 2 microns



Ta Phuoc et al., Nat. Phot. 2012

12 avril 2018

# Les installations laser de puissance localement

## Plusieurs EQUIPEX et installations >qq Meuros

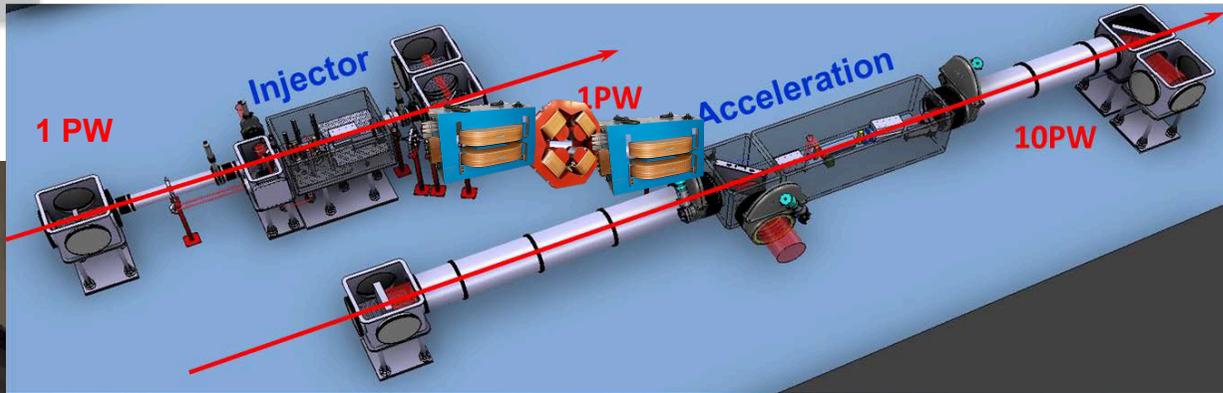


Energie par impulsion qui dépasse  
Le Joule -> vraiment « extrême »:  
Plateau: **LOA, LULI/APOLLON**  
Saclay/Orme des merisiers: **UHI100/attolab**  
Campus d'Orsay: **LASERIX**

Cristal de Titane Saphir:  
Large spectre d'amplification autour de 800 nm

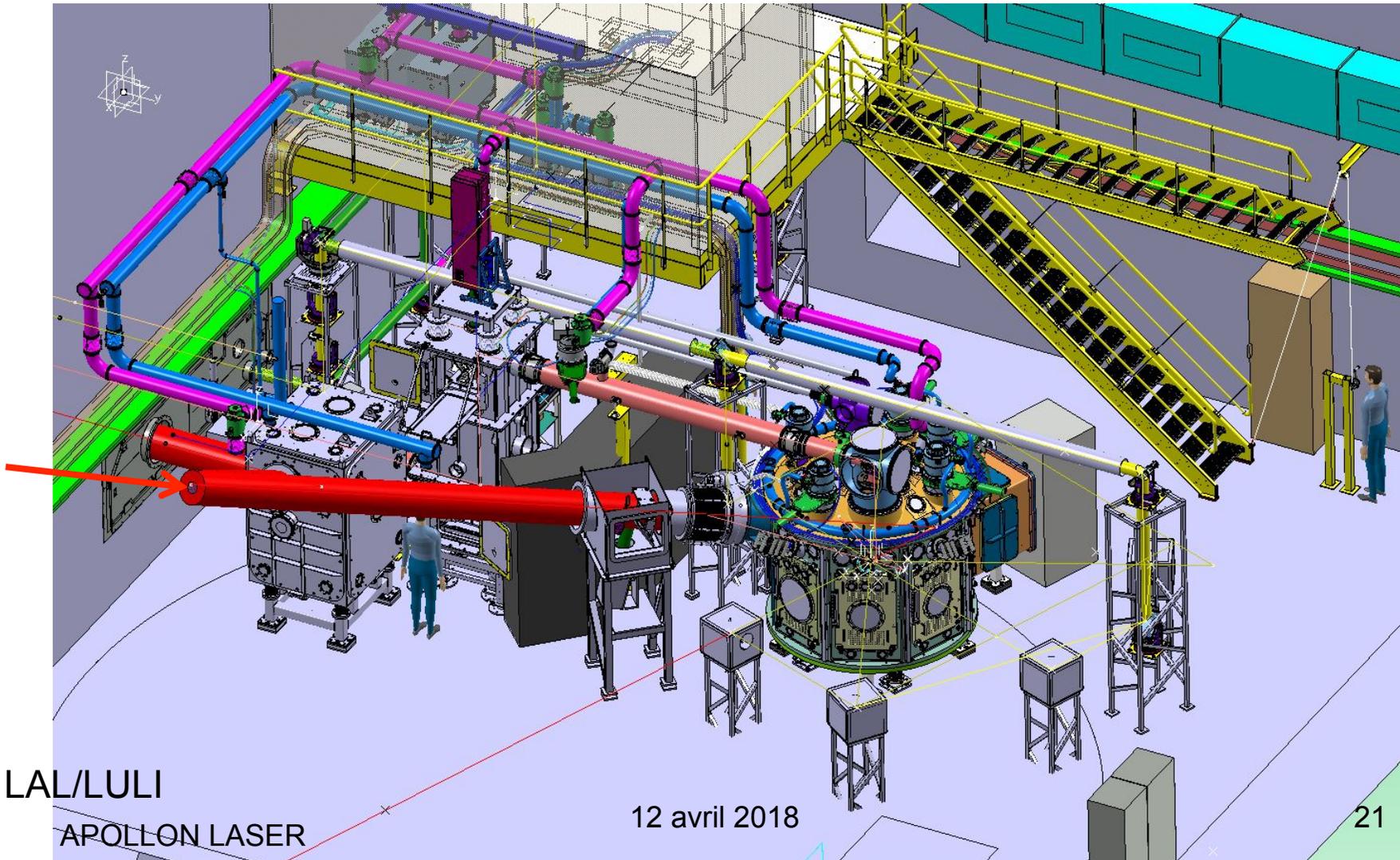
**APOLLON: Un laser PW et plus à l'Orme des merisiers**

# La salle longue focale d'APOLLON: Expériences d'accélération en double étage



12 avril 2018

# Schéma de la Salle courte focale: Vers des tests de QED et physique nucléaire De type astrophysique de laboratoire



# La recherche sur les nouvelles sources de lumière extrême

- La haute cadence, le pompé diode, la post compression, les nouveaux milieux à Gain, lasers fibrés mis en phase, la haute puissance moyenne
- Collaboration rapprochée avec les industriels des lasers proches de Paris Saclay Labos communs/CIFRE

LCF/Lidyl/Laserix

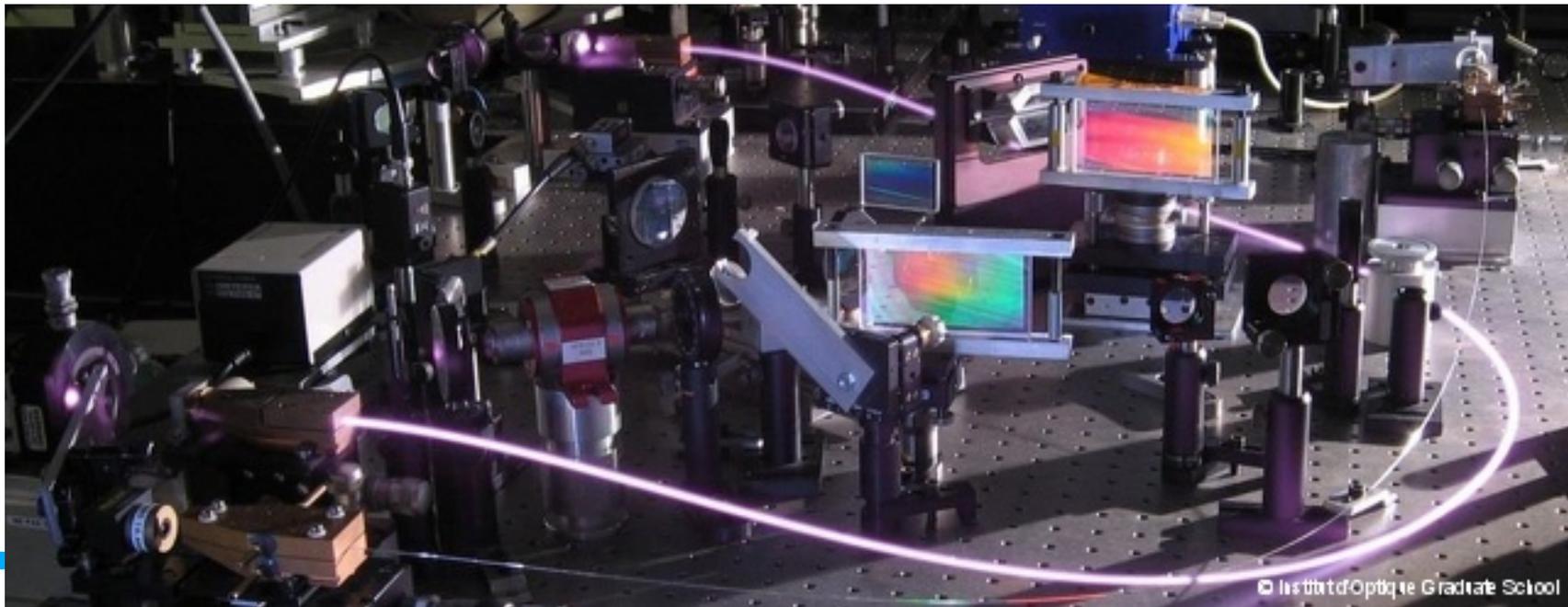


Image IOGS

# La place de Paris Saclay: 150 chercheurs



- Endroit unique au monde pour la diversité et la qualité de l'investissement dans cette thématique: Paris Saclay a joué un rôle positif dans ce domaine
- Des développements lasers les plus amont aux applications sociétales en passant Par la recherche en physique fondamentale, liens forts avec industrie
- De plus en plus de convergence avec P2I (lasers/accélérateurs, physique nucléaire, tests de QED)
- **Domaine très compétitif au niveau international**, la France doit continuer à investir Pour rester dans les pionniers du domaine, car de nouveaux acteurs arrivent et Investissent massivement

