

Sources X Compton compactes intenses : état de l'art

Marie Jacquet

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire
IN2P3,CNRS



Séminaire LAL, 20 mars 2012

- 1. Contexte**
- 2. Sources Compton inverse (ICS)**
- 3. Caractéristiques/Spécifications d'une ICS compacte**
→ Illustration par quelques projets
- 4. Potentiel d'applications**

- 1. Contexte**
2. Sources Compton inverse (ICS)
3. Caractéristiques/Spécifications d'une ICS compacte
→ Illustration par quelques projets
4. Potentiel d'applications

Pourquoi une source X “compacte” ?

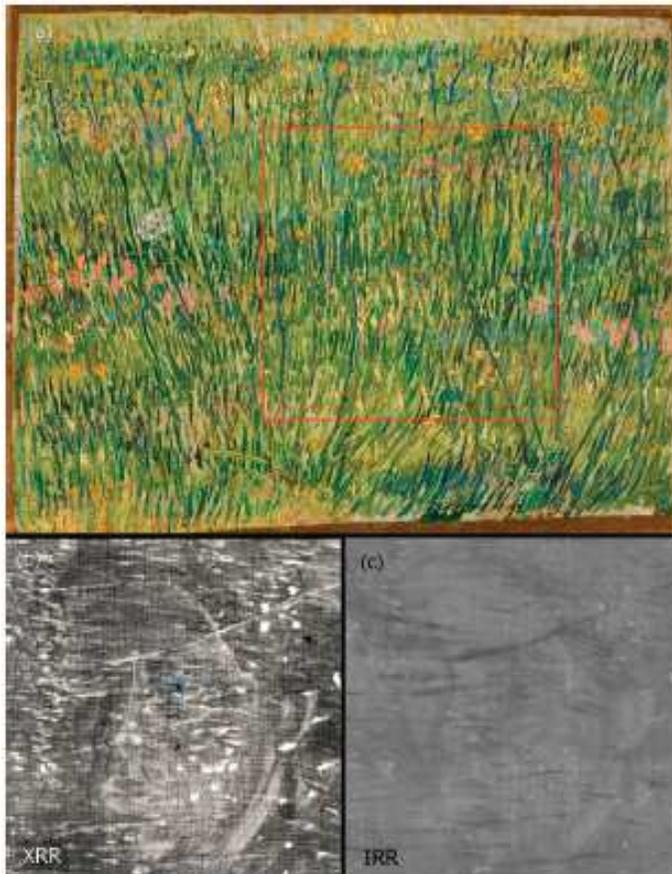
► **Dans beaucoup de domaines scientifiques**

les sources **synchrotron** sont actuellement les seules machines en terme de brillance capable de mener à bien les **analyses** et **recherches les plus ambitieuses**.

Vincent van Gogh "Un coin d'herbe" (1887) au synchrotron de DESY

Analyses au synchrotron de DESY

Radiographie X & Réflectographie IR conventionnelles

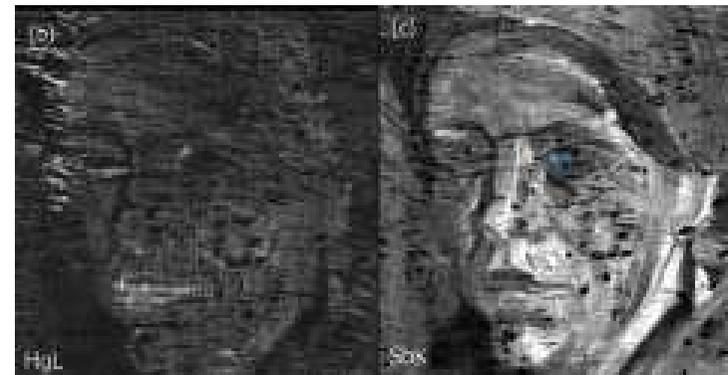


Transmission X

Réflectographie IR

(Anal. Chem. 80, 2008, 6436-6442)

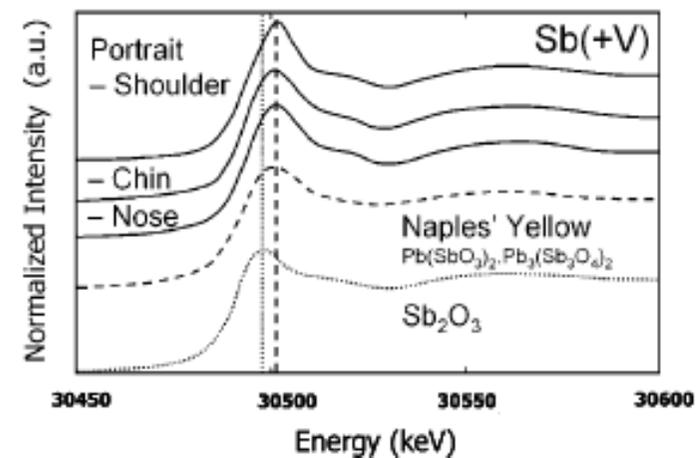
Fluorescence X (38.5 KeV) → Identification des pigments



Vermillon

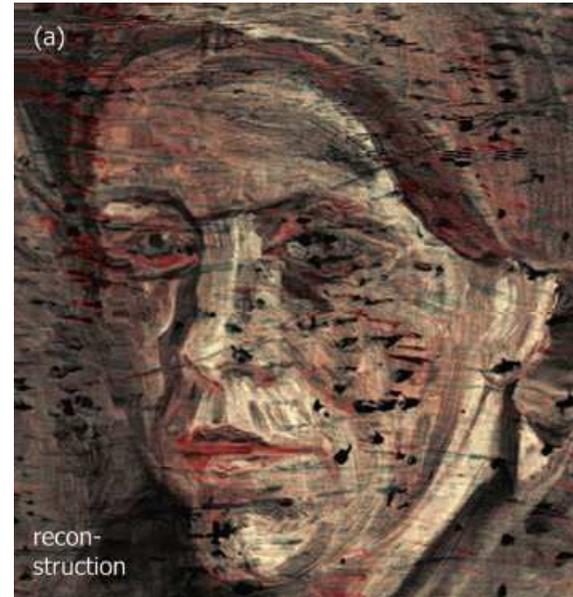
Antimoine

Absorption au seuil K d'un élément pour identifier précisément les composés chimiques (couleurs)



Vincent van Gogh "Un coin d'herbe" (1887) au synchrotron de DESY

Reconstruction colorée



Oeuvre peinte
quelques années
avant

Paléontologie : morceaux d'ambre (100 MA avant JC) à l'ESRF

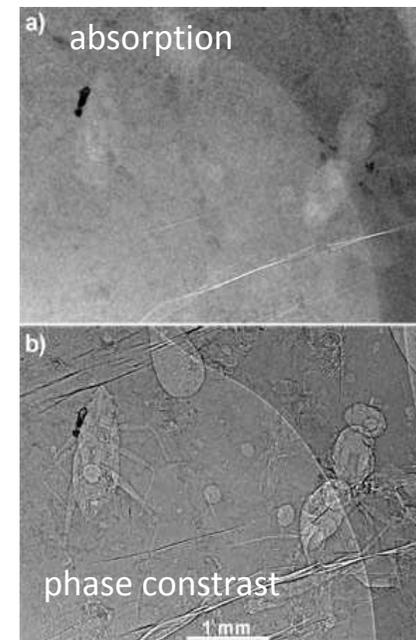
(Microscopy & Microanalysis, 14, 2008, 251-259)

Morceaux d'ambre (100 MA avant JC)



Analyses à l'ESRF

X monochromatiques
+ cohérence transverse



→ éléments piégés dans l'ambre

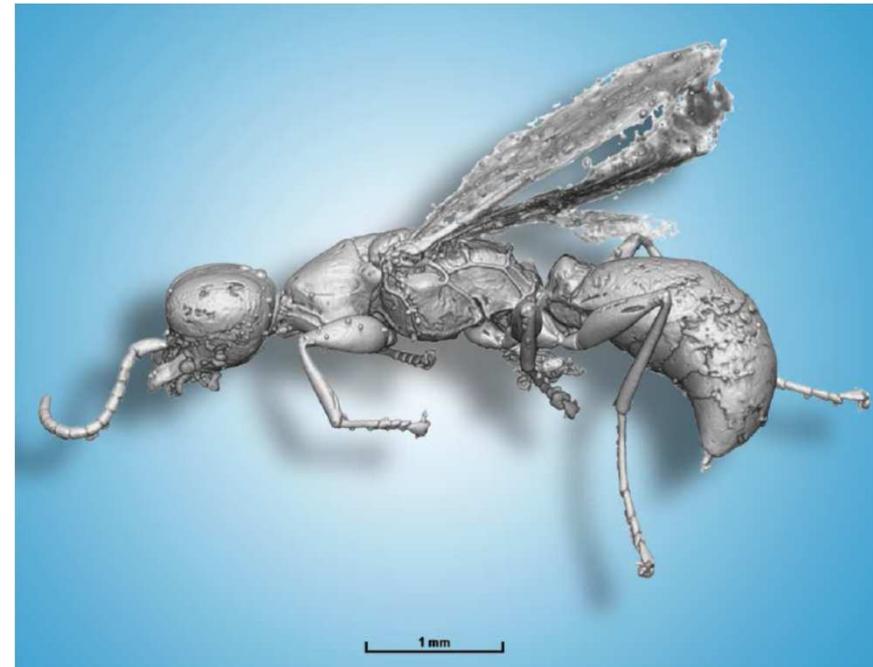
Paléontologie : morceaux d'ambre (100 MA avant JC) à l'ESRF

Morceaux d'ambre
(100 MA avant JC)



(Microscopy & Microanalysis, 14, 2008, 251-259)

Reconstruction 3D



Pourquoi une source X “compacte” ?

► Dans beaucoup de domaines scientifiques

les sources **synchrotron** sont actuellement les seules machines en terme de brillance capable de mener à bien les **analyses** et **recherches les plus ambitieuses**.

► Sources synchrotron :

- peu “pratique” pour certaines applications
- temps d'accès limité,
- trop chères pour être reproduites suffisamment alors que les besoins dans beaucoup de domaines scientifiques sont importants.

► Avec **des sources compactes** :

Les méthodes actuellement utilisées aux synchrotrons, (la diffraction, l'absorption, la diffusion, l'imagerie, la spectroscopie...) pourraient être largement développées dans **un environnement de la taille d'un laboratoire (hôpitaux, labos, musées)**.

Les sources X compactes aujourd'hui

► Tubes rayons X :

Les plus performants sont les **anodes tournantes**

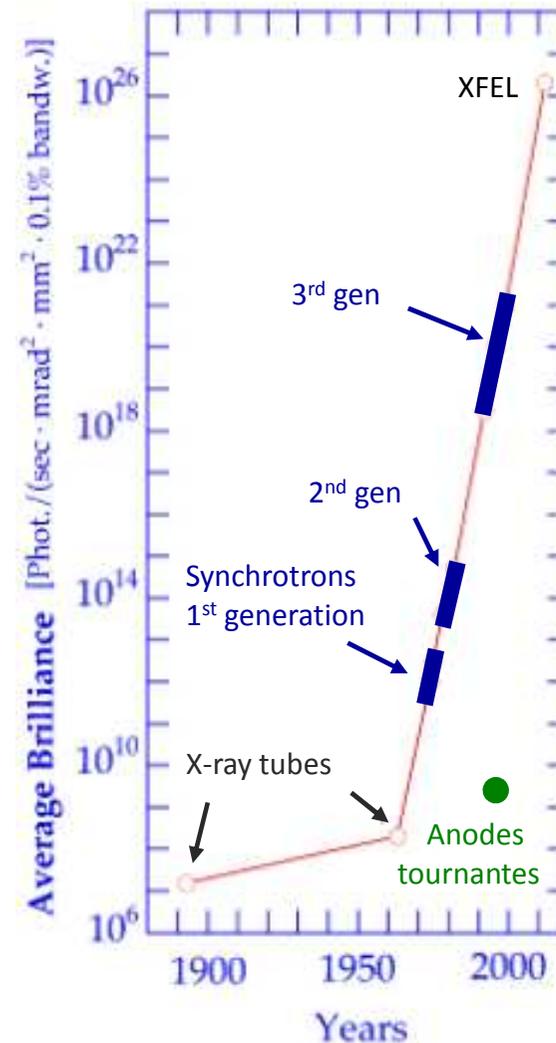
~ 10^{10} ph/sec , polychromatique

~ 200 μm taille faisceau

► Sources plasma :

Pulses ultra-courts ~ fs, mais très bas flux.

→ Ces sources ne permettent pas d'exploiter des techniques utilisées aujourd'hui aux synchrotrons.



Les sources X compactes aujourd'hui et demain

► Tubes rayons X :

Les plus performants sont les **anodes tournantes**

~ 10^{10} ph/sec , polychromatique

~ 200 μm taille faisceau

► Sources plasma :

Pulses ultra-courts ~ fs, mais très bas flux.

→ Ces sources ne permettent pas d'exploiter des techniques utilisées aujourd'hui aux synchrotrons.

► Sources Compton Inverse (ICS) :

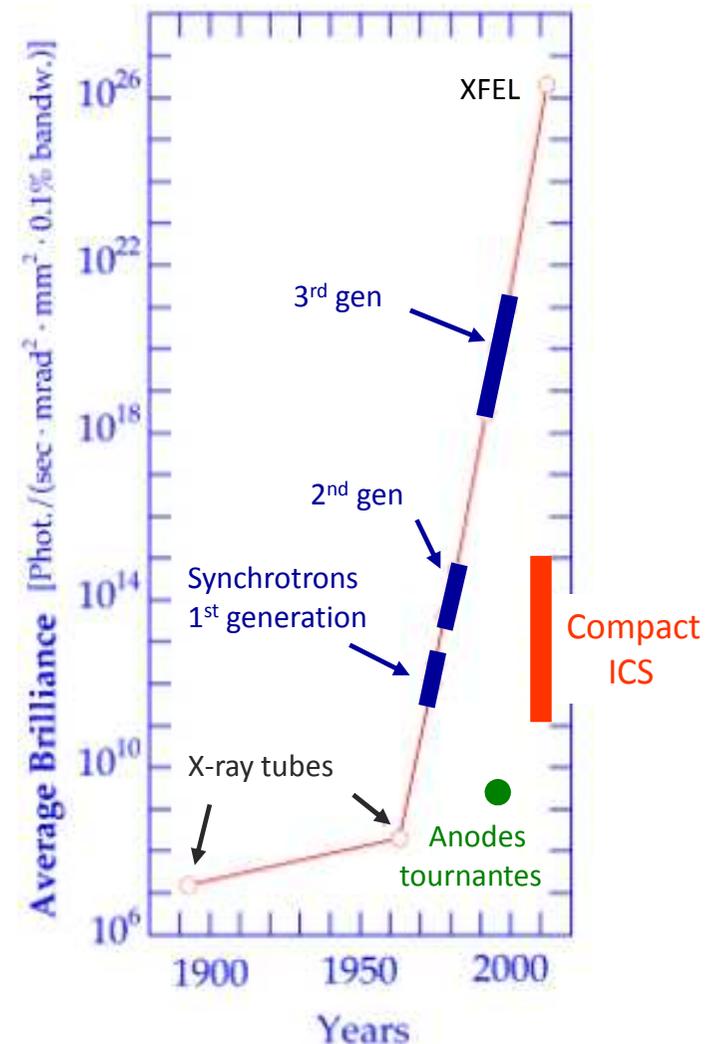
→ **Compacité** (surface ~ 100 m²)

→ Intégration dans hôpitaux, labos, musées

→ **Haut flux**

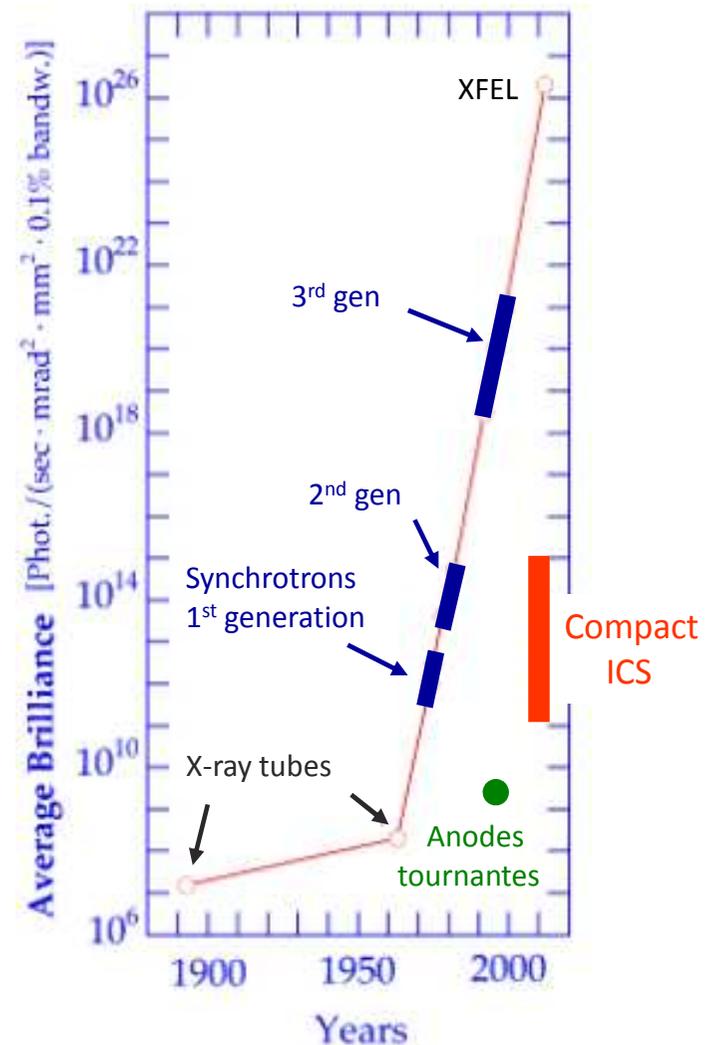
→ **Faisceau de haute qualité**

→ **Bas coût (comparé aux synchrotrons)**



Champs d'application

- ▶ **Science biomédicale**
 - ▶ **Préservation de l'héritage culturel**
 - ▶ **Science des matériaux, industrie**
- **Environnement de travail** pratique et accessible
(= environnement de laboratoire)
- **Plus de contraintes de coût ou de dangers** liés au transport dans les synchrotrons d'œuvres d'art précieuses ou de cristaux dans des conteneurs refroidis à l'azote liquide.
- **Comblent le grand manque de sources intenses de laboratoire.**



1. Contexte
2. **Sources Compton inverse (ICS)**
3. Caractéristiques/Spécifications d'une ICS compacte
→ Illustration par quelques projets
4. Potentiel d'applications

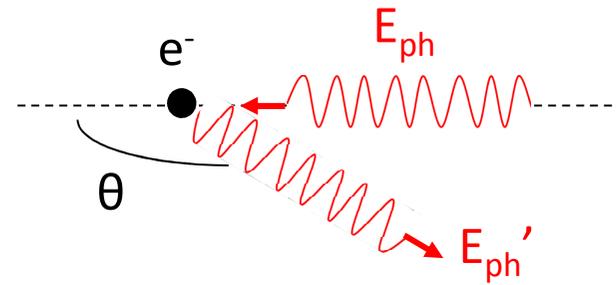
Diffusion Compton → diffusion photon / particule chargée

Diffusion Thomson / Compton

→ L'électron est initialement au repos

▶ “Régime Thomson / Compton (Klein-Nishina)”

→ E_{ph} photon diminue (ou inchangée si $E_{ph} \ll m_e$)
Une partie de son énergie est transmise à l'électron

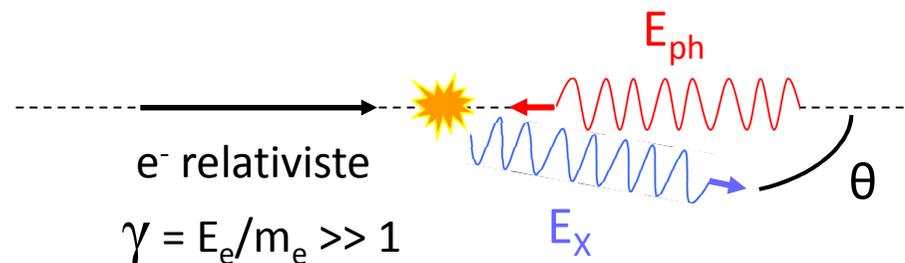


$$E_{ph}' = \frac{E_{ph}}{1 + (E_{ph}/m_e)(1 - \cos\theta)}$$

Diffusion Compton Inverse

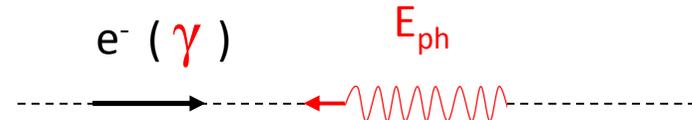
→ L'électron n'est plus au repos

▶ “Régime Compton Inverse”



Diffusion Compton Inverse : cinématique

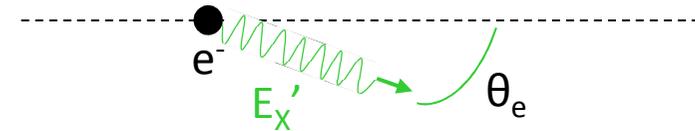
Laboratoire \rightarrow $\left\{ \begin{array}{l} \text{électron} \rightarrow \gamma \\ \text{photon} \rightarrow E_{ph} \end{array} \right.$



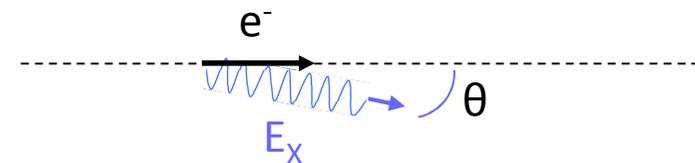
Réf. e⁻ au repos $\rightarrow E_{ph}' \sim \gamma (1+\beta) E_{ph}$
 \uparrow
 1^{er} boost



Diffusion Compton ($E_{ph} \ll m_e$) $\rightarrow E_{X}' \sim E_{ph}'$



Laboratoire $\rightarrow E_X \sim \gamma [1+\beta \cos(\theta_e)] E_X'$
 \uparrow
 2^{ème} boost



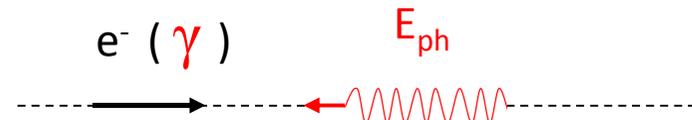
$$E_X \sim \gamma^2 E_{ph} (1+\beta) [1+\beta \cos(\theta_e)]$$

\rightarrow "Accélérateur de photons"

$$\gamma \gg 1, \theta \ll 1 \rightarrow E_X \sim \frac{4 \gamma^2 E_{ph}}{1 + (\gamma\theta)^2}$$

Diffusion Compton Inverse : cinématique

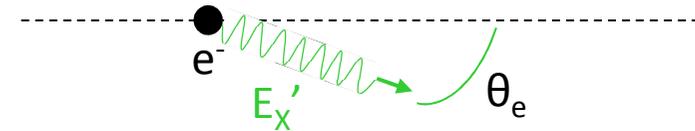
Laboratoire \rightarrow $\left\{ \begin{array}{l} \text{électron} \rightarrow \gamma \\ \text{photon} \rightarrow E_{ph} \end{array} \right.$



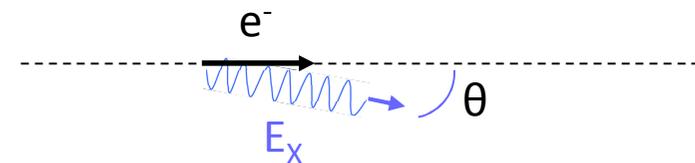
Réf. e⁻ au repos $\rightarrow E_{ph}' \sim \gamma (1+\beta) E_{ph}$
 1^{er} boost



Diffusion Compton ($E_{ph} \ll m_e$) $\rightarrow E_{X}' \sim E_{ph}'$



Laboratoire $\rightarrow E_X \sim \gamma [1+\beta \cos(\theta_e)] E_X'$
 2^{ème} boost



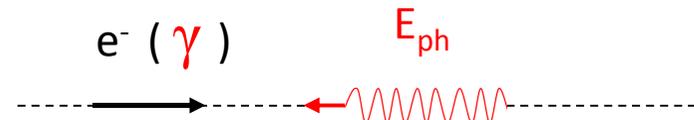
$$E_X \sim \gamma^2 E_{ph} (1+\beta) [1+\beta \cos(\theta_e)]$$

\rightarrow "Accélérateur de photons"

$$\gamma \gg 1, \theta \ll 1 \rightarrow E_X \sim \frac{4 \gamma^2 E_{ph}}{1 + (\gamma\theta)^2}$$

Diffusion Compton Inverse : cinématique

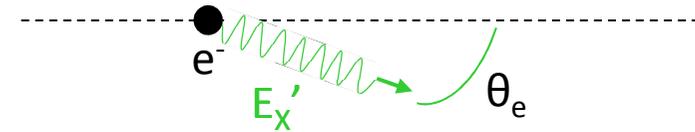
Laboratoire \rightarrow $\left\{ \begin{array}{l} \text{électron} \rightarrow \gamma \\ \text{photon} \rightarrow E_{ph} \end{array} \right.$



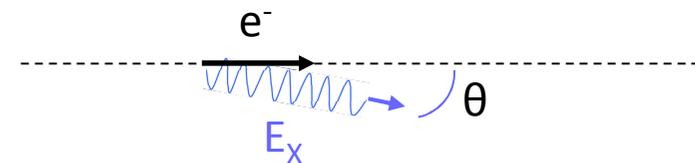
Réf. e- au repos $\rightarrow E_{ph}' \sim \gamma (1+\beta) E_{ph}$
 \uparrow
 1^{er} boost



Diffusion Compton ($E_{ph} \ll m_e$) $\rightarrow E_{X}' \sim E_{ph}'$



Laboratoire $\rightarrow E_X \sim \gamma [1+\beta \cos(\theta_e)] E_X'$
 \uparrow
 2^{ème} boost



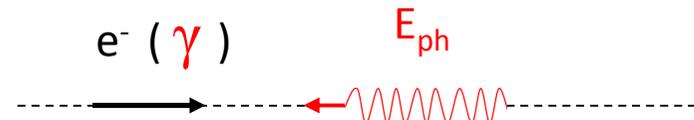
$$E_X \sim \gamma^2 E_{ph} (1+\beta) [1+\beta \cos(\theta_e)]$$

\rightarrow “Accélérateur de photons”

$$\gamma \gg 1, \theta \ll 1 \rightarrow E_X \sim \frac{4 \gamma^2 E_{ph}}{1 + (\gamma\theta)^2}$$

Diffusion Compton Inverse : cinématique

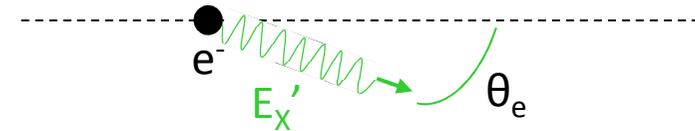
Laboratoire \rightarrow $\left\{ \begin{array}{l} \text{électron} \rightarrow \gamma \\ \text{photon} \rightarrow E_{ph} \end{array} \right.$



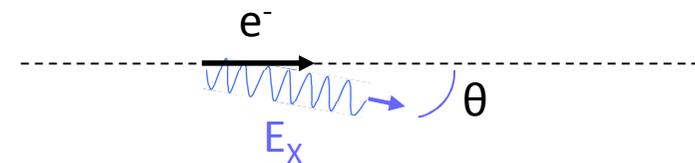
Réf. e- au repos $\rightarrow E_{ph}' \sim \gamma (1+\beta) E_{ph}$
 1^{er} boost



Diffusion Compton ($E_{ph} \ll m_e$) $\rightarrow E_X' \sim E_{ph}'$



Laboratoire $\rightarrow E_X \sim \gamma [1+\beta \cos(\theta_e)] E_X'$
 2^{ème} boost



$$E_X \sim \gamma^2 E_{ph} (1+\beta) [1+\beta \cos(\theta_e)]$$

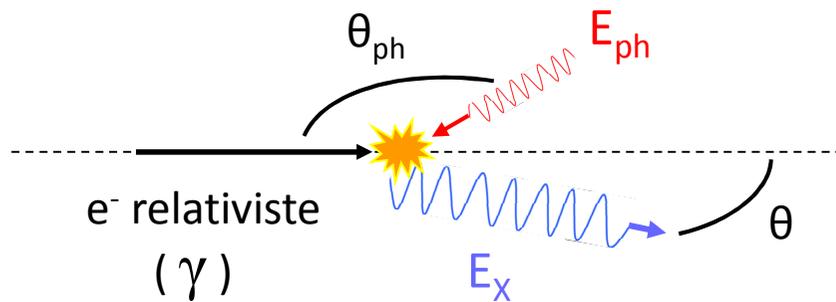
\rightarrow "Accélérateur de photons"

$$\gamma \gg 1, \theta \ll 1 \rightarrow E_X \sim \frac{4 \gamma^2 E_{ph}}{1 + (\gamma\theta)^2}$$

Sources Compton Inverse : principe

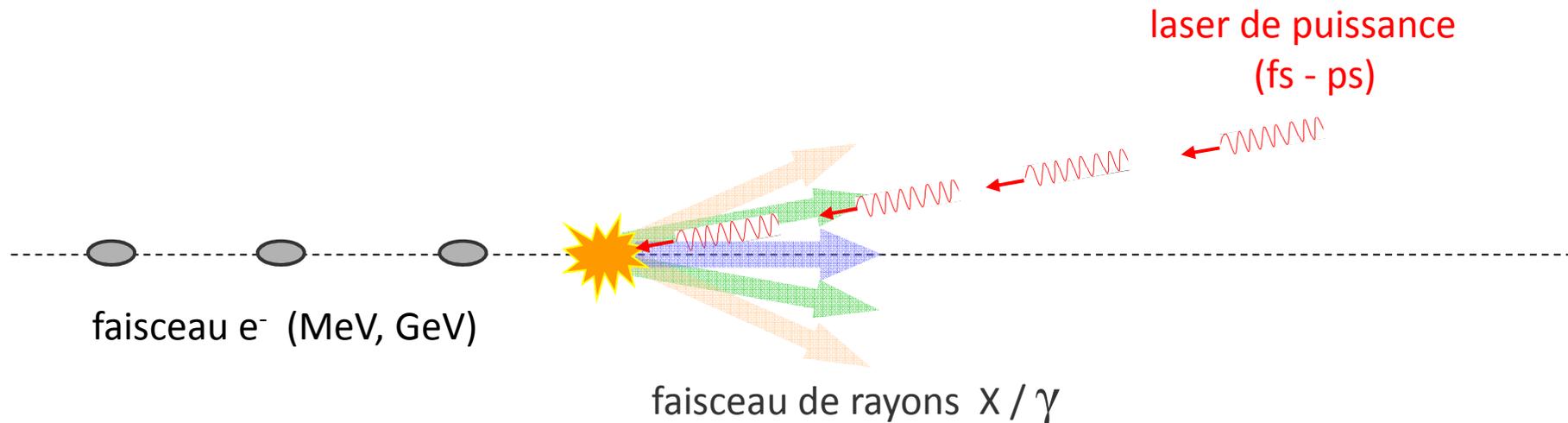
Diffusion Compton Inverse

- $\gamma = E_e/m_e \gg 1$
- $E_{ph} \ll m_e$

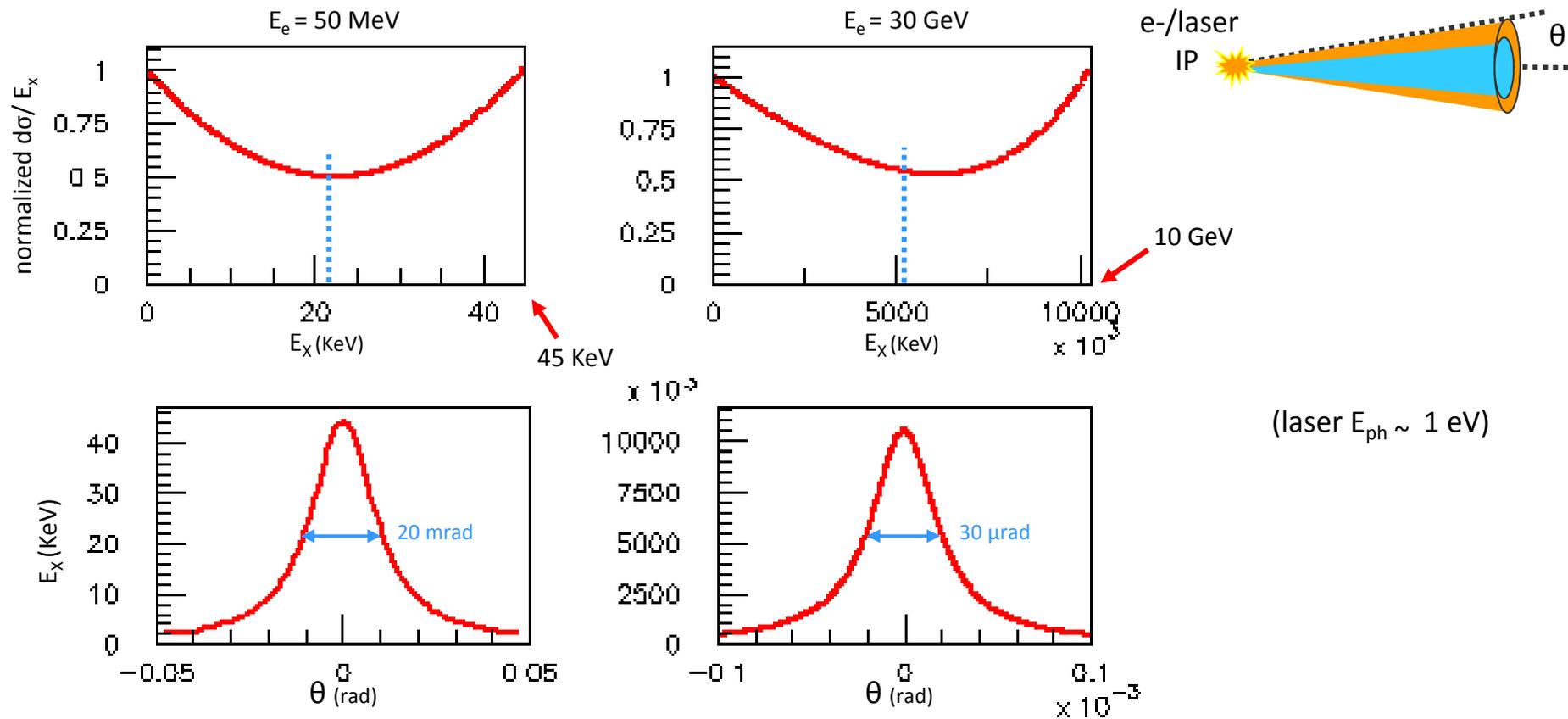


→

$$E_x \sim \frac{2 \gamma^2 E_{ph} [1 - \cos(\theta_{ph})]}{1 + (\gamma\theta)^2}$$



Faisceaux Compton Inverse : distributions spectrale / angulaire



- La moitié des photons diffusés sont contenus dans un cône d'ouverture $\sim 1/\gamma$ (demi-angle)

- Dépendance univocale entre E_x and θ

1. Contexte
2. Sources Compton inverse (ICS)
- 3. Caractéristiques/Spécifications d'une ICS compacte**
→ Illustration par quelques projets
4. Potentiel d'applications

Caractéristiques/spécifications d'une ICS compacte haut flux

- ▶ **Compacité** (surface $\sim 100 \text{ m}^2$)

→ Intégration dans un hôpital, un labo, un musée

- ▶ **Energie des X accordable**

- ▶ **Polarisation des X contrôlée**

- ▶ **Flux** $\sim 10^{12} - 10^{14}$ ph / sec

- ▶ **Brillance** $\sim 10^{12} - 10^{15}$ ph / sec / mm^2 / 0.1% bw / mrad^2

- ▶ **Durée des pulses** \sim ps , sub-ps

- ▶ **Cohérence transverse**

Chromaticité des X accordable

$$E_X \sim E_e^2 E_{ph}$$

L'énergie maximum des X (Compton edge) peut “facilement” être accordée en changeant l'énergie des électrons et/ou du laser.

Contrôle de la polarisation des X

- ▶ La polarisation des X est déterminée par celle du laser.
- ▶ Le degré de polarisation est maximum au Compton edge (sur l'axe) où les photons diffusés retiennent la polarisation initiale du laser.

Intensité et qualité du faisceau d'X

Intensité

- Flux

Qualité

- Brillance
- Durée des pulses
- Cohérence transverse

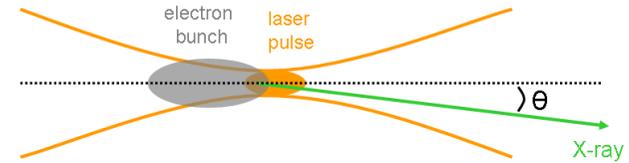
La qualité du faisceau d'X dépend

- des caractéristiques du faisceau d'électrons et du laser,
- **est essentiellement dominée par la cinématique des électrons**

Flux

$$\text{Flux} = N_x / \text{sec} = L \sigma_{\text{compt}}$$

$$6.6 \cdot 10^{-29} \text{ m}^2$$



$$L \sim \frac{N_e N_\gamma f_{\text{rep}}}{2\pi (\sigma_e^2 + \sigma_\gamma^2)} \quad (\text{collisions frontales})$$

N_e → nb d'e⁻ par bunch

N_γ → nb de photons par pulse

f_{rep} → fréquence de répétition de l'interaction

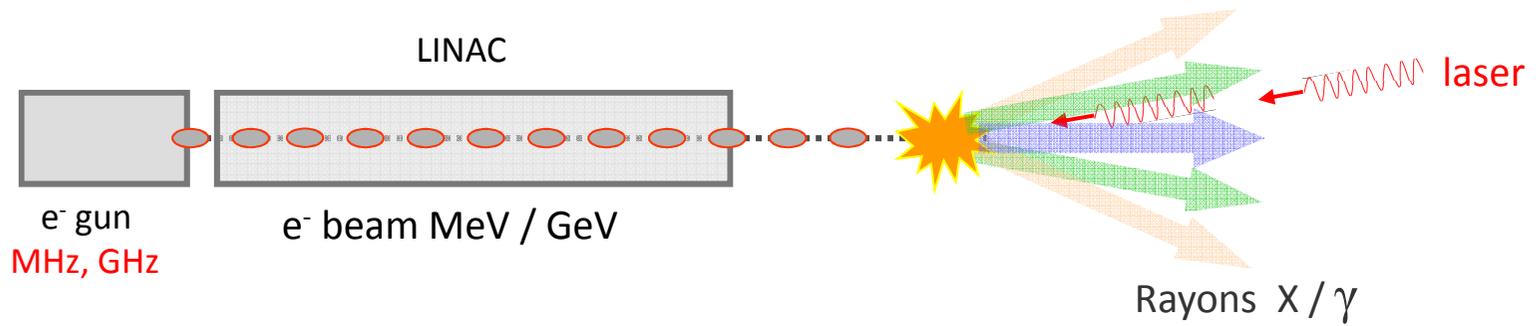
σ_e → taille transverse des bunches d'e⁻

σ_γ → waist du laser (~ taille transverse à l'IP)

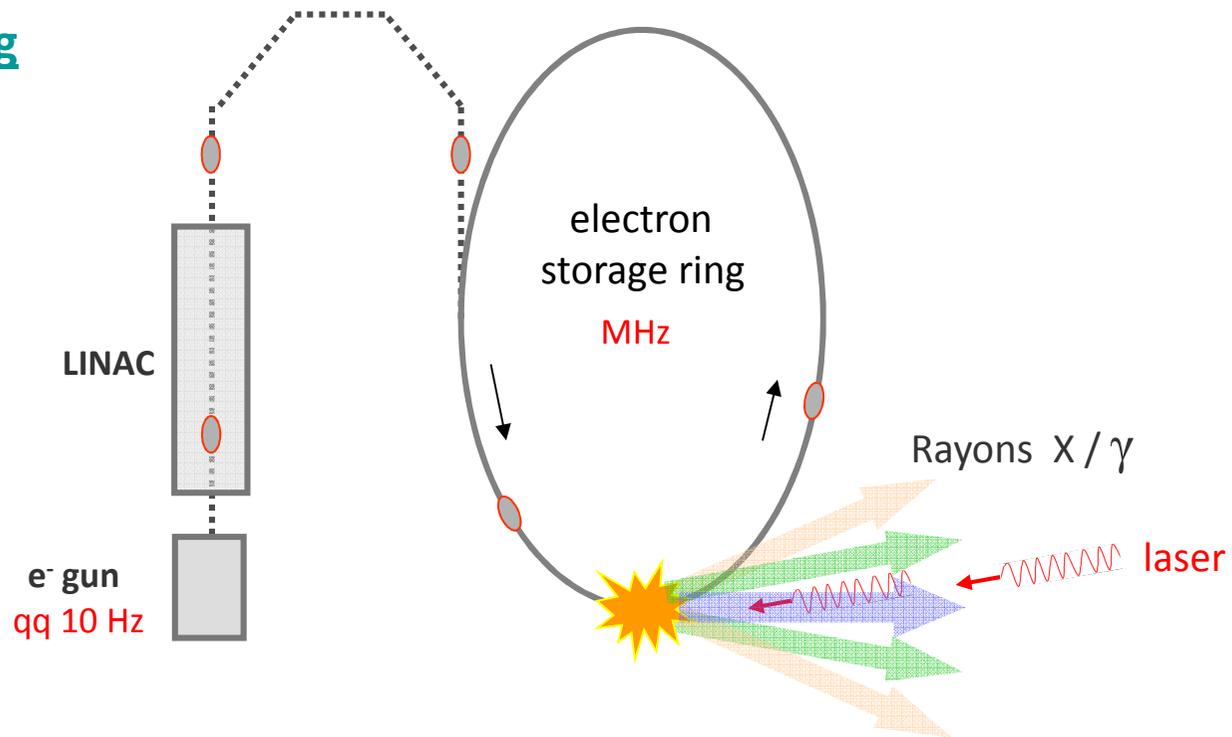
Haut flux → bcp de photons, bcp d'électrons, petites tailles de faisceaux, **grande** f_{rep}

Flux \rightarrow augmenter f_{rep} \rightarrow 2 schémas de base

Linac



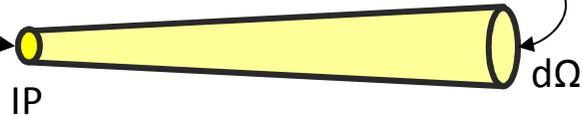
Storage Ring



Brillance

(= la qualité du faisceau)

$$Br_x = \frac{\text{Flux}}{(\text{mm}^2 \text{ source}) (\text{energy bin}) (\text{mrad})^2}$$

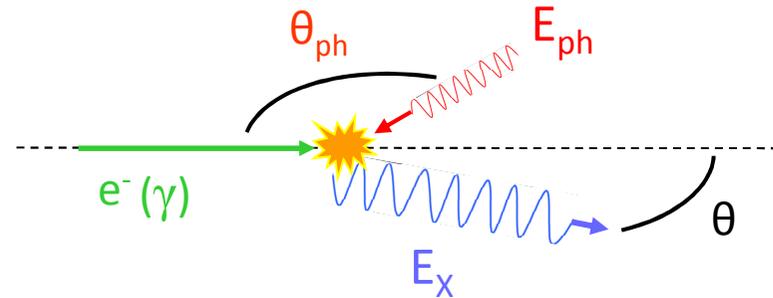


$$Br_x \sim \frac{\text{Flux}}{(\text{mm}^2 \text{ source}) (dE_x/E_x) (\text{mrad})^2}$$

(dE_x/E_x = largeur de bande spectrale des X)

$dE_x/E_x \rightarrow$ Dispersion en énergie
Divergence du laser et du faisceau d'e⁻

$$E_x \sim \frac{2 \gamma^2 E_{ph} [1 - \cos(\theta_{ph})]}{1 + (\gamma\theta)^2}$$



Laser :

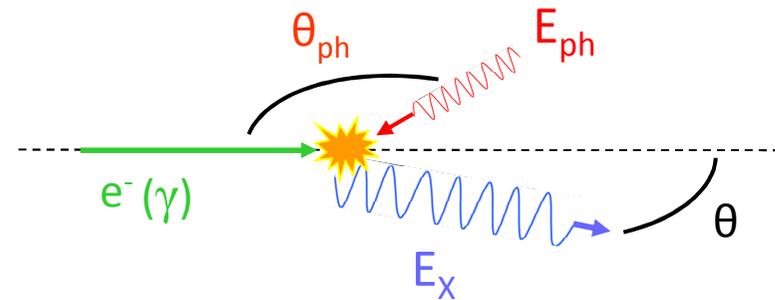
Dispersion en énergie $\rightarrow E_{ph} + dE_{ph} \rightarrow dE_x / E_x \sim dE_{ph} / E_{ph}$

Laser de haute qualité $\rightarrow dE_x / E_x \sim 10^{-3}$

Divergence $\rightarrow \theta_{ph} + d\theta_{ph} \rightarrow dE_x / E_x \sim \frac{1}{4} (d\theta_{ph})^2 \sim \frac{1}{4} \left(\frac{\lambda}{\pi w} \right)^2$ (frontales)

$\lambda = 1 \mu\text{m}, w = 40 \mu\text{m} \rightarrow dE_x / E_x \sim 10^{-5}$

$$E_x \sim \frac{2 \gamma^2 E_{ph} [1 - \cos(\theta_{ph})]}{1 + (\gamma\theta)^2}$$



Laser :

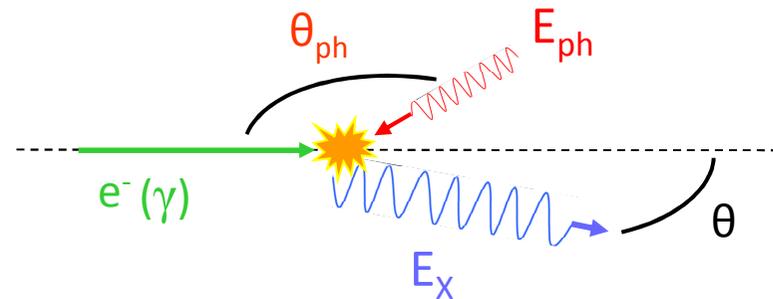
Dispersion en énergie $\rightarrow E_{ph} + dE_{ph} \rightarrow dE_x / E_x \sim dE_{ph} / E_{ph}$

Laser de haute qualité $\rightarrow dE_x / E_x \sim 10^{-3}$

Divergence $\rightarrow \theta_{ph} + d\theta_{ph} \rightarrow dE_x / E_x \sim \frac{1}{4} (d\theta_{ph})^2 \sim \frac{1}{4} \left[\frac{\lambda}{\pi w} \right]^2$ (frontales)

$\lambda = 1 \mu\text{m}, w = 40 \mu\text{m} \rightarrow dE_x / E_x \sim 10^{-5}$

$$E_x \sim \frac{2 \gamma^2 E_{ph} [1 - \cos(\theta_{ph})]}{1 + (\gamma\theta)^2}$$



Electrons :

$$\text{Dispersion en énergie} \rightarrow \gamma + d\gamma \rightarrow dE_x / E_x \sim 2 d\gamma / \gamma$$

$$e^- \text{ de haute qualité} \rightarrow dE_x / E_x \sim 10^{-3}$$

$$\text{Divergence} \rightarrow \sigma'_e \rightarrow dE_x / E_x \sim (\gamma \sigma'_e)^2$$

Emittance :

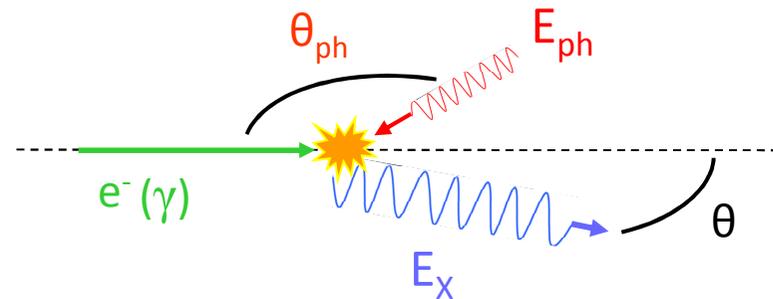
$$\mathcal{E} \sim \sigma_e \sigma'_e \text{ (m.rad)} \sim (\text{taille transverse}) \cdot (\text{divergence}) \rightarrow dE_x / E_x \sim (\mathcal{E}_N / \sigma_e)^2$$

$$\mathcal{E}_N = \gamma \mathcal{E} \text{ (accélérateurs standards : } \mathcal{E}_N \sim qq \cdot 10^{-6} \text{)}$$

$$\text{Paquets d}'e^- \text{ 20 } \mu\text{m} \quad \bullet \quad \mathcal{E}_N \sim 1 \cdot 10^{-6} \text{ m.rad} \quad \rightarrow \quad dE_x / E_x \sim 2.5 \cdot 10^{-3}$$

$$\bullet \quad \mathcal{E}_N \sim 3 \cdot 10^{-6} \text{ m.rad} \quad \rightarrow \quad dE_x / E_x \sim 2.2 \cdot 10^{-2}$$

$$E_x \sim \frac{2 \gamma^2 E_{ph} [1 - \cos(\theta_{ph})]}{1 + (\gamma\theta)^2}$$



Electrons :

Dispersion en énergie $\rightarrow \gamma + d\gamma \rightarrow dE_x / E_x \sim 2 d\gamma / \gamma$

e^- de haute qualité $\rightarrow dE_x / E_x \sim 10^{-3}$

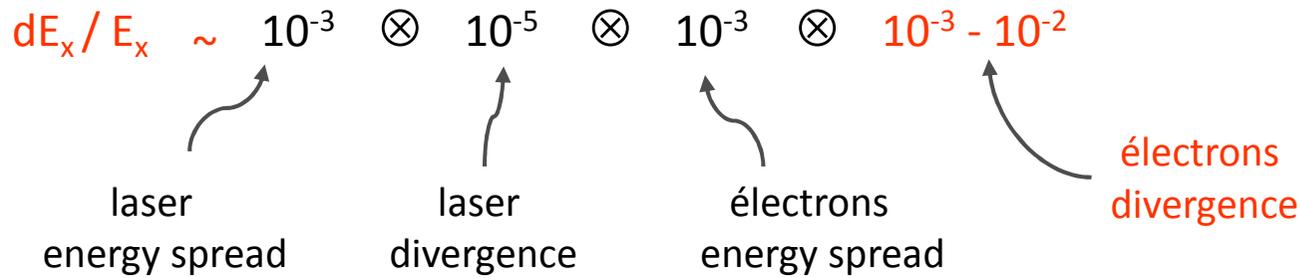
Divergence $\rightarrow \sigma'_e \rightarrow dE_x / E_x \sim (\gamma \sigma'_e)^2$

Emittance :

$\mathcal{E} \sim \sigma_e \sigma'_e$ (m.rad) \sim (taille transverse) \cdot (divergence) $\rightarrow dE_x / E_x \sim (\mathcal{E}_N / \sigma_e)^2$

$\mathcal{E}_N = \gamma \mathcal{E}$ (accélérateurs standards : $\mathcal{E}_N \sim qq \cdot 10^{-6}$)

- Paquets d' e^- 20 μm
- $\mathcal{E}_N \sim 1. \cdot 10^{-6}$ m.rad $\rightarrow dE_x / E_x \sim 2.5 \cdot 10^{-3}$
 - $\mathcal{E}_N \sim 3. \cdot 10^{-6}$ m.rad $\rightarrow dE_x / E_x \sim 2.2 \cdot 10^{-2}$



→ ... retour à la brillance

$$Br_x \sim \frac{\text{Flux}}{(\text{mm}^2 \text{ source}) (dE_x/E_x) (\text{mrad})^2} \sim \frac{\text{Flux} \cdot \gamma^2}{\epsilon_N^2}$$

- ▶ L'émittance du faisceau d'électron est un paramètre crucial pour la brillance
 - Petites tailles de faisceaux pour produire un haut Flux
 - MAIS pas aux dépends de la divergence pour ne pas diminuer la brillance

(spectre sur l'axe)

- collisions frontales
- e⁻ 50 MeV
- laser λ = 1030 nm

A émittance fixée :

Diminuer la taille transverse des bunchs d'e⁻

→ augmentation du flux

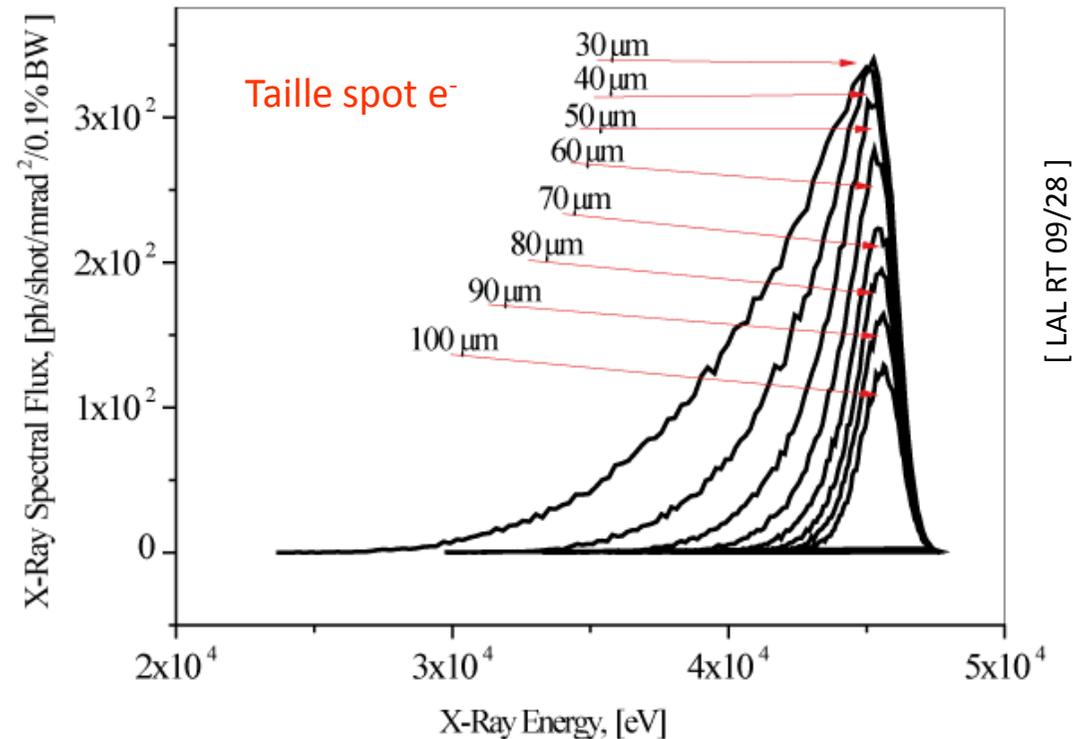
MAIS

→ Augmente aussi la divergence du faisceau d'e⁻

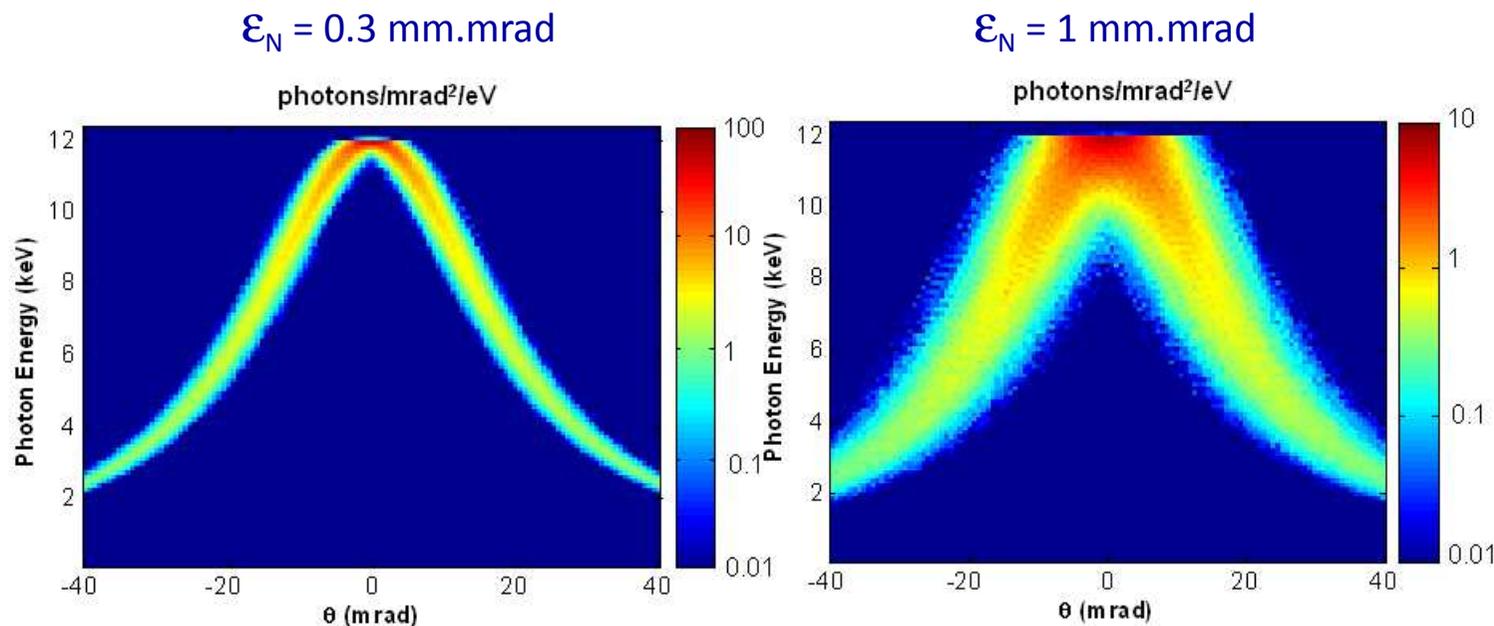
→ Elargissement de la distribution spectrale des X

$$\epsilon_N \sim 5 \cdot 10^{-6} \text{ m.rad (fixed)}$$

RTX Spectra for various electron focus size



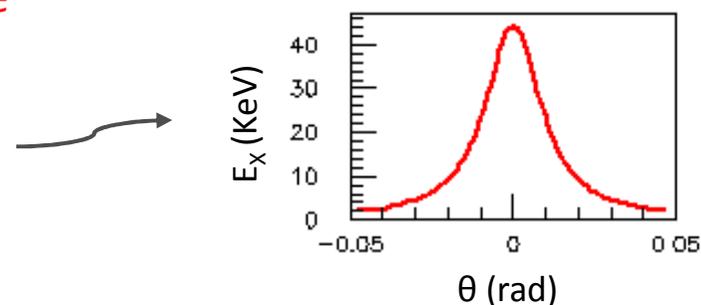
[LAL RT 09/28]



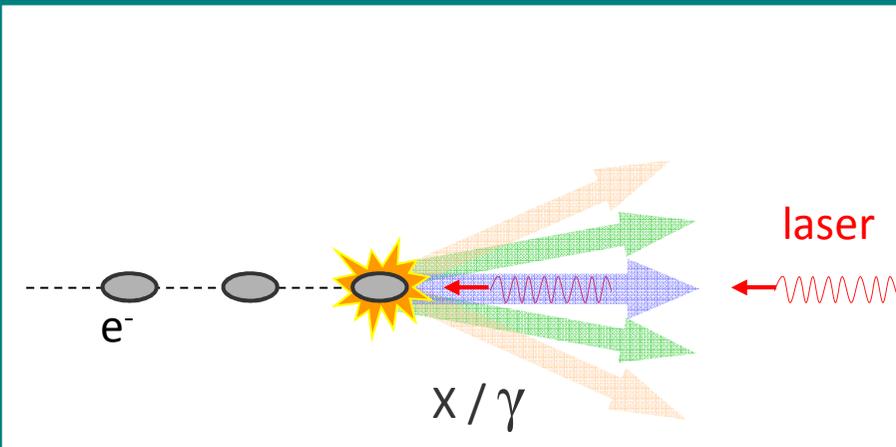
[W.S. Graves, Alghero Workshop 2008]

→ La brillance du faisceau d’X est **la convolution entre**

- le spectre théorique venant de la cinématique du processus Compton d’un photon X généré par un électron parfait
- et l’émittance du faisceau d’électrons



Durée des pulses

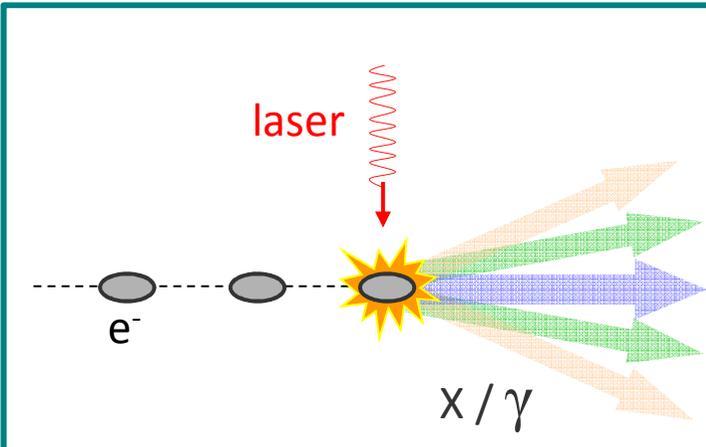


The diagram shows an electron bunch (represented by grey ovals) moving from left to right. A laser pulse (represented by a red wavy arrow) is moving from right to left, colliding head-on with the electron bunch. The interaction point is marked with a yellow starburst and labeled x/γ . The resulting radiation is shown as a fan of colored arrows (orange, green, blue) pointing to the right.

~ durée du bunch d'électrons
pour des **collisions frontales**

→ **0.1 - 10 ps**

selon les caractéristiques
du canon à électrons

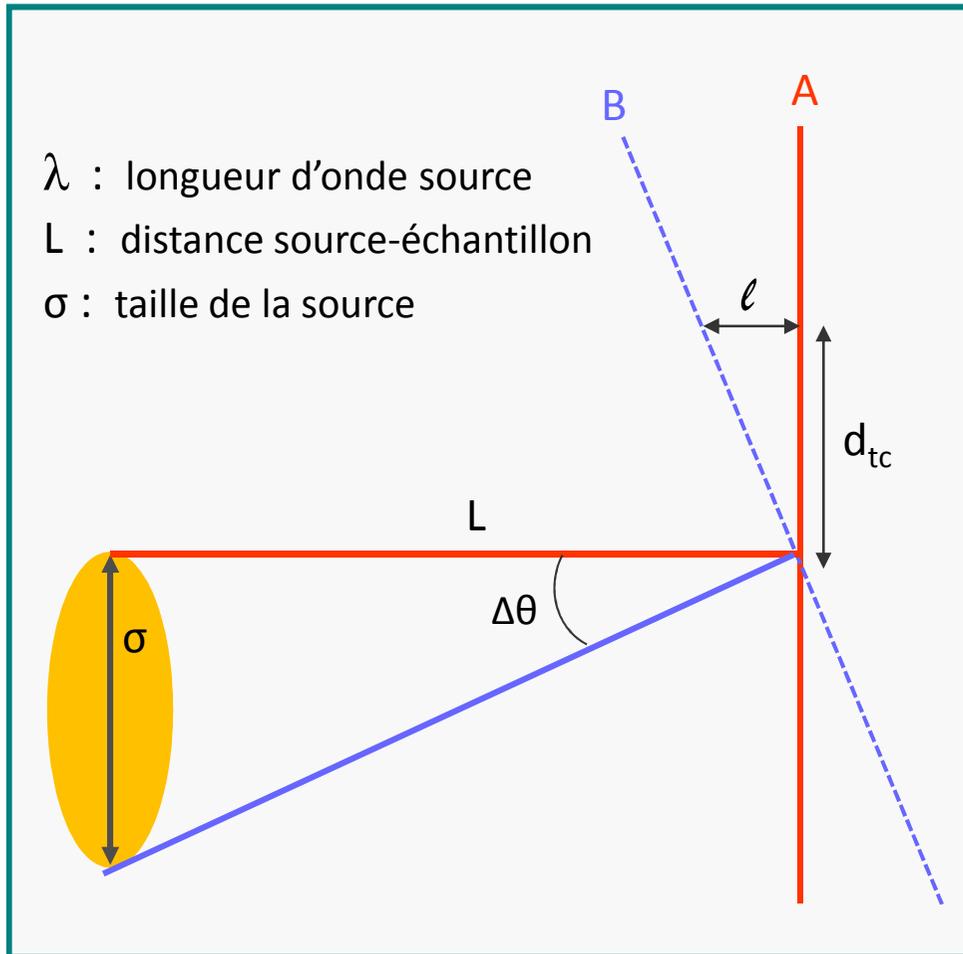


The diagram shows an electron bunch (represented by grey ovals) moving from left to right. A laser pulse (represented by a red wavy arrow) is moving downwards, colliding at a 90-degree angle with the electron bunch. The interaction point is marked with a yellow starburst and labeled x/γ . The resulting radiation is shown as a fan of colored arrows (orange, green, blue) pointing to the right.

~ temps de transit interaction
pour des **collisions à 90°**

→ **pulses ultra-courts < 100 fs**

Cohérence transverse



Pour que les fronts d'onde A et B arrivent en phase

$$\rightarrow l \sim \lambda$$

$$d_{tc} \sim l / \Delta\theta \quad \rightarrow \quad d_{tc} \sim \frac{\lambda L}{\sigma}$$
$$\Delta\theta \sim \sigma / L$$

$$d_{tc} \sim \frac{L}{\sigma E_x (\text{KeV})} \quad (1.23 \cdot 10^{-9})$$

- X de 40 KeV
- 20 m source - échantillon

$$\rightarrow \sigma \sim 20 \mu\text{m} \quad \rightarrow \quad d_{tc} \sim 30 \mu\text{m}$$

Ordres de grandeurs

$$\text{Flux} \sim \frac{N_e N_\gamma f_{\text{rep}} \sigma_{\text{compt}}}{2\pi (\sigma_e^2 + \sigma_\gamma^2)}$$

$$\text{Br}_x \sim \frac{\text{Flux} \cdot \gamma^2}{\epsilon_N^2}$$

Typiquement, pour obtenir

- Flux $\sim 10^{12} - 10^{14}$
- Br $\sim 10^{12} - 10^{15}$
- Cohérence transverse



$$\left[\begin{array}{l} N_e \rightarrow 0.01 - 1 \text{ nC} \\ \epsilon_N \rightarrow 0.5-10 \text{ mm.mrad} \\ \sigma_e \rightarrow 5 - 100 \mu\text{m} \\ \\ N_\gamma \rightarrow > 10 \text{ mJ / pulse} \\ \sigma_\gamma \rightarrow 10 - 100 \mu\text{m} \end{array} \right.$$

Ordres de grandeurs

$$\text{Flux} \sim \frac{N_e N_\gamma f_{\text{rep}} \sigma_{\text{compt}}}{2\pi (\sigma_e^2 + \sigma_\gamma^2)}$$

$$\text{Br}_x \sim \frac{\text{Flux} \cdot \gamma^2}{\epsilon_N^2}$$

Typiquement, pour obtenir

- Flux $\sim 10^{12} - 10^{14}$
- Br $\sim 10^{12} - 10^{15}$
- Cohérence transverse

→ Augmenter la fréquence de répétition
du laser et des électrons

Recirculation du laser
→ **Cavité Fabry-Perot**

- 1) Augmenter la freq. de répétition
de la **source d'électrons**
- 2) Augmenter la fréq. de répétition
avec un **anneau de stockage**

N_e	→	0.01 - 1 nC
ϵ_N	→	0.5-10 mm.mrad
σ_e	→	5 - 100 μm
f_{rep}	→	10 - 100 MHz
N_γ	→	> 10 mJ / pulse
σ_γ	→	10 - 100 μm

Machines ICS (flux 10^{10} ph/sec)

Experiment		Type	Energy	ph/sec	Source size	Pulse
*JAEA	(Kyoto, Japan)	Microtron	0.4 MeV	10^2 (10 Hz)	80 μm	10 ps
*SPRING-8	(Japan)	Ring	10 MeV	10^3		
*TERAS/AIST	(AIST, Japan)	Ring	1-40 MeV	10^4	2 mm	
*Soft Xrays	(Univ. of Waseda)	Linac	0.2-0.5 KeV	10^4 (5 Hz)	200 μm	10 ps
+CXS	(SLAC, Standford)	Linac	20-85 KeV		95 μm	ps
*LSS	(BNL/ATF, Brookhaven)	Linac	7 KeV	10^5 (0.03 Hz)	40 μm	4 ps
*LUCX	(KEK, Japan)	Linac	33 KeV	10^5 (12.5 Hz)	40 μm	14 ps
*TTX prelim.	(Tsinghua)	Linac	4.6 KeV	10^5 (5 Hz)	800 μm	6 ns
*FESTA/AIST	(Tsukuba, Japan)	Linac	2.3-4.6 KeV	10^{5-6} (10 Hz)	100 μm	0.3-3 ps
*LCS/AIST	(AIST, Japan)	Linac	20-40 KeV	10^{6-7} (10 Hz)	40 μm	0.2-3 ps
*T-REX/MEGa-ray	(LLNL, Livermore)	Linac	0.1-0.9 MeV	10^6 (10 Hz)	36 μm	16 ps
*PLEIADES	(LLNL, Livermore)	Linac	40-140 KeV	10^8 (10 Hz)	30 μm	0.3-5 ps
*Vanderbilt/MXI	(Tennessee)	Linac	15-50 KeV	10^8 (0.01 Hz)	30 μm	10 ps
*COBALD	(Daresbury)	ERLinac	15-30 KeV	10^7 (10 Hz)	35 μm	0.1-0.4 ps
TTX	(Tsinghua)	Linac	60 KeV	10^8 (10 Hz)	60 μm	1 ps
+Univ. Tokyo	(UTNL, Japan)	Linac	10-40 KeV	10^9 (12.5 Hz)	100 μm	10 ns
+Multi-LCS/AIST	(AIST, Japan)	Linac	10-40 KeV	10^9 (10 Hz)	40 μm	0.2-3 ps
+PLASMON X	(INFN, Italy)	Linac	20-500 KeV	10^{10} (10 Hz)	10 μm	20 ps
MXI	(MXI System)	Linac	8-100 KeV	10^{10} (10 Hz)		

* Machines in operation

+ Machines in construction

La faisabilité du processus de production de rayons X par effet Compton inverse a déjà été démontrée par des expériences actuellement en fonctionnement

mais :

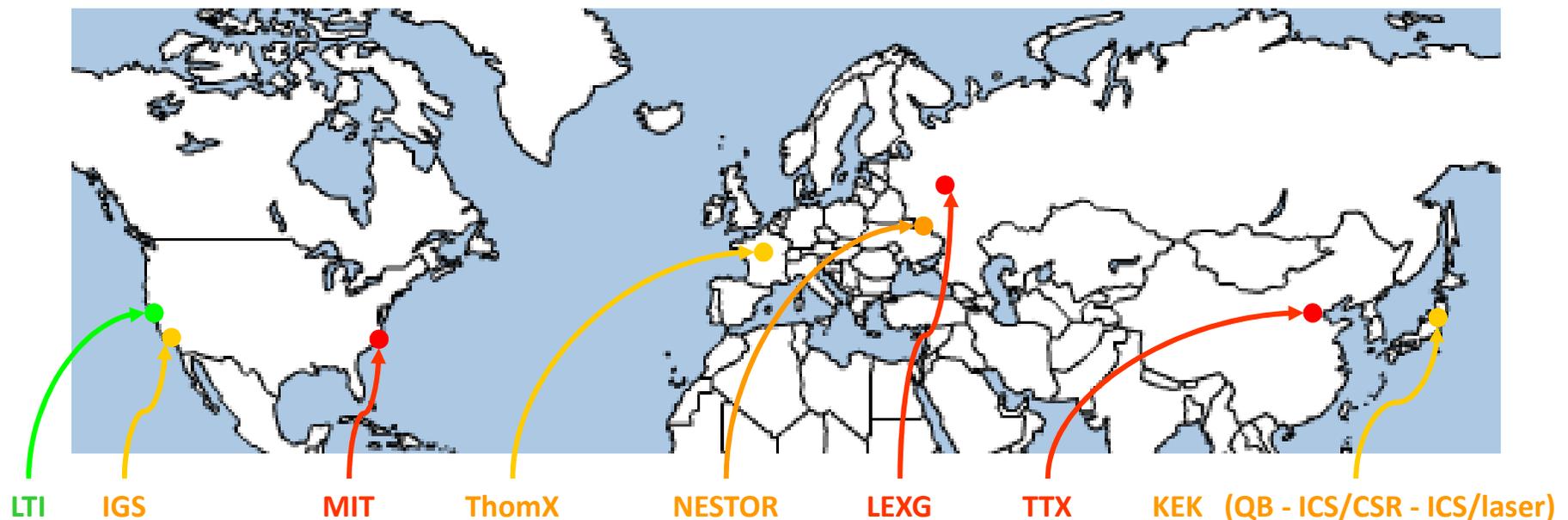
Flux 10^{10} ph/sec et souvent installations de grande taille

Projets d'ICS compactes (flux > 10¹¹ ph/sec)

Experiment		Type	Energy	ph/sec	Source size	Pulse
* LTI	(Lycean Tech.)	Ring	10-20 KeV	10 ¹¹ (80 MHz)	50 μm	
TTX	(Tsinghua)	Ring	20-80 KeV	10 ¹² (25 MHz)	50 μm	10 ps
LEXG	(Moscow, Russia)	Ring	33 KeV	10 ¹²	20 μm	10 ps
+ NESTOR	(NCS KIPT, Kharkov)	Ring	10-900 KeV	10 ¹³ (20 MHz)	80 μm	10 ps
+ ThomX	(Orsay, LAL)	Ring	20-90 KeV	10 ¹³ (20 MHz)	70 μm	10 ps
+ Quantum Beam	(KEK/STF, Japan)	Linac (SC)	~ 35 KeV	10 ¹³ (160 MHz)	10 μm	40 fs
+ ICS/CSR	(KEK/cERL, Japan)	Linac (ERL)	0.04-4 KeV	10 ¹³⁻¹⁴ (1.3 GHz)		0.1-1 ps
+ ICS/laser	(KEK/cERL, Japan)	Linac (ERL)	< 115 KeV	10 ¹³ (130 MHz)	30 μm	3 ps
MIT project	(MIT, Cambridge)	Linac (SC)	3-30 KeV	10 ¹⁴ (100 MHz)	2 μm	1 ps
+ IGS	(RadiaBeam, California)	Linac (SC)	10.8 MeV	10 ¹⁴	7.4 μm	10 ps

* Machines in operation

+ Machines in construction

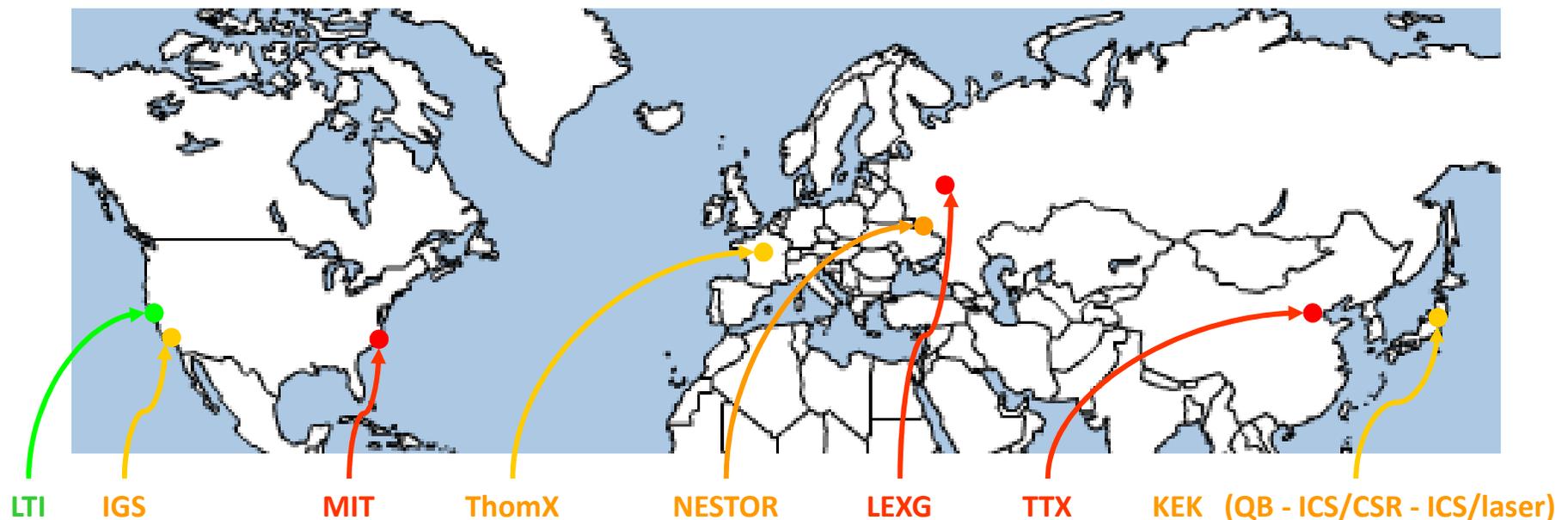


Projets d'ICS compactes (flux > 10¹¹ ph/sec)

Experiment		Type	Energy	ph/sec	Source size	Pulse
* LTI	(Lycean Tech.)	Ring	10-20 KeV	10 ¹¹ (80 MHz)	50 μm	
TTX	(Tsinghua)	Ring	20-80 KeV	10 ¹² (25 MHz)	50 μm	10 ps
LEXG	(Moscow, Russia)	Ring	33 KeV	10 ¹²	20 μm	10 ps
+ NESTOR	(NCS KIPT, Kharkov)	Ring	10-900 KeV	10 ¹³ (20 MHz)	80 μm	10 ps
+ ThomX	(Orsay, LAL)	Ring	20-90 KeV	10 ¹³ (20 MHz)	70 μm	10 ps
+ Quantum Beam	(KEK/STF, Japan)	Linac (SC)	~ 35 KeV	10 ¹³ (160 MHz)	10 μm	40 fs
+ ICS/CSR	(KEK/cERL, Japan)	Linac (ERL)	0.04-4 KeV	10 ¹³⁻¹⁴ (1.3 GHz)		0.1-1 ps
+ ICS/laser	(KEK/cERL, Japan)	Linac (ERL)	< 115 KeV	10 ¹³ (130 MHz)	30 μm	3 ps
MIT project	(MIT, Cambridge)	Linac (SC)	3-30 KeV	10 ¹⁴ (100 MHz)	2 μm	1 ps
+ IGS	(RadiaBeam, California)	Linac (SC)	10.8 MeV	10 ¹⁴	7.4 μm	10 ps

* Machines in operation

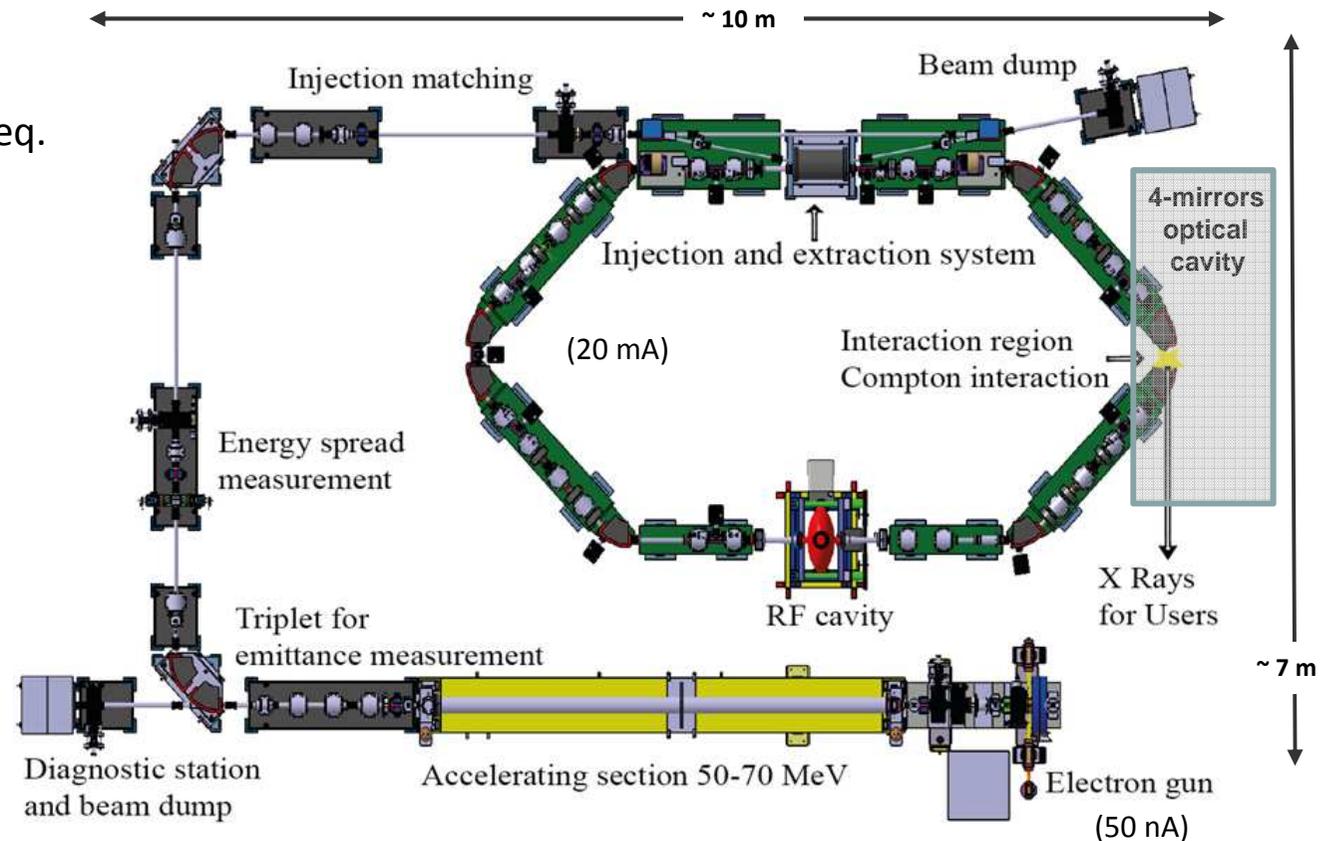
+ Machines in construction



Anneau de stockage : ThomX design



- 1 nc / bunch , 50 Hz inj. freq.
- Anneau, 20 MHz freq.
- $\sigma_e \sim 70 \mu\text{m}$
- $\epsilon_N \sim 2\text{-}20 \text{ mm.mrad}$
- $\tau_e \sim 10\text{-}20 \text{ ps}$



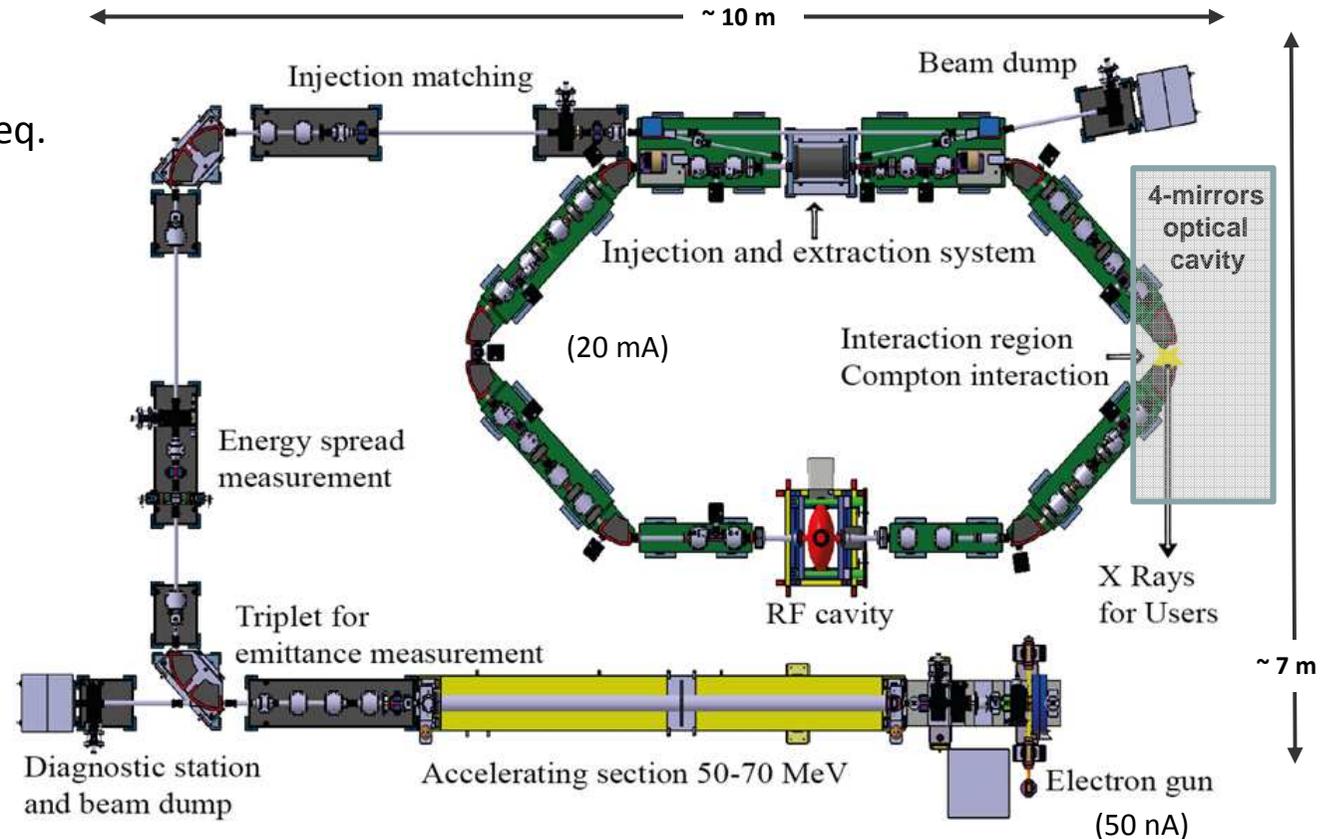
Système Laser /Cavité :

- Laser $\sim 1\text{W}$
- Amplification par fibres optiques (100 W) 2-3 $\mu\text{J/pulse}$
- Amplification cavité optique gain 10000
- 1 MW stocké à l'intérieur de la cavité (20-30 mJ/pulse)

Anneau de stockage : ThomX design



- 1 nc / bunch , 50 Hz inj. freq.
- Anneau, 20 MHz freq.
- $\sigma_e \sim 70 \mu\text{m}$
- $\epsilon_N \sim 2\text{-}20 \text{ mm.mrad}$
- $\tau_e \sim 10\text{-}20 \text{ ps}$



Flux	10^{13}
Brilliance	10^{11}
Pulse	10-20 ps
Source	70 μm

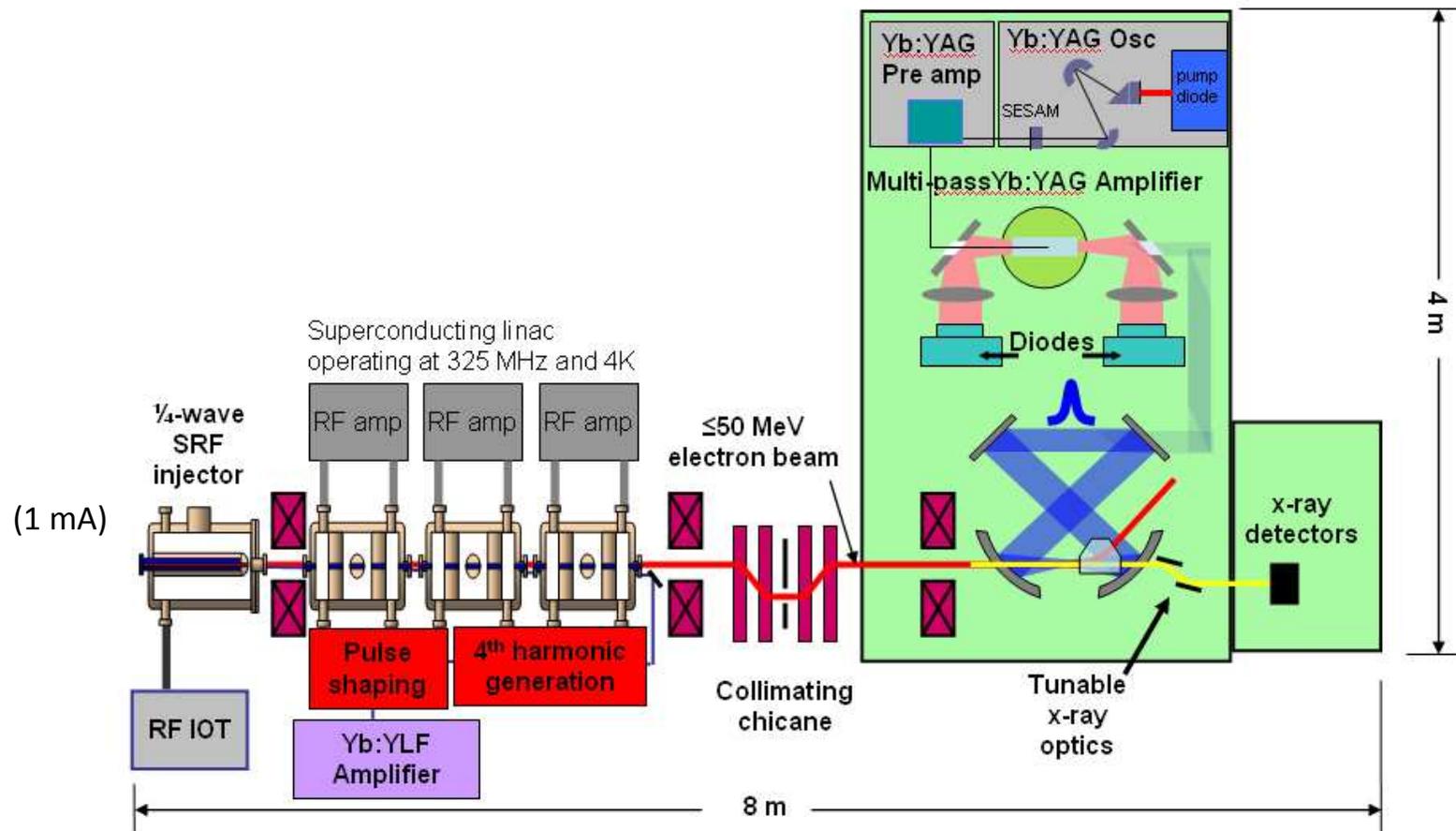
Système Laser /Cavité :

- Laser $\sim 1\text{W}$
- Amplification par fibres optiques (100 W) 2-3 $\mu\text{J/pulse}$
- Amplification cavité optique gain 10000
- 1 MW stocké à l'intérieur de la cavité (20-30 mJ/pulse)

- 0.01 nc / bunch , 100 MHz inj. freq.
- $\sigma_e \sim 2 \mu\text{m}$
- $\epsilon_N \sim 0.1 \text{ mm.mrad}$
- $\tau_e \sim 0.1 \text{ ps}$

Système Laser /Cavity :

- Laser $\sim 10\text{W}$
- Amplification par fibres (cryogenic) (1 KW) $10 \mu\text{J/pulse}$
- Amplification **cavité optique gain 1000**
- 1 MW stock e   l'intérieur de la cavité (10 mJ/pulse)



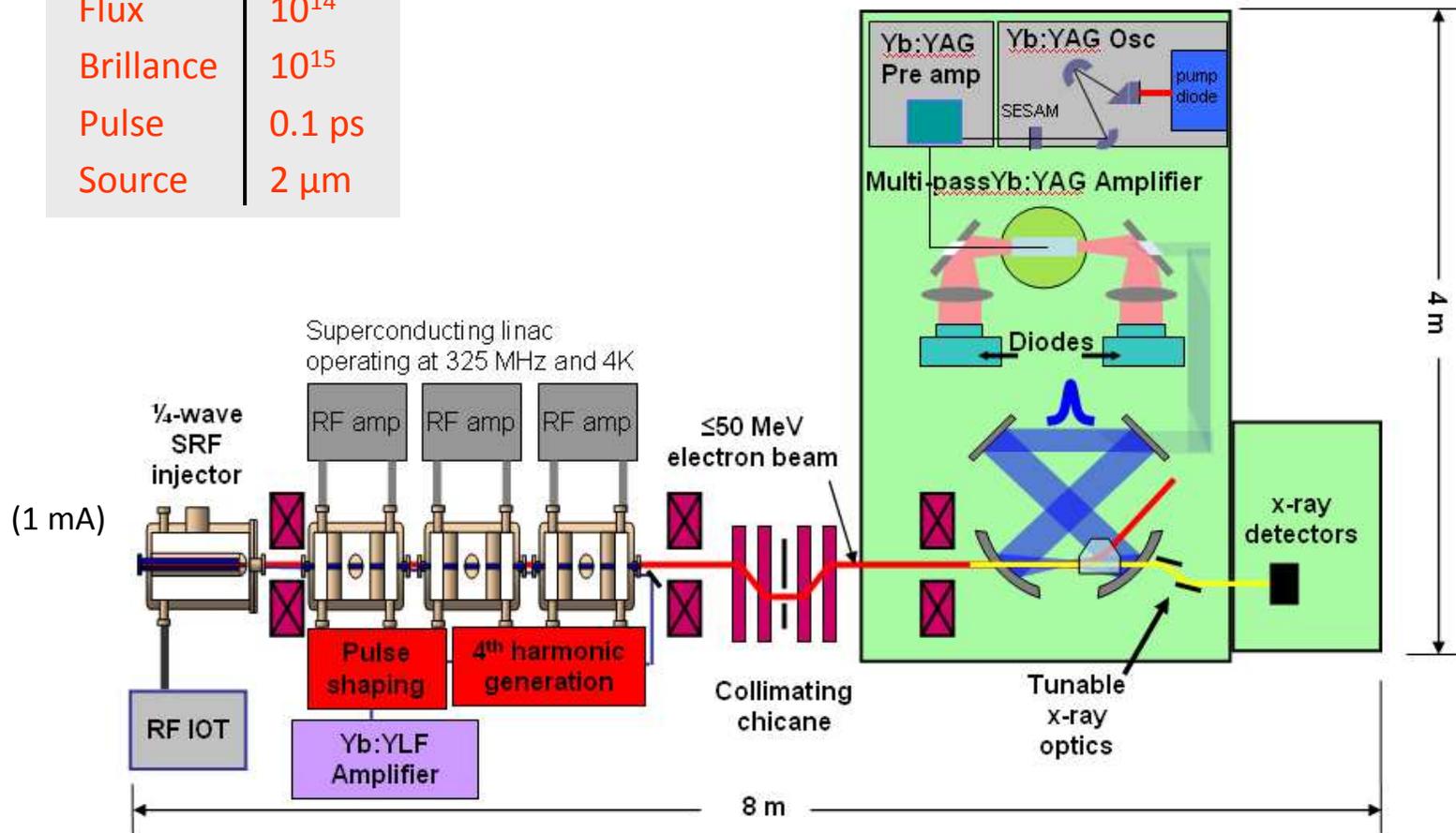
[W.S. Graves, Alghero Workshop 2008]

- 0.01 nc / bunch , 100 MHz inj. freq.
- $\sigma_e \sim 2 \mu\text{m}$
- $\epsilon_N \sim 0.1 \text{ mm.mrad}$
- $\tau_e \sim 0.1 \text{ ps}$

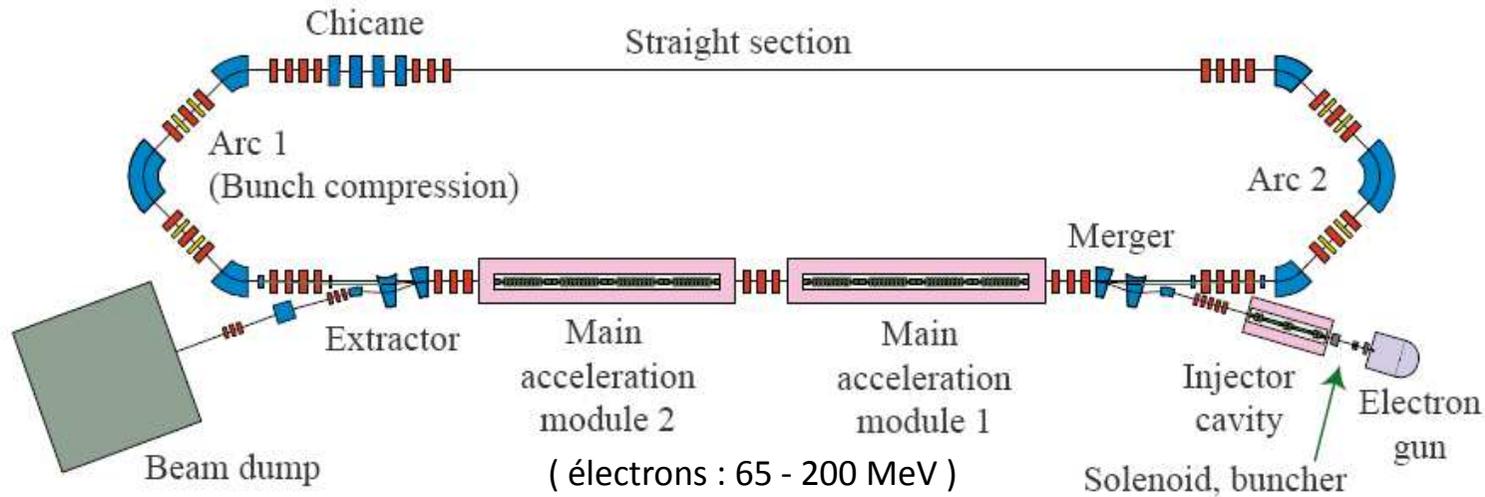
Système Laser /Cavity :

- Laser $\sim 10\text{W}$
- Amplification par fibres (cryogenic) (1 KW) $10 \mu\text{J/pulse}$
- Amplification **cavité optique gain 1000**
- 1 MW stocké à l'intérieur de la cavité (10 mJ/pulse)

Flux	10^{14}
Brilliance	10^{15}
Pulse	0.1 ps
Source	$2 \mu\text{m}$



[W.S. Graves, Alghero Workshop 2008]



[Proc. EPAC 2008, MOPC061]

Collisions frontales (2-3 $\mu\text{J}/\text{pulse}$, FP gain 3000)

- 0.01 nC / bunch , 130 MHz inj. freq.
- $\sigma_e \sim 30 \mu\text{m}$
- $\epsilon_N \sim 0.1 \text{ mm.mrad}$
- $\tau_e \sim 3 \text{ ps}$

Flux	10^{13}
Brilliance	10^{15}
Pulse	3 ps
Source	30 μm

90° collisions (10 mJ/pulse)

- 0.1 nc / bunch , 1 KHz rep. freq.
- $\sigma_e \sim 20 \mu\text{m}$
- $\epsilon_N \sim 1 \text{ mm.mrad}$
- $\tau_e \sim 1 \text{ ps}$

Flux	10^7
Brilliance	10^7
Pulse	0.1 ps
Source	20 μm

[NIM A 608, S57-S61, 2009]

Machines type Linac → supra → Principaux challenges techniques

- ▶ Construction/validation d'un **canon e⁻** supra fournissant :
 - une **émittance** extrêmement petite
 - une très haute fréquence de répétition (~ 100 MHz – 1 GHz)
 - des pulses ultra-courts (~ 100 fs)

- ▶ Construction/validatation du **système d'amplification des pulses laser** par fibre refroidi (~ 1 kW puissance moyenne)

- ▶ Difficultés liées à la radioprotection :
 - MIT : 0.01 nc / bunch , 100 MHz, 40 MeV → 40 KW
 - (ThomX : 1 nc / bunch , 50 Hz, 50 MeV → 2.5 W)

1. Contexte
2. Sources Compton inverse (ICS)
3. Caractéristiques/Spécifications d'une ICS compacte
→ Illustration par quelques projets
4. **Potentiel d'applications**

Potentiel d'applications

- **Science biomédicale**
- **Préservation de l'héritage culturel**
- **Science des matériaux, industrie**

→ Des spécifications du faisceau d'X sont requises pour une technique d'analyse donnée sur un échantillon donné

- Flux sur l'objet (œuvre d'art, cristaux, animaux ...)
- $bw \Delta E/E$
- Cohérence transverse
- Durée des pulses

Techniques d'analyse

1. **Imagerie / Tomographie**

2. **Spectroscopie (diffraction)**

(Phénomènes d'absorption, diffusion, fluorescence)

Méthodes non destructives

1. Imagerie

Interactions onde/matière décrites par l'indice de réfraction

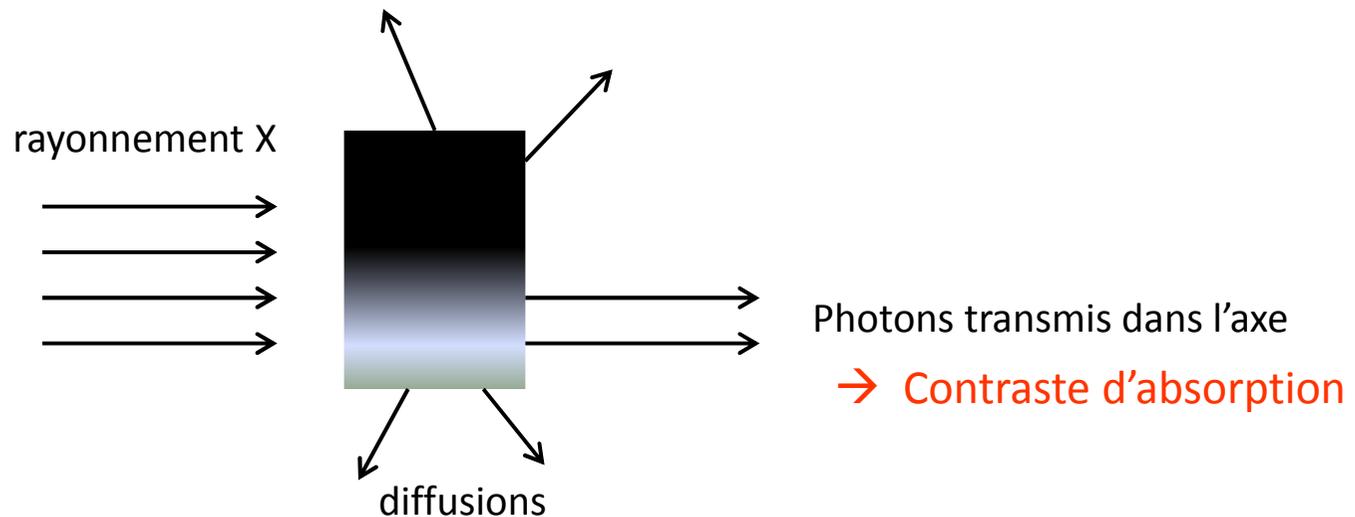
$$N = n_R + i n_A$$

Phénomènes de
→ réfraction
→ diffraction
→ interférences

(effets liés à la phase de l'onde)

**Contraste
d'absorption**

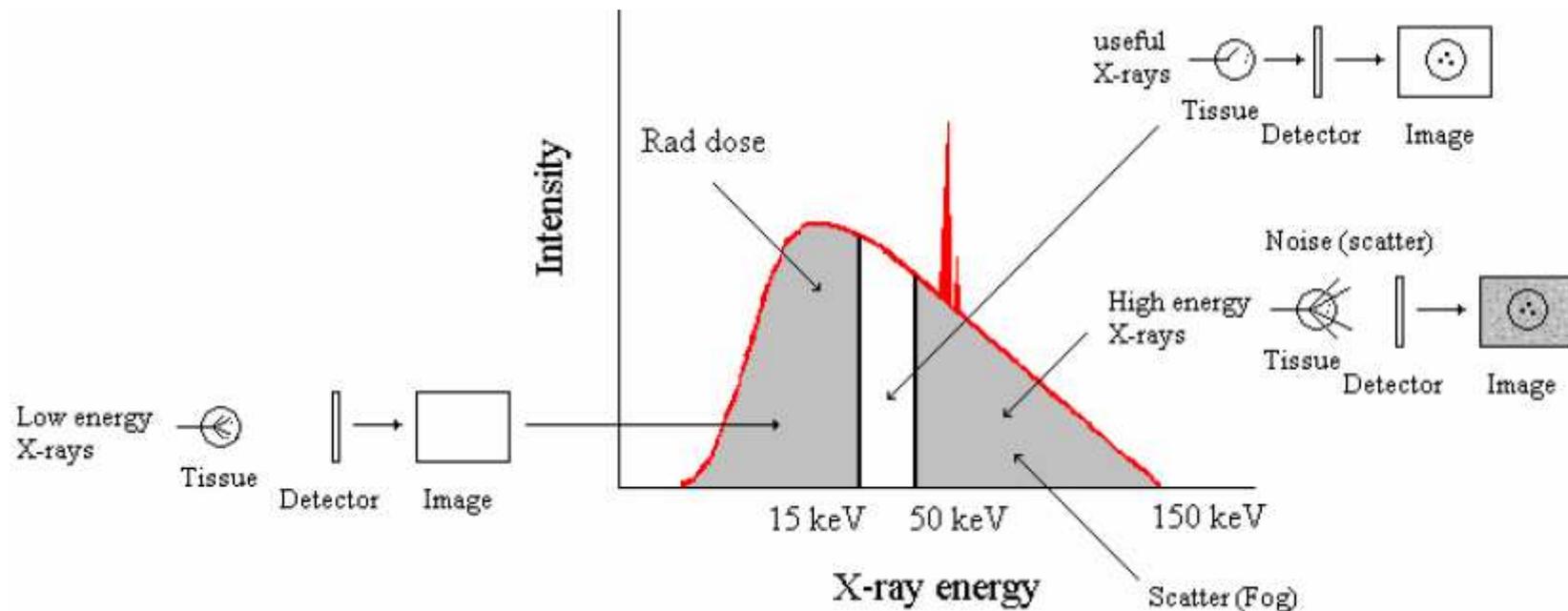
Dépend de - la longueur d'onde des X
- la nature des éléments



Radio conventionnelle

Tubes X

- faisceau polychromatique
- x-ray < 15 KeV absorbés par la peau et les tissus → dose reçue augmentée
- x-ray haute énergie → diffusions → qualité de l'image réduite

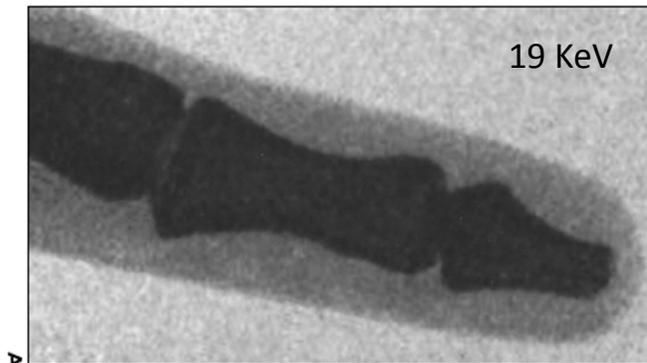


Radio conventionnelle

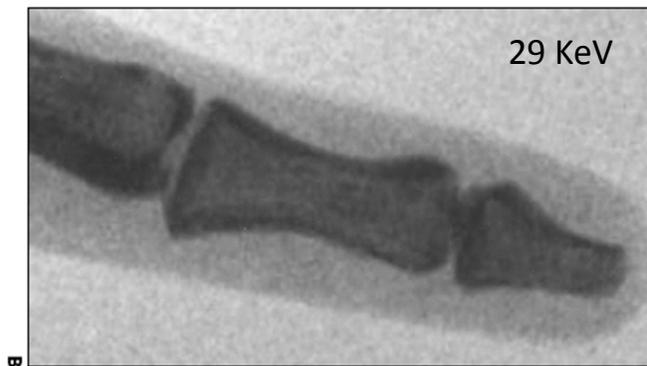
Sources ICS

- faisceau "monochromatisable"
- énergie accordable → réduction de la dose reçue et qualité de l'image ↑

Images obtenues à partir d'un seul pulse de 8 psec (MXI / Vanderbilt)



- Tissus mous bien visible
- Os opaque



- Os transparents aux rayons X, révélant le cortex
- Tissus mous moins distincts

[AJR, 181, 2003, 1197]

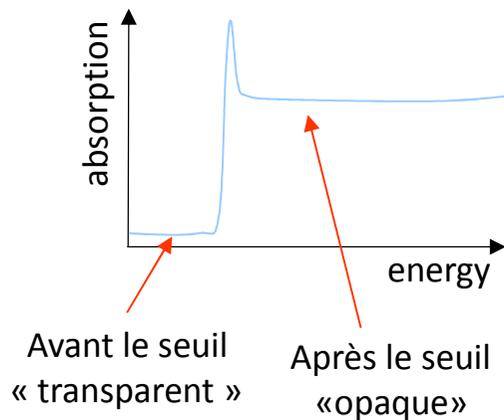
K-edge absorption

► Imagerie au seuil K d'un élément

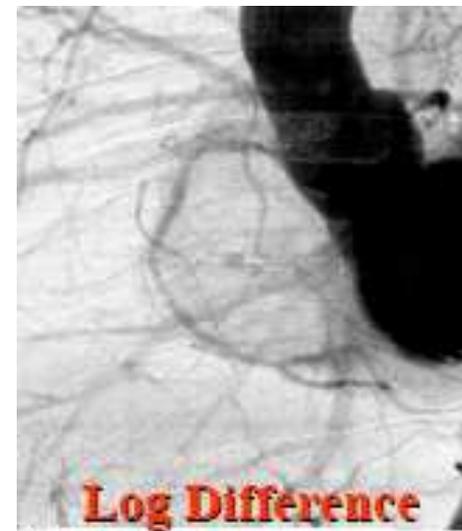
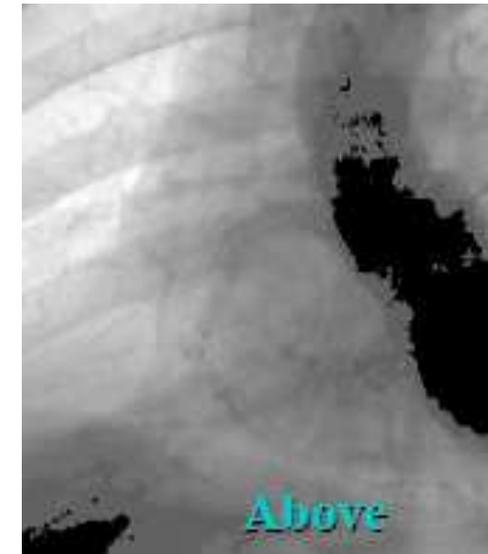
(ou agent de contraste)

Iode : 33.2 KeV

Gadolinium : 50 KeV



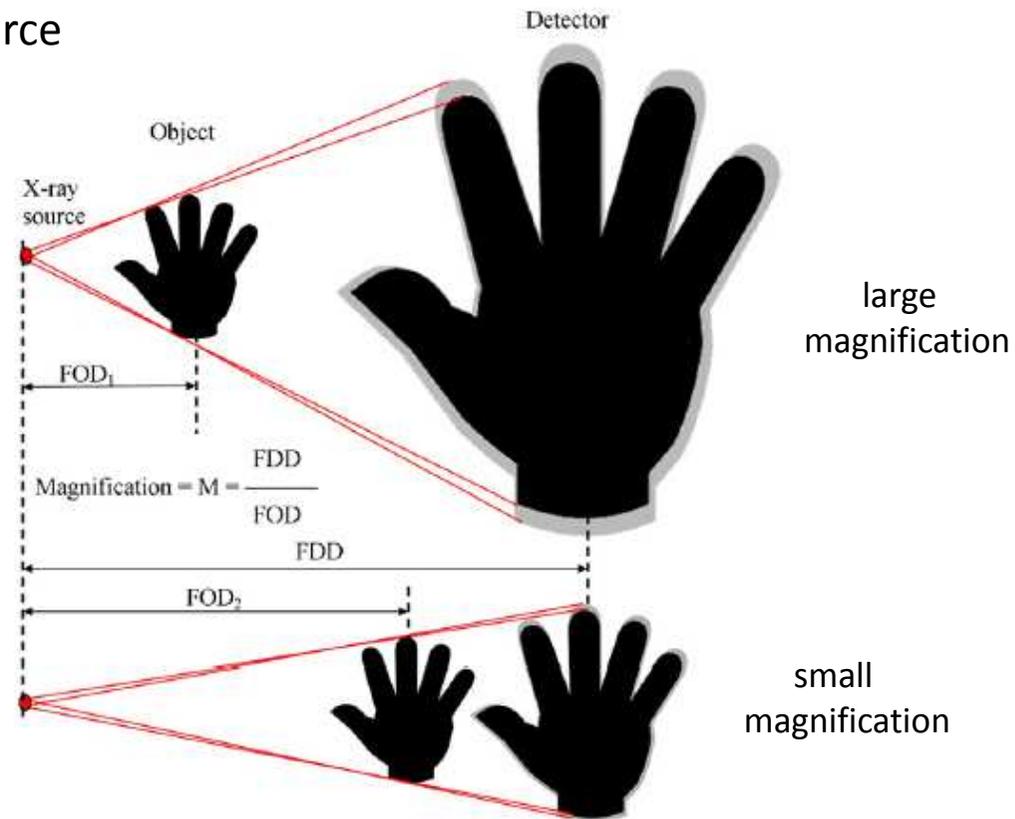
→ La différence des 2 augmente le contraste



K-edge ESRF

Magnification

- Faisceau divergent
- Petite taille de source



Source de taille finie → flou

Interactions onde/matière décrites par l'indice de réfraction

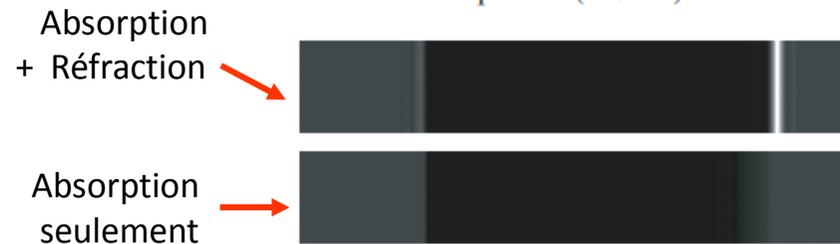
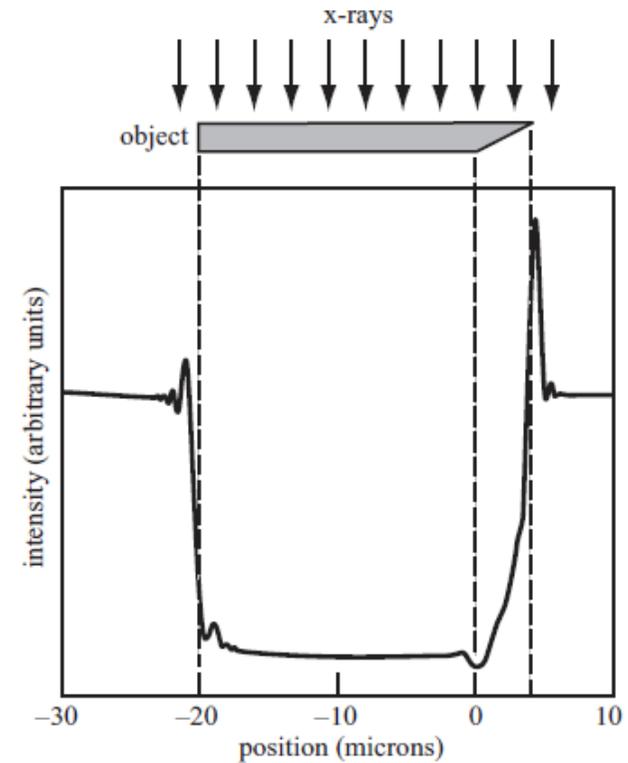
$$N = n_R + i n_A$$

Phénomènes de
→ réfraction
→ diffraction
→ interférences
(effets liés à la phase de l'onde)

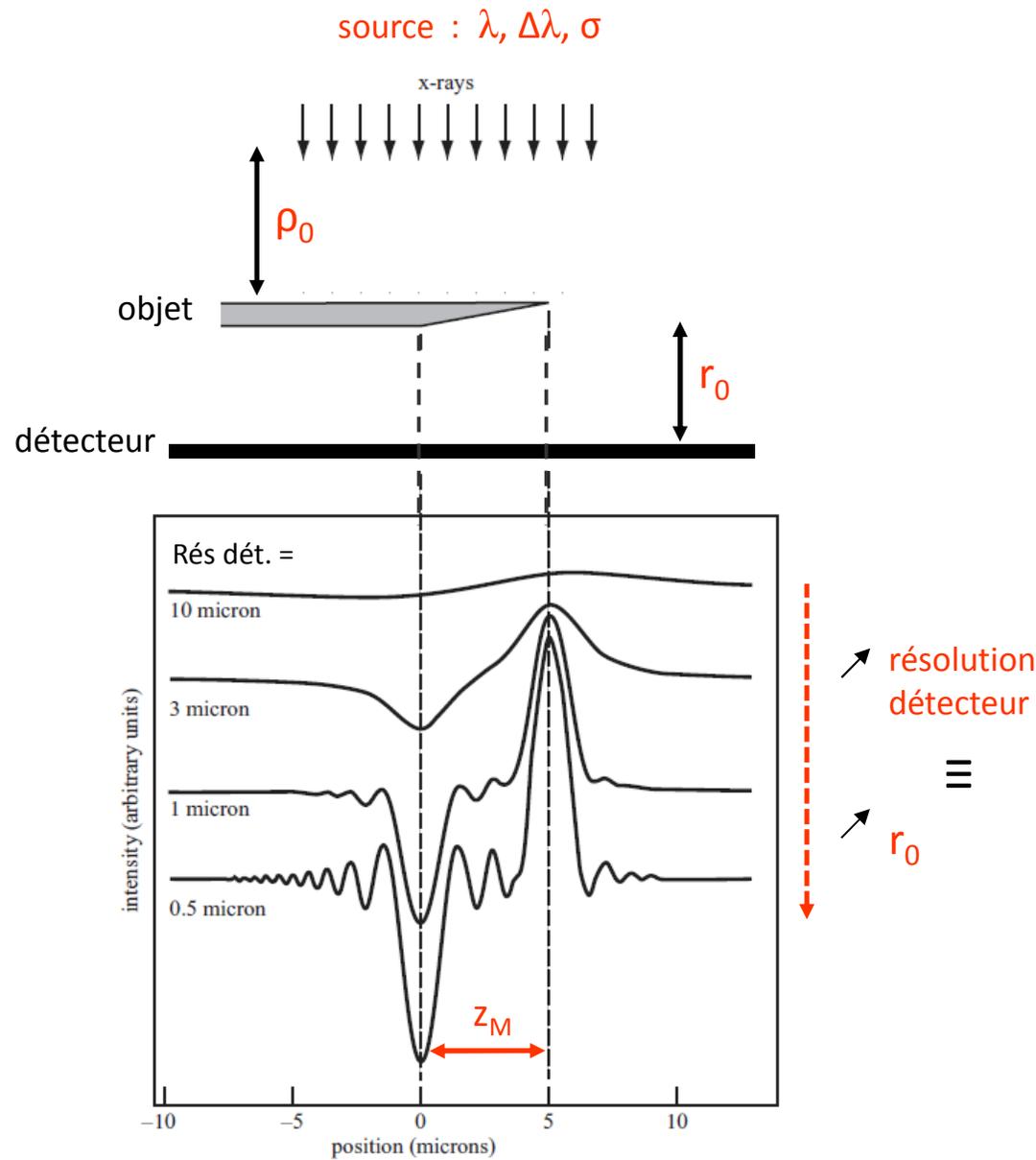
Contraste d'absorption

Superposition d'ondelettes
→ phénomène classique
réfraction/diffraction
(intégrales de Fresnel)

→ **Contraste de phase**



[J. Phys. D: Appl. Phys 35 (2002) R105-R120]



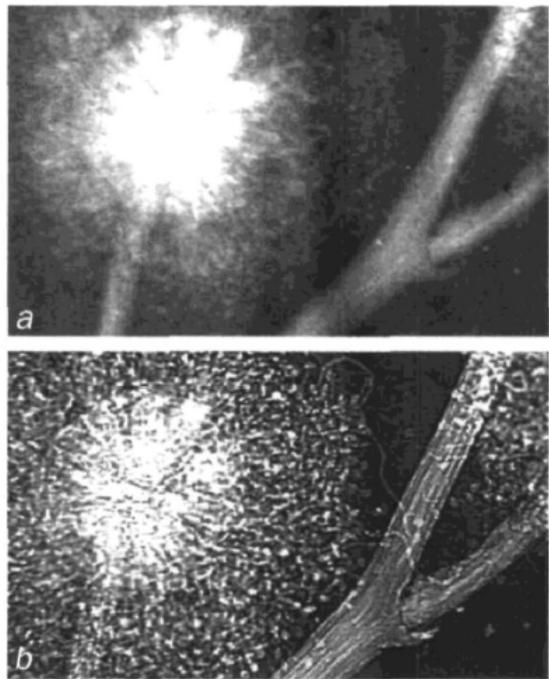
Conditions pour détecter le maximum (frange) principal

- $\Delta z_M / z_M \sim \Delta\lambda / \lambda \ll 1$
- $(r_0 / \rho_0) \sigma \ll z_M$

Phase-contrast-imaging
au synchrotron ELETTRA

(image d'un mimosa)

[Phys. World 11, 1998, 28]



Phase-contrast imaging avec l'ICS Lycean Tech.

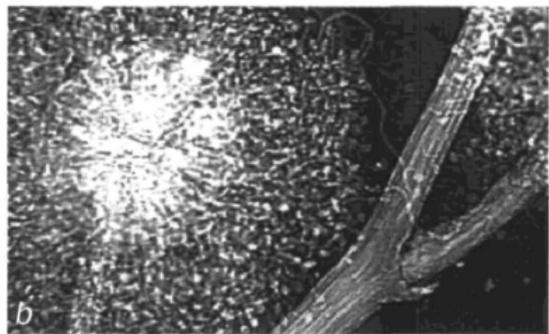
(R. Ruth, en fonctionnement depuis 2006)

Phase-contrast-imaging
au synchrotron ELETTRA

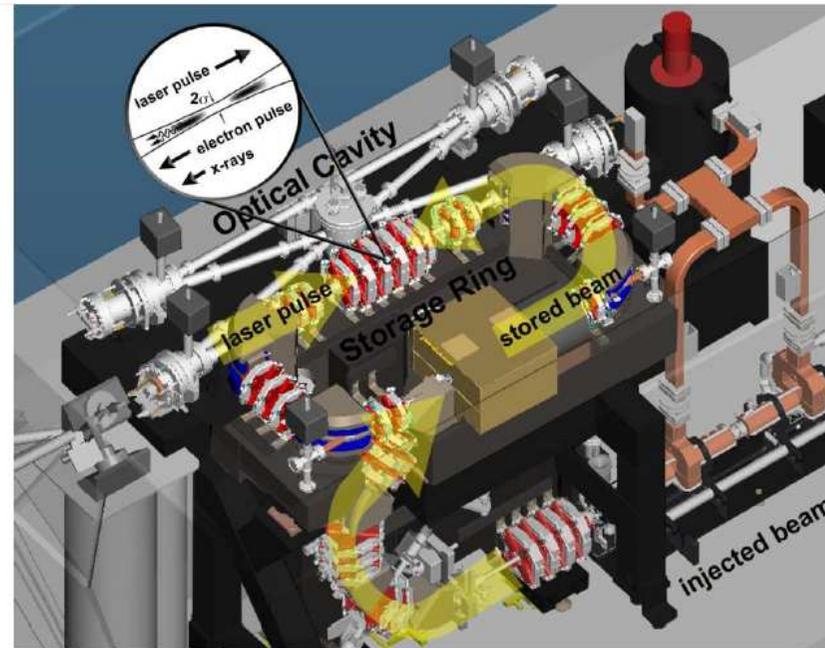
(image d'un mimosa)



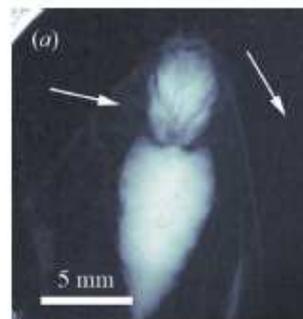
FULVIA ARPELLI AND ALESSANDRO OLIVO



[Phys. World 11, 1998, 28]



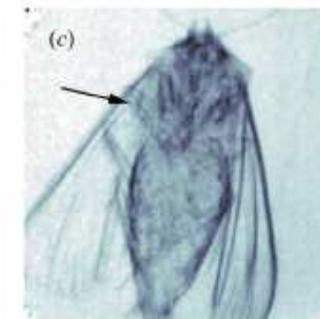
13.5 KeV
10⁹ ph/sec
 $\Delta E/E = 3\%$
 $\sigma = 165 \mu\text{m}$



standard absorption



phase-contrast

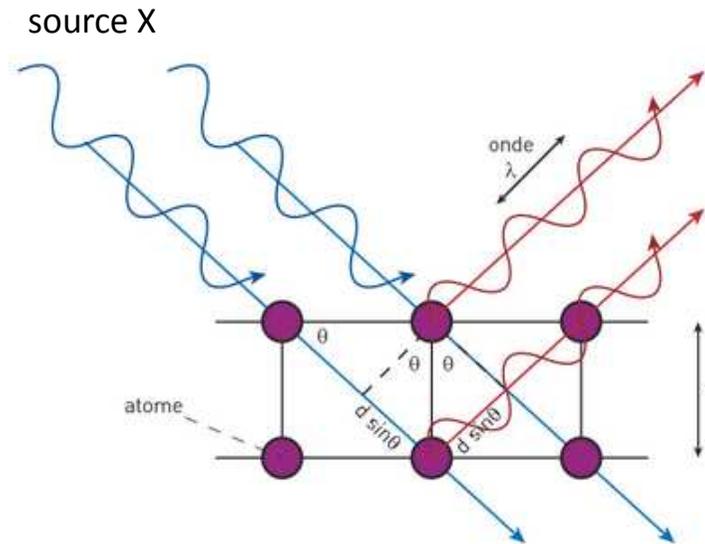


dark field

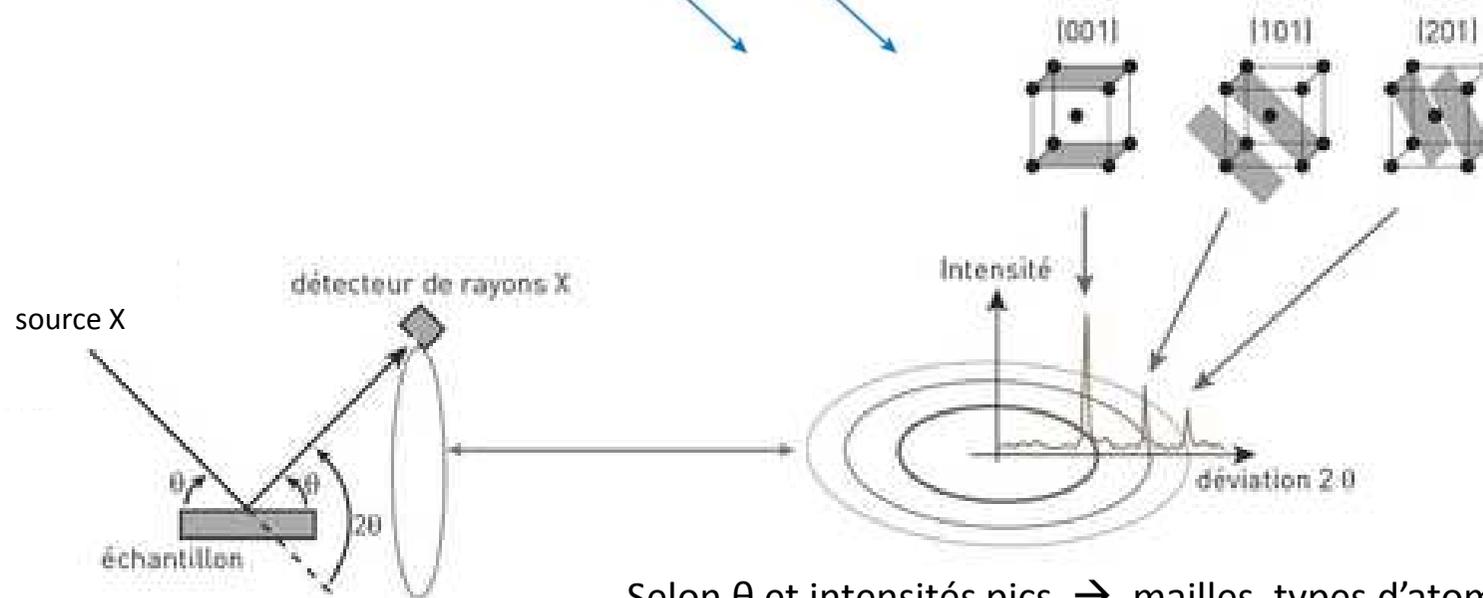
[Synch. Rad. 16, 2009, 43-47]

2. Spectroscopie

Diffraction



Matériau cristallisé
→ Ondes diffusées
→ Interférences

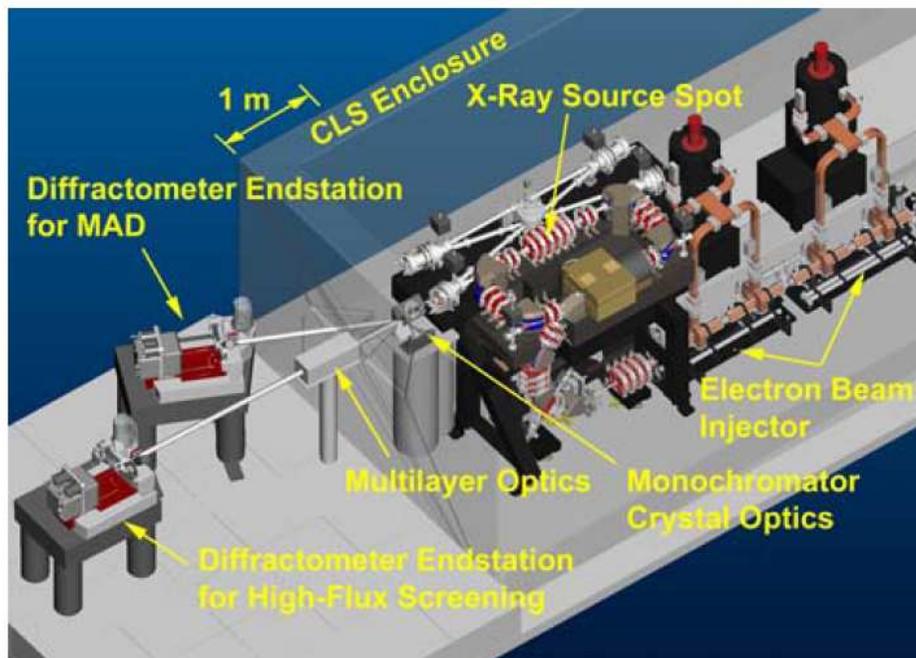


Selon θ et intensités pics → mailles, types d'atomes ...

Structure 3D de macro-molécules (protéines)

Connaissance de la structure d'une protéine → accéder à sa fonction dans la cellule

Première détermination de la structure 3D d'une protéine à l'ICS Lycean Tech.



$5 \cdot 10^6$ ph/sec

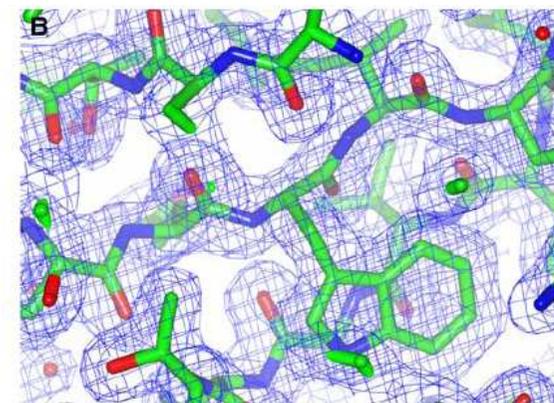
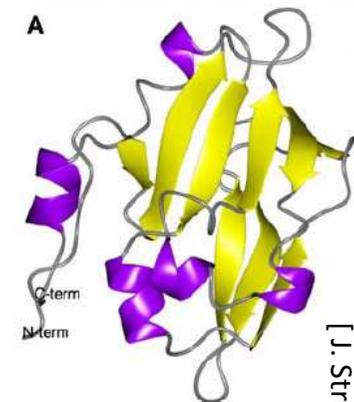
Faisceau : 120 μ m sur le cristal

$E=15$ KeV

$\Delta E/E = 1.4\%$

Protéine MytuGCSPH (taille du cristal : 250 X 250 X 100 μ m)

Fig. 6 Structure and electron density of MytuGCSPH. **a** Overview of the structure for MytuGCSPH in ribbon representation. **b** Electron density from the MytuGCSPH CLS data set at 2.0 Å resolution centered around Trp 14



[J. Struct. Funct. Gen. 11, 2010, 91-100]

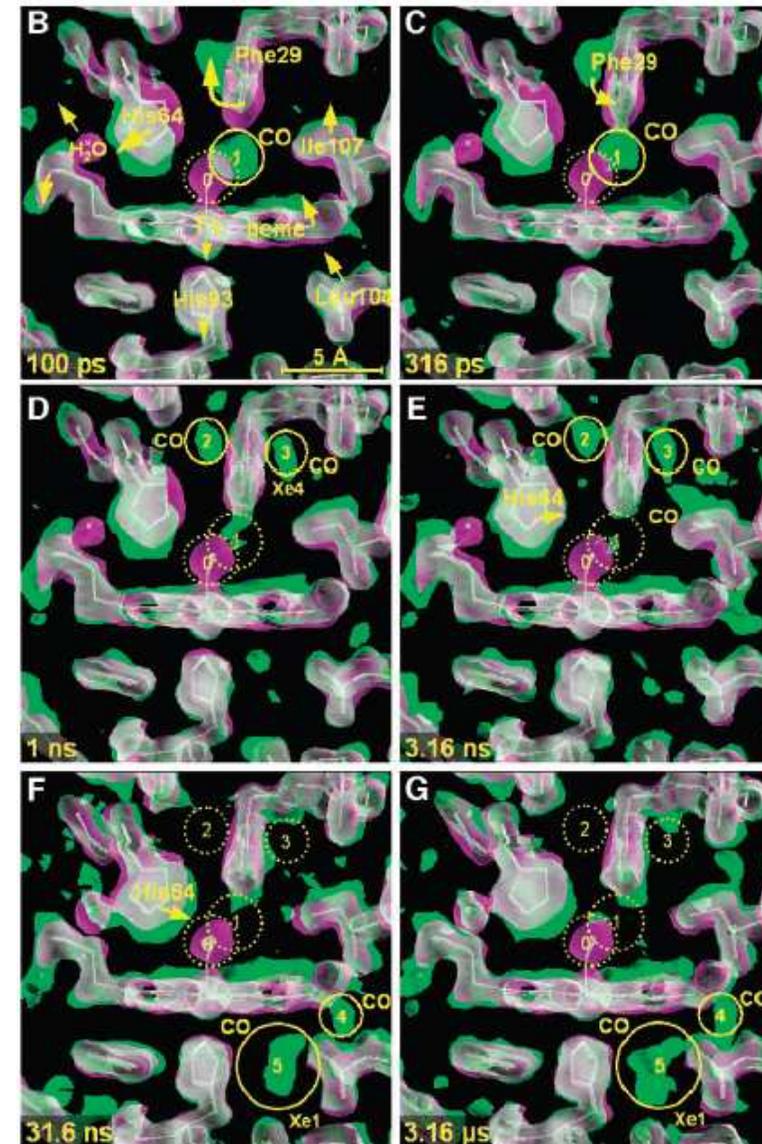
Etudes de systèmes dynamiques

- ▶ Visualisation en temps réel de processus atomiques/moléculaires
- ▶ Exp. “pompe-sonde”
→ Actuellement : résolution ~ 100 ps)

Visualisation “en direct” de l’interaction
entre une protéine et un ligand
(ESRF, Résolutions 2\AA , 100 ps)

[Science 300, 1944, 2003]

- ▶ Echelle de temps des mvts chimie moléculaire
 - 10 -100 fs
 - ICS compactes pulses ultra-courts, LEL



Conclusion

- ▶ Les ICS compacts combinent
 - **Compacité**
 - **Haut flux, haute brillance**
 - **Energie accordable**
 - **Cohérence**
 - **Pulses ultra-courts**

- ▶ Les ICS compacts d'aujourd'hui
 - **Machines chaudes**
 - **Brillance $\sim 10^{11-12}$** (\sim synch 1^{ère} gén.)

- ... et de demain
 - **Machines (canons) supra**
 - **Brillance $\sim 10^{15}$** (\sim synch 2^{ème} gén.)

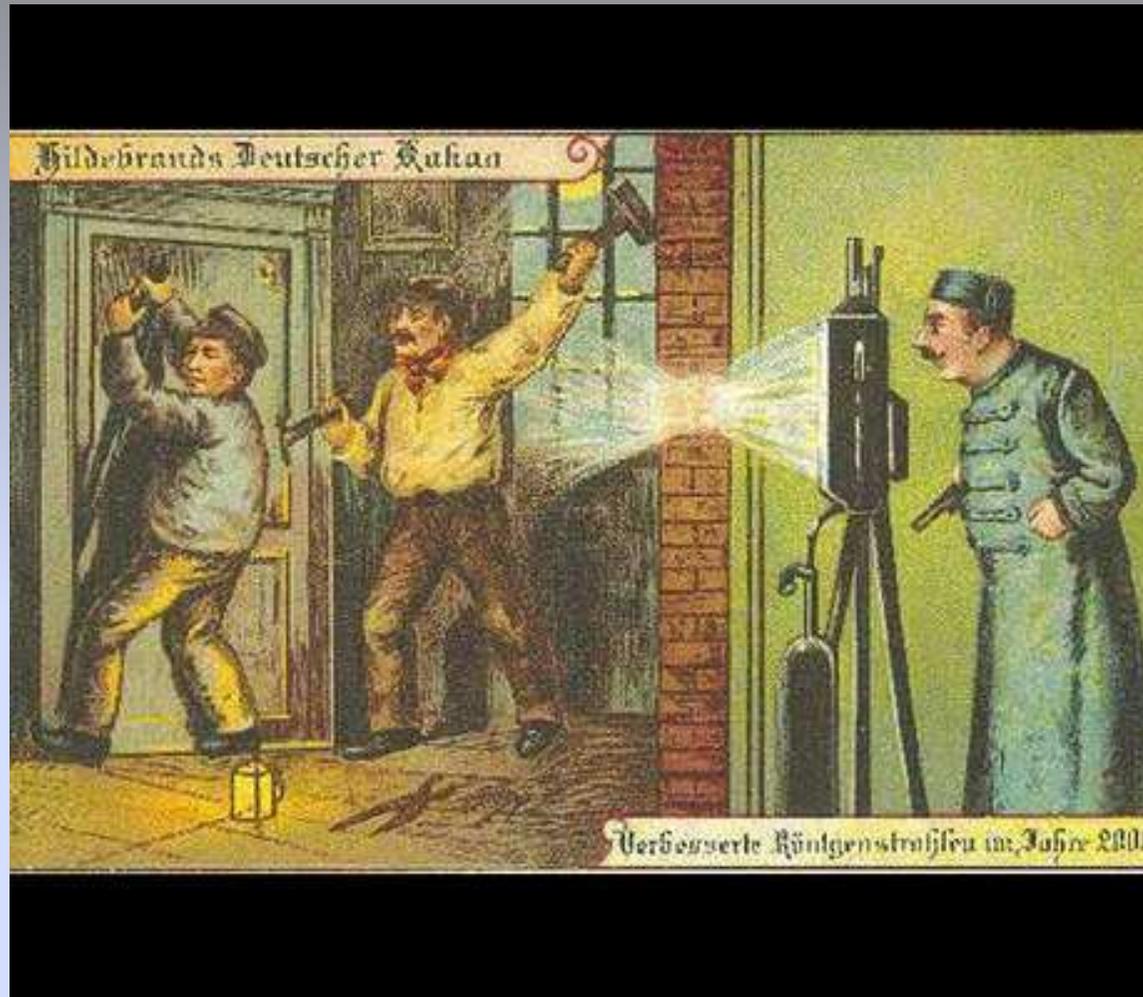
- ▶ Ces sources vont ouvrir une **nouvelle approche dans la recherche et le développement** de techniques et d'applications jusque-là réservées aux synchrotrons.

Conclusion

- ▶ **Imagerie /Tomographie** (conventionnelle, K-edge, magnification, contraste de phase)
 - **Médecine** → dépistage, thérapie
 - **Héritage culturel**
 - Informations sur les techniques utilisées, sur l'état et sur l'histoire d'une œuvre, peinture, objet archéologique ...
 - Caractérisation des surfaces d'objets et de leur structure interne (→ restauration)

- ▶ **Spectroscopie** (fluorescence, diffraction matériaux cristallisés, poudres ...)
 - **Biomédical** → structures des protéines, nouveaux médicaments ...
 - **Minéralogie, géologie, métallurgie, chimie ...**
 - **Expériences "pompe-sonde"** (pulses ultra-courts ~ 10-100 fs)
 - Visualisation en temps réel de processus atomiques/moléculaires

- **Avec les ICS compactes : utilisation de ces techniques ambitieuses dans des labos, des hopitaux, des musées.**



Merci de votre attention