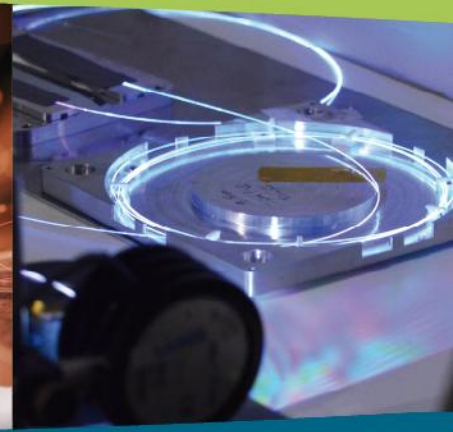
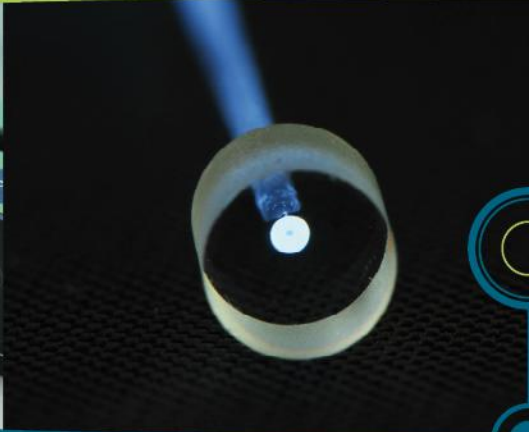


ALPhA NOV

Centre Technologique Optique et Lasers

Sources de rayons X par Laser intense Projet XPulse



Aboubakr BAKKALI



LE PÔLE DE COMPÉTITIVITÉ
PHOTONIQUE EN AQUITAINE

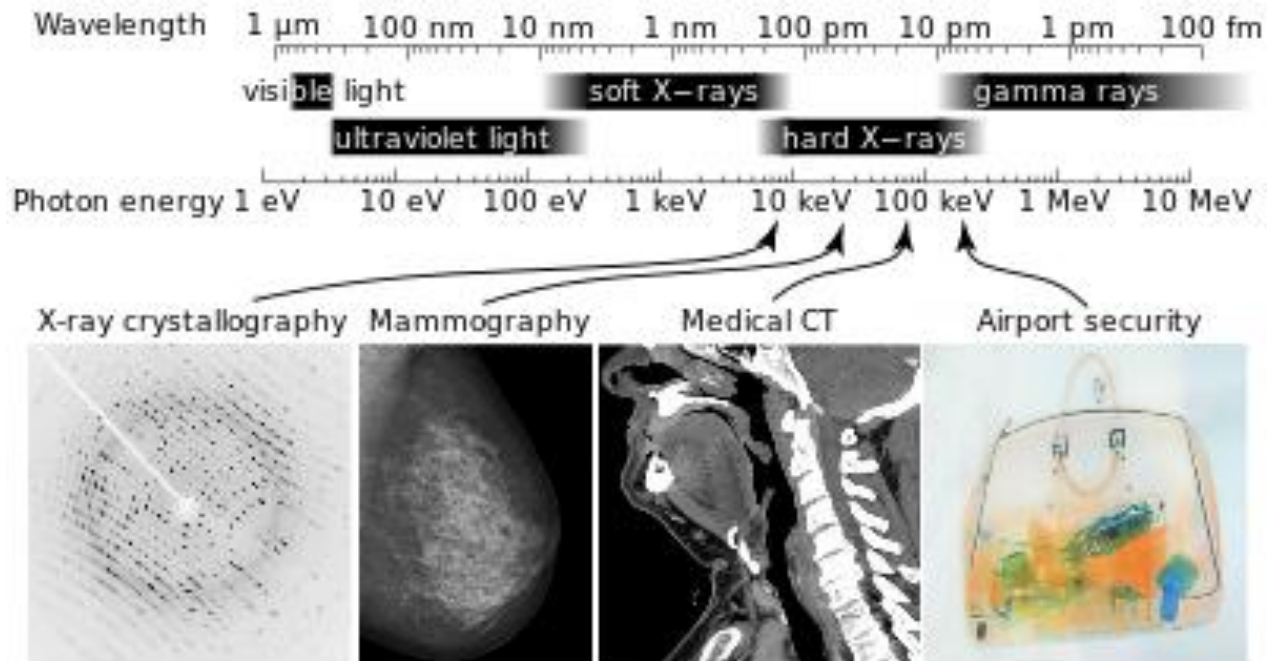


- 120 ans après leur découverte par Roentgen, les rayons X sont en grande majorité produits par la même technologie de tubes à vides

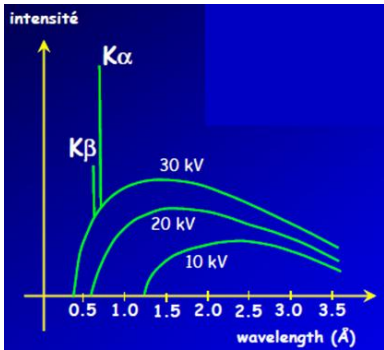


- Applications

- Imagerie médicale
- Cristallographie (diffraction X)
- Sécurité
- Contrôle Non Destructif CND



Tubes à rayons X (1)

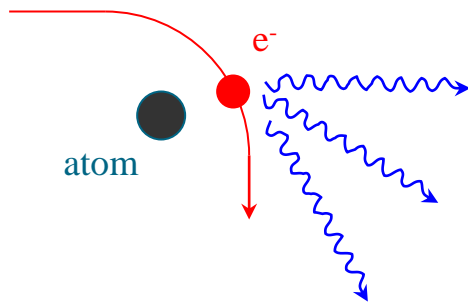


- Paramètres des tubes à rayons X

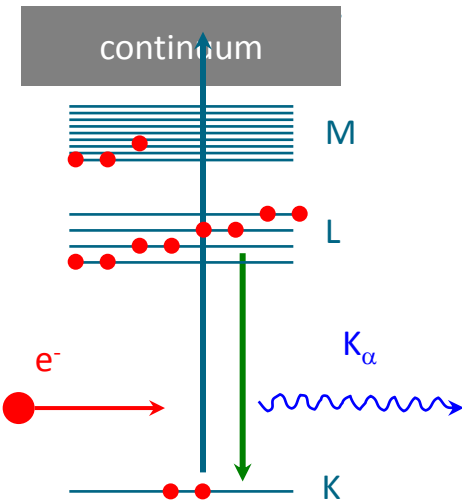
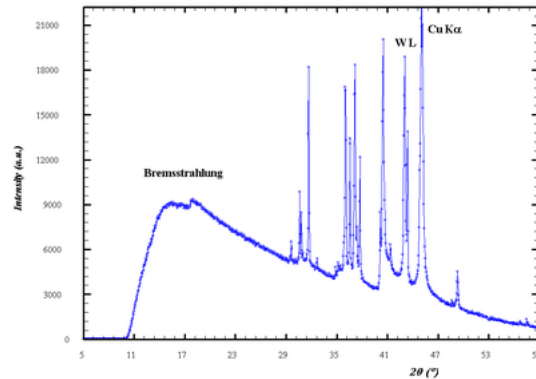
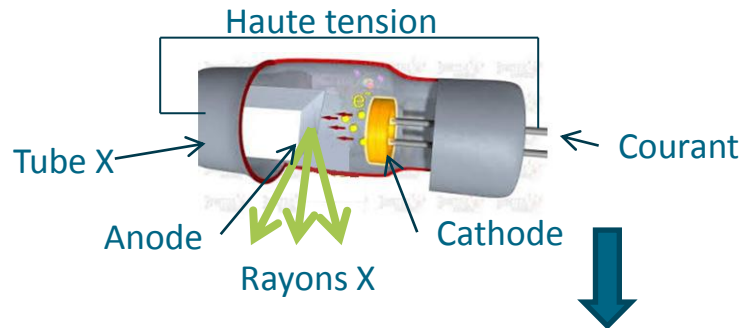
- Matériaux de la cible --
- Intensité du courant --
- Haute tension --

	$\lambda(\text{Å})$		
	$K\alpha_1$	$K\alpha_2$	$K\beta$
Cr	2.294	2.290	2.085
Fe	1.940	1.936	1.757
Co	1.793	1.789	1.621
Cu	1.544	1.540	1.392
Mo	0.7135	0.7093	0.6323
Ag	0.5638	0.5594	0.4970

rayonnement continu (parfois pulsé)



Bremsstrahlung



Raies caractéristiques (K_{α} , ...)

- Evolution des technologies des tubes à rayons X
 - Tube scellé
 - Tubes à anode tournante
 - Tubes microfocus
 - Tubes à anode liquide



Sources de laboratoire

System	Power (W)	Actual spot on anode (μm)	Apparent spot on anode (μm)	Brilliance ($\text{photons s}^{-1} \text{mm}^{-2} \text{mrad}^{-1}$)
Standard sealed tube	2000	10000×1000	1000×1000	0.1×10^9
Standard rotating-anode generator	3000	3000×300	300×300	0.6×10^9
Microfocus sealed tube	50	150×30	30×30	2.0×10^9
Microfocus rotating-anode generator	1200	700×70	70×70	6.0×10^9
State-of-the-art microfocus rotating-anode generator	2500	800×80	80×80	12×10^9
Excillum JXS-D1-200	200	20×20	20×20	26×10^9

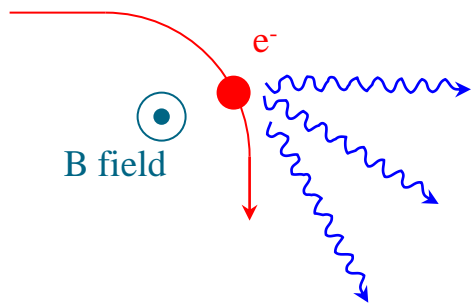
- Equipements larges basés sur l'accélération de particules

- Encombrement ~ centaines de mètres
- Coût ~ centaines de M\$
- Accès difficile
- Rayons X collimatés => Haute brillance
- Pulsé (durée ~ 100 ps)

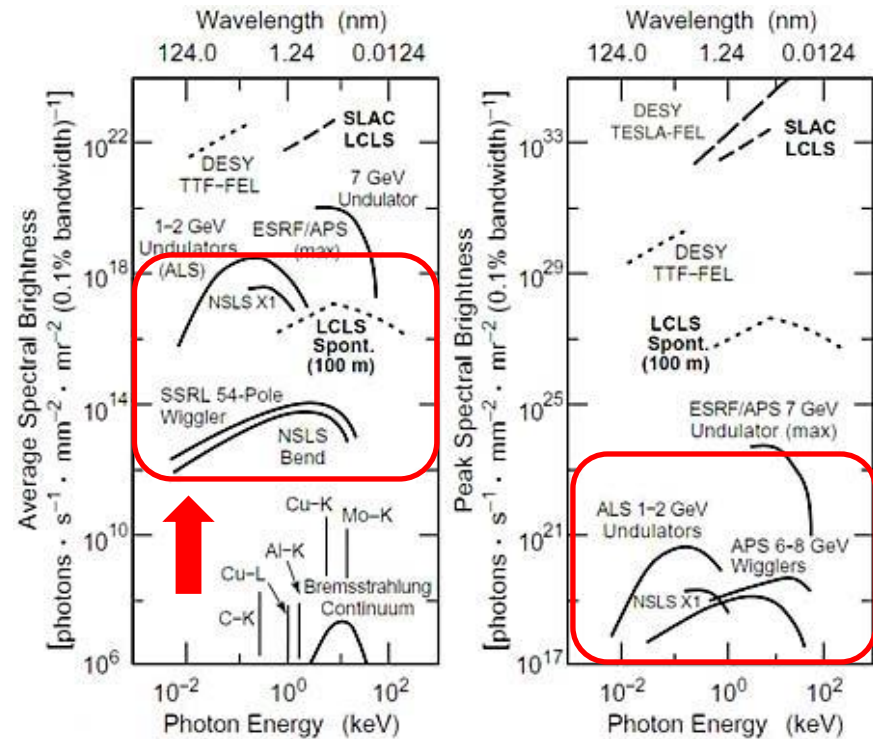


- Principe

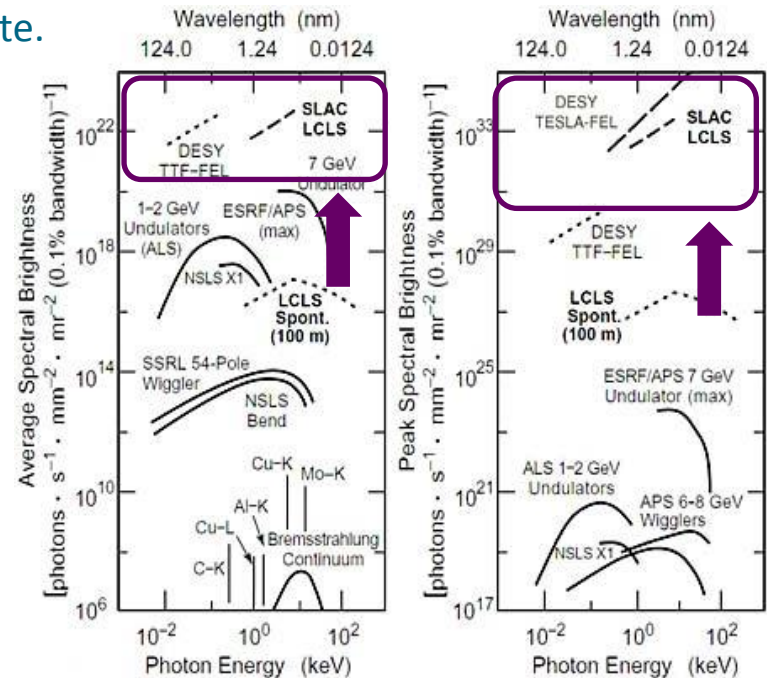
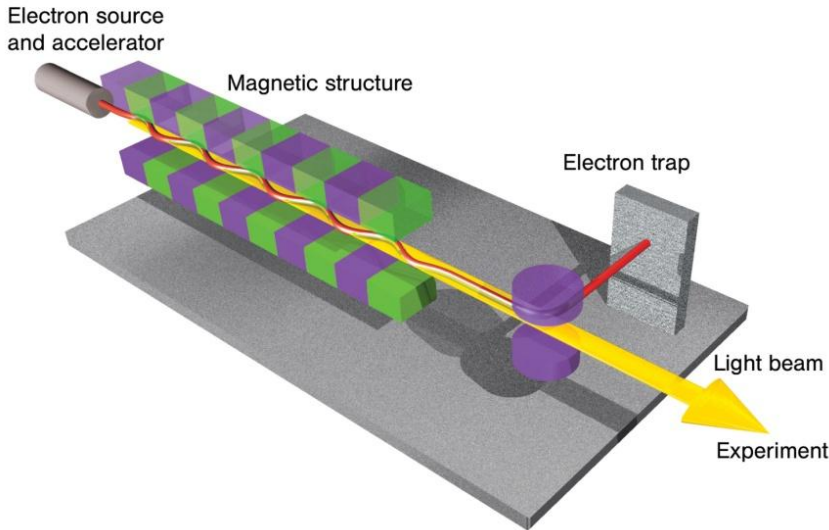
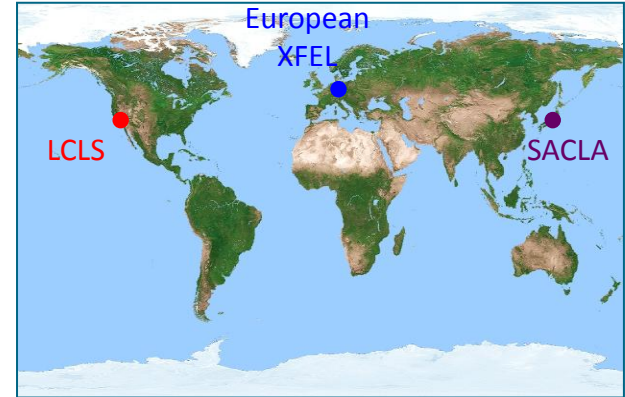
- Accélération et/ou déviation de particules chargées => Induit la génération de rayonnements X

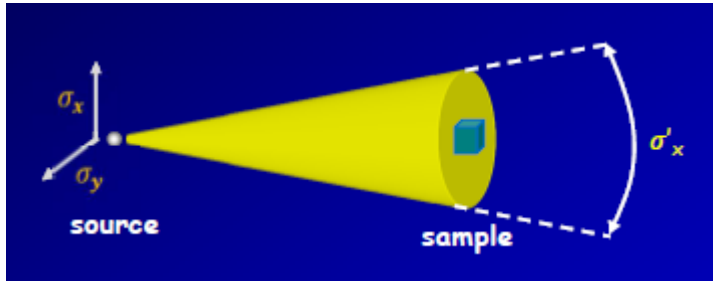


Synchrotron radiation



- Nouvelle génération d'Equipements
 - Equipements très larges (quelques km)
 - Coût ~G\$
 - Accès très difficile
 - Le faisceau X amplifié => Ordre de grandeur plus brillant que les synchrotron dernière génération
 - Pulsé (durée de l'ordre de 10 – 100 fs)
- Principe
 - Rayons X généré par émission spontanée cohérente.





Brillance de la source (Brightness)

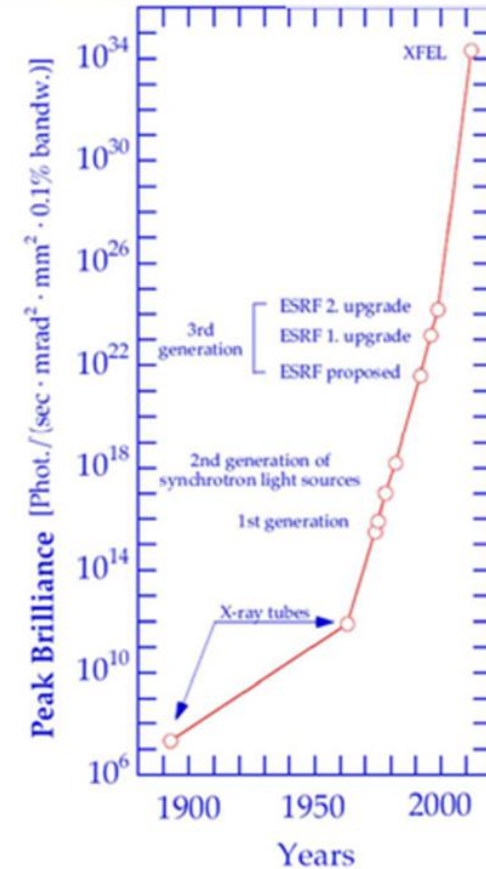
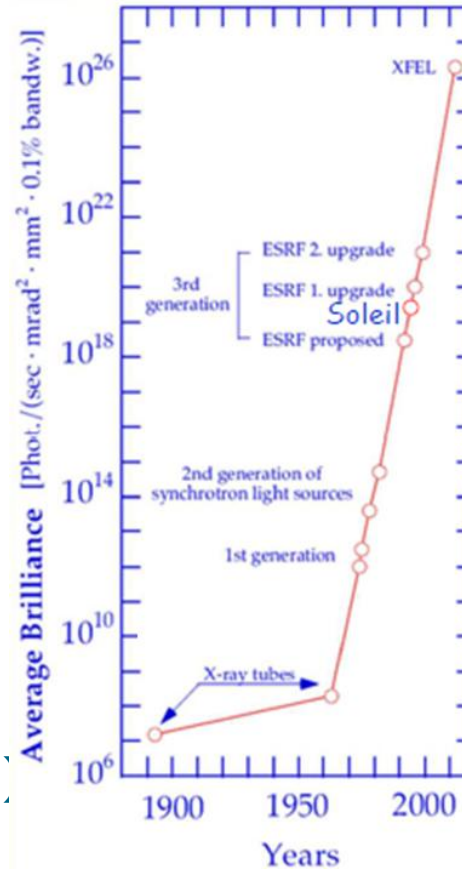
Ph/s/mrad²/mm²/0,1 BW

Flux des photons par s (Ph/s)

Taille de la source (mm²)

Divergence (mrad²) 1 mrad = 0,06°

Domaine spectral ($\Delta\lambda/\lambda$ de 0,1%)



Les sources X par laser

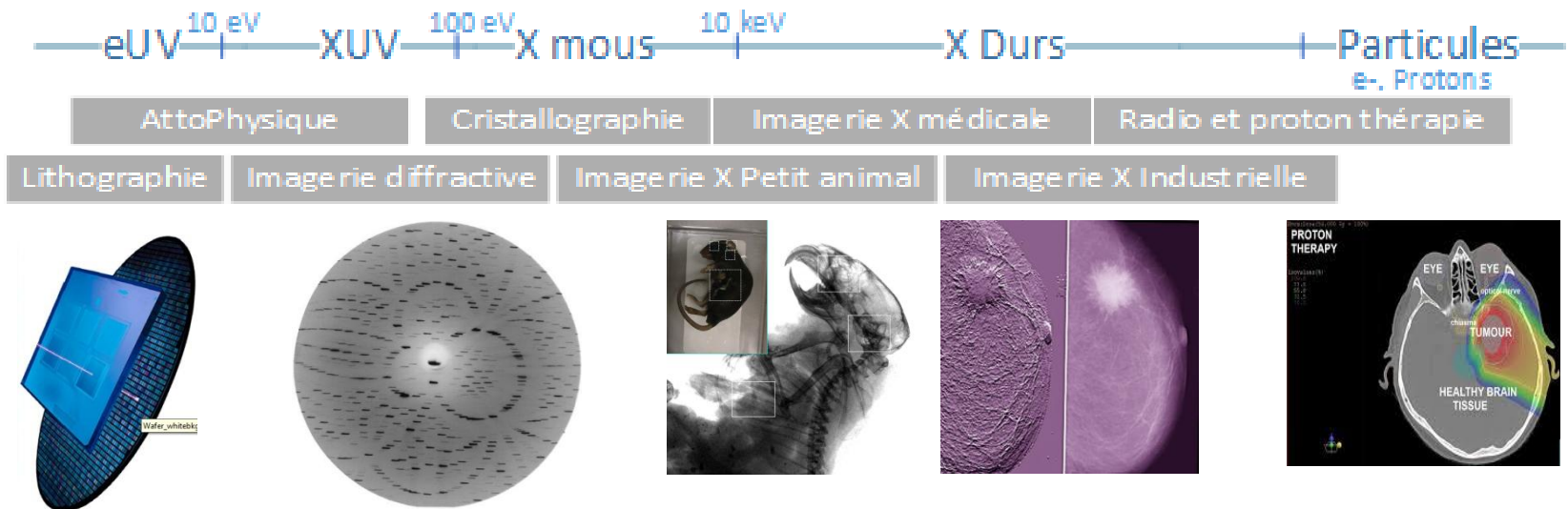
Les récents
développement des
lasers intenses



Sources secondaires
rayonnements et
particules

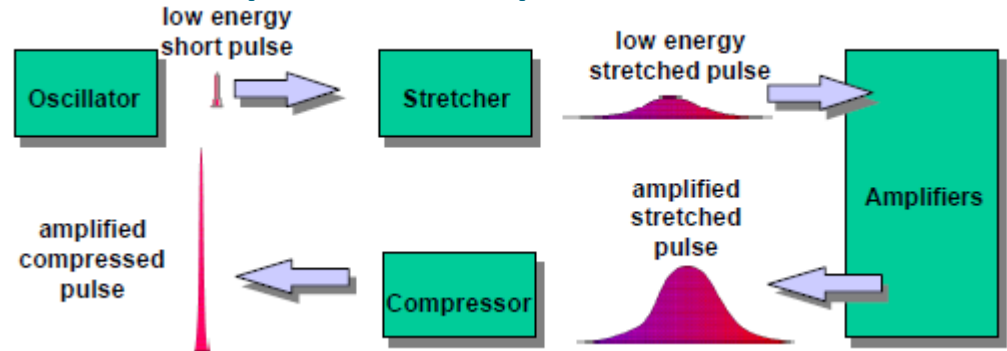


Nouvelles génération de
sources de rayons X
« laboratoire »

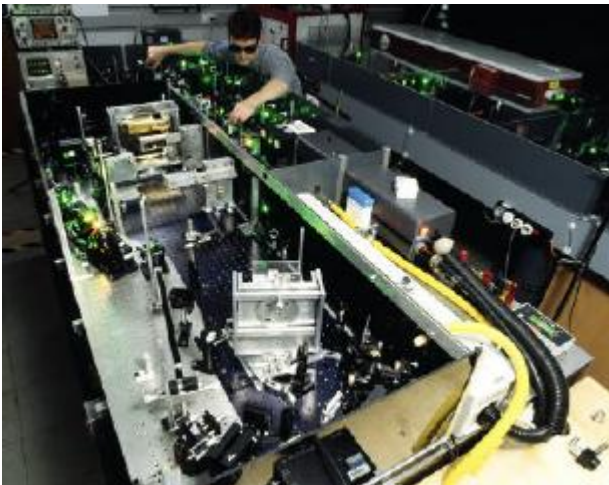


- **Disponibilité de sources Laser laboratoire (table-top) avec des puissance crêtes de l'ordre de quelques TW**
- **Niveau KW de puissance moyenne en cours de développement**

Chirped Pulse Amplification



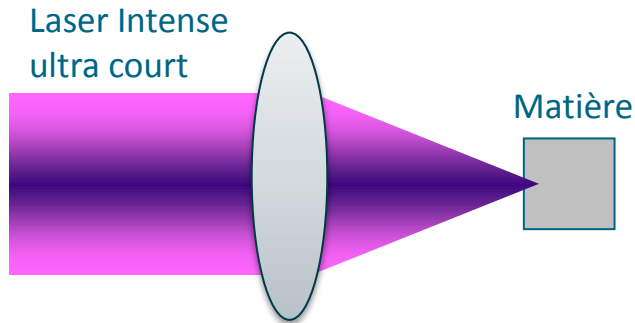
TW CPA laser system



PW LMJ CEA Barp



Vs

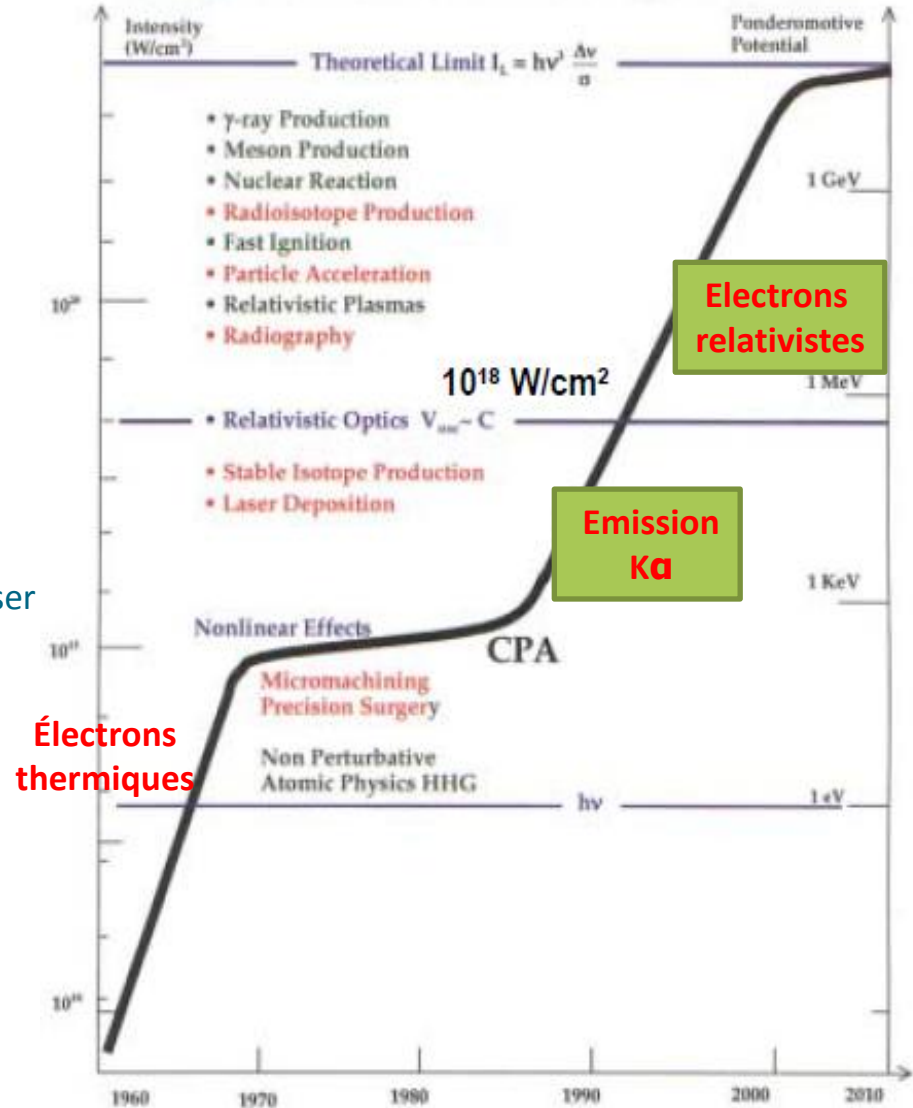


$$I = \frac{2E}{\pi \cdot w_0^2 \cdot \tau_0}$$

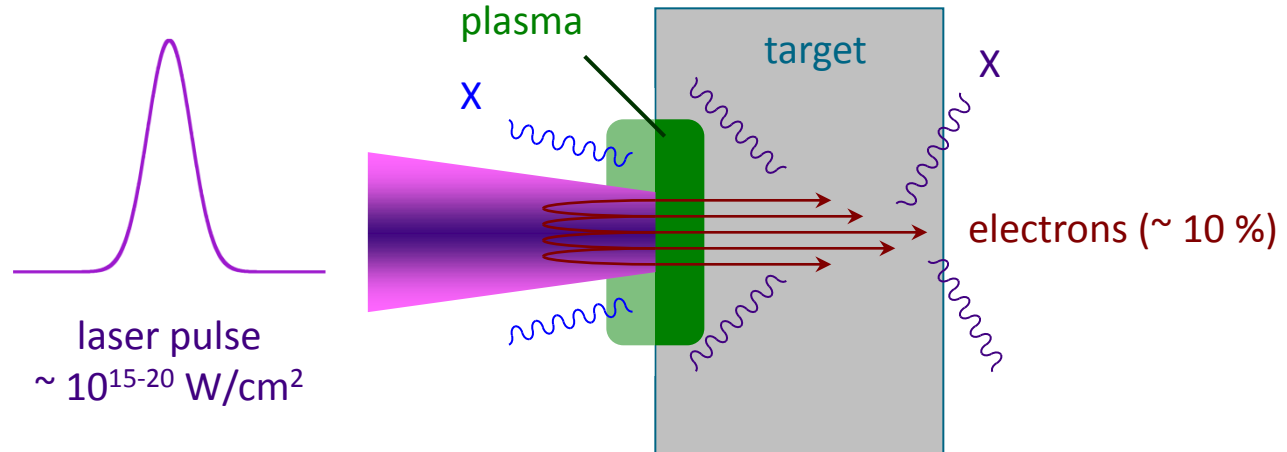
E : Energie Laser
 w_0 : rayon de la tache focale laser
 τ_0 : Durée d'impulsion

Exemple :

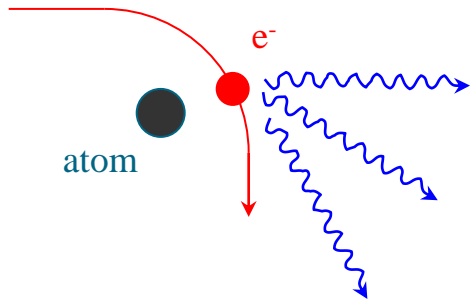
E=500 mJ, $w_0 = 10 \mu\text{m}$, $\tau_0 = 100 \text{ fs}$
 $\Rightarrow I_0 = 3 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$



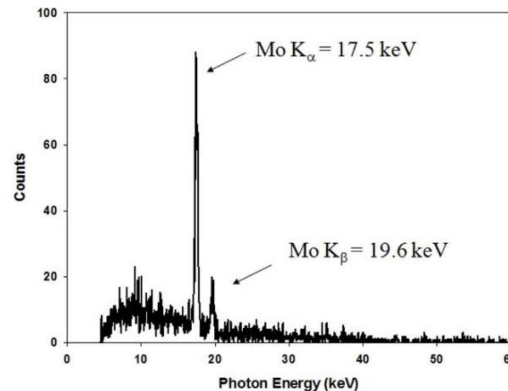
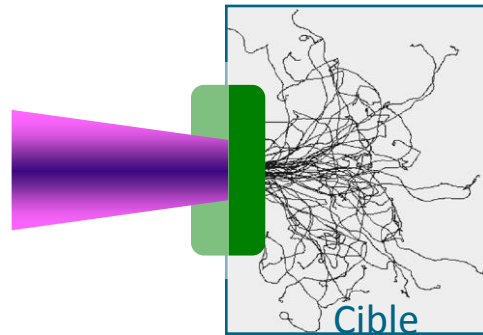
- Interaction Laser – plasma en régime femtosecond
 - Un plasma chaud et dense est produit localement sur la surface de la cible ($\sim 100 \text{ eV} - 1 \text{ keV}$)
=> Emission de rayons X dite “Thermique” ($\geq 1 \text{ keV}$)
 - Des électrons rapides sont produits ($> 10 \text{ keV}$)
=> Emission de rayons X “supra-thermiques” ($> 10 \text{ keV}$)



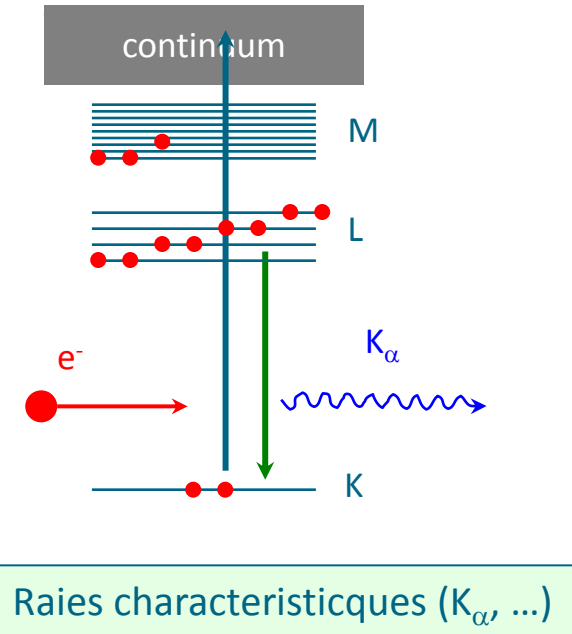
- Source K-Alpha similaire aux sources tubes X à l'exception de :
 - les électrons sont accélérés directement sur la cible
 - Le point d'émission est de l'ordre d'une dizaine de μm
 - Et le rayonnement X est impulsionnel : sa durée est équivalente à la durée de l'impulsion laser (<1ps)



Bremsstrahlung

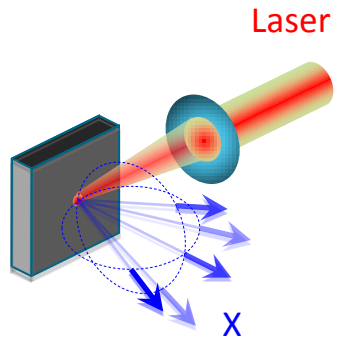


* 90mJ/100Hz sur cible Mo



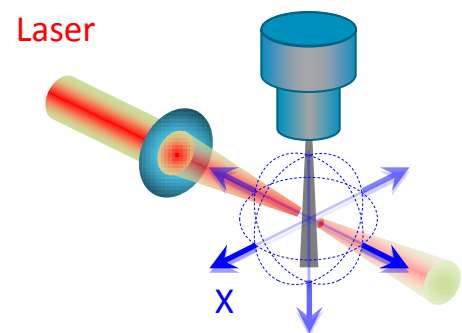
Raies caractéristiques (K_{α} , ...)

- Des cibles de différents types et dimensions :
 - Améliorer l'efficacité de conversion, l'absorption de l'intensité laser devra être optimale => des cibles hautes densités (~ cibles solides)
 - Le renouvellement de la cible à haute fréquence et la gestion des débris

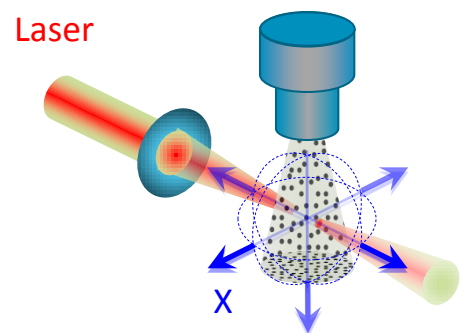


Cible solide

Cible massive, en ruban, en feuille, fil, poudre...
- Production débris
+ multitude d'éléments disponibles



Liquides



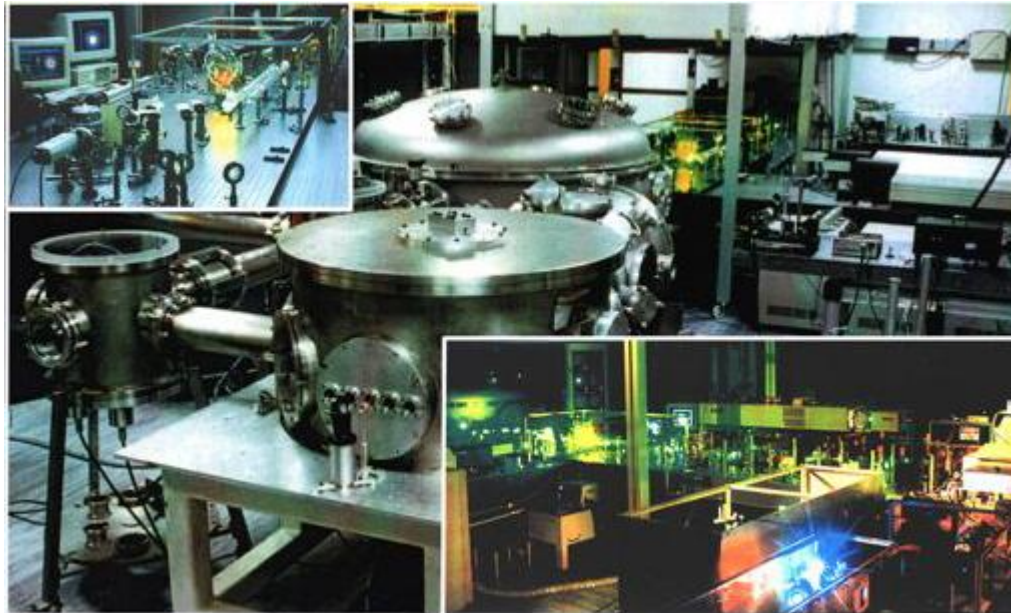
Gouttelettes

Nanostructures

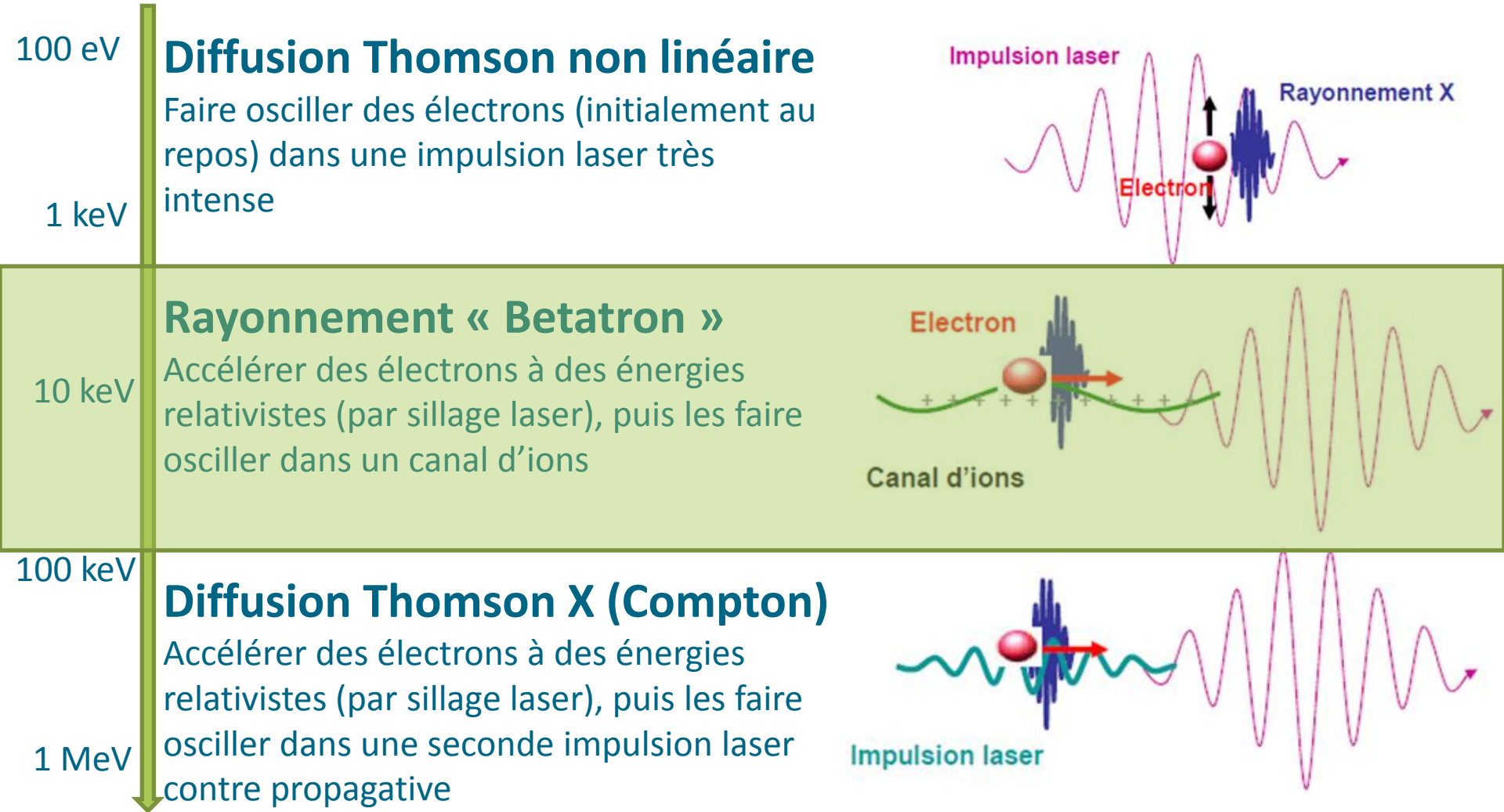
+ Absorption de l'énergie laser
+ rapide expansion et refroidissement du plasma (3D)
+ Pas de débris
- peu d'éléments

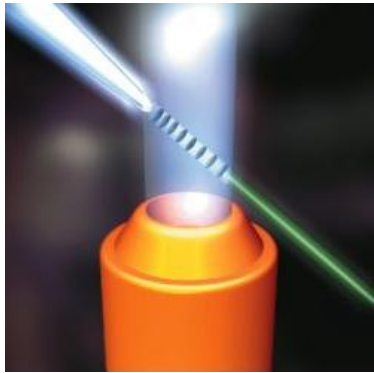


- Caractéristiques de la source
 - Surface d'émission réduite (quelques μm), isotropique (2π à 4π sr)
 - Emission dans les X durs ($\sim 1 - 100$ keV)
 - Durée \sim quelques 100 fs
 - Efficacité de conversion \sim quelques 10^{-4} à 10^{-5} de l'énergie laser
 - Intensité laser $\sim 10^{16-17}$ W/cm² suffisante
 - => peut atteindre des taux de répétition élevés (1 kHz)



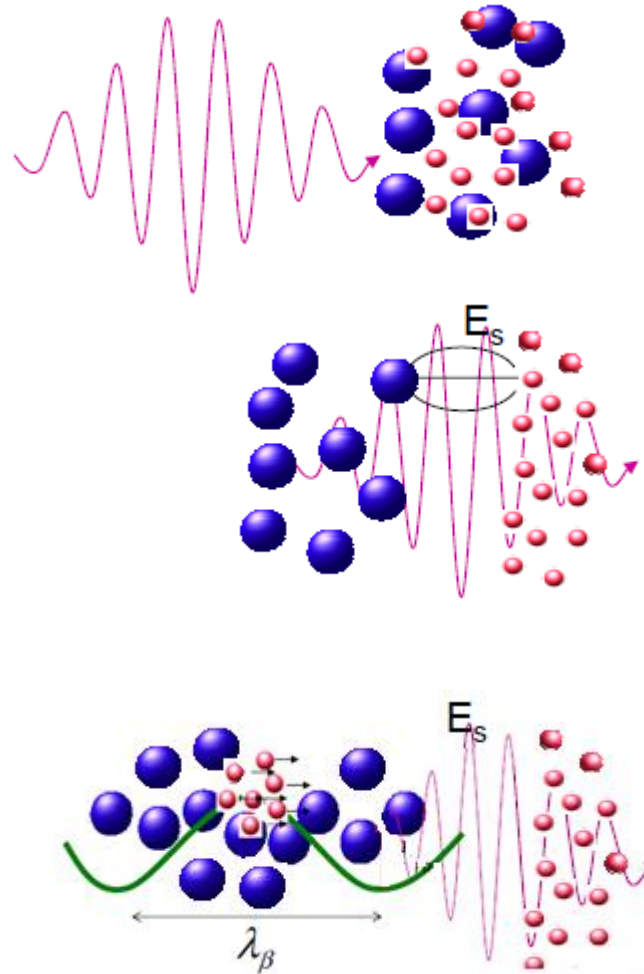
Les autres sources de rayons X par laser





Le laser est focalisé
sur une cible gazeuse
(He)

$$I > 10^{18} \text{ W.cm}^{-2}$$

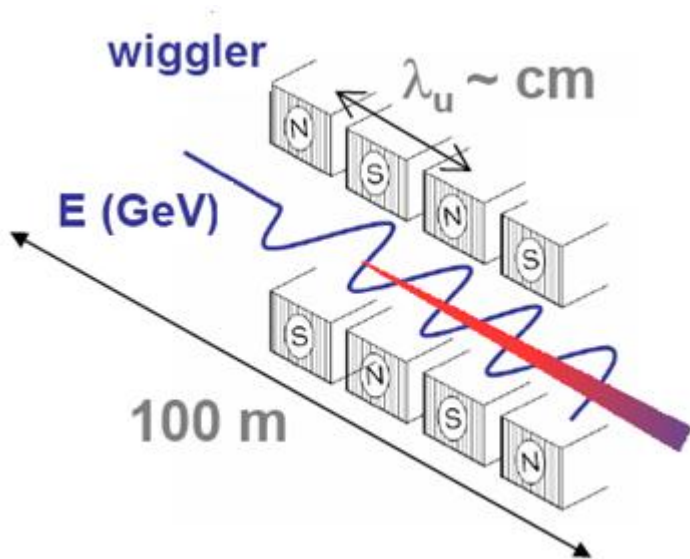


- Un Plasma est créé sur le front avant de l'impulsion

- La force pondéromotrice associée au laser pousse les électrons vers l'avant et un champ électrique longitudinal dû à la séparation de charges est créé

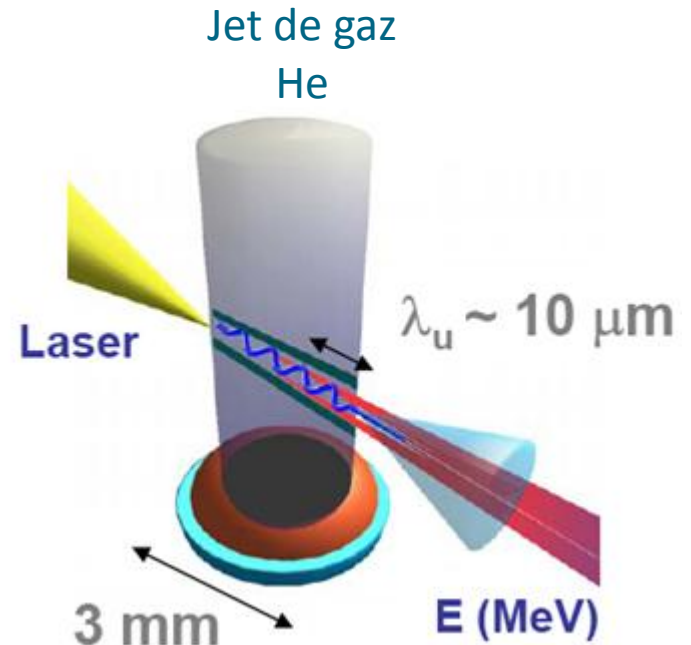
- Des électrons piégés dans ce champ peuvent être accélérés (par sillage laser à des énergies relativistes (Jusqu'à ~500 MeV)

- Ils oscillent ensuite dans le canal d'ions et génèrent un faisceau de rayons X dit Bêtatron



Cavité RF : 1 m

Champs électrique $E_z = 10-100$ MV/m

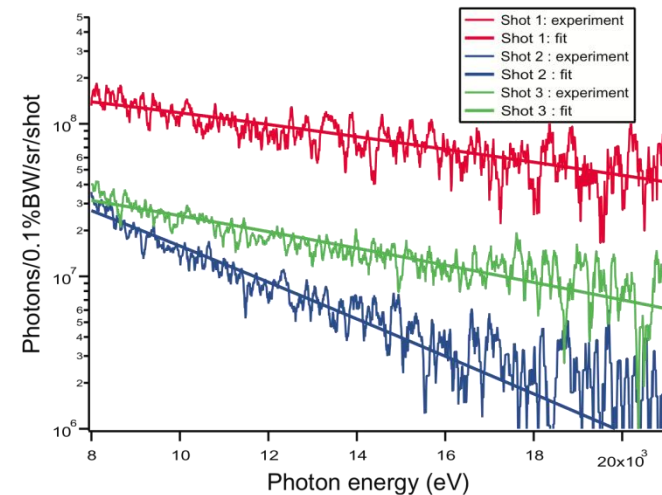


Onde plasma : 100 μm

$E_z = 10-100$ GV/m

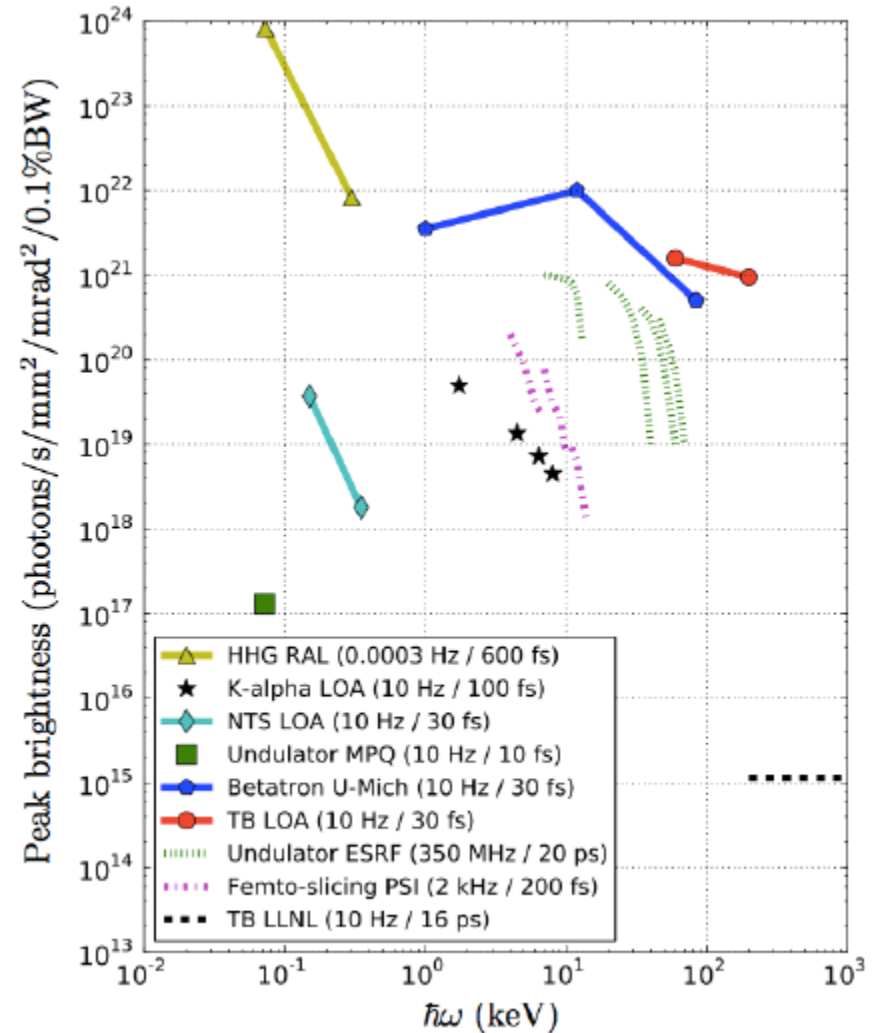
- Caractéristiques générale
 - Faisceau collimaté $\sim 50\text{mrad}$ divergence
 - Point d'émission de l'ordre de $1\text{-}2\ \mu\text{m}$
 - Rayons X émis avec des énergies de 1 à $10\ \text{keV}$
 - Durée \sim peut atteindre $10\ \text{fs}$
 - $\sim 10^8$ photons/tir
 - Intensité laser relativiste ($> 10^{18}\ \text{W/cm}^2$)
- => Technique limitée en terme de taux de répétition ($< 10\ \text{Hz}$)

Technique pas encore maîtrisée : les flux de photons ainsi que les spectres restent encore très fluctuants d'un tir à l'autre



Des sources de rayons X par laser développées en laboratoire on permet d'atteindre des niveaux de brillance élevés et des durées de pulses très courtes

L'objectif est donc de stabiliser ces technologies et de les rendre accessible à la communauté scientifique



En Europe, Plusieurs équipes développent des sources X secondaires par Laser



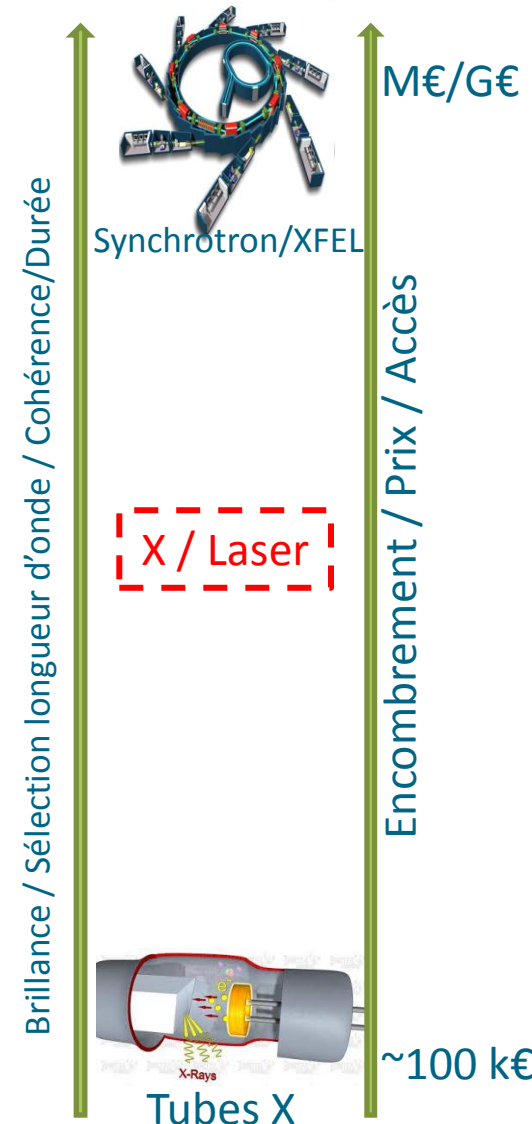
Plateforme
ASUR

LASERLAB-EUROPE



Conclusions :

- L'objectif de ces travaux est la production de faisceaux de rayons X femtosecond pour diverses applications
- Ces sources seront facile à produire, compactes, brillantes, et synchronisées avec le laser
- Ces sources ne sont pas encore stables : la focalisation laser, les flux d'électrons et de photons ainsi que les spectres ne sont pas encore maîtrisés



Merci de votre attention!

