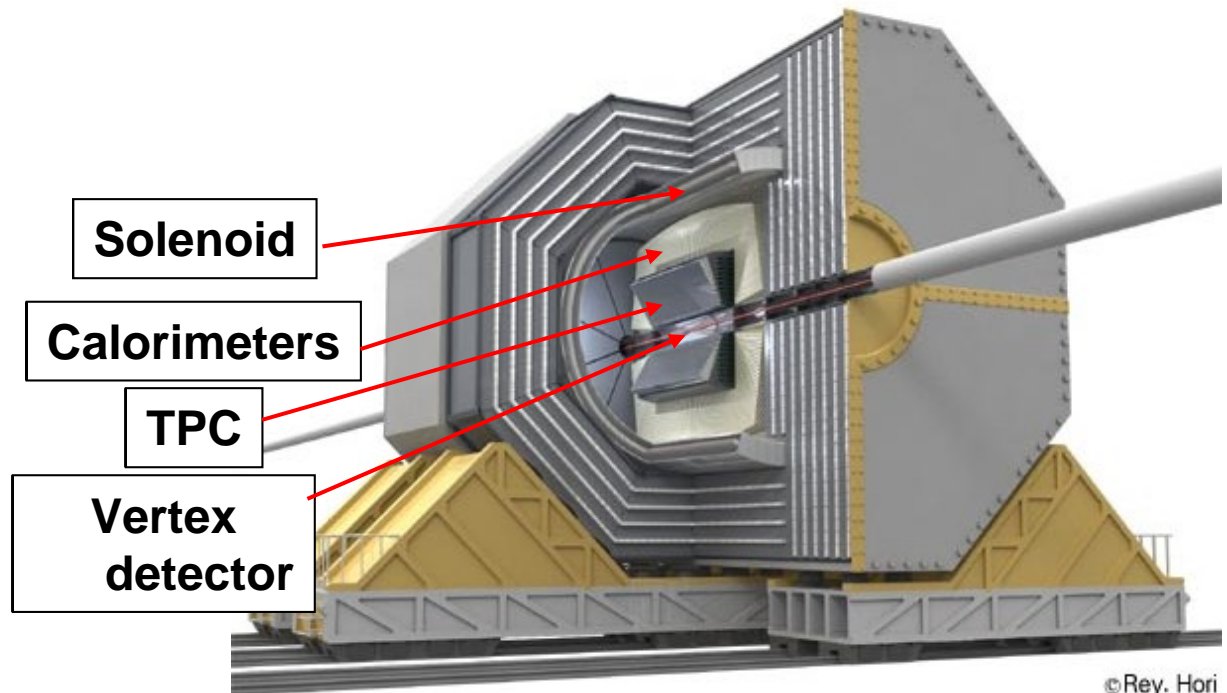
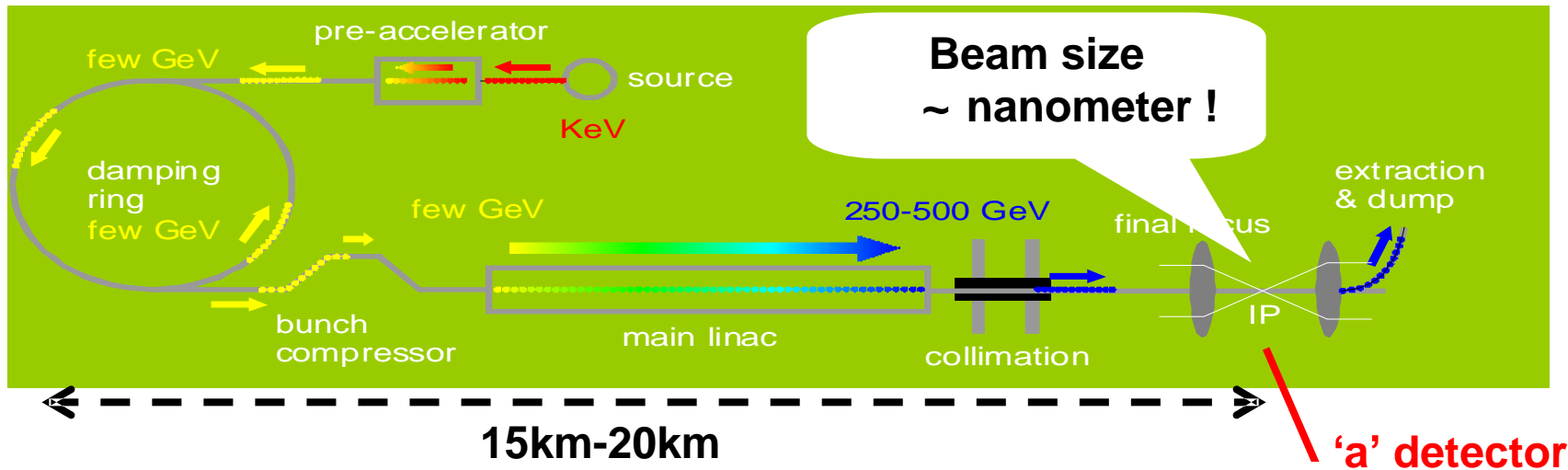


# Cours Laser #2 :

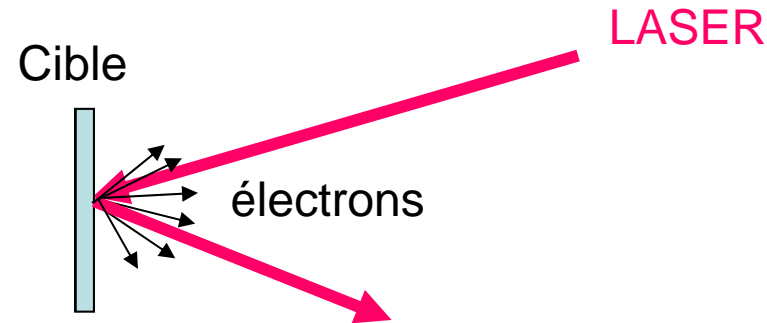
## Quelques applications en HEP

- Dans le cadre des accélérateurs d'électrons
  - Production d'électrons pour accélérateurs : canon à électron
  - Utilisation de la diffusion Compton
    - Diagnostique des faisceaux ('beam diagnostic')
      - Mesure de la polarisation des faisceaux : Polarimètre Compton
      - Mesure de la taille des faisceaux intenses pour l'ILC : 'laser wire'
    - Source de positons polarisés pour l'ILC et CLIC
    - Collisionneur photon-photon à l'ILC
    - Machine à rayons X compacte pour la médecine et le musée du Louvre
- VIRGO
- Free Electron Laser

# Exemple du *futur* accélérateur ILC $e^+e^-$ linear collider

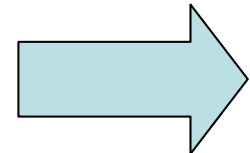


# Source d'électrons : le canon à électrons photo déclenché

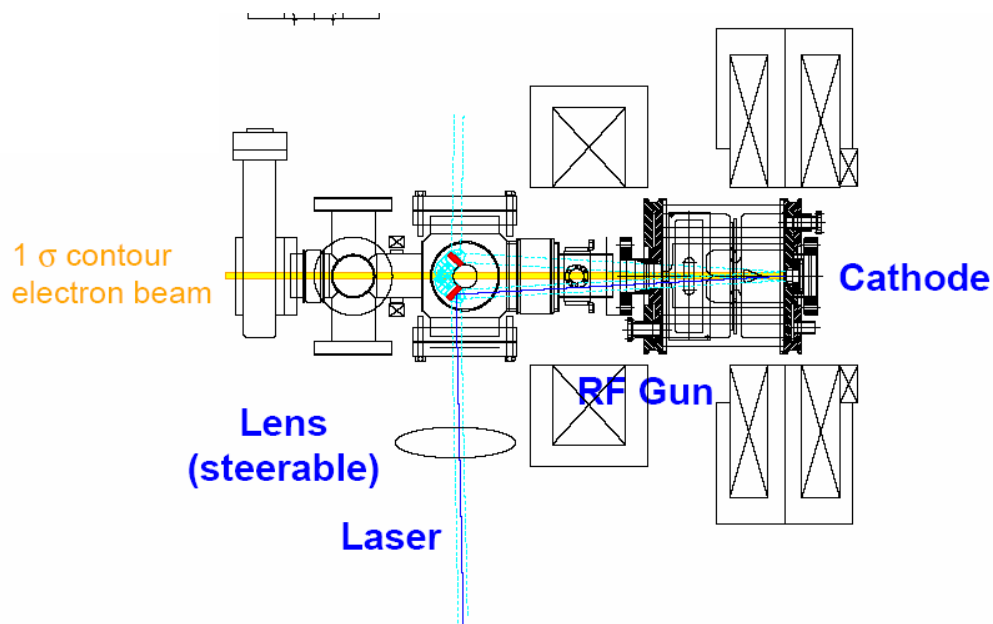
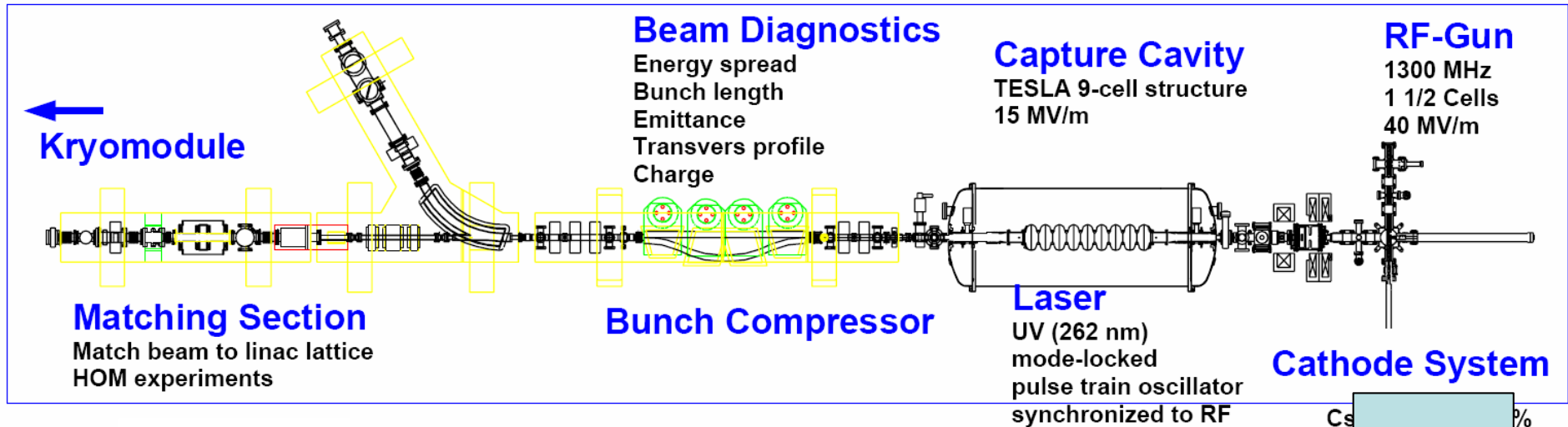


**Pb thermiques dans la cible** → 'trains de pulses laser' (~ 3000 pulses @ 5Hz)

Exemple d'un système :  
Le TTF [Tesla Test Facility] à  
DESY

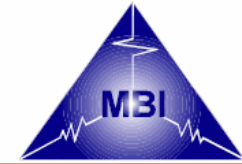


TTF

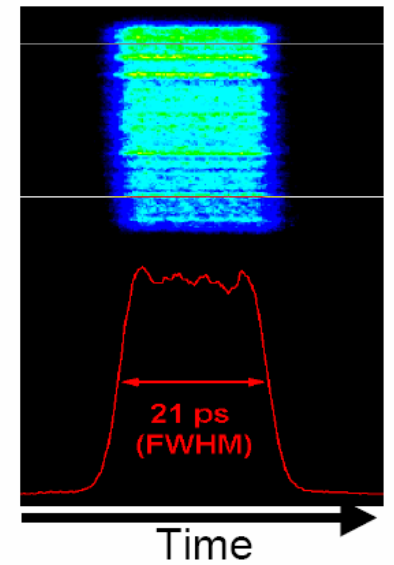
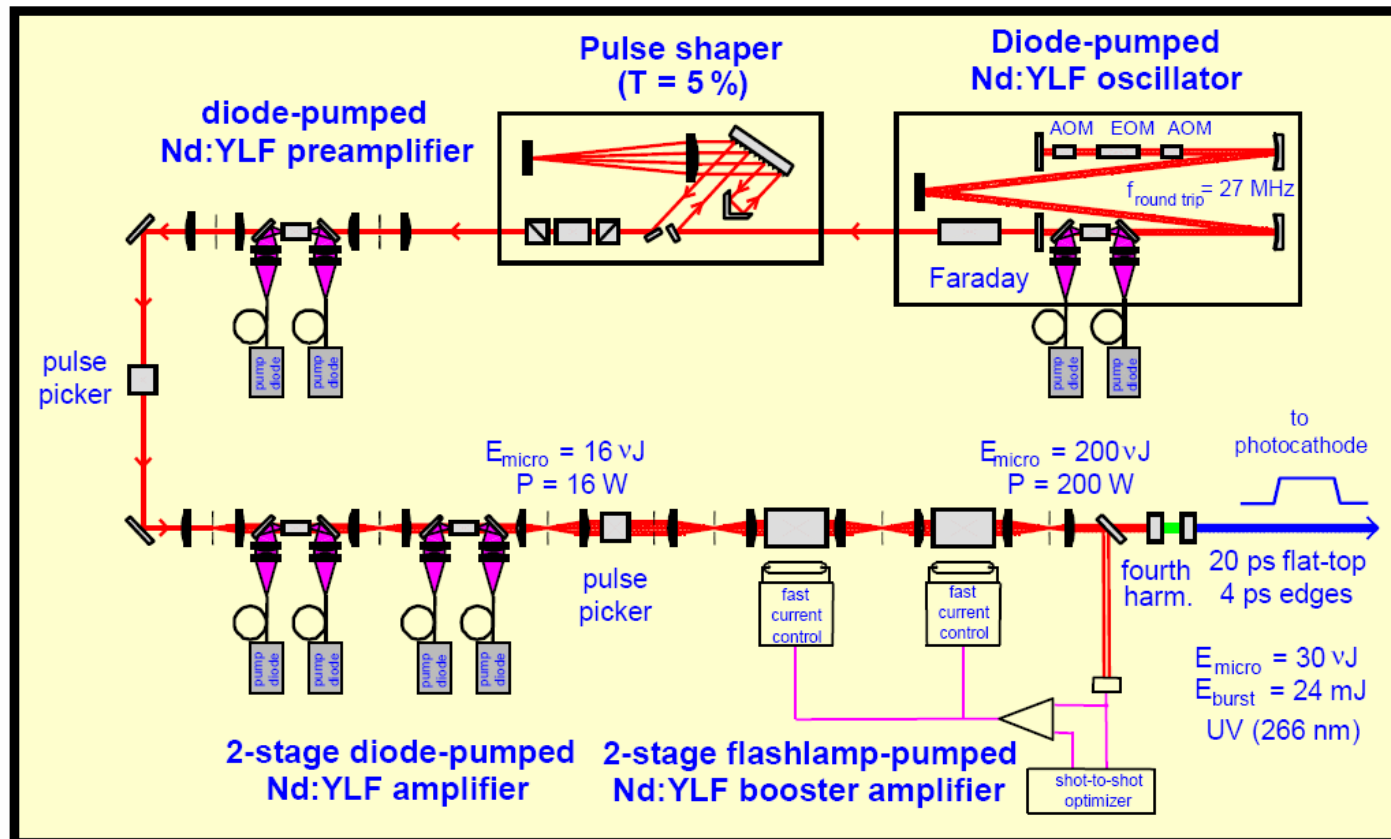


Le laser 'éjecte' les électrons de la cathode

# TTF 2 Laser Upgrade



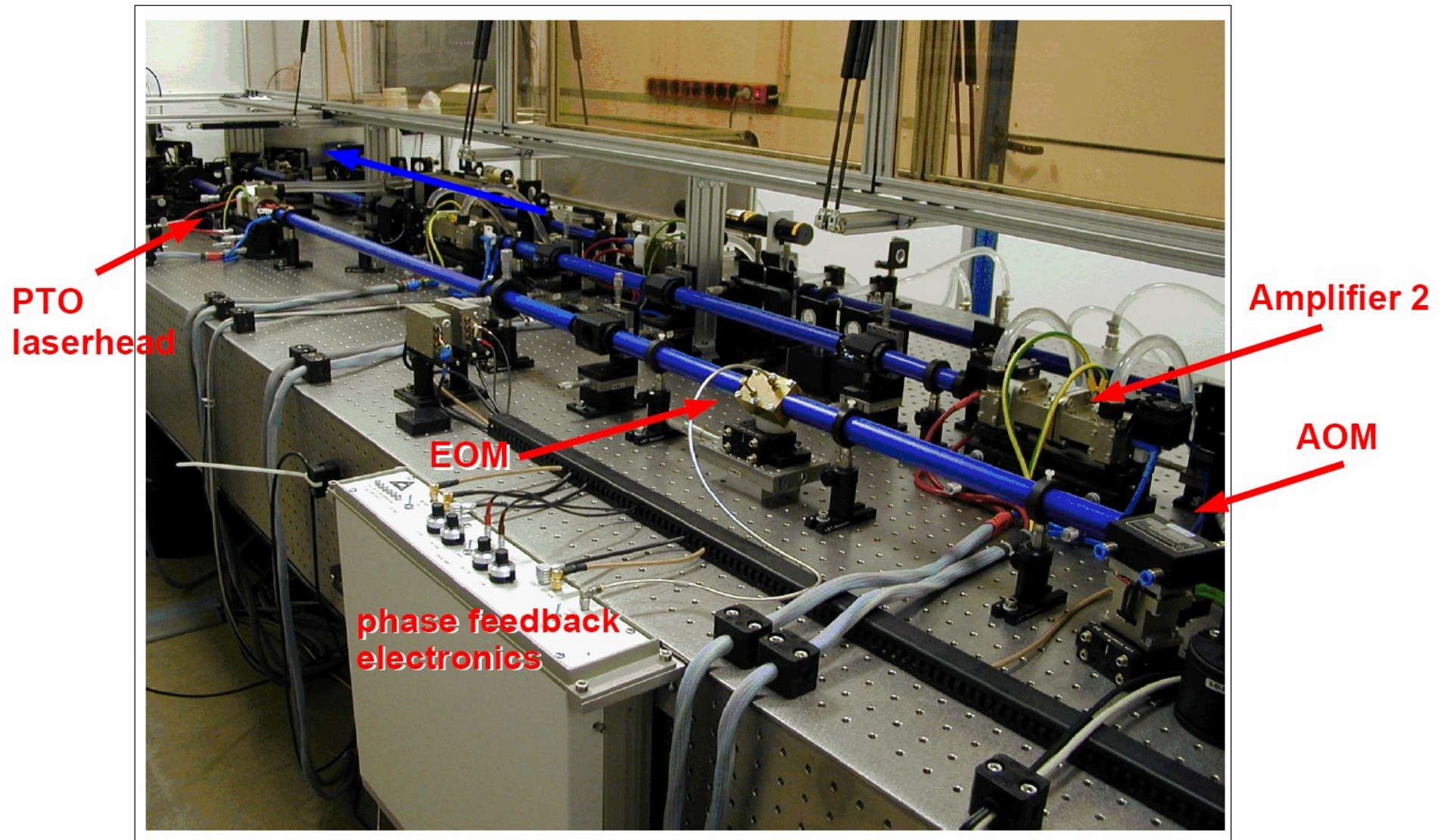
- 😊 Together with Max-Born-Institute, Berlin (I. Will et al.)
- 😊 Upgrade is being tested at PITZ (DESY Zeuthen)



**NEW:**  
**Longitudinal flat profile**

# TTF1 laser system

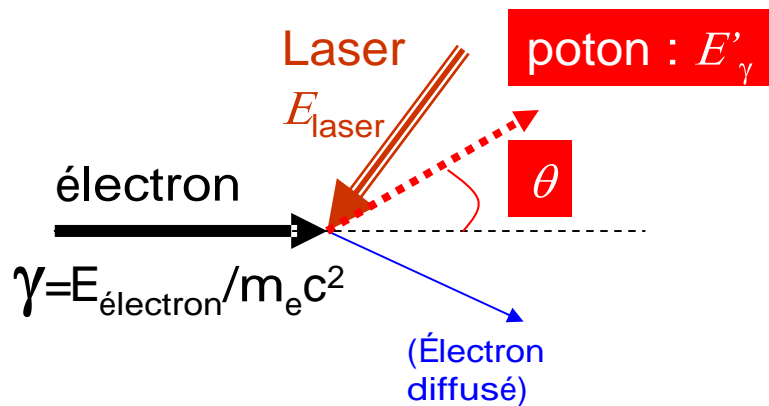
---



S. Schreiber, TESLA Collaboration Meeting, WG III, 16-Sep-2003

# Utilisation de l'interaction Laser-électron

photon(laser)+électron → photon'+électron'



$$E'_{\gamma, \max} = 4\gamma^2 \omega_{laser}$$

Avec  $\gamma \sim 100$

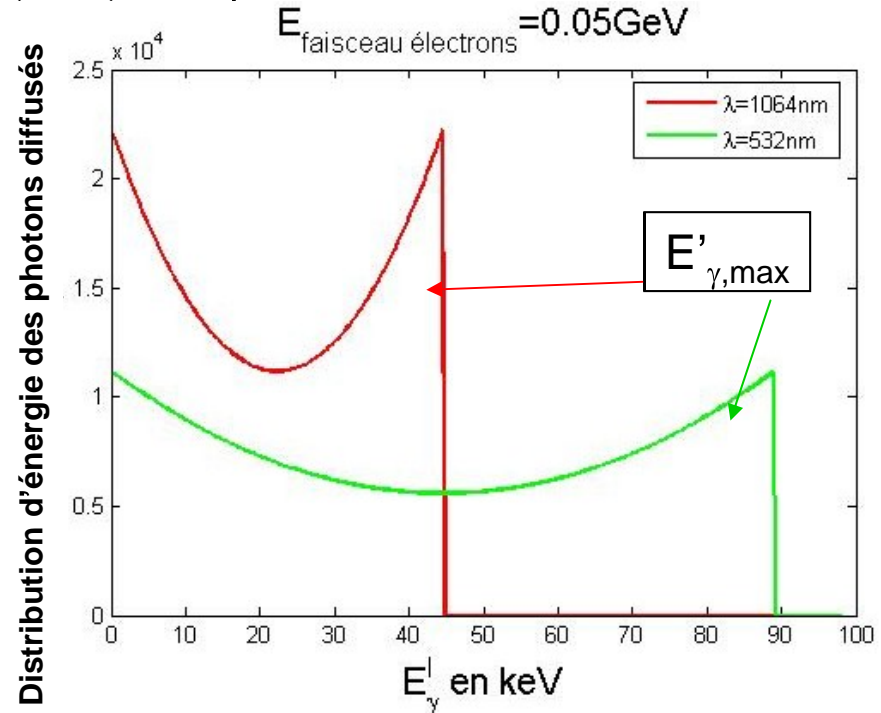
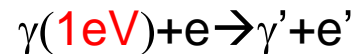
$$\rightarrow E'_{\gamma, \max} = 45000 \text{ eV si } E_{laser} \approx 1 \text{ eV}$$

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

Exemple du faisceau laser YAG

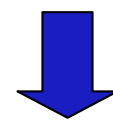
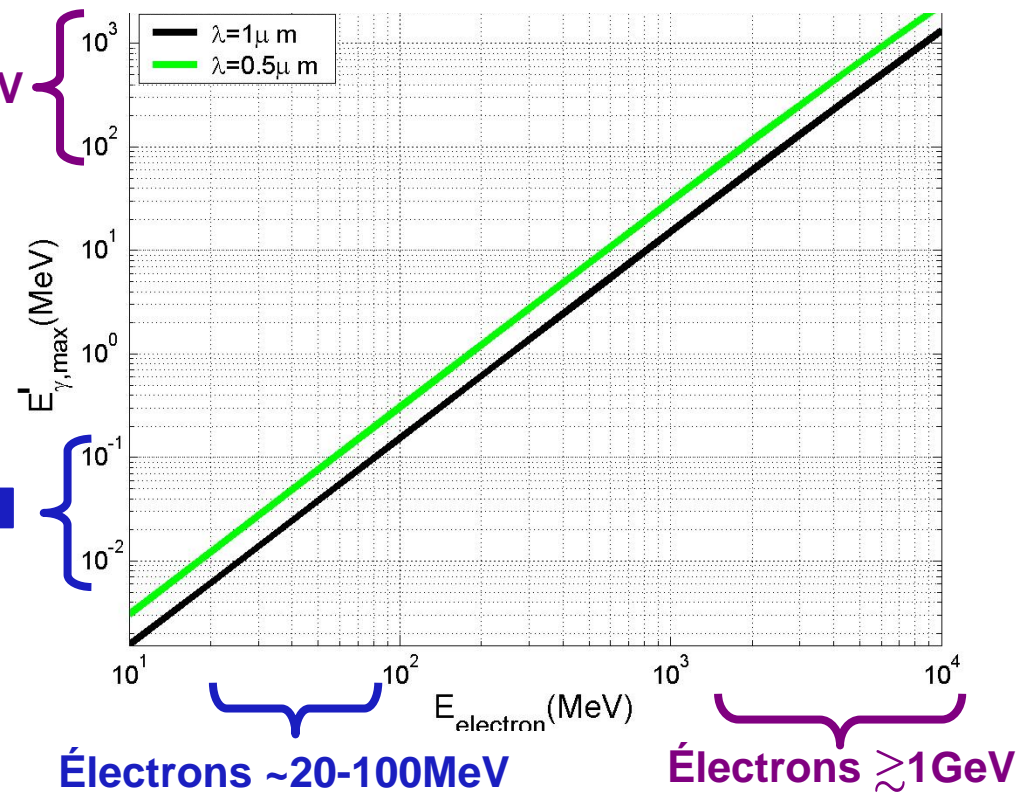
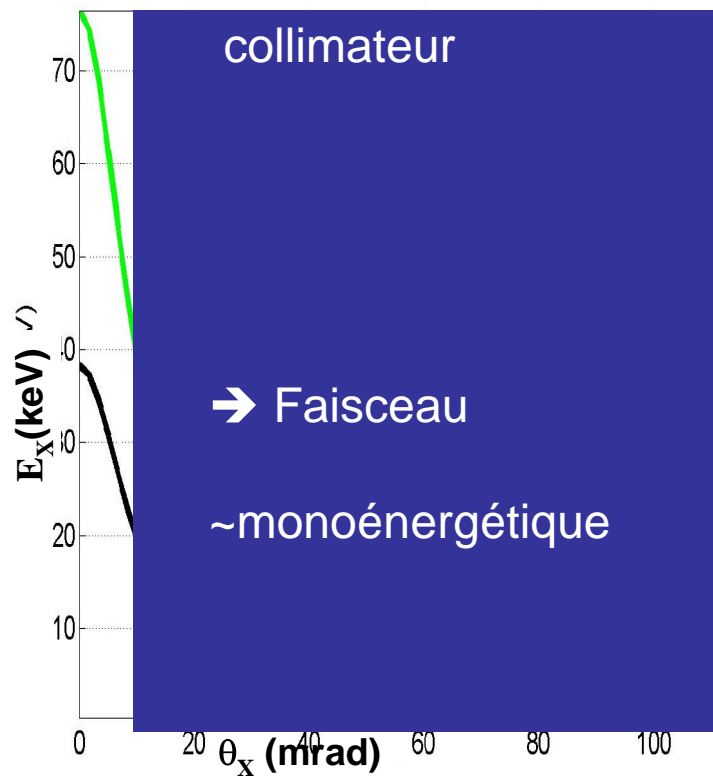
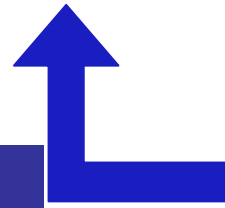
$\lambda \approx 1 \mu\text{m}$  → énergie des photons du faisceau laser  $E_{laser} \approx 1 \text{ eV}$

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



# Quelques intérêts de la diffusion Compton

Production rayon X ~10-100keV  
2corps  $\rightarrow E_X = f(\theta_X)$



Applications basses énergie  
 • Médicales  
 radiographie & radiothérapie  
 • muséologie

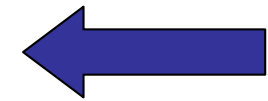
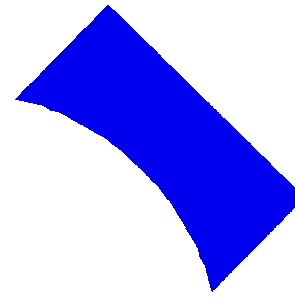
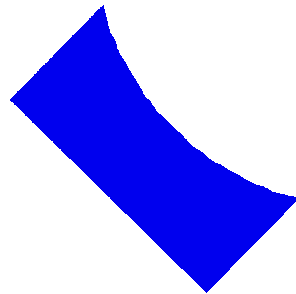
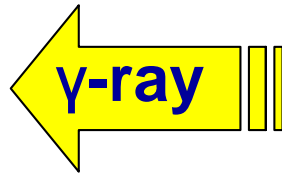
Applications hautes énergies  
 • Polarimétrie Compton  
 • Laser wire  
 • [Collisionneur  $\gamma\gamma$ /ILC]  
 • Source de positrons polarisés



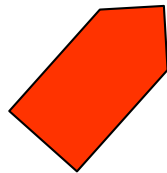
***Mais la 'section efficace' Compton est très petite***

***→ il faut de forte puissances laser***

***→ cavité optique Fabry-Perot***



Electron Beam



Laser

From Shimizu-san  
KEK

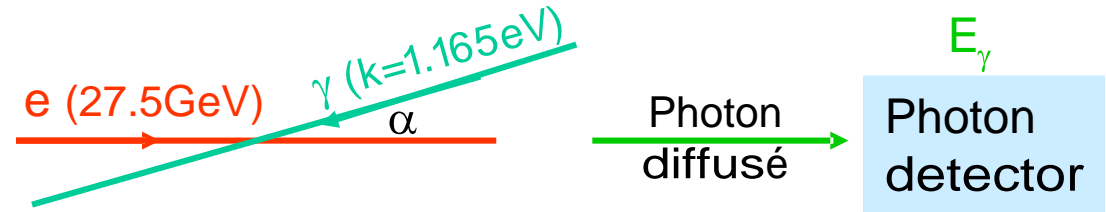
# Utilisation de lasers pour les diagnostics faisceaux

- Polarimètre
- Profiler : 'laser wire'

# Principe de mesure de la polarisation Longitudinale des électrons à haute énergie

## Diffusion Compton :

$$e + \gamma \rightarrow e + \gamma$$



## Section efficace :

$$d\sigma/dE_\gamma = \sigma_0(E_\gamma) - P_e S_\gamma \sigma_1(E_\gamma)$$

$\sigma_0, \sigma_1$ : connues (QED)

$S_\gamma$ : degré de polarisation  
circulaire faisceau laser ( $\pm 1$ )

$P_e$ : Polarisation des  $e^-$   
déterminée par un fit  
(le Likelihood de Marc...)

## Luminosité (électron- laser):

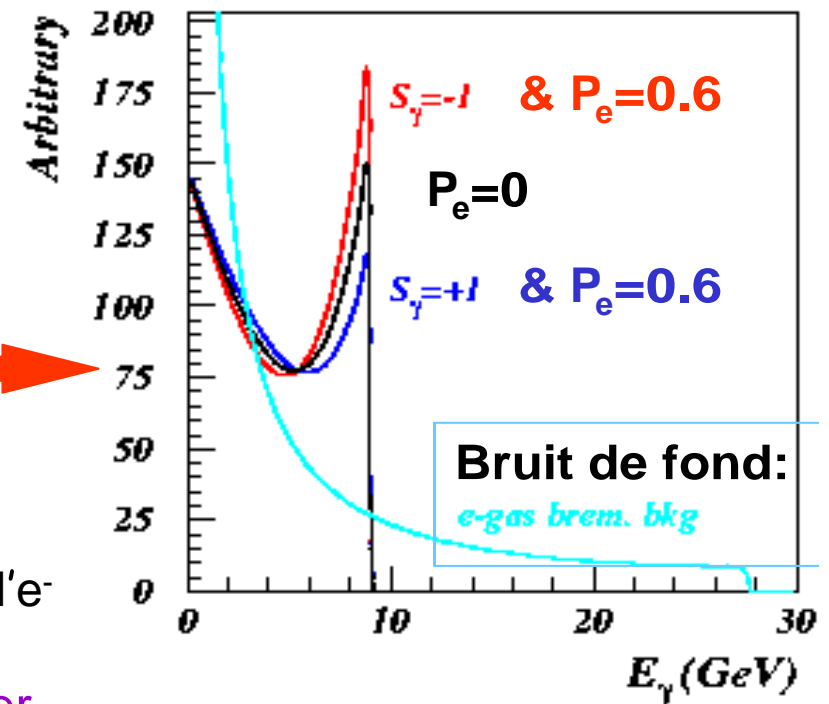
$$\text{Lumi} \propto \frac{\lambda P_L I_e}{\alpha \sqrt{\sigma_{e,y}^2 + \sigma_{\gamma,y}^2}}$$

$I_e$ : intensité faisceau d' $e^-$

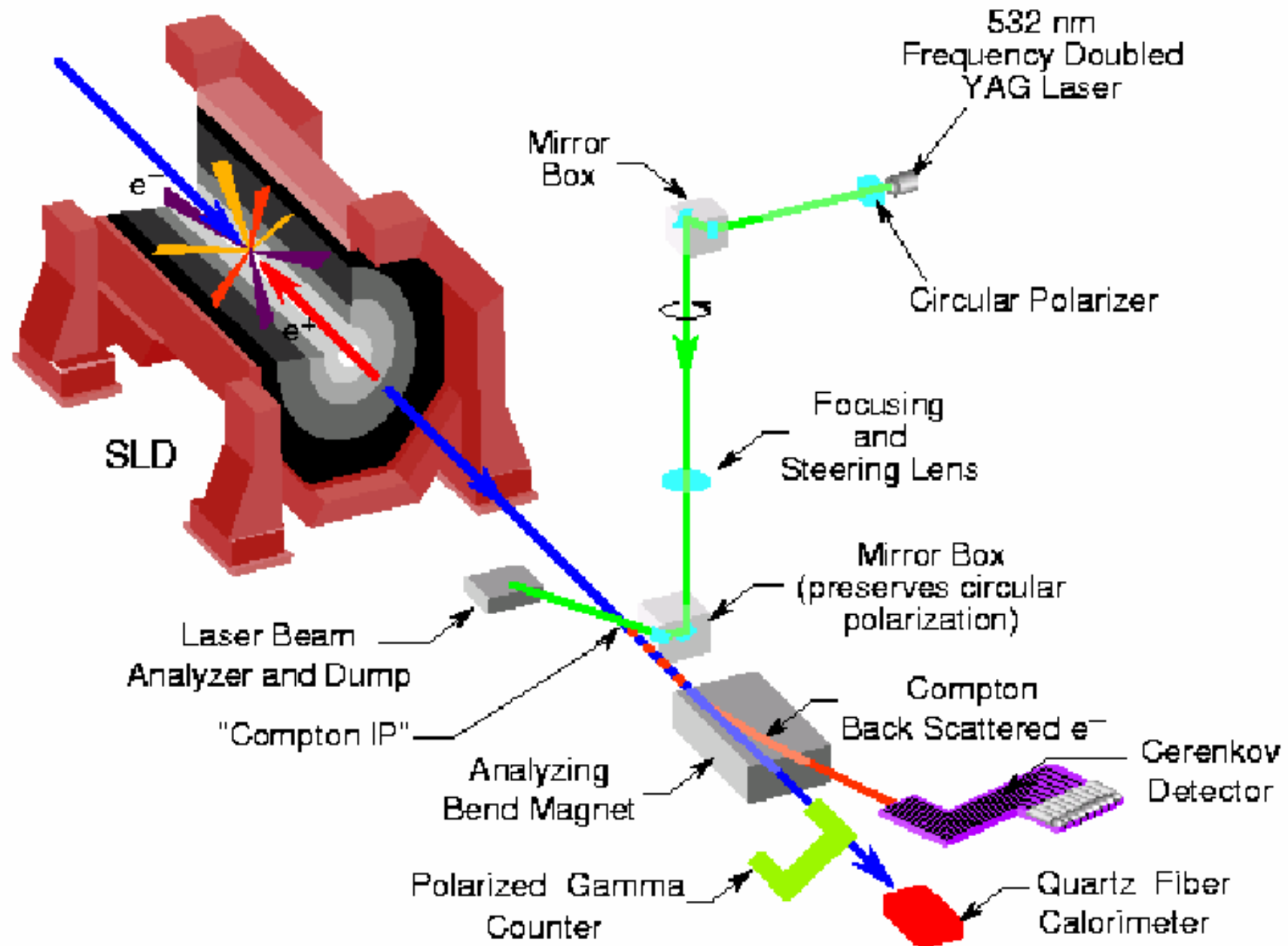
$P_L$ : puissance du laser

$\lambda$ : longueur d'onde laser

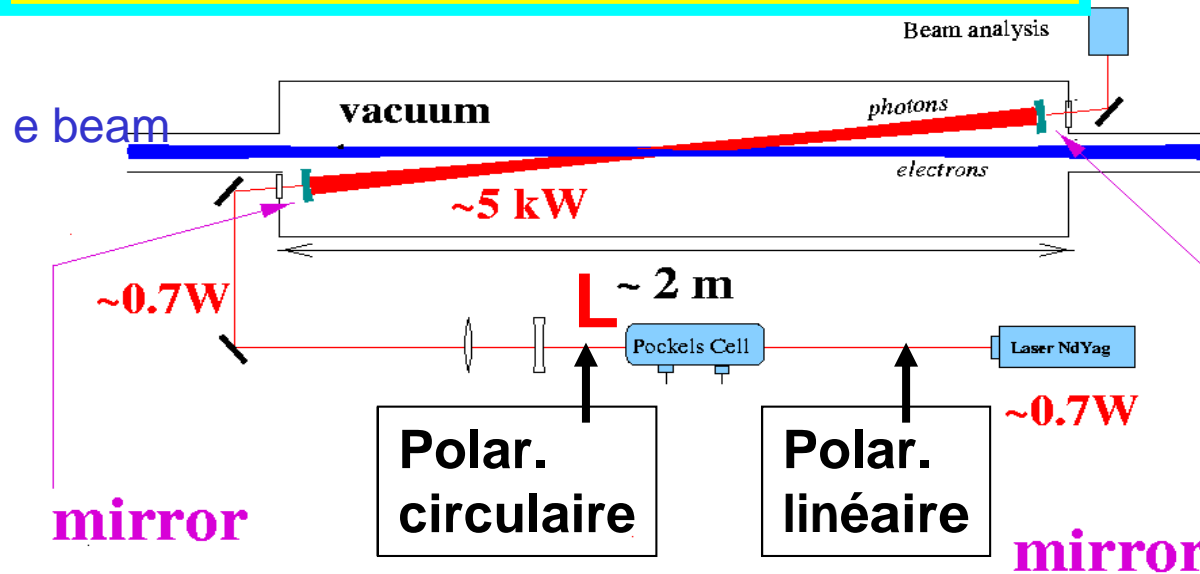
$\alpha$ : angle de croisement



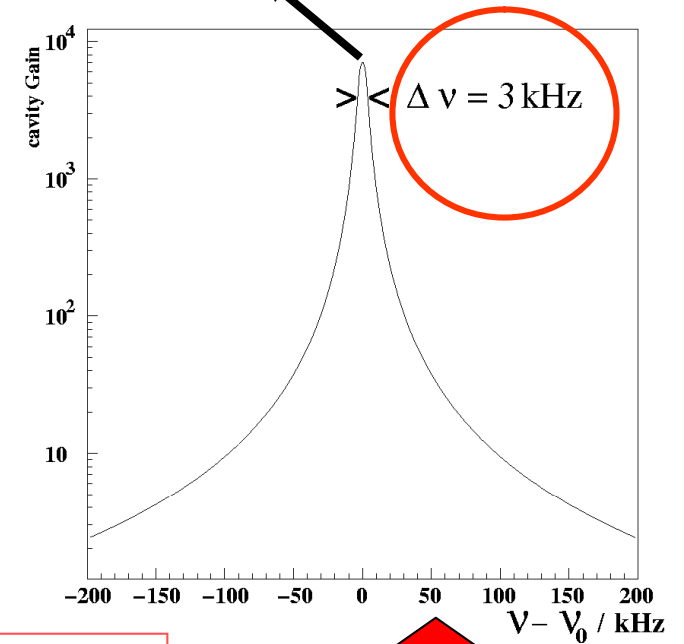
## Un exemple de setup expérimental : le collisionneur e+e- SLC de SLAC/Stanford



# Cavité Fabry-Perot pour 'amplifier' Le laser



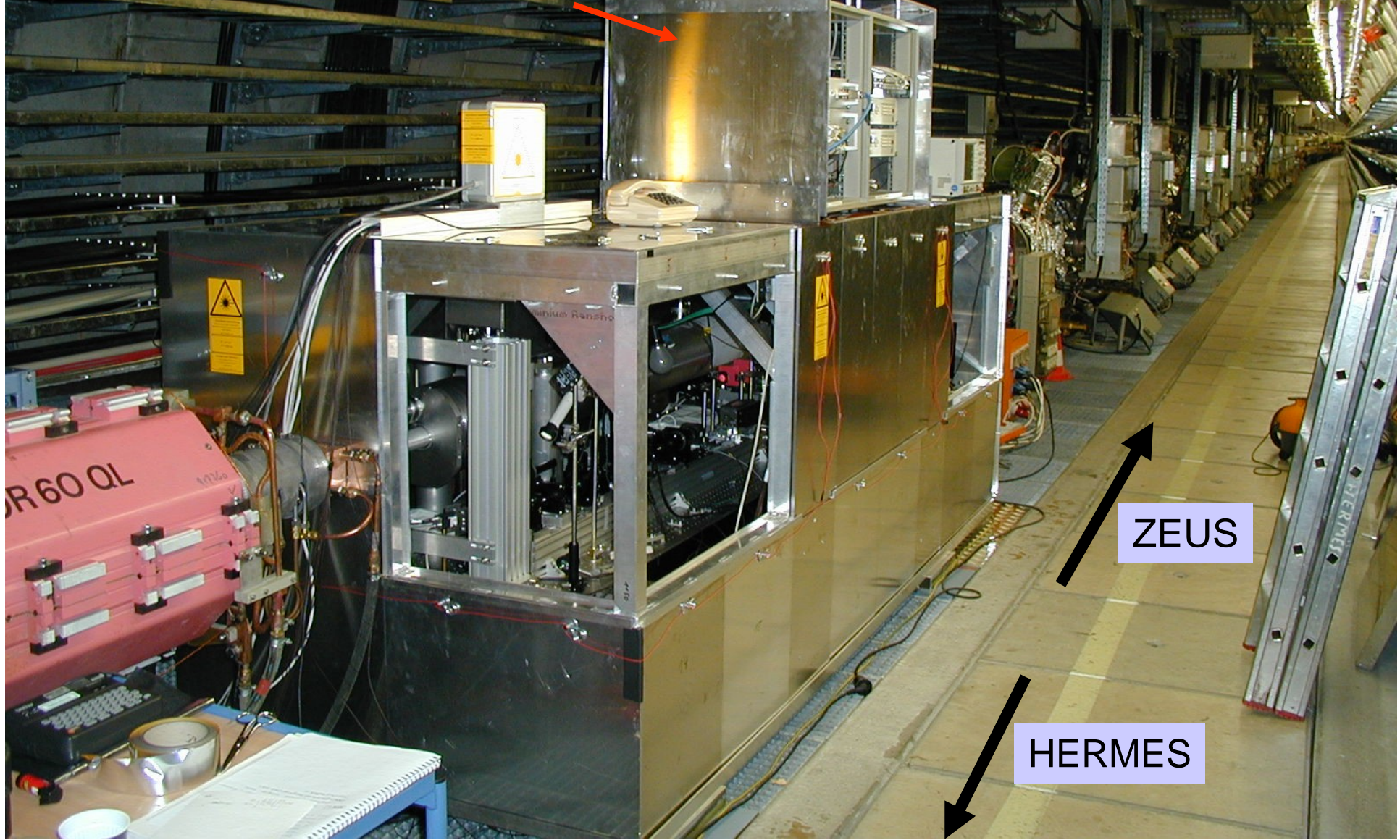
Gain ~9000



Quand  $\nu_{\text{Laser}} \propto c/2L \Rightarrow$  résonance

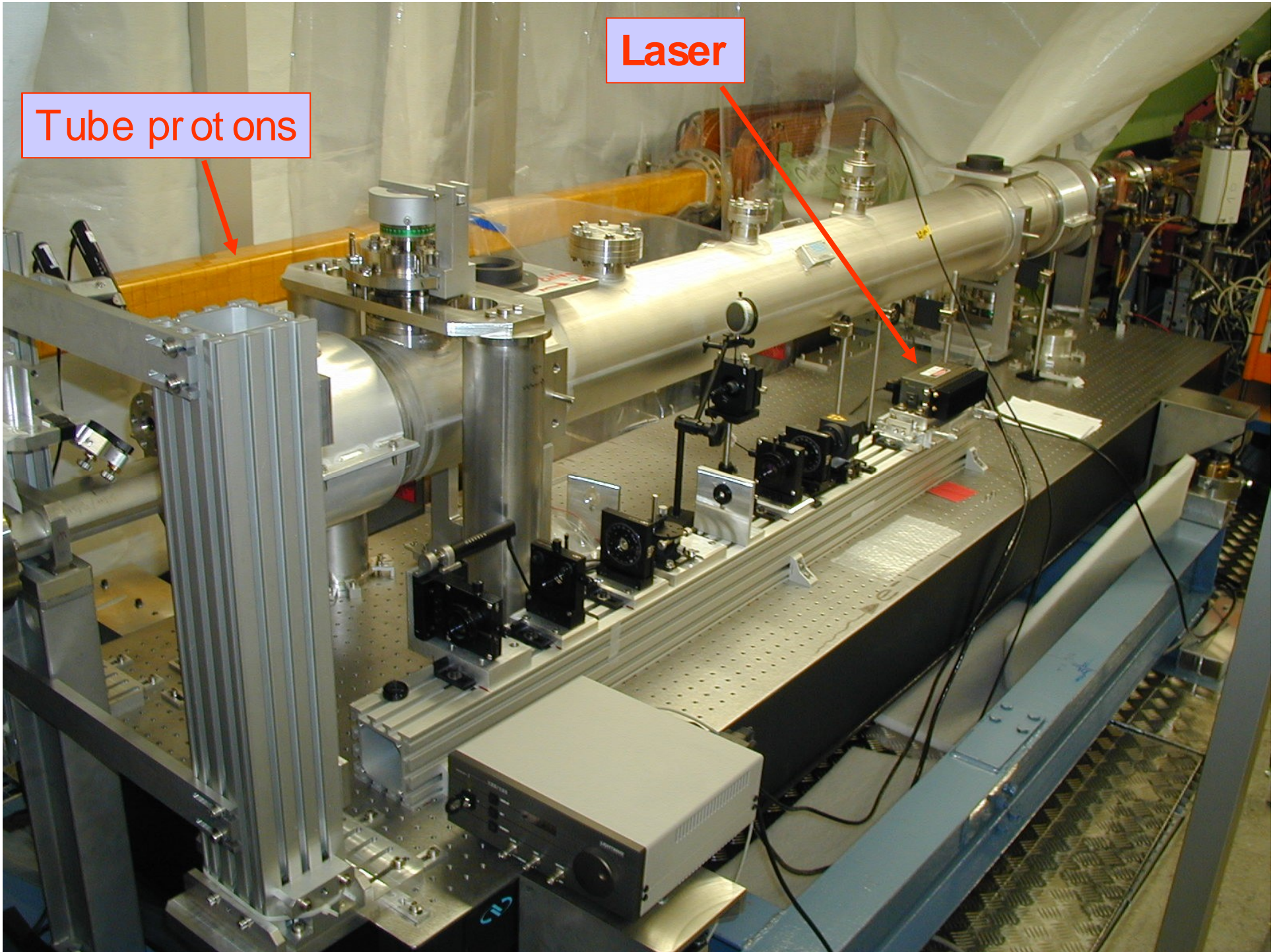
- Mais :  $\Delta\nu/\nu_{\text{Laser}} = 10^{-11} \Rightarrow$  asservissement laser/cavité
  - Effectué en `jouant` sur la fréquence du laser
    - $\Rightarrow$  Laser Nd:YAG (infra-rouge,  $\lambda = 1064 \text{ nm}$ )
  - Existe à CEBAF (Jlab) et à HERA (DESY) : 5 kW dans la cavité  $\rightarrow$  mesure rapide & précise de la polarisation

Blindage (3 mm pb) +  
isolation thermique ( $\pm 0.5K$ )  
(sandwich Alu/isolant/Alu)



ZEUS

HERMES



Tube protons

Laser

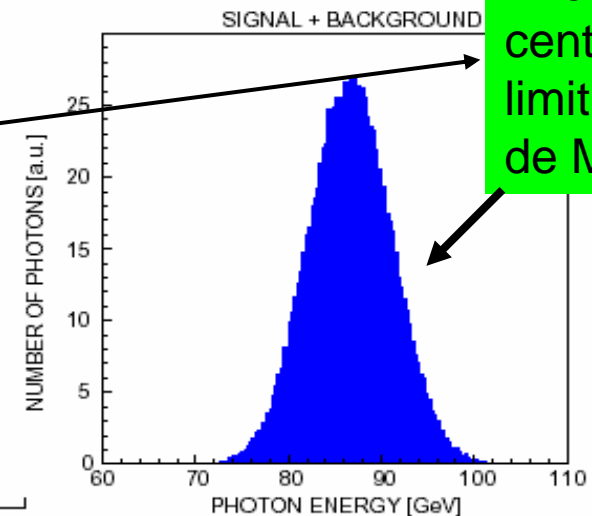
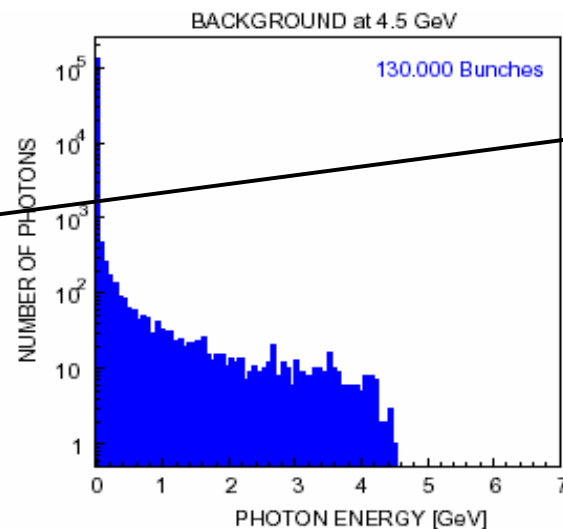
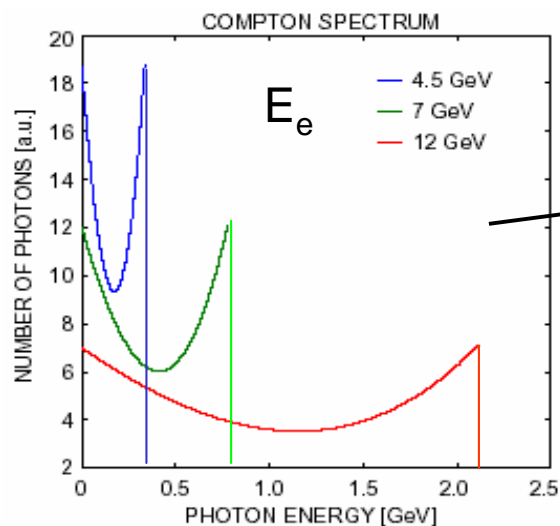
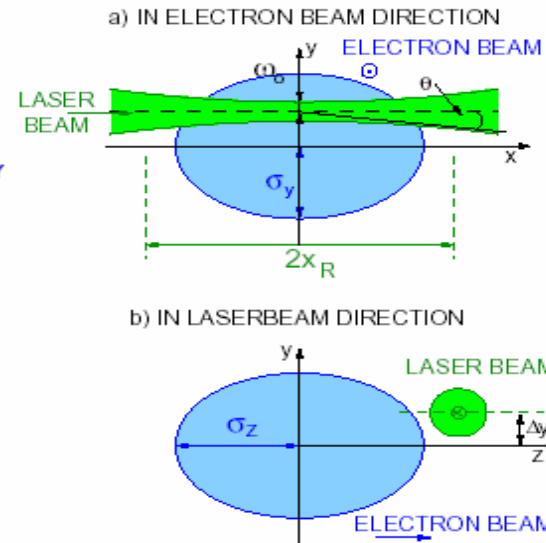
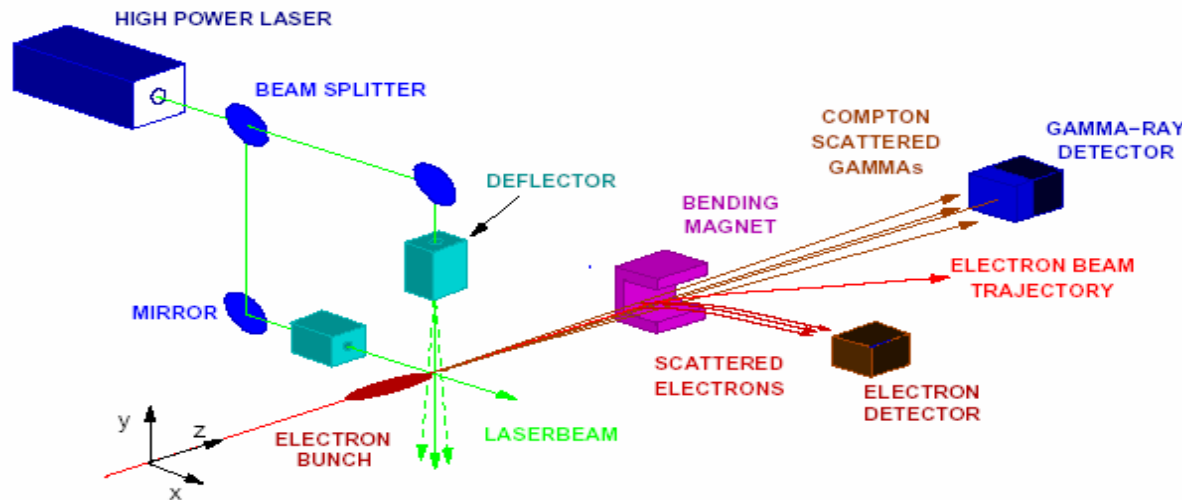
# Laser wire

- Technique non destructive pour mesurer la taille transverse d'un faisceau d'électrons/positons
- Ancienne méthode : fil de tungstène
  - Impossible avec les faisceaux du futur ILC !



•Principe de la mesure :

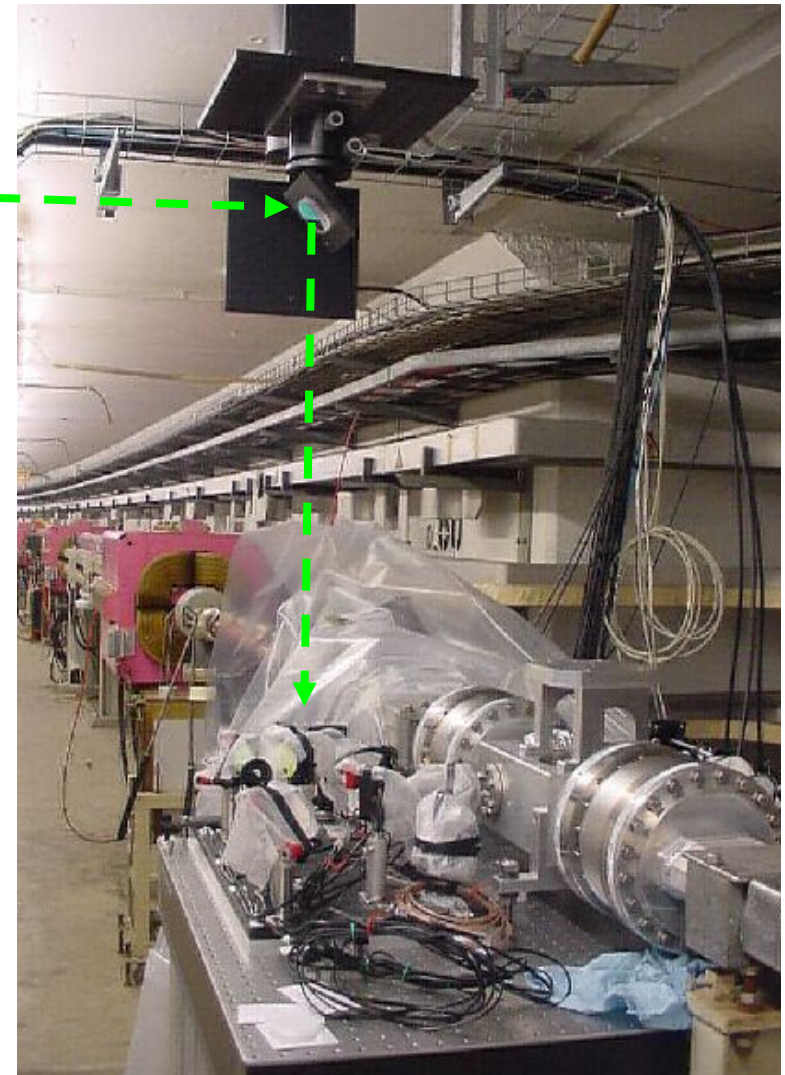
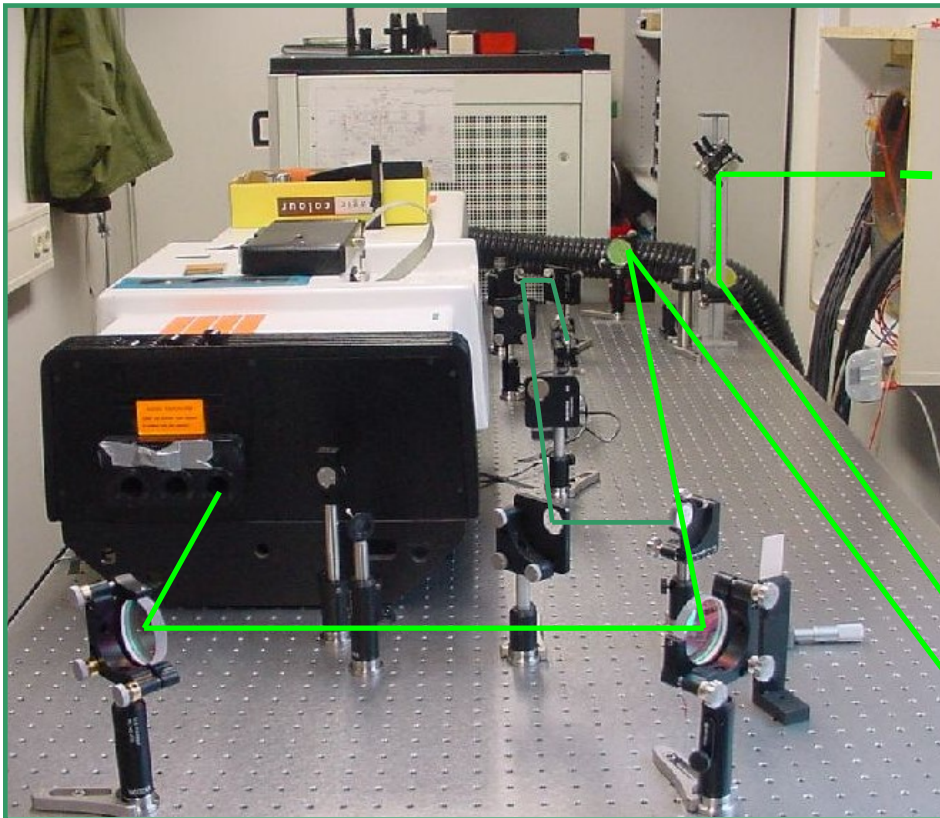
- diffusion Compton: on compte le nb de photons/électrons diffusés en changeant la position du faisceau laser
- ➔ taille du paquet d'électrons si l'on connaît la taille des pulses du laser ET SI cette taille est  $<$  ou  $=$  à la taille du bunch d'électrons



Théorème central limit de Marc...

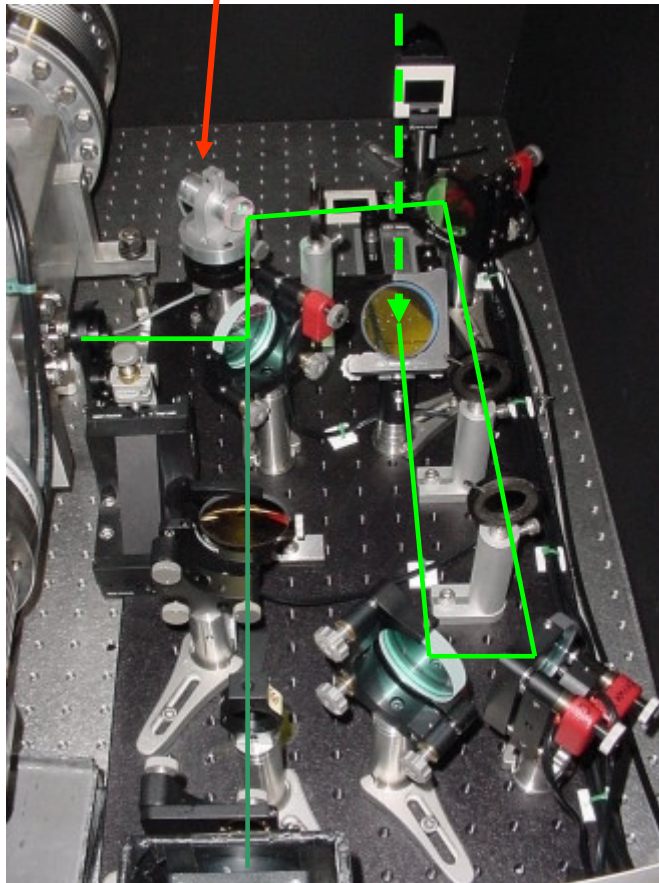
## R&D a DESY : installation dans l'anneau PETRA

Un laser pulsé vert intense

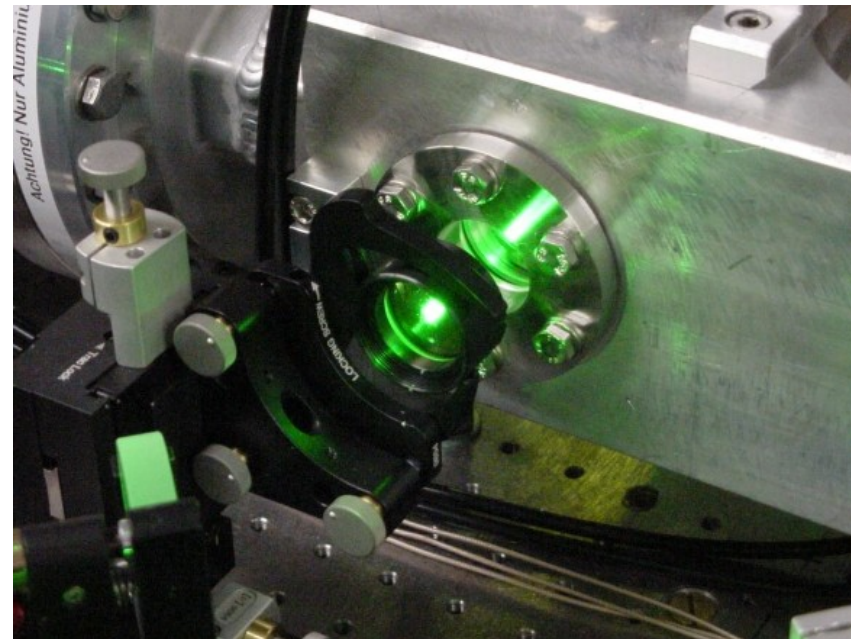


Tube à vide  
des électrons

Miroir sur piezo  
pour bouger le faisceau



Entrée du laser dans le tube à vide

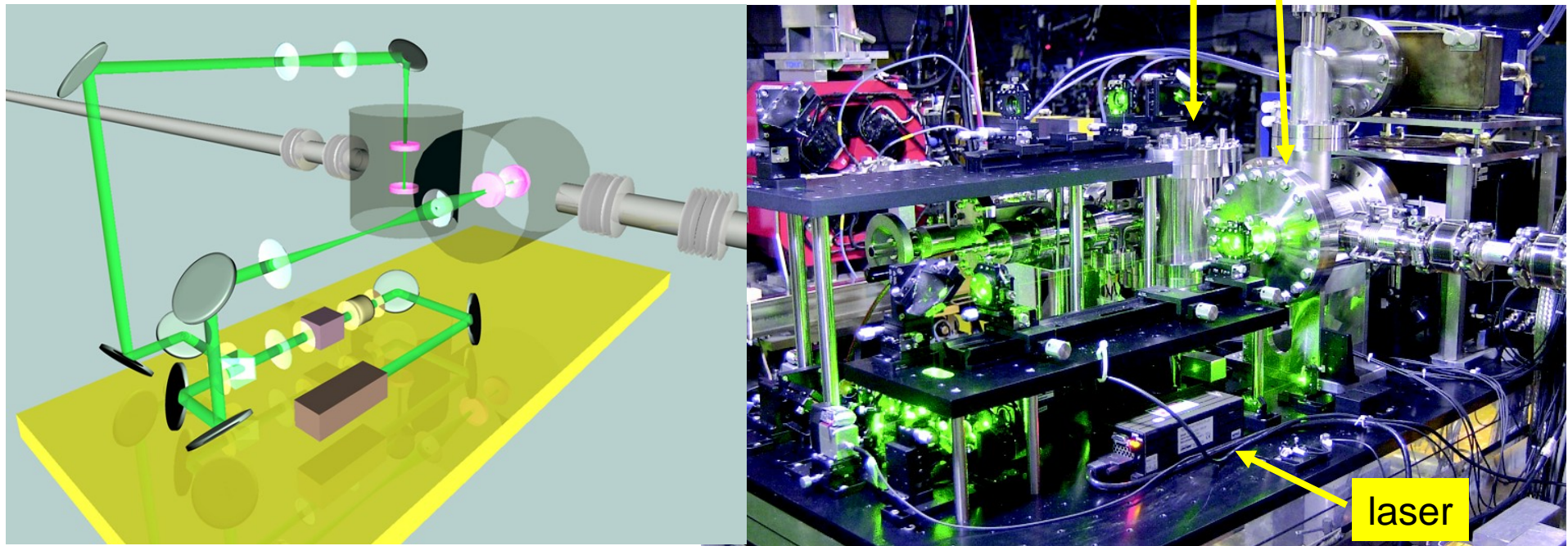


**Résultat : ça marche !**

Installation en cours sur ATF2 a KEK ou les faisceaux sont micrométriques ...

## Laser wire pour l'ILC

**CW** Laser wire beam size monitor in ATF/KEK Dumping Ring  
[Projet KEK]



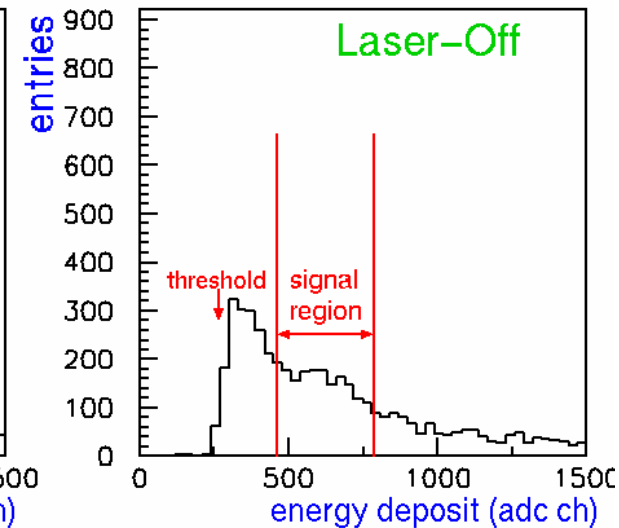
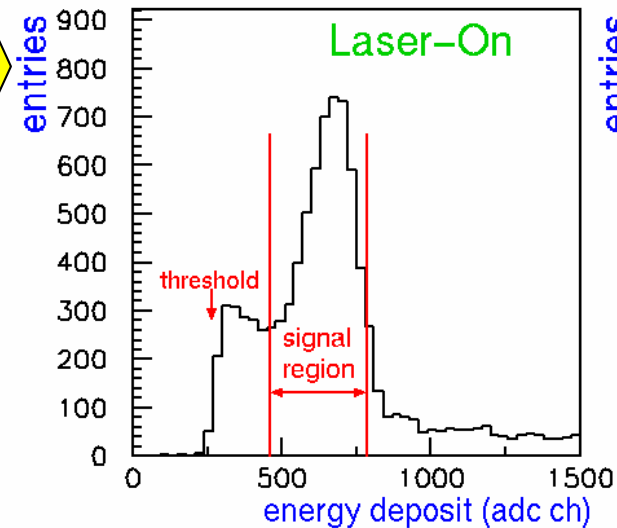
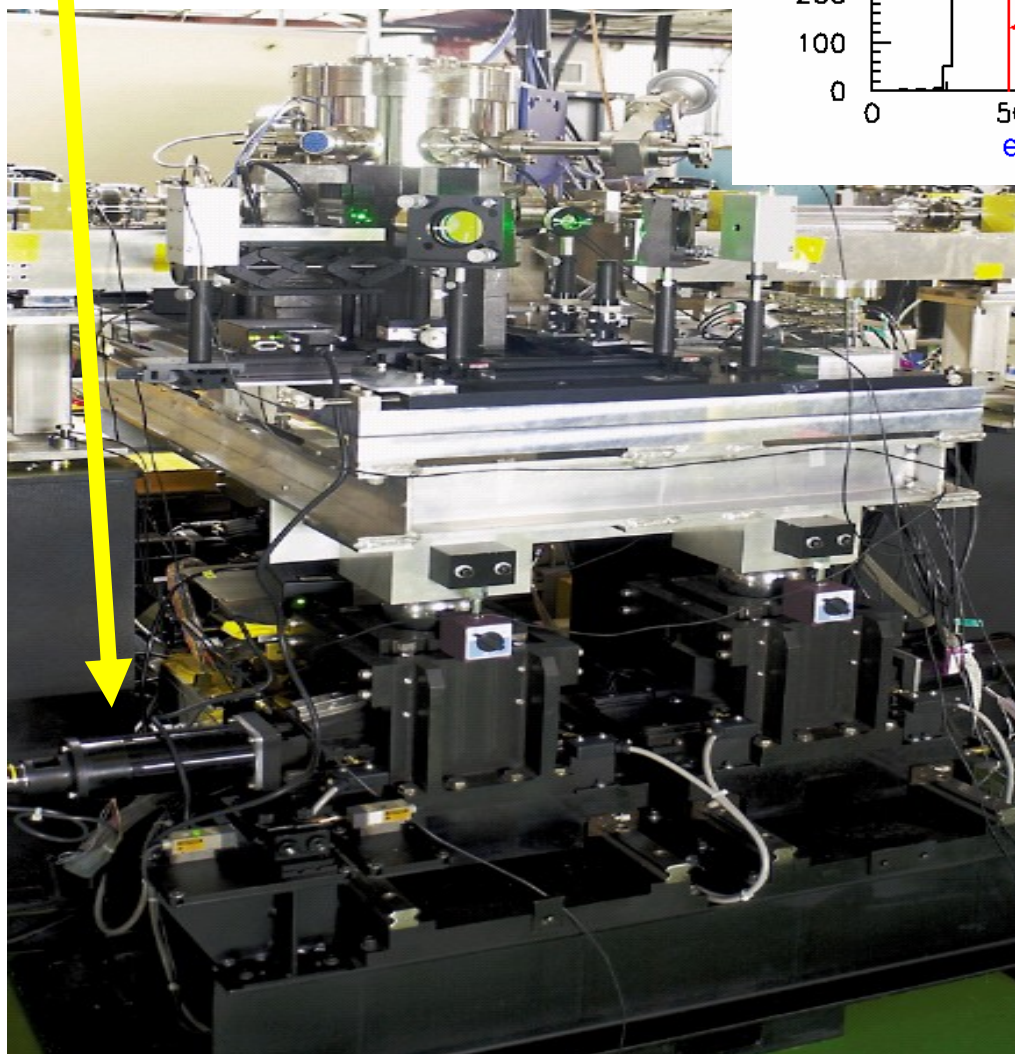
**CW** 300mW 532nm Solid-state  
Laser fed into optical cavities

Slide from J. Urakawa

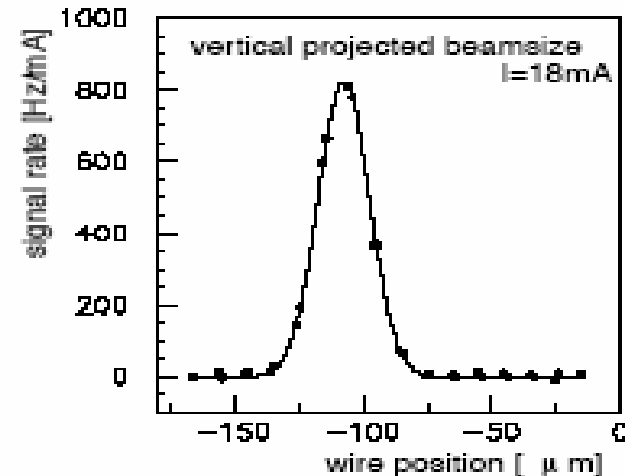
14.7 $\mu$ m laser wire for X scan  
5.7 $\mu$ m for Y scan  
(whole scan: 15min for X,  
6min for Y)

Comptage du nb de  $\gamma$  diffusés

Pour différentes positions de la table optique  
[scan micrométrique...]



Exemple de mesure



Projets actuels

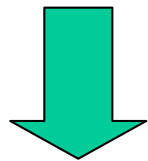
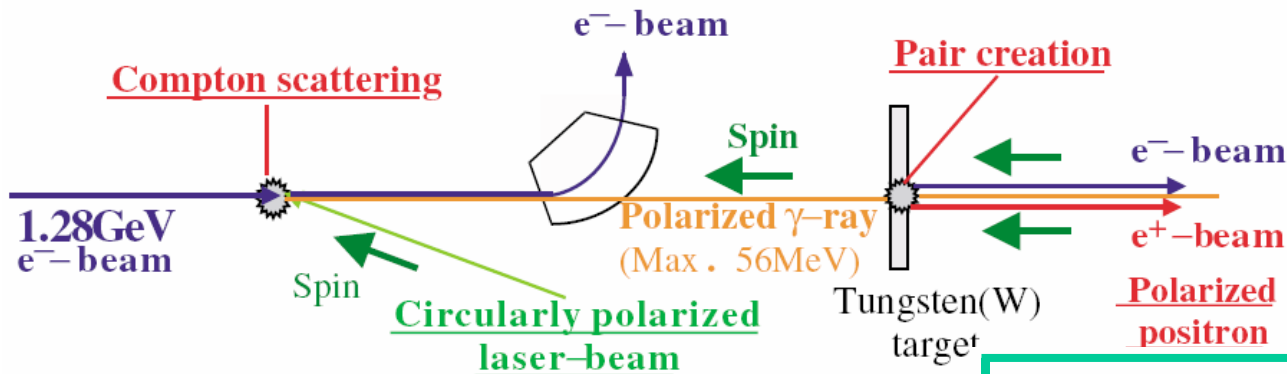
- laser pulsé + cavité [KEK]
- laser pulsé (amplis fibres dopées Yb) sans cavité [Oxford, N. Delerue]

# Source de positrons polarisés pour le futur collisionneur linéaire

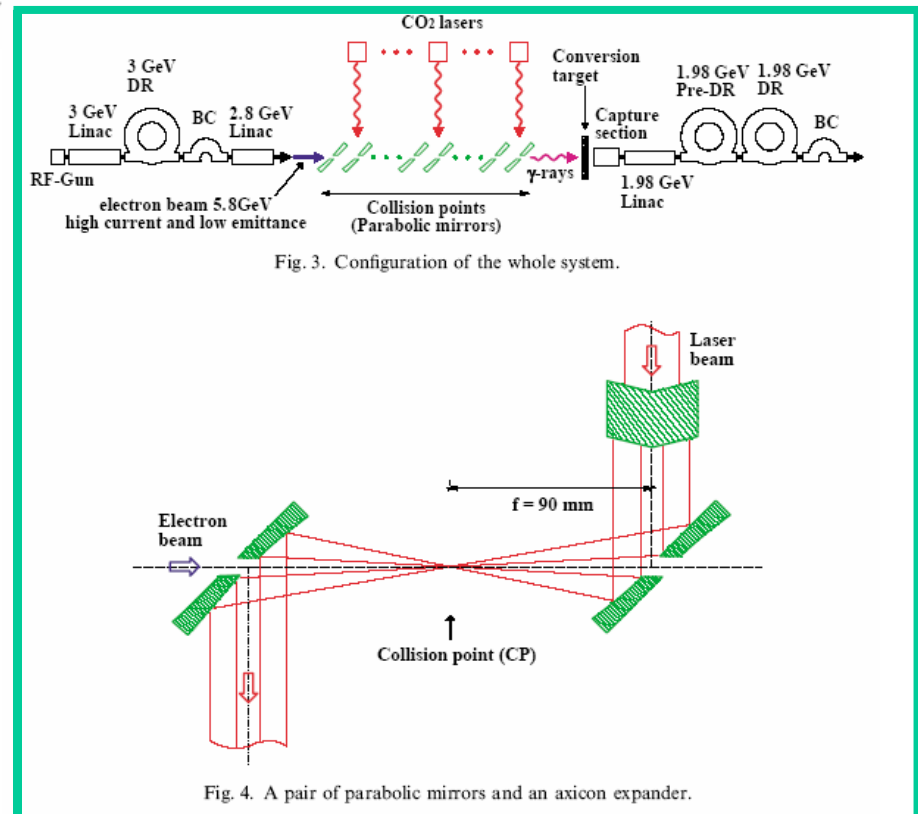
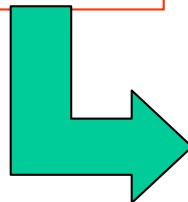
2 techniques

- Technique utilisant la diffusion Compton (challenging !)
- Technique utilisant des onduleurs

# Solution Compton (KEK, NI MA500(2003)232)

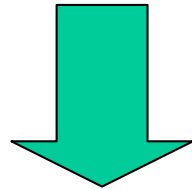


Pb : le nb de lasers (qqes dizaines...) & syst ème optique complexe...

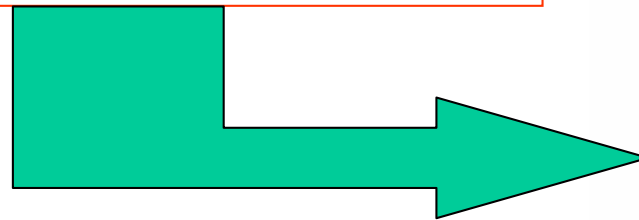


Mais :

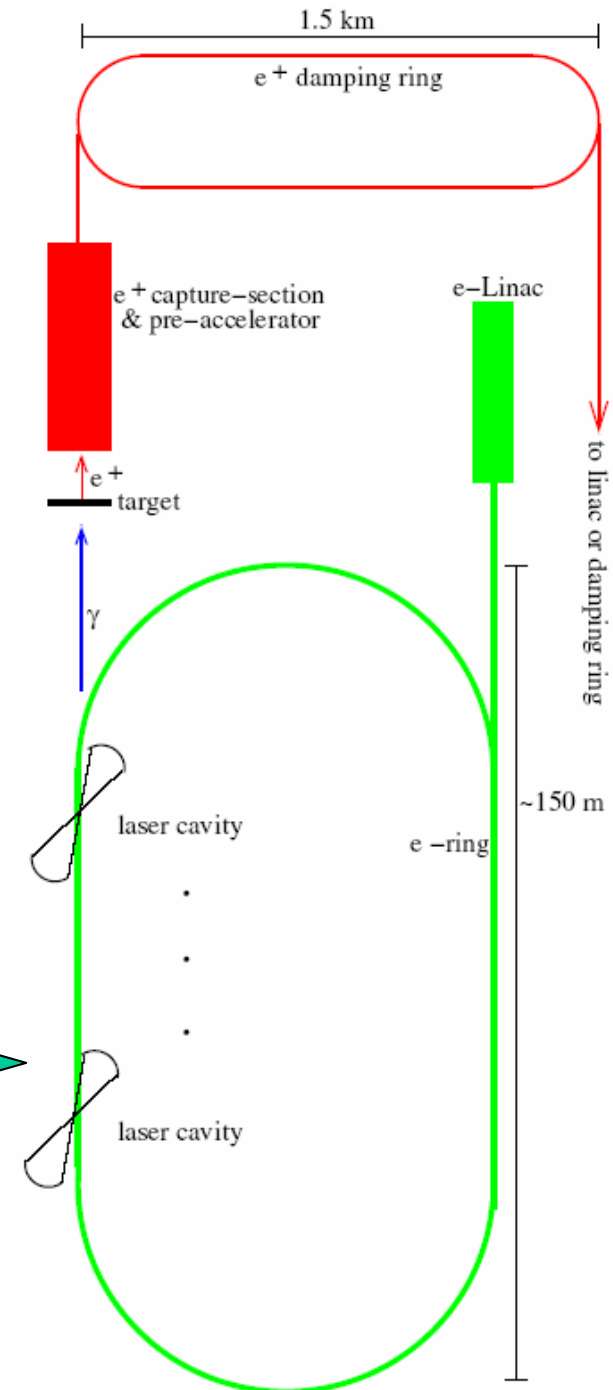
- Faisceaux = trains de  
~ 3000 bunches
- Fréquence [trains] = 5 Hz



200 ms pour créer les  
e+ polarisés



0.6J/pulse @ 1ps @ 60MHz →  $\langle P \rangle = 36\text{MW}$  !!!  
par cavité → R&D ! (KEK, CELIA, LAL)



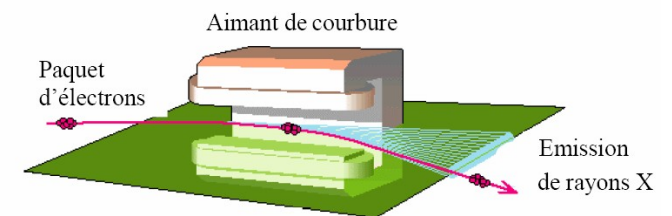
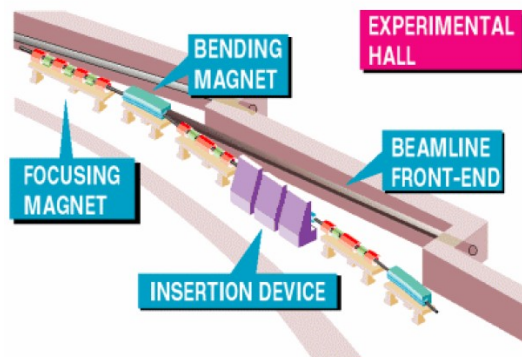


# Un exemple de 'synergie' laser-accélérateur-médecine-muséologie

•Ce qui a été fait auprès des gds accélérateurs à rayonnement synchrotron avec les rayons X et que l'on voudrait refaire dans une petite salle

- Exemple 1 : radiothérapie
- Exemple 2 : muséologie

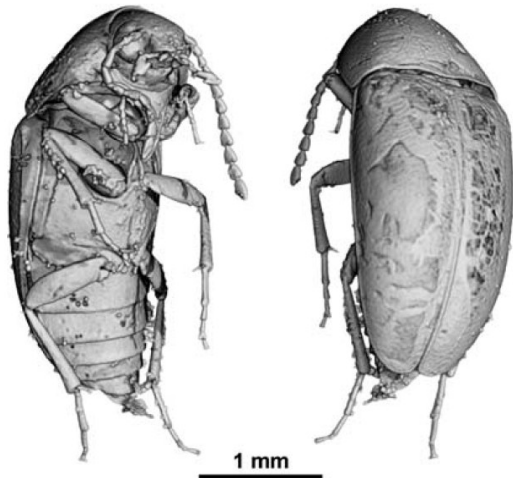
ESRF



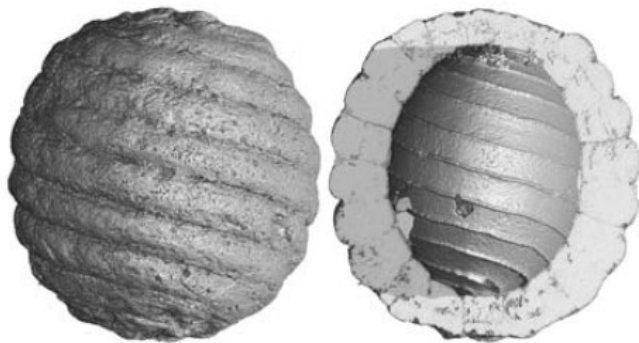
# Applications en paléontologie & art

## Phase contrast imaging

Appl. Phys. A 83, 195–202 (2006)



Scarabé du cétagé (145-65 Ma av. JC)  
dans de l'ambre opaque ( $E_x=20\text{keV}$ )



b

'algue' de l'océan Téthys

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



**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 !

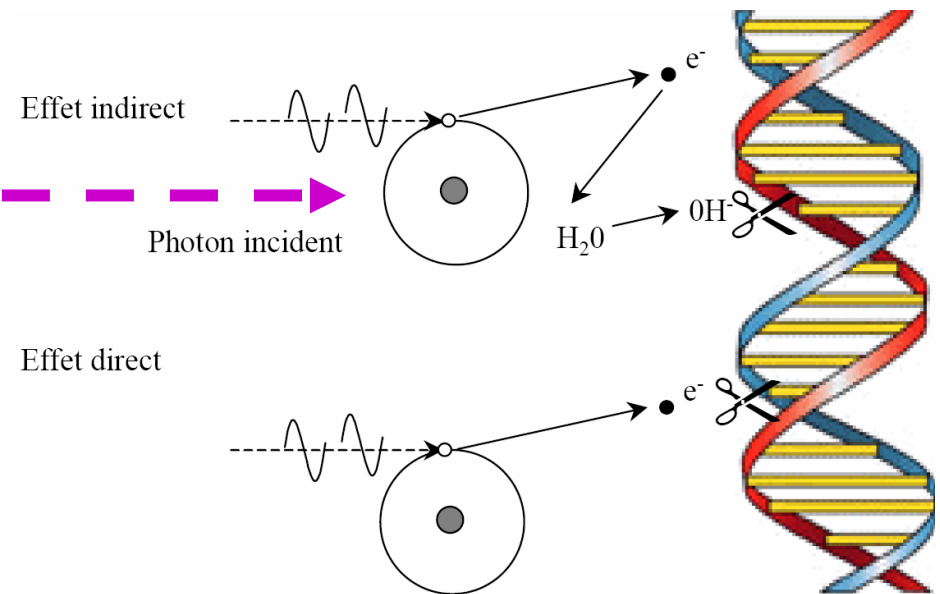
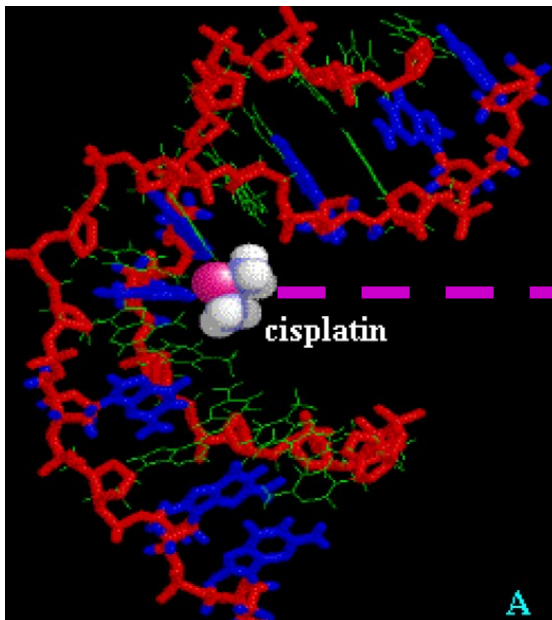
<http://www.vangogh.ua.ac.be/>

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

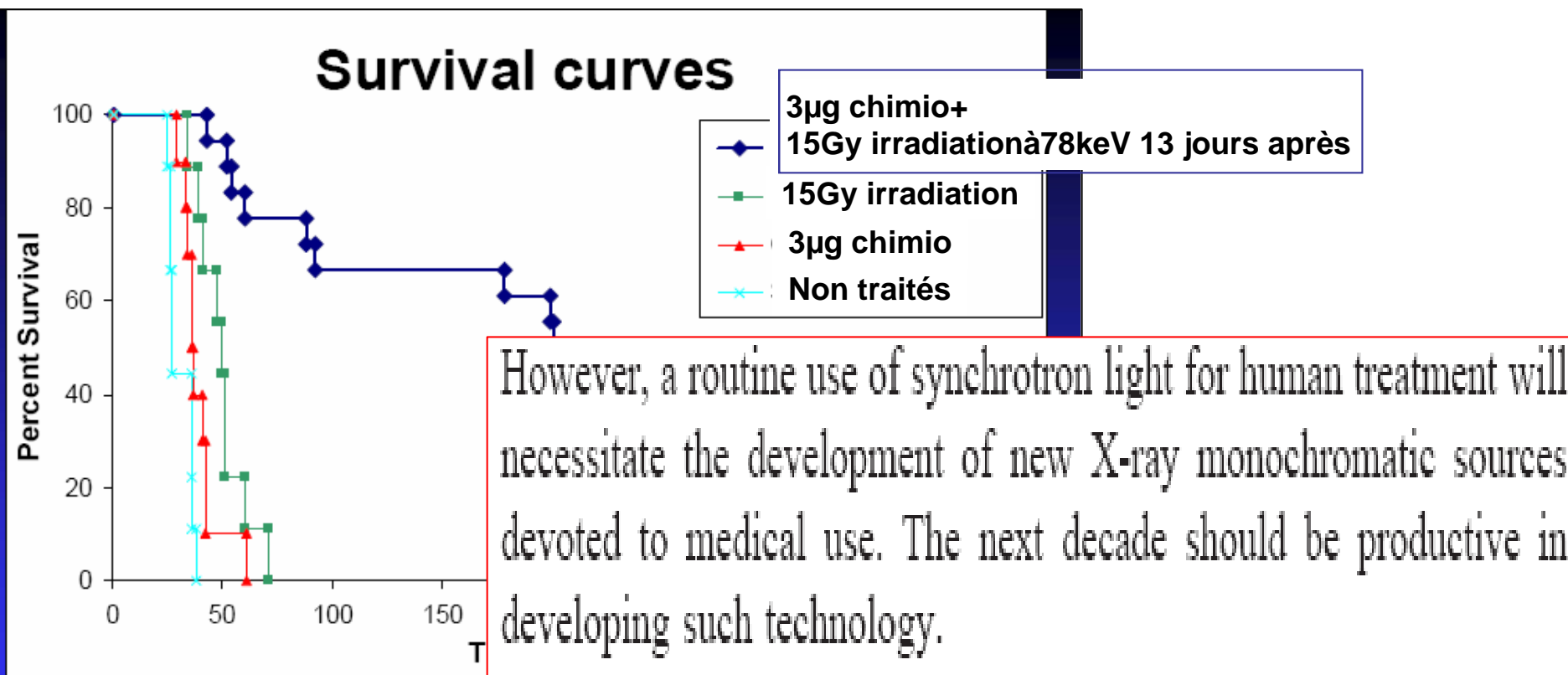
Pas de traitement pour le 'glioblastome'  
aujourd'hui (7 cas/10<sup>5</sup> par an en France...)

•**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...)



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

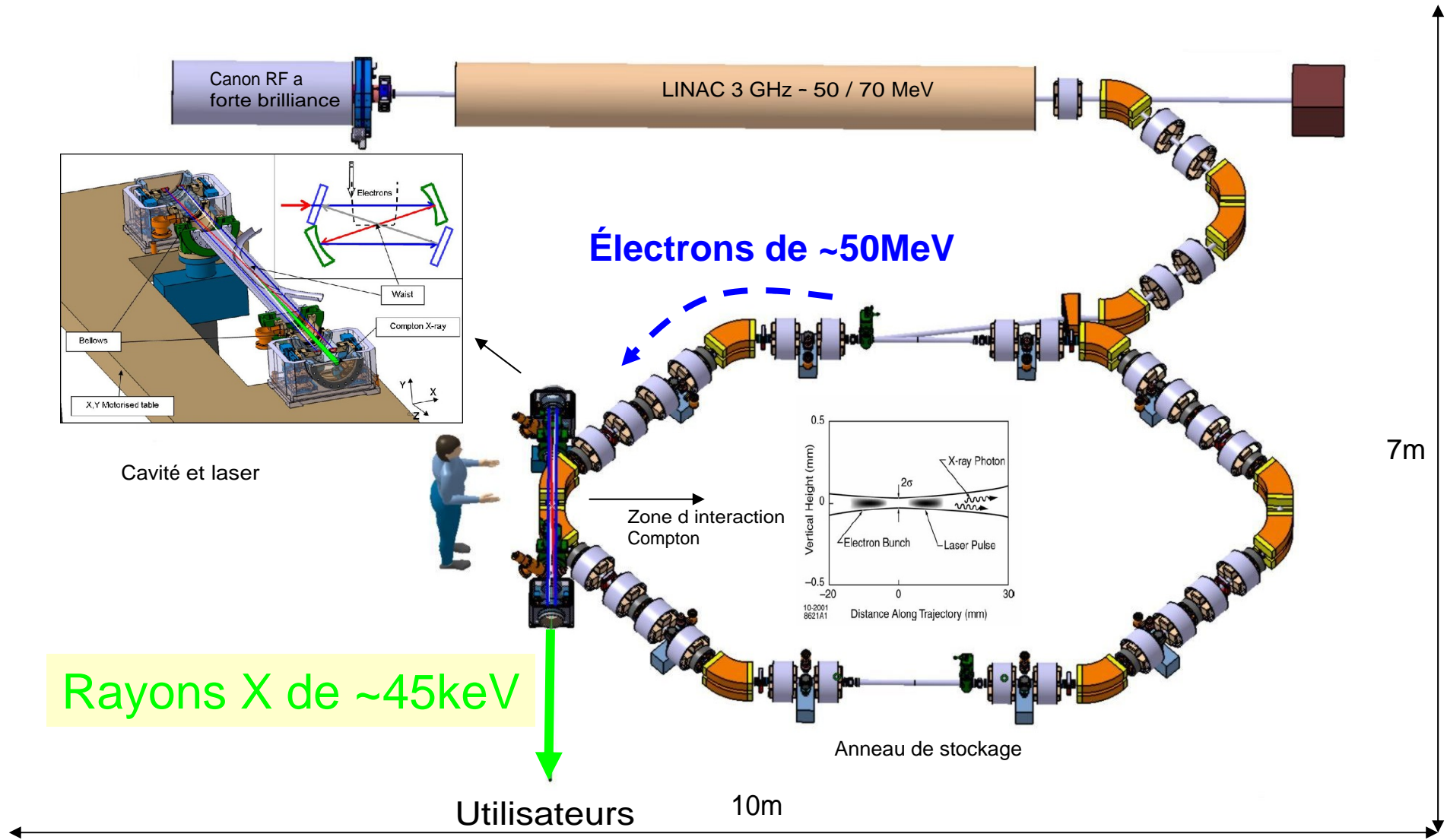
**694 % Increase in life span relative to median survival time**

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

A. Bravin, [www.ca.infn.it/alghero2008](http://www.ca.infn.it/alghero2008)

# Projet Français ThomX

Une machine compacte. Elle peut être intégrée dans un hôpital, un laboratoire ou un musée !!!!



# VIRGO

## Une Nouvelle Fenêtre Sur L'Univers

**[Tiré d'une présentation de Fabien Cavalier/LAL]**

- **Les ondes gravitationnelles**
- **Comment les détecter ?**
- **Le défi technologique de VIRGO**

# Les Ondes Gravitationnelles

## Astronomie :

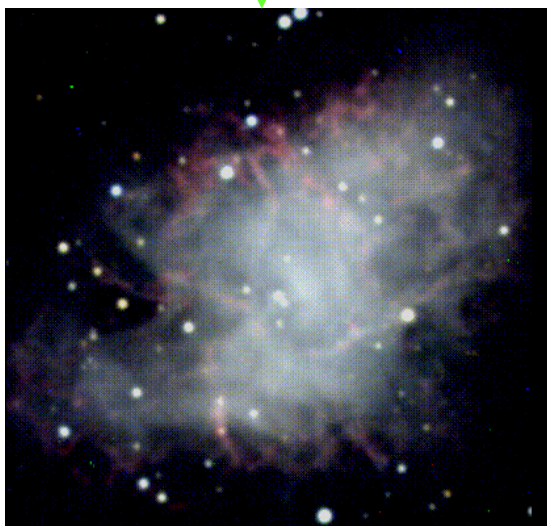
- Ondes Radio
- Infrarouge
- Visible
- Ultraviolet
- Rayons X
- Rayons  $\gamma$

**Ondes électromagnétiques  
émises par des  
charges électriques  
en mouvement  
ou des réactions  
nucléaires**

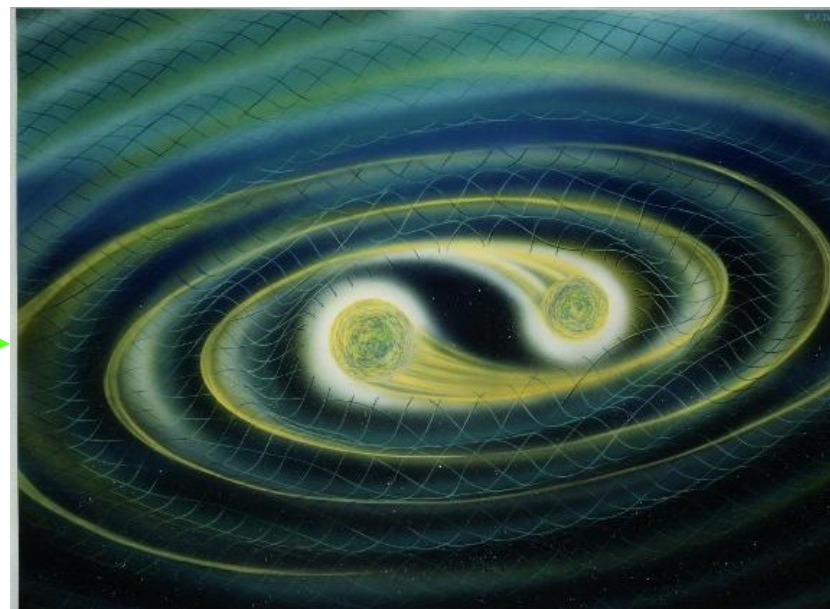
**Les Ondes Gravitationnelles  
sont émises par des masses en mouvement**

- Il est impossible de créer des sources détectables en laboratoire :  $h \approx 10^{-34}$
- Seuls des événements astronomiques cataclysmiques peuvent produire des ondes détectables :  $h \approx 10^{-21}$

Explosion d'étoiles ( Supernovae )



Collision  
d'étoiles  
à neutrons



• Naissance d'un trou noir



# L'Interféromètre de Michelson

Laser

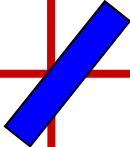


Miroir

Chemin 2

Miroir

Semi-réfléchissant

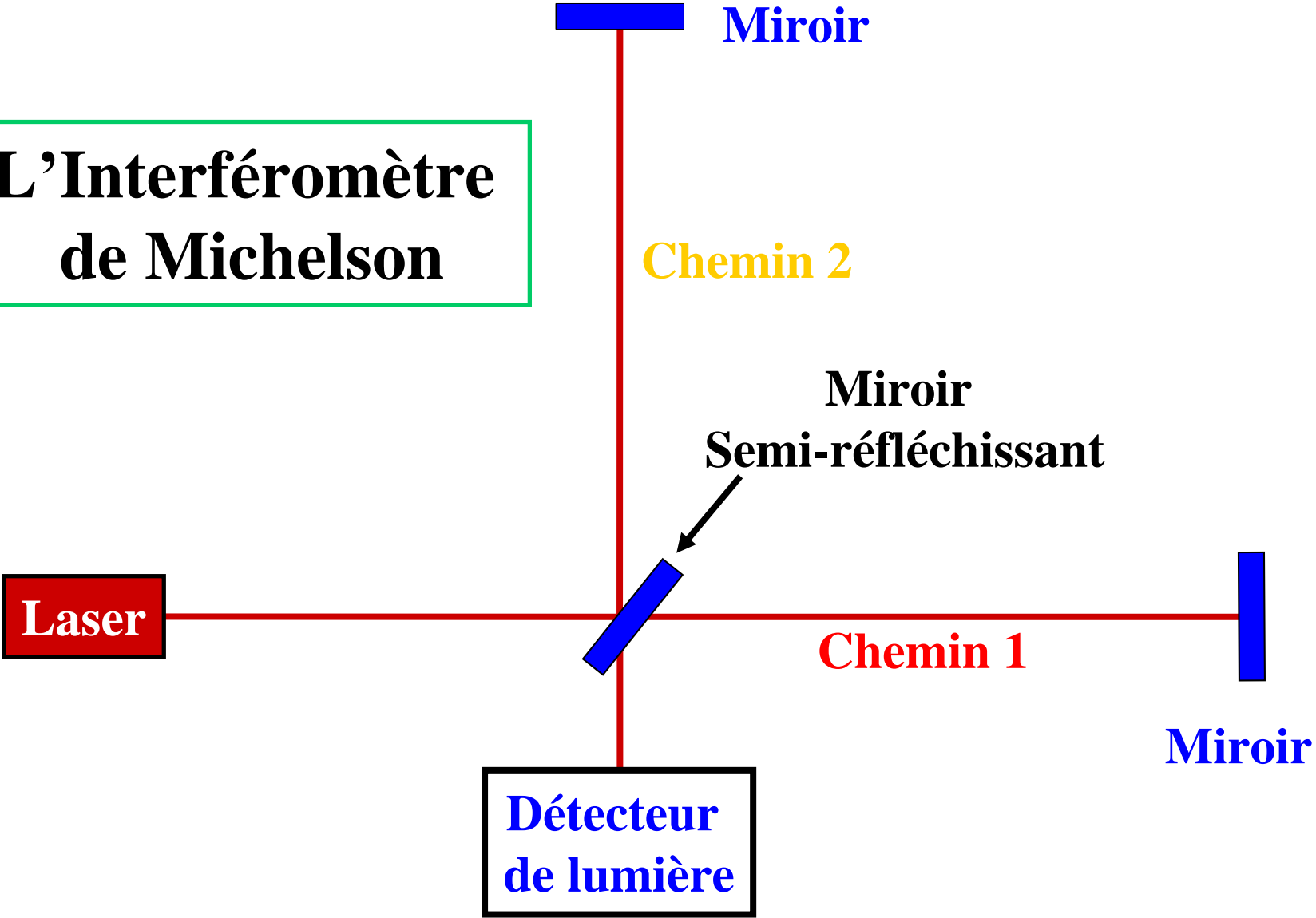


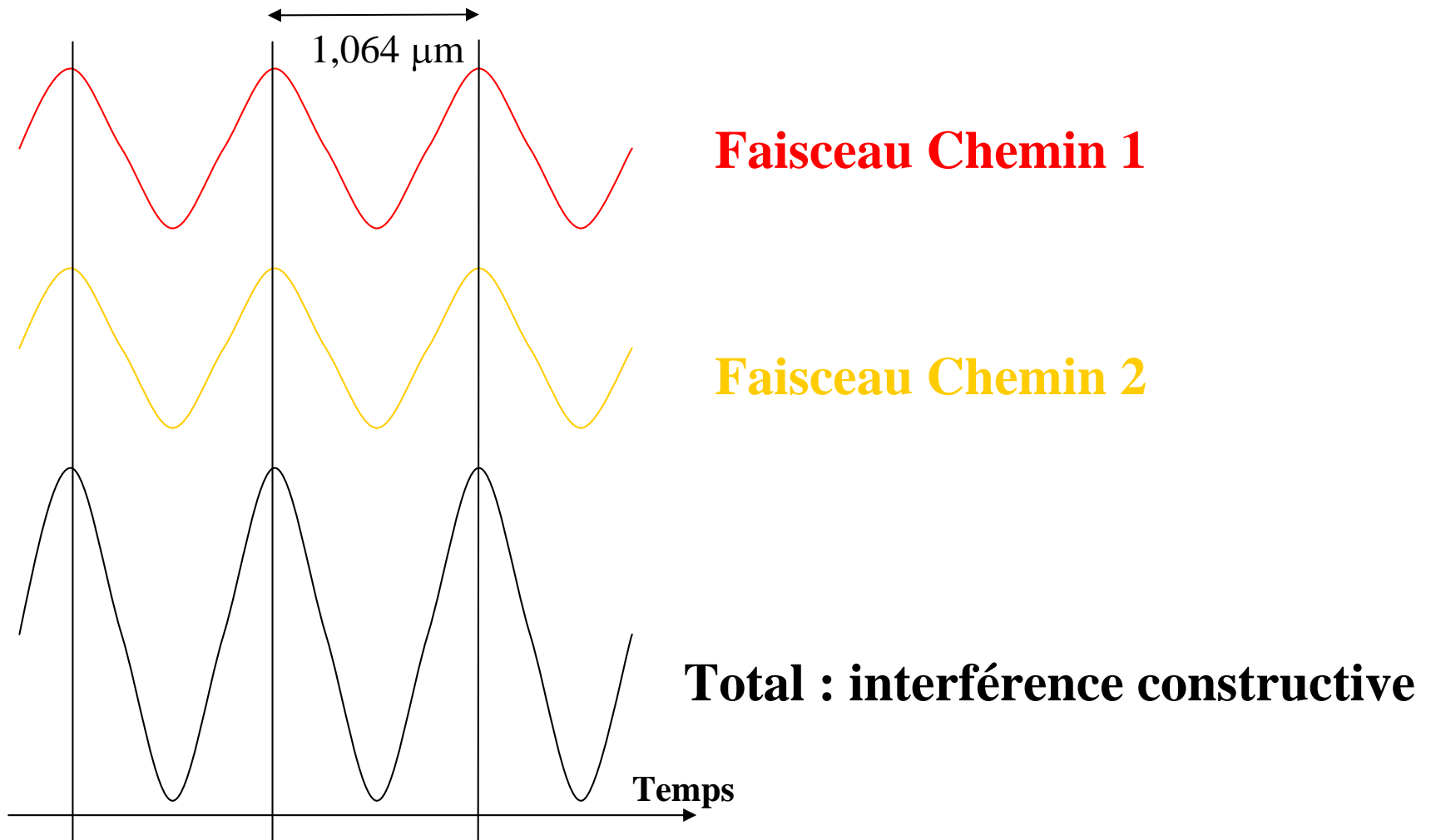
Chemin 1



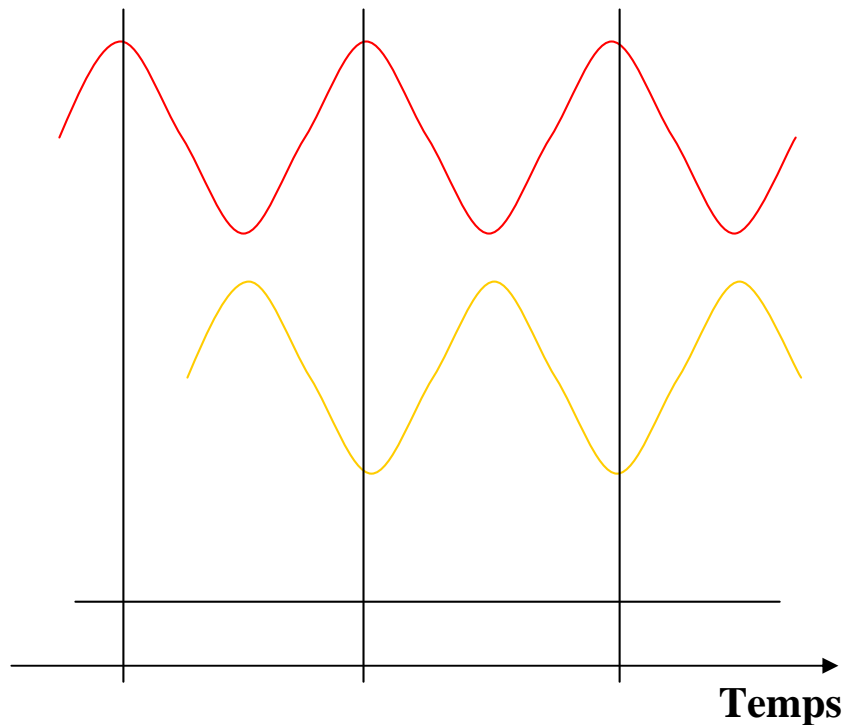
Miroir

Détecteur de lumière





**Le détecteur de lumière voit la somme des deux faisceaux**



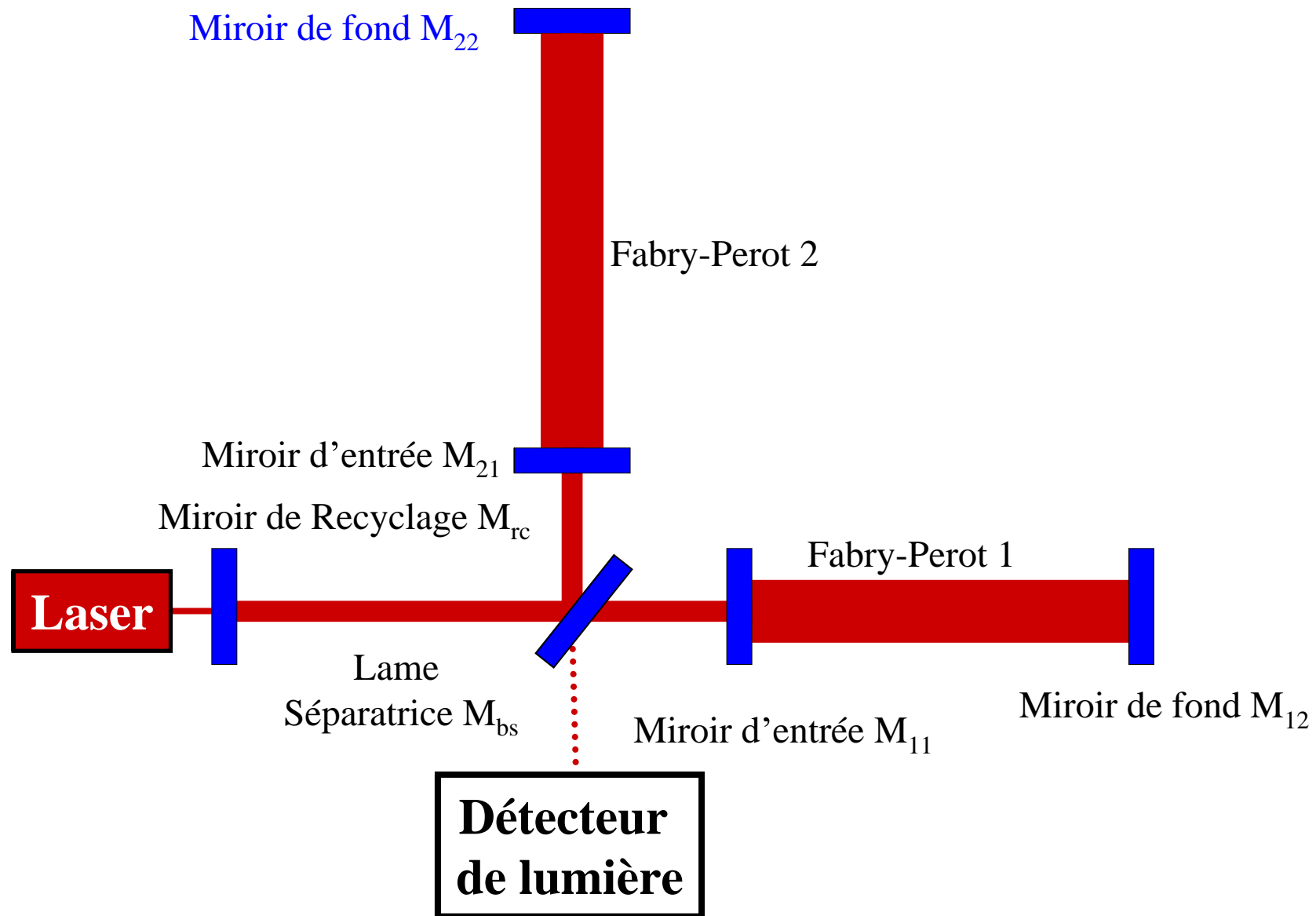
**Faisceau Chemin 1**

**Faisceau Chemin 2**

**Total : interférence destructive  
appelée frange noire**

**L'état d'interférence dépend  
de la différence de longueur entre les deux chemins**

- Réglons l'interféromètre sur une frange noire
- Une onde gravitationnelle va changer la longueur des chemins
- Le détecteur va recevoir de la lumière
- La quantité de lumière est proportionnelle à l'amplitude  $h$



# Le défi technologique de VIRGO

**VIRGO est un projet Franco-Italien :**

- **En construction à Cascina dans les environs de Pise**
- **Fin de la construction prévue à l'automne 2003**
- **Regroupe des laboratoires du CNRS et de l'INFN**
- **Rassemble 50 physiciens et 150 ingénieurs**

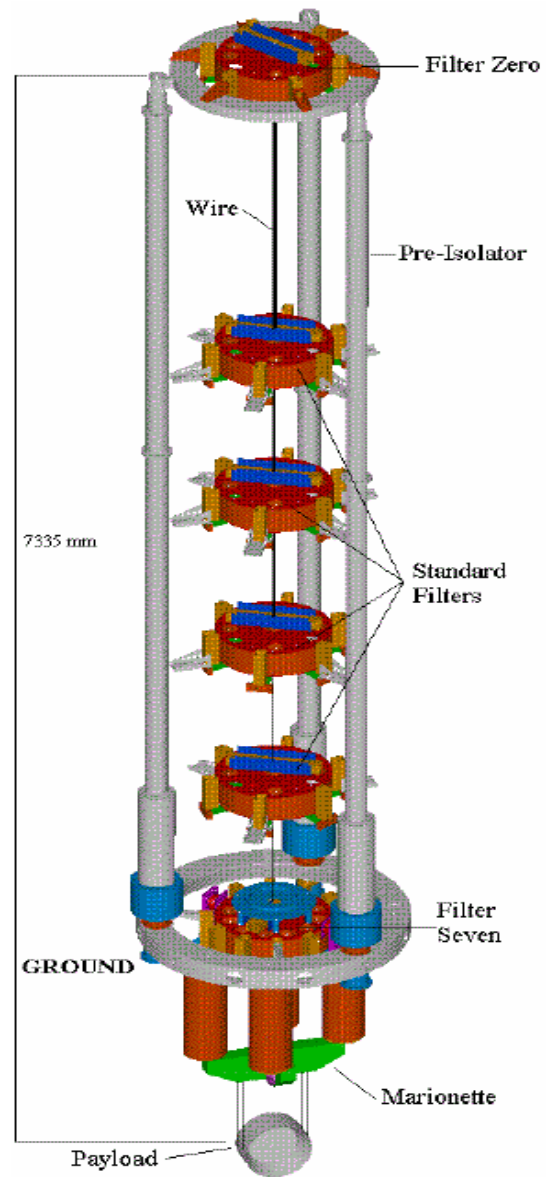


## **Les Difficultés techniques :**

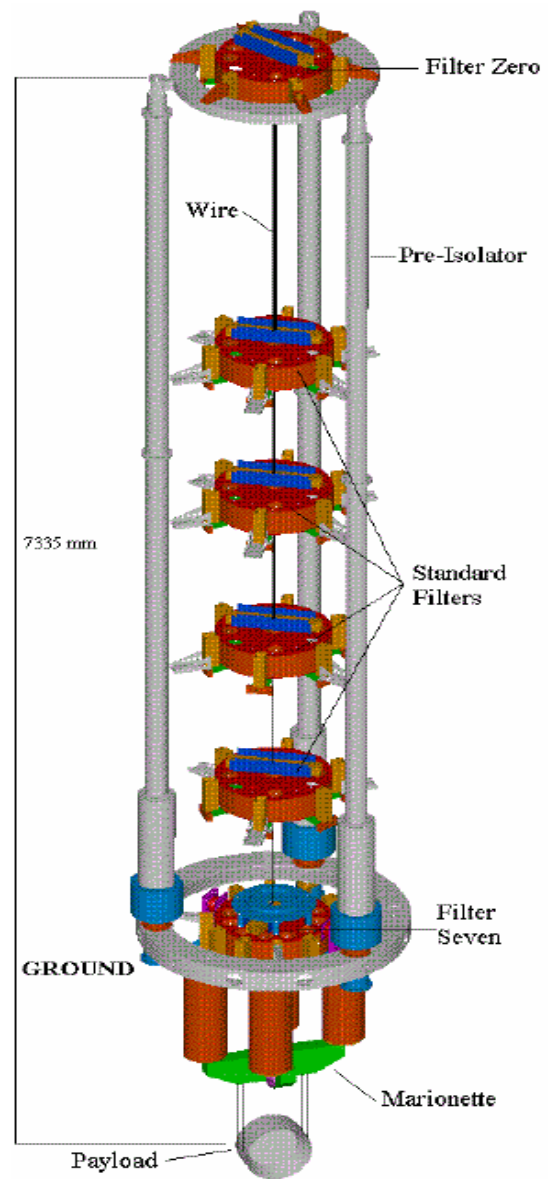
- **S'isoler des vibrations du sol**
- **Mettre tout l'interféromètre (  $\approx 7000 \text{ m}^3$  ) sous vide**
- **Avoir un laser dont la fréquence et la puissance sont stables 24 heures sur 24**
- **Avoir des miroirs dont la qualité est à la limite des techniques actuelles**
- **Contrôler en permanence (toutes les  $100 \text{ } \mu\text{secondes}$ ) que l'interféromètre est à son point de fonctionnement nominal**



# Le Super-Atténuateur



# Le Super-Atténuateur



**Le Vide**



**Le Tube**

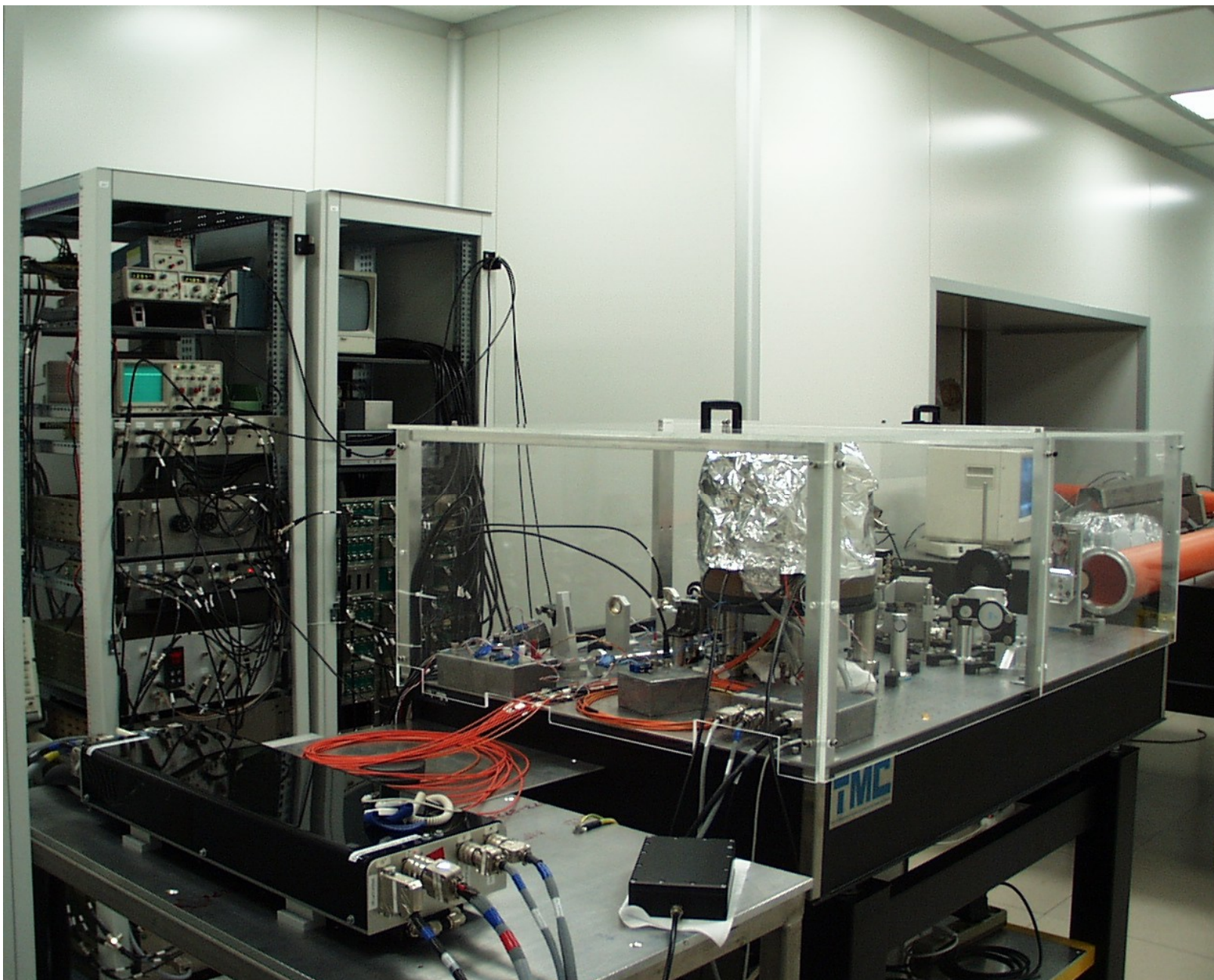


**Les Tours**



**Les Vannes**

# La Source Laser



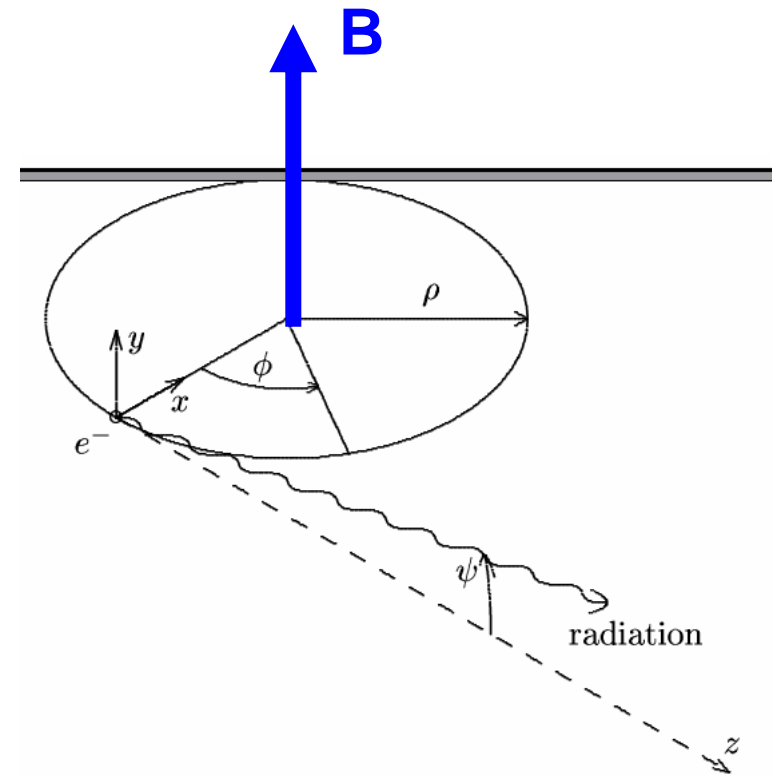
**F.E.L & SASE**  
(**F**ree **E**lectron **L**aser  
&  
**S**elf **A**mplified **S**pontaneous  
**E**mission)

# Rayonnement synchrotron

*Une particule chargée qui tourne dans un champ magnétique rayonne des photons*

L'énergie (ou longueur d'onde) dépend

- Du champ magnétique,
- De l'énergie des particules chargées,
- Du rayon de courbure de la trajectoire



## Rayonnement créé par des électrons dans un onduleur magnétique

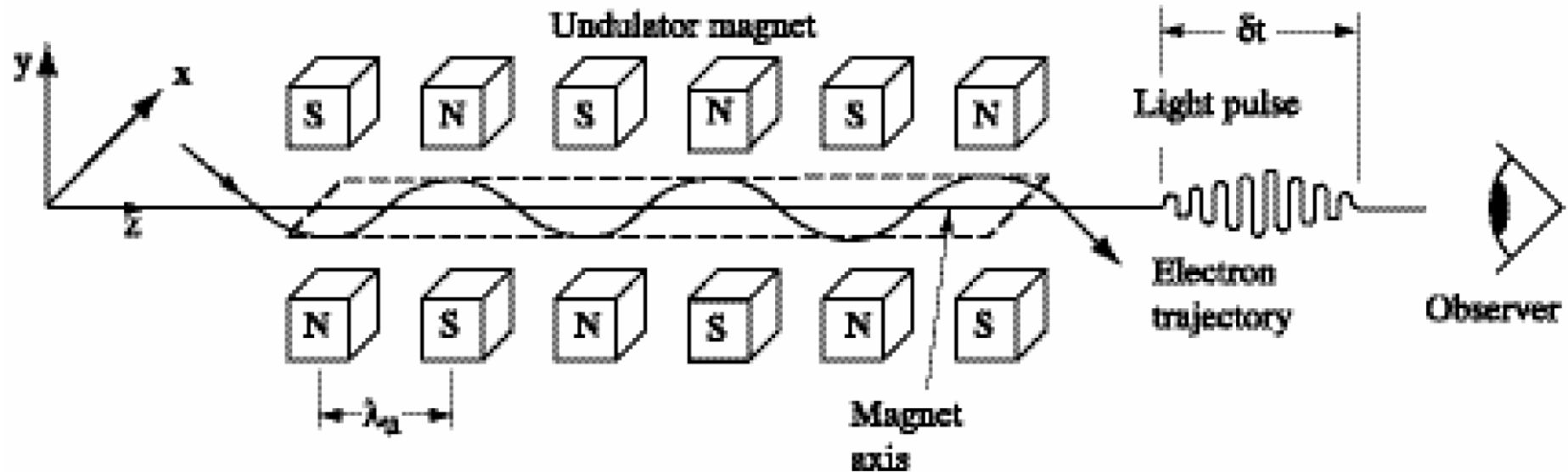
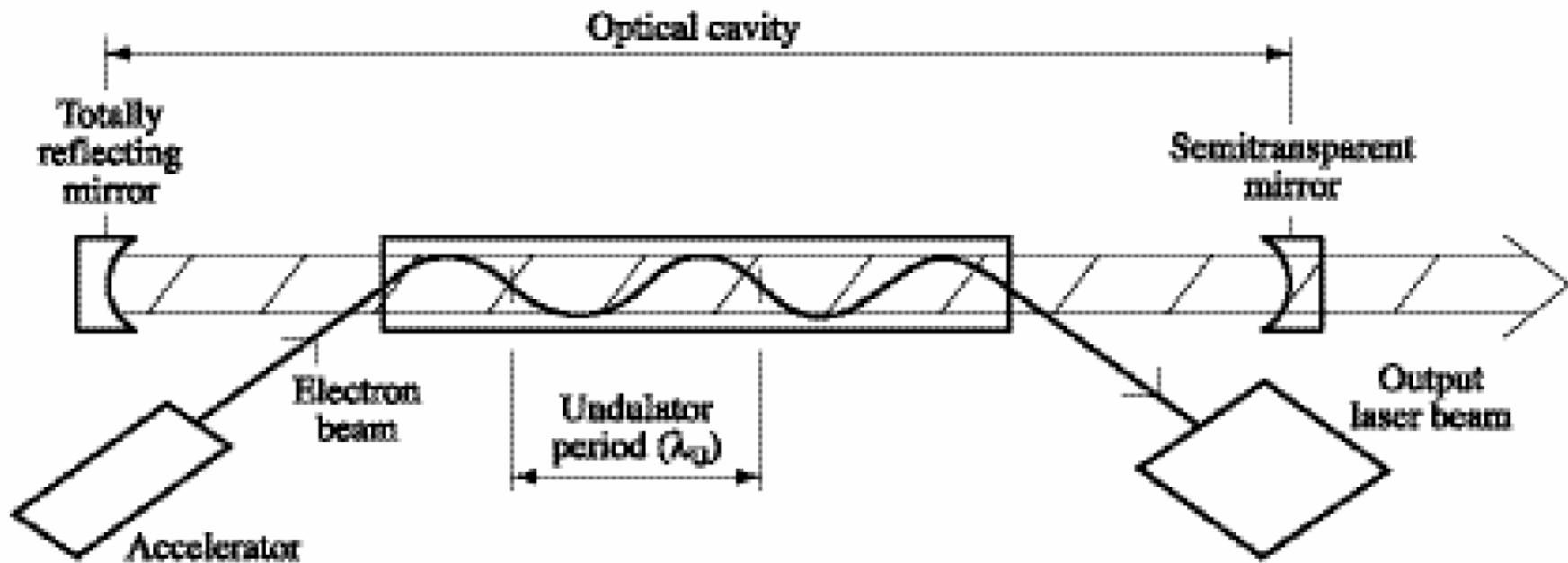


Fig. 1 Synchrotron emission in Undulator Magnet

Un rayonnement est créé. Longueur d'onde de la première harmonique:

$$\lambda \propto \lambda_u \frac{m_e^2}{E_e^2} (1 + K^2), K \propto \lambda_u \frac{B}{m_e}$$

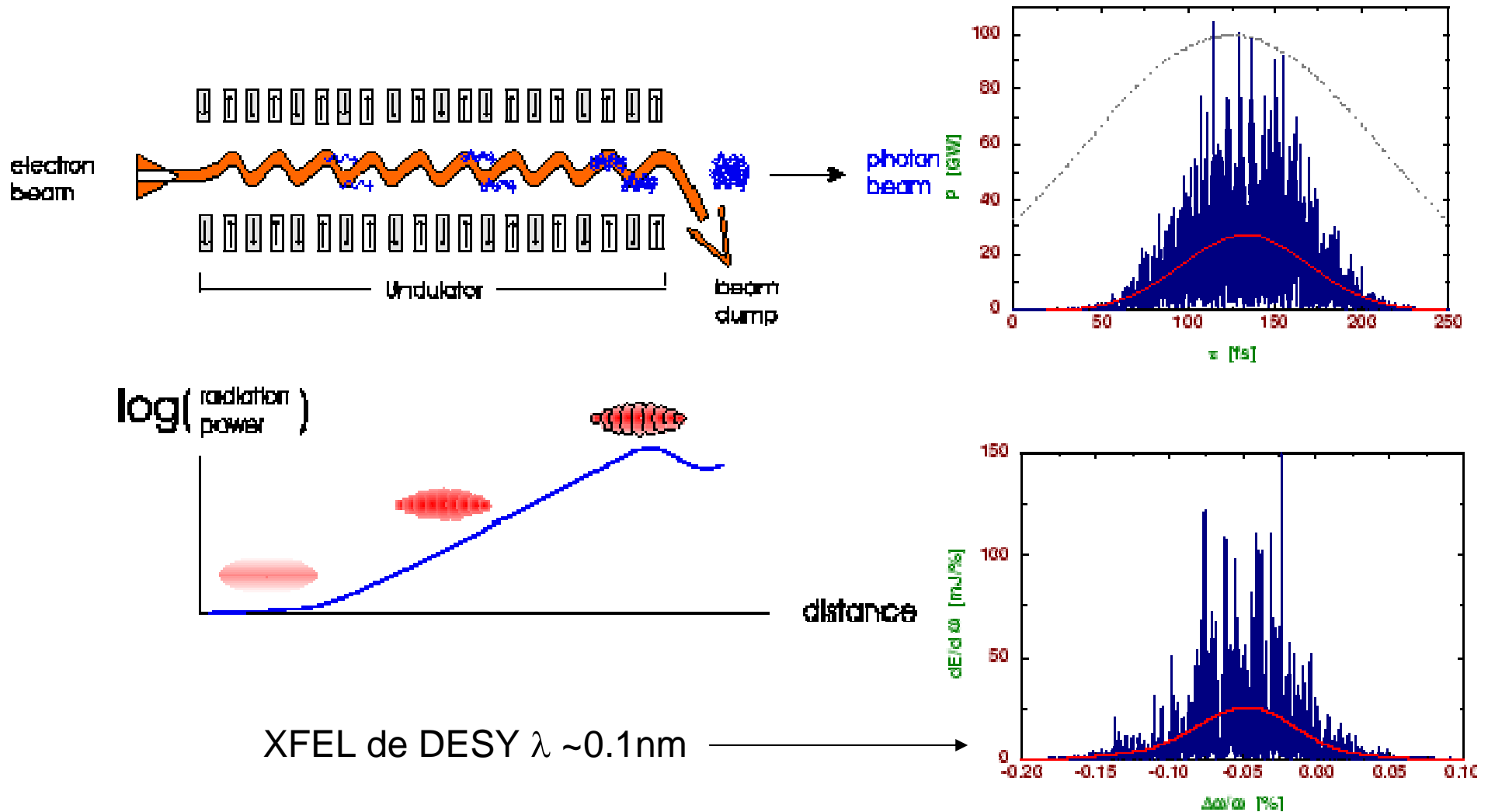
Pour amplifier le rayonnement créé, on place une cavité. On 'stocke' ainsi des longueurs d'ondes dans l'infrarouge, le visible et les UV faibles.





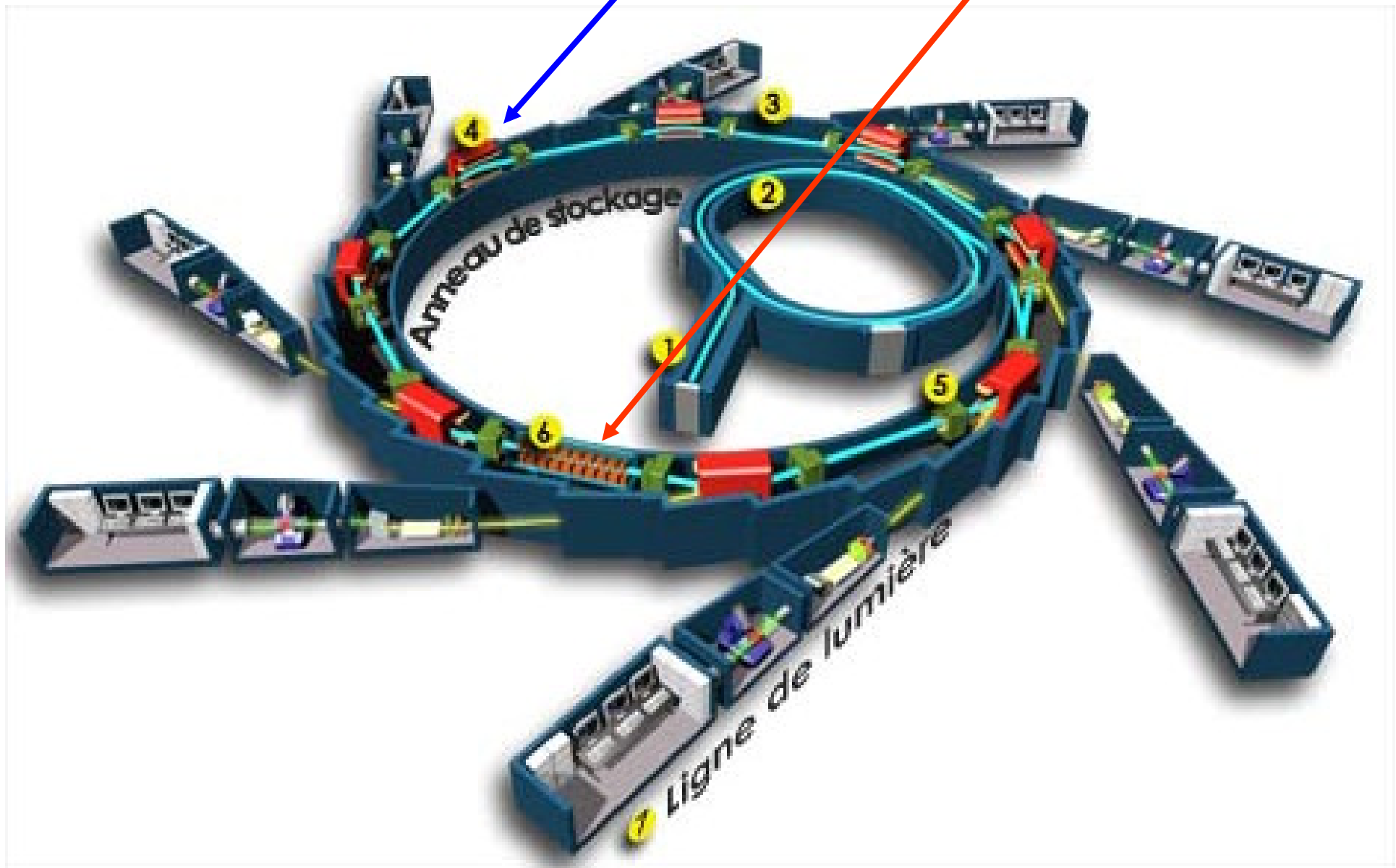
# SASE (=Self Amplified Spontaneous Emission)

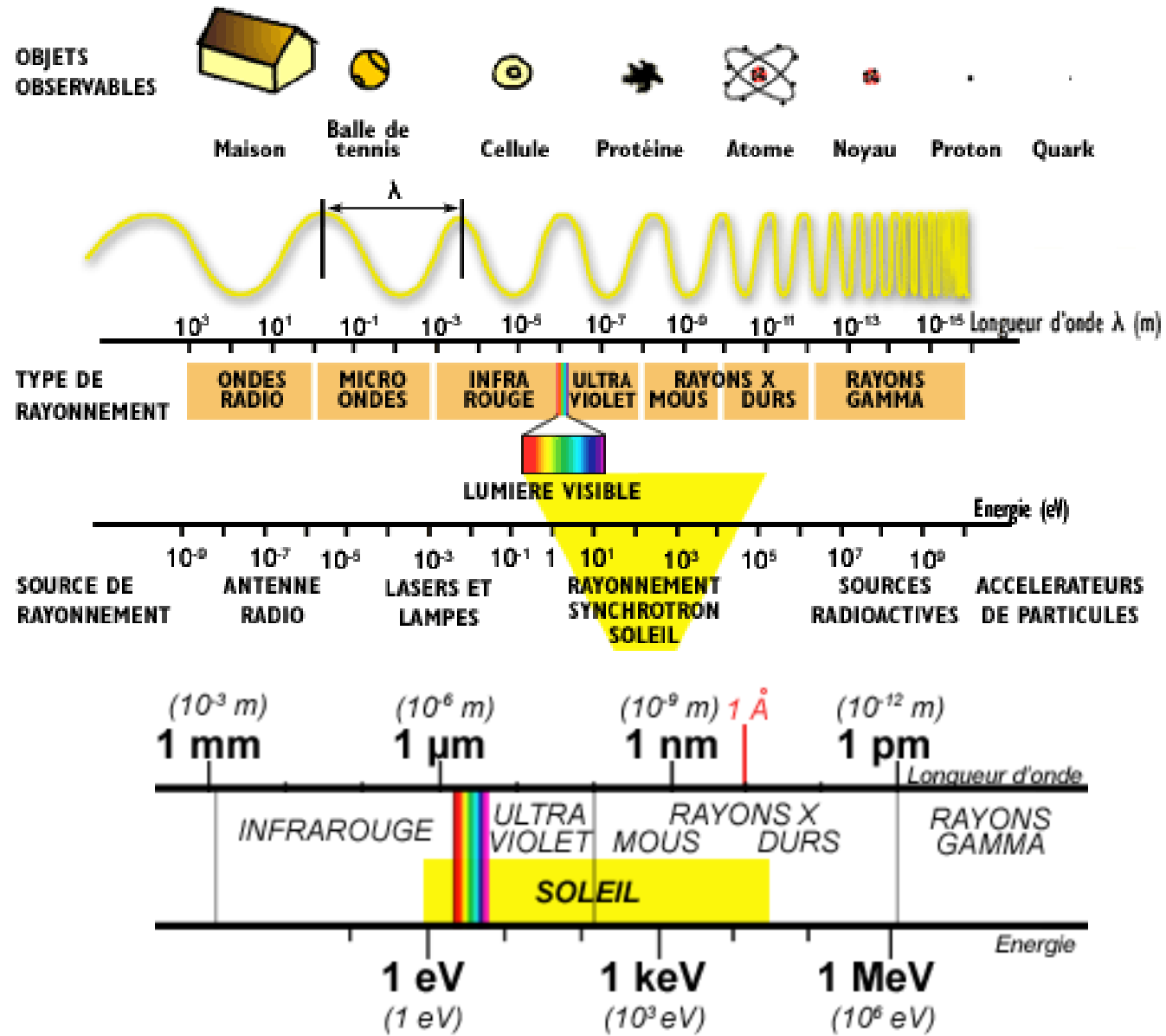
Pas de miroir pour les longueurs d'ondes trop courtes (VUV et rayons X).  
On utilise des faisceaux de très bonne qualité dont les tailles et les fréquences sont optimisées pour renforcer la cohérence entre l'émission du rayonnement et le rayonnement lui-même.



XFEL de DESY  $\lambda \sim 0.1\text{nm}$

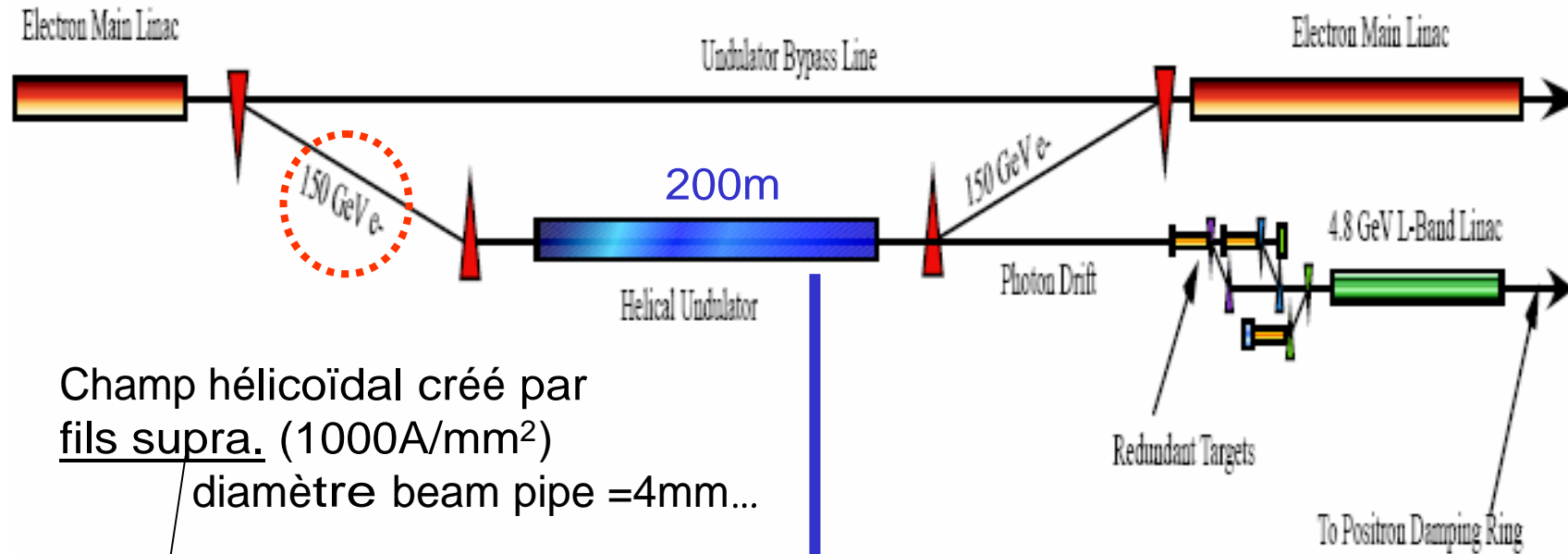
SOLEIL: utilisation du rayonnement synchrotron (et **onduleurs**)





**Applications** : biologie, médecine, chimie, physique des surfaces ...

# Source $e^+$ polarisés : solution onduleur

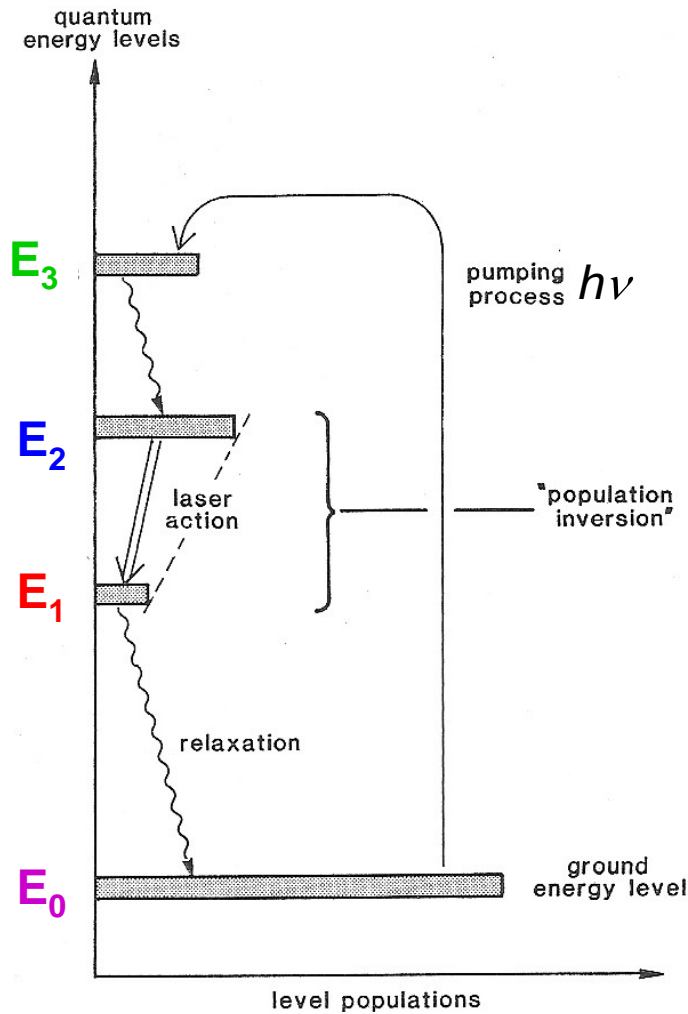


Champ hélicoïdal créé par  
fils supra. ( $1000\text{A}/\text{mm}^2$ )  
diamètre beam pipe = 4mm...



Proto. Onduleur Daresbury Lab.

# Petit rappel

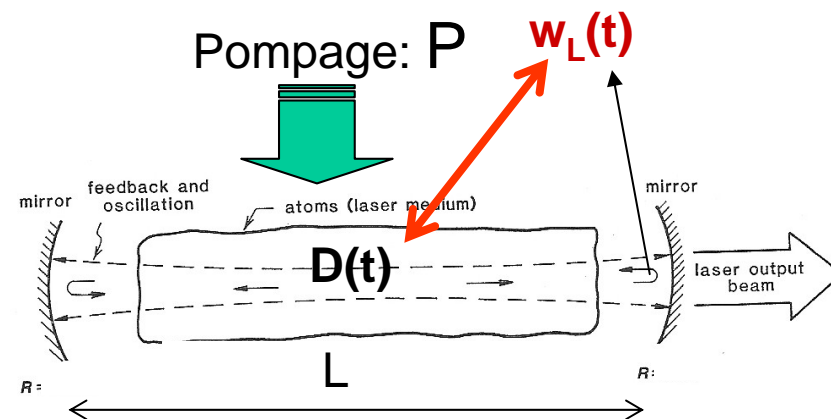


Fréquence de l'onde elm :  $\nu = (E_3 - E_0) / h$

- **Durée de vie du niveau 3 très courte**
- Relaxation non radiative entre les niveaux **3** et **2**
- **Radiation laser entre les niveaux 2 et 1**  
 → Durée de vie du niveau **2** très longue
- **Durée de vie du niveau 1 très courte**

**Note :**

- **radiation laser  $E_{\text{Laser}} = E_2 - E_1 < h\nu$**



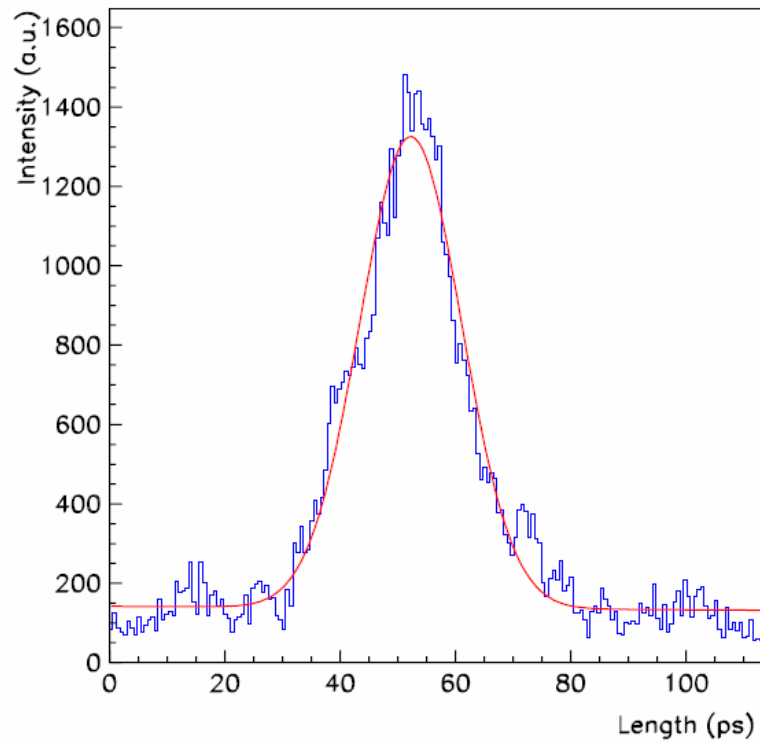
$$\frac{1}{\tau_c} = (1 - R) \frac{c}{L} \equiv \text{pertes dans la cavite}$$

$$Q \equiv \text{facteur - qualite - cavite} = 2\pi\nu_L\tau_c$$

## Laser Pulse length in UV measured with a streak camera

---

😊 laser pulse length sigma =  $7 \pm 1$  ps



in this example:  $\sigma = 8.5$  ps

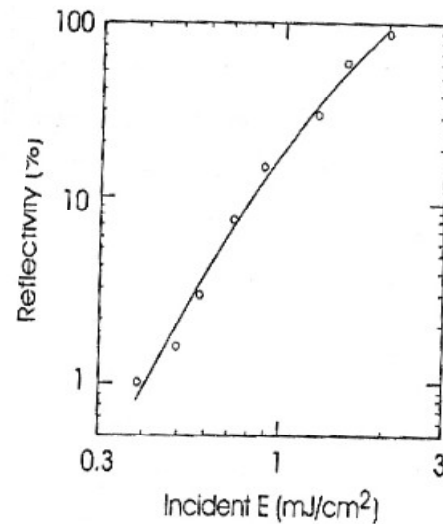
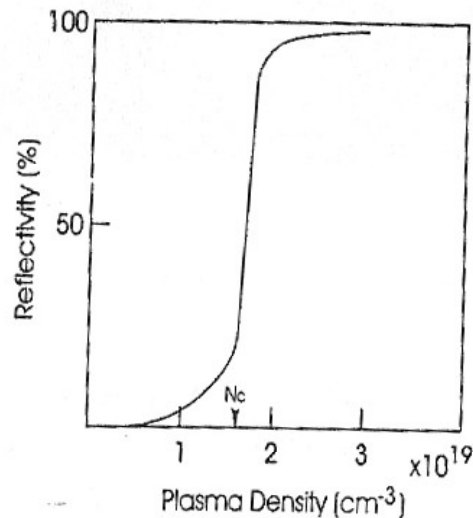
Les lasers des injecteurs ont des structures en trains de pulses à cause des effets thermiques dans les milieux à gain des amplificateurs

- On part d'un pulse long (qqes microsecondes) hyper puissant  
fréquence de répétition  $f_{rep}=1-10\text{Hz}$  (5Hz pour l'ILC)
- On 'découpe' ce long pulse en 'sous-pulses' de qqes picosecondes  
→ trains de pulses de qqes ps, fréquence des trains de 1 à 10 Hz

### • Technique de Brookhaven :

création de sous pulses à partir de pulses larges issus d'un laser CO<sub>2</sub>,  $\lambda=10.6\ \mu\text{m}$

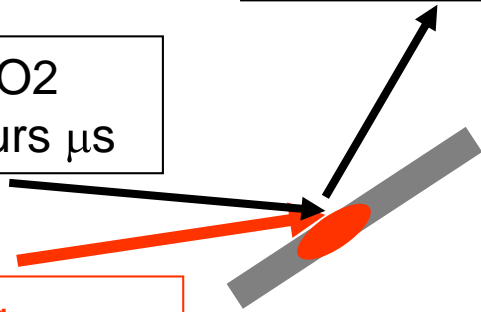
- Le Germanium est un  $\frac{1}{2}$  conducteur 'transparent' pour  $\lambda=10.6\ \mu\text{m}$
- Mais il est absorbant pour  $1\ \mu\text{m}$  (longueur d'onde du Nd:YAG)
- → on envoie un laser pulsé Nd:YAG de qqes picosecondes en même temps que le CO<sub>2</sub> sur une lame de Ge



1 pulse CO<sub>2</sub>  
de plusieurs  $\mu\text{s}$

Nd:Yag  
1ps  
haute cadence

N pulses CO<sub>2</sub>  
d'1ps !!!



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

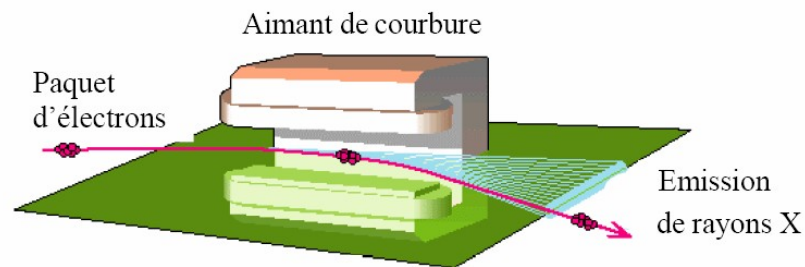
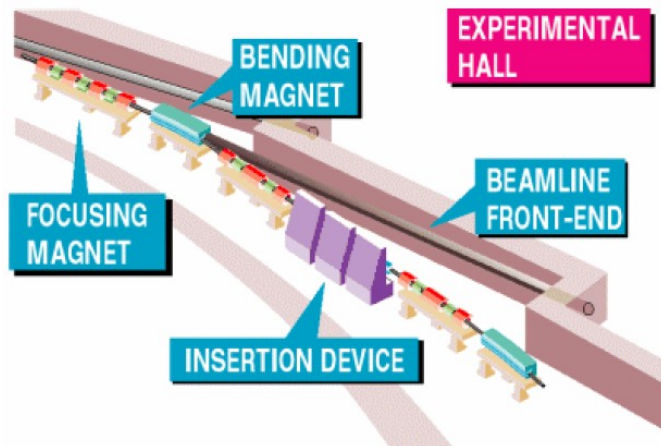
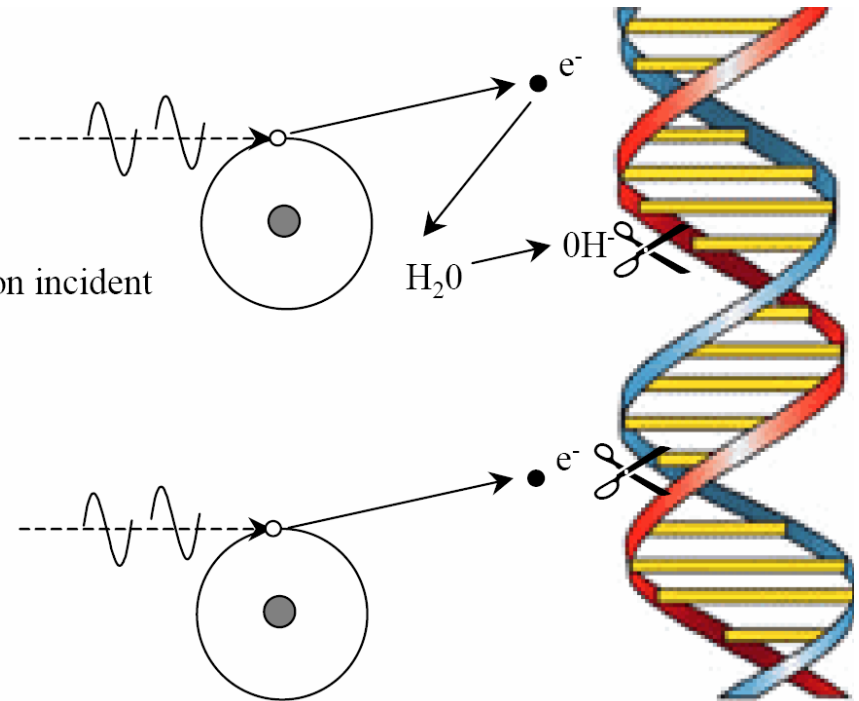
**Pas de traitement pour le 'glioblastome' aujourd'hui (& 7 cas/10<sup>5</sup> par an...):**

**•Idée** (cf these 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...

Effet indirect

Photon incident

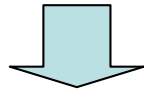
Effet direct



Sélection de l'énergie du rayonnement

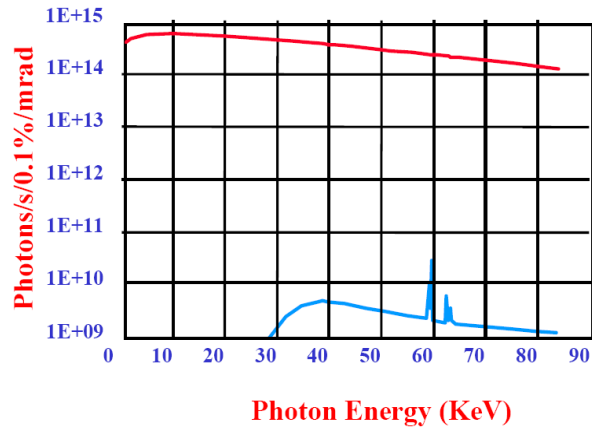


Pourquoi du rayonnement  
synchrotron ?

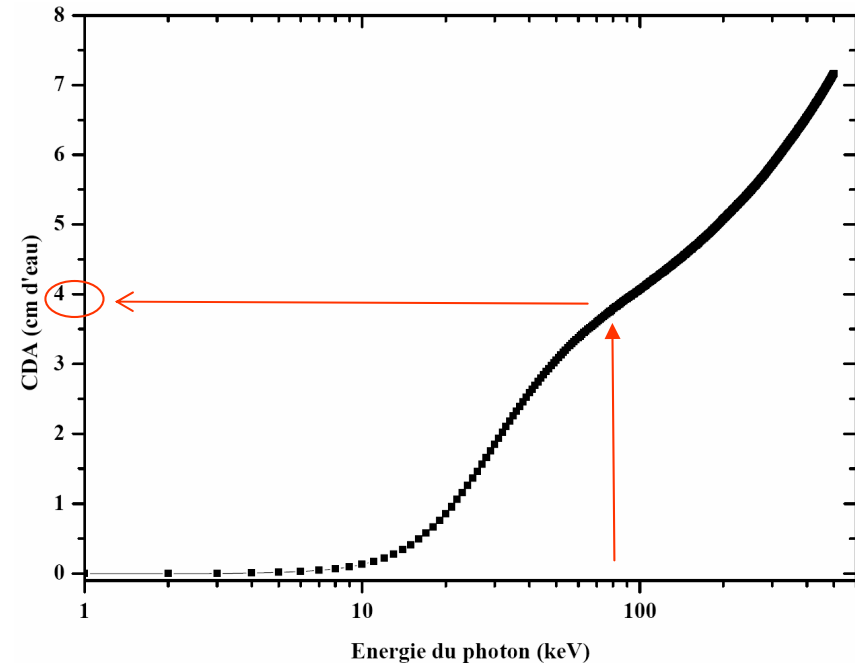
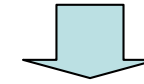


### FLUX PHOTONIQUE sur la ligne Médicale ID17

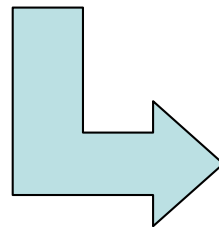
- X-Ray tube - 110KV - 2.5mm Al @ 1 meter/source
- ESRF ID 17 @ 200mA - Wiggler: 1.4T - 1.6m - 150mm



Pourquoi un élément à grand Z  
(le platine)



- Haut flux de X monoénergétiques à 78 keV
- Parcours moyen de ces X dans l'eau convenable



Minimisation des pertes dans les tissus sains  
&  
maximisation de l'effet radiotérapeuthique

Nécessité aussi d'une machine à bas coup

→ Utilisation de l'interaction Compton ( $e^- + \text{laser} \rightarrow e^- + \text{photon}$ )  
Laser pulsé 'amplifié' dans une cavité

Production de rayons X dont on peut choisir l'énergie (=longueur d'onde) à des flux de puissance tolérables par l'organisme  
[Projet qui démarre CELIA(P. Balcou)/KB/LAL/THALES ]

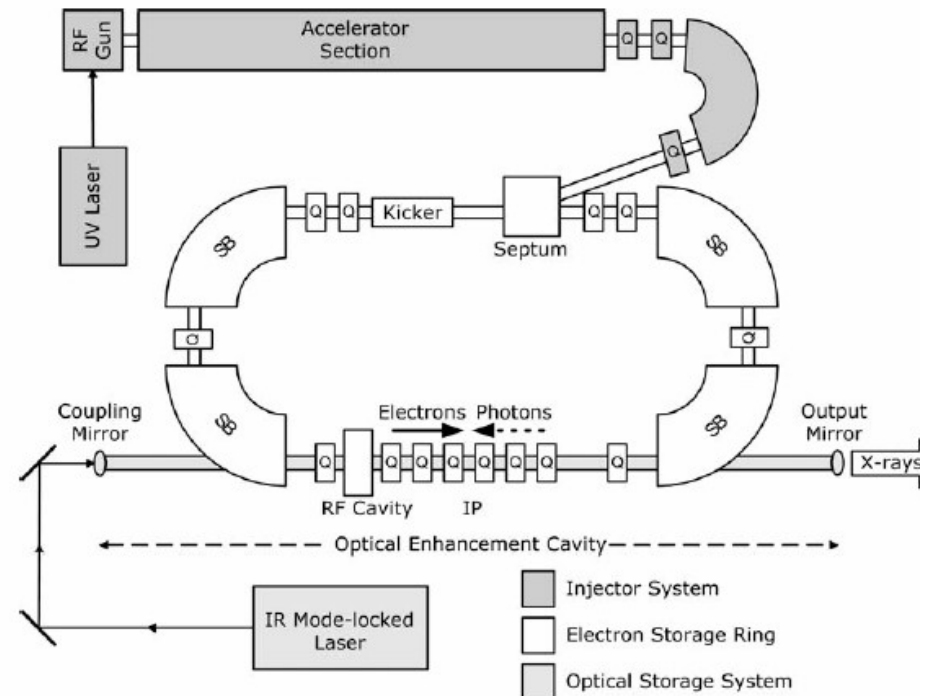
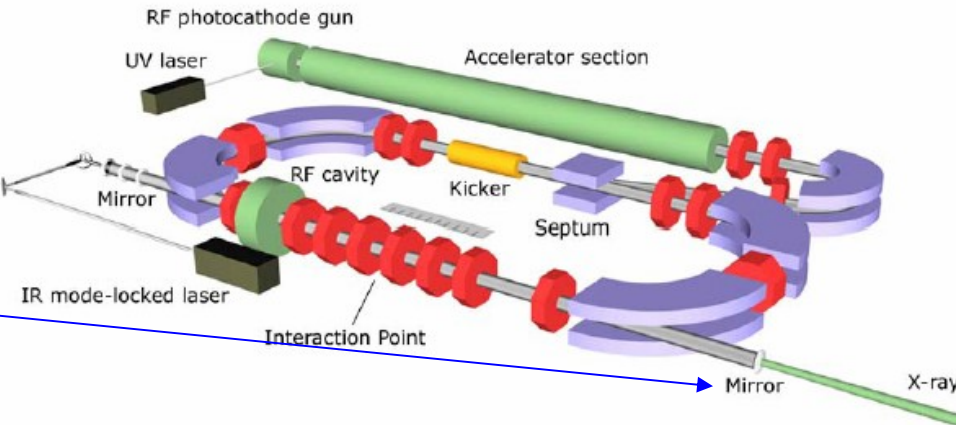


Figure 1.2: Concept drawing of a compact X-ray source. Major components : injector (electron gun and accelerator section), the electron storage ring (show focusing quadrupole and bending dipole magnets), and the integrated optical cavity (between mirrors). Electron-photon scattering at the interaction point produces naturally collimated, narrow bandwidth X-rays.

# ESRF (Grenoble)

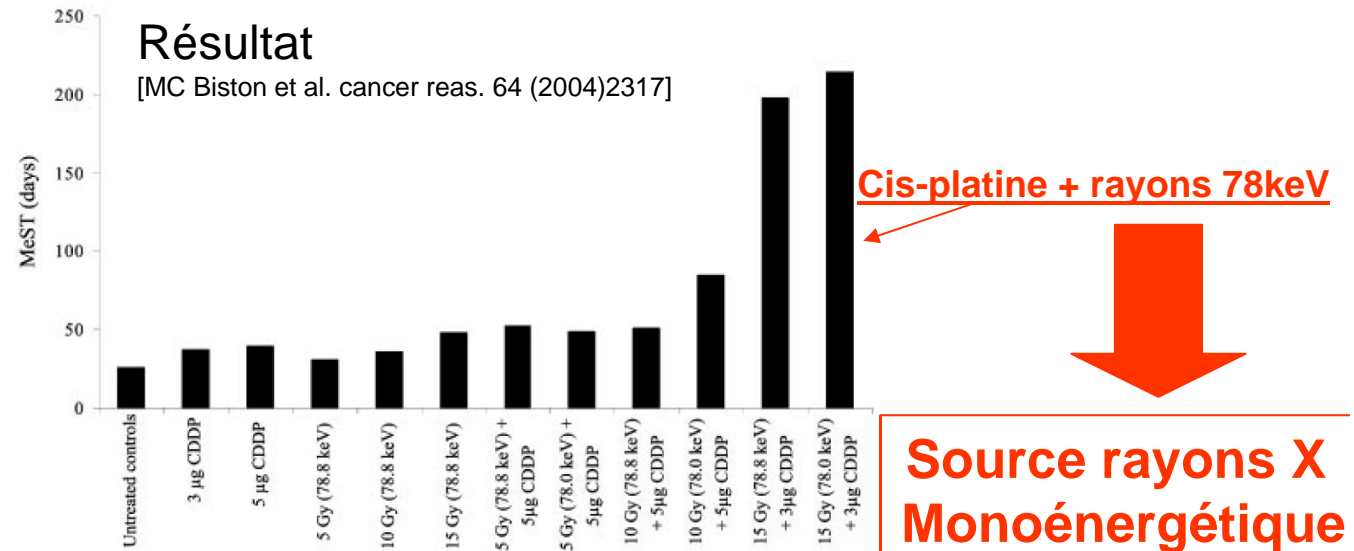
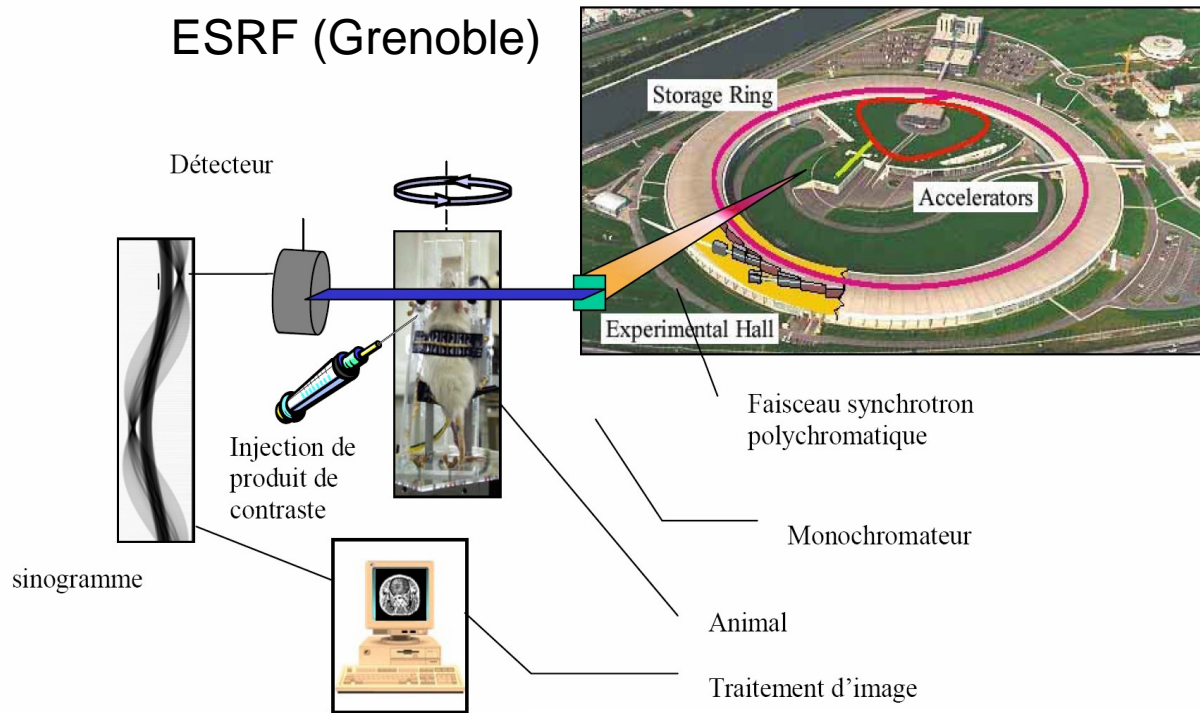


Fig. 4. Median survival time (MeST) expressed in days after tumor inoculation and indicated treatments of rats bearing F98 glioma. Because no significant differences have been observed between MeST from irradiation treatments alone at 78.0 and 78.8 keV, only the MeST from 78.8 keV irradiation is represented. Each group of treated rats contained at least six animals. The untreated control group contained at least 10 rats.

## Production des bunches d'électrons polarisés

$e^-$  = particule de spin 1/2

**Polarisation longitudinale d'un bunch de N électrons :**

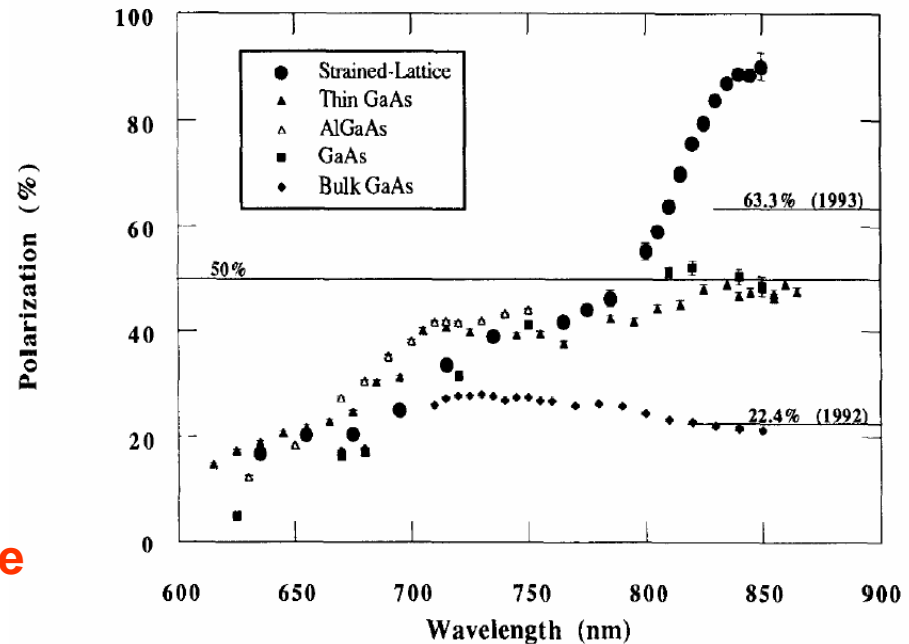
$$P = (N^+ - N^-) / N$$

$N^\pm$  = nb d'électrons dont la projection du spin suivant l'axe de vol est  $\pm 1/2$

- (Si le laser est polarisé circulairement)  
ET pour certaine cathode, les électrons émis sont polarisés longitudinalement  
ex. : le SLD de SLAC  
Cathode = GaAs contraint mécaniquement
- Si non,  $P \sim 0$  !!!

**Pour polariser des  $e^+$  c'est une autre affaire...**

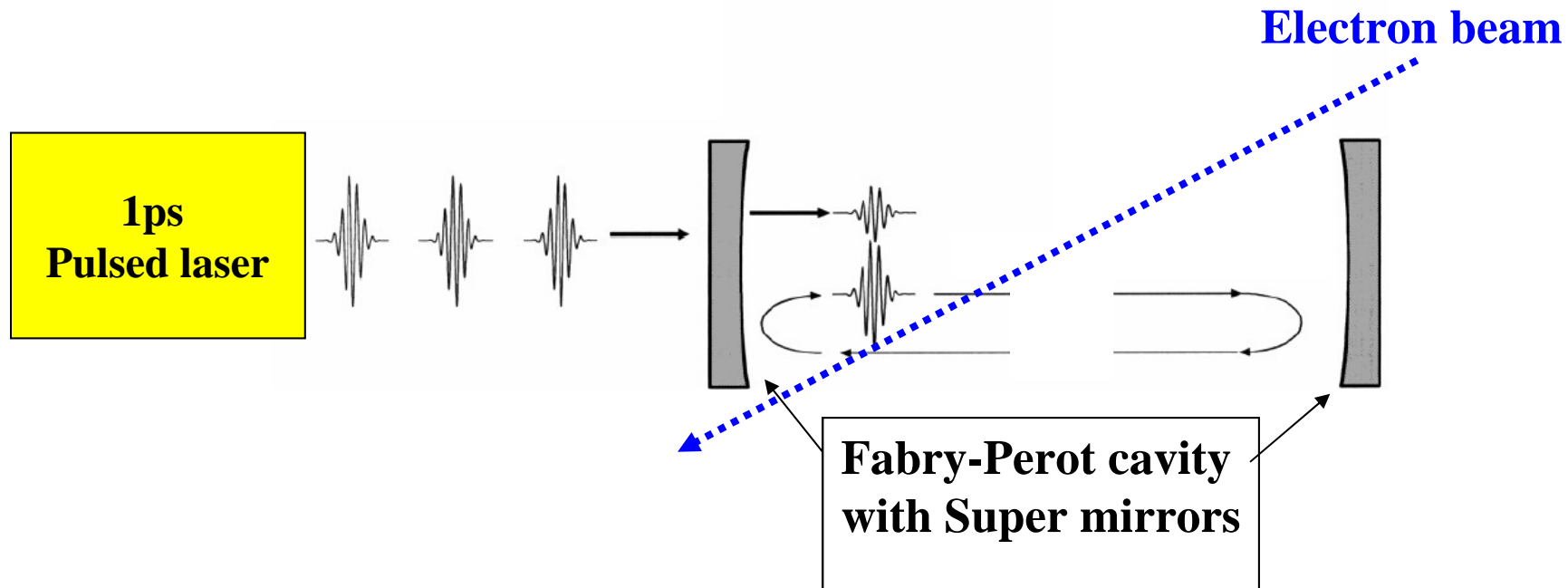
Cathode Polarization vs. Source Laser Wavelength



2: Electron polarizations versus laser wavelength (nm) for different photocathodes.

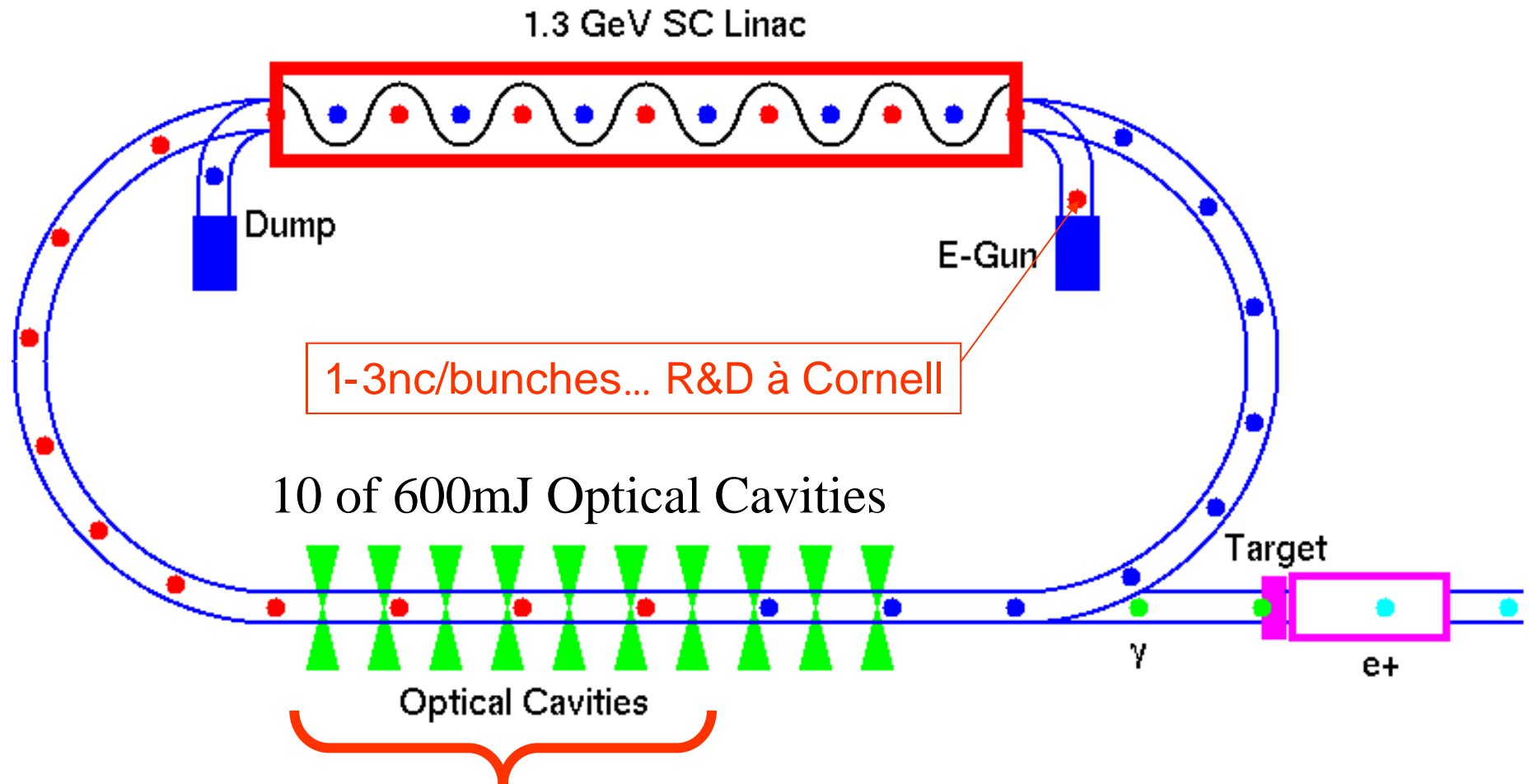
Mais l'énergie requise pour les pulses laser est énorme : 600mJ/pulse à  $f_{\text{rep}}=100\text{-}300\text{ MHz}$  !

Une solution :



- Possible grâce aux lasers à blocage passif de modes  
→ R&D en cours

# Schémas ERL pour la source d'e+ polarisés



0.6J/pulse @ 1ps @ 60MHz  $\rightarrow$   $\langle P \rangle = 36\text{MW}$  !!!  
par cavité  $\rightarrow$  **R&D** ! (KEK, LAL)

Ce document à été crée avec Win2pdf disponible à <http://www.win2pdf.com/fr>  
La version non enregistrée de Win2pdf est uniquement pour évaluation ou à usage non commercial.