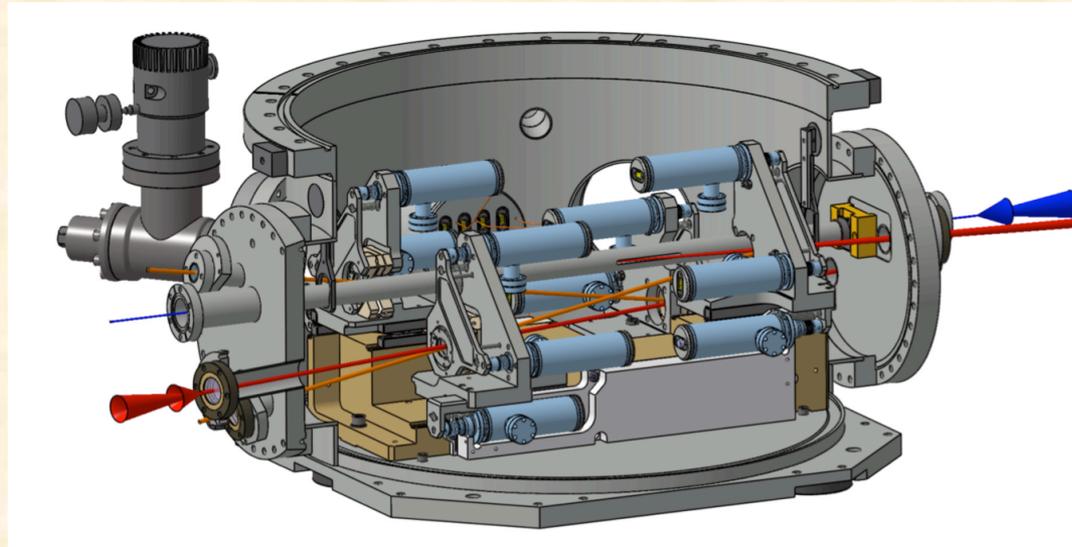


# Introduction aux LASERs

## III. Utilisation



Nicolas Delerue

LAL (CNRS and Université de Paris-Sud)

# Rappel

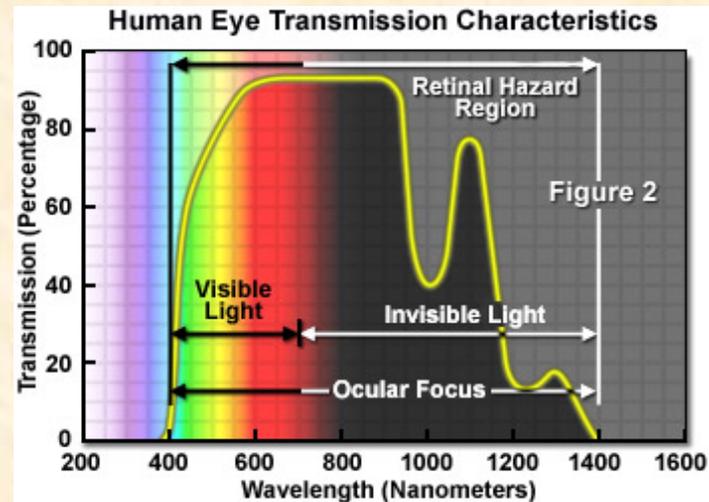
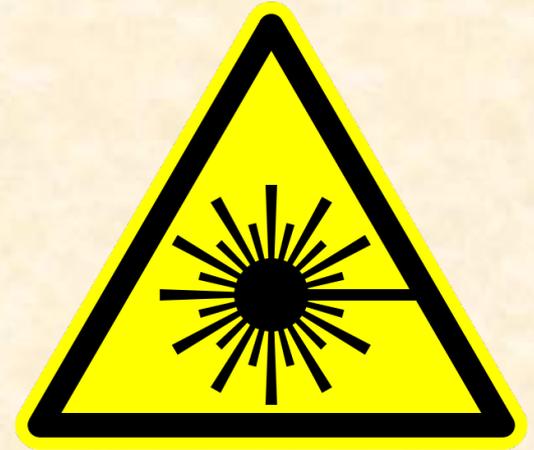
- Dans un milieu amplificateur suffisamment pompé, une émission spontanée peut entraîner la formation d'un faisceau laser par émission stimulée.
- Les paramètres de la cavité (milieu amplificateur, géométrie, puissance de pompe, ...) déterminent la qualité du faisceau laser sortant.
- Il est possible de manipuler les impulsions laser, pour changer leur longueur d'onde ou leur durée.

# Notions de ce cours

- (lasers de puissance)
- (CPA)
- Sécurité avec un faisceau laser
- Propagation d'un faisceau laser
- Interféromètres
- Lasers à fibres
- Cavités Fabry-Pérot
- Laser à électron libre
- Coût de différents lasers
- Applications diverses

# Notions de sécurité avec les lasers

- Les lasers sont des sources de lumières potentiellement très puissantes.
- Dans certains cas les radiations émises par le laser sont à des longueurs d'onde invisibles pour l'œil humain.
- Le faisceau émis par un laser peu causer des dégâts important aux yeux et aux autres parties du corps.
- Leur utilisation est soumis à des restrictions pour la sécurité des utilisateurs et du public.



# Classification des lasers

## Classes 1 et 2

*Les lasers sont répartis en 4 classes et 7 sous classe selon leur dangerosité.*

- Classe 1: Laser sans danger dans des conditions normales d'utilisation. Exemple: lecteurs de CD/DVD, imprimantes, ...  
Puissance: jusqu'à 0.39uW
- Classe 2: Laser visibles pour lesquels la protection de l'œil est assuré par le reflexe palpébral (clignement). Exemple: lecteur de code-barres.  
Puissance: jusqu'à 1mW
- Classe 1M et classe 2M: lasers des classes ci-dessus mais qui peuvent devenir dangereux si une optique (ex: loupe) est utilisée.



# Classification des lasers

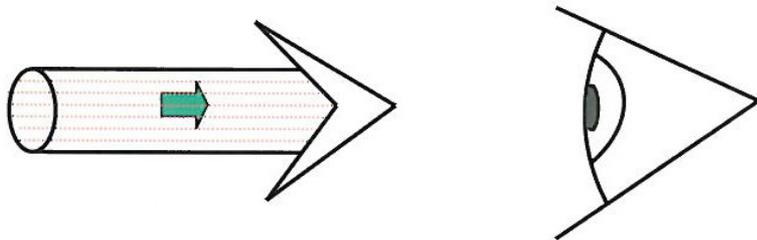
## Classes 3 et 4

- Classe 3A: Laser pour lesquels la vision directe du faisceau est potentiellement dangereuse.  
Puissance: jusqu'à 5mW
- Classe 3B: Laser pour lesquels la vision directe du faisceau est dangereuse.  
Puissance: jusqu'à 500mW
- Classe 4: Laser pouvant aussi causer des dommages sur la peau ou par réflexion diffuse.

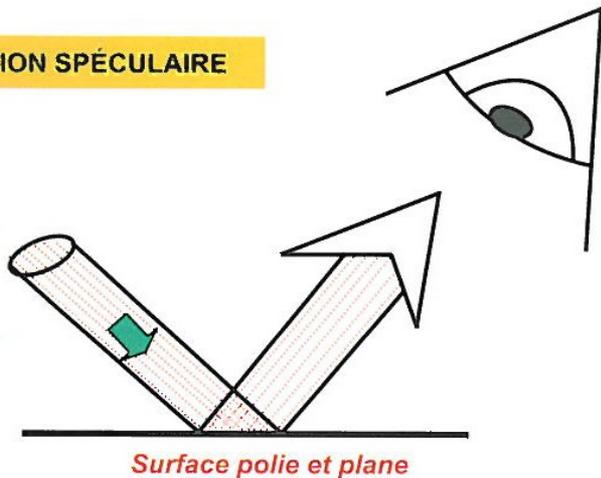


# Certains laser sont dangereux même par réflexion diffuse

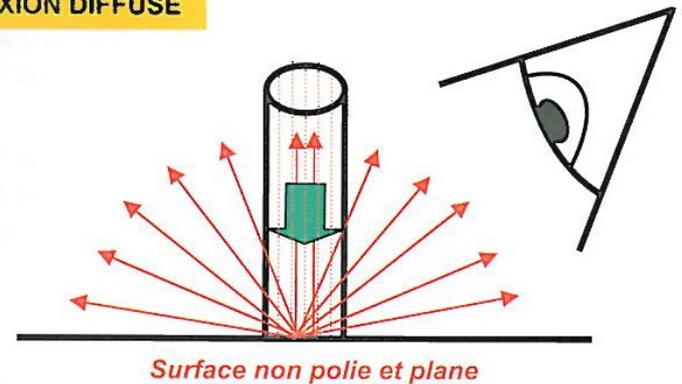
FAISCEAU DIRECT



RÉFLEXION SPÉCULAIRE



RÉFLEXION DIFFUSE



Source: Q. Legrand (LAL)

# Procédures de sécurité associées aux lasers

- Le port de lunettes de protection est obligatoire avec les classes 3B et 4 et est recommandé avec la classe 3A.
- Dans de nombreux cas les lasers doivent être inhibés par un interlock: une sécurité qui peut les éteindre si les conditions de sécurité ne sont plus remplies (ouverture du couvercle ou d'une porte par exemple).
- A l'extérieur d'une salle contenant un laser il y a souvent une signalisation spécifique (laser allumé, type de laser, puissance,...).

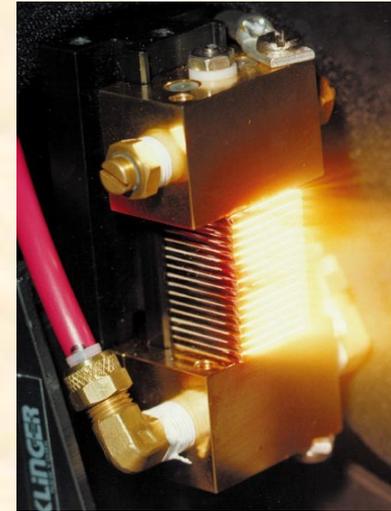


Avec un laser de classe 3B le port des lunettes de protection est obligatoire au CNRS!



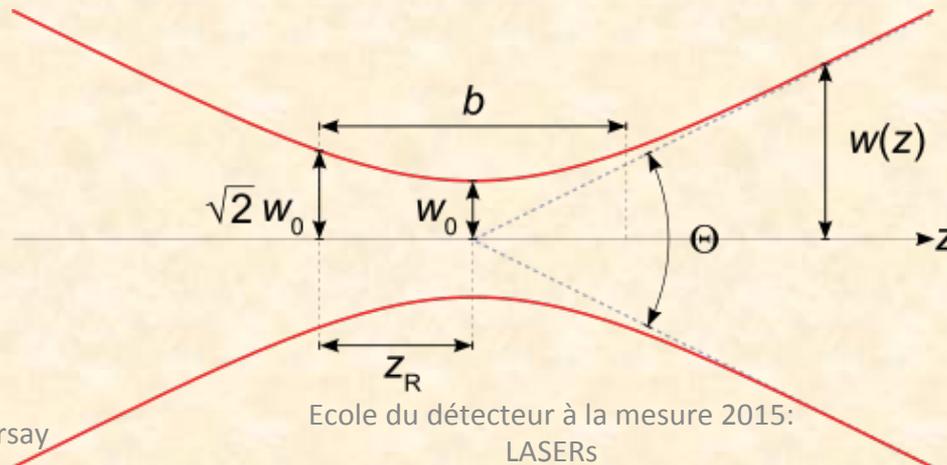
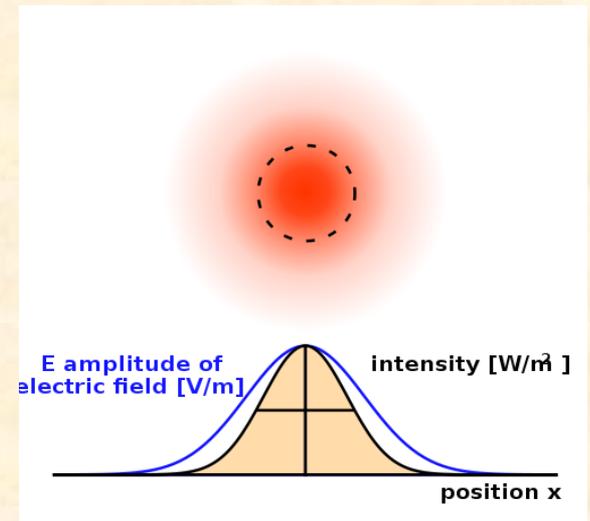
# Efficacité

- L'efficacité des lasers (énergie délivrée/énergie consommée à la prise) varie selon leurs paramètres et en particulier selon leur méthode de pompage.
- Les lasers utilisant des lampes à décharge ont des efficacités de quelques pourcent.
- Les diodes laser ont un rendement de l'ordre de 50-60%
- Avec un pompage par diode l'efficacité d'un laser peut atteindre 40% dans l'IR, ~20% dans le vert, 5-10% dans l'UV.
- Pour comparaison: une ampoule à incandescence a une efficacité de ~3%.
- Une lampe fluorescente (tube néon) a une efficacité de l'ordre de 20%  
Une lampe fluorescente compacte a une efficacité de l'ordre de 10%



# Propagation d'un faisceau laser

- Un faisceau laser idéal (mode TEM 00) est gaussien.
- Au premier ordre les règles de l'optique géométrique s'appliquent.
- Cependant il n'est pas possible de former un point focal infiniment petit (cf cours accélérateurs).
- Près d'un point focal un faisceau laser va décrire une trajectoire hyperbolique.



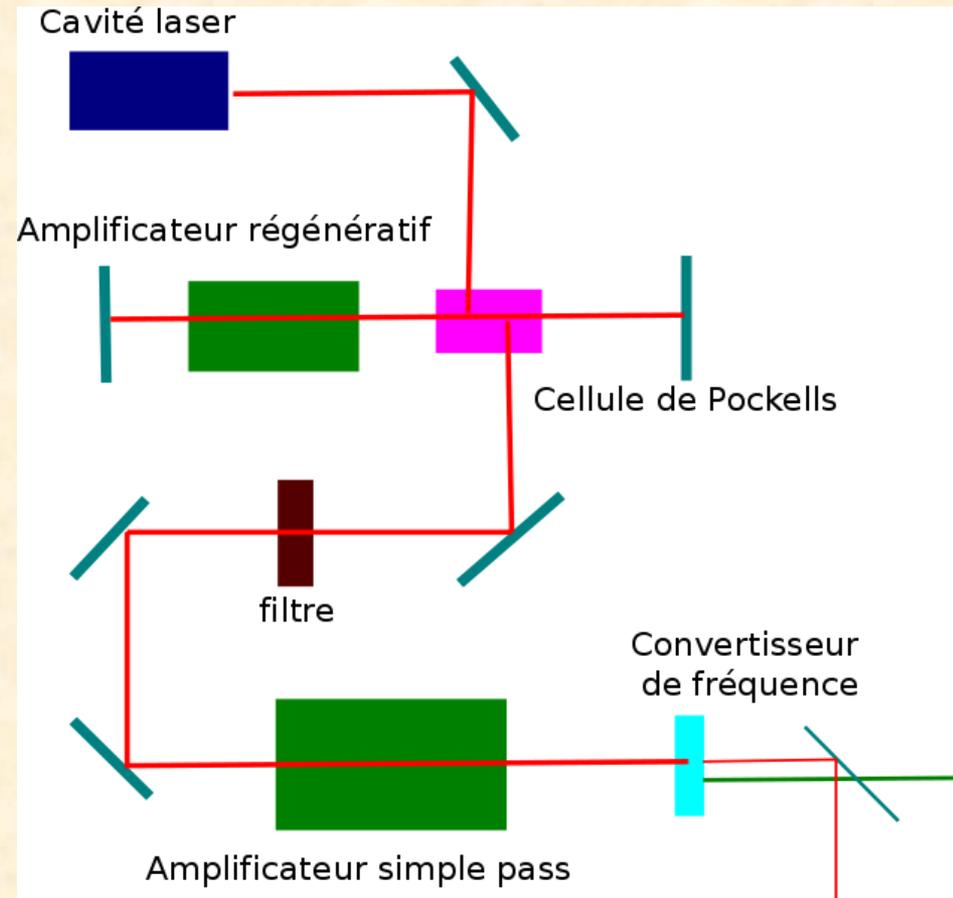
# Propagation d'un faisceau laser (2)

- Un rayon lumineux se propageant n'est visible que là où il est diffusé!  
=> Il n'est pas visible dans l'air (sauf fumée)  
=> Il n'est pas visible sur les miroirs!
- Note: certains miroirs « diélectriques » ont des revêtements qui sont réfléchissant seulement à certaines longueurs d'onde (et transmettent à d'autres).



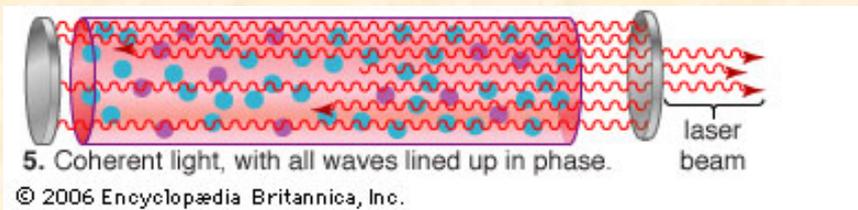
# Alignement

- L'alignement d'un laser est très important.
- Le faisceau d'un laser se propage en ligne droite  
=> une erreur de 1mrad sur un miroir se transforme en 1mm après un 1m.  
=> une erreur de quelques mm en entrée dans le milieu amplificateur résulte dans une puissance beaucoup plus faible.
- Un monture de miroir « bouge » régulièrement (cycle thermiques, vibrations acoustiques,...)
- Il faut régulièrement ré-aligner les gros systèmes laser pour conserver des performances raisonnables.



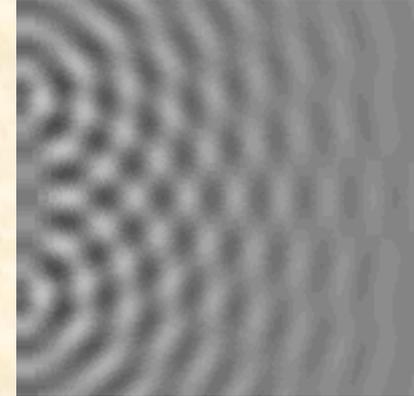
# Cohérence

- Dans un système idéal toutes les ondes de lumière (ondes électromagnétiques) émises par une source sont liées en phase.
- Dans la réalité ce n'est pas toujours le cas...
- Si une source émet deux ondes électromagnétiques séparées spatialement mais avec une relation entre leur phases il y a cohérence spatiale.
- Si les deux ondes sont émises à des instants différents il y a cohérence temporelle.
- Une ampoule incandescente a une très mauvaise cohérence spatiale et temporelle.
- Les lasers, de par la nature de l'émission, ont une excellente cohérence spatiale et temporelle.



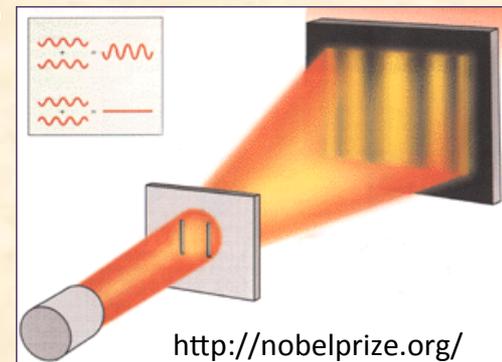
$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi)}$$

lecteur à la mesure 2015:  
LASERS



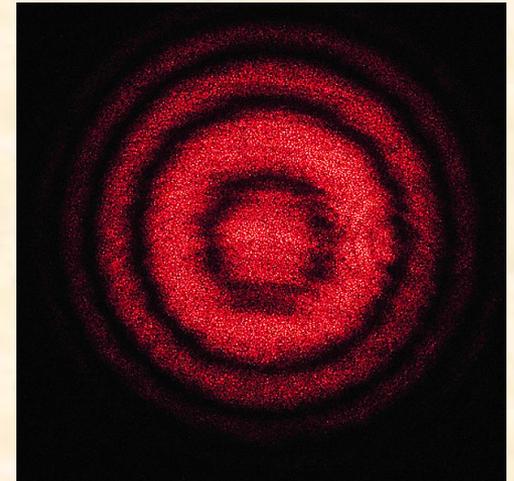
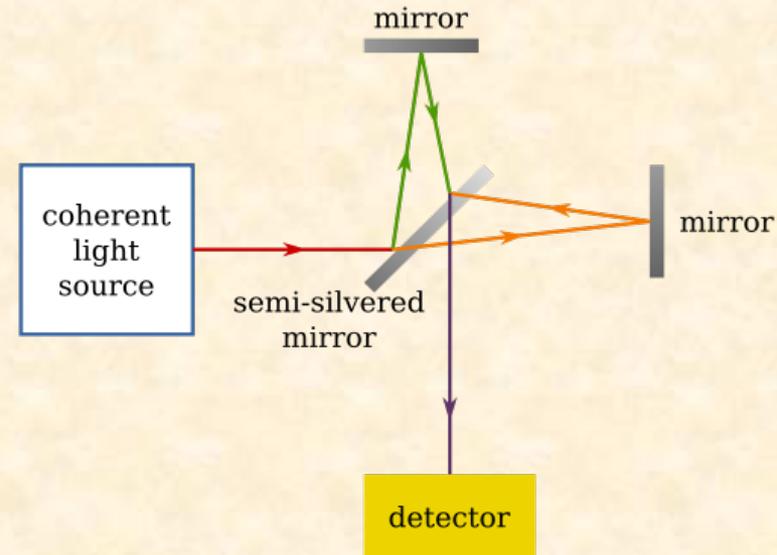
# Interférences

- Deux vagues qui se superposent peuvent s'ajouter pour en former une plus grande ou au contraire « s'annuler ».
- Cela s'appelle des interférences. Elles peuvent être constructives (quand les vagues s'ajoutent) ou destructives (quand les vagues s'annulent).
- Les ondes électromagnétiques se comportent comme des vagues en 3 dimensions. Quand elles sont cohérentes elles peuvent donc interférer constructivement ou destructivement.



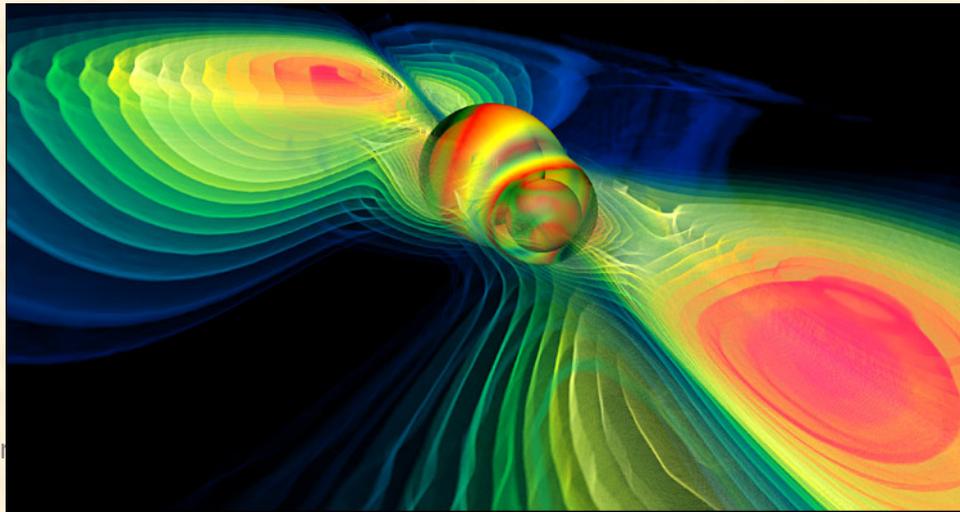
# L'interféromètre de Michelson

- Dans un interféromètre de Michelson un faisceau lumineux (cohérent) est séparé en deux bras.
- Les deux bras sont ensuite recombinaisonnés => interférences.
- Ces interférences changent si la longueur de l'un des deux bras change.
- Ce montage fut utilisé pour la première fois à la fin du XIXème siècle et il montra que la vitesse de la lumière était la même dans toutes les directions (Michelson-Morley) contrairement aux prédictions de l'époque.



# Application: VIRGO

- Lorsque deux étoiles massives (par exemple des étoiles à neutrons) sont très proches l'une de l'autre elles émettent des « ondes gravitationnelles », c'est à dire qu'elles tordent l'espace-temps autour d'elles.
- Des cataclysmes gravitationnels (supernovae, collision d'un système binaire massif,...) peuvent aussi émettre des ondes gravitationnelles.
- Ces ondes seraient trop faibles pour que nous les ressentions directement sur terre mais elles entraîneraient sur leur passage une légère oscillation de la taille des objets.



# Application: VIRGO

## Un interféromètre géant

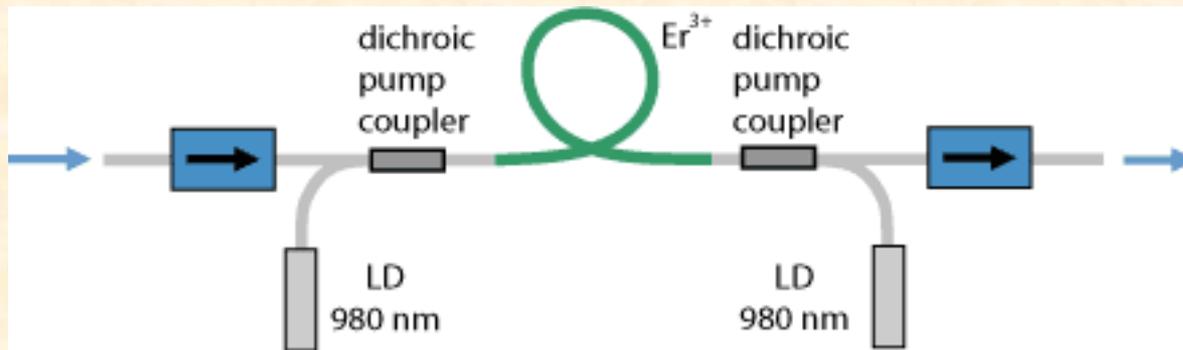
- L'interféromètre de Michelson est l'outil le mieux adapté pour observer des variations des longueurs.
- En construisant un interféromètre géant il est possible d'être sensibles à des variations de longueurs très faibles, comme celles attendues dans le cas d'ondes gravitationnelles.
- VIRGO est un interféromètre dont les bras ont 3km de long! (LIGO: deux cousins de même taille!).
- Cependant pour une meilleure sensibilité il faudrait au moins 100 fois plus long (mais repliés)!



# Les lasers à fibre

## 1. Télécoms

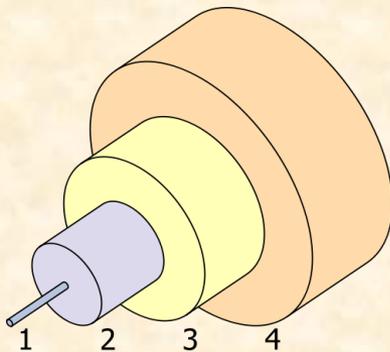
- Les fibres optiques faite de silice sont le meilleur moyen de transmettre des données sur des longues distances.
- Les fibres télécom les plus populaires opèrent autour de 1550nm là où les pertes dans la silice sont les plus faible.
- Malgré les pertes très faibles, le signal doit être amplifié après une certaine distance.
- Il est possible de doper des fibres optiques avec de l'erbium. Elles peuvent alors être utilisées comme amplificateur.



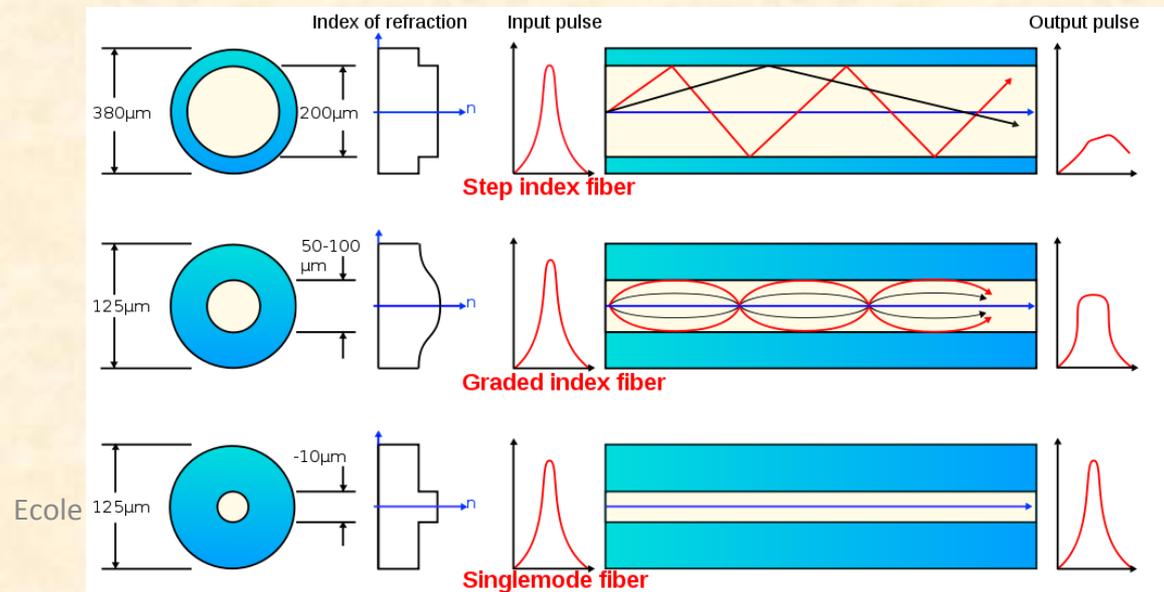
# Lasers à fibre

## Principe d'une fibre optique

- Dans une fibre optique le cœur guide la propagation du signal optique. La gaine est faite d'un matériel différent de manière à ce que les rayons lumineux arrivant à incidence rasante sur l'interface fibre-gaine soient réfléchis et restent dans le cœur.
- Si le cœur est très petit seul le mode principal peut se propager.



Nicolas Delerue, LAL Orsay

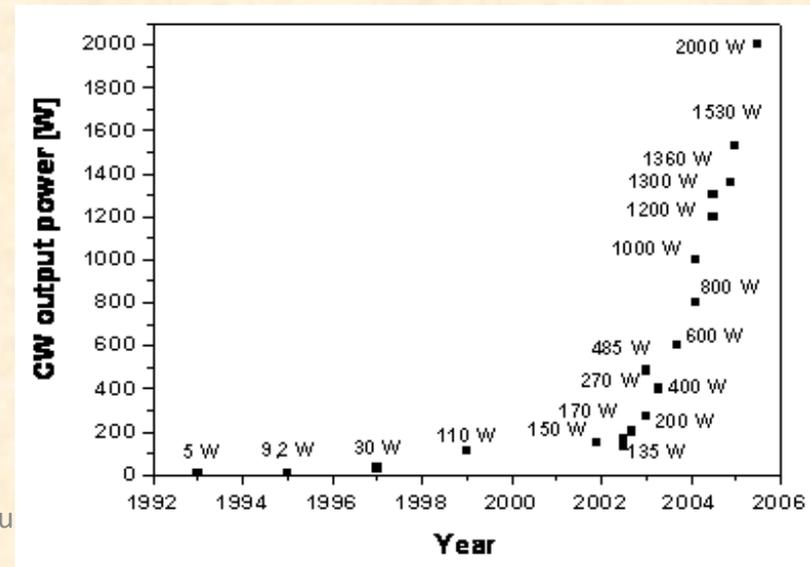
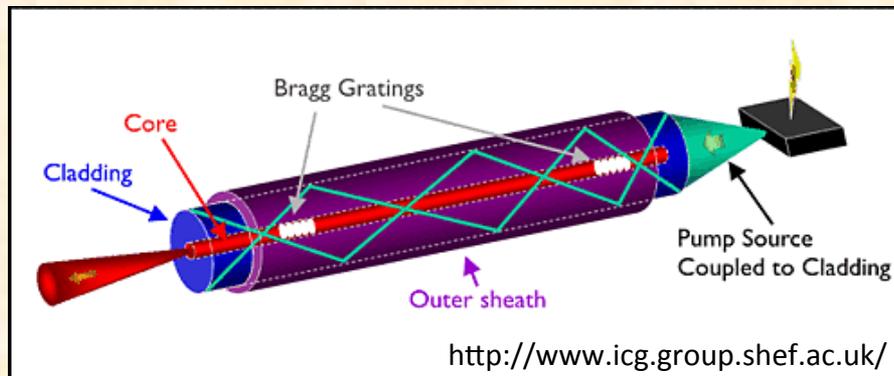


Ecole

# Les lasers à fibre

## 2. Hors télécoms

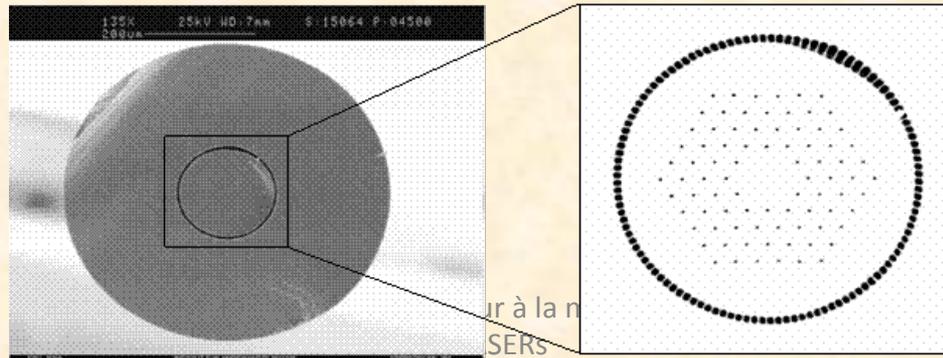
- Les fibres optiques dopées ont aussi des propriétés très intéressantes hors des applications télécoms:
  - une fibre possède une grande surface d'échange => meilleures propriétés thermiques
  - le nombre de mode pouvant se propager dans une fibre est plus réduit => meilleure qualité de faisceau.
- Pour atteindre des puissances importantes l'erbium n'est pas le meilleur choix: trop fragile.
- L'ytterbium possède des propriétés thermiques meilleures (longueur d'onde  $\sim 1030\text{nm}$ ).



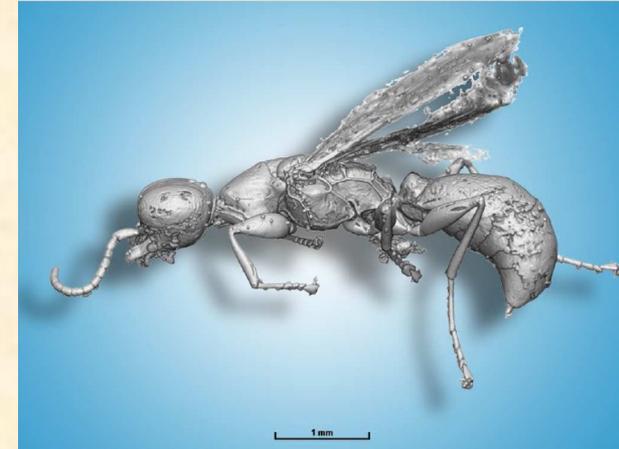
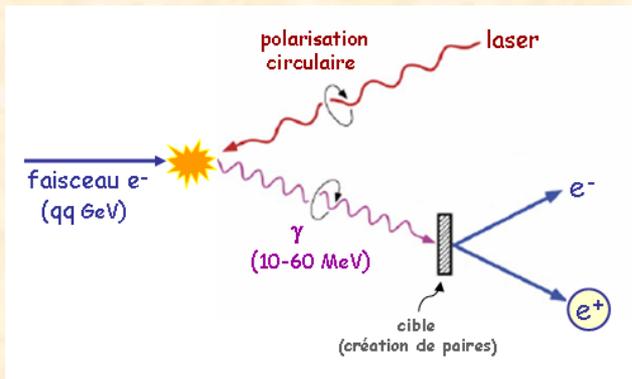
# Les lasers à fibre:

## Fibre photonique

- Il est possible de fabriquer des fibres ayant une géométrie spéciale pour permettre une meilleure amplification, une meilleure qualité de faisceaux, une meilleure qualité de pointage et de meilleures propriétés thermiques.
- Certaines de ces fibres dites « photonique » permettent par exemple de s'assurer que la pompe entre progressivement dans le cœur, améliorant ainsi l'homogénéité de l'amplification.
- Ces fibres sont souvent utilisées simplement comme milieu amplificateur mais elles peuvent aussi être fusionnées avec d'autres éléments (pompe,...).

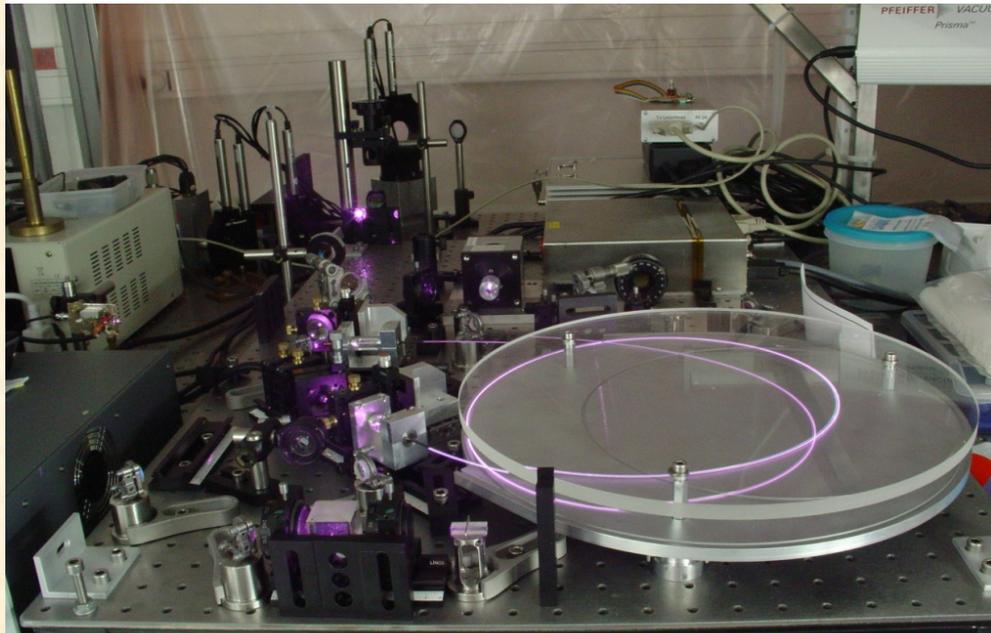
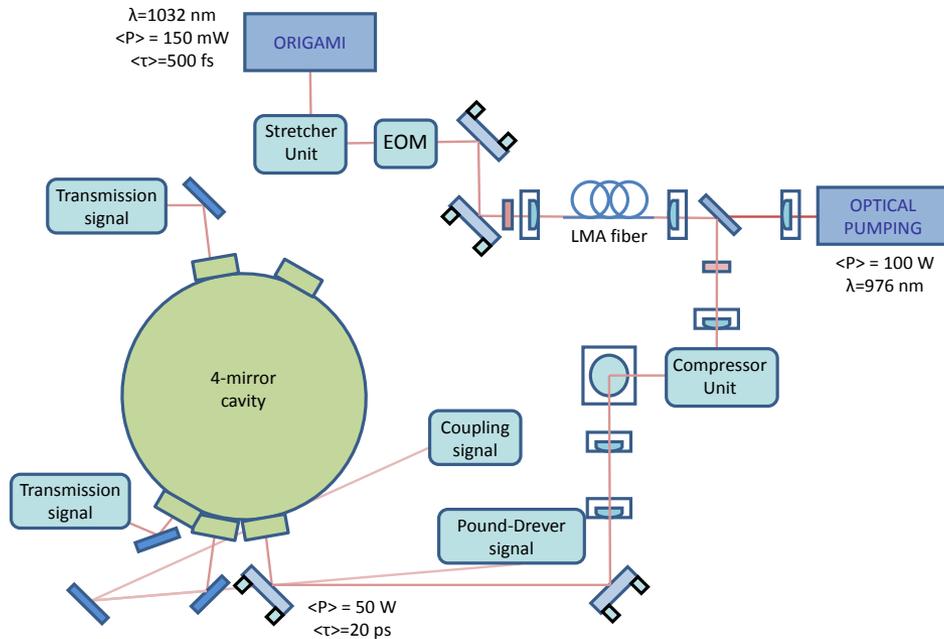


# Application: MightyLaser



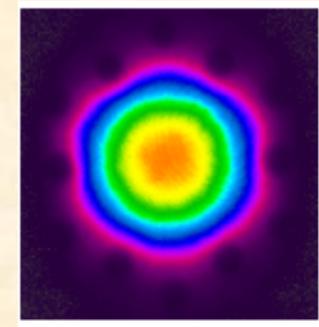
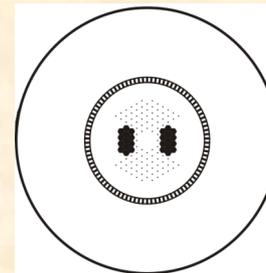
- La production d'un flux intense de rayons X (ou de rayons gamma) de haute énergie a de nombreuses applications: cela permet par exemple d'étudier des tableaux anciens, des fossiles pris dans de l'ambre ou de produire des positrons polarisés pour la prochaine génération d'accélérateurs de particules.
- Cela peut être fait de manière compacte en utilisant les interactions entre un laser et un paquet d'électrons.
- MightyLaser est un projet installé sur l'accélérateur ATF au KEK au Japon pour démontrer que des flux intenses de rayons X peuvent être produit par cette technique.

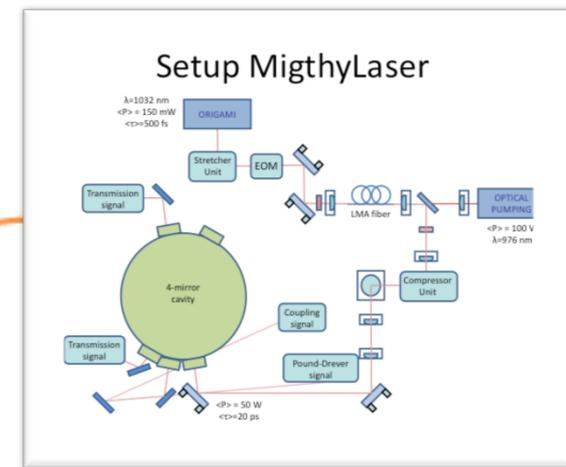
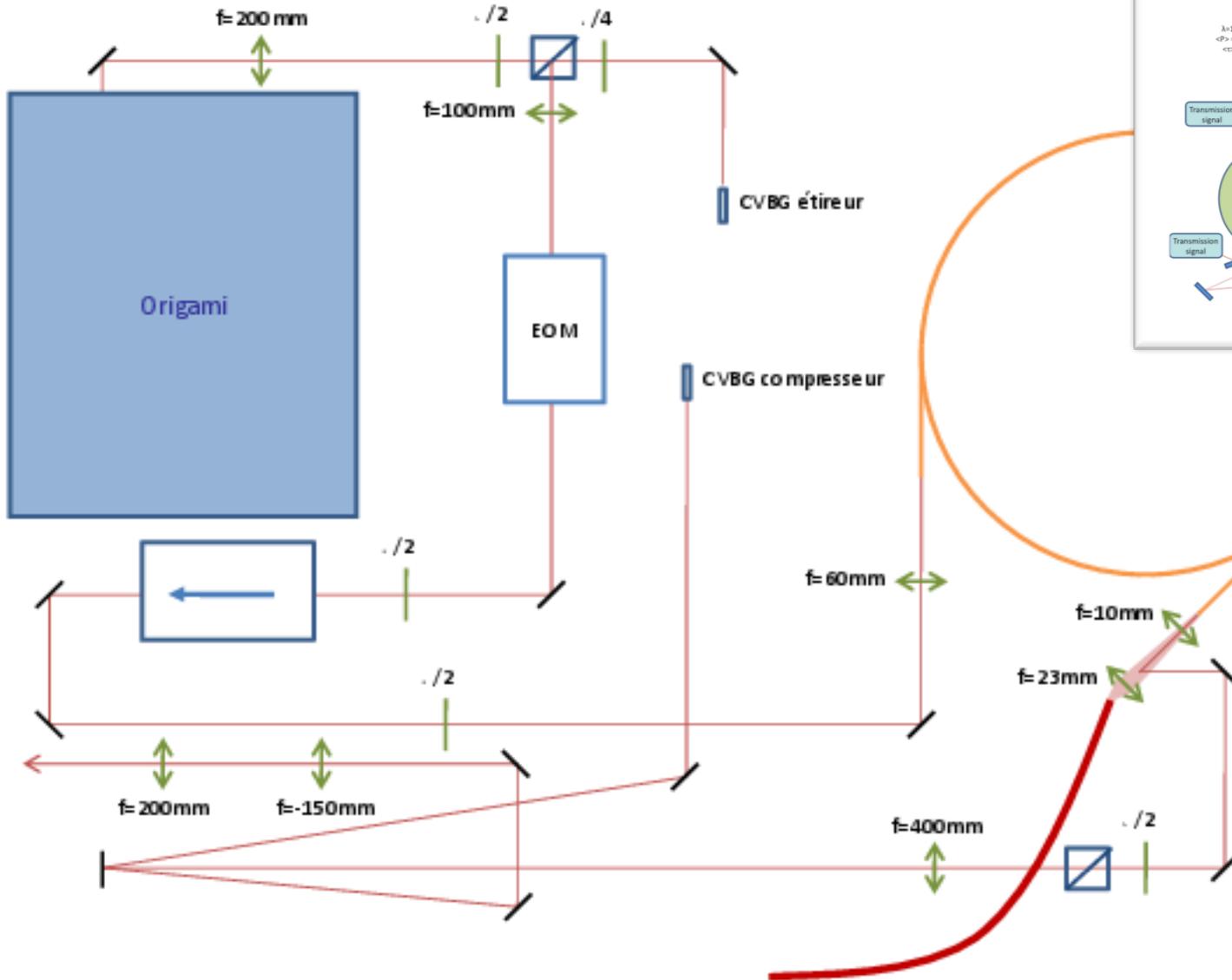
# Setup MightyLaser



## Exemple de laser à fibre: MightyLaser

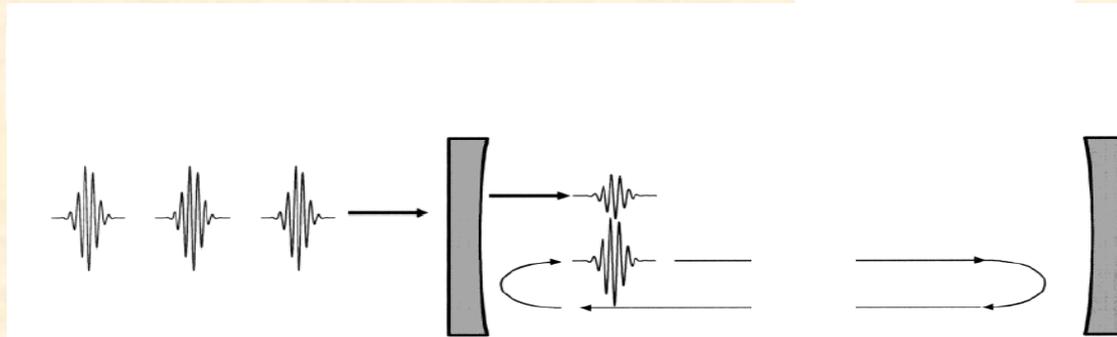
- Dans MightyLaser la qualité du faisceau laser est très importante, d'où le choix d'un amplificateur à fibre.
- La puissance requise nécessite l'amplification d'une impulsion étirée.
- Cf schéma optique détaillé.





- Les impulsions laser sont ensuite empilées dans une cavité Fabry-Pérot...

# Cavités Fabry-Pérot



- Il est possible de « capturer » une impulsion lumineuse entre deux miroirs de haute qualité (haute finesse) => Cavité Fabry-Pérot
- Une fois cette impulsion capturée, il est possible d'en ajouter d'autres...
- Cependant il faut faire attention: les impulsions interagissent entre-elles. Si elles n'ont pas la bonne phase elle vont interagir destructivement.  
=> La longueur (aller-retour) de la cavité doit être un nombre entier de longueurs d'ondes.
- Dans certains cas, cela requiert un système de retro-action très avancé pour compenser les fluctuations (acoustiques, thermiques...) de la longueur de la cavité.

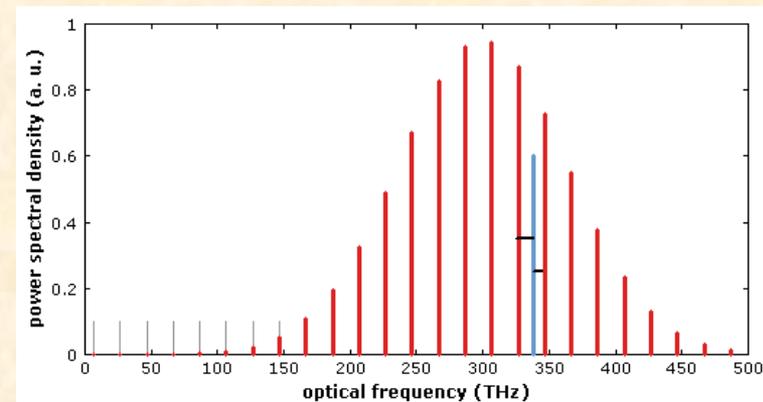
# Peignes de fréquence

- Il n'est pas possible que la cavité soit exactement à la bonne longueur pour toutes les longueurs d'onde de la largeur spectrale de la cavité  
=> dans une cavité Fabry-Pérot certaines longueurs d'ondes sont accumulées et d'autres sont rejetées...  
=> peigne de fréquence!

$$\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$$

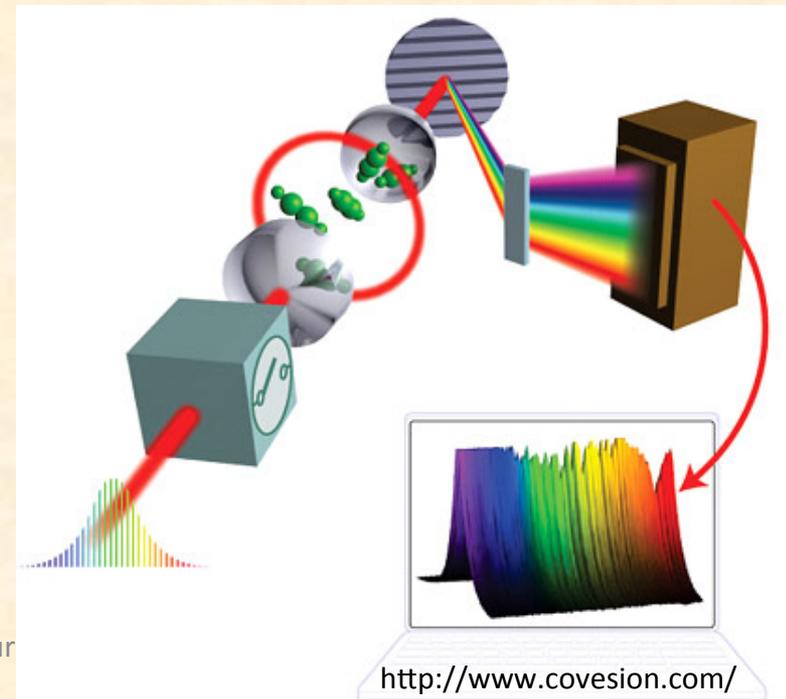
$$L = k\lambda_1 = (k + 1)\lambda_3$$

$$\nexists k_2 \in N/L = k_2\lambda_2$$



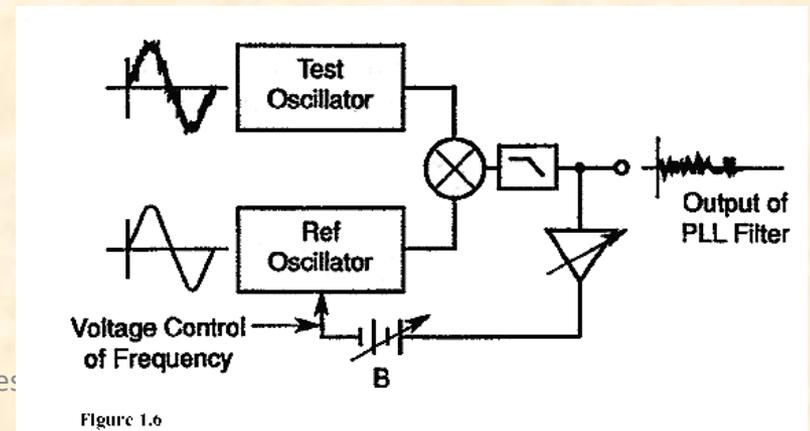
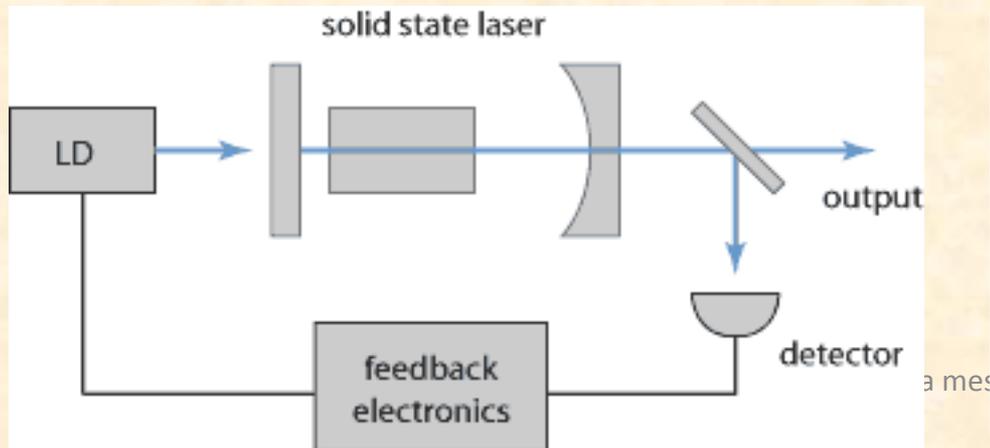
# Peignes de fréquence (2)

- Les peignes de fréquences ont de très nombreuses applications: leurs inventeurs ont été récompensés par le prix Nobel 2005.
- Les peignes de fréquence ont de nombreuses applications: mesure de fréquences optiques de manière très précise, stabilisation d'horloges atomiques, mesures de distances, spectroscopie...

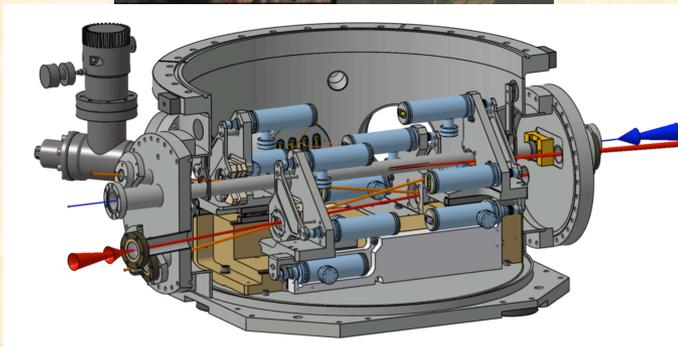
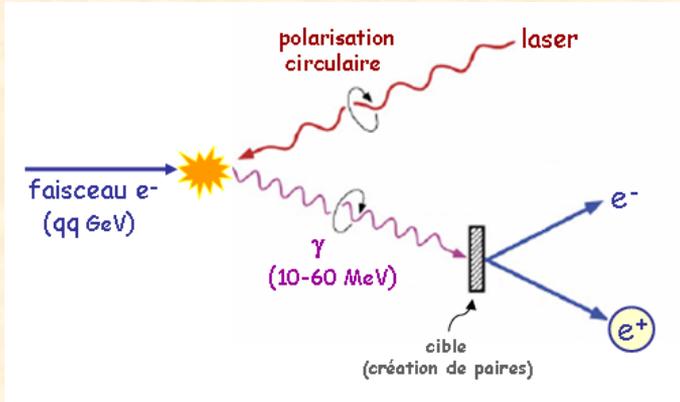


# Synchronisation

- Quand un laser est utilisé dans un accélérateur il faut assurer la synchronisation du laser avec l'accélérateur (pour que les impulsions arrivent en même temps).
- Cela peut se faire en ajustant la taille de la cavité avec une boucle à phase asservie (Phase locked loop, PLL).

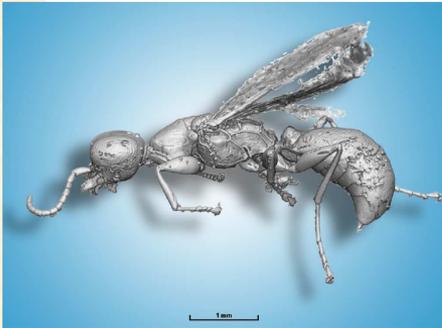
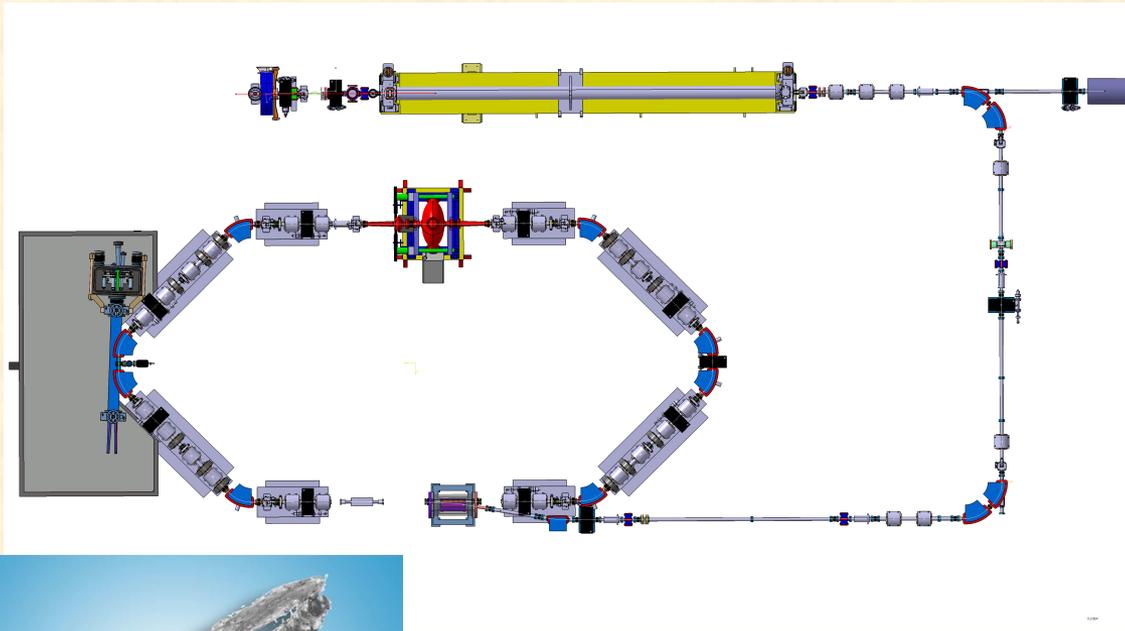


# Application: MightyLaser



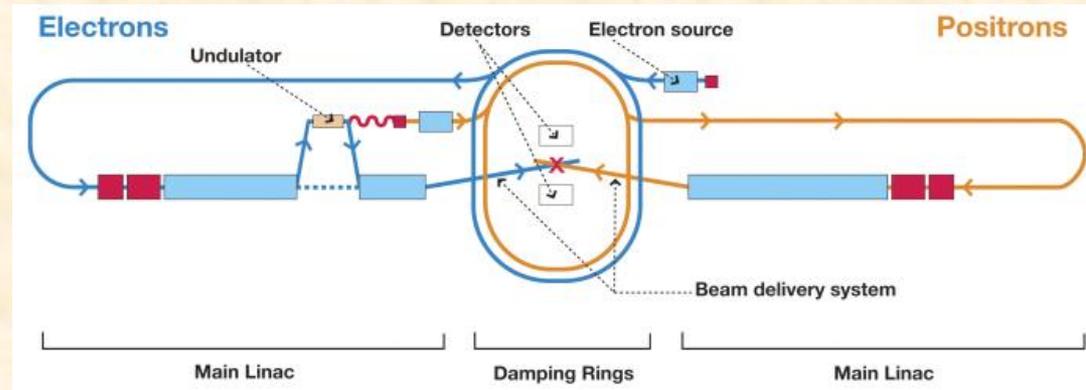
- La section efficace des interactions Compton est très faible.
- Pour obtenir un bon rendement il est possible de « recycler » le faisceau laser dans une cavité Fabry-Pérot.
- Le projet MightyLaser étudie comment accumuler des puissances laser importantes dans une cavité Fabry-Pérot installée sur un accélérateur d'électrons (ATF) au Japon.

# Application: ThomX

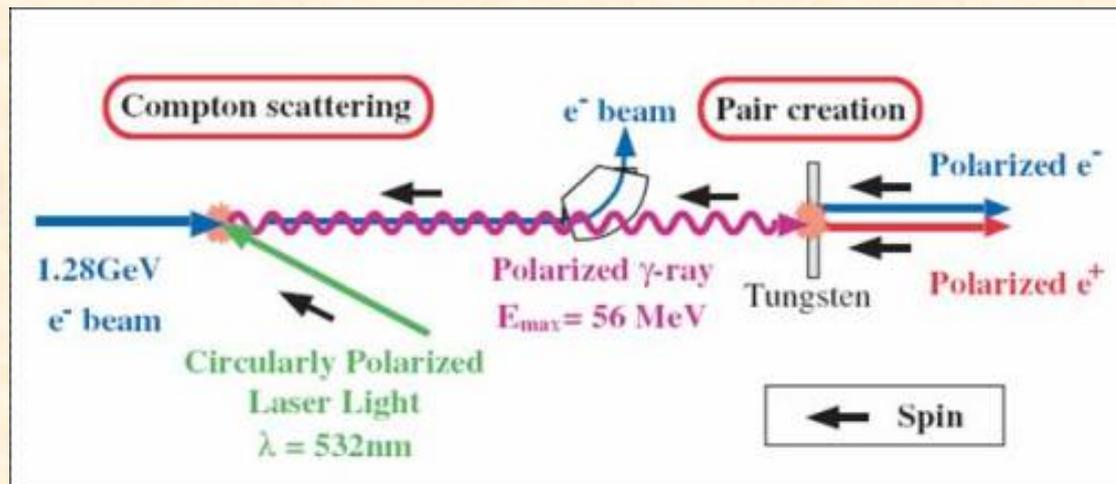


- L'accélérateur ThomX en phase de développement à Orsay va utiliser une cavité Fabry-Pérot pour produire des flux intenses de rayons X avec des applications dans de nombreux domaines.

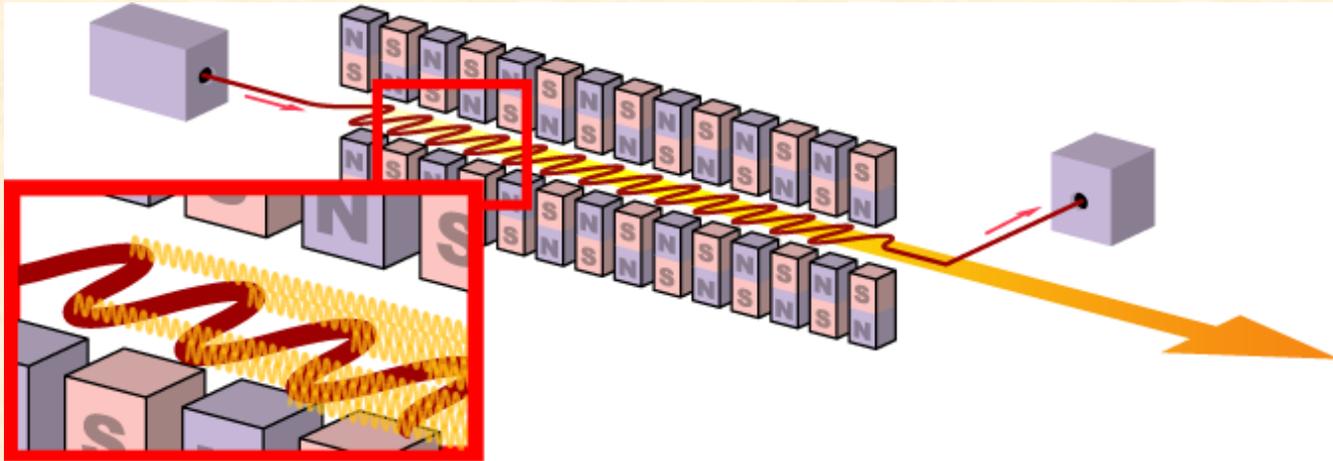
# Source de positrons pour l'ILC



- Le prochain collisionneur  $e^+/e^-$  aura besoin d'une source intense de positrons.
- L'une des solutions possible pour produire ce flux est de produire des photons de haute énergie par interaction Compton.
- Il y a aussi des projets de collisionneur photon-photon avec des photons de centaines de GeV. Ces photons seraient probablement produit par interaction Compton.

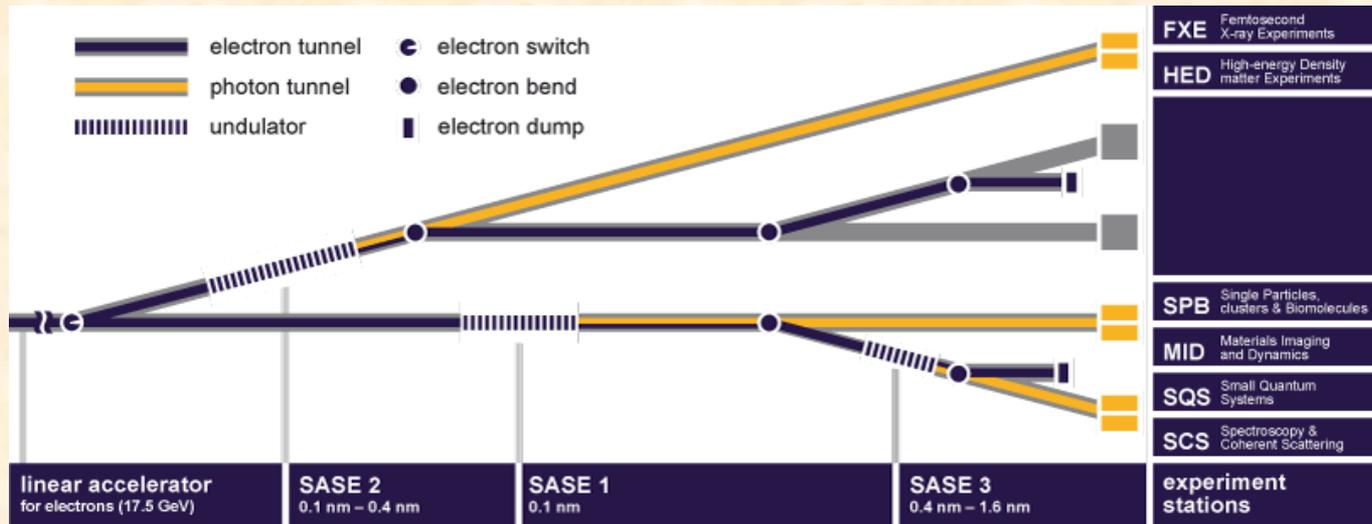


# Un type de laser particulier: Le laser à électrons libres



- Un électron (ou toute particule chargée) peut émettre du rayonnement synchrotron.
- En créant des conditions favorables il est possible de préparer les électrons à émettre de la lumière (c'est à dire en quelque sorte crée une inversion de population).
- Puis il est possible d'entraîner une émission stimulée  
=> C'est le principe du laser à électrons libres.
- Tout comme pour un laser classique un FEL peut fonctionner soit en régime exponentiel soit en régime saturé.

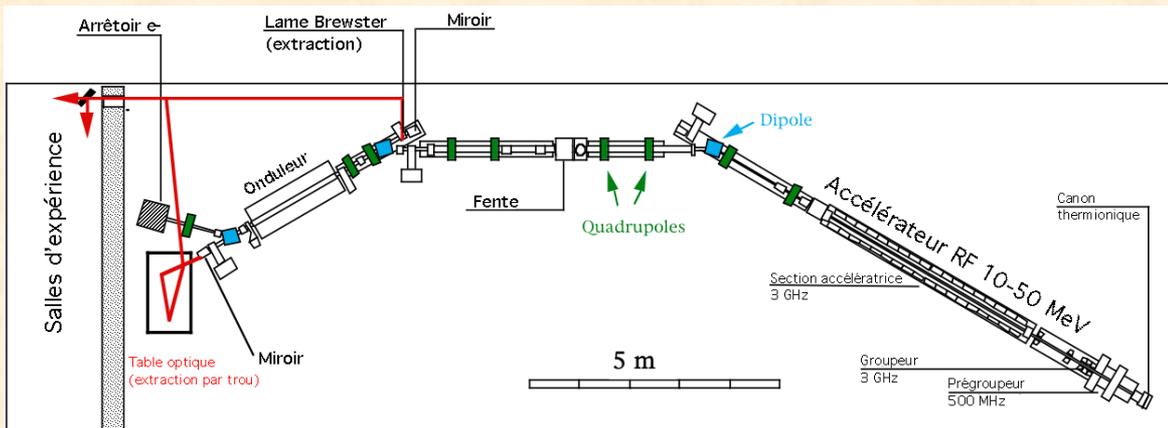
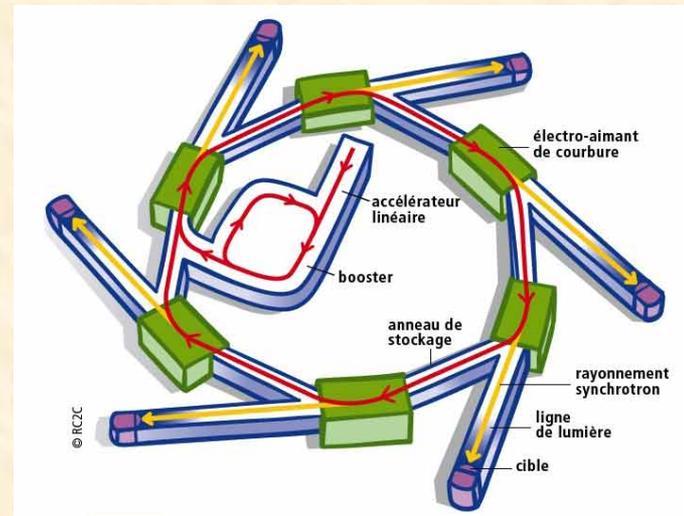
# Application: X-FEL



- Le FEL Européen X-Fel va produire des impulsions très courtes et très intenses de rayons X avec des applications dans de nombreux domaines de recherche.

# FEL et synchrotrons

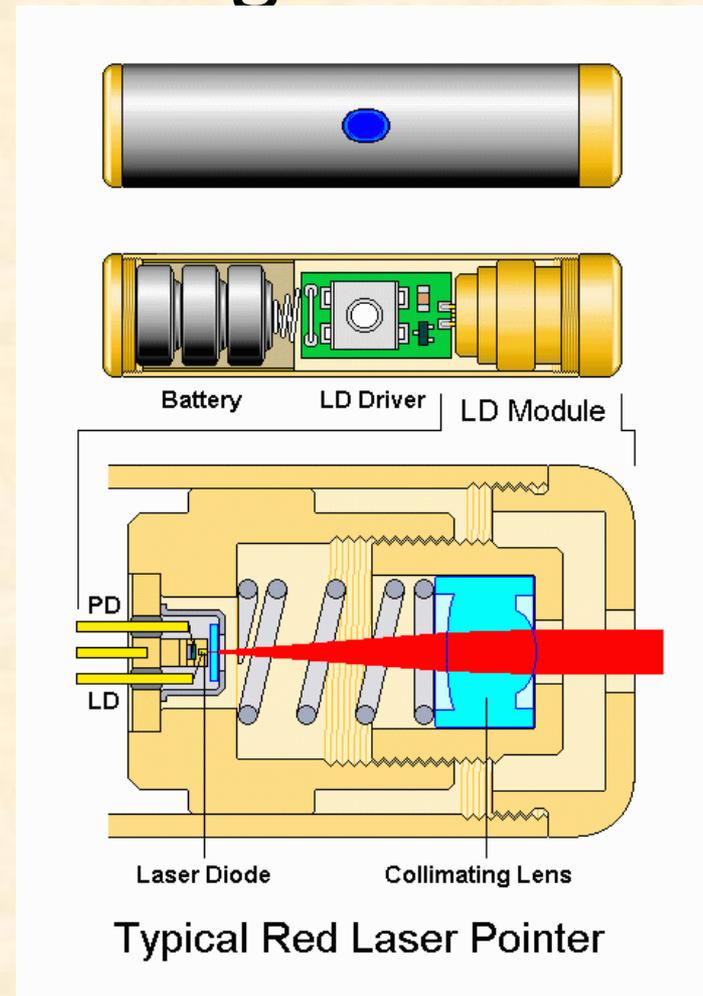
- En France il y a deux synchrotrons utilisés comme source de lumière: SOLEIL et l'ESRF et un laser à Electron libre IR (CLIO).
- A la différence des lasers à électrons libre, les synchrotron n'utilisent pas (normalement) l'émission stimulée => flux beaucoup moins intense.
- Les synchrotrons produisent aussi des impulsions plus longues => beaucoup moins de puissance crête.



# Combien coûte un laser?

## Pointeur laser rouge

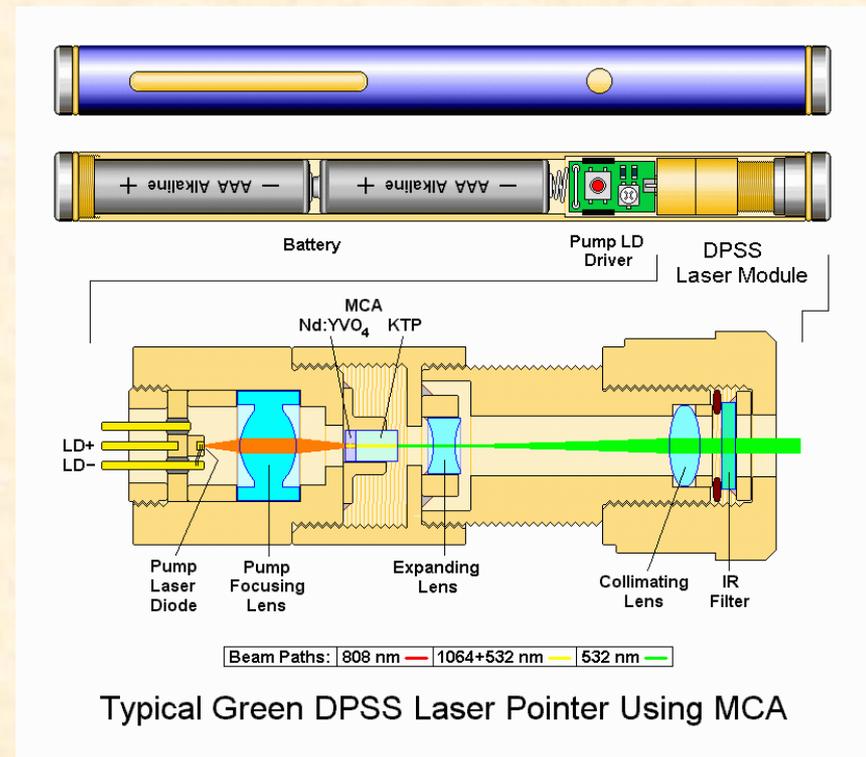
- Difficile de donner des prix exacts (confidentiels) mais je vais donner des ordres de grandeur.
- Un pointeur laser rouge coûte à peu près le même prix qu'un ticket de lotterie.



# Combien coûte un laser?

## Pointeur laser vert

- Un pointeur laser vert coûte le même prix qu'un repas dans un restaurant...



# Combien coûte un laser?

## Laser de discothèque

- Un laser d'ambiance coûte à peu près le même prix qu'un netbook.



# Combien coûte un laser?

## Oscillateur ps/fs

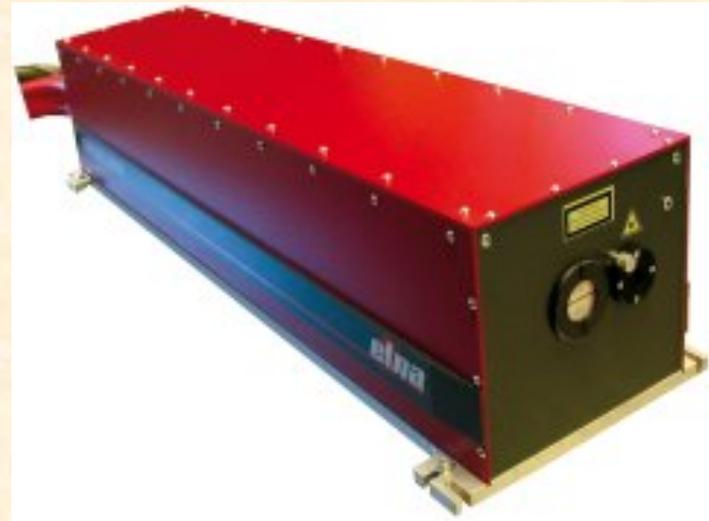
- Un oscillateur picosecondes ou femtosecondes coûte le même prix qu'une grosse voiture.



# Combien coûte un laser?

## Systeme pulsé Megawatt/Gigawatt

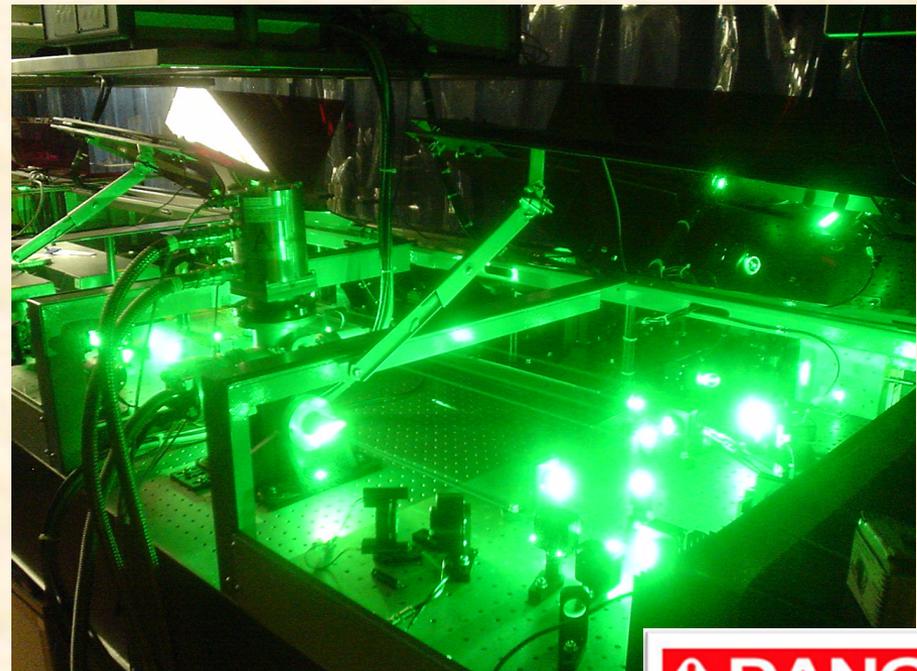
- Un système laser pulsé (ps/fs) capable de produire quelques MW ou GW coûte le même prix qu'une maison.



# Combien coûte un laser?

## Système Terawatt

- Pour pouvoir vous offrir un système Terawatt l'une des solutions est de gagner le premier prix au loto...



<http://www.amplitude-technologies.com/>

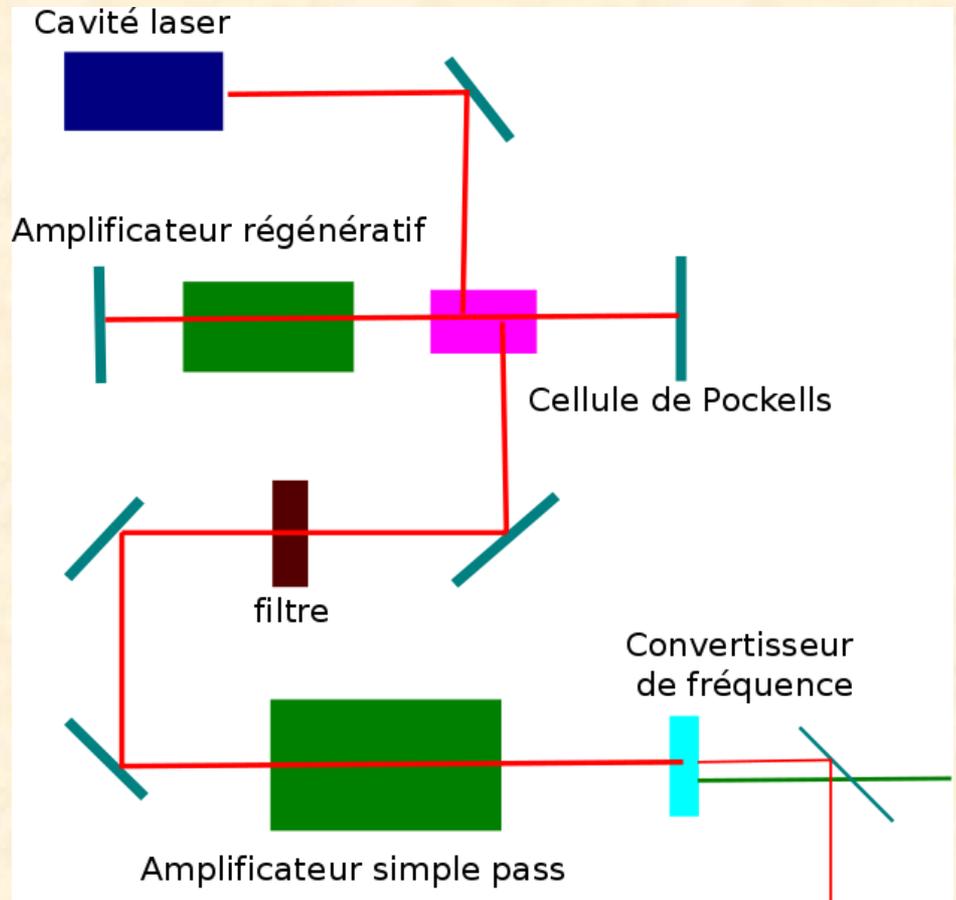


**JOUER COMPORTE DES RISQUES : ENDETTEMENT, ISOLEMENT, DÉPENDANCE.**  
**POUR ÊTRE AIDÉ, APPELEZ LE 09-74-75-13-13 (APPEL NON SURTAXÉ)**

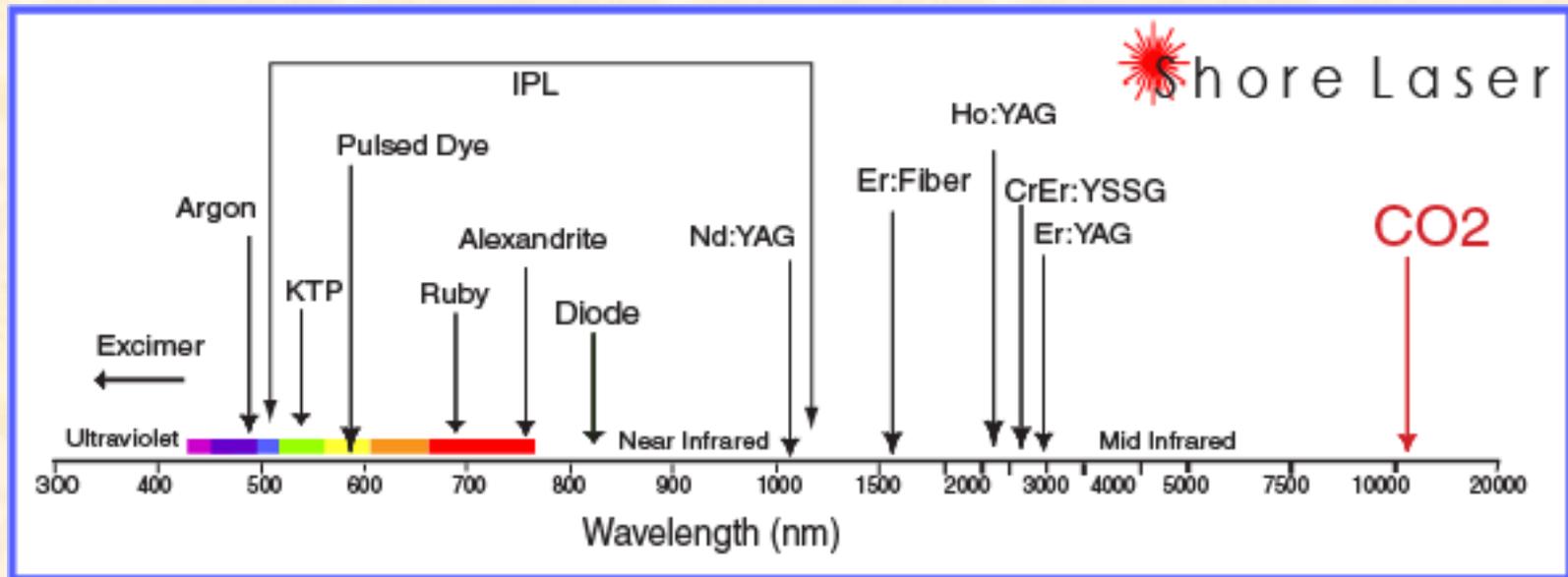


# Qu'est-ce qui coûte cher dans un laser?

- La puissance crête est l'un des facteurs important pour le coût d'un laser (plus que la puissance moyenne).
- Le système de pompage absorbe souvent la plus grosse partie du budget, suivi par le milieu amplificateur.



# Spectre de quelque lasers



- Les lasers couvrent toute la gamme visible et bien au delà dans l'IR. Il est par contre plus difficile d'aller dans l'UV lointain (hors FEL).

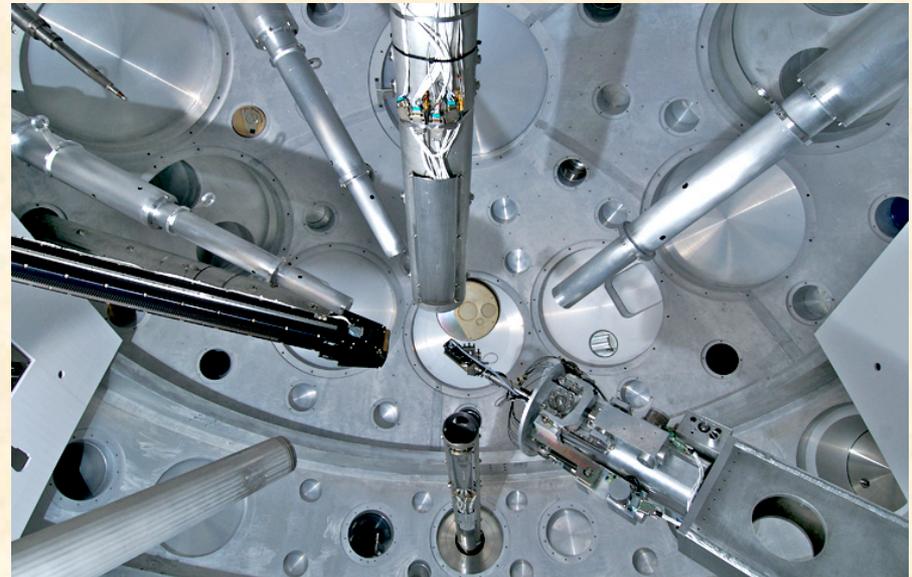
# Laser mégajoule

- Le laser le plus énergétique du monde est en construction pas très loin d'ici, près de bordeaux.
- Le laser mégajoule pourra à terme délivrer des impulsions ns de 1.8MJ.
- Cela est fait en combinant 8 faisceaux laser obtenu en groupant 30 chaînes d'amplification chacun.
- Il sera utilisé pour simuler les bombes nucléaires fabriquées en France.



# Megajoule

- La combinaison de nombreuses chaînes laser de haute énergie en un seul faisceau est loin d'être facile: si la phase est mauvaise il y a interférence destructive!!!
- Au point focal par contre les 8 faisceaux vont taper sur des parties différentes de la cible  
=> pas de problèmes d'interférence.
- La pression obtenue sera de l'ordre de 1 Tbar!



# Application: expériences pompe-sonde

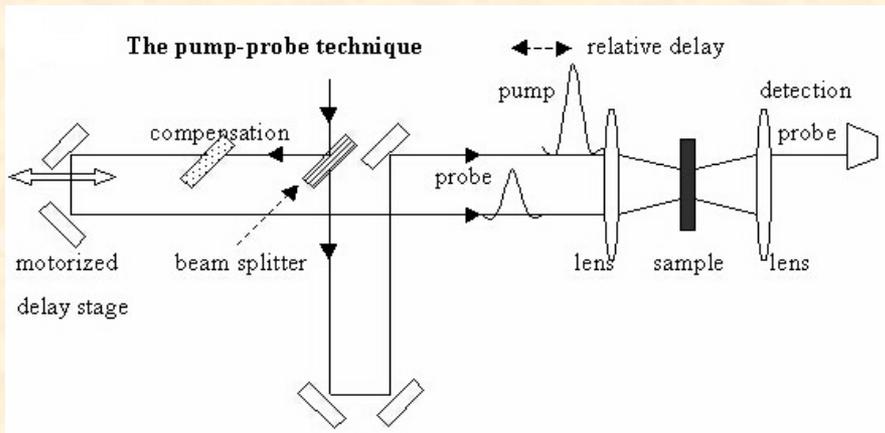
- Permet de voir des phénomènes ultra-courts en contrôlant l'intervalle de temps entre le déclenchement et l'observation.



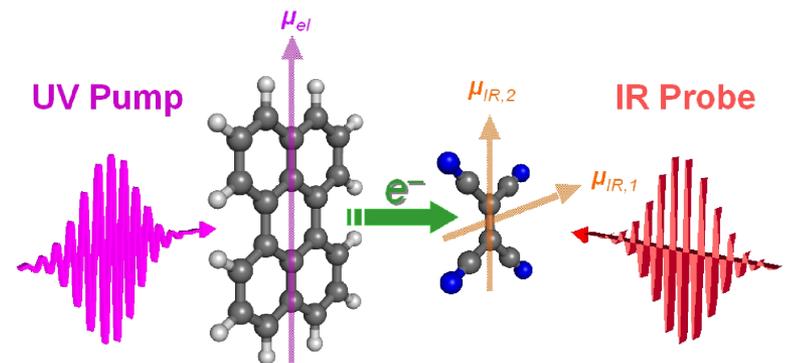
K. Adamczyk, J. Dreyer, E. T. J. Nibbering  
O. F. Mohammed, N. Banerji, B. Lang, E. Vauthey



## Polarization-Sensitive UV-Pump IR-Probe Spectroscopy

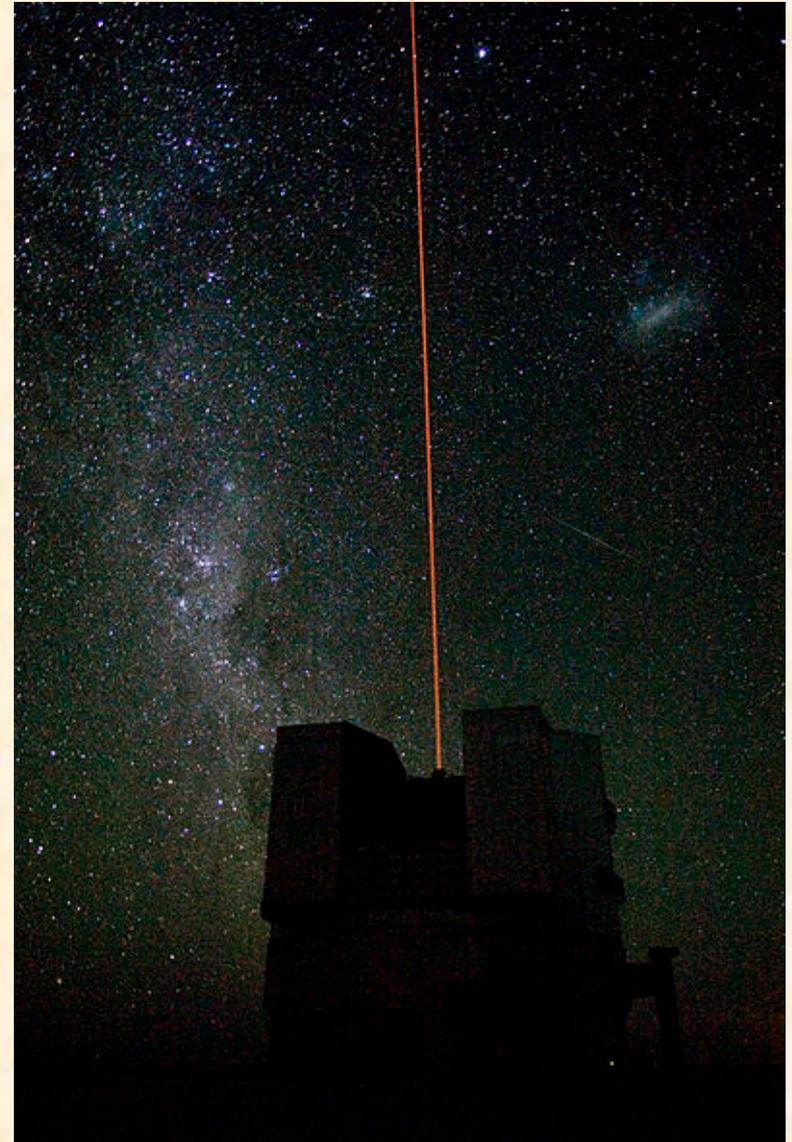


<http://www.iop.kiev.ua/>



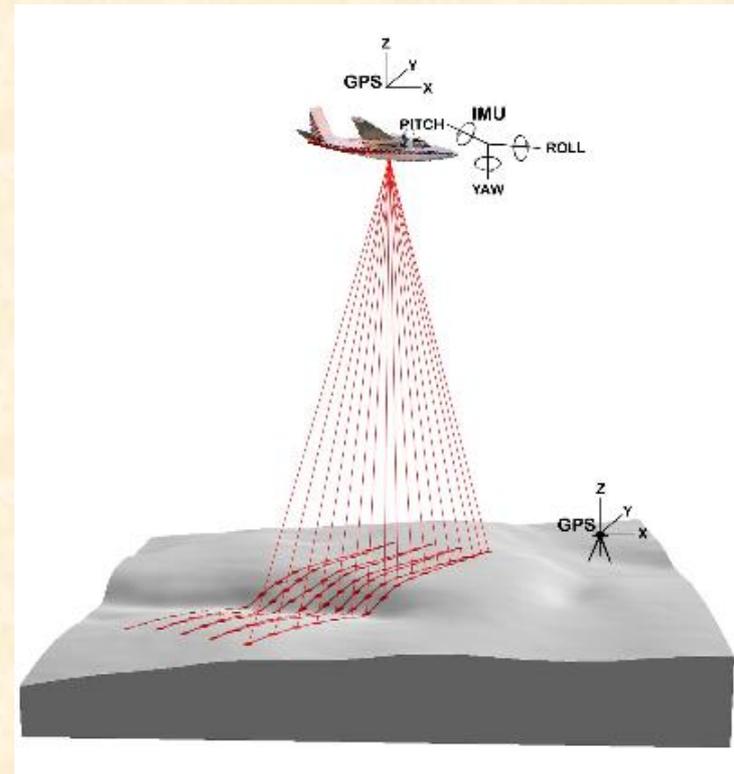
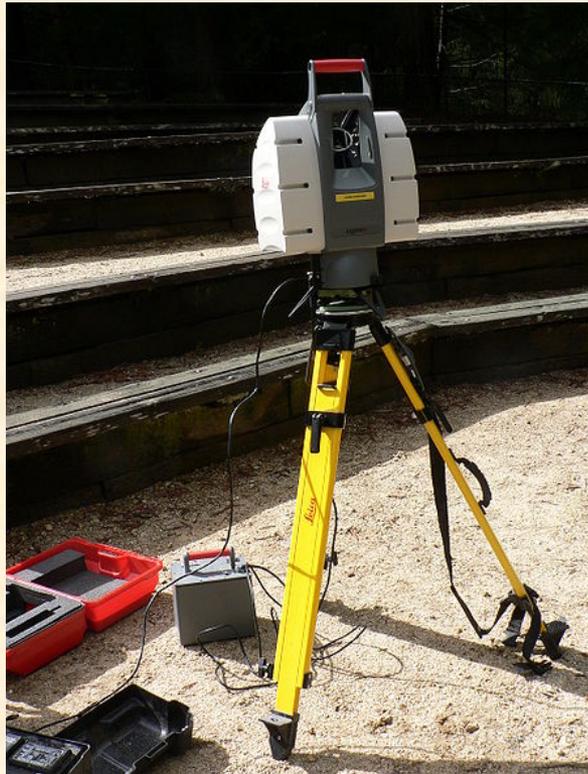
# Etoiles virtuelles

- La résolution des télescopes terrestres est limitée par les fluctuations de densité dans l'atmosphère.
- Pour améliorer la résolution de leurs télescopes les astronomes corrigent ces fluctuations en utilisant des optiques « adaptative ».
- Ils peuvent le faire en observant des étoiles bien connues à proximité de l'objet qu'ils veulent observer.
- Ils peuvent aussi utiliser des lasers de puissance illuminant le ciel pour créer des « étoiles virtuelles ».



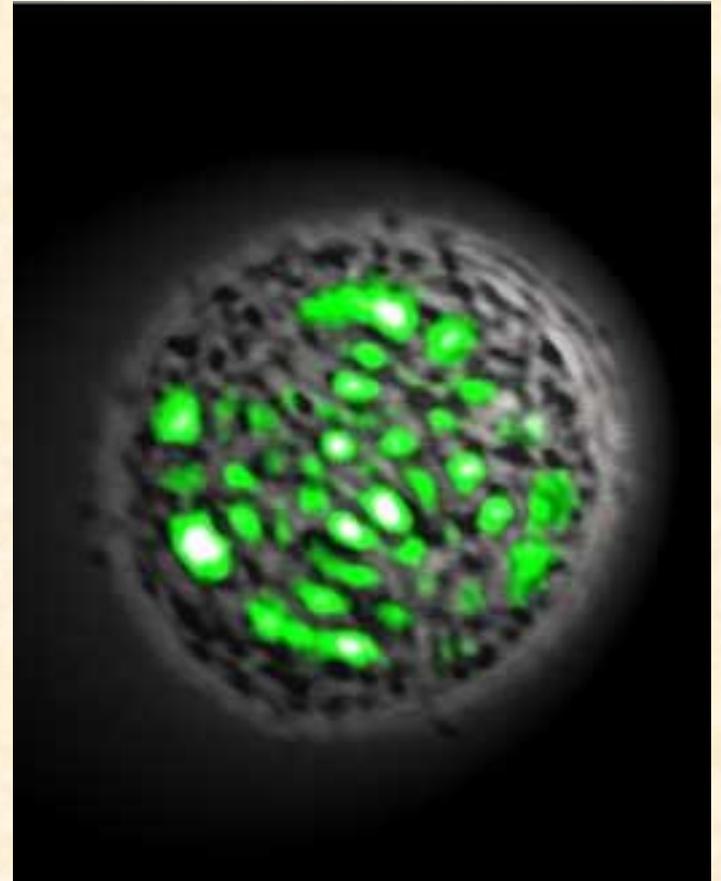
# LIDAR / Mesure de distance

- LIDAR = Light Detection and Ranging
- Analogue dans le visible du RADAR (mais meilleure résolution).



# Laser vivant

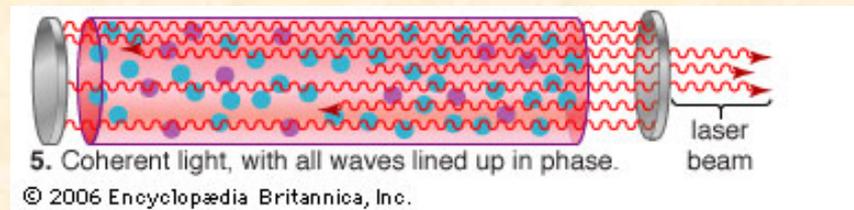
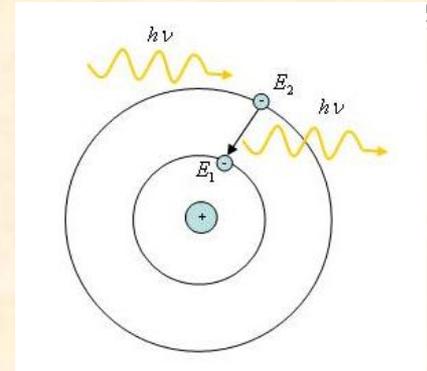
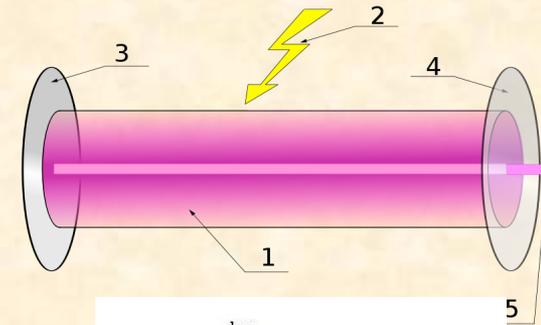
- Selon un article publié cette semaine dans nature il est même possible de créer un laser avec des cellules vivantes.
- Ces cellule ont été modifiées génétiquement pour produire de la fluorescence.  
=> Il est possible de créer une inversion de population  
=> émission stimulée.



<http://www.nature.com/news/2011/110612/full/news.2011.365.html>

# Résumé général

- LASER = Light Emission by Stimulated Emission of Radiation
- Pour obtenir une émission stimulée, il faut créer les bonnes conditions: pompage, inversion de population, bonne cavité,...
- Les longueurs d'ondes disponibles sont limitées par les transitions atomiques existantes mais certaines opérations (ex: doublement) sont possibles.
- Il est possible de créer des impulsions laser très courtes avec une puissance très importante.
- Depuis la première réalisation les lasers ont trouvé de nombreuses applications, à la fois dans notre vie courante et en physique (des particules).
- Certains lasers ont un prix très bas, mais les lasers les plus avancés sont des objets de haute technologie complexe à utiliser et coutant très cher...
- Dans tous les cas, soyez prudent en utilisant un laser!



# Bibliographie

- Encyclopedia of laser physics and technology, R. Paschotta, <http://www.rp-photonics.com/> (en anglais)
- A. Siegman, « LASERS » (en anglais)
- S. Hooker, C. Webb, « Laser Physics », (en anglais)
- B. Cagnac et J.P. Faroux, *Lasers* (CNRS Editions, en français)