

III. Production/utilisation du rayonnement X et gamma

- ✓ Introduction : faisceau laser & ondes électromagnétiques
- ✓ Machines à rayonnement synchrotron
- ✓ La diffusion faisceau d'électrons + faisceau laser
 - ✓ Machine Compton à rayons X et gamma

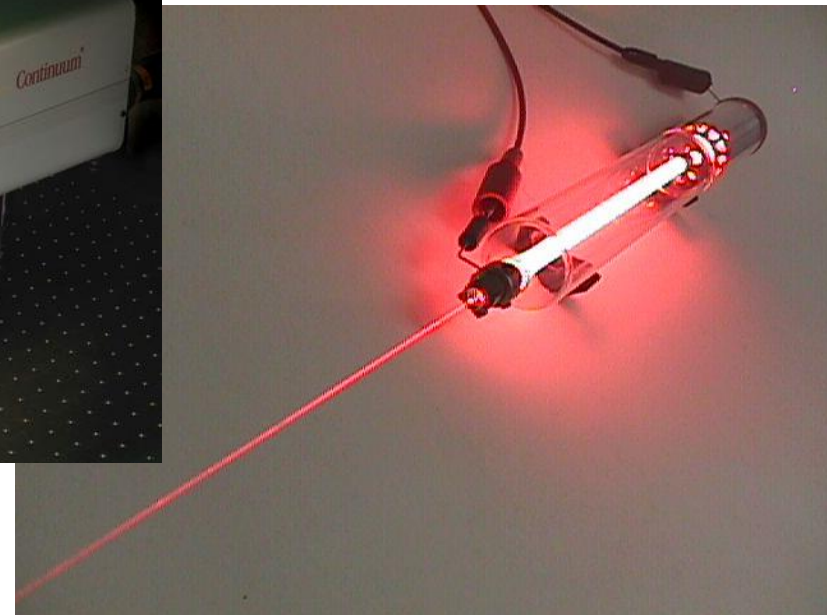
III.1 Introduction : LASERS & les ondes électromagnétiques

Le laser et les ondes électromagnétiques

→ faisceaux lumineux peu divergent qui se propagent 'autour' d'un axe



laser pulsé



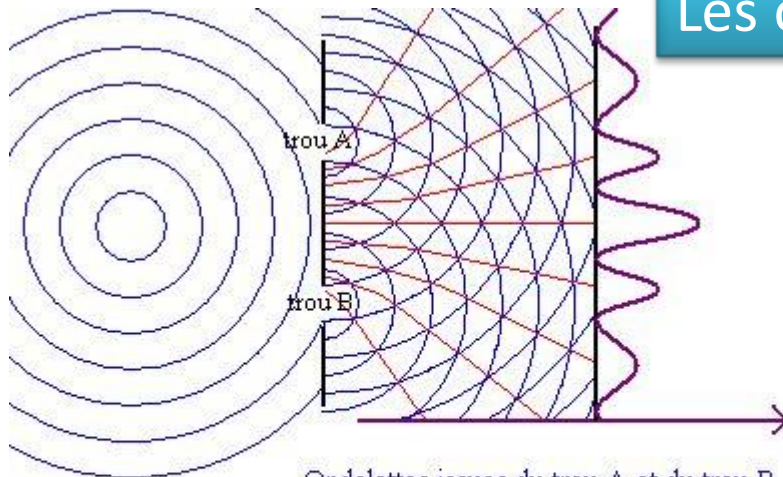
Laser continu




Qu'est ce qu'une onde: les ondes à la surface de l'eau

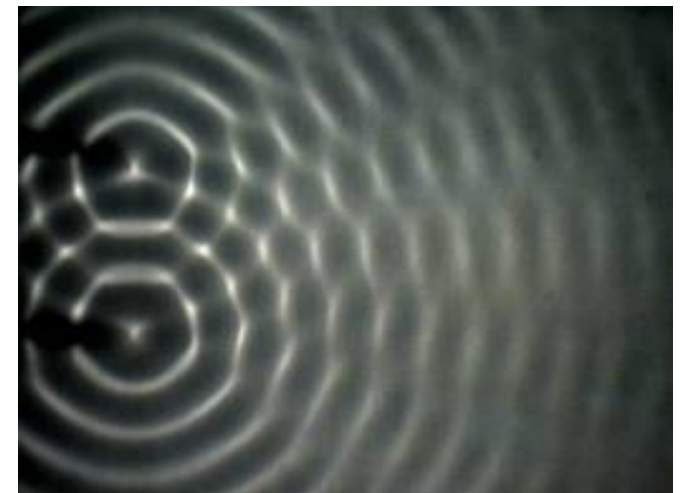


'Diffraction par un trou'

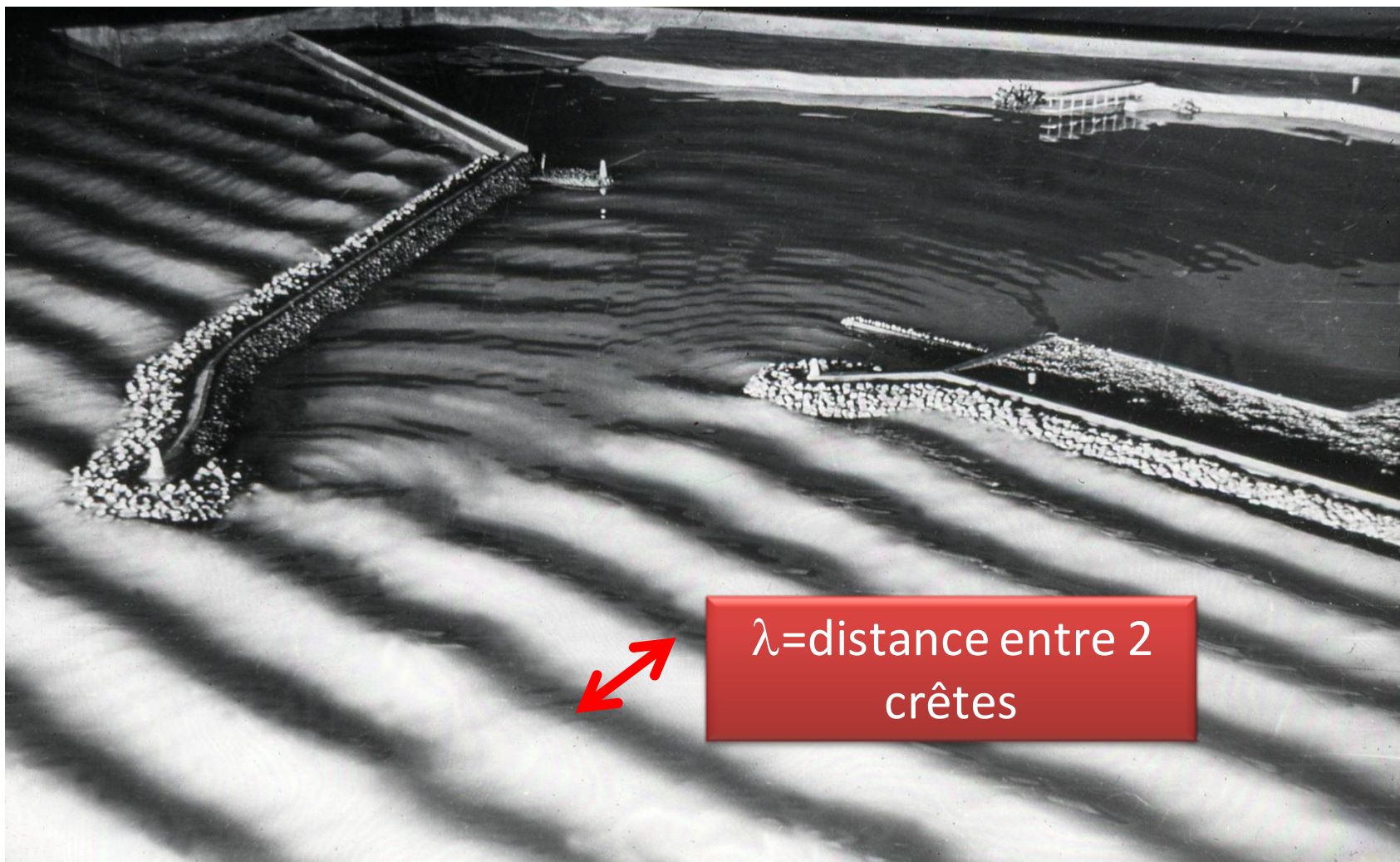
Les ondes 'interfèrent'



-  Ondelettes issues du trou A et du trou B entre la plaque et le détecteur
-  Figure d'interférence
-  Courbe donnant l'amplitude des interférences au niveau du détecteur

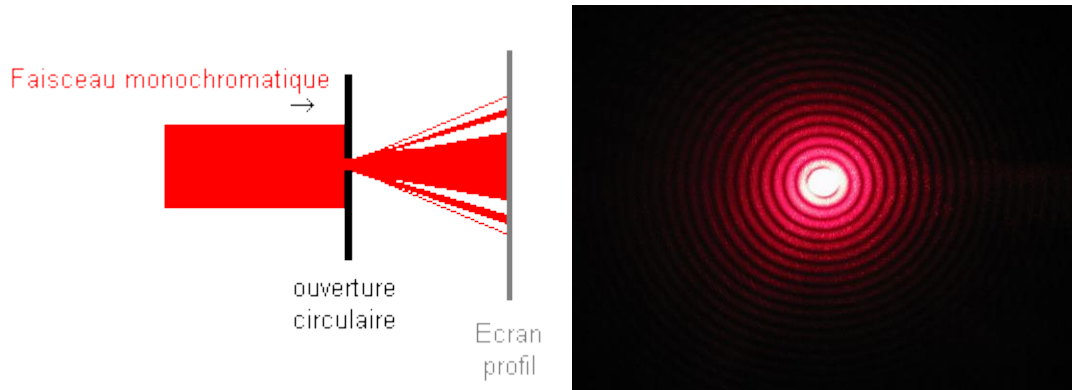


Longueur d'onde = λ



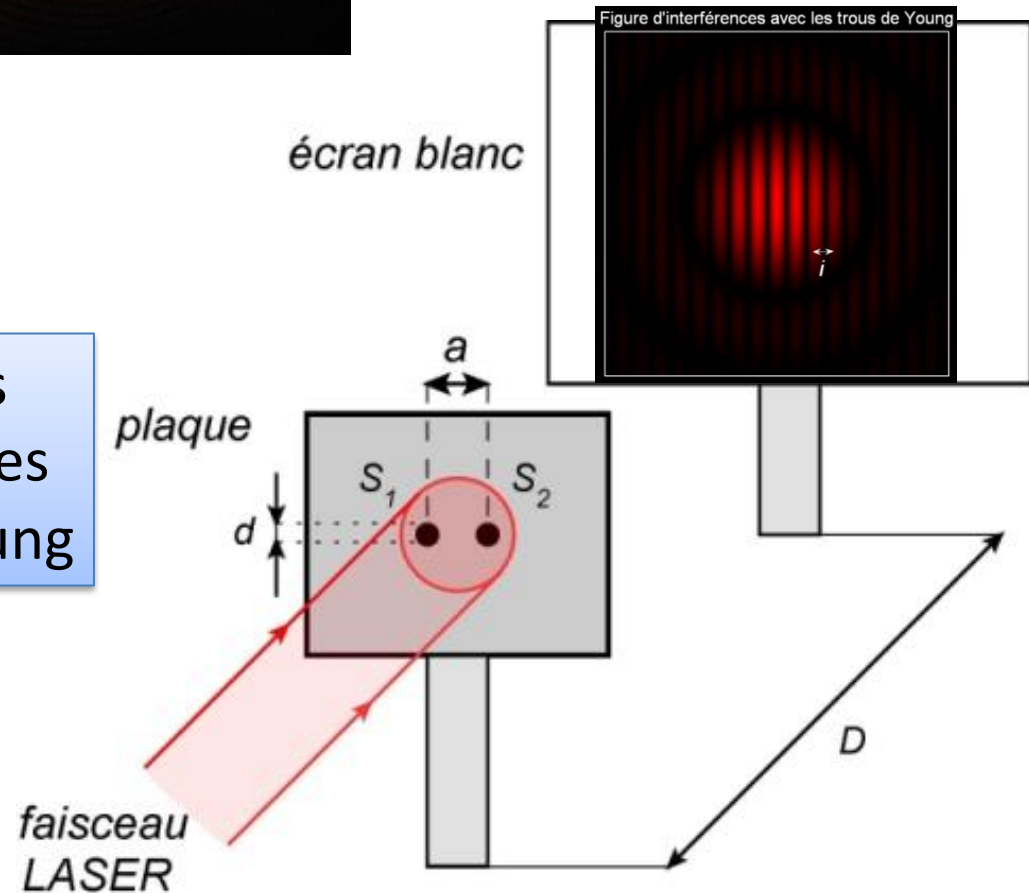
λ = distance entre 2
crêtes

Le faisceau laser est une onde 'electromagnétique' qui se propage dans le vide ...



'Diffraction par un trou'

Interférences
Expérience des
fentes de Young



Rayonnement des ondes électromagnétiques

Une charge + et une charge – qui oscillent → rayonnement une onde elm

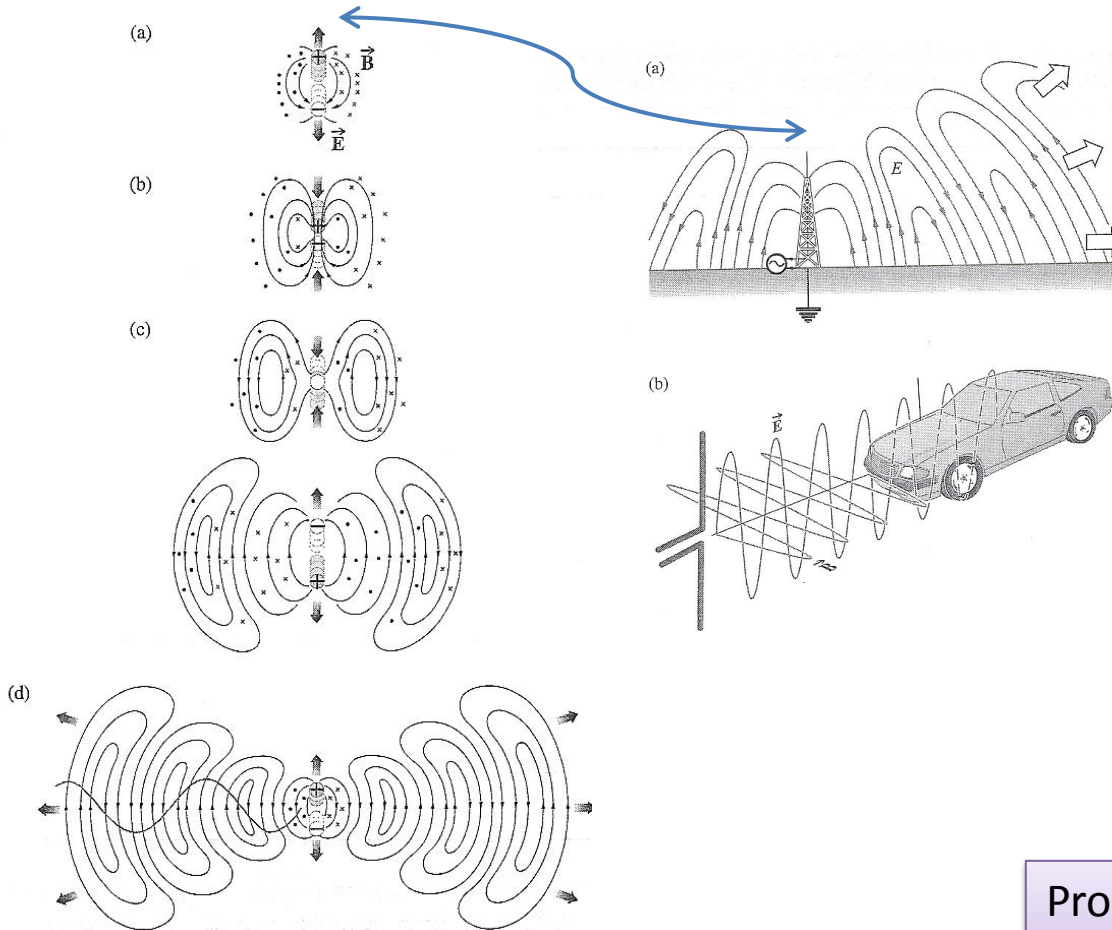
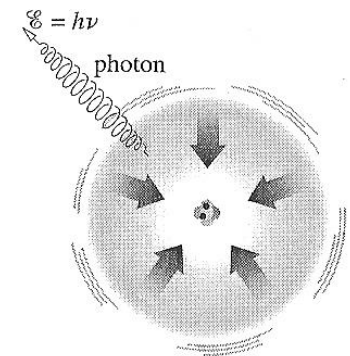


Figure 3.32 The \vec{E} -field of an oscillating electric dipole.

Désexcitation d'un atome



(c) De-excitation with emission of a photon

Propagation décrite par les équations de Maxwell

L'onde est décrite par un 'Champ Électromagnétique'

Champ électrique oscillant

$$\vec{E}(\vec{r};t) = \vec{E}_0 \cos(2\pi\nu t - \vec{k} \cdot \vec{r})$$

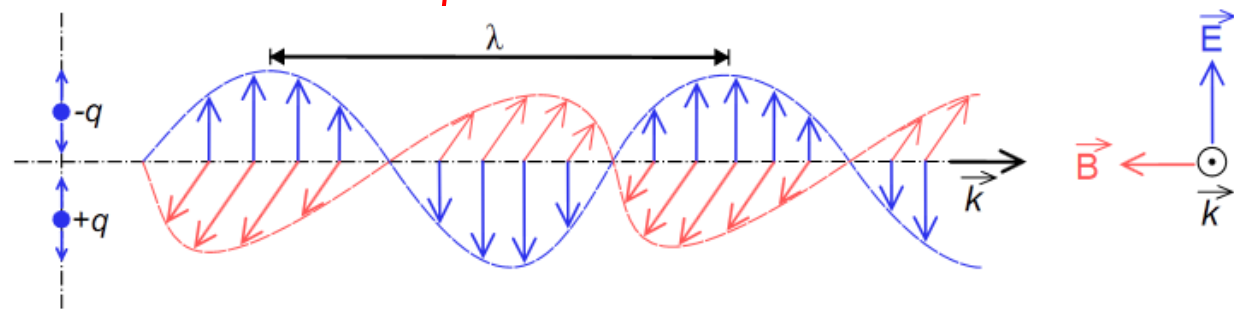
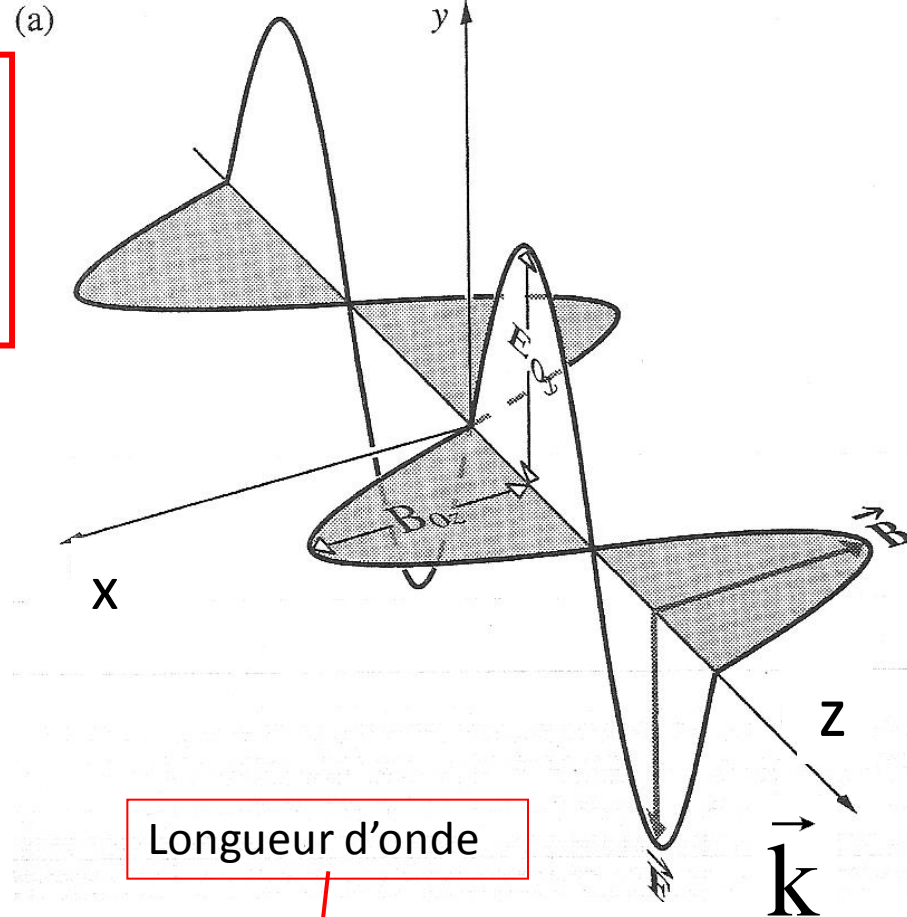
et

Champ magnétique oscillant

B : perpendiculaire à E dans le vide
et les milieux isotropes

Longueur d'onde λ

Fréquence $\nu = c/\lambda$

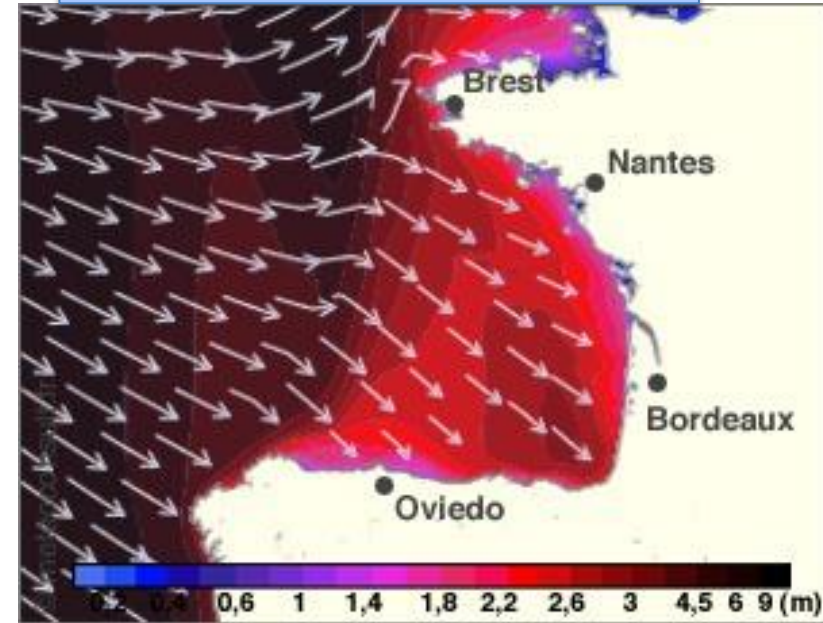


Le champ électromagnétique est 'vectoriel' : champs E et B

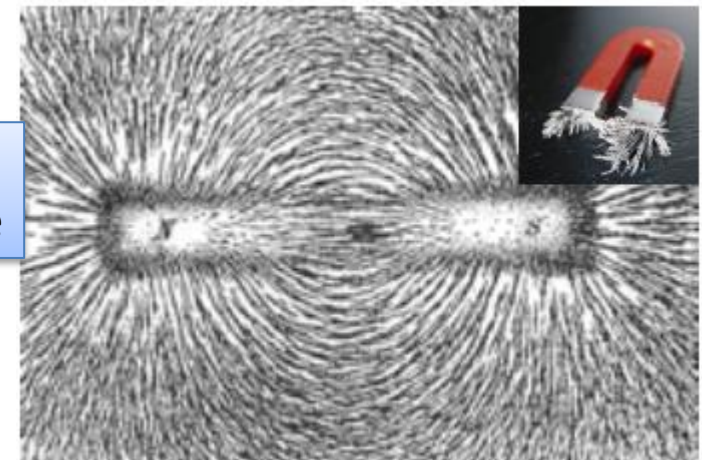
Exemple de 'champ scalaire' :
Le champ de pression atmosphérique



Exemple de 'champ vectoriel' :
Le champ de vitesse du vent

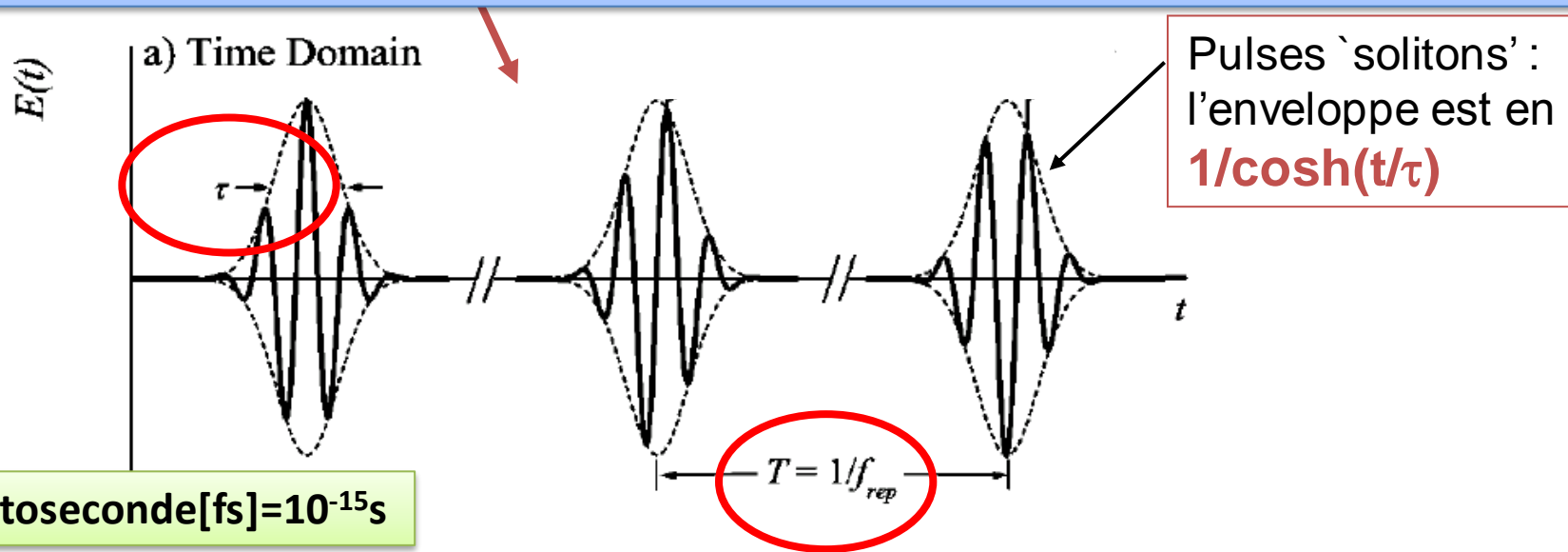


Exemple de 'champ vectoriel' :
Le champ magnétique statique



Faisceaux laser à impulsion

En un pointz, on perçoit un champ électrique oscillant durant un temps très bref $\sim \tau$
C'est un 'cosinus' multiplié par une 'enveloppe'



E = énergie par pulse (en Joule)

$P_{moyenne} = E/T$ (en Watts)

$P_{crête} = E/\tau$ (en Watts)

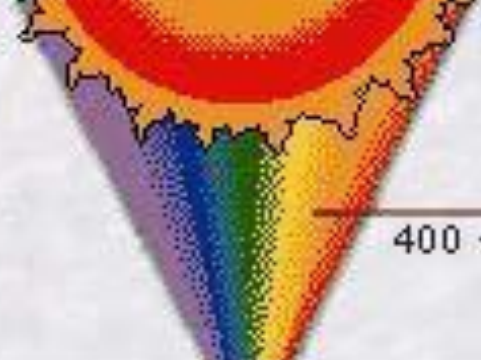
Ex. : YAG, $\lambda = 1 \mu\text{m}$, $E = 3 \text{ J/pulse}$, $f_{rep} = 10 \text{ Hz}$, $\tau = 30 \text{ fs}$

$P_{moyenne} = 30 \text{ W}$

$P_{crête} = 10^{14} \text{ W} = 100 \text{ TéraWatts} = 0.1 \text{ PétaWatts} !!!$

L'intensité crête = $P_{crête} / (\text{'surface' du faisceau})$

Spectre électromagnétique



Spectre de la lumière visible

400 - 700 nm



0,01 nm

1 nm

100 nm

1 mm

1 cm

1 m

1 km



----->
 λ Longueur d'onde de l'onde elm

Mais un faisceau de lumière est aussi un ensemble de particules de lumière:

des photons d'énergie $E=h\nu=hc/\lambda$ ($E\sim 1\text{ev}$ pour $\lambda=1\mu\text{m}$)

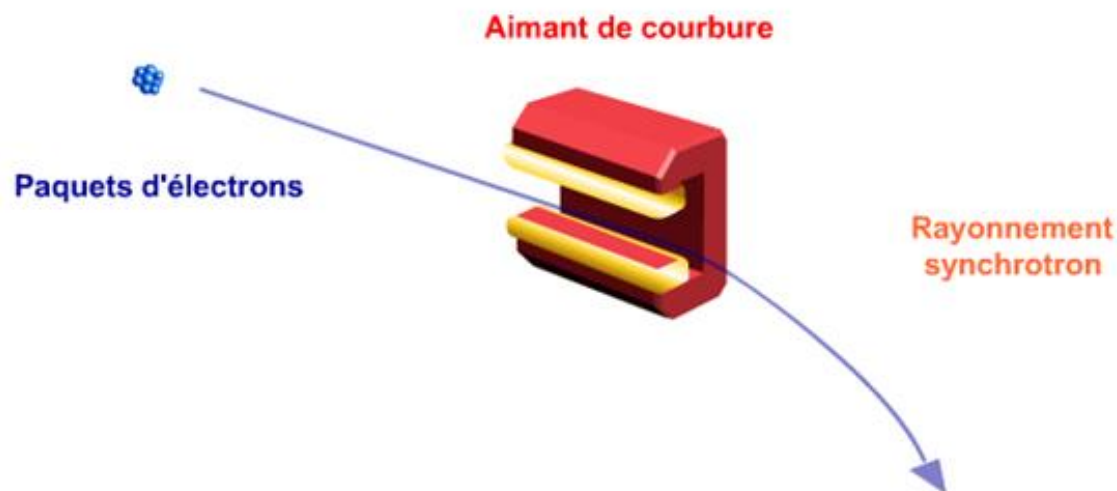
Le nombre de photons dans un pulse laser = $E_{\text{crête}}/h\nu$

III.2 Le rayonnement synchrotron

→ qqes applications choisies

Le rayonnement synchrotron est produit lorsque des particules chargées (électrons) et en mouvement à la vitesse de la lumière sont déviées par un champ magnétique (force de Lorentz).

Les longueurs d'onde de ce rayonnement vont de l'infrarouge aux rayons X

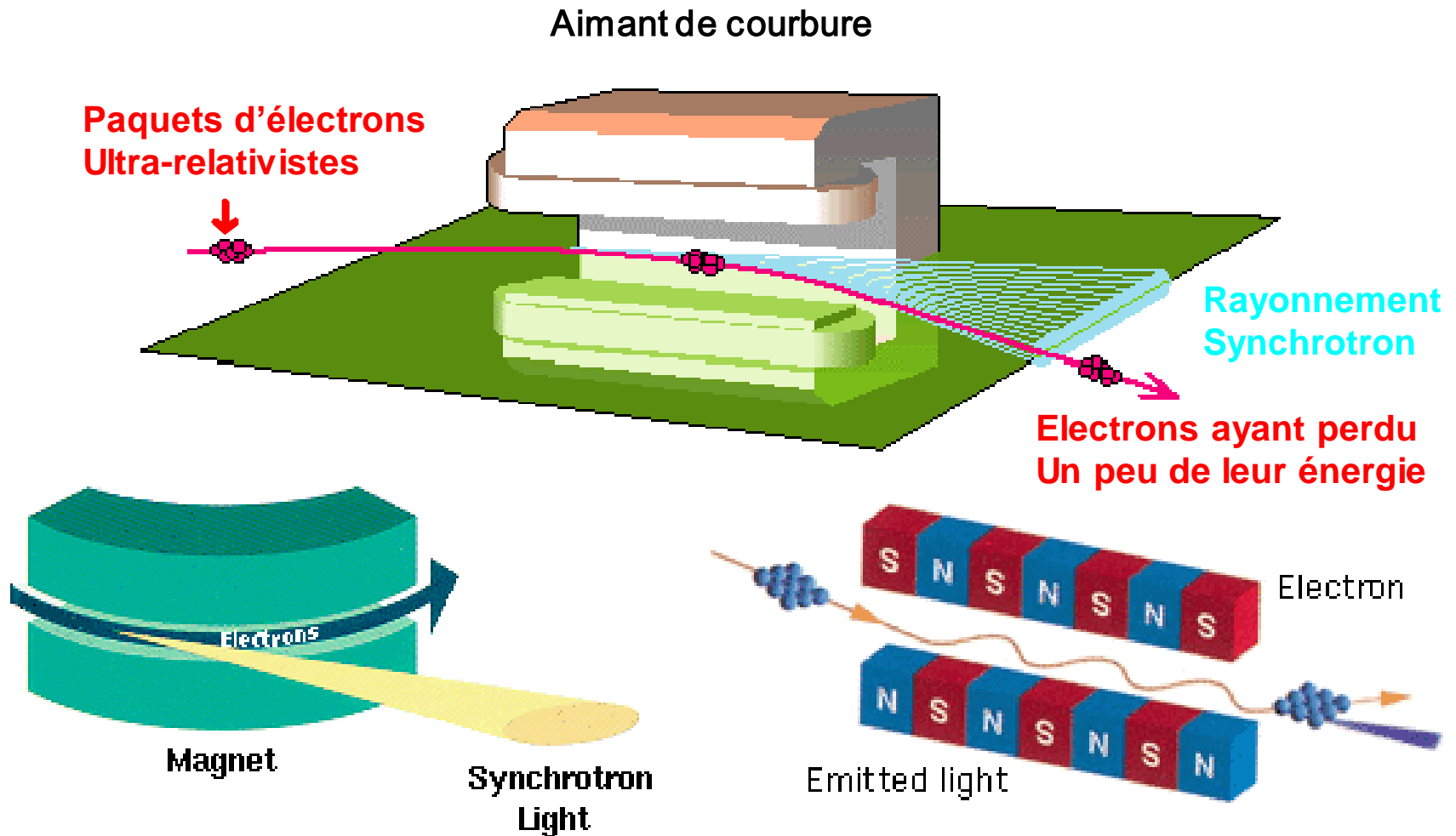


La lumière est émise dans une nappe tangente à la trajectoire de la particule

Rayonnement Synchrotron

Lors de la courbure de leur trajectoire, les électrons sont ralentis par action de leur champ électrique propre et perdent de l'énergie

Ces photons sont émis dans une direction tangente à leur trajectoire

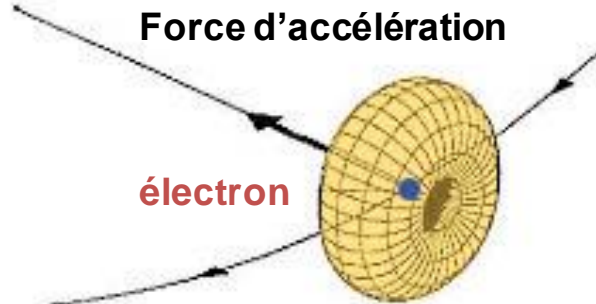


Des électrons relativistes

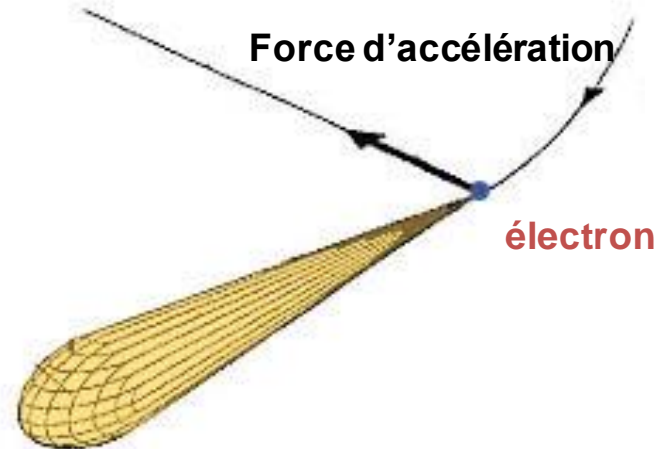
Quand les électrons sont accélérés avec une **faible vitesse** (ondes radio, par exemple), ils émettent un rayonnement électromagnétique dans **toutes les directions**.

Quand la vitesse des électrons **approche la vitesse de la lumière** (électrons relativistes), l'émission se fait dans **une seule direction** et toute la puissance est concentrée dans un **cône très étroit** (15 μm hauteur / 150 μm largeur sur dipôle).

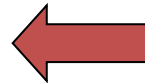
Rayon de courbure



Rayon de courbure



C'est une des spécificités du rayonnement synchrotron



L'angle d'émission est très étroit
 $\theta = 1/\gamma = 0.186 \text{ mrad} = 0.01^\circ$

Rayonnement Synchrotron

Large spectre possible qui s'étend du domaine Infra rouge aux RX durs.

Lumière blanche (Aimants de courbure) ou
Spectre de raies très fines, accordable(Onduleurs)

Flux élevé : Faisceau de photons très intense

$$\text{Flux} = \text{Photons} / (s \times 0.1\% \text{ BW})$$

Brilliance élevée (Densité spectrale): Faisceau de photons très collimatés générés par une source (faisceau d'électrons) de taille et de divergence très faibles (cohérence spatiale dans le plan verticale).

$$\text{Brilliance} = \text{Photons} / (s \times \text{mm}^2 \times \text{mrad}^2 \times 0.1\% \text{ BW})$$

Polarisation: La lumière produite peut être polarisée linéairement (H ou V), circulairement, elliptiquement (réglables au niveau des onduleurs)

Emission continue ou pulsée: Les durées des impulsions de faisceau peuvent être réduites jusqu'à ~10 picoseconds

Une gamme spectrale étendue

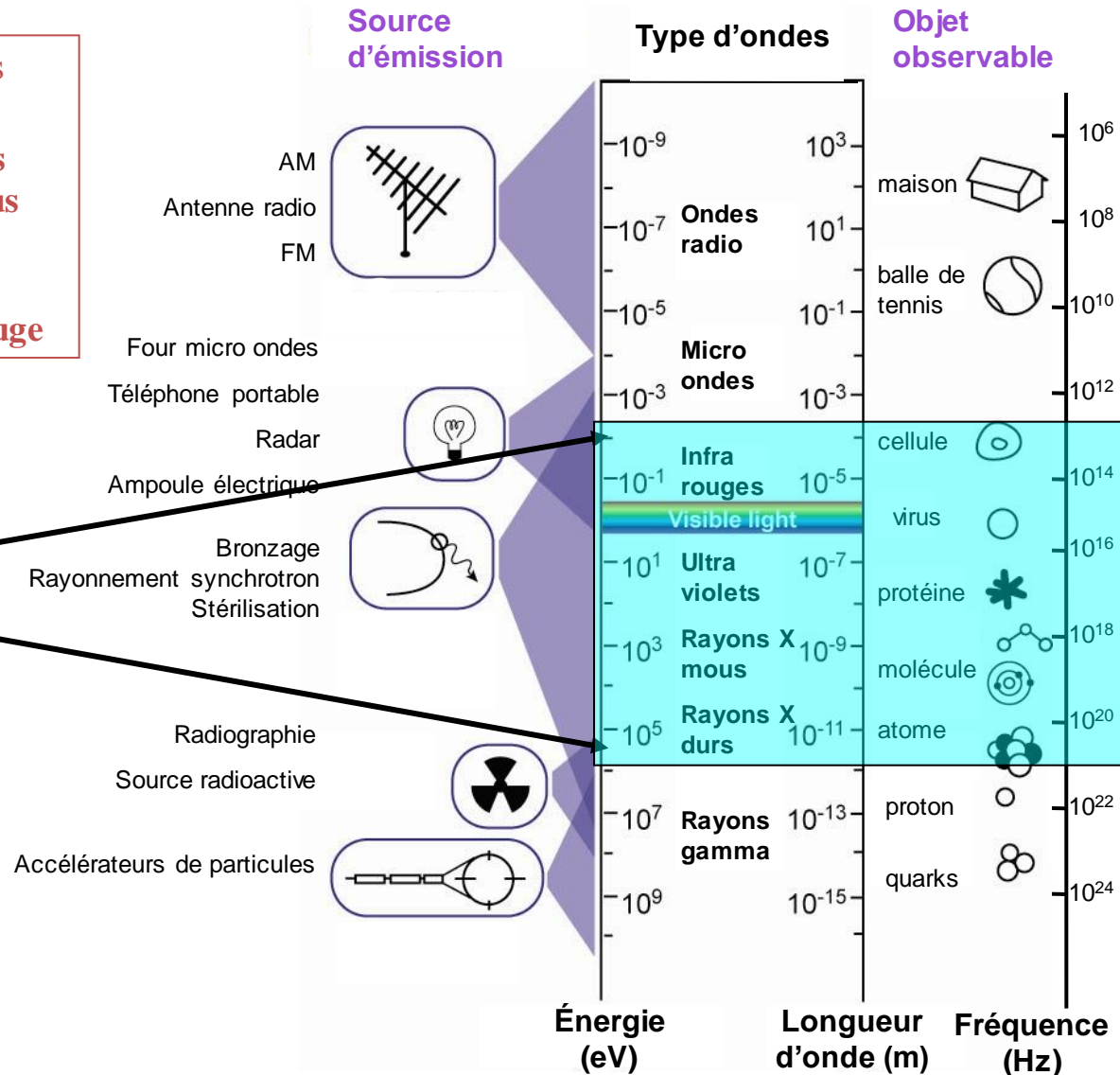
Relation longueur d'onde/énergie des photons

$$\lambda_{ph}[A] = 12.4 / E_{ph}[keV]$$

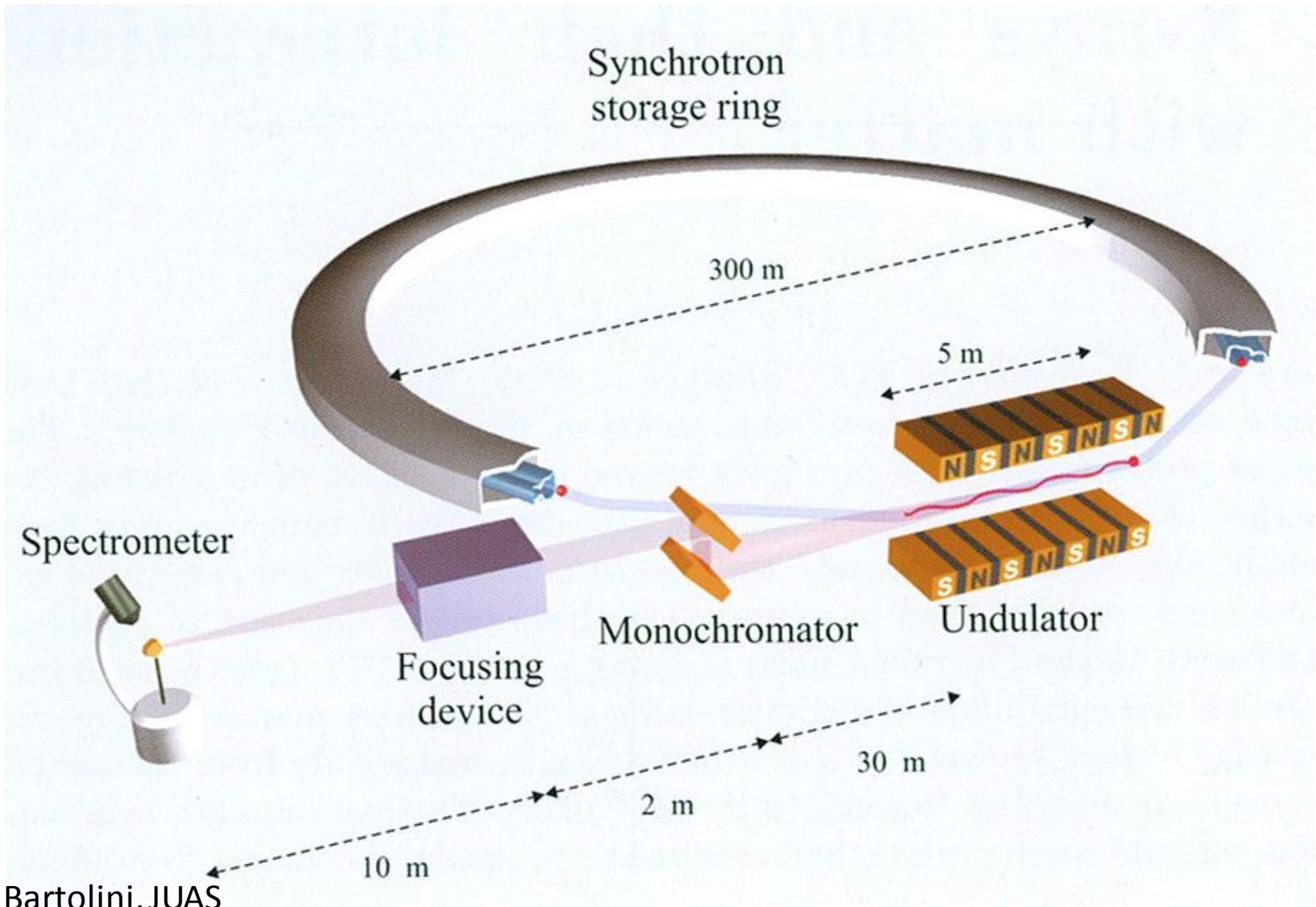
1 A	⇔	12.4 keV	RX durs
1 nm	⇔	1240 eV	RX mous
100 nm	⇔	12 eV	UV
1 μm	⇔	1 eV	Visible
10 μm	⇔	0.1 eV	Infrarouge

Depuis l'**INFRA ROUGE LOINTAIN**

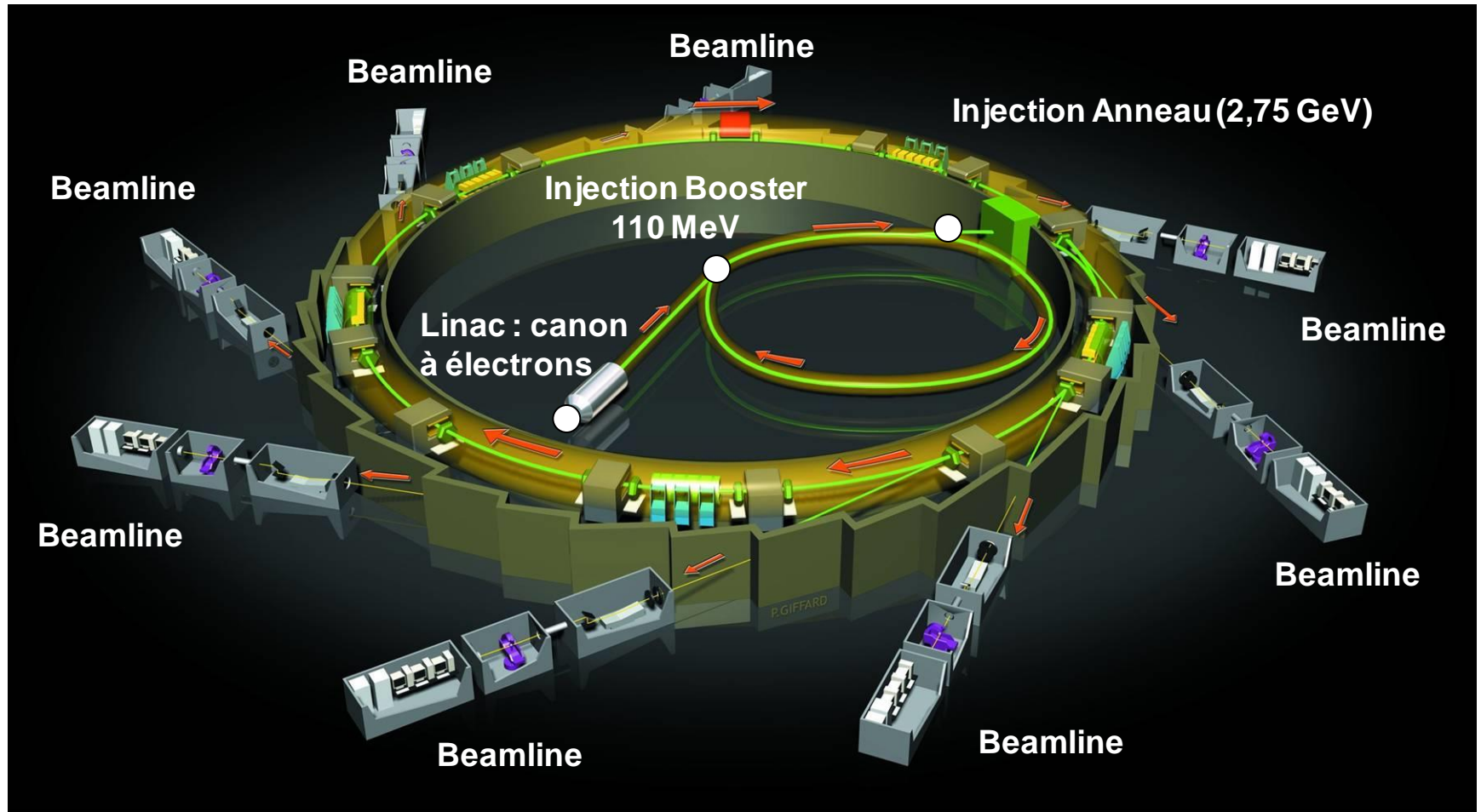
jusqu'aux **RAYONS X DURS**



Layout of a synchrotron radiation source (II)



Linac, Booster, Anneau de stockage et lignes de lumière



Toutes les lignes de lumière reçoivent du faisceau simultanément



SOLEIL
SYNCHROTRON



ESRF



3rd Generation Light Sources



ESRF - France



DIAMOND - UK



ALBA - Spain

Under construction - Ultimate SR facilities



Max-IV

Lund - Sweden



Sirius - Brazil



SSRF

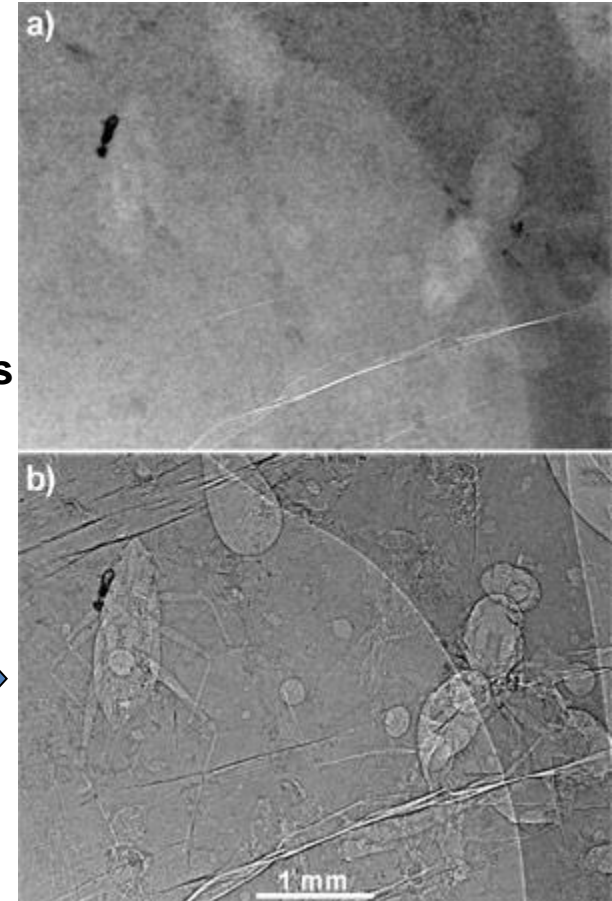
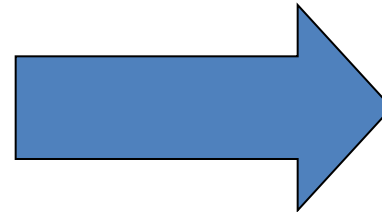
Shanghai - China

Applications en paléontologie

<http://www.esrf.eu/news/general/amber/amber/>

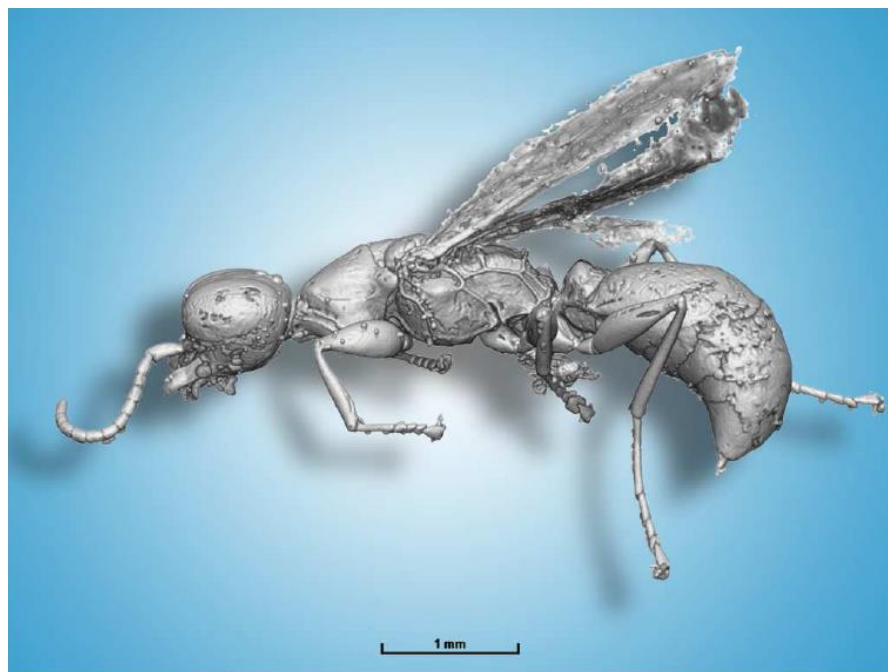
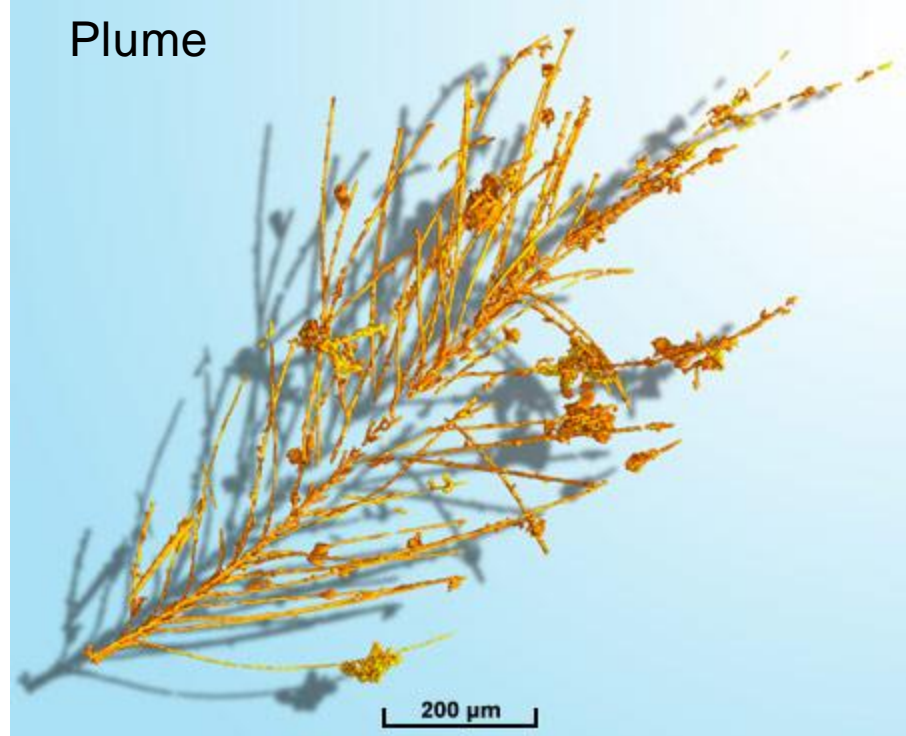
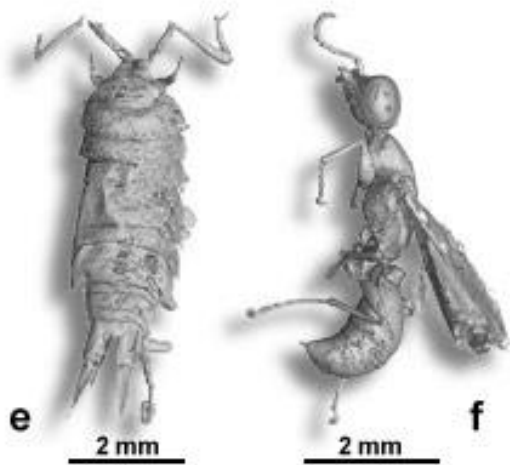
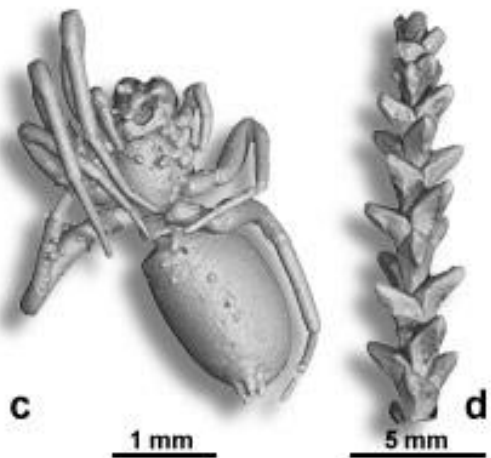
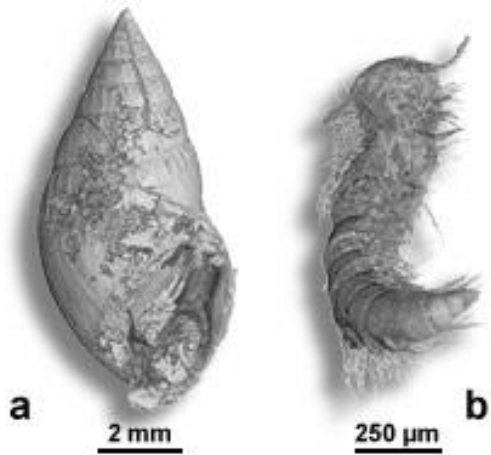


Rayons X
monochromatiques
de quelques dizaines
de keV
ESRF



Morceau d'ambre datant de
100 millions d'années avant JC (charentes)

La très grande qualité optique des faisceaux de l'ESRF
→ reconstruction non destructive en 3D
des éléments piégés dans l'ambre il y a plus de 100M d'années !!!



(Tafforeau, ESRF)

Application à l'étude des oeuvres d'art

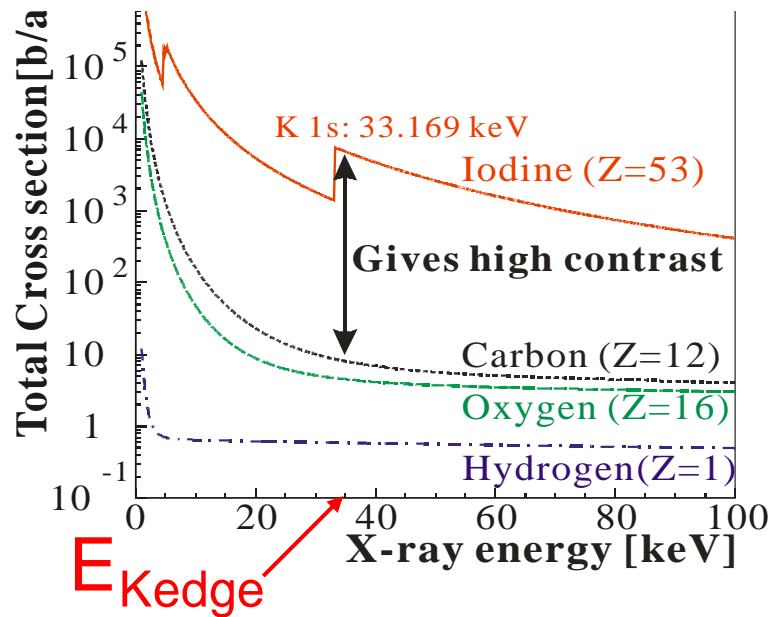
'K edge imaging'

1. Les pigments contiennent des éléments chimiques lourds
2. 'Couche K' de ces éléments excités par rayons X → identification

K-edge imaging sur les éléments lourds de pigments (Pb → blanc, Hg → vermillon ...)

Total Cross Section of X-ray attenuation

for various elements



**Mais ~30keuros d'assurance pour 2 jours
→ machine compacte dans un musée
Souhaitée...**

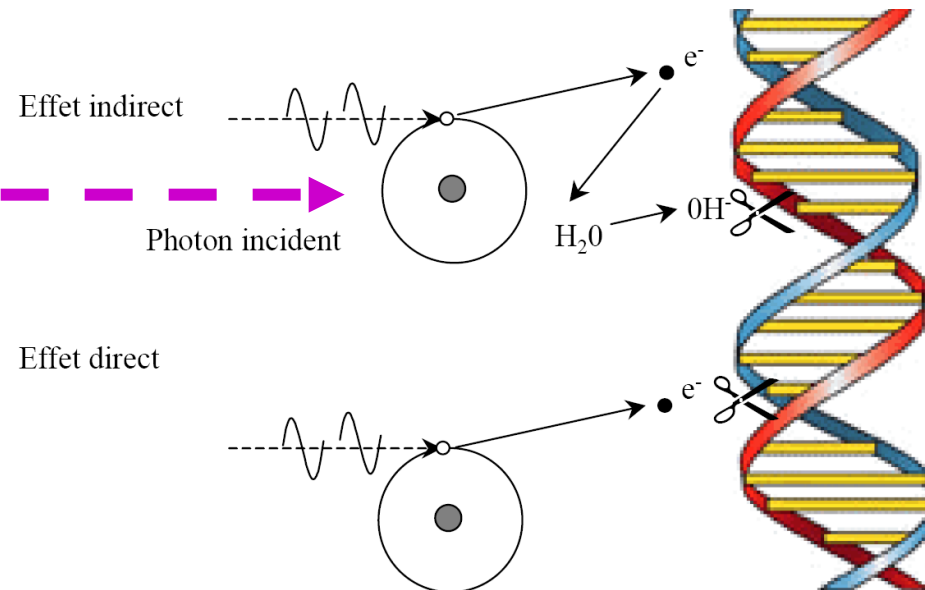
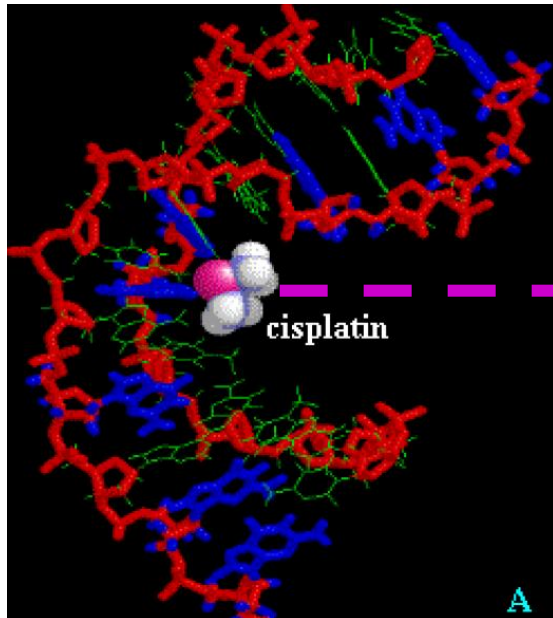
J. Dik et al., *Analytical Chemistry*, 2008, 80, 6436
Cours d'histoire de l'art sur cette étude !
<http://www.vangogh.ua.ac.be/>

Une application médicale à l'ESRF (ligne ID17): radiothérapie pour le traitement des gliomes

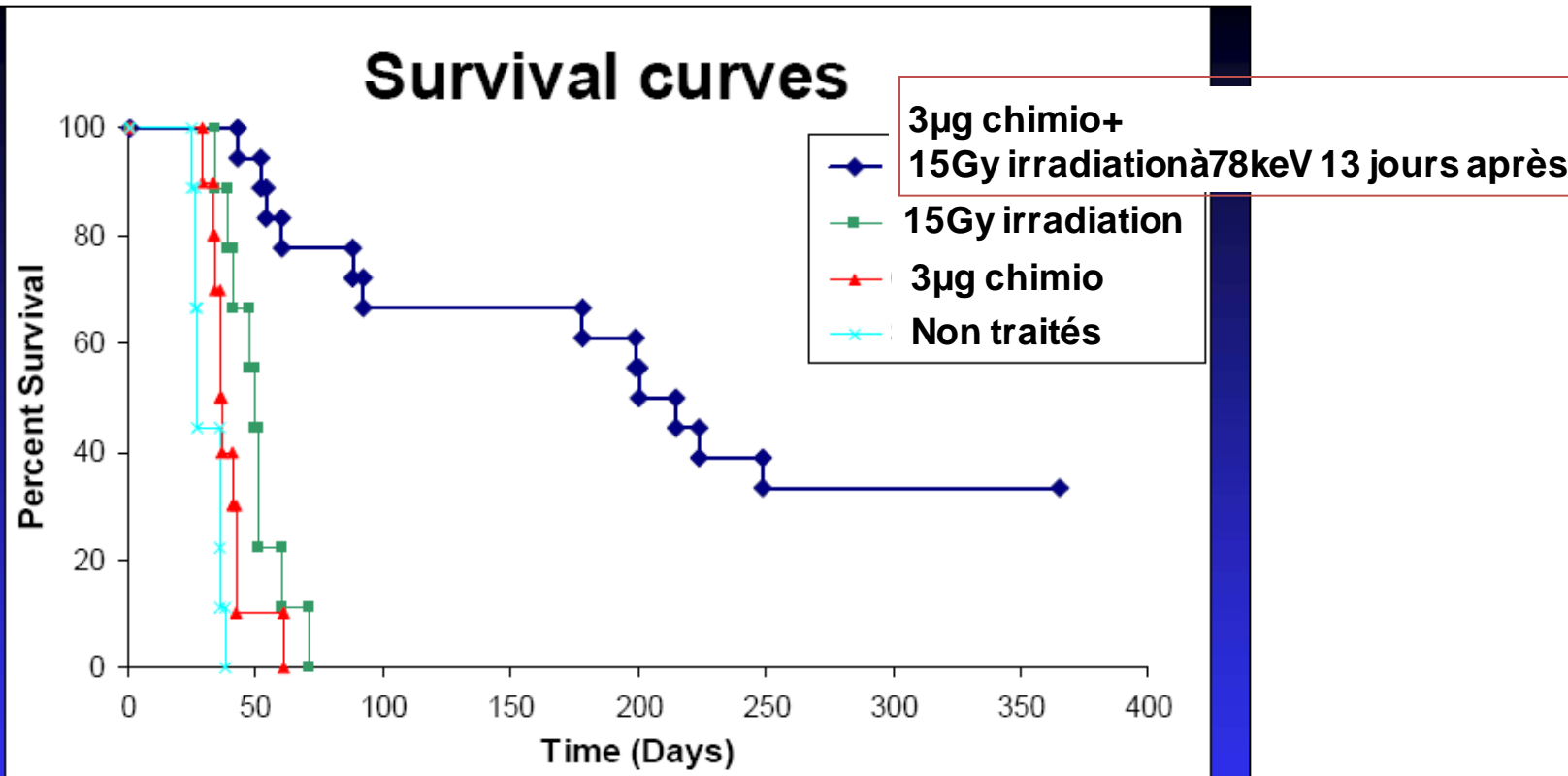
Pas de traitement pour le 'glioblastome'
aujourd'hui (7 cas/10⁵ par an en France...)

• **Idée** (cf thèses S. Corde, J.F. Adam, ESRF)
fixer un élément lourd (**platine**) sur l'ADN
cancéreuse

• **Puis** exciter l'atome par un
rayonnement X (**78 keV=couche K**)
pour détruire cette ADN...



Mesures effectuées à l'ISRF sur des rats (auxquels on a inoculé le gliome)
→ Phase d'essais cliniques à l'ESRF (chats et chiens...)



694 % Increase in life span relative to median survival time

M.C. Biston, et al., Cancer research, 64, 2317-2323 (2004)

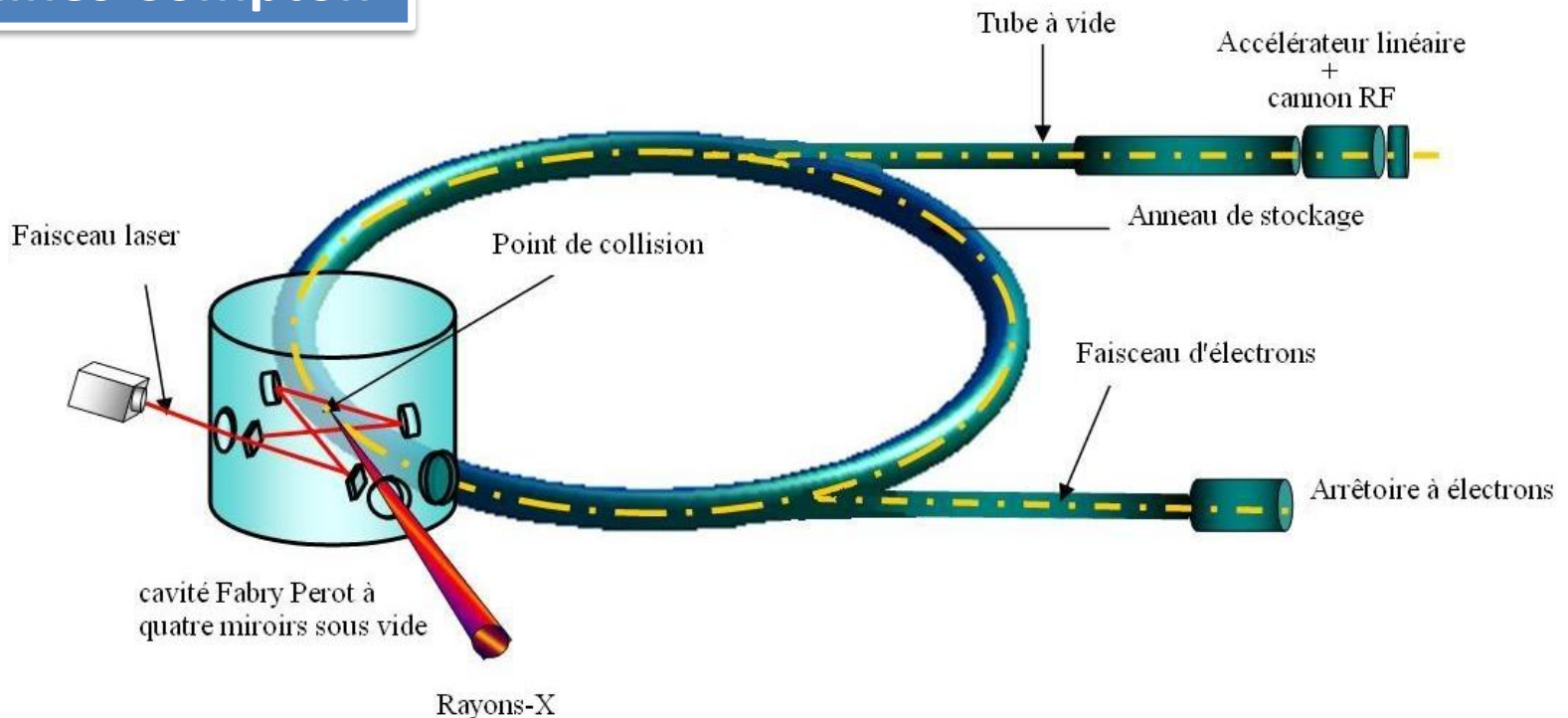
A. Bravin, www.ca.infn.it/alghero2008

Exemple tiré d'une
publication médicale
de l'ESRF

However, a routine use of synchrotron light for human treatment will necessitate the development of new X-ray monochromatic sources devoted to medical use. The next decade should be productive in developing such technology.

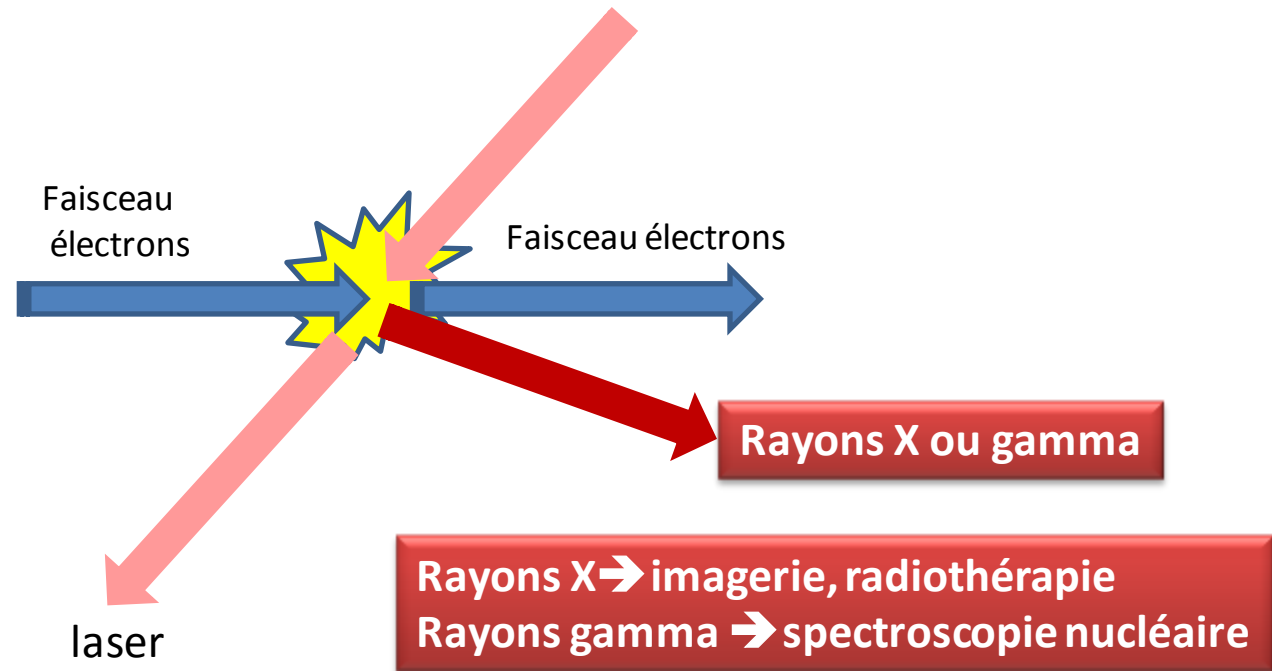
[S. Corde et al. cancer reas. 63 (2003)3221]

Les machines Compton



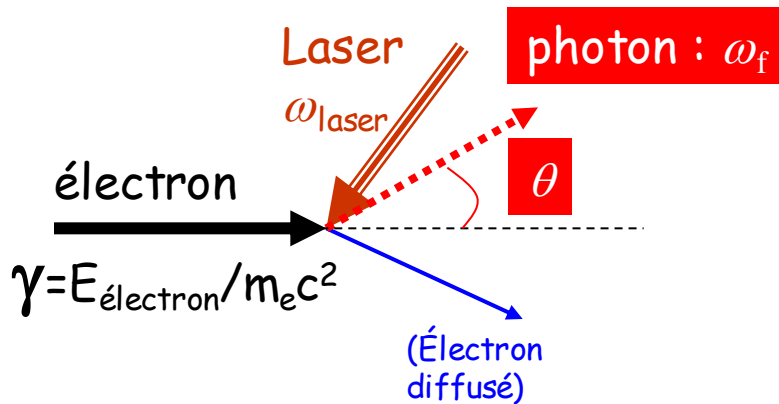
III.1 Applications de l'interaction Laser électrons : les machines Compton

Processus d'interaction laser électrons 'diffusion Compton'



- ❖ A haute énergie on décrit la réaction en considérant l'interaction d'un photon du laser avec un électron du faisceau (diffusion Compton)
- ❖ A 'basse énergie' on peut considérer que l'électron oscille dans le champ électrique oscillant de l'onde électromagnétique et qu'il rayonne (diffusion Thomson)

Diffusion Compton



$$\omega_{f,max} = 4\gamma^2 \omega_{laser}$$

Avec $\gamma \sim 100$ ($E_{\text{électron}} = 50 \text{ MeV}$)

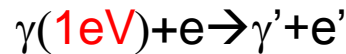
$\rightarrow \omega_{f,max} = 45000 \text{ eV}$ si $\omega_{laser} \approx 1 \text{ eV}$

L'interaction Compton est le mécanisme le plus efficace pour 'booster' l'énergie

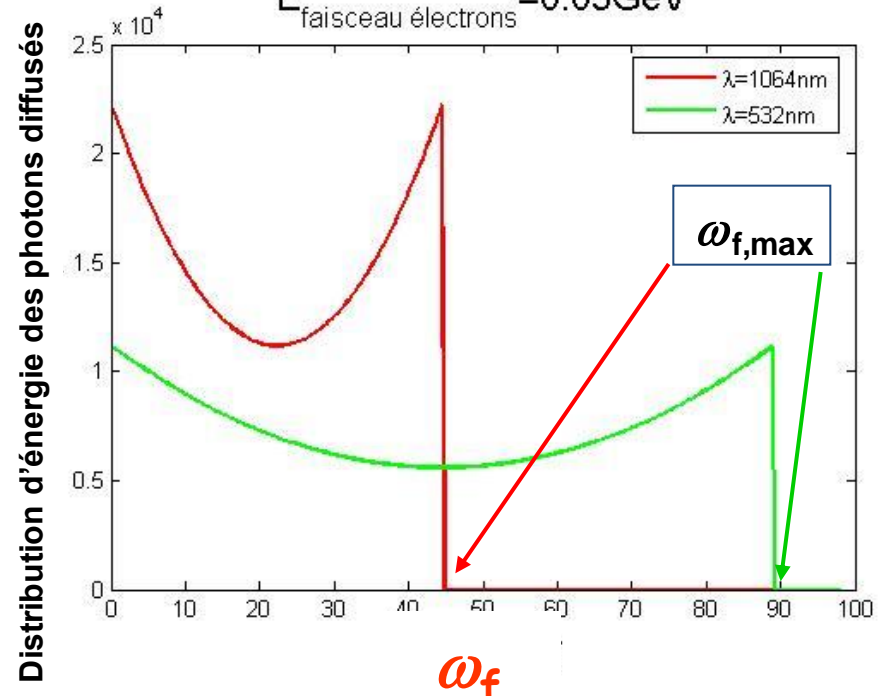
Exemple du faisceau laser YAG

$\lambda \approx 1 \mu\text{m}$ \rightarrow énergie des photons du faisceau laser $E_{laser} \approx 1 \text{ eV}$

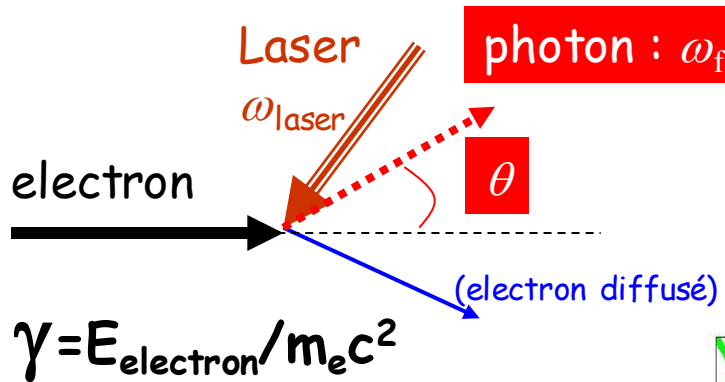
• On peut décrire la diffusion Compton laser électron via le processus élémentaire



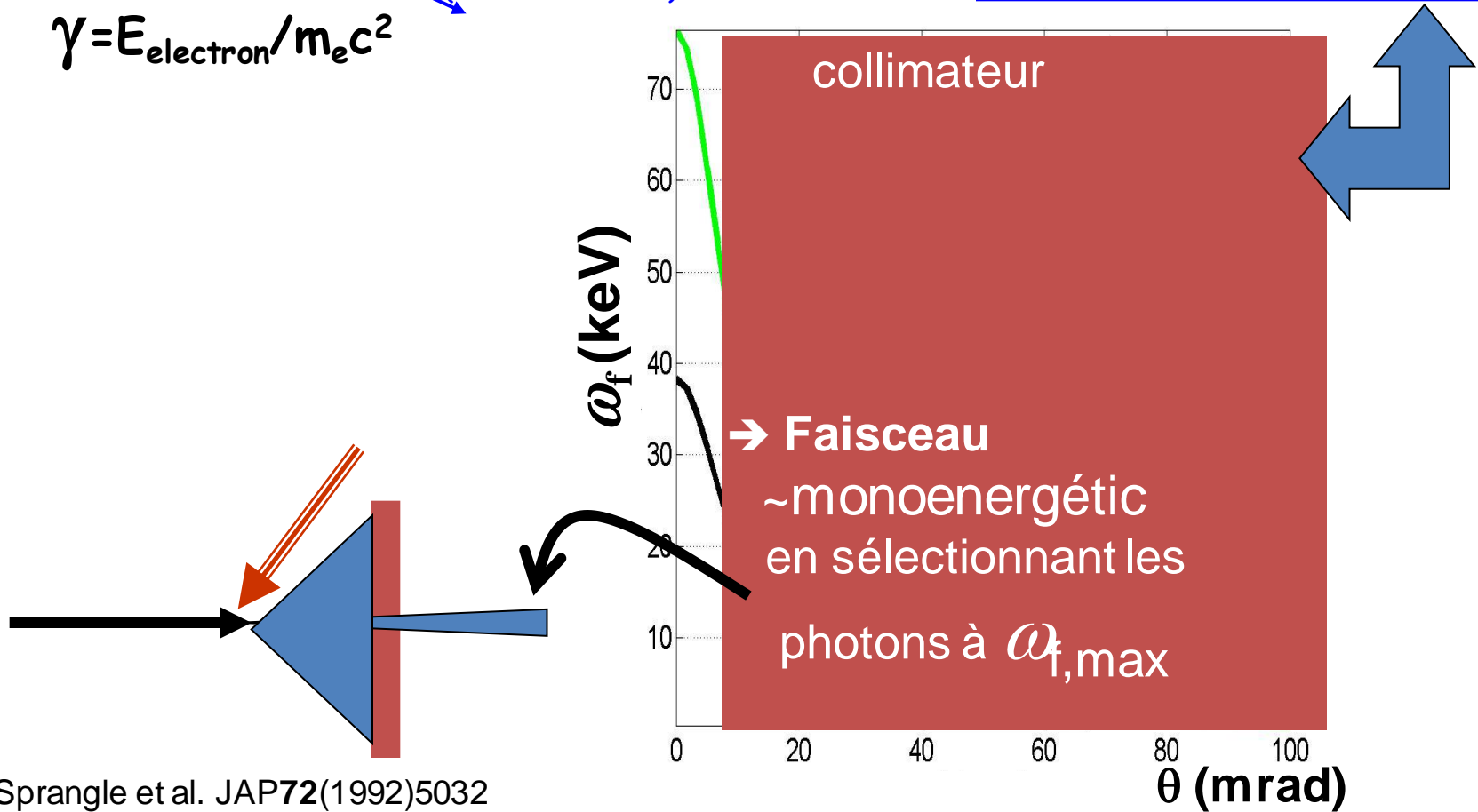
$E_{\text{faisceau électrons}} = 0.05 \text{ GeV}$



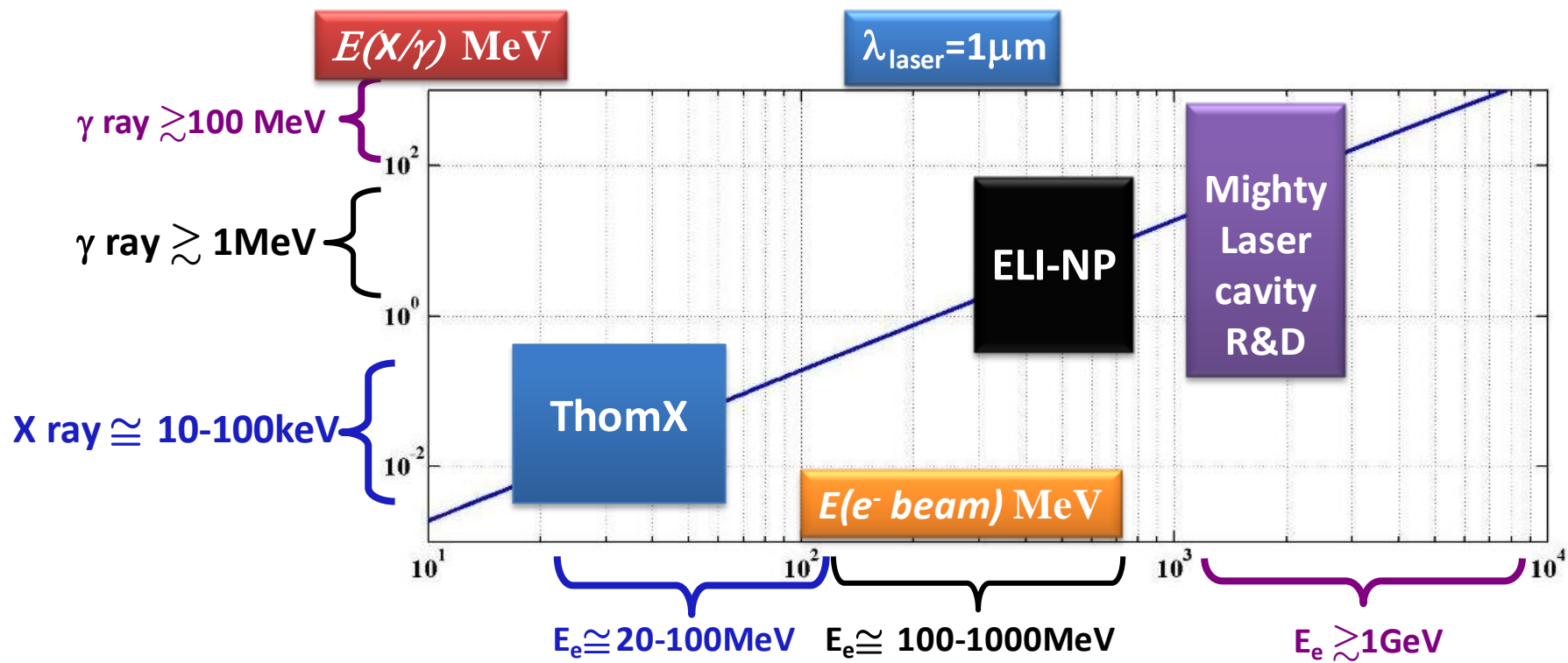
Correlation cinématique entre l'angle et l'énergie du photon



La diffusion Compton
 Photon_laser+e → photon+e'
 est une processus
 À 2 corps → cinématique
 relativiste : $\omega_f = f(\theta)$



Applications of Compton scattering



Low energy applications

- Medical: radiography & radiotherapy
- Museology ...

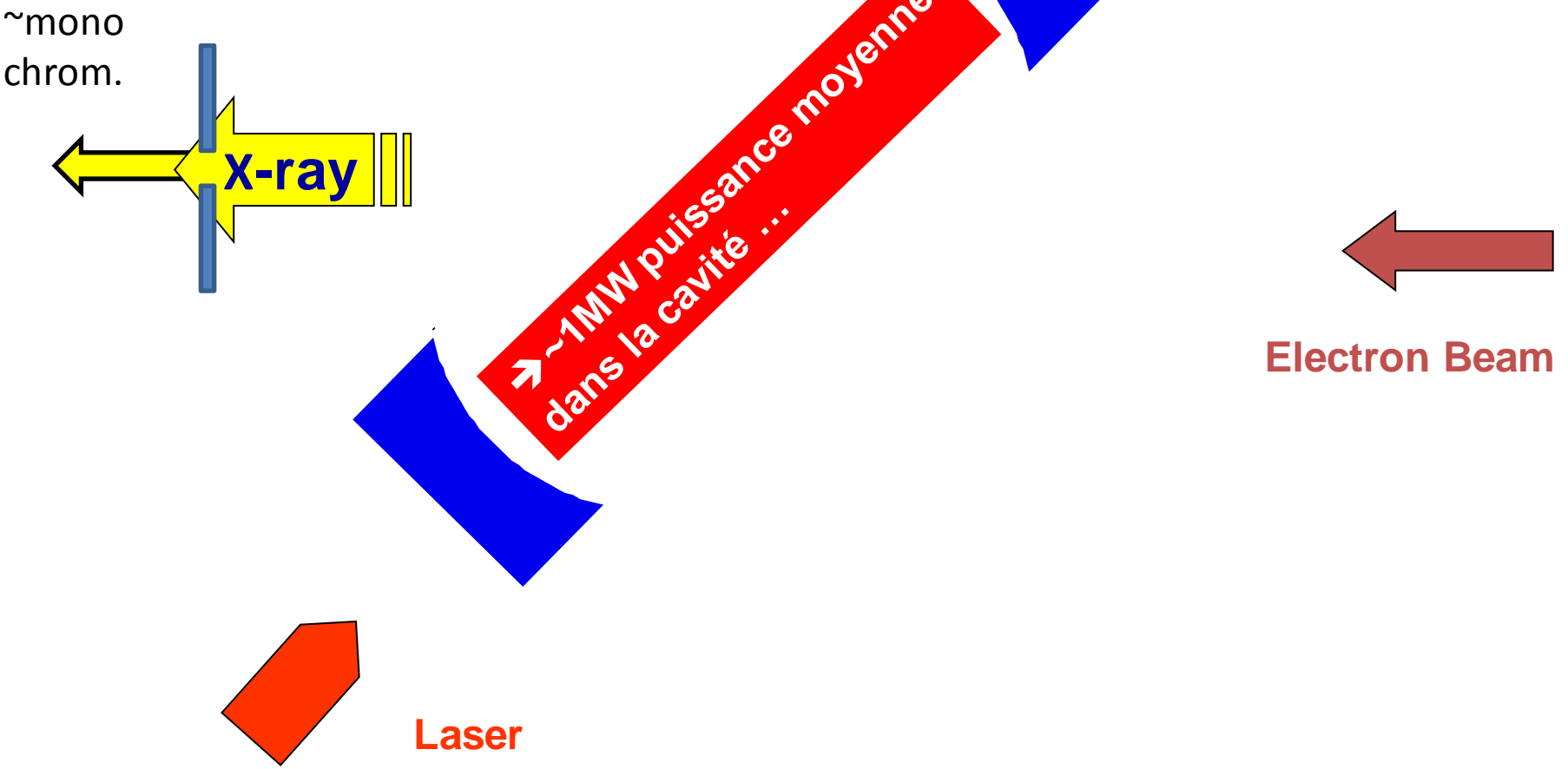
Nuclear fluorescence applications

- Nuclear physics
- Nuclear survey
- Nuclear waste management...

High energy applications

- Compton polarimeter $\gamma\gamma$ collider
- Polarised positron source...

*Mais la 'section efficace' Compton est très petite
→ il faut de forte puissances laser
→ cavité optique Fabry-Perot pour
des machines a haute répétition*



From Shimizu-san
KEK

The ThomX project: monochromatic high flux X-ray source for Low-energy applications



□ Collaboration between:

LAL (A. Variola, project leader),

SOLEIL (Synch. Rad. machine, Saclay),

CELIA (Laser lab., Bordeaux)

NEEL (Instr. X, Grenoble)

+ C2RMF/CNRS (scientific lab. of Le Louvre museum, led by P. Walter)
at start (C.R. Physique 10 (2009)676)

+ New archeological Lab. in paris (P. Walter)

+ **ESFR&INSERM** (Grenoble, Synch. Rad. Machine, medical ligne group,
A. Bravin)

+ **Thales** for industrial applications

□ ThomX funded by the 'grand emprunt national'

→ ~10M€



The ThomX machine



~50MeV electrons

→ Compton Scattering perturbations

→ Intra beam Scattering ...

→ 'Transient machine' (we will start with 20ms beam life time)

Size ~10mx7m

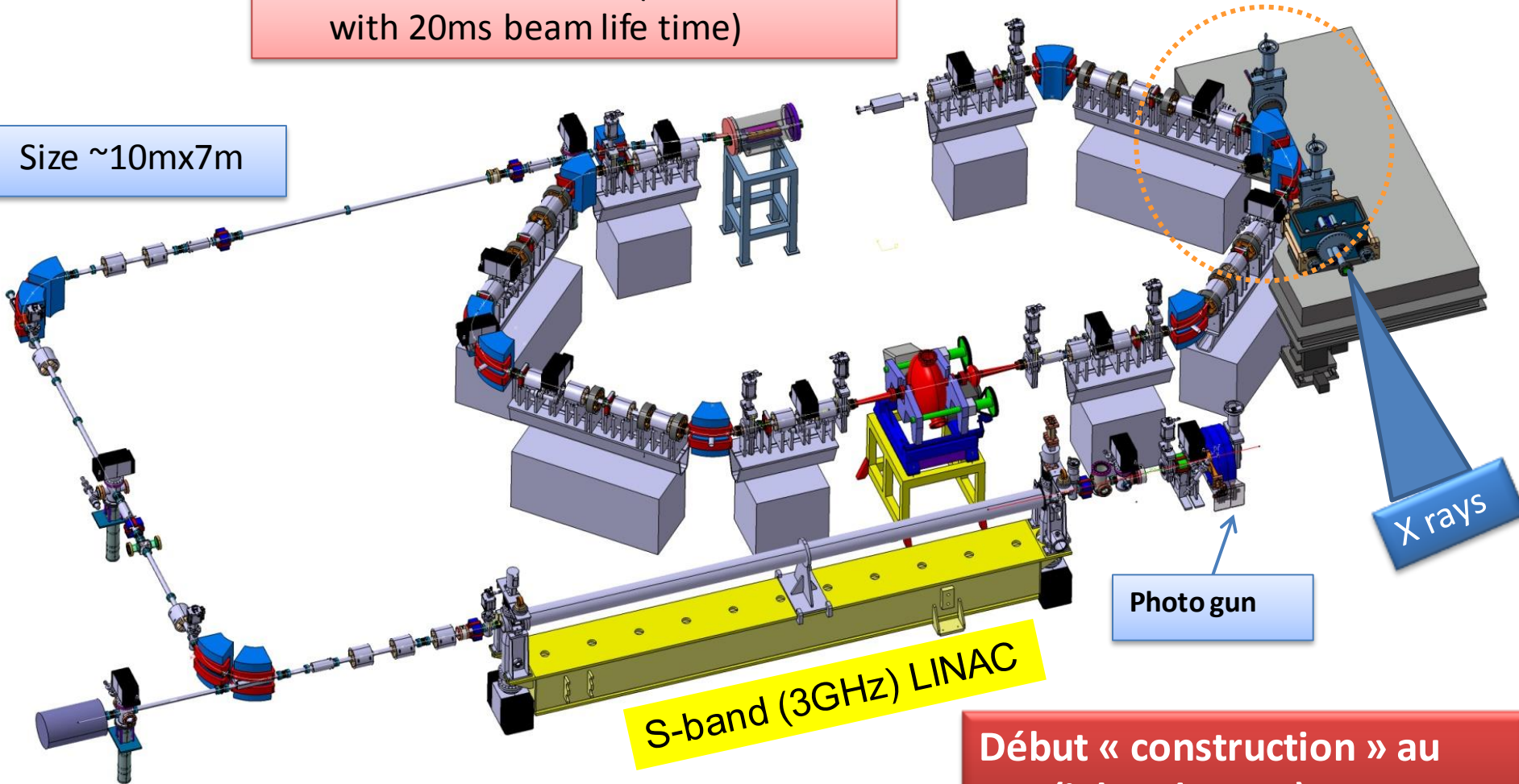
Optical resonator

X rays

Photo gun

S-band (3GHz) LINAC

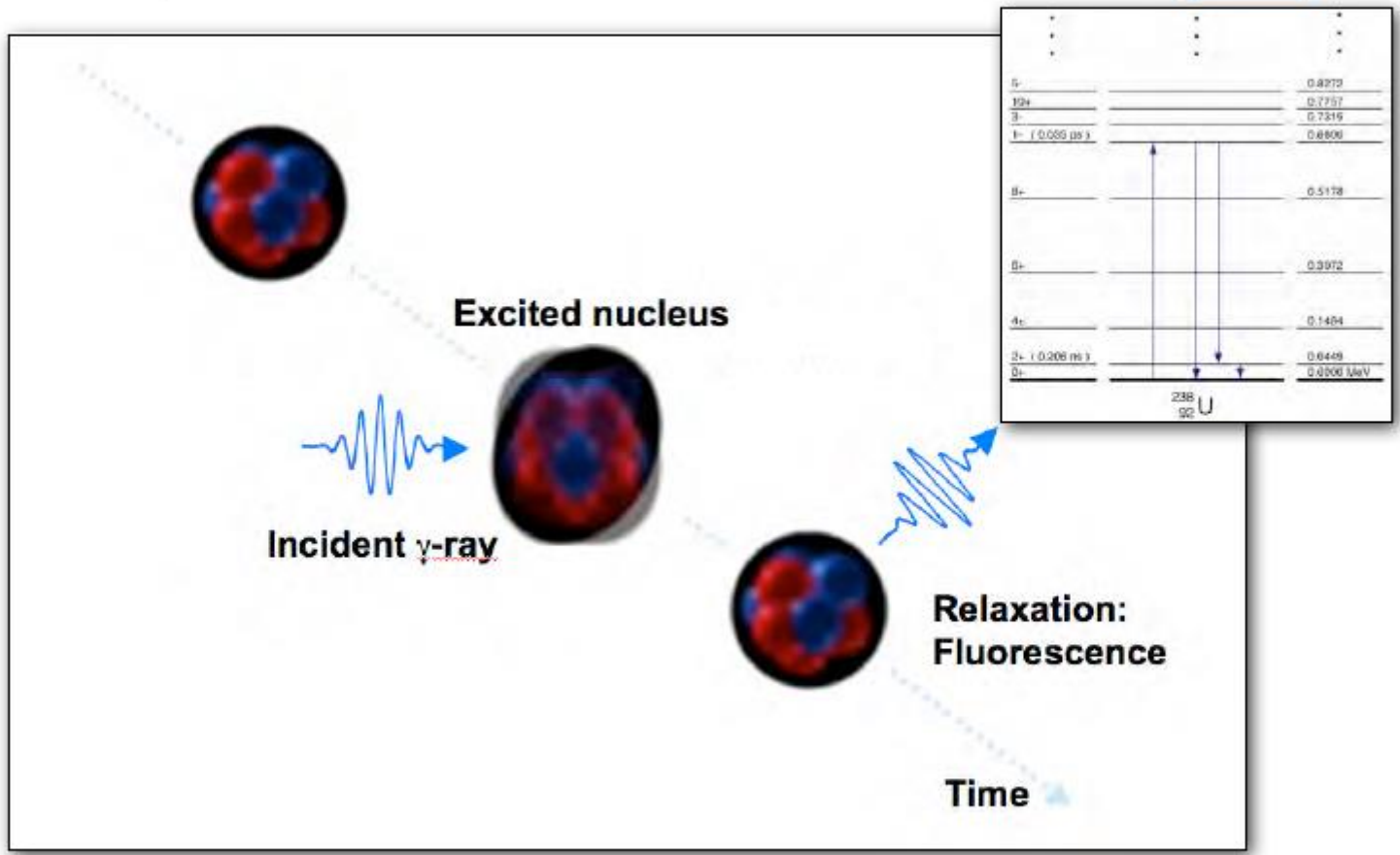
Début « construction » au LAL (igloo de Lure) 2012



Application à moyenne énergie : fluorescence nucléaire

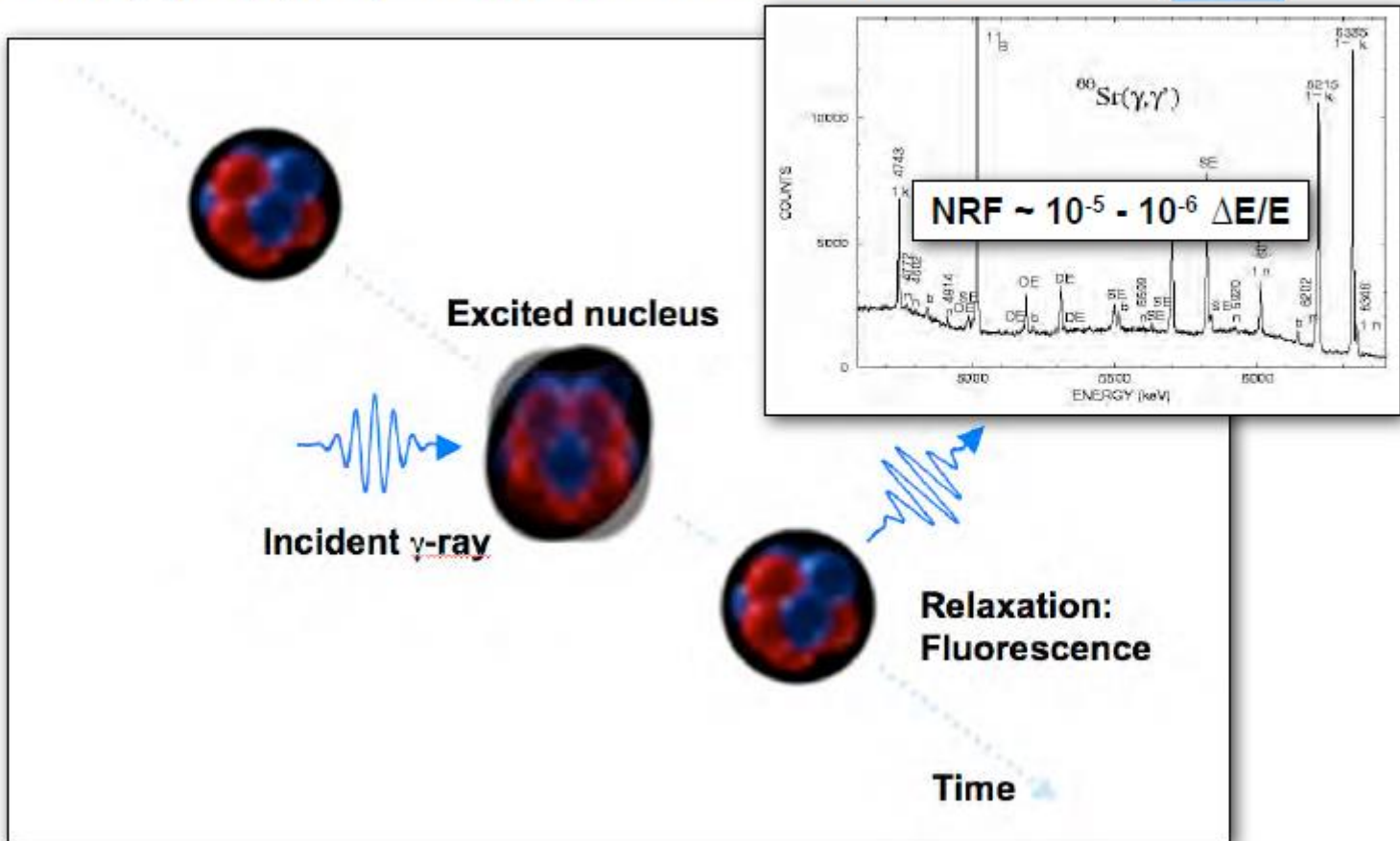
- **Projet américain (LLNL)**
 - Machine à rayon gamma monochromatique pour identifier la présence d'Uranium aux frontières
 - La machine doit tenir dans un camion !
- **Projet japonais**
 - Mesurer la composition des éléments radioactifs dans les 'bidons' de déchets à enterrer

Nuclear resonance fluorescence is easily excited narrowband laser-Compton sources



Nuclear Resonance Fluorescence depends upon the number of protons and the number of neutrons in the nucleus and is an isotope-specific material signature

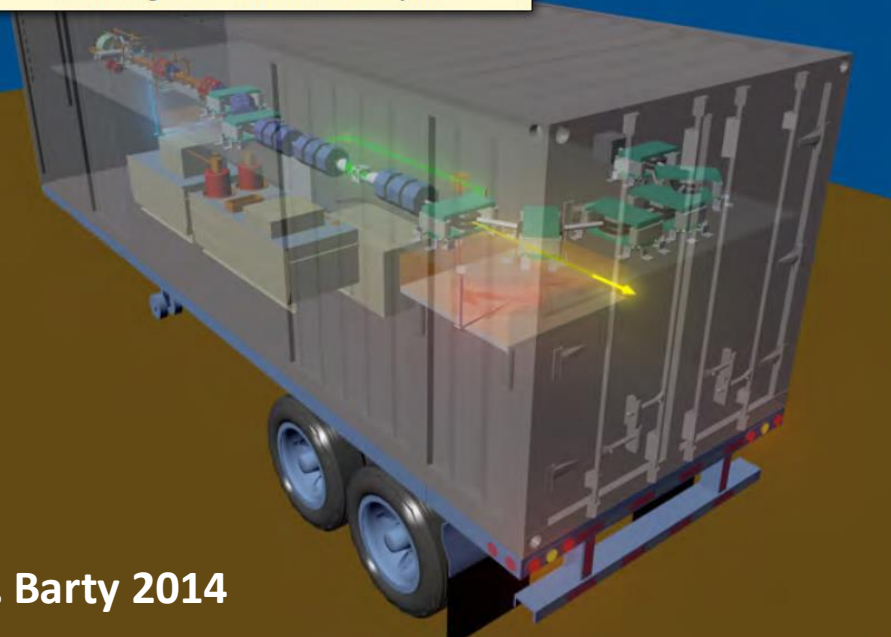
Intrinsic NRF widths are of order meV but are thermally (Doppler) broadened to of order eV



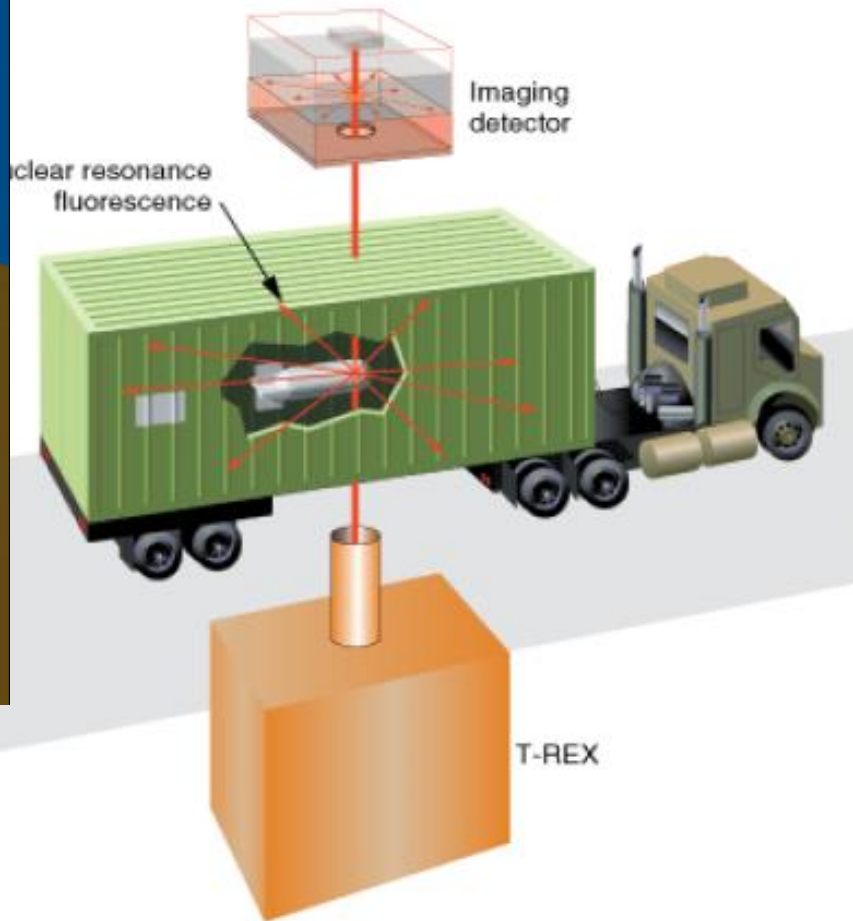
Selective excitation of NRF transitions is possible with laser-Compton gamma-ray source bandwidths of order $\Delta E/E \sim 10^{-3}$

Besoin : Source de rayons gamma dequasi 'mono-énergie'

Many applications also require that the underlying technologies be robust and compact

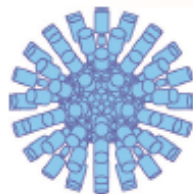


C. Barty 2014



need 10^{13} γ/s

GAMMA DETECTOR



Livermore researchers are developing a system that combines the capabilities of a Thomson-radiated extreme x-ray (T-REX) system with a nuclear resonance fluorescence technique to detect small amounts of nuclear materials and image their isotopic distribution. The system could be used to inspect well-shielded objects, such as cargo containers moving through a terminal.

Applications : gestion des déchets nucléaires



Applications of high-flux γ -ray beams to nuclear and radioactive waste management

**R. Hajima
ERL Development Group,
Japan Atomic Energy Agency**

PosiPol'08, Hiroshima, Jun.18, 2008.

1

Radioactive waste in JAEA



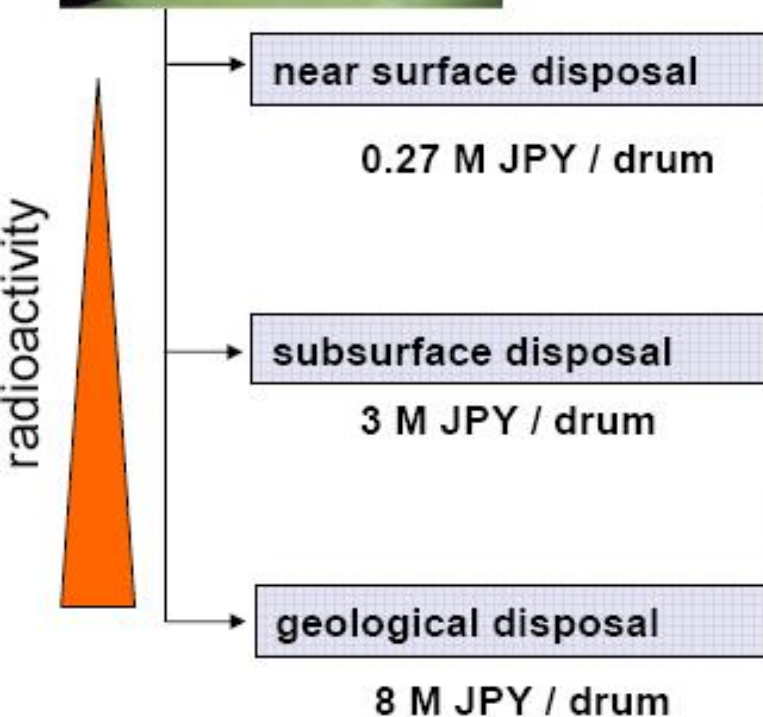
cleanup of all the waste in JAEA costs \$20 billion and 80 years.



the most urgent issue !

Gestion des déchets nucléaires

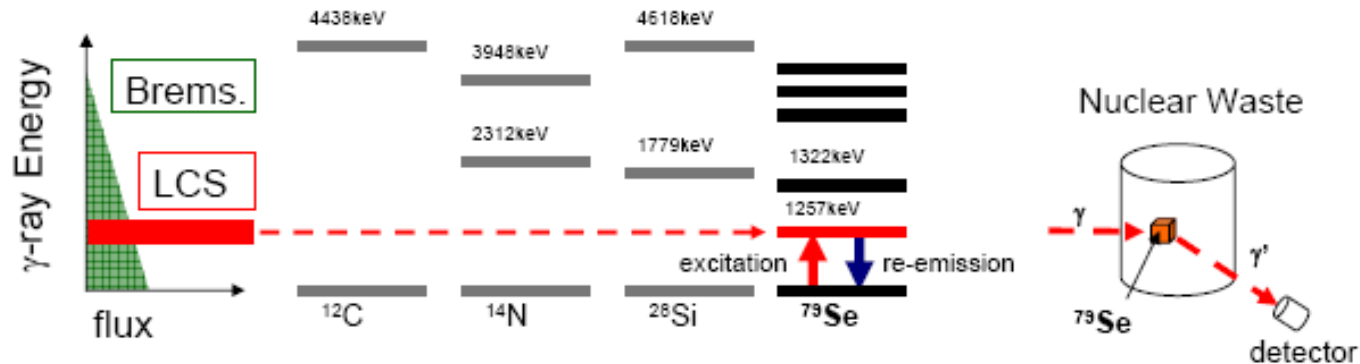
68,900 drums stored in JAEA (Agence Nucléaire du Japon)



Le stockage des déchets est une procédure très onéreuse : on enterre les bidon suivant leur dangerosité **MAIS** les mesures de radioactivité ne sont pas assez précises

- Besoin d'identifier les isotopes radioactifs dans les bidons (U238, ...)
- Fluorescence nucléaire résonnante avec 1-4 MeV rayons gamma
- Faisable avec une machine Compton
 - 320 MeV electrons
 - ~600kW puissance moyenne, 2ps@130MHz, 1µm longueur d'onde laser

Nondestructive Assay by Nuclear Resonant Fluorescence

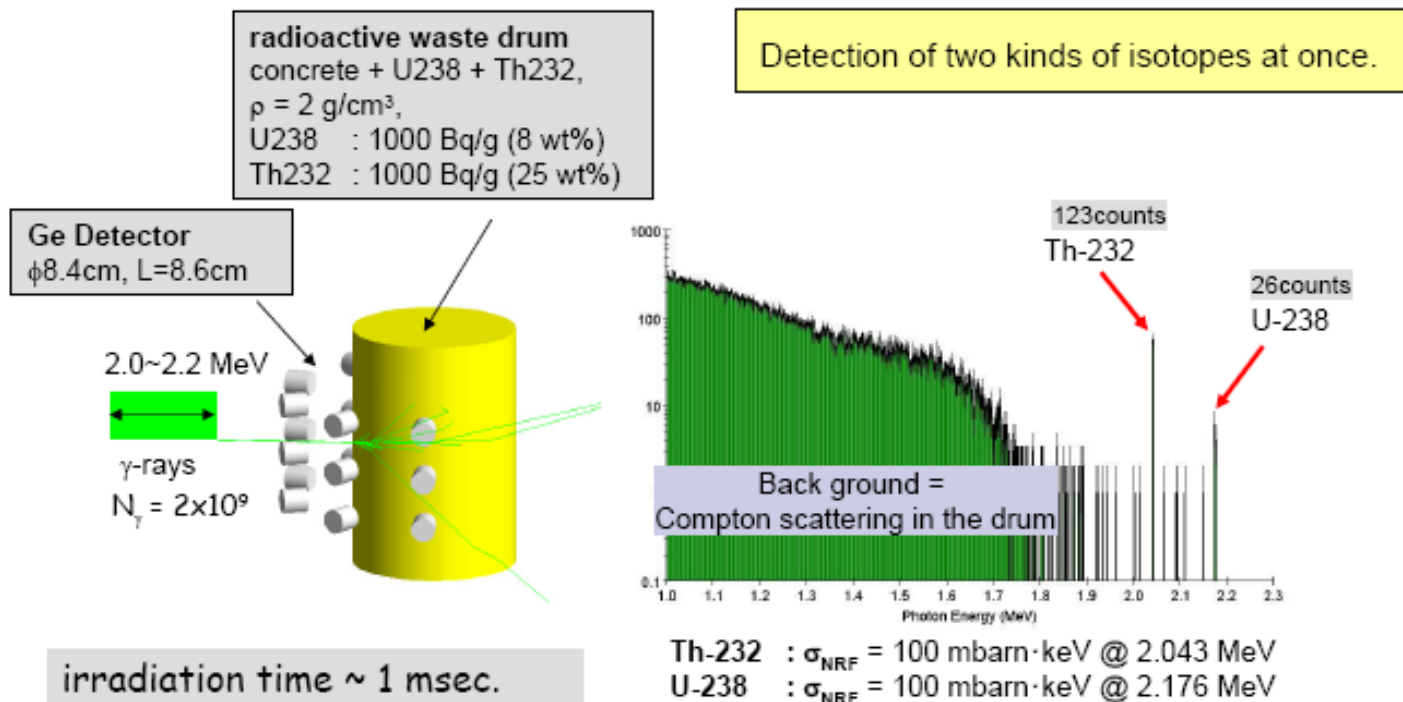


- Irradiation of γ -rays tuned at a NRF energy of nuclide to detect
- Detection of scattered γ -rays by energy-resolved detectors
- NRF is a unique fingerprint of nuclides \rightarrow radioactive and stable nuclides can be detected
- Using 1-4 MeV γ -rays \rightarrow applicable to thick objects

Un accélérateur d'électrons de 350 MeV est nécessaire pour cette application
Caractéristiques du laser :

**\rightarrow ~600kW average power,
 2ps@130MHz, 1 μm laser wavelength**

Nondestructive Detection of Isotopes



Simulation by GEANT4 (with NRF extension)

N. Kikuzawa et al.,
Proc. AccApp'07

**Projet européen
Extrem Light Infrastructure–Nuclear Pilar
(ELI-NP-GS)**

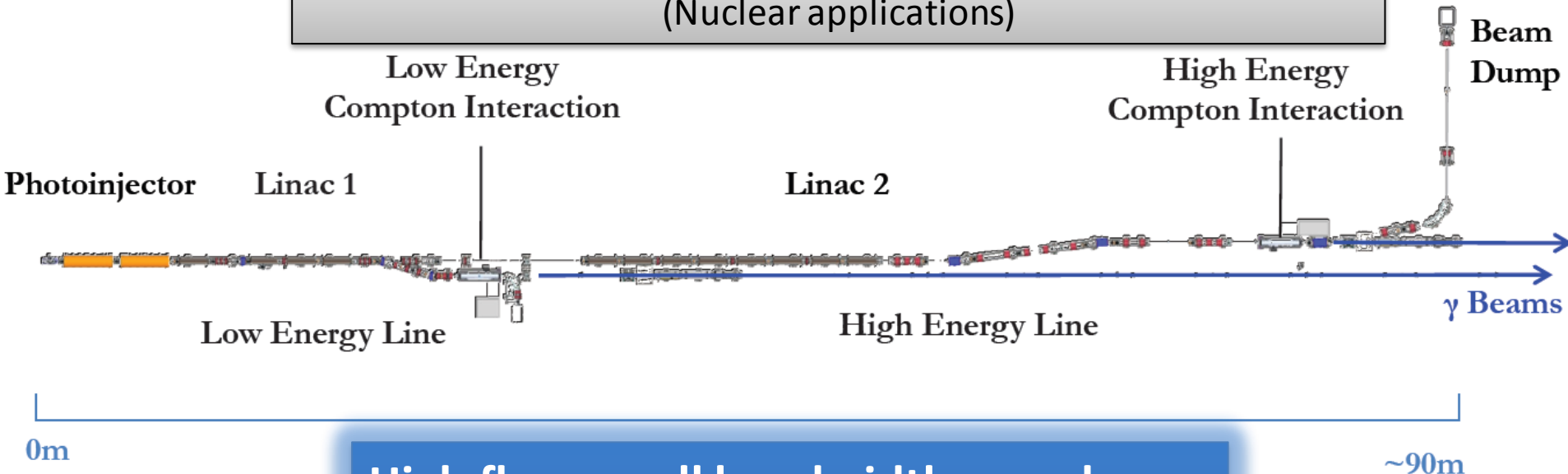
**→ Produire des rayons γ
de ~ 1 MeV à 20MeV
pour faire de la physique nucléaire**

**→ besoins technologiques
au-delà des possibilités
technologiques
actuelles**

Futur: ELI-NP γ -ray beam (European answer to a EC tender)



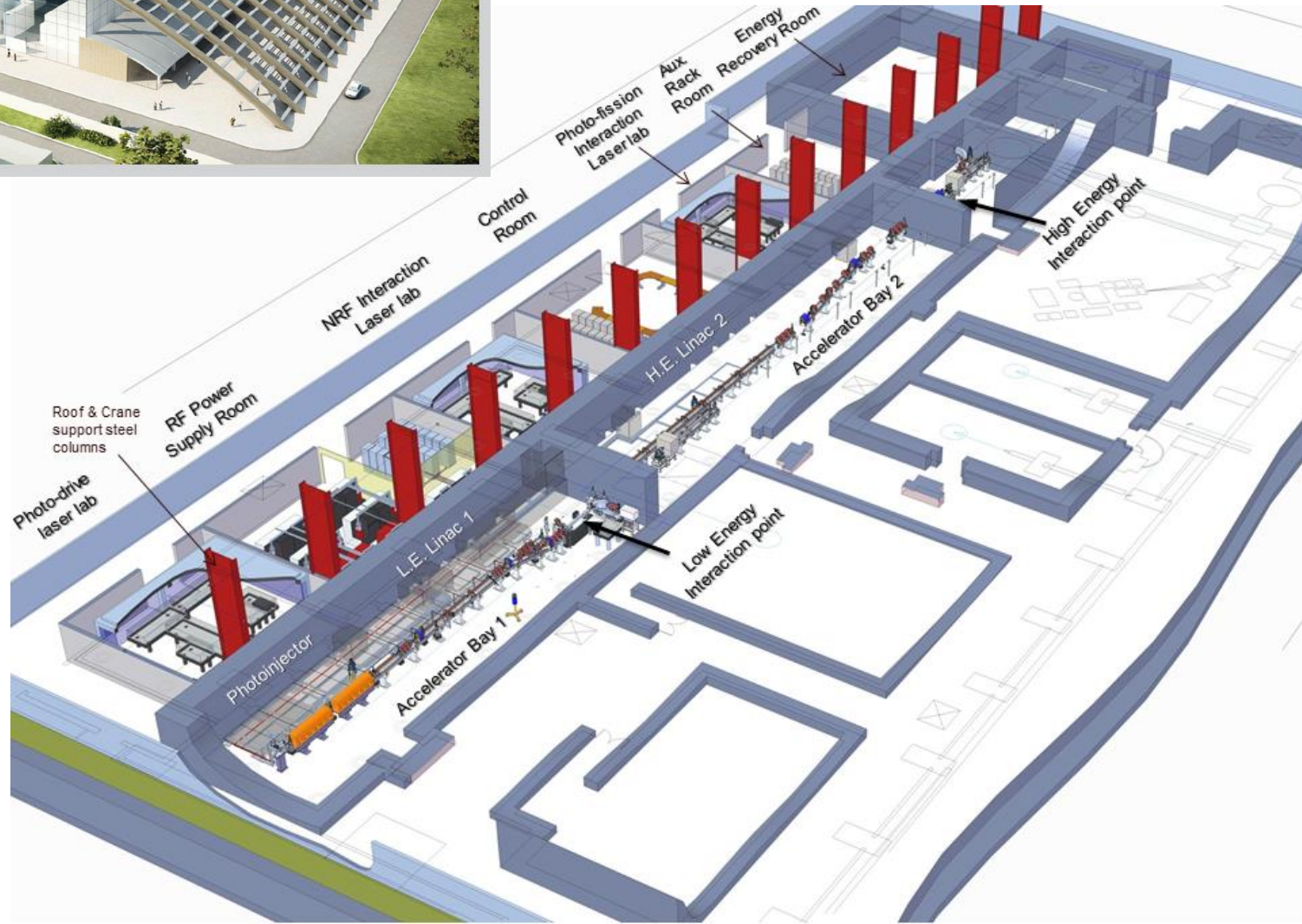
S&C band 700MeV e^- 100Hz LINAC with 2 Compton IPs \rightarrow Bucarest
(Nuclear applications)



High flux, small bandwidth γ -ray beam
(~100 better than state of the art)

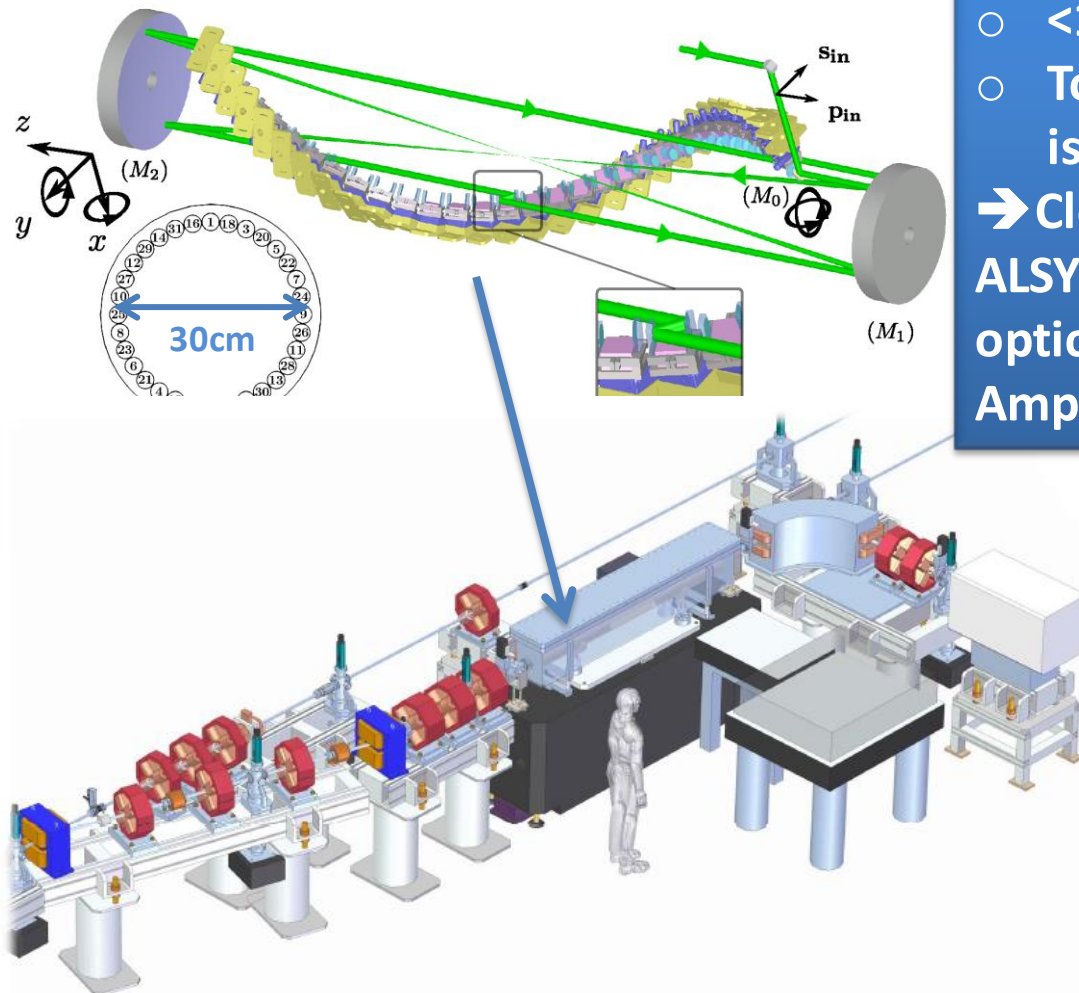


In Romania, Magurele, the ELI pillar will focus on laser-based nuclear physics. For this purpose, an intense gamma-ray source is foreseen by coupling a high-energy particle accelerator to a high-power laser.



LAL contribution to ELI-NP

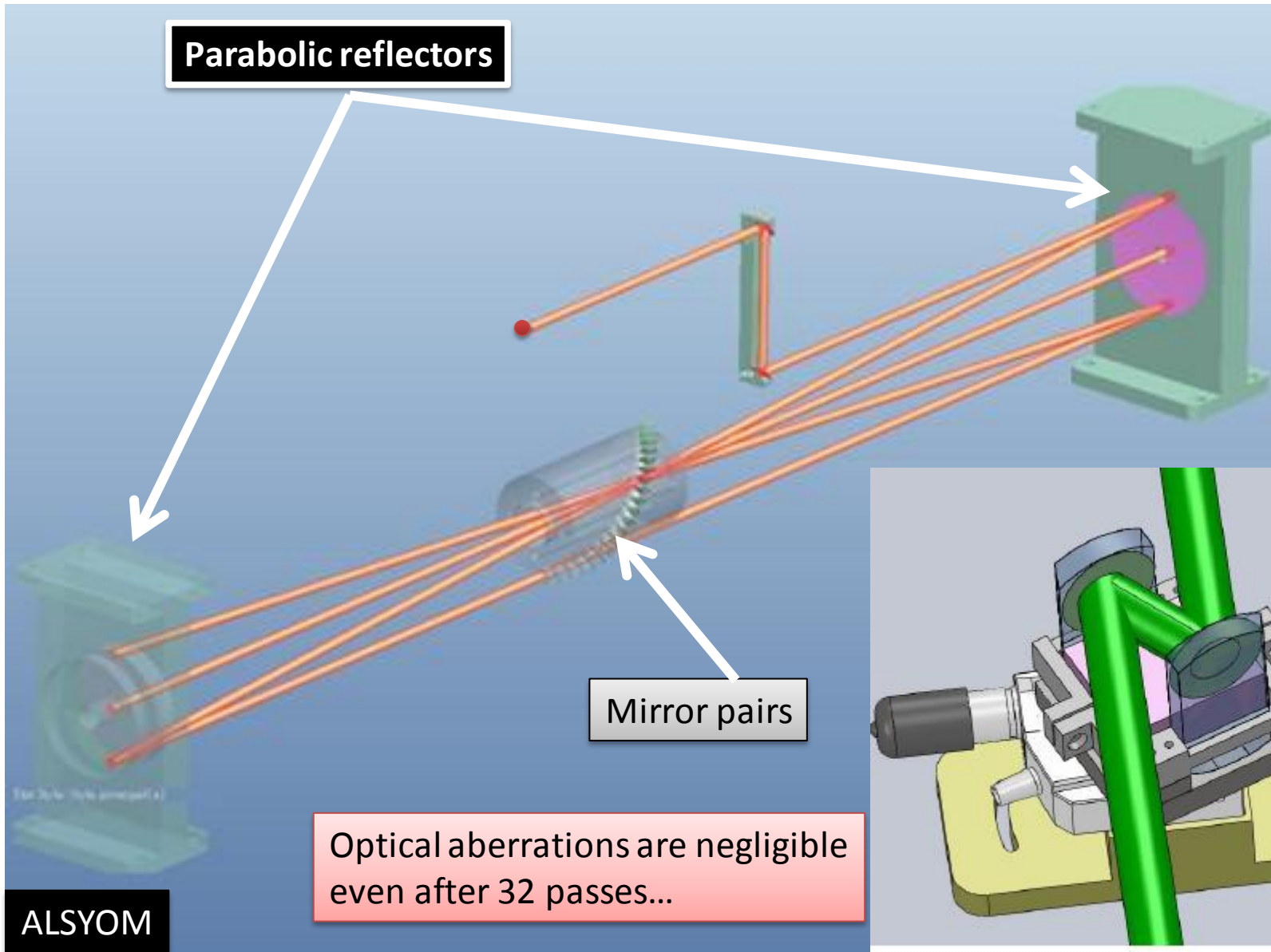
Design, alignment, synchronization, commissioning of a 32-pass 3D recirculator
→ High precision 'aberration free' optical setup



- <100fs synchronization
 - Tolerances & cleanliness & damage issues similar to Laser Mega Joule
- Close collaboration with ALSYOM CO. in charge of manufacturing, optical pre-alignments, installations
Amplitude Co. for the lasers

Le CNRS a signé la réponse à l'appel d'offre qui sera remis cette semaine en Roumanie

ELI-NP solution: a laser beam 3D recirculator



Applications de la diffusion Compton à haute énergie dont on a pas parlé

- 'Laser wire'
- Polarimètre Compton
- Source de positrons polarisés
- Collisionneur photon-photon

IV. Nouvelles techniques d'accélération

Accélération laser-plasma

VOLUME 43, NUMBER 4

PHYSICAL REVIEW LETTERS

23 JULY 1979

Laser Electron Accelerator

T. Tajima and J. M. Dawson

Department of Physics, University of California, Los Angeles, California 90024

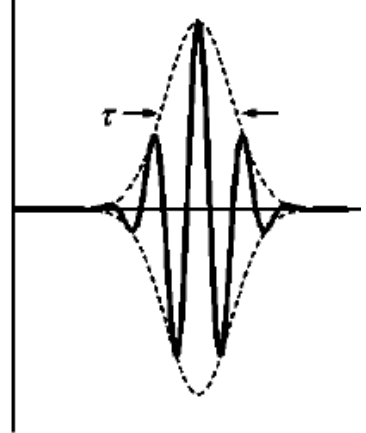
(Received 9 March 1979)

An intense electromagnetic pulse can create a weak of plasma oscillations through the action of the nonlinear ponderomotive force. Electrons trapped in the wake can be accelerated to high energy. Existing glass lasers of power density 10^{18}W/cm^2 shone on plasmas of densities 10^{18}cm^{-3} can yield giga-electronvolts of electron energy per centimeter of acceleration distance. This acceleration mechanism is demonstrated through computer simulation. Applications to accelerators and pulsers are examined.

Pulse laser **HYPER** intense

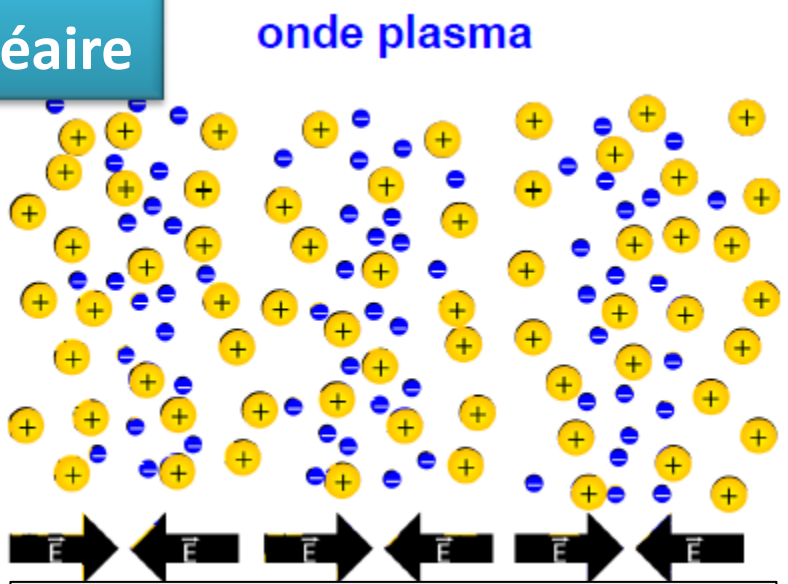
Onde plasma Régime non-linéaire

a) Time Domain



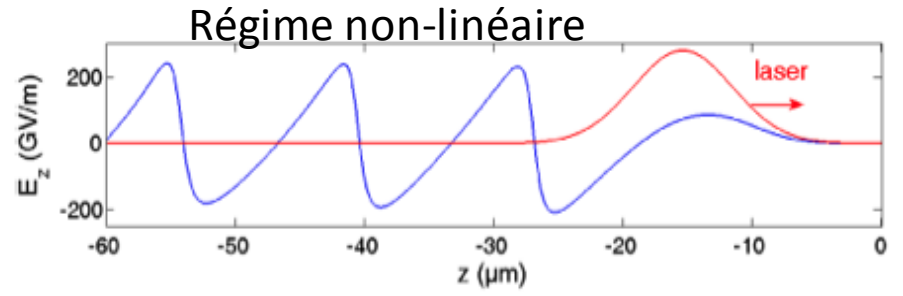
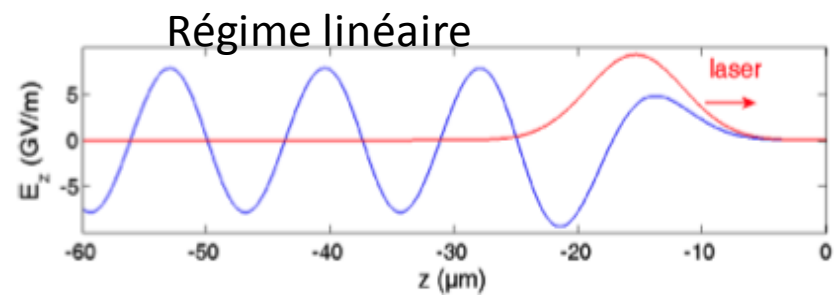
+

Gaz



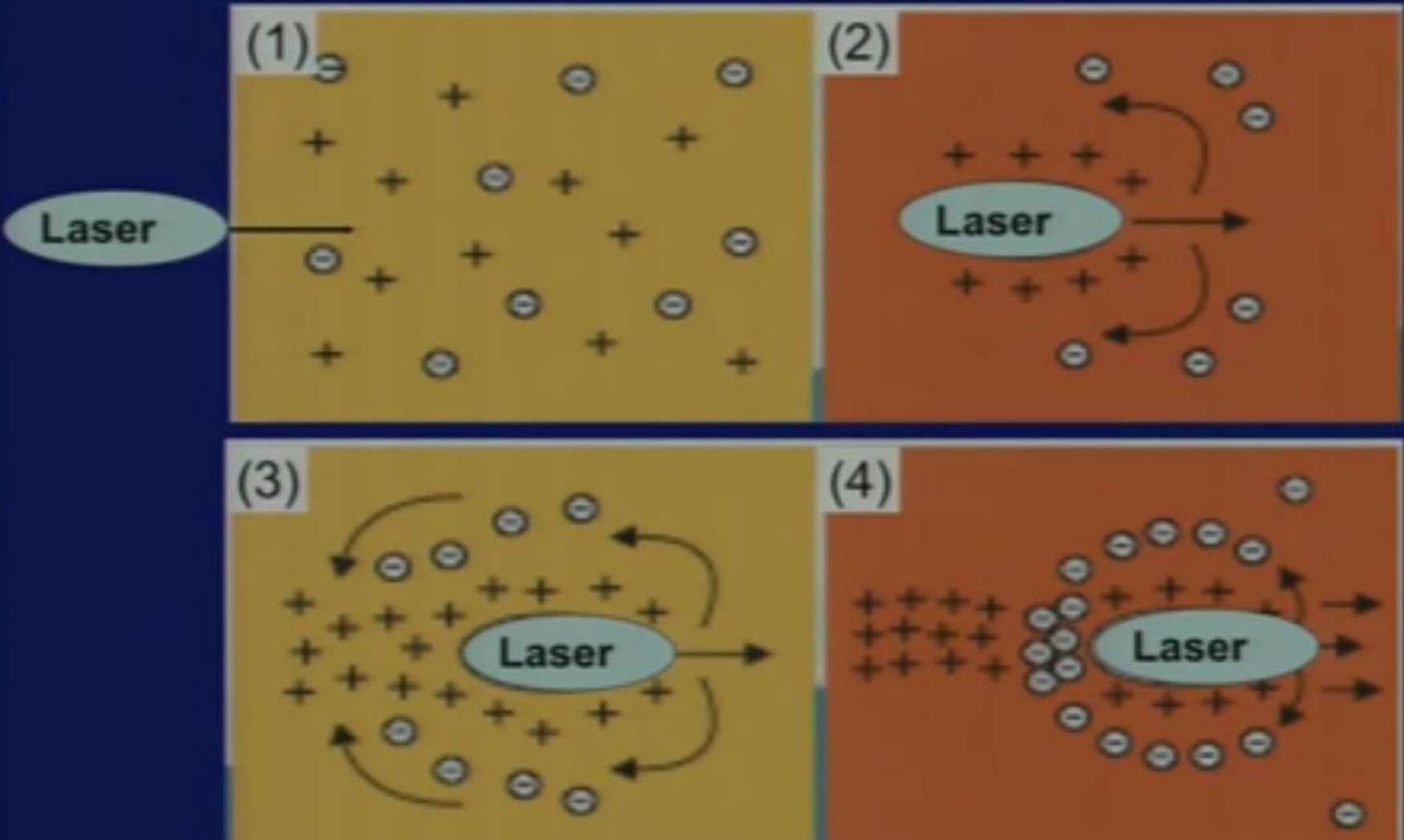
$1\text{fs} = 10^{-15}\text{s}$
 $= 0,000000000000000001\text{s}$

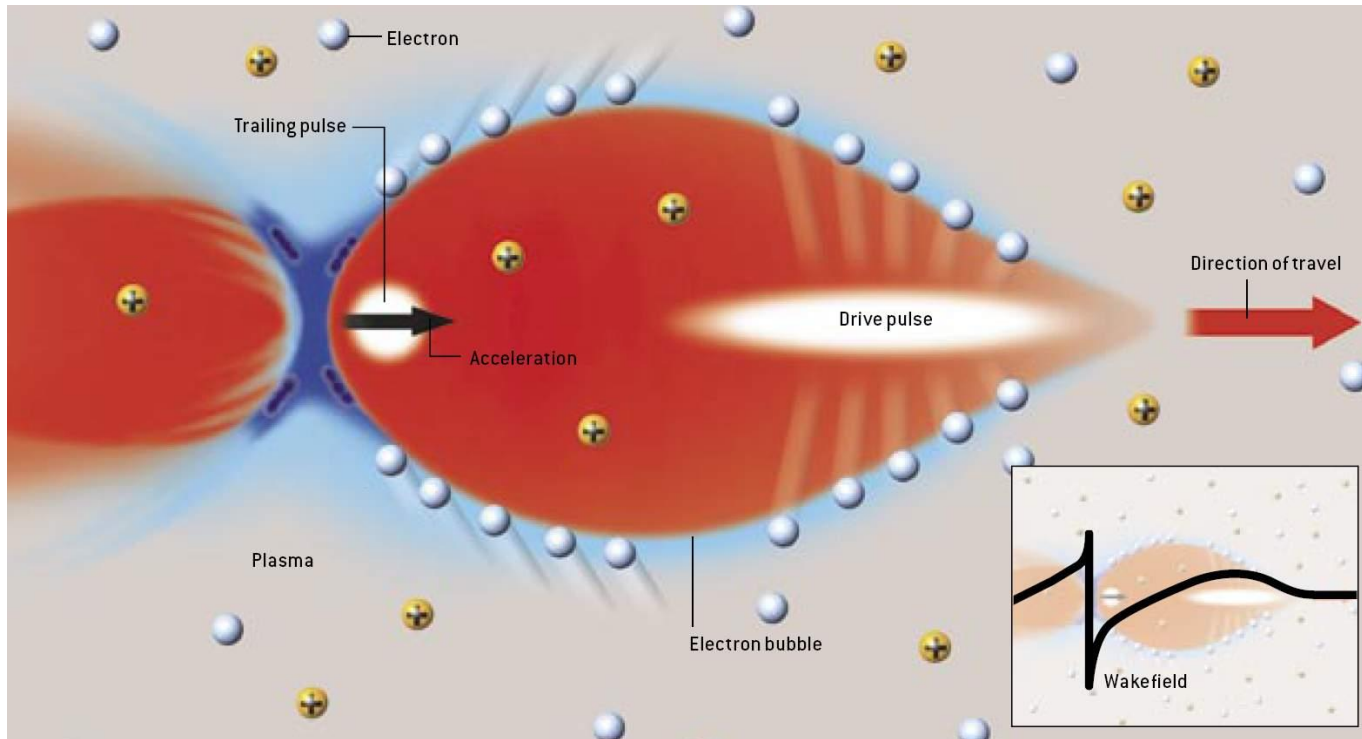
Champ électriques $\sim 100\text{GV/m}$!
 (qqes 10MV/m en techno standard)
 Dans le 'sillage' de l'onde laser



Régime de la bulle

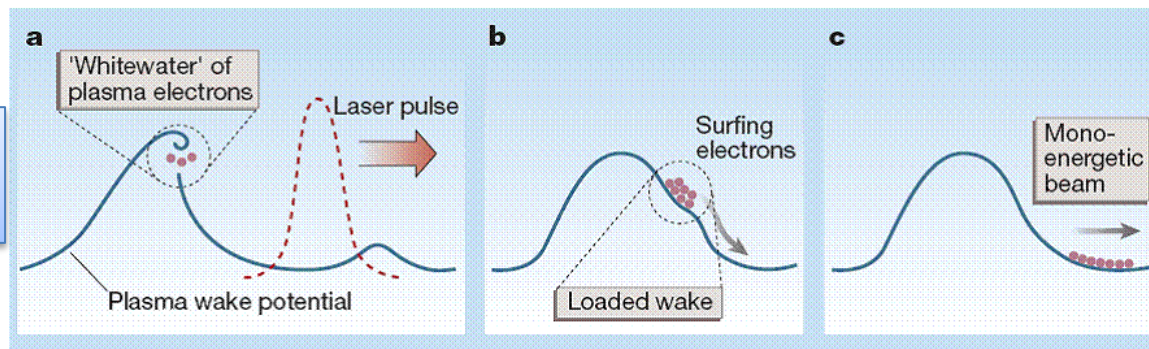
Intense laser causes charge separation leading to extremely high fields in plasma



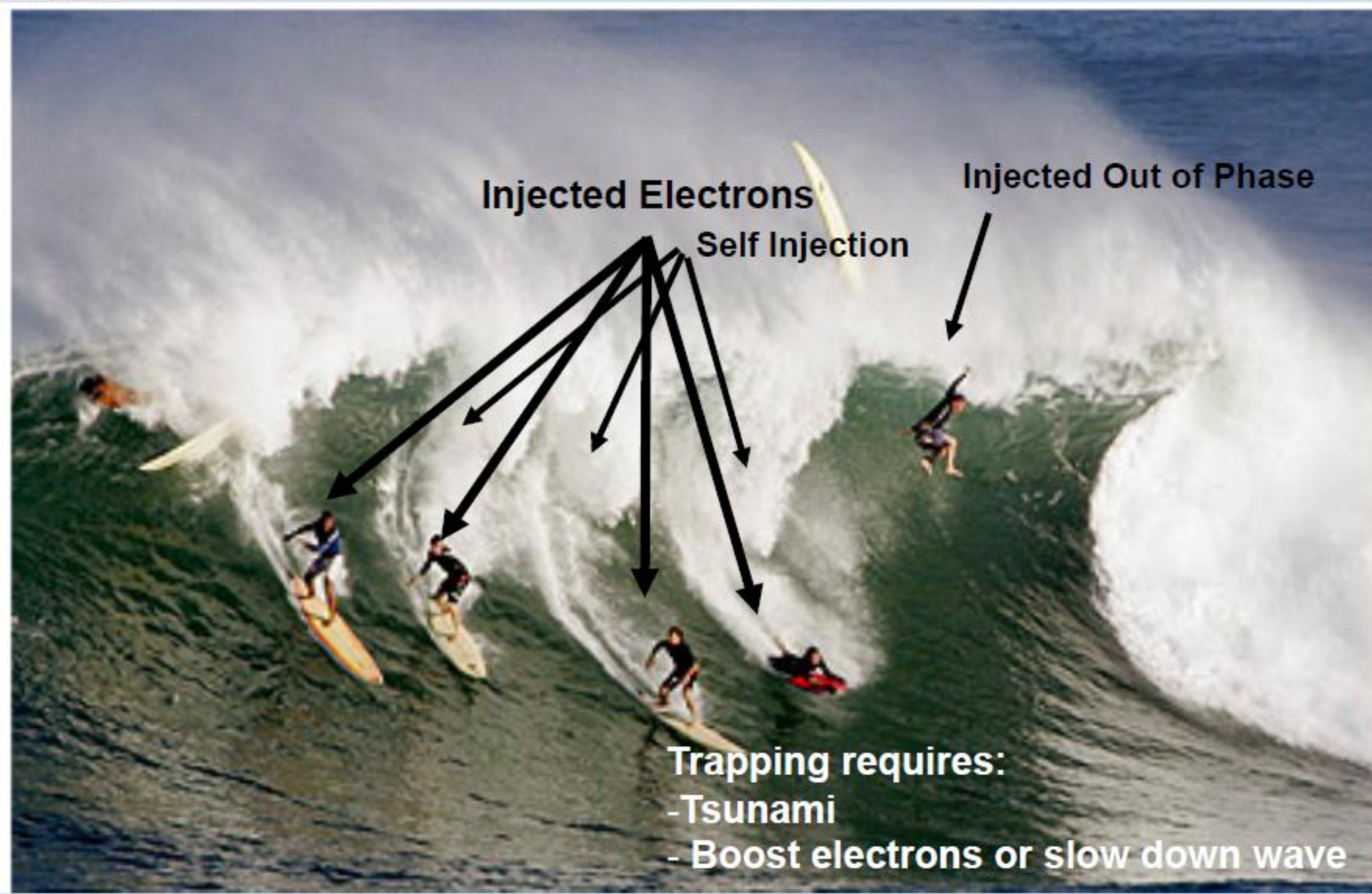


C. Joshi., Scientific American (2006)

‘Équivalent Surfer’



“Electrons” accelerating on a wave: controlled injection



Injected Electrons

Injected Out of Phase

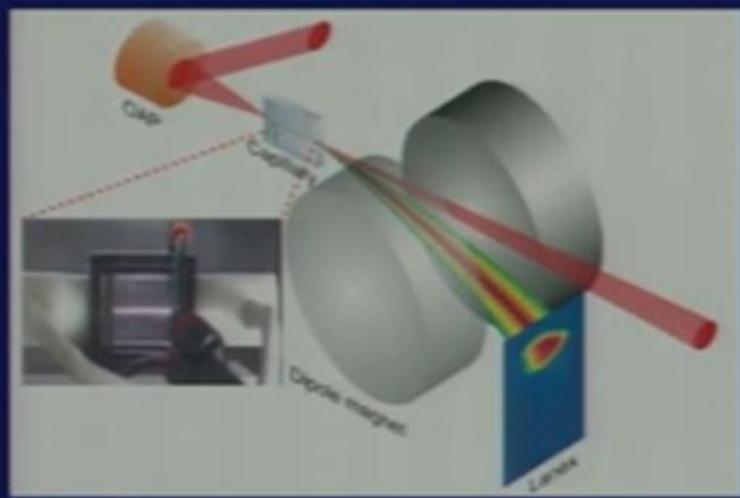
Self Injection

Trapping requires:

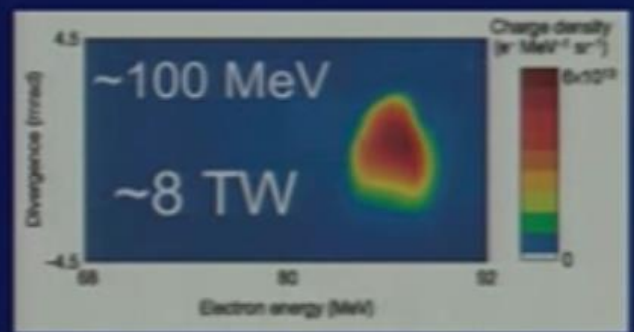
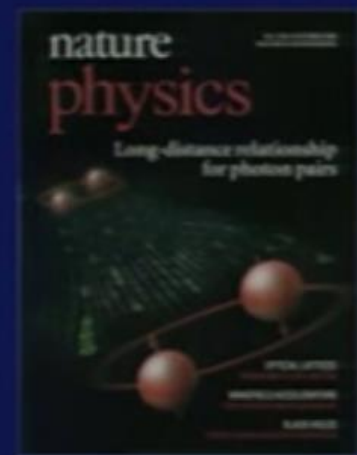
- Tsunami
- Boost electrons or slow down wave

Up to GeV electron beams have been obtained using 40 TW laser pulses and laser guiding structures

2004



2006



C. G. R. Geddes, et al, Nature, 431, p538 (2004)



W.P. Leemans et. al, Nature Physics 2, p696 (2006)

BELLA: BERkeley Lab Laser Accelerator

BELLA Facility: state-of-the-art 1.3 PW-laser for laser accelerator science:
>42 J in <40 fs (> 1PW) at 1 Hz laser and supporting infrastructure at LBNL

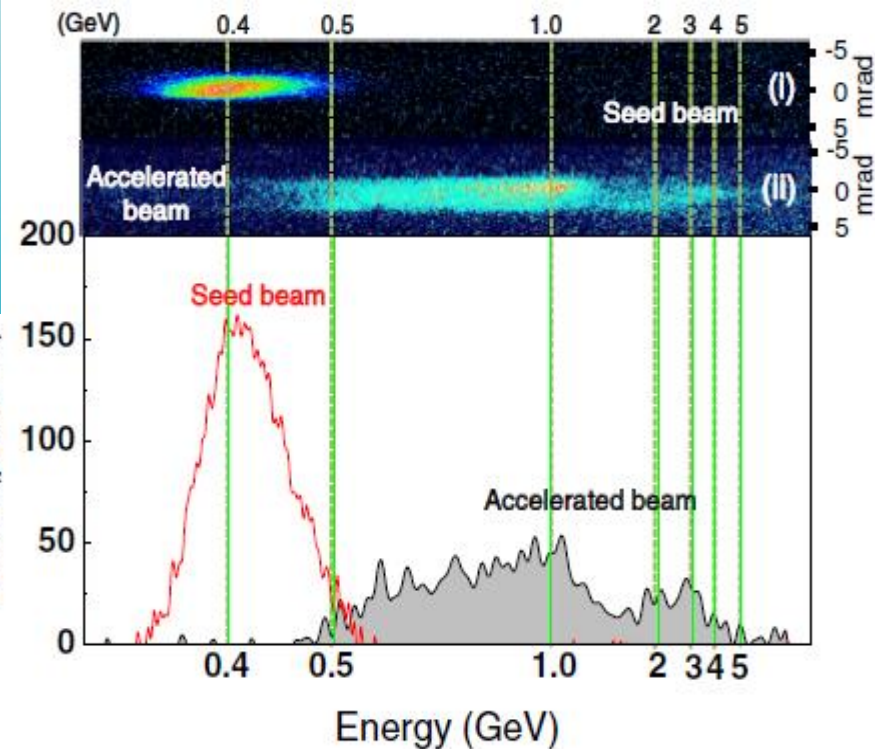
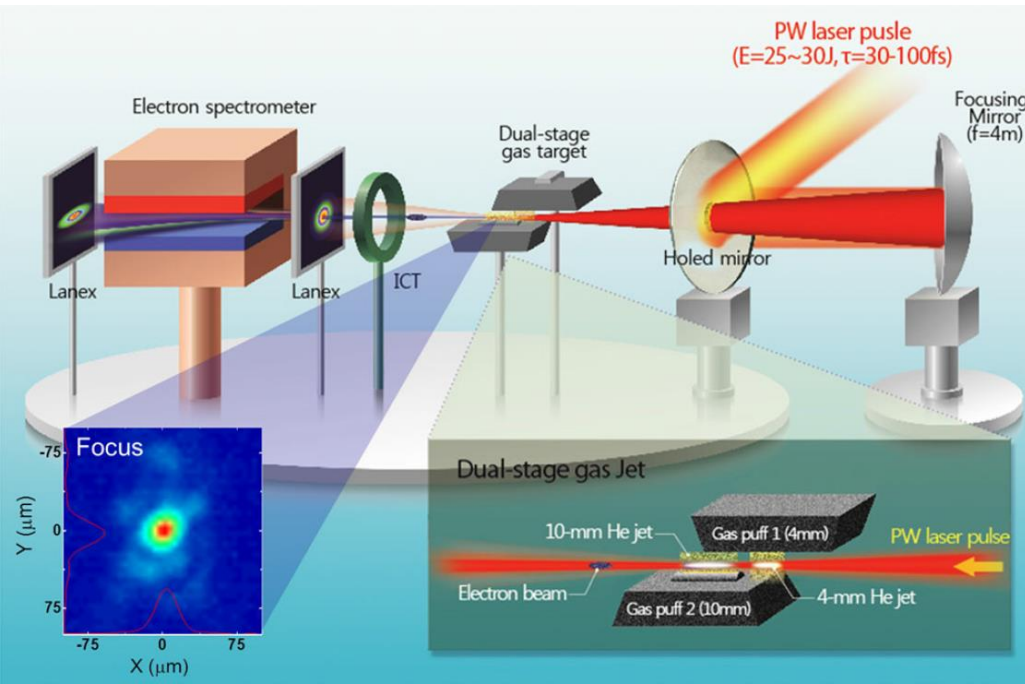


Critical HEP experiments:

- 10 GeV electron beam from <1 m LPA
- Staging LPAs
- Positron acceleration

Amplitude technologie
& THALES sont leaders ...

La plus haute énergie atteinte



PRL 111, 165002 (2013)

Répétabilité

PRL 101, 085002 (2008)

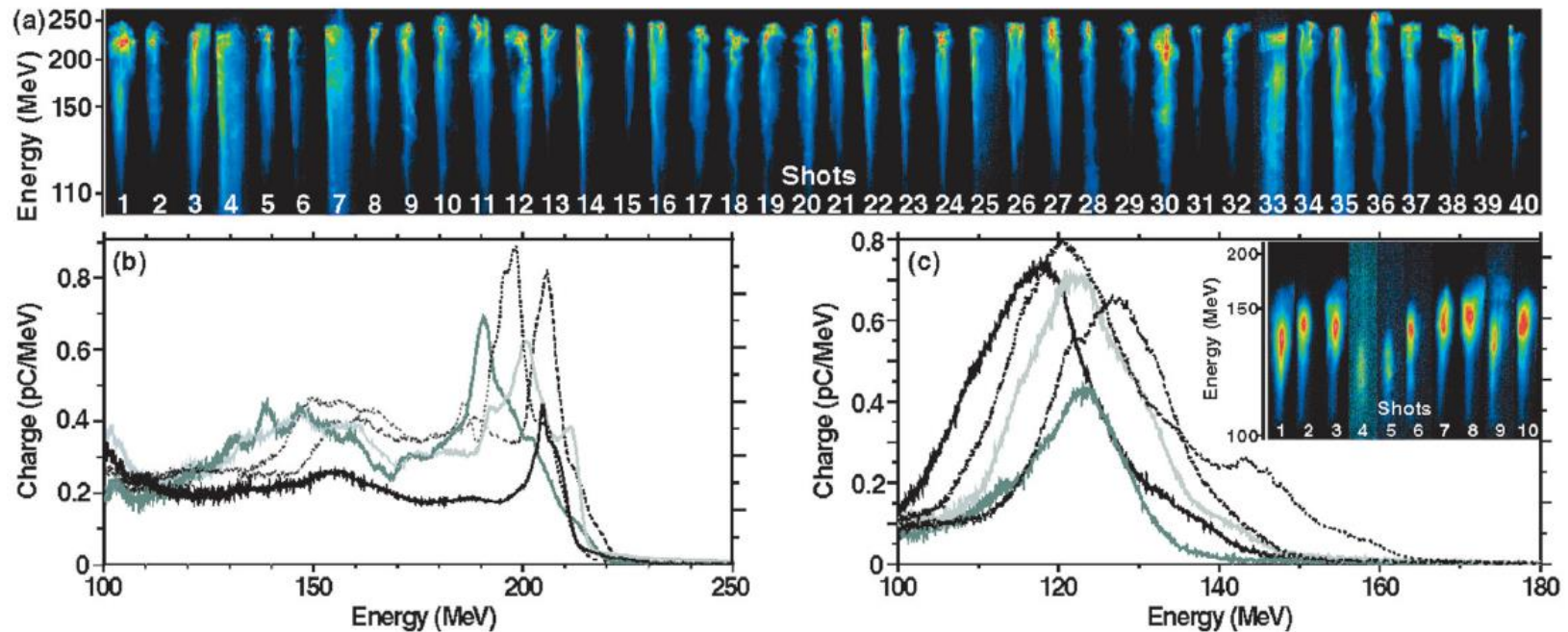


FIG. 3 (color). (a) False-color images of 40 consecutive, spatially dispersed electron beams on $S2$ ($n_e \approx 7.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) [sample spectra in (b)]. (c) Exemplary spectra for $n_e \approx 6.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Ten consecutive images of $S2$ are presented in the inset. The color normalized for each shot.

Reproducible LWFA was demonstrated.³³⁾ From laser shot to shot, each time the LWFA accelerates electrons to a narrow energy bunch with the same peak energy with a similar energy spread. (by courtesy of S. Karsch).

Proc. Jpn. Acad., Ser. B 86 (2010)

Laser acceleration and its future

By Toshiki TAJIMA^{+1,+2,†}

Plasma-based accelerators for future colliders

- PWFA-linear collider:
- two-beam accelerator geometry
- 25 GeV drive beams
- 19 plasma stages (1 TeV)
- $n=10^{17} \text{ cm}^{-3}$ (set by 30 μm driver bunch length)

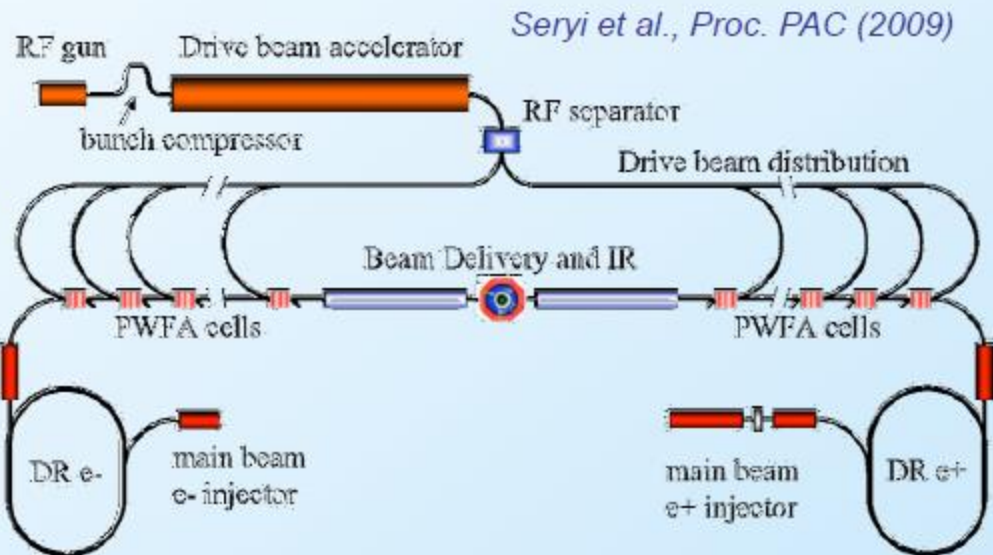
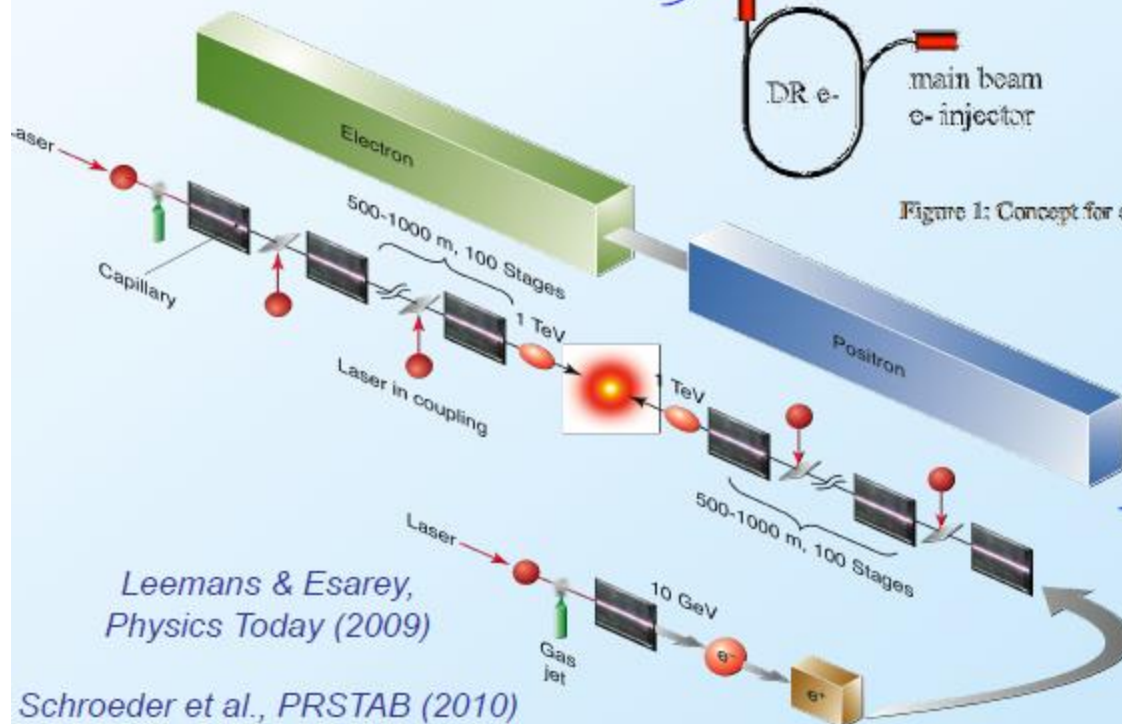
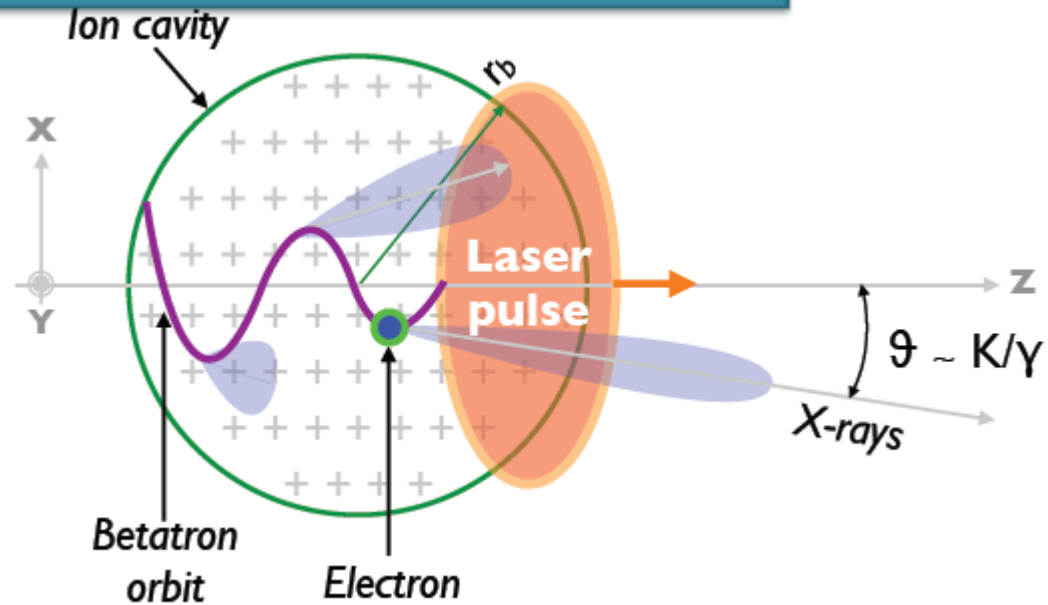
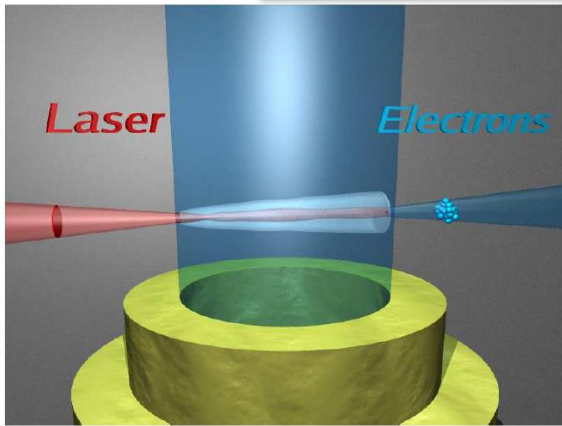


Figure 1: Concept for a multi-stage PWFA-based Linear Collider.

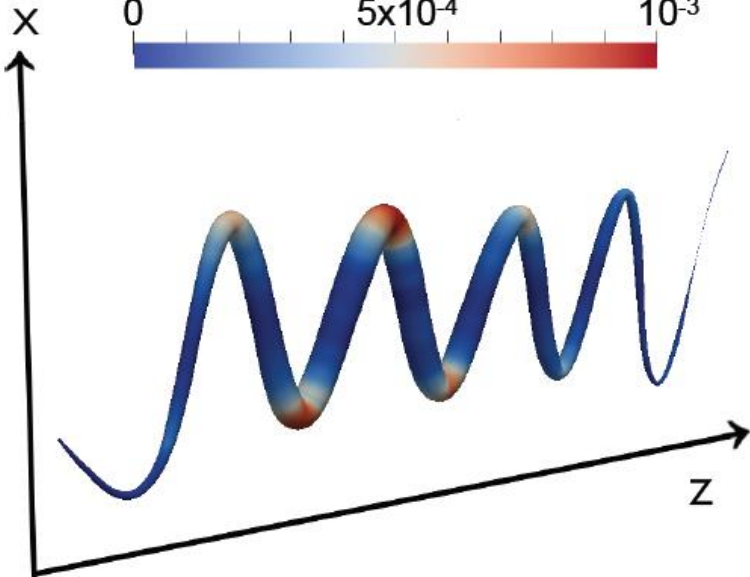


- LPA-linear collider:
- 50 stages (1 TeV collider)
- 10 GeV/stage
- requires $\sim 10 \text{ J}$ laser (at tens of kHz, hundreds of kW)
- $n=10^{17} \text{ cm}^{-3}$ (set by laser depletion)

Autre application : Utilisation du rayonnement dans le régime de la bulle

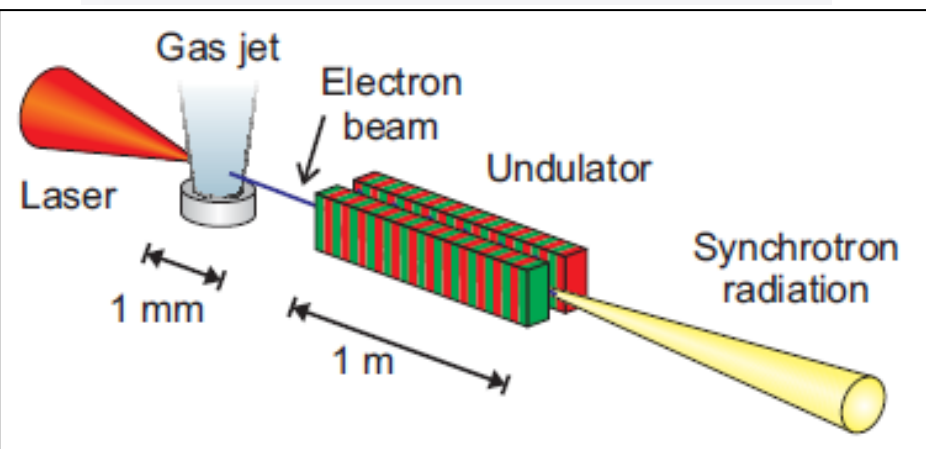
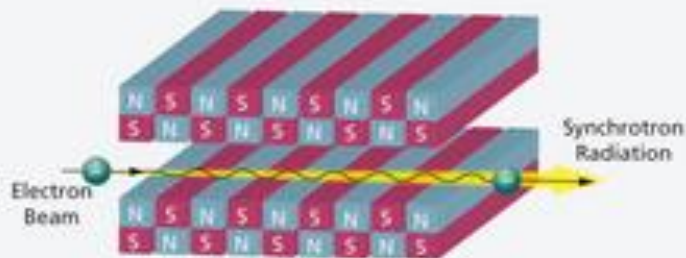


Radiated power (J/s)

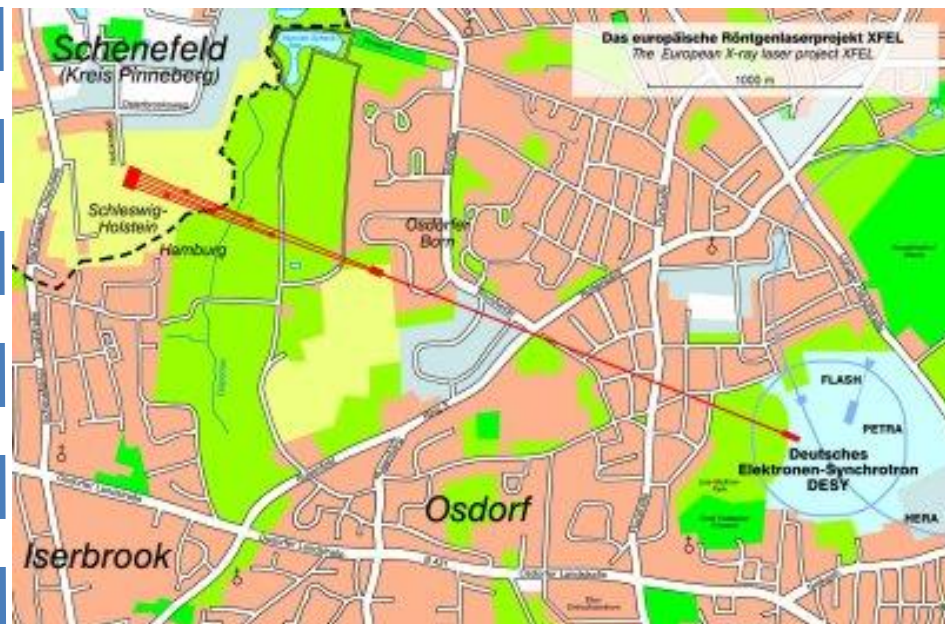


Lorsque les électrons sont accélérés dans
la bulle du plasma ils rayonnent ...

On peut aussi envoyer les électrons produits dans un 'onduleur'



XFEL DESY Hambourg



2,1km de cavités supra → électrons de 17.5 GeV
→ Pulses femtoseconde de rayons X
(projet à >1B€)

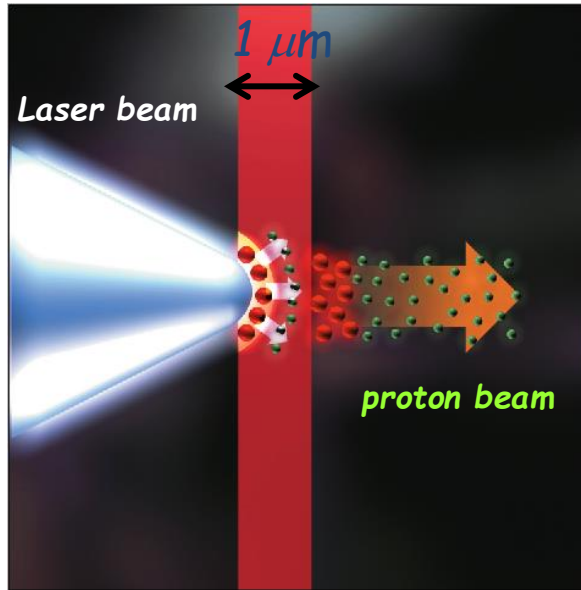
Cela produit des pulses de rayons X femtosecondes

Génération de faisceaux de protons et ions

VOLUME 92, NUMBER 17

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
30 APRIL 2004



Highly Efficient Relativistic-Ion Generation in the Laser-Piston Regime

T. Esirkepov,^{1,*} M. Borghesi,² S.V. Bulanov,^{1,2,†} G. Mourou,³ and T. Tajima¹

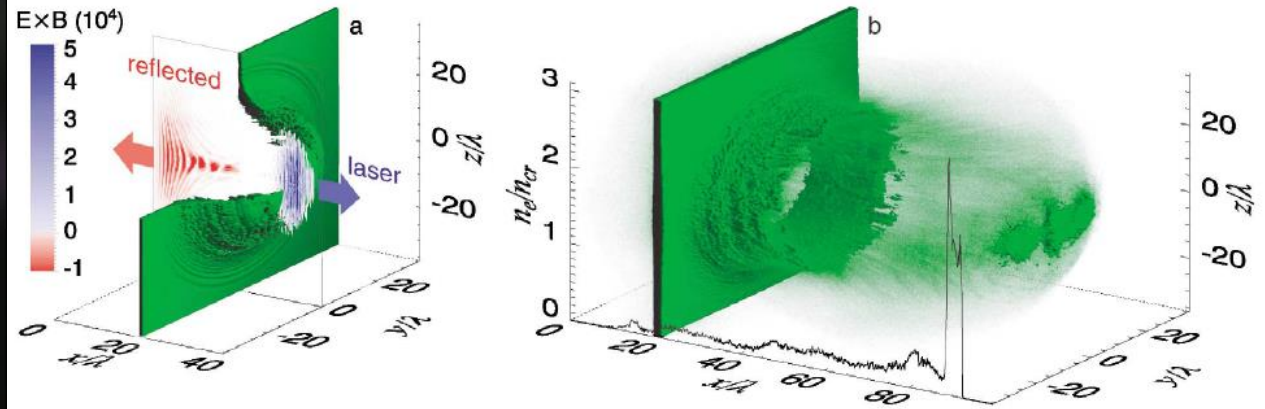


FIG. 1 (color). (a) The ion density isosurface for $n = 8n_{cr}$ (a quarter removed to reveal the interior) and the x component of the normalized Poynting vector $(e/m_e\omega c)^2 \mathbf{E} \times \mathbf{B}$ in the $(x, y = 0, z)$ plane at $t = 40 \times 2\pi/\omega$. (b) The isosurface for $n = 2n_{cr}$, green for lower density at $t = 100 \times 2\pi/\omega$; the black curve shows the ion density along the laser pulse axis.

Laser piston

La totalité des électrons est accélérée,

Séparation de charge \Rightarrow accélération ions

Réflexion du laser sur électrons \Rightarrow accélération additionnelle

qq 100 MeV \rightarrow qqGev