

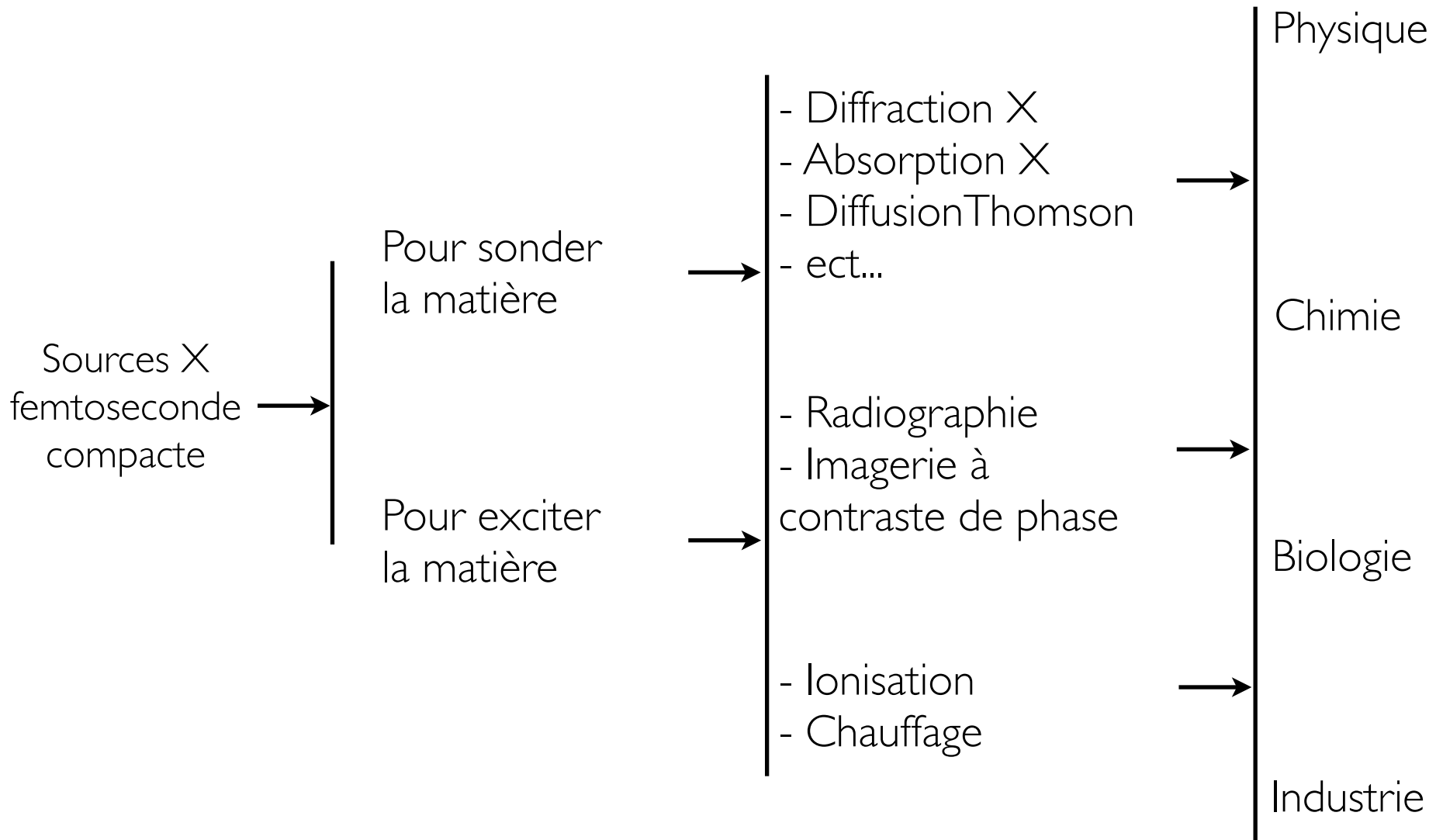


Sources X femtosecondes basées sur l'utilisation des accélérateurs laser plasma

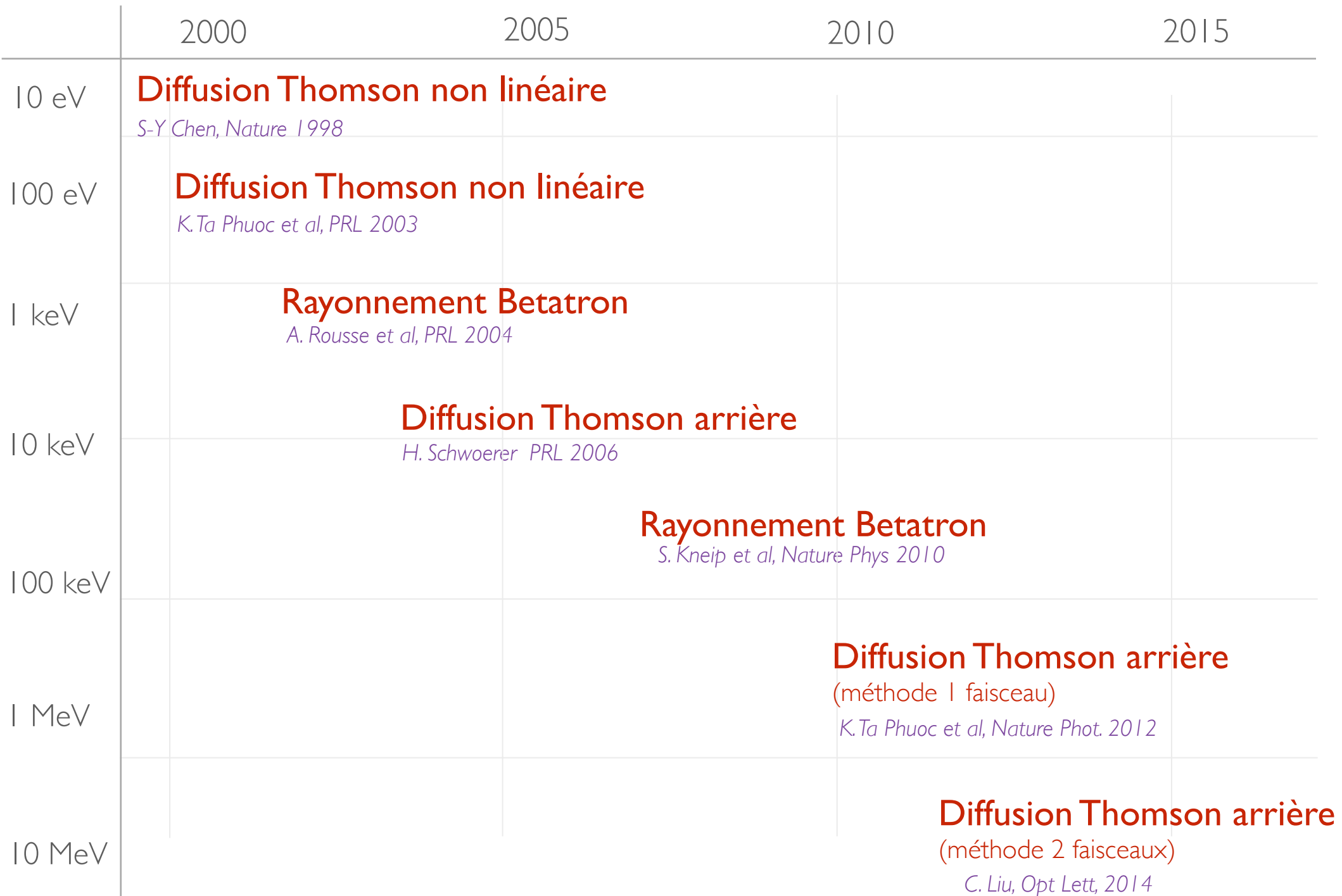
Kim TA PHUOC, Sebastien CORDE, Cedric THAURY, Andreas DOEPP, Emilien GUILLAUME, Julien GAUTIER, Victor MALKA, Antoine ROUSSE, Stephane SEBBAN, Benoit MAHIEU, Antoine DOCHE.

LOA, ENSTA ParisTech - CNRS - Ecole polytechnique - Université Paris-Saclay
PALAISEAU, France

Pourquoi développer de nouvelles sources X ?



Sources X basées sur les accélérateurs laser plasma



→ Source X Betatron (1-50 keV)

- Principe
- Caractérisation expérimentale
- Applications

→ Source Thomson arrière (Compton) (100 keV - MeV)

- Principe
- Caractérisation expérimentale
- Applications

→ Résumé, conclusion & perspectives

$$\frac{d^2 I}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{4\pi^2 c} \left| \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega[t - \vec{n} \cdot \vec{r}(t)/c]} \frac{\vec{n} \times [(\vec{n} - \vec{\beta}) \times \dot{\vec{\beta}}]}{(1 - \vec{\beta} \cdot \vec{n})^2} dt \right|^2$$

Vitesse Acceleration

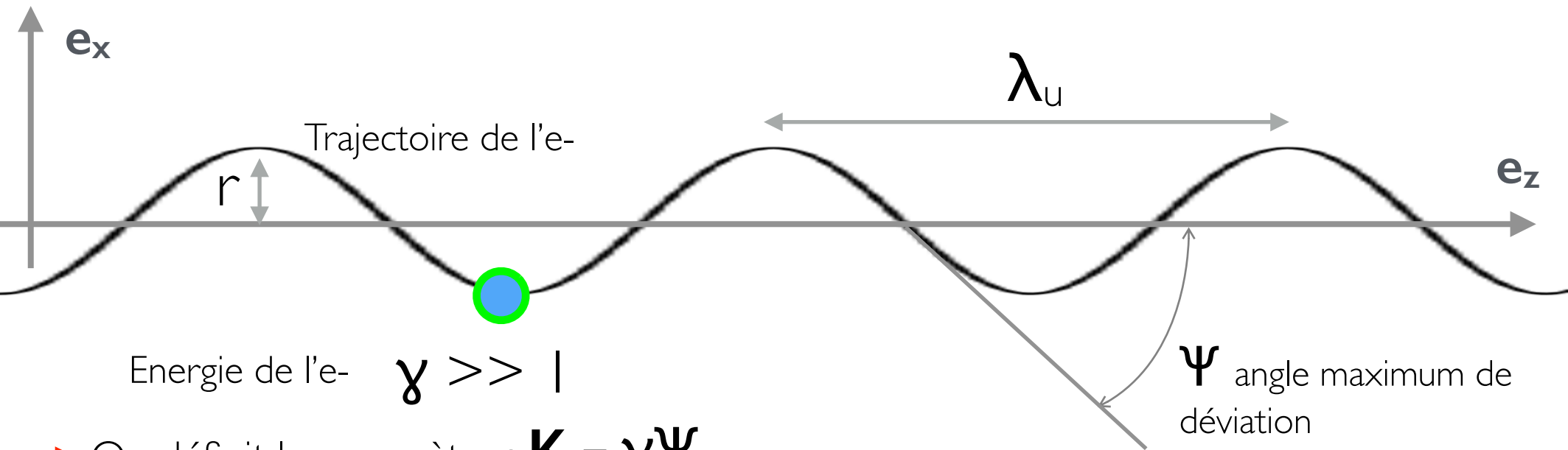
Energie rayonnée

- L'accélération transverse est nécessaire pour produire efficacement du rayonnement
- Un électron relativiste émet des ordres de grandeur plus de rayonnement qu'un électron non relativiste
- Le rayonnement est émis dans la direction de la vitesse de l'électron.
- Si le mouvement de l'électron est oscillant à ω_e , le rayonnement émis sera à la fréquence $\omega \sim 2\gamma^2 \omega_e$ et ses harmoniques. Du rayonnement X peut être émis en faisant osciller des électrons à une fréquence bien inférieure à la fréquence X.

Rayonnement d'électrons relativistes



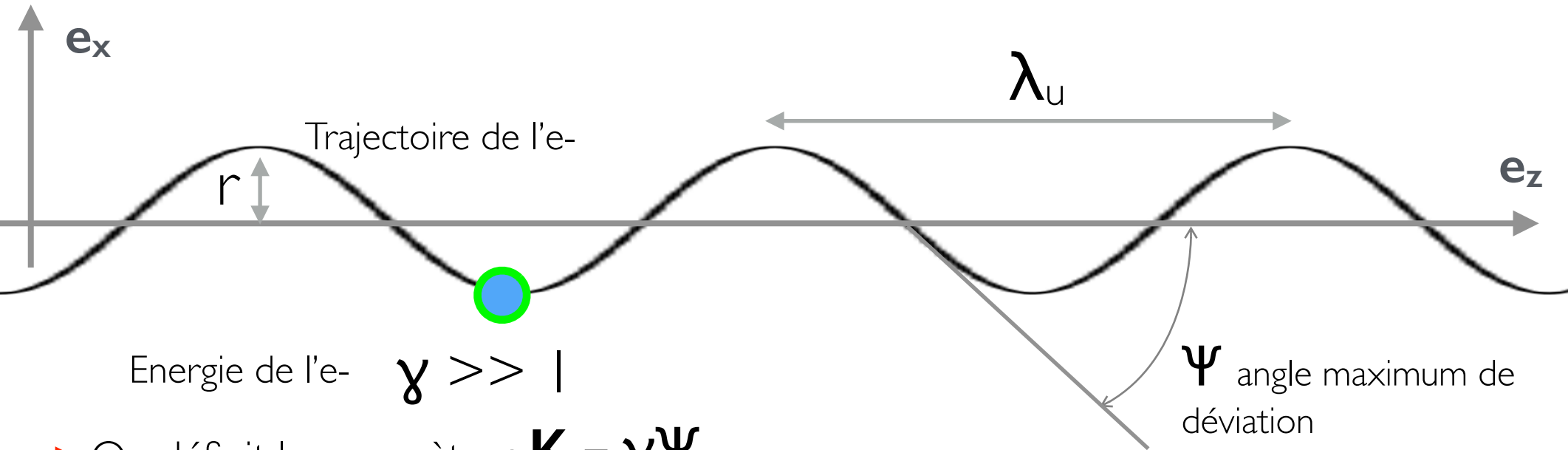
→ Nous avons besoin d'électrons relativistes oscillants



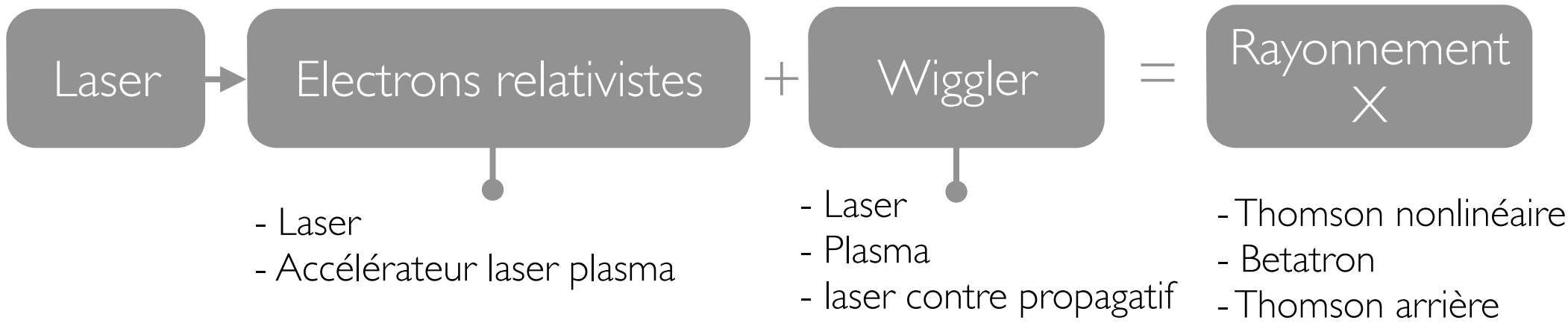
→ On définit le paramètre : $\mathbf{K} = \gamma\Psi$

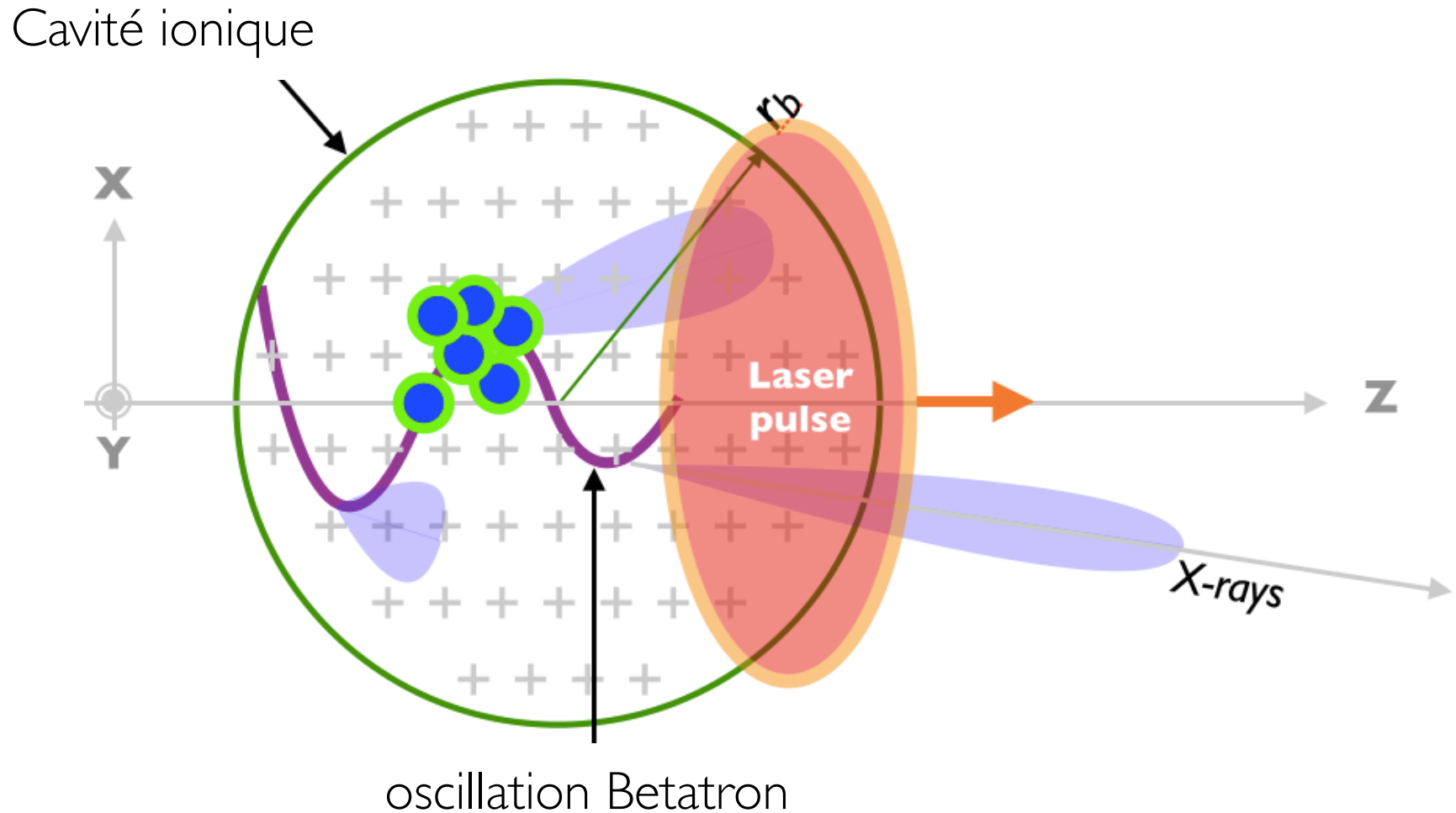
Rayonnement d'électrons relativistes

→ Nous avons besoin d'électrons relativistes oscillants

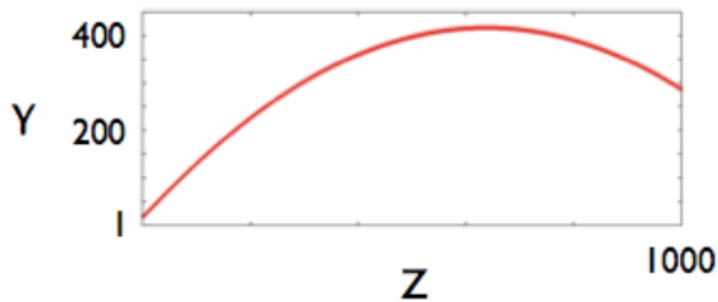
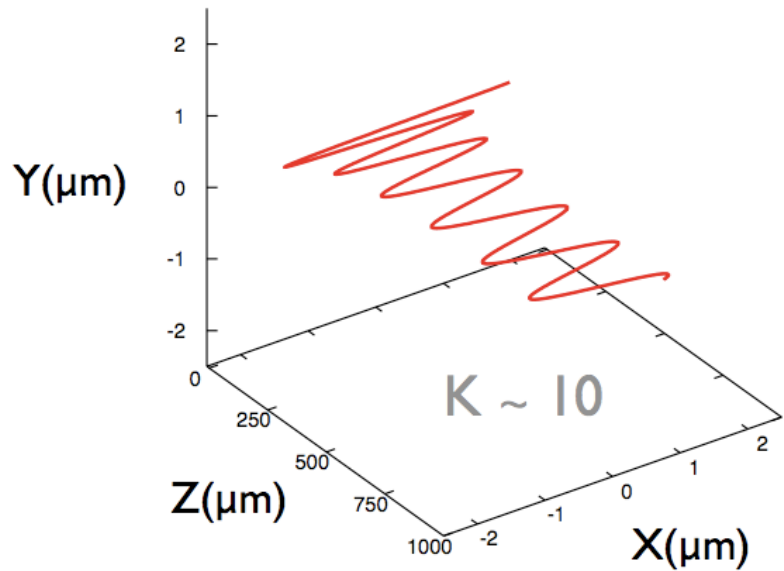


→ On définit le paramètre : $\mathbf{K} = \gamma\Psi$





- Dans ce régime d'interaction les électrons sont accélérés et oscillent dans une cavité ionique créée dans le sillage d'une impulsion laser intense.
- Pour calculer le rayonnement il faut d'abord calculer la trajectoire de l'électron



$$\frac{dp}{dt} = \mathbf{F}_{\parallel} + \mathbf{F}_{\perp} = -\frac{m\omega_p^2}{2}\zeta\hat{z} - \frac{m\omega_p^2}{2}(x\hat{x} + y\hat{y})$$

acceleration \uparrow \uparrow oscillation

La période spatiale du mouvement est:

$$\lambda_u(t) = \sqrt{2\gamma(t)}\lambda_p,$$

$$\lambda_u[\mu\text{m}] = 4.72 \times 10^{10} \sqrt{\gamma/n_e[\text{cm}^{-3}]},$$

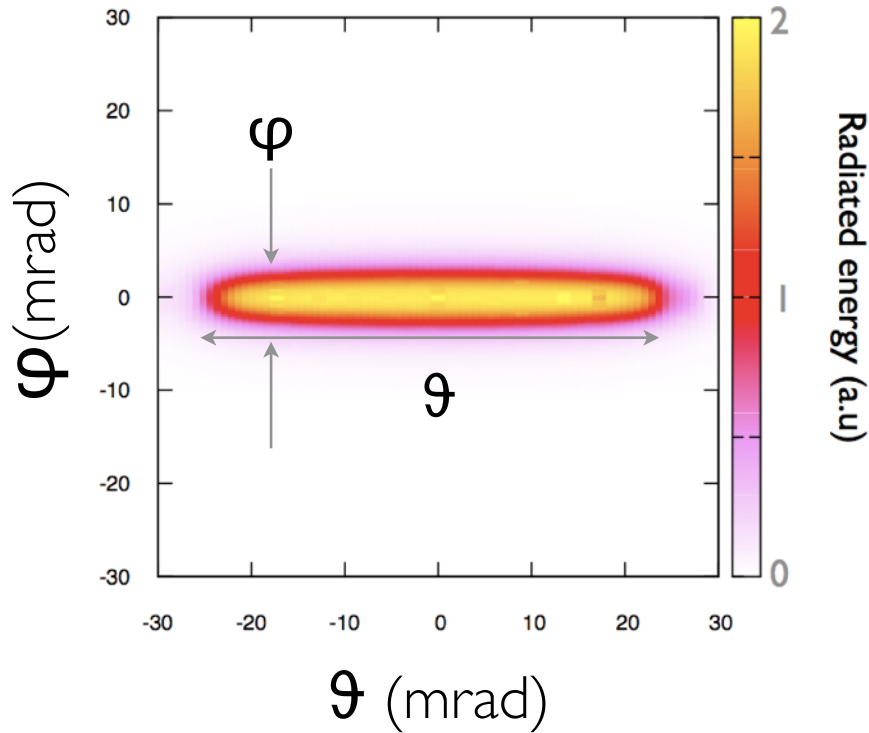
$\lambda_u \sim 100\text{-}200$ microns,

et le paramètre K vaut:

$$K(t) = r_{\beta}(t)k_p\sqrt{\gamma(t)/2},$$

$$K = 1.33 \times 10^{-10} \sqrt{\gamma n_e[\text{cm}^{-3}]} r_{\beta}$$

$K \sim 10$



→ Distribution spatiale

$$\vartheta = K/\gamma \quad \varphi = 1/\gamma$$

~30 mrad

→ Spectre, énergie critique

$$\hbar\omega_c[\text{eV}] = 5.24 \times 10^{-21} \gamma^2 n_e [\text{cm}^{-3}] r_\beta [\mu\text{m}]$$

~9 keV

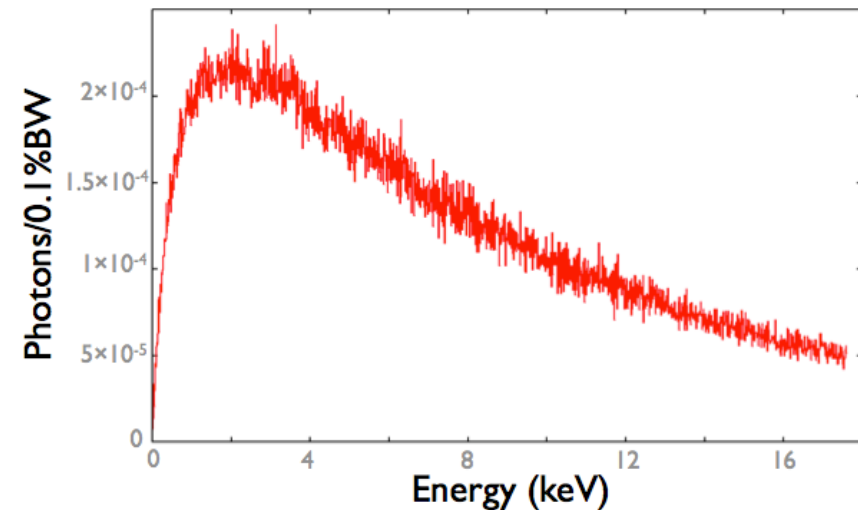
→ Nombre de photons/ electron

$$N_\gamma = 3.31 \times 10^{-2} K \quad \text{for } K \gg 1.$$

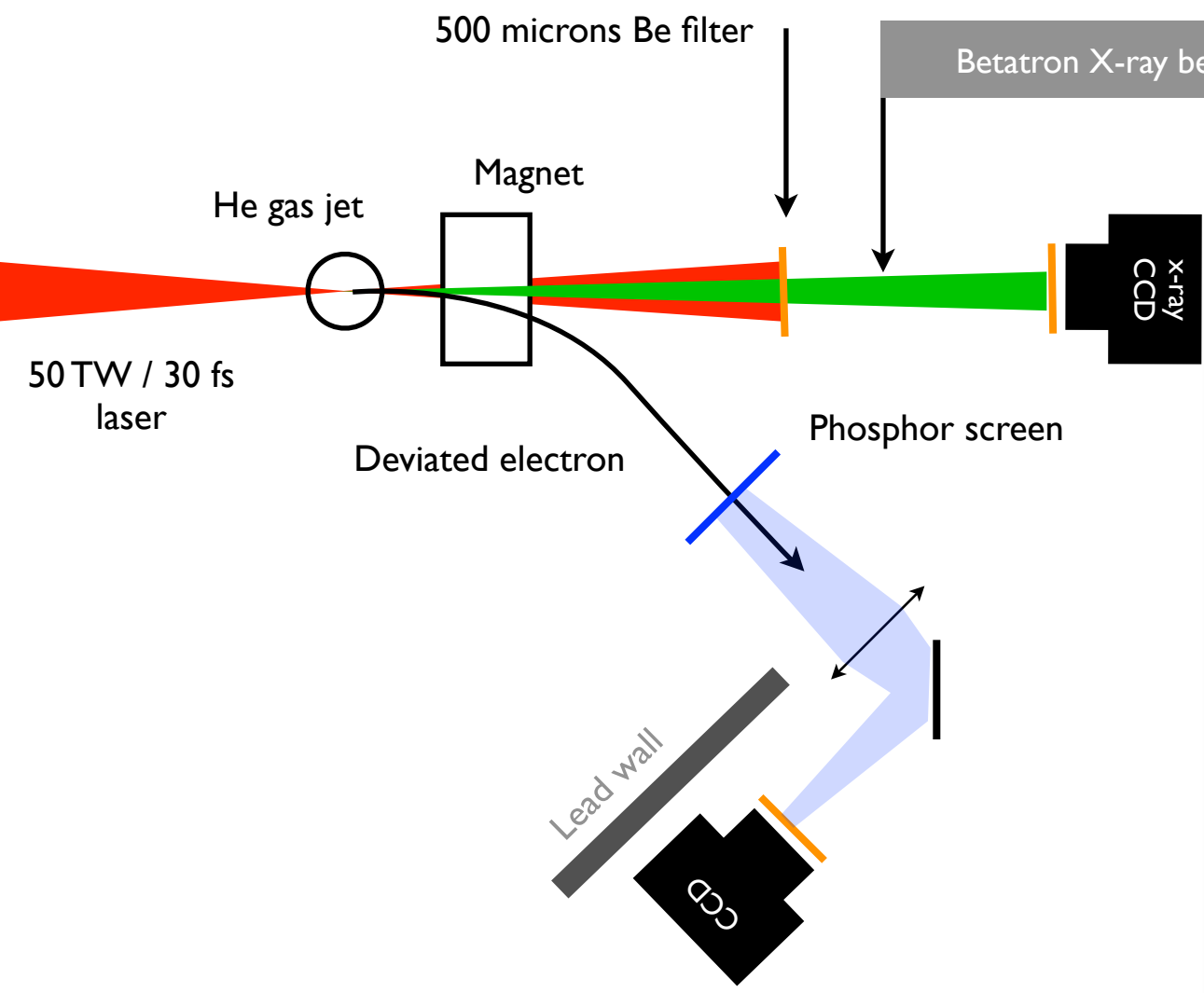
~0.3 photon / electron

→ La taille de source est de l'ordre du micron

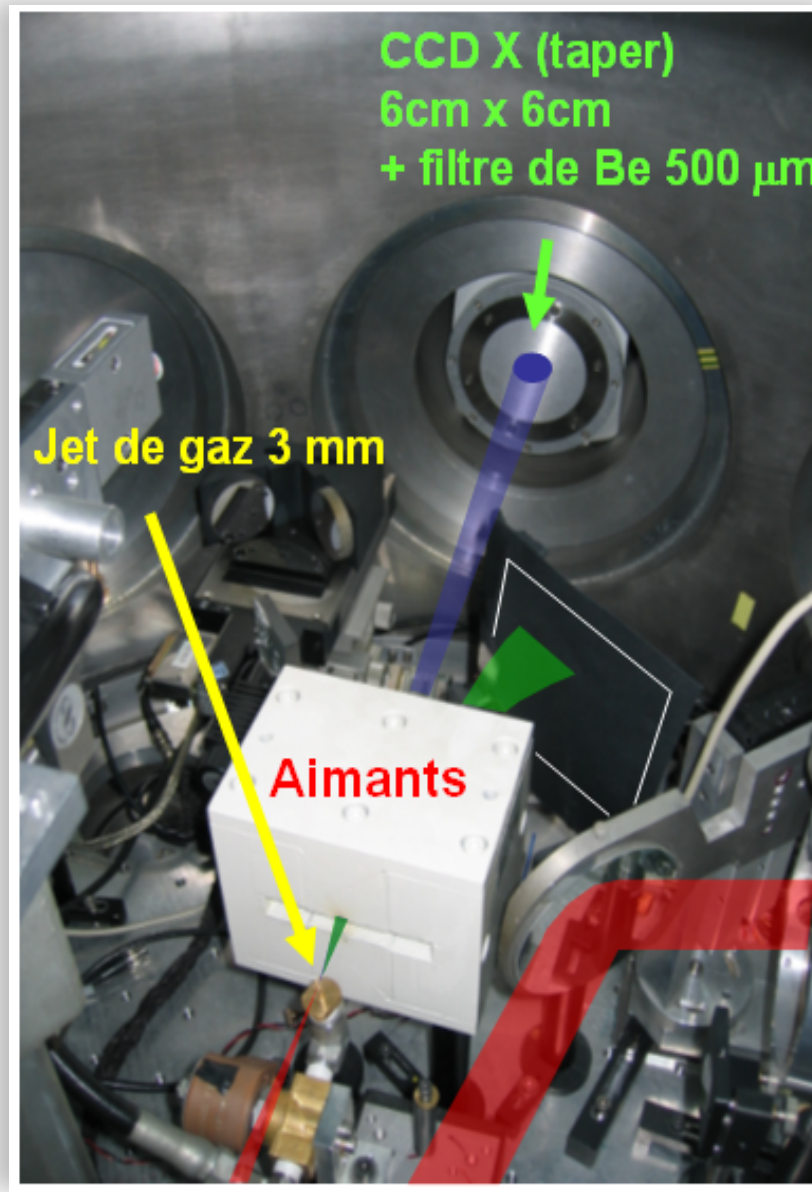
→ La durée est de quelques femtosecondes



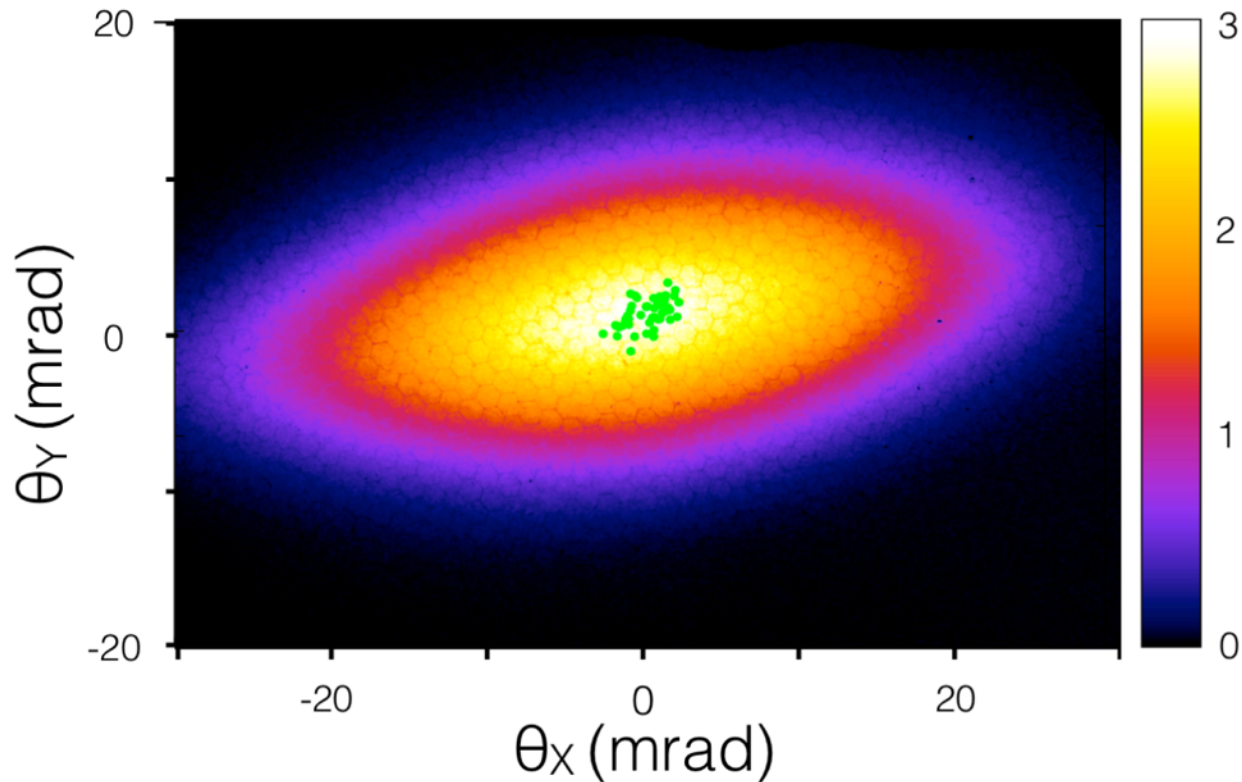
Expérience



$$a_0 = 2$$
$$n_e = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

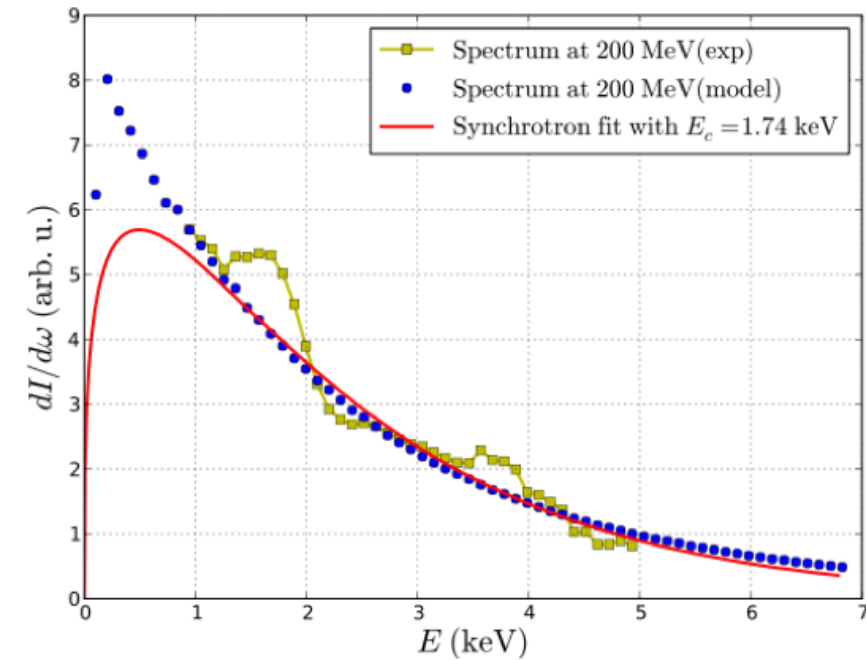


Profil du faisceau de rayonnement X

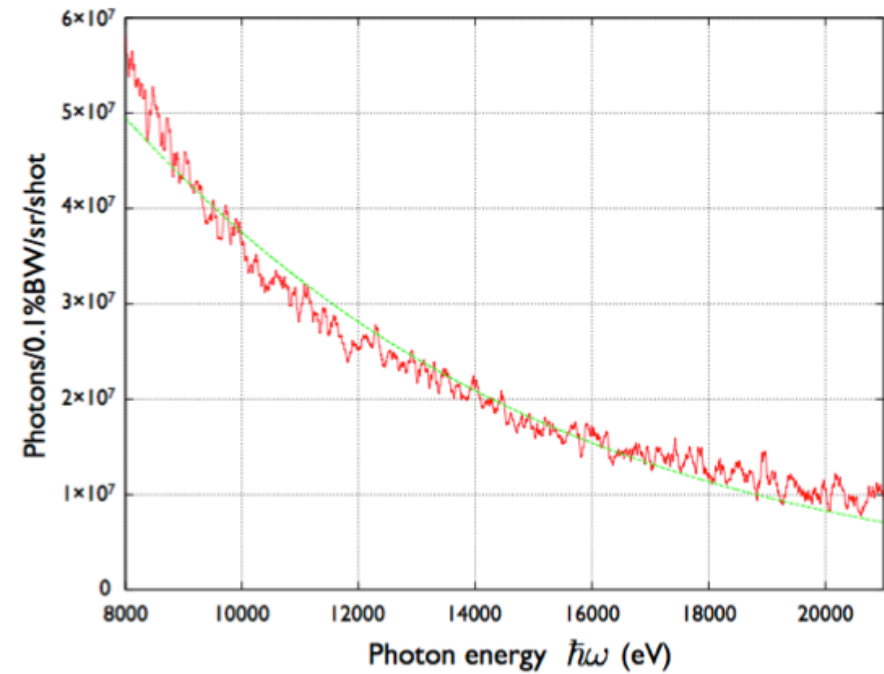


- Divergence 20 - 50 mrad
- Stabilité de pointé de l'ordre de 10% du diamètre du faisceau
- Forme elliptique du faisceau toujours identique

50 TW



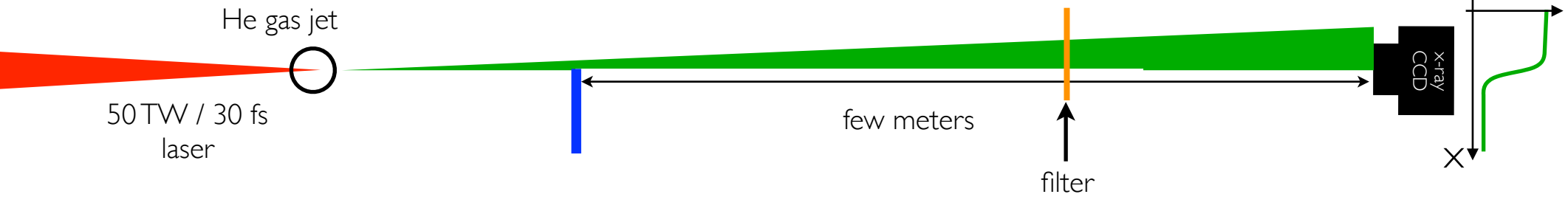
100 TW



→ Energie critique de quelques keV à quelques dizaines de keV

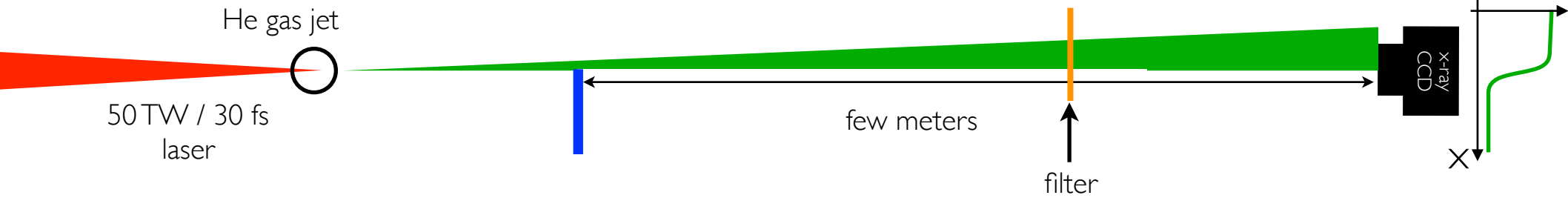
→ le flux est de l'ordre de 10^{8-9} photons / tir

→ La taille de source est un paramètre déterminant pour les applications



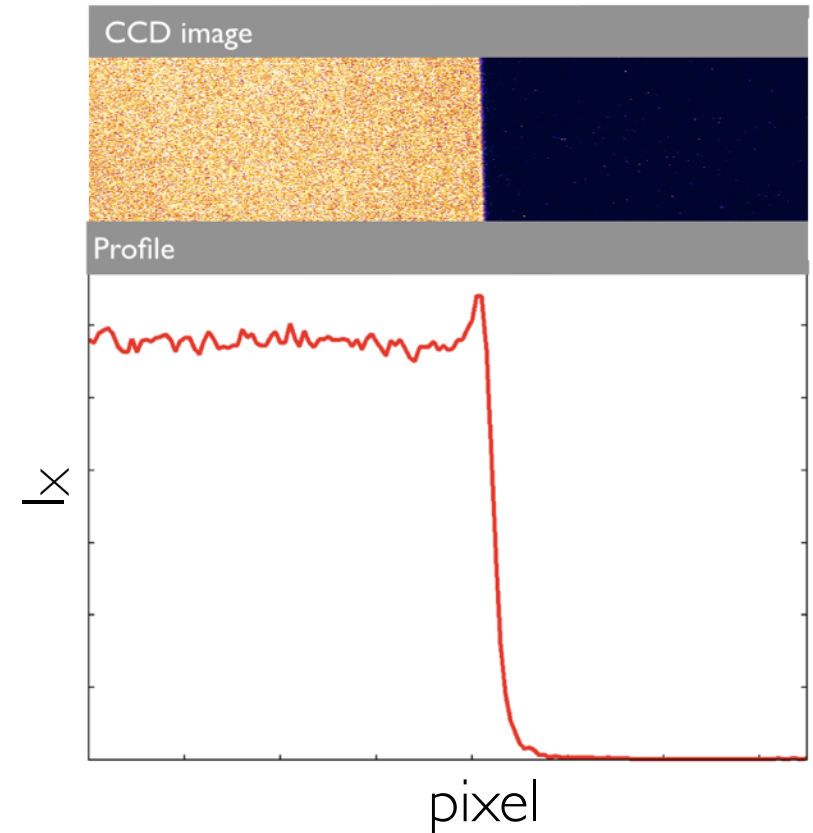
Taille de source

→ La taille de source est un paramètre déterminant pour les applications

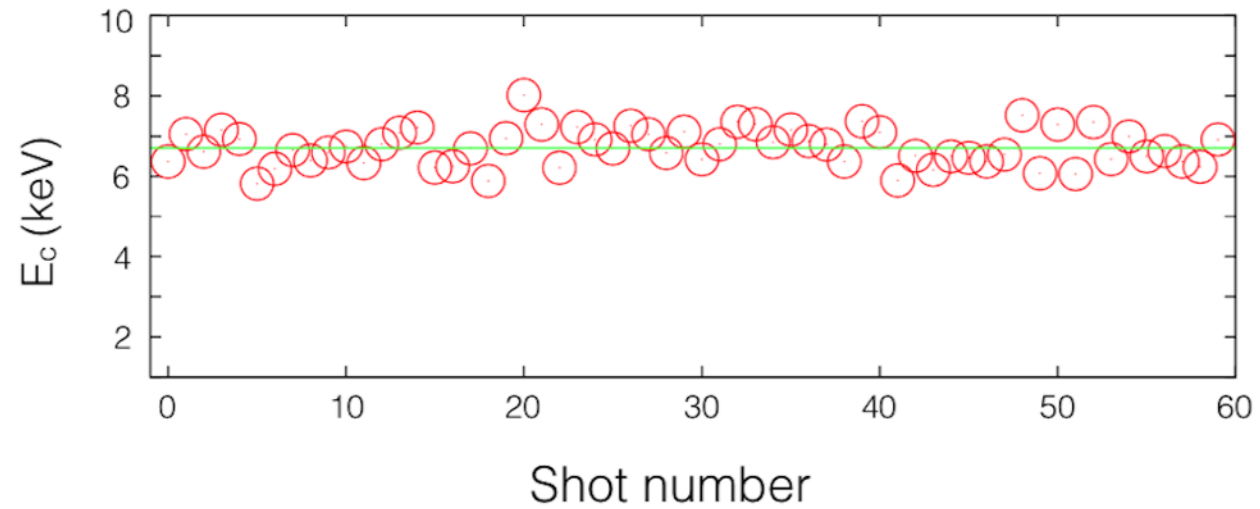


→ La taille de source mesurée est de l'ordre de 1-2 microns

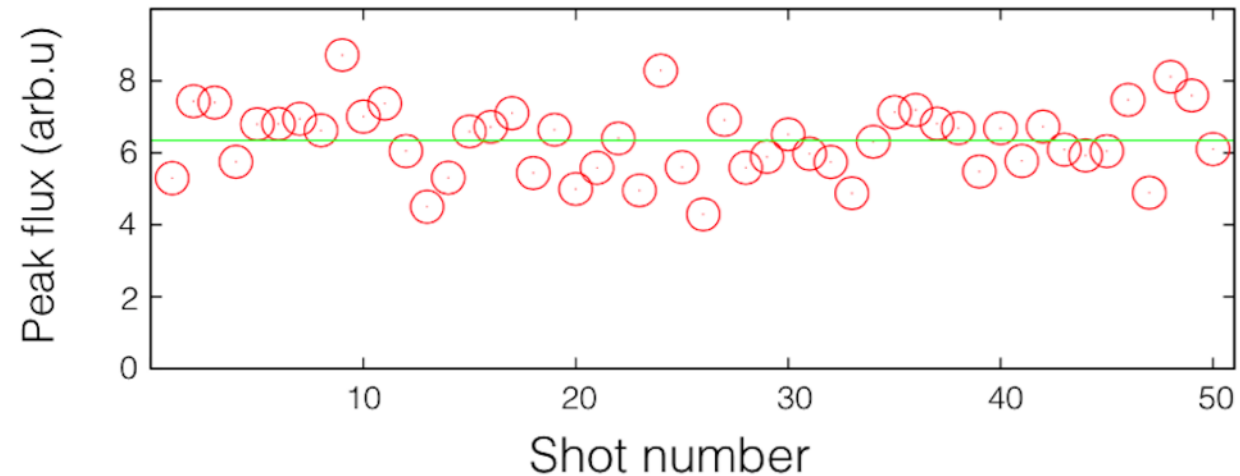
→ La mesure est limitée par la résolution



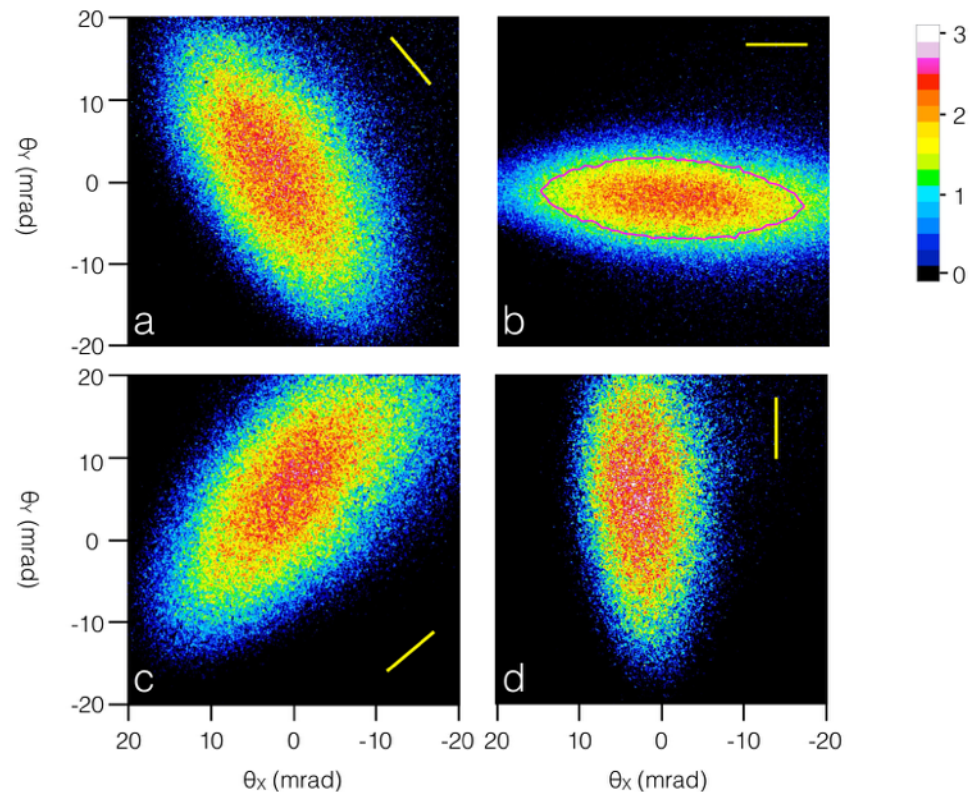
- La stabilité en énergie critique (écart type) est de l'ordre de 10% de l'énergie moyenne



- La stabilité du flux (écart type) est de l'ordre de 15% du flux moyen



→ Le profil du faisceau de rayonnement est elliptique. L'orientation de l'ellipse dépend de l'orientation de la polarisation du laser.



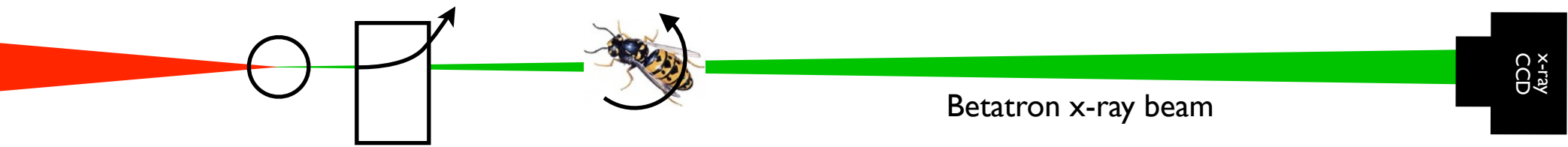
→ Les électrons oscillent essentiellement dans le plan de polarisation du laser. Le rayonnement Betatron est polarisé.

→ Le degré de polarisation est de l'ordre de 80%

→ La polarisation peut être ajustée en tournant la polarisation du laser

- 10^5 photons/tirs/0.1% BW @ 1 keV
- 10^{8-9} photons/tir
- Divergence: 10's mrad
- Durée: < 10 fs
- Spectre large: 1-50 keV
- Taille de source: 1- 2 microns

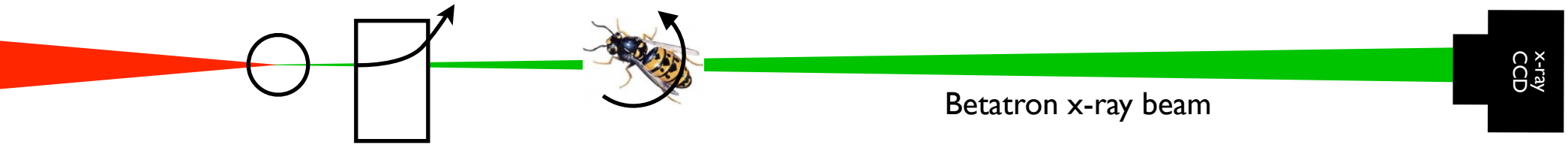
Simple à produire et à utiliser pour les applications



→ Le rayonnement Betatron a des propriétés intéressantes pour cette application

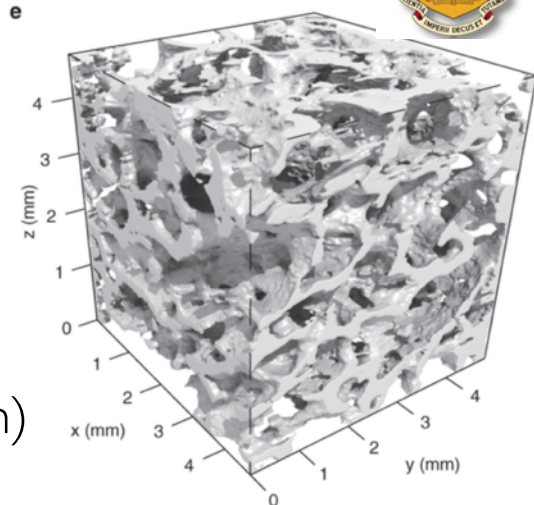
- Haute brillance (10^{20} ph/s/mm²/mrad²/0.1%bw @1 keV)
- Taille de source de l'ordre de 1 micron
- Longueur de cohérence de quelques microns à 1 m et 5 keV

Application: Radiographie à contraste de phase

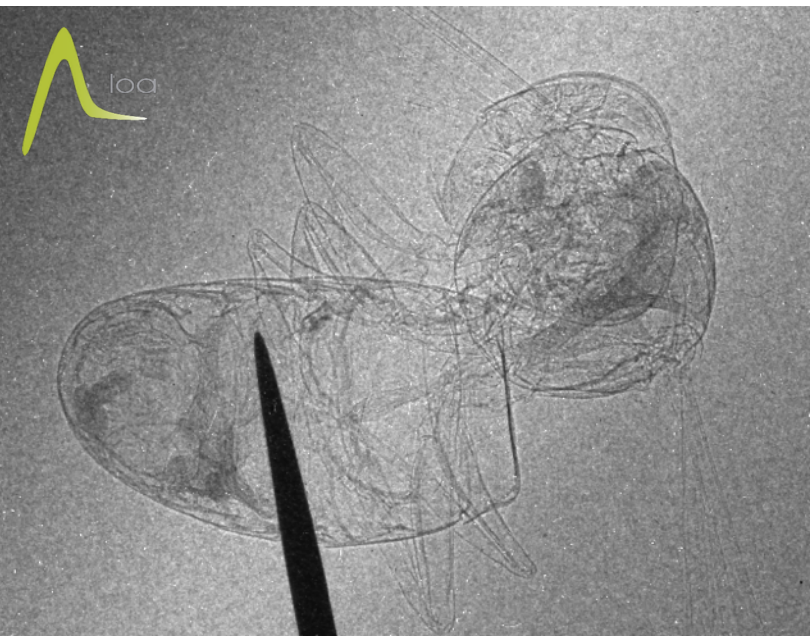


→ Le rayonnement Betatron a des propriétés intéressantes pour cette application

- Haute brillance (10^{20} ph/s/mm²/mrad²/0.1%bw @1 keV)
- Taille de source de l'ordre de 1 micron
- Longueur de cohérence de quelques microns à 1 m et 5 keV

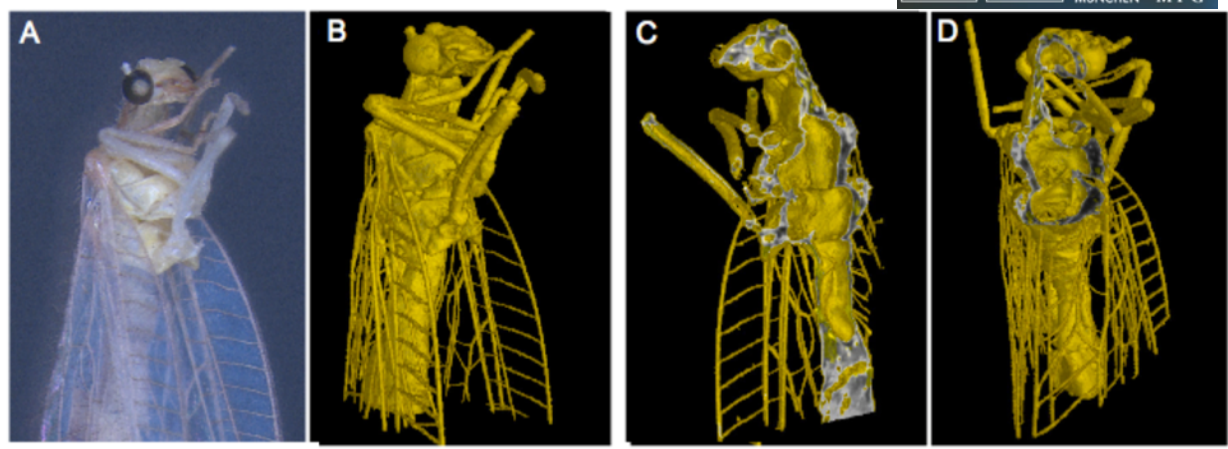


Radiograph of a bee (Phase contrast)

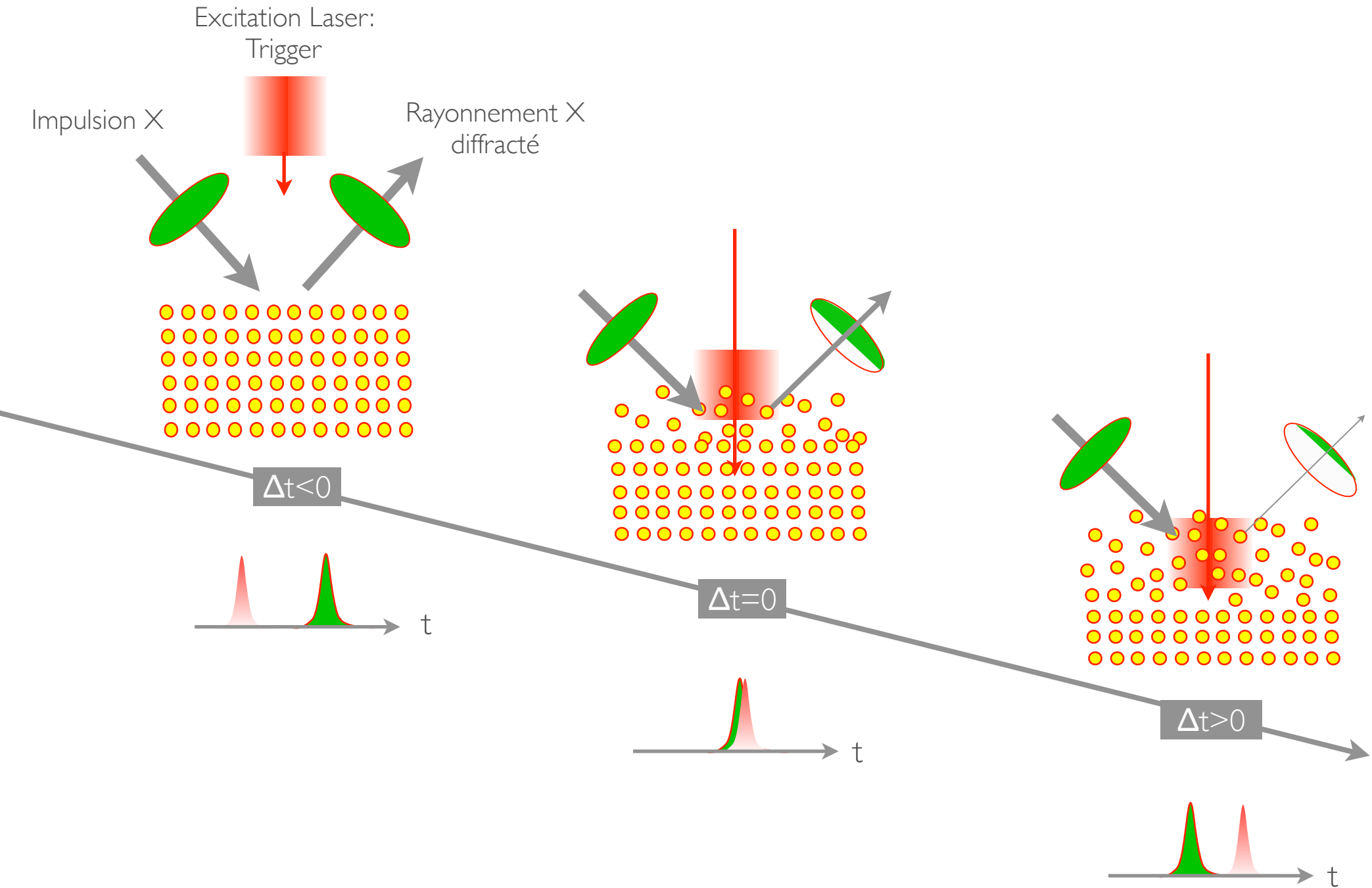


Bone tomography (contrast absorption)

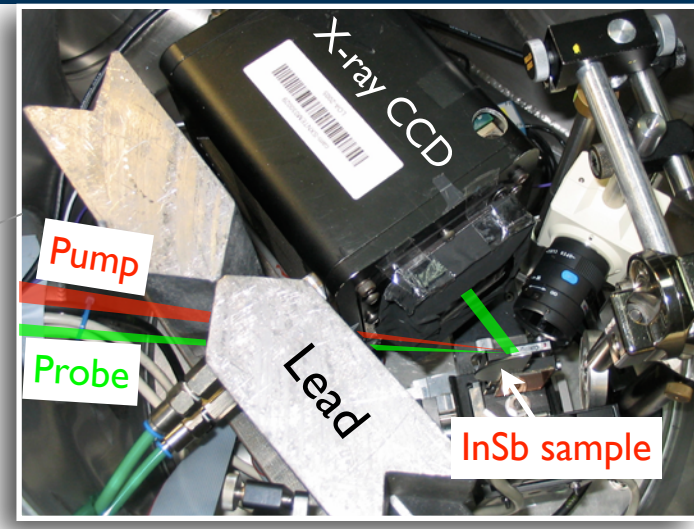
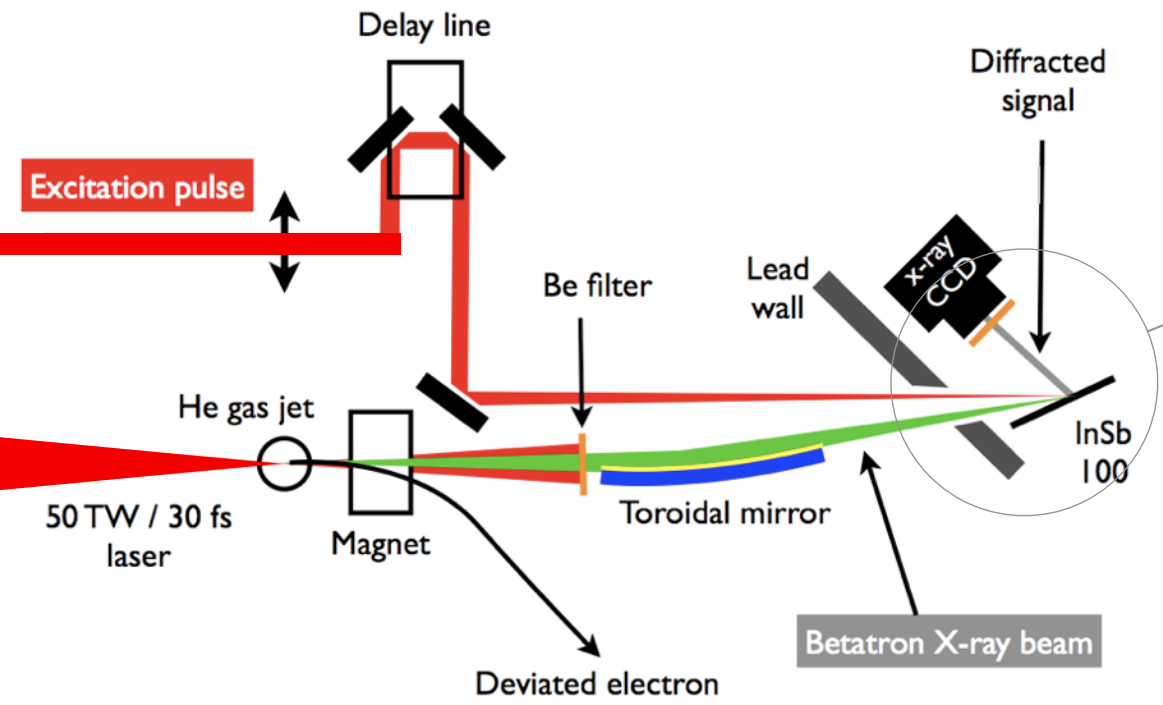
Tomography of a fly (Phase contrast)



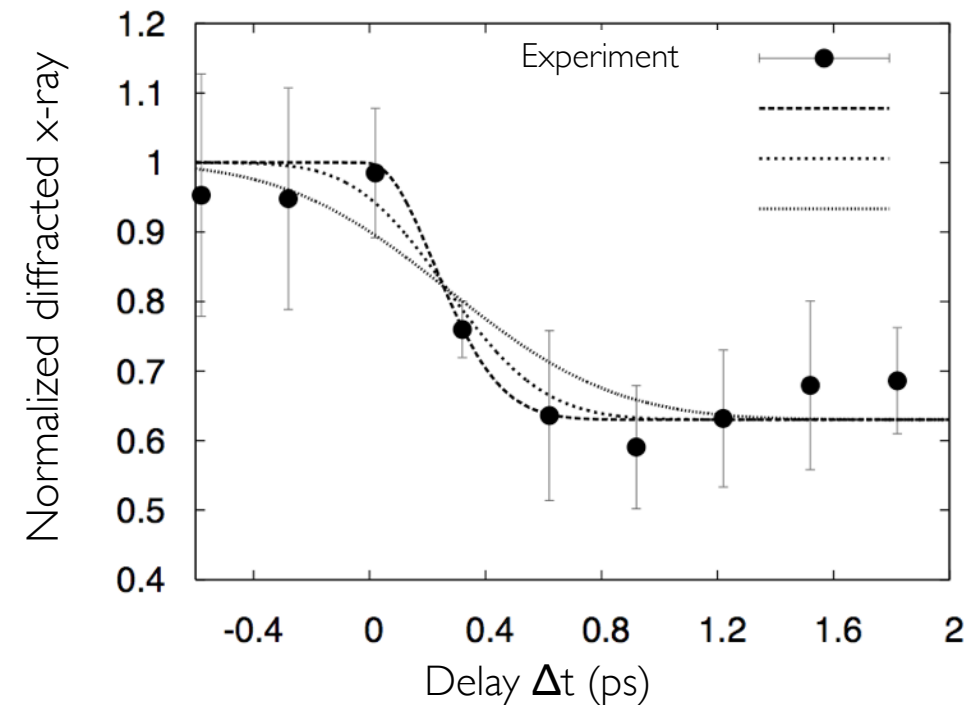
Application: diffraction X femtoseconde



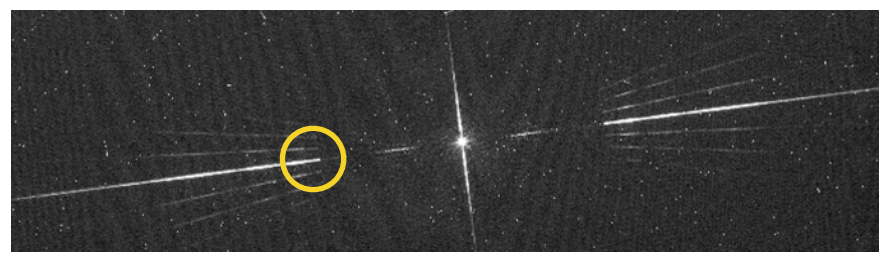
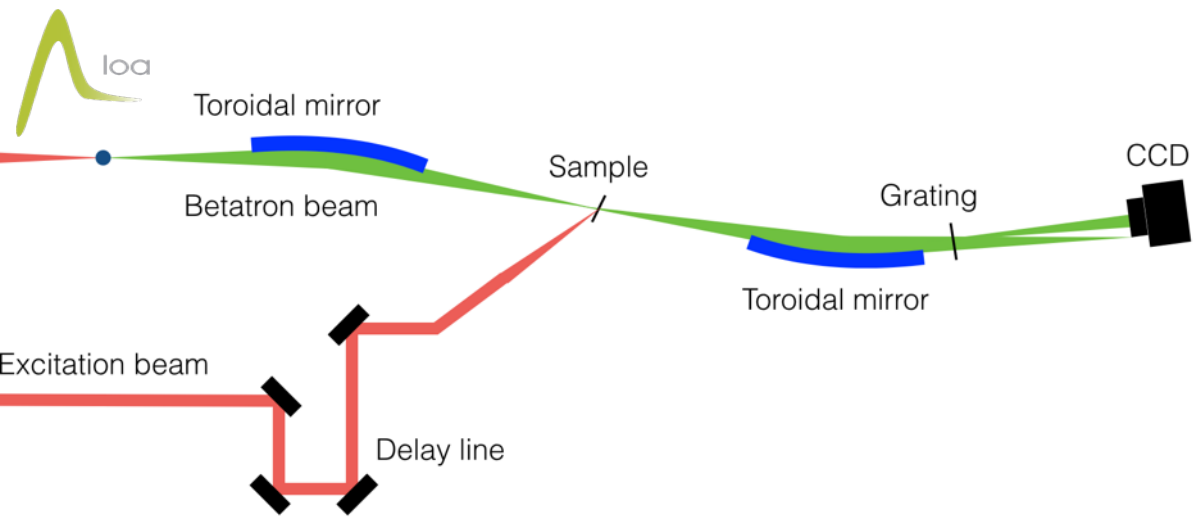
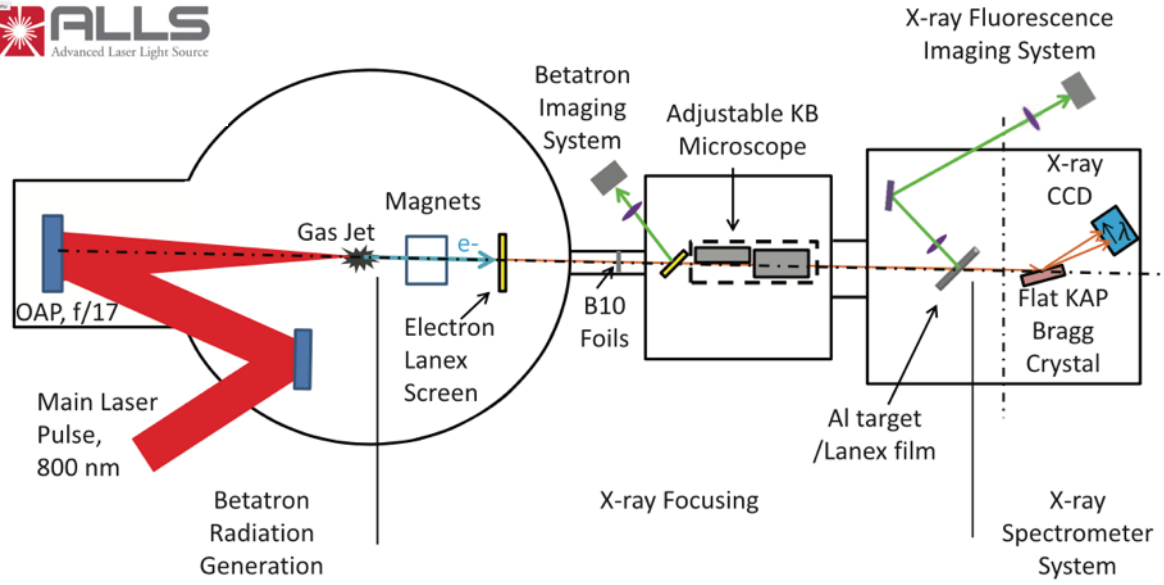
Application: diffraction X femtoseconde



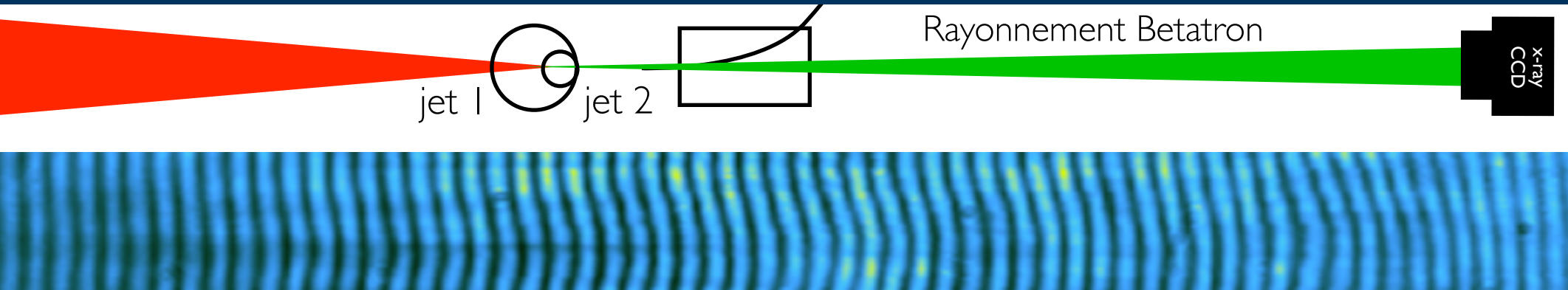
→ Nous pouvons mesurer une transition de phase (ordre/désordre) avec une résolution de quelques dizaines de femtosecondes.



Application: Absorption X femtoseconde

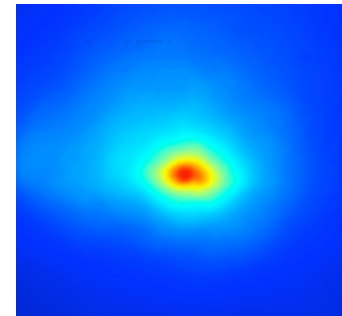


Perspectives: Découplage des parties accélérateur et wiggler

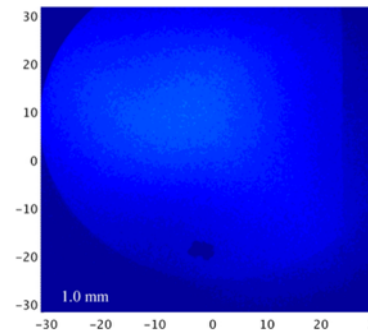


- Ajuster l'accélérateur pour produire des faisceaux d'électrons de bonne qualité
- Contrôle indépendant ALP et wiggler

ALP

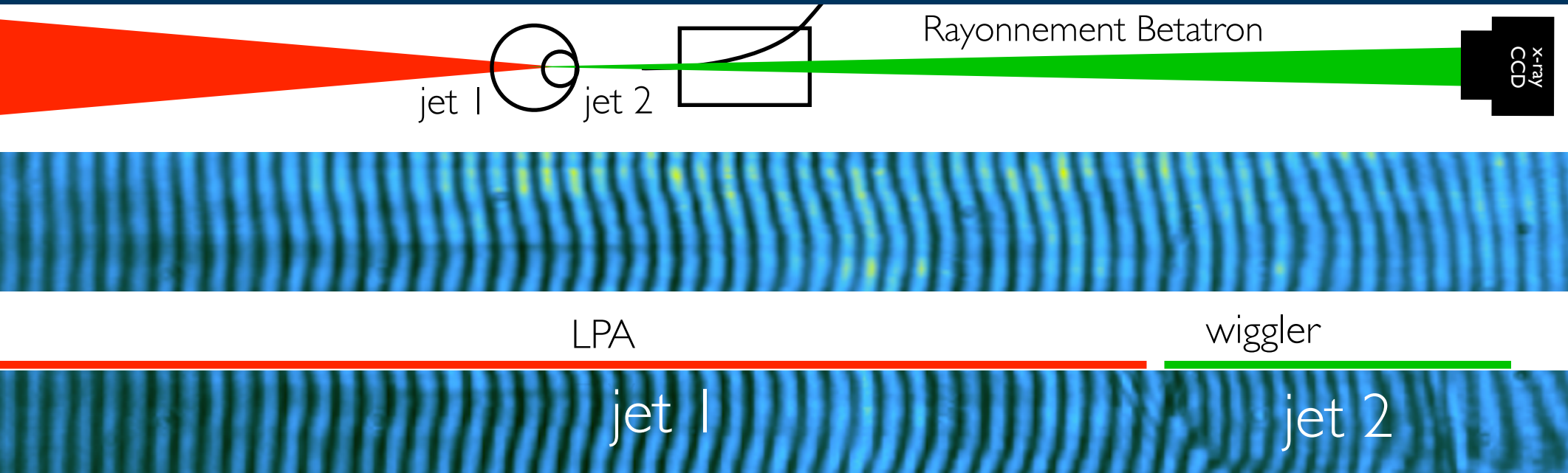


e-beam

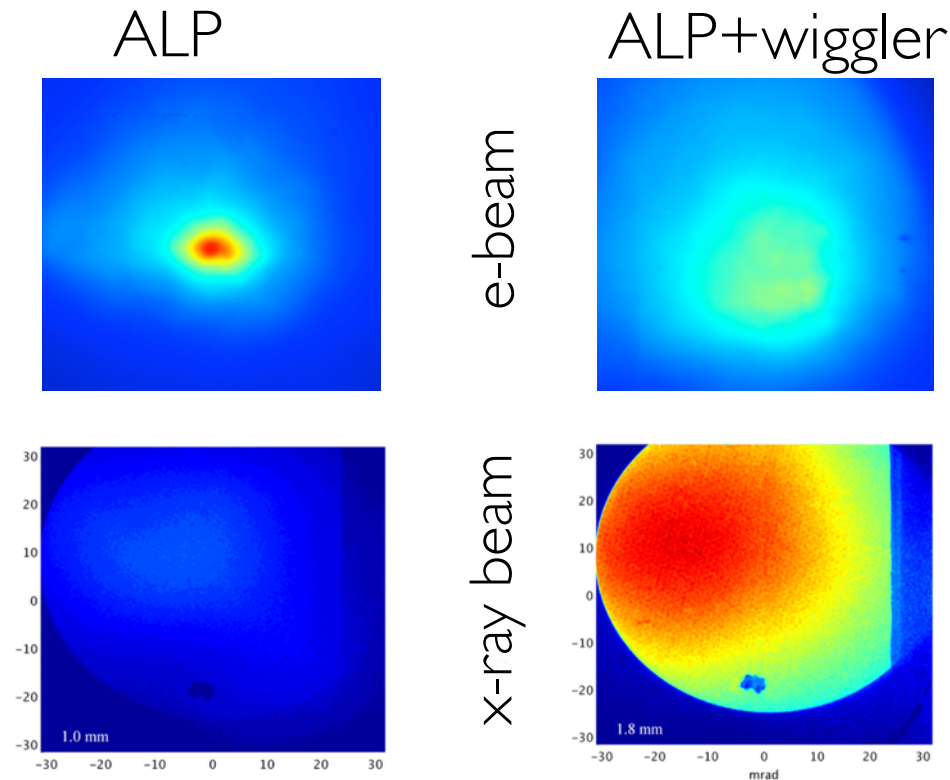


x-ray beam

Perspectives: Découplage des parties accélérateur et wiggler



- Ajuster l'accélérateur pour produire des faisceaux d'électrons de bonne qualité
- Contrôle indépendant ALP et wiggler



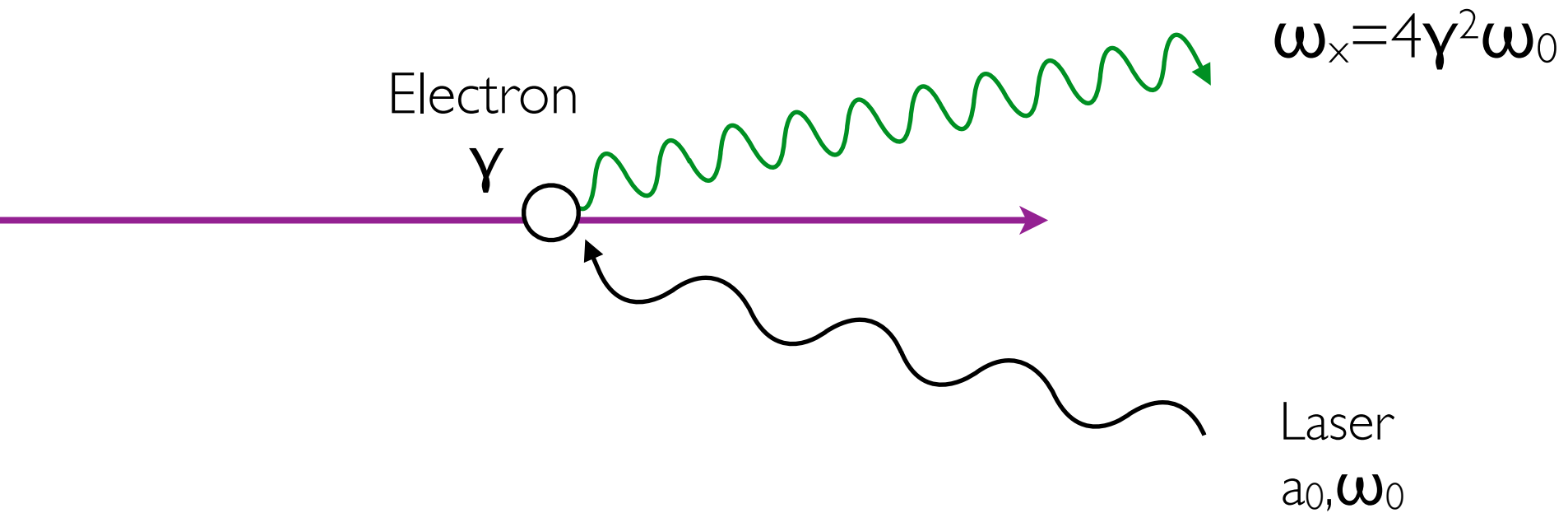
→ Source X Betatron (1-50 keV)

- Principe
- Caractérisation expérimentale
- Applications

→ Source Thomson arrière (Compton) (100 keV - MeV)

- Principe
- Caractérisation expérimentale
- Applications

→ Résumé, conclusion & perspectives



→ Des électrons d'énergie modeste émettent du rayonnement énergétique

20 MeV → 10 keV

65 MeV → 100 keV

200 MeV → 1000 keV

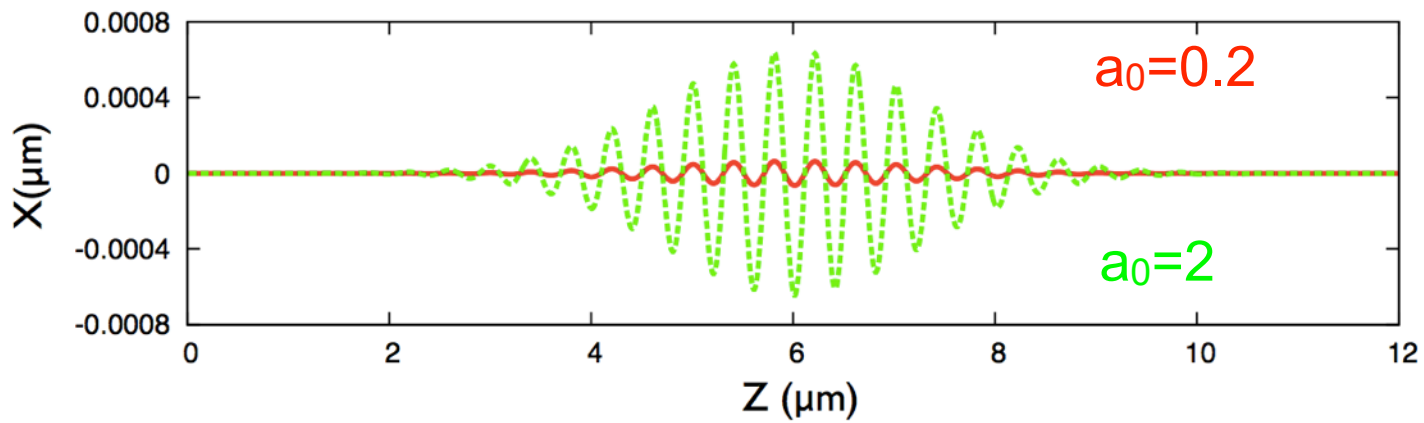
Diffusion Thomson arrière: Principe



Electrons orbits

$$\gamma \approx 200$$

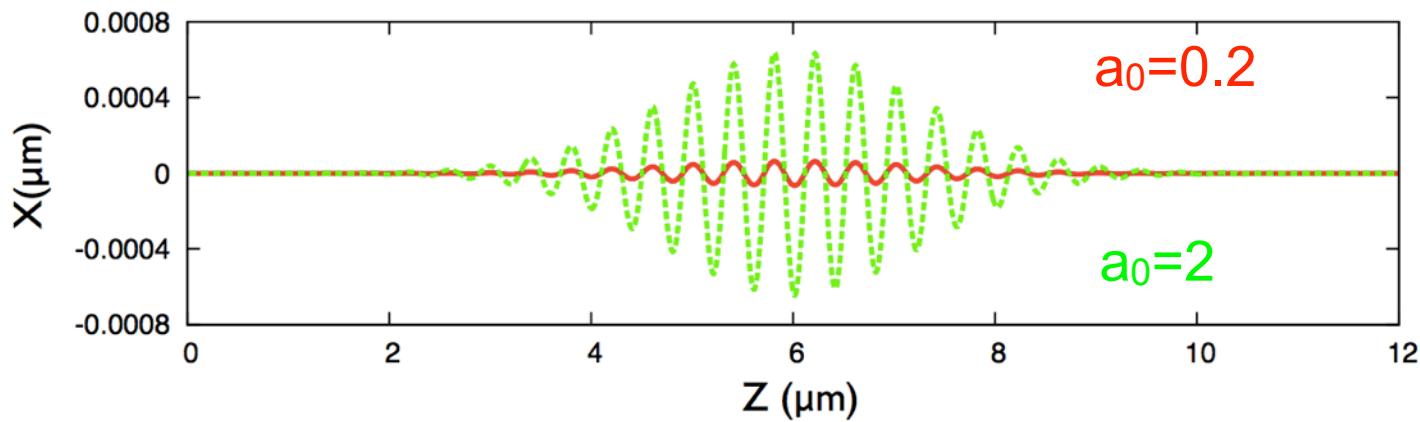
$$\lambda_u \approx 1 \mu\text{m}$$



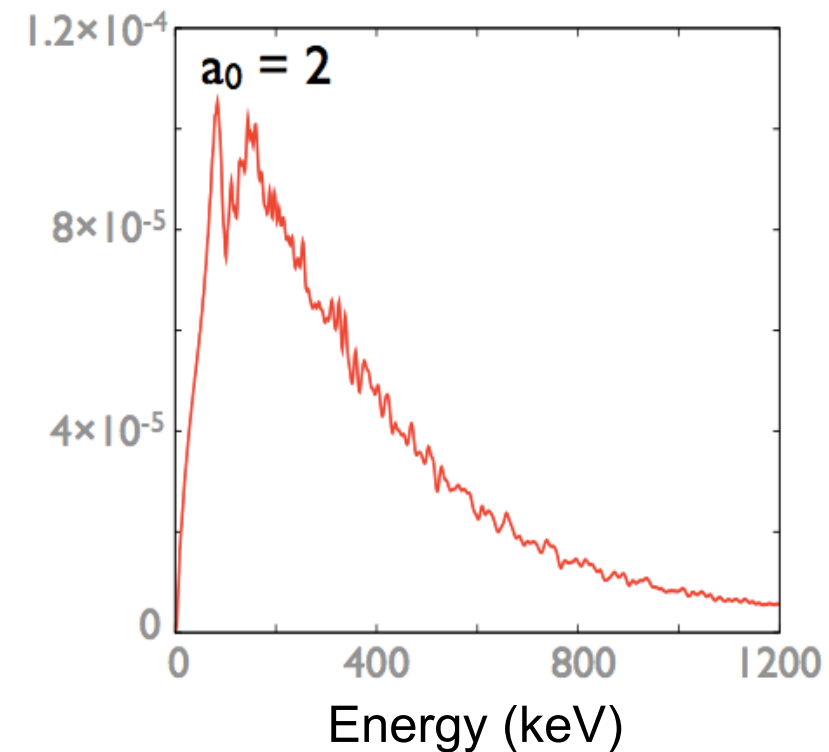
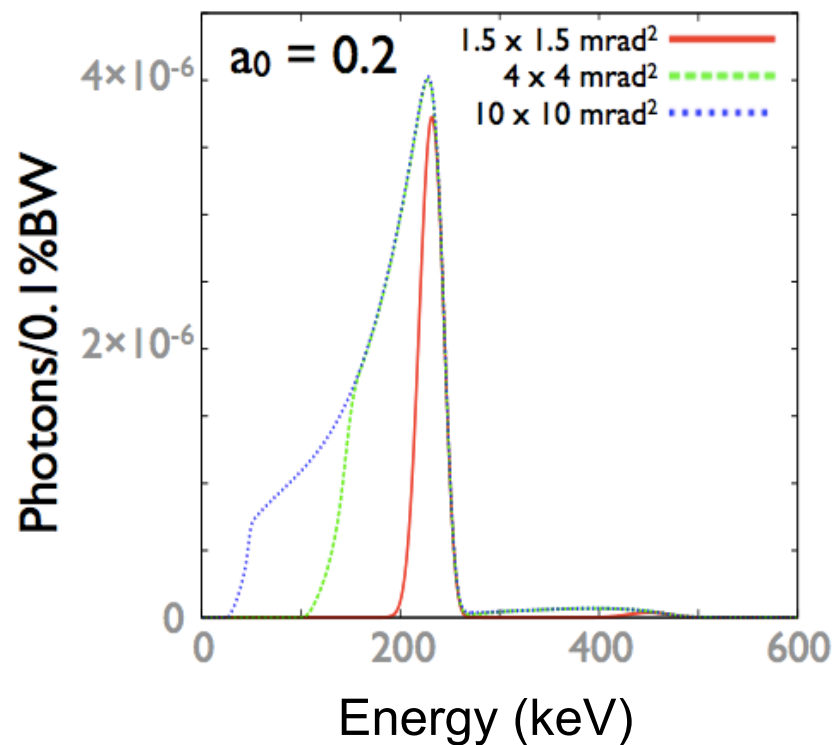
Trajectoire

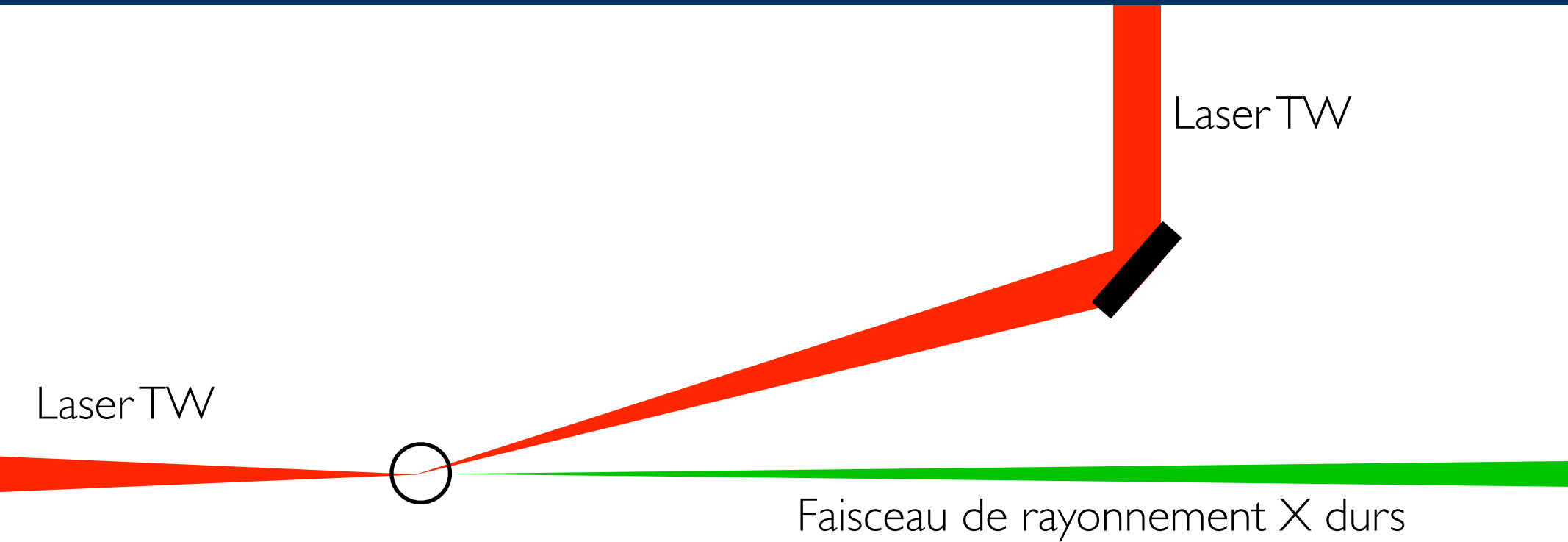
$$\gamma \approx 200$$

$$\lambda_u \approx 1 \mu\text{m}$$

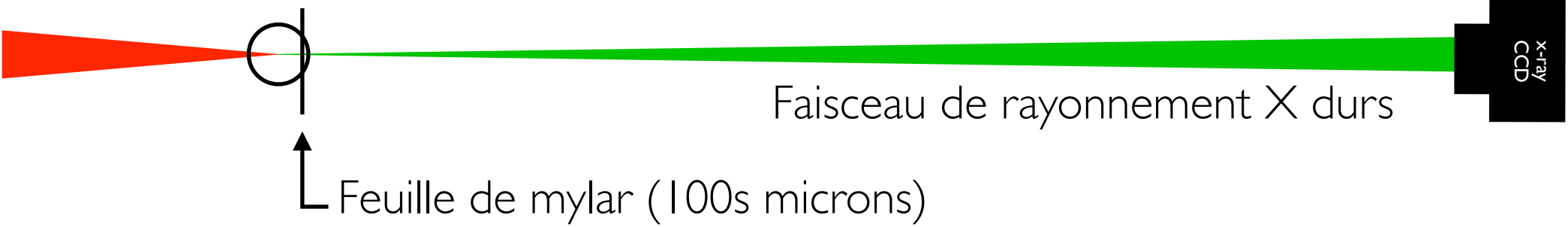


Spectre

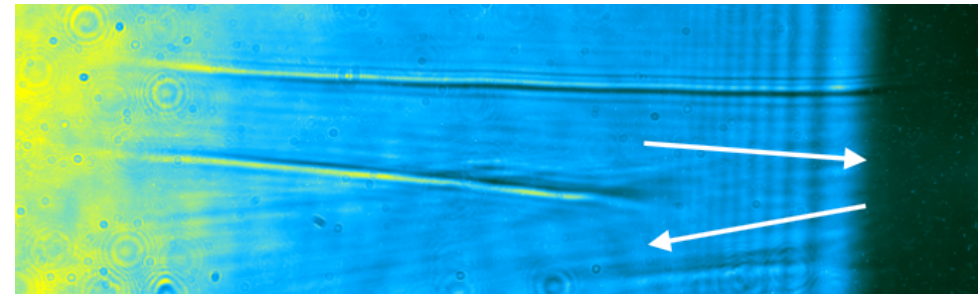
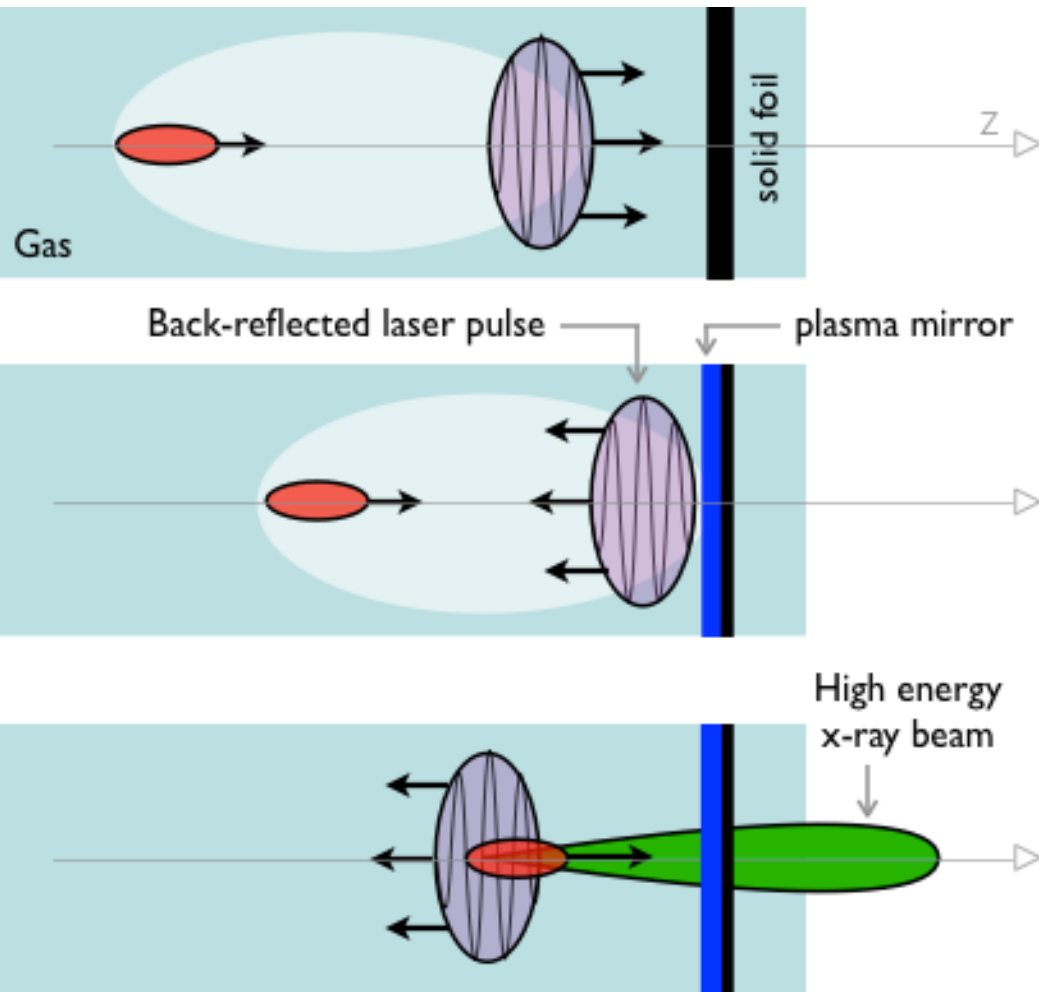
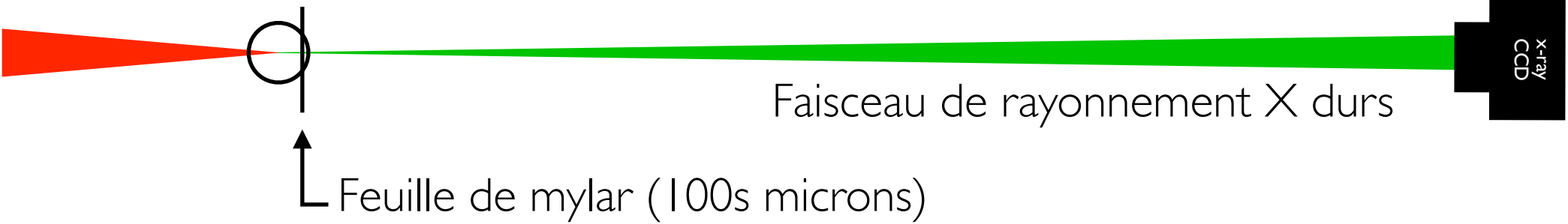




- Nécessite deux impulsions laser intenses
- Superposition spatiale et temporelle délicate (quelques microns, quelques fs)
- Faisceaux de rayonnement observés dans la gamme 10 keV - 10 MeV.

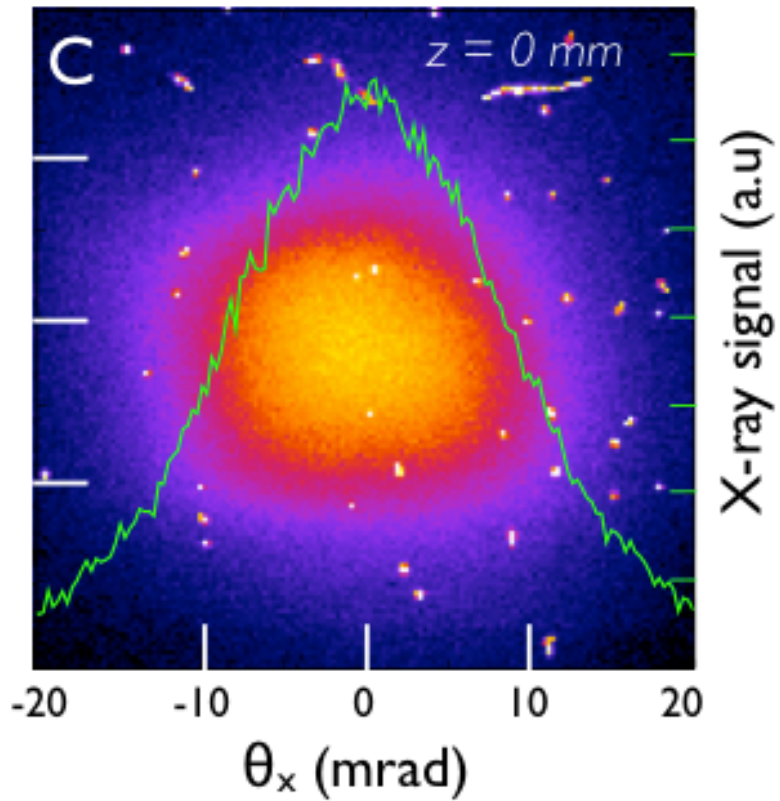


Experience: Méthode à un faisceau

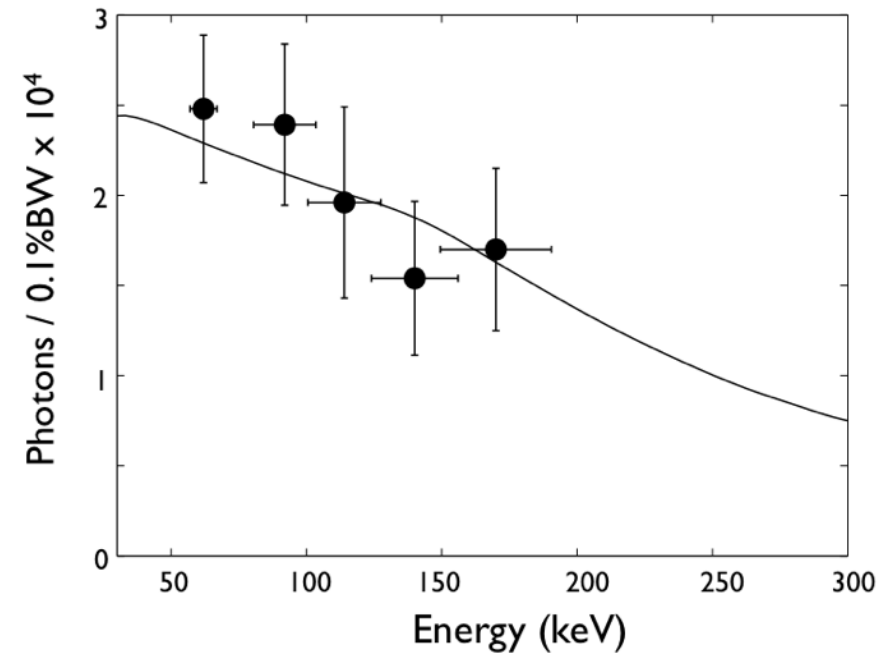
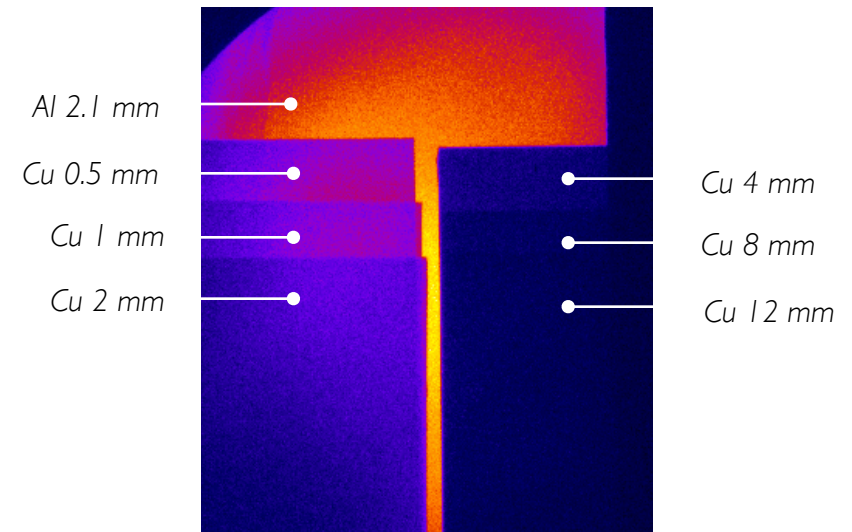


- Synchronisation inhérente
- Peu de controle

Profil du faisceau



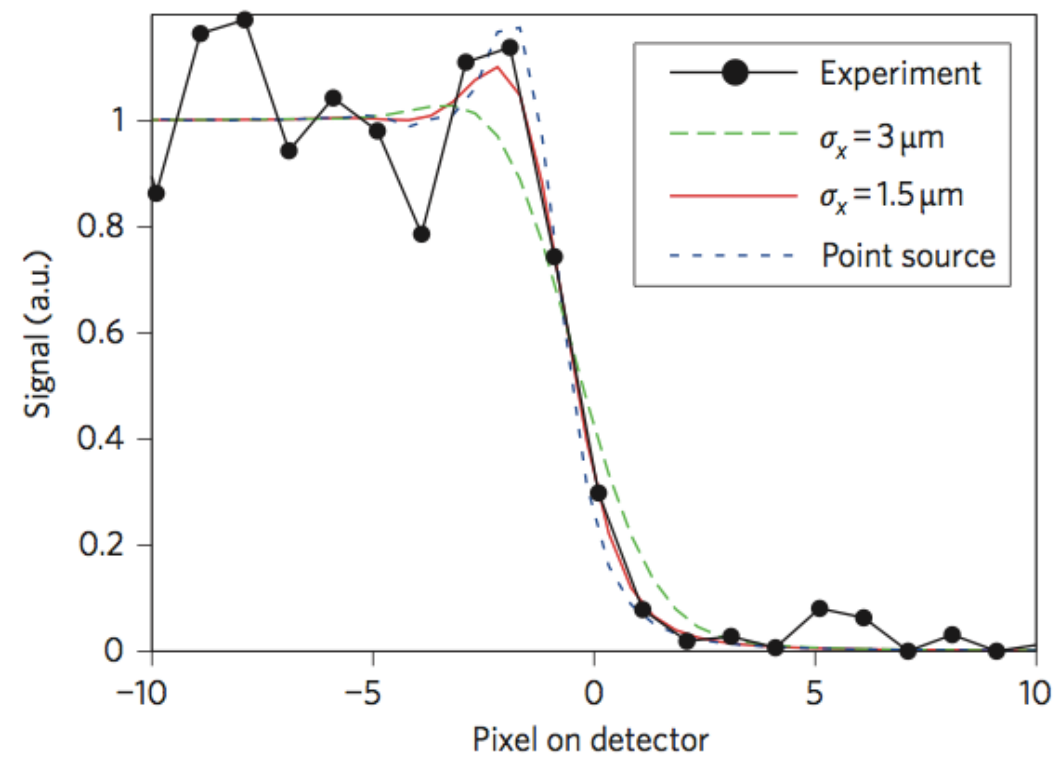
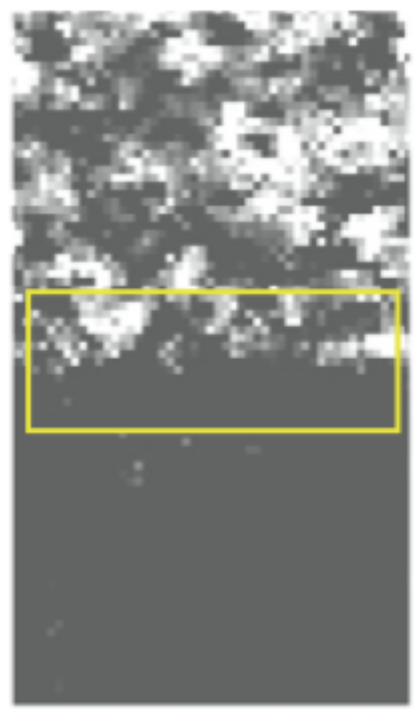
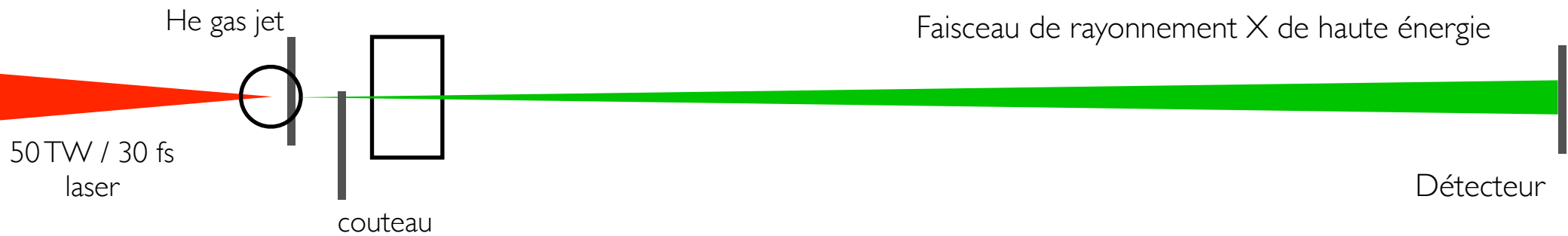
Spectre: Transmission à travers des filtres



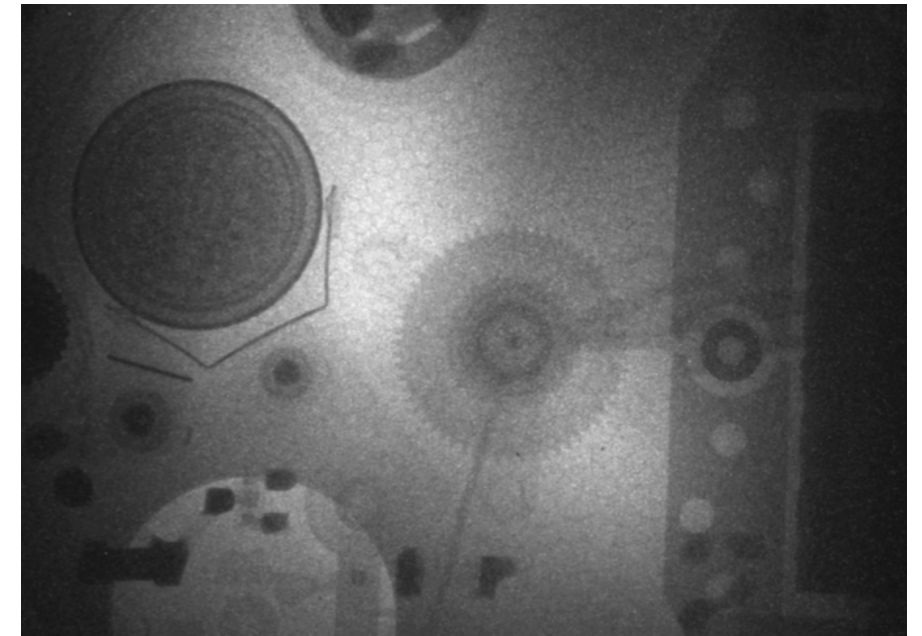
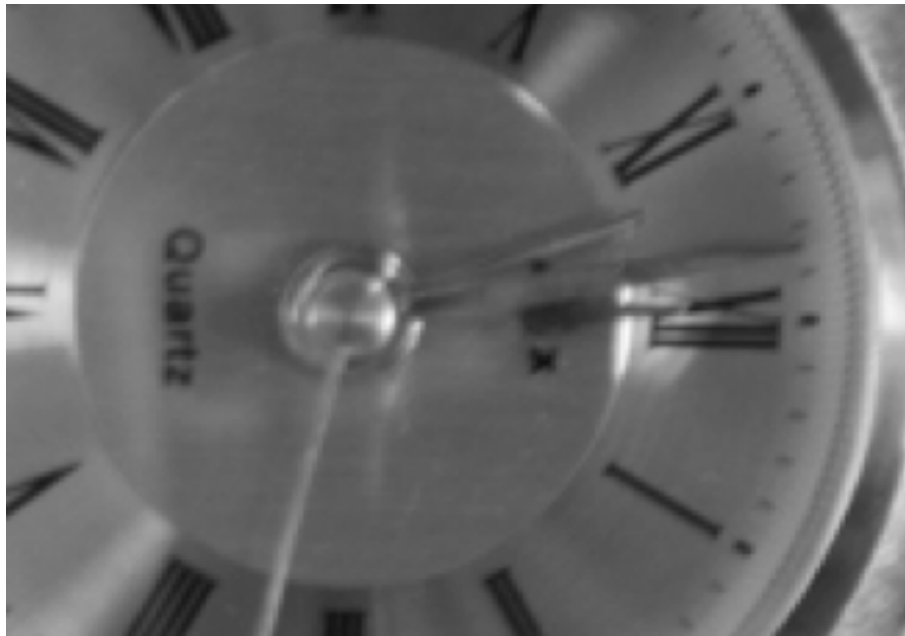
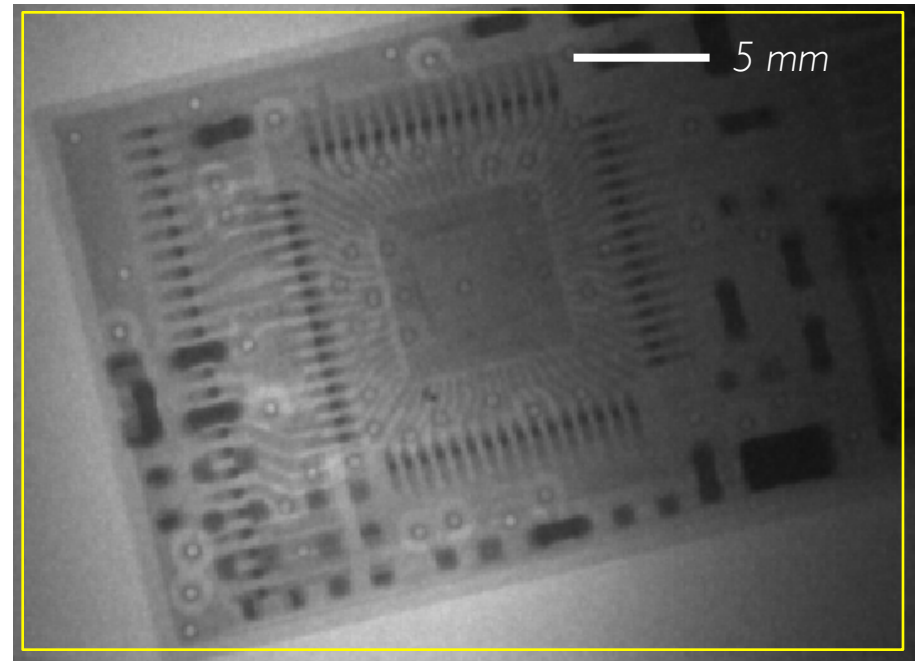
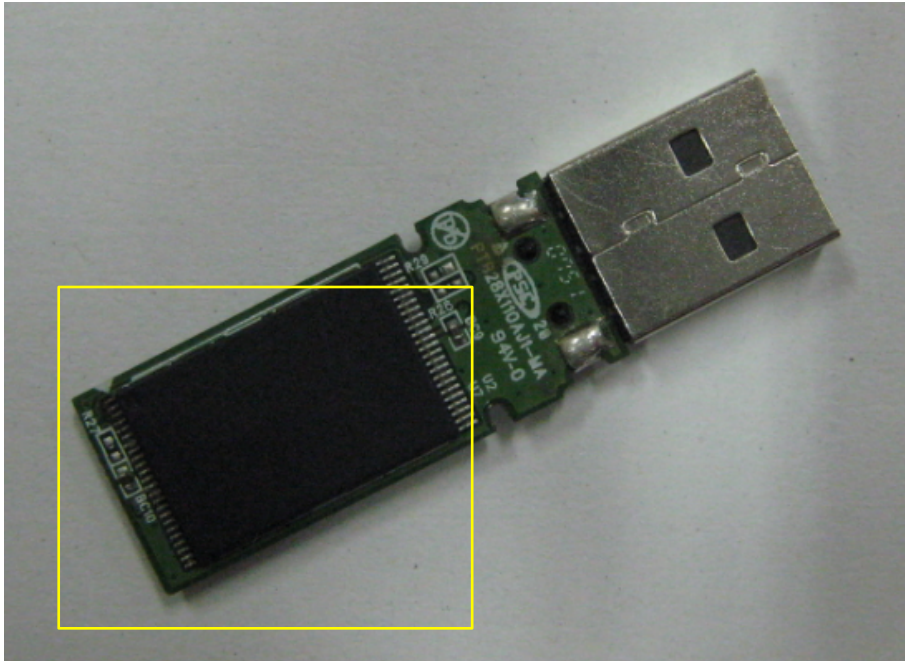
→ Divergence de l'ordre de 20 mrad

→ Flux de l'ordre de 10^8 photons / tir

Mesure de la taille de source



→ Taille de source de l'ordre de 1 micron



- 10^4 photons/tir/0.1% BW @ 100 keV
- 10^{8-9} photons/tir
- Divergence: 10's mrad
- Durée: <10 fs
- Spectre: 10s keV à quelques MeV ou spectre étroit
- Taille de source: 1 - 2 microns

Conclusion



Nonlinear Thomson scattering:

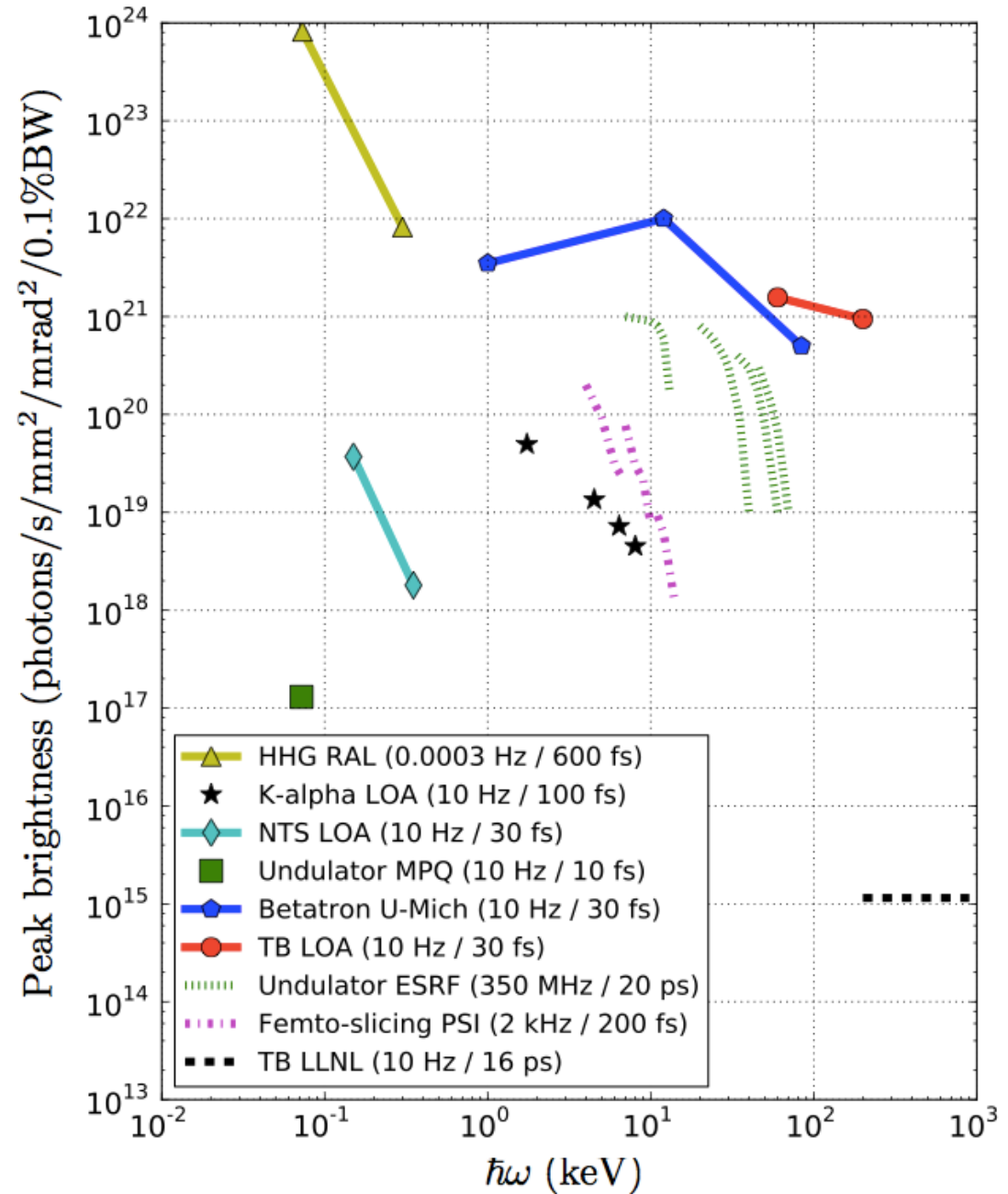
- 100 eV - 1 keV
- Large divergence
- femtosecond

Betatron radiation:

- Up to several 10s keV
- Low divergence
- femtosecond
- micron source size

Compton:

- Up to several 1 MeV
- Low divergence
- femtosecond
- micron source size



- Source de rayonnement Betatron

Contrôler les trajectoires des électrons de manière à ce qu'ils émettent du rayonnement de manière plus efficace (en modulant la densité du plasma par exemple).

- Source de Rayonnement Thomson arrière:

Produire une source de rayonnement dans la gamme de la dizaine de keV avec des lasers plus compacts et de plus haute cadence (100 Hz - 10 TW).

Produire du rayonnement spectralement fin (5-10% de l'énergie).

- Applications:

Absorption X femtoseconde

Imagerie à contraste de phase à haute énergie (50-100 keV)