

accélération et production de particules avec des lasers de puissance

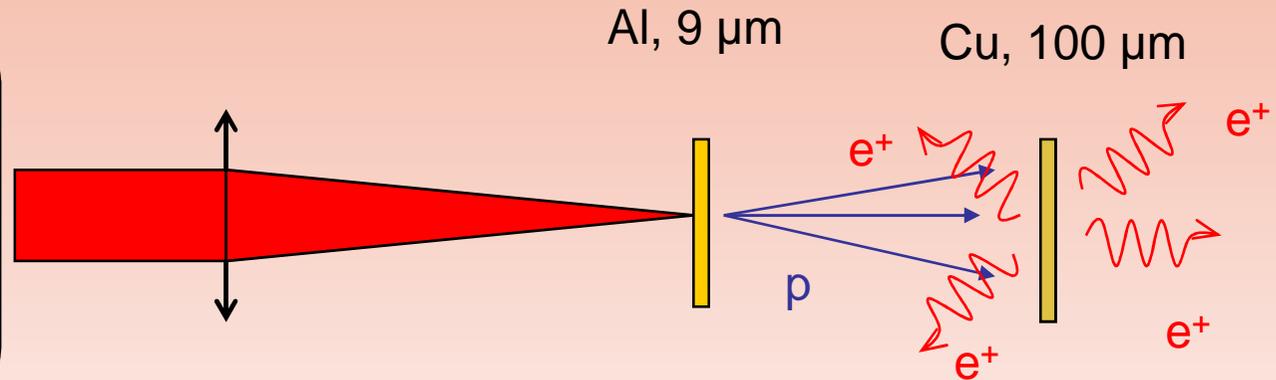


Franck GOBET
Groupe Excitations Nucléaires par Lasers
Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux Gradignan

Lumière et faisceaux de particules

Laboratoire pour l'Utilisation
des Lasers Intenses (LULI)

Faisceau laser
 $\lambda = 1057 \text{ nm}$
 20 J
 300 fs
 $\approx 10^{20}$ photons

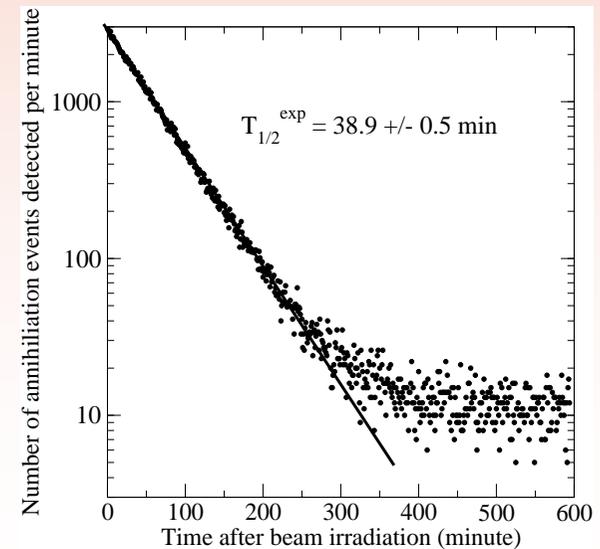


β^+ et $T_{1/2} = 38,1 \text{ min}$: ^{63}Zn



Des protons de quelques 10 MeV peuvent être produits
perpendiculairement à la cible

Comment ? Caractéristiques des faisceaux ?



Plan du cours

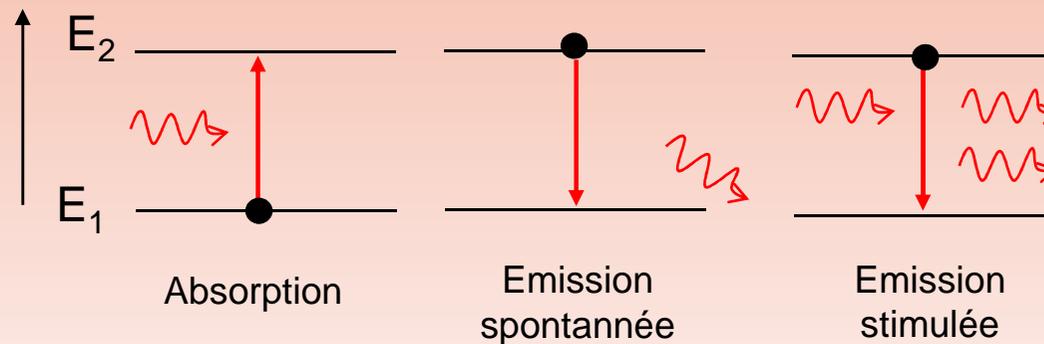
- Les lasers de puissances
- Accélération des électrons
(mécanismes de base; caractéristiques)
- Accélération des protons
(mécanismes de base; caractéristiques)
- Conclusion; applications pour la physique nucléaire

Partie 1: Les lasers de puissance

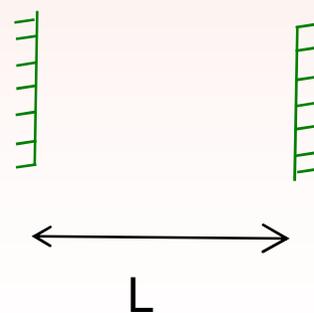
Principe de Fonctionnement d'un laser

Laser = oscillateur optique = amplificateur + filtre

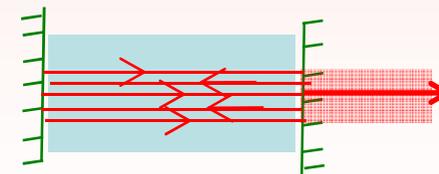
Un amplificateur optique: l'émission stimulée



+ Un filtre: une cavité optique:



Mode propre:
 $\nu_k = k (c/2L)$



Les lasers de puissance, contexte général

$$P = E / \Delta t \quad \text{de } 10^{12} \text{ à quelques } 10^{15} \text{ W}$$

- * Lasers de grande énergie (kJ - MJ) et durée « longue » (ns)
faible cadence de tir (1 tir par jour)
- * Lasers de basse énergie (mJ – 100 J) et durée courte (ps,fs)
haute cadence de tir (jusqu'au kHz)

Deux types de lasers pour des physiques différentes

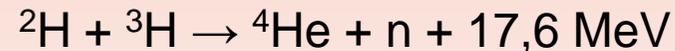
Lasers de longue durée (ns) et de haute énergie (kJ - MJ):

produit un **PLASMA** dense et chaud

$$\rho \sim 10^{-2} \text{ g / cm}^{-3}; T \sim 10 \text{ à } 500 \text{ eV.}$$

Applications:

Fusion par confinement inertiel



Nécessité de déposer 1 à 2 MJ pour cible millimétrique sur ~ 10 ns

NIF (Livermore): gain de 10 en énergie d'ici 2012 ?

LMJ (région aquitaine),

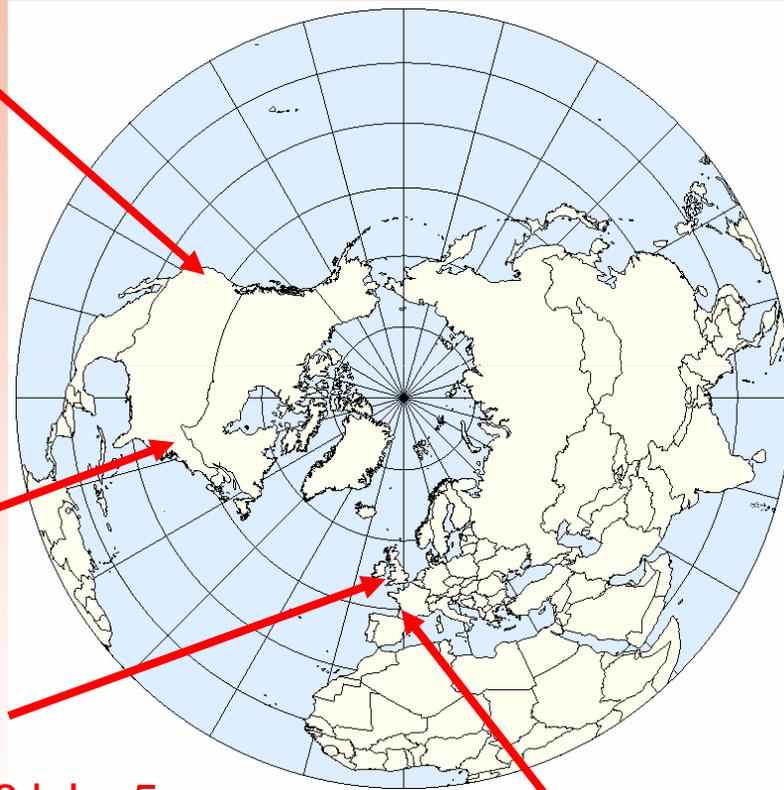
démonstrateur **LIL** (région aquitaine) – 4 faisceaux de 5 kJ

Etude en laboratoire des jets en astrophysique

Les lasers de grande énergie dans le monde

Livermore

- NIF (2012?) – 1,8 MJ – 4 ns



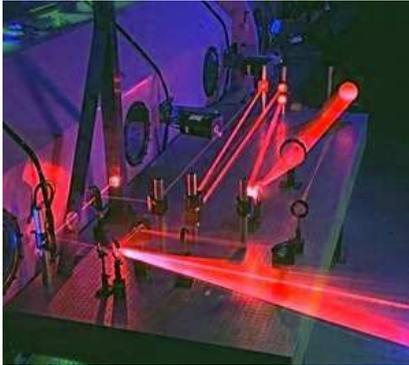
Rochester

OMEGA – 40 kJ – 1 ns

RAL – VULCAN – 2,6 kJ – 5 ns

HIPER (2015..?) – 200 kJ - ns

Aquitaine: CEA/CESTA
LIL 2004 – 20 kJ - ns
LMJ – 1,8 MJ (2015?)



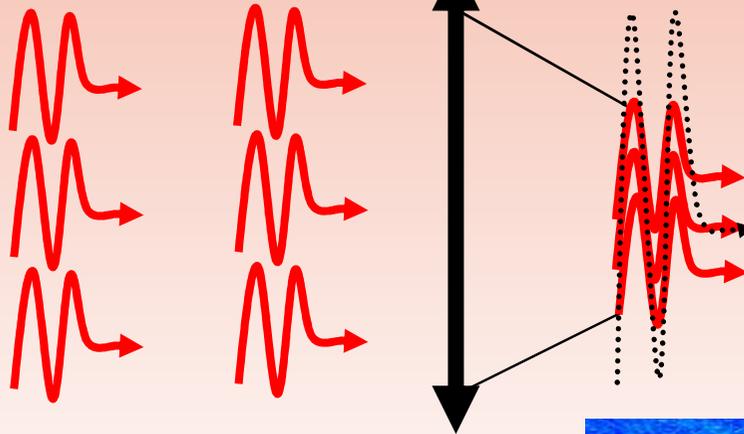
**Laser de courte durée (ps - fs)
et de basse énergie (mJ – 100 J):**

Champs électriques et magnétiques forts: 10^{11} V/cm, 1000 T

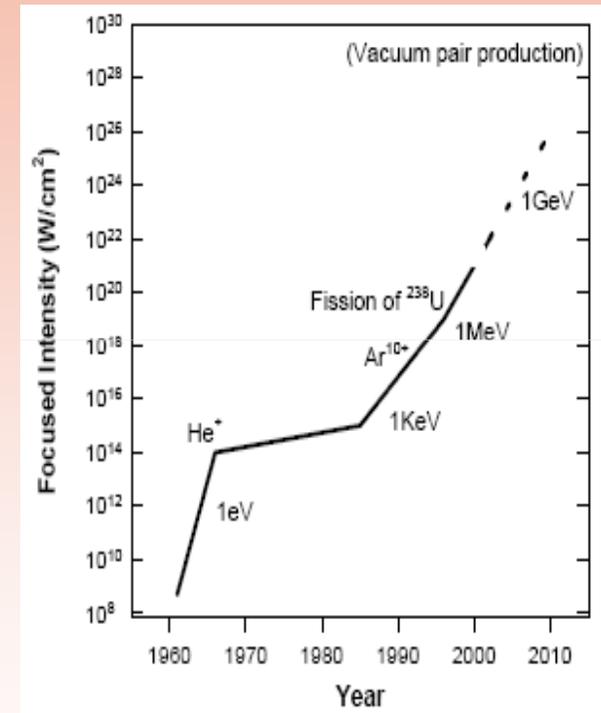
$\lambda = 900$ nm
 $\Leftrightarrow 1.3$ eV

$\Delta t \sim 10^{-15}$ s

$$I = \frac{E}{\Delta t \cdot S}$$



Typiquement 10^{20} W.cm⁻²

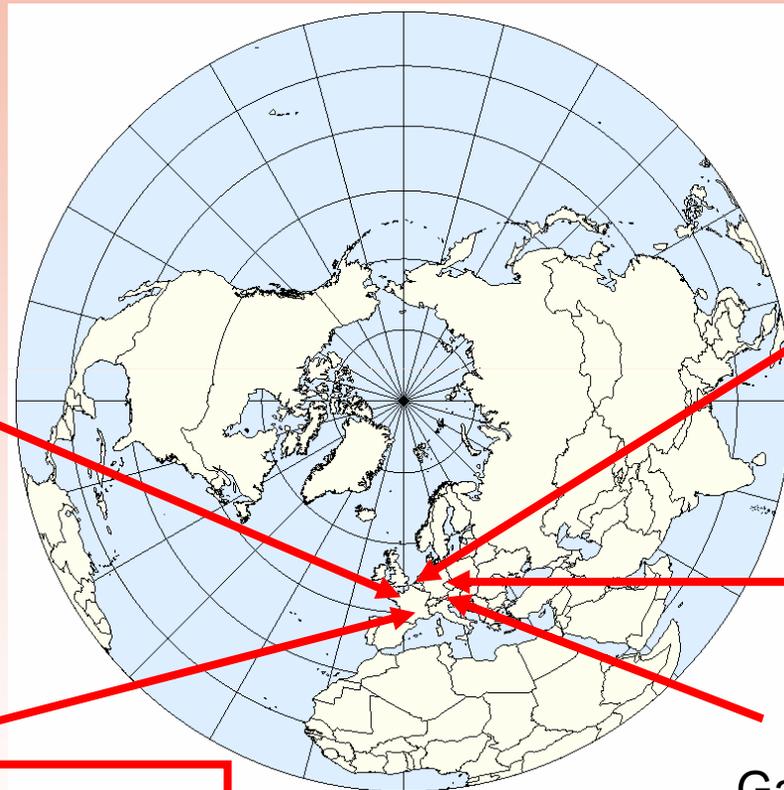


De nombreux lasers en France et en Europe, dont 2 au CELIA à Bordeaux

Application: sources de particules d'énergie supérieures au MeV

Quelques lasers ultra intenses en France et Allemagne

Palaiseau
LULI-100TW –Pico2000
LOA – « salle jaune »



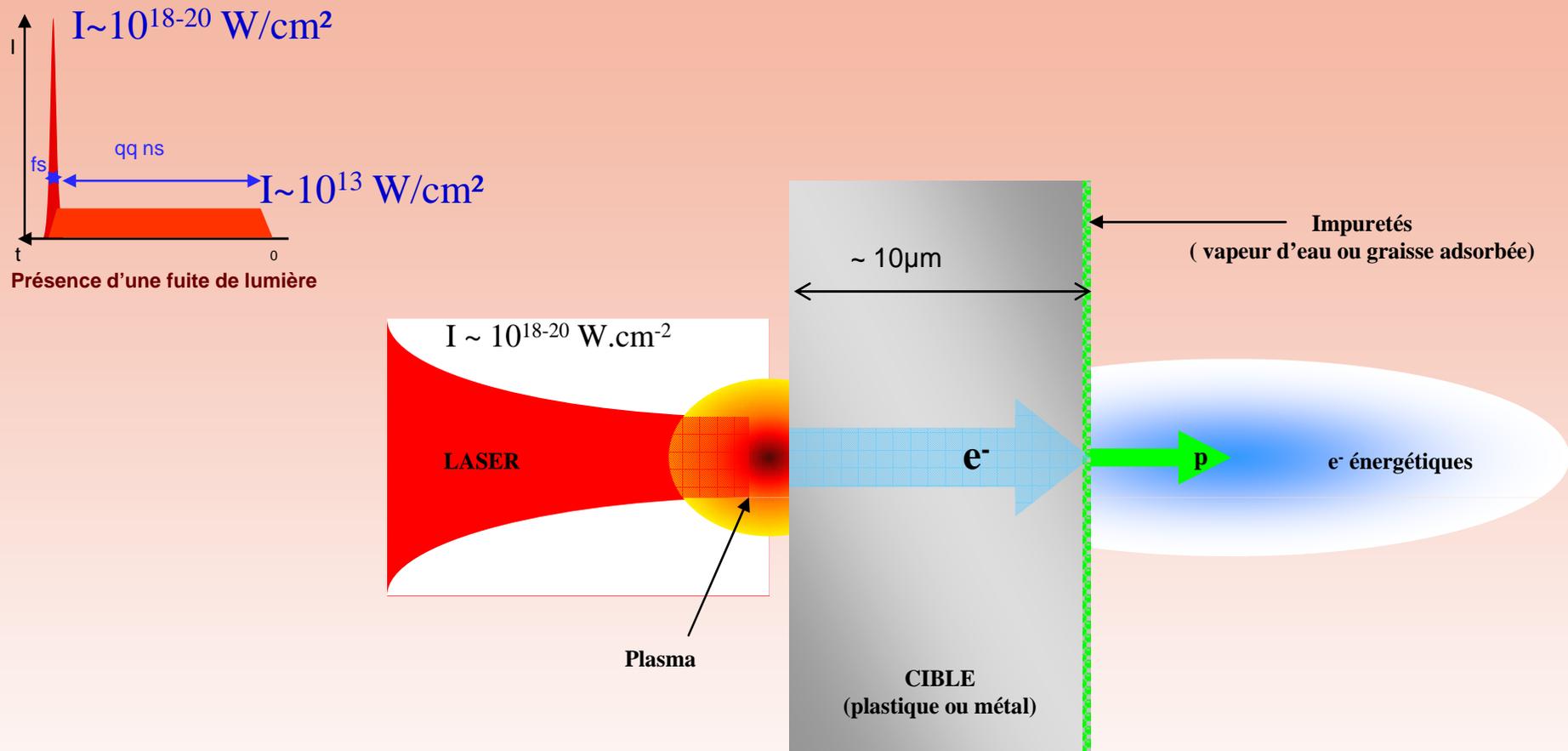
Projets:
ELI
Démonstrateur ILE
Vers 10^{25} W.cm² !!

Jena, IOQ, Jeti

Garching, MPQ ATLAS

Aquitaine:
CELIA – aurore - eclipse
CEA/CESTA – alise - petal

Caractéristiques temporelles de l'impulsion laser; conséquences



Production de faisceaux de particules :

Si $I_{ASE} > 10^{13} \text{ W.cm}^{-2}$: l'impulsion laser interagit avec une cible à l'état de plasma

⇒ Faisceau d'électrons favorisé

Si $I_{ASE} < 10^{13} \text{ W.cm}^{-2}$: l'impulsion laser interagit avec une cible à l'état solide

⇒ Faisceau de protons favorisé

Partie 2: Accélération d'électrons par laser

Accélération d'électrons libres par l'onde électromagnétique (EM):
Onde plane - vide

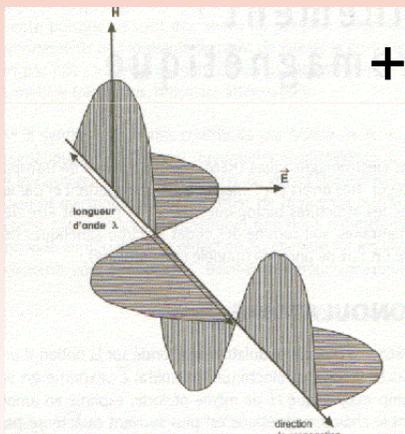
Le champ électrique peut être très élevé:

$$E_{\max} \text{ (TV / m)} \approx 2,75 \sqrt{\frac{I \text{ (W / cm}^2\text{)}}{10^{18}}}$$

$$I = 10^{19} \text{ W.cm}^{-2} \rightarrow E_{\max} = 8,7 \text{ TV/m}$$

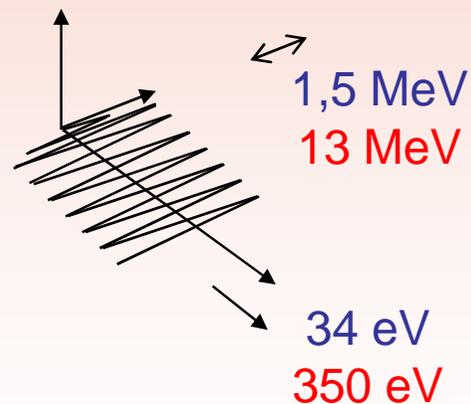
$$I = 10^{21} \text{ W.cm}^{-2} \rightarrow E_{\max} = 87 \text{ TV/m}$$

Onde EM plane:



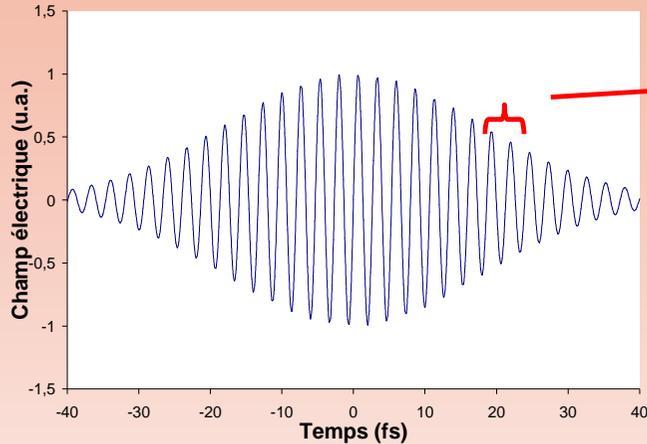
Dynamique de l'électron: $m_e \gamma \frac{d\vec{v}(\vec{r}, t)}{dt} = \vec{F}_{Lorentz}(\vec{r}, t) = -e(\vec{E}(\vec{r}, t) + \vec{v}(\vec{r}, t) \wedge \vec{B}(\vec{r}, t))$

= Trajectoire de l'électron:



Ne permet pas d'expliquer l'accélération longitudinale des électrons observée!

Accélération d'électrons libres par l'onde électromagnétique (EM):
Onde finie dans le temps et dans l'espace - vide

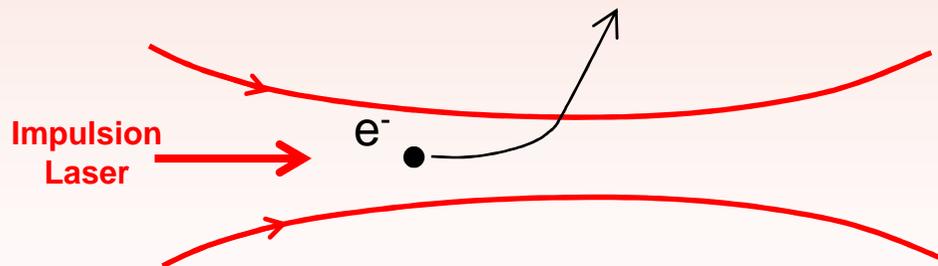


$$\langle \vec{F}_{Lorentz}(\vec{r}, t) \rangle_{\text{une période}} = -e \langle (\vec{E}(\vec{r}, t) + \vec{v}(\vec{r}, t) \wedge \vec{B}(\vec{r}, t)) \rangle_{\text{une période}}$$

$$\text{et } T_{\text{onde}} \ll \tau_{\text{enveloppe}}$$

$$\langle \vec{F}_{Lorentz}(\vec{r}, t) \rangle_{\text{une période}}^{\text{1er ordre}} = \vec{F}_{\text{pondéromotrice}} = -\frac{e^2}{2\gamma\epsilon_0 m_e \omega_L^2} \underbrace{\vec{\nabla} I(\vec{r}, t)}$$

La force pondéromotrice expulse les électrons des zones de fortes intensités



Pour $I=10^{19} \text{ W.cm}^{-2}$: $\Delta W_{\text{max, long}} = 690 \text{ keV}$
 $I=10^{21} \text{ W.cm}^{-2}$: $\Delta W_{\text{max, long}} = 6,9 \text{ MeV}$

Ne permet pas d'expliquer l'accélération longitudinale des électrons observée!

Accélération d'électrons libres par l'onde électromagnétique (EM):
Onde finie dans le temps et dans l'espace - **Plasma**

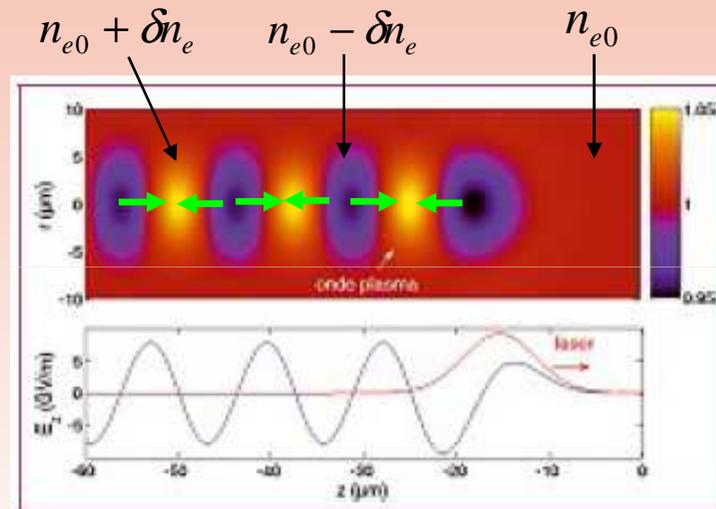
Plasma = milieu ionisé

La force pondéromotrice induite par l'impulsion laser modifie la densité électronique:
création d'une onde plasma de pulsation:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}}$$

$$I = 10^{17} \text{ W.cm}^{-2}$$

$$n_{e0} = 10^{18} \text{ e}^- \text{ cm}^{-3}$$



Une faible séparation de charge produit un fort champ électrique longitudinal:

$$E(\text{GV} / \text{m}) \approx 100 \left[\frac{n_e (\text{cm}^{-3})}{10^{18}} \right]^{1/2} \frac{\delta n_e}{n_e} \quad 5 \text{ GV/m au maximum dans l'exemple}$$

Impulsion EM + plasma → Champ électrique longitudinal de plusieurs GV/m !!

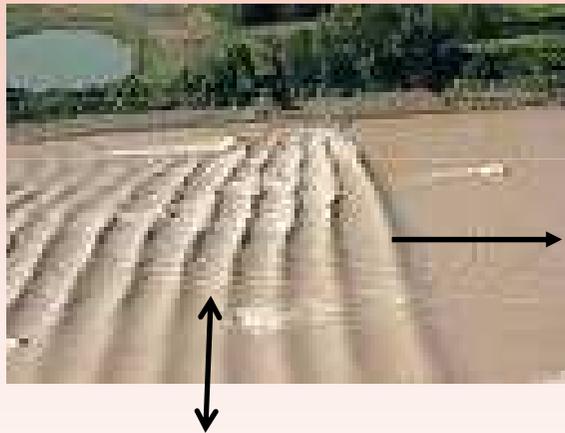
Propagation de l'onde plasma

La déformation de la densité électronique se propage à la vitesse de groupe de l'impulsion laser $\approx c$

La vitesse de phase du champ électrique longitudinal est donc relativiste

Est-ce qu'un électron peut « profiter » de ce champ pour être accéléré?

Une analogie « dans la vie de tous les jours » d'un habitant de Gironde ou de Dordogne: le mascaret



Direction de propagation de la déformation de la surface de l'eau.
Vitesse de phase $\approx 15 - 30$ km/h

Direction du mouvement de l'eau

Un surfeur avec une « bonne » vitesse initiale peut être piégée par l'onde



Et un électron dans une onde plasma créée par laser ?

Piégeage d'un électron? Le cas de l'onde plasma 1D relativiste

Dans le référentiel (R) du laboratoire :

P.Mora and F.Amiranoff, Appl. Phys., **66** (1989) 3476

$$\delta n(z, t) = \delta n_e \sin \left[\omega_p \left(\frac{z}{v_p} - t \right) \right] \quad \text{avec } v_p \approx c$$

Équation
de Maxwell-Gauss

$$\vec{E}(z, t) = \frac{m_e c \omega_p}{e} \frac{\delta n_e}{n_e} \cos \left[\omega_p \left(\frac{z}{v_p} - t \right) \right] \vec{e}_z$$

Dans le référentiel (R') propre à l'onde plasma:

$$\longrightarrow \gamma_p = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_p}{c}\right)^2}}$$

Le champ électrique est stationnaire: $\vec{E}'(z', t) = \frac{m_e c \omega_p}{e} \frac{\delta n_e}{n_e} \cos \left[\frac{\omega_p z'}{v_p \gamma_p} \right] \vec{e}_z$

La force électrique dérive d'une énergie potentielle Φ' :

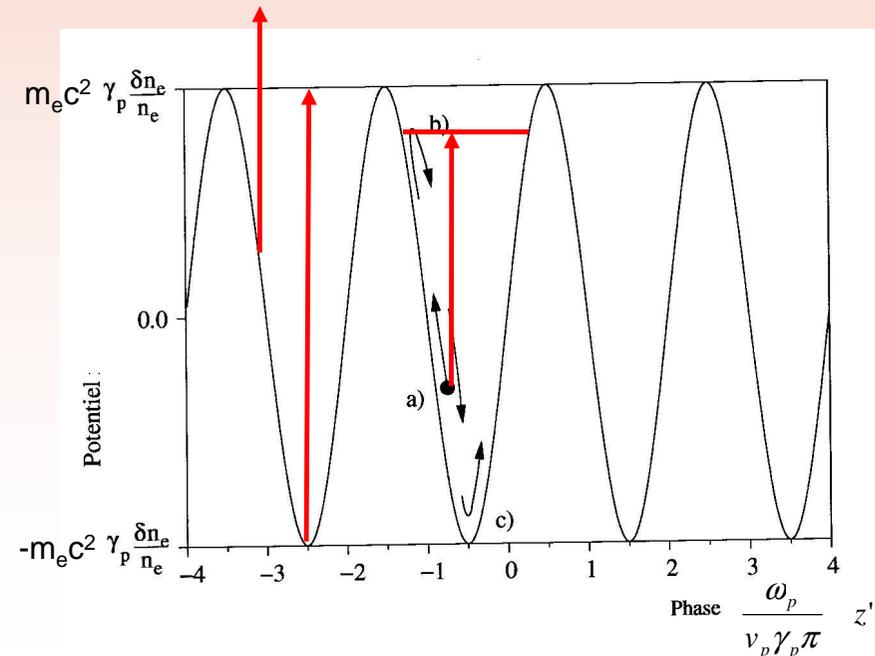
$$\Phi'(z') = m_e c^2 \gamma_p \frac{\delta n_e}{n_e} \sin \left[\frac{\omega_p z'}{v_p \gamma_p} \right]$$

Si à l'instant initial un électron est injecté en z'_0 avec le facteur relativiste γ'_0 alors:

$$m_e (\gamma'(z') - 1) c^2 + \Phi'(z') = m_e (\gamma'_0 - 1) c^2 + \Phi'(z'_0)$$

Un électron peut être piégé si:

$$E_c'^0 = m_e (\gamma'_0 - 1) c^2 \leq 2 m_e c^2 \gamma_p \frac{\delta n_e}{n_e}$$



Gain en énergie de l'électron piégé ($z(t) \approx z_0 + v_p t$)?

Des électrons peuvent être piégés....

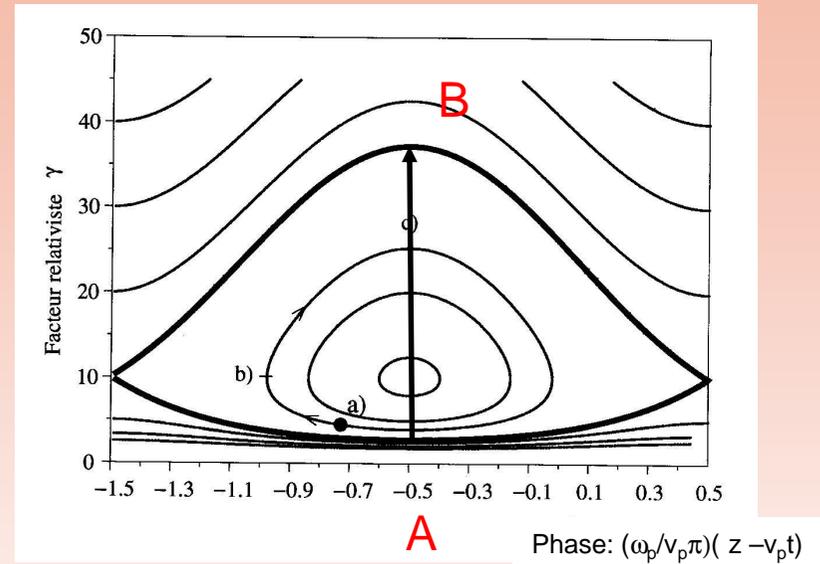
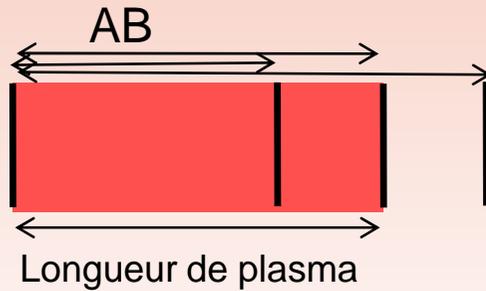
Retour dans le référentiel du laboratoire (R):

Gain en énergie maximal:

$$\Delta W_{\max} = 4\gamma_p^2 \frac{\delta n_e}{n_e} mc^2$$

$$T_{\text{plasma}} \approx 10\text{eV} - 1\text{keV}$$

$$\gamma_0 \approx 1$$



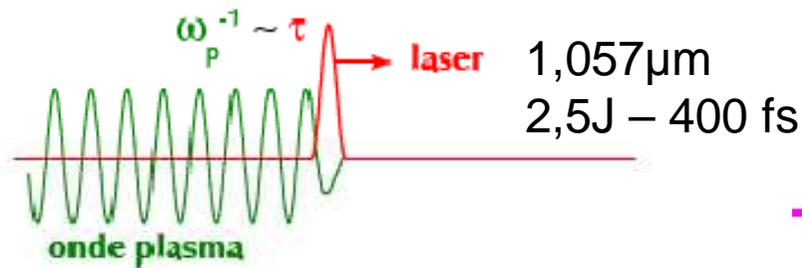
~~$$\Delta W_{\max}$$~~

A.N: $I = 10^{17} \text{ W.cm}^{-2}$

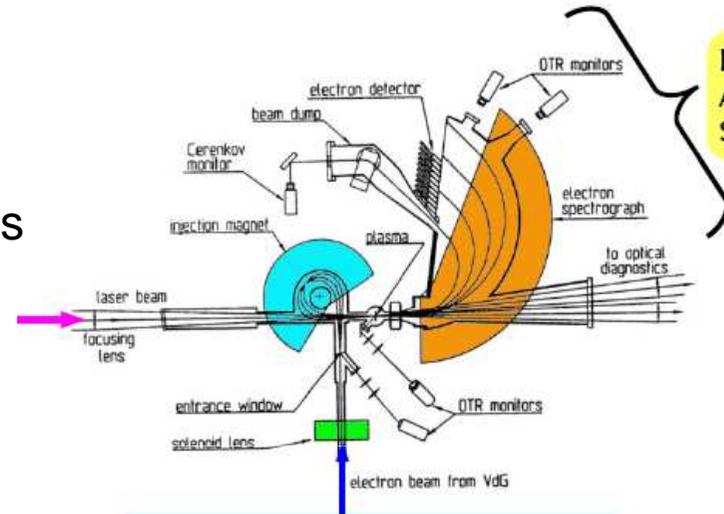
$$n_e = \begin{cases} 10^{17} \text{ cm}^{-3} \\ 10^{19} \text{ cm}^{-3} \end{cases} \quad \gamma_p \approx \begin{cases} 100 \\ 10 \end{cases} \quad \Delta W_{\max} \approx \begin{cases} 20 \text{ GeV} \\ 200 \text{ MeV} \end{cases} \quad \text{Longueur AB} \begin{cases} 1 \text{ m} \\ 1 \text{ mm} \end{cases}$$

d'ondes

1^{ère} expériences de démonstration
 après 1995, laser intense de courte durée ($<ps$) $I=4.10^{17} \text{ W.cm}^{-2}$

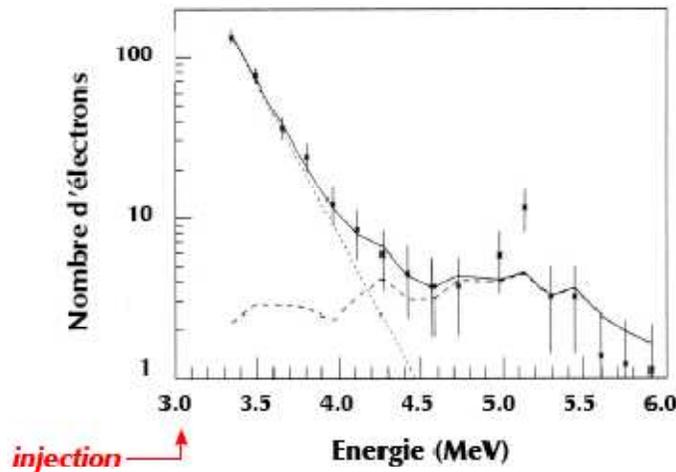


Sillage laser



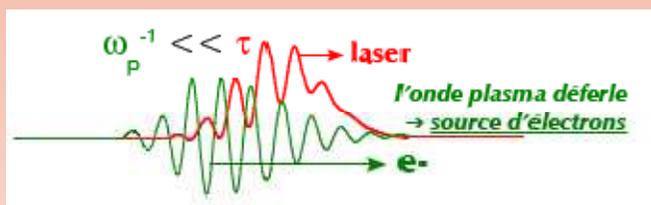
LLR (LPNHE)
 Aimant d'injection
 Spectromètre, ...

Laboratoire des Solides Irradiés
 Faisceau d'électrons (Van de Graaf)
 3 MeV, 300 mA, 0.4 ms, $\sim 1000 \text{ e/ps}$



Après 2000, augmentation de l'intensité laser $I > 10^{18} \text{ W.cm}^{-2}$
 le sillage automodulé - forcé

Cible solide



Distribution continue en énergie

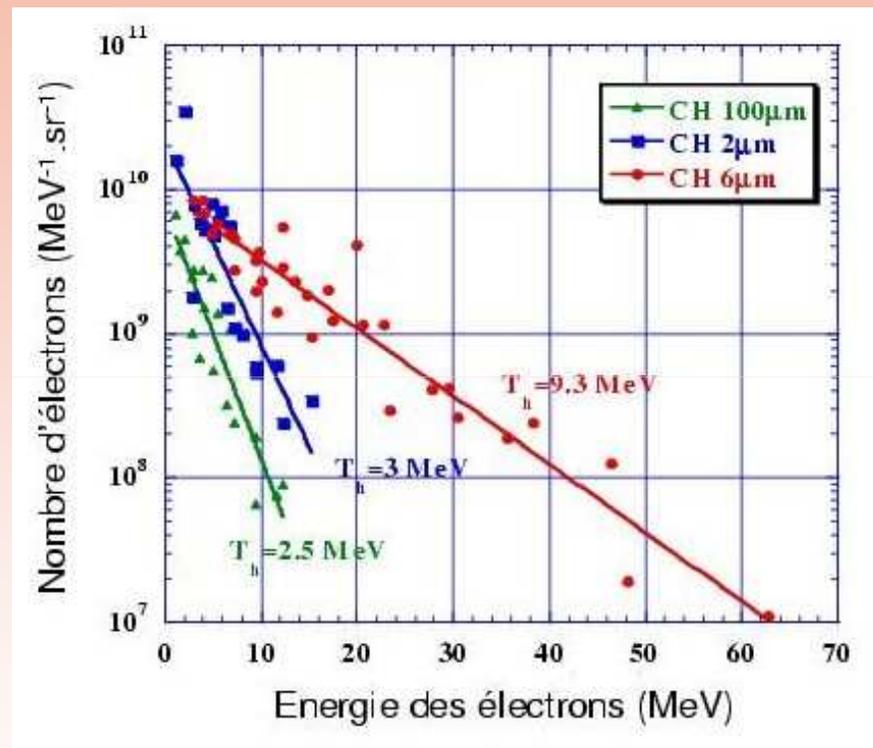
Pour une cible jet de gaz (He)
 5nC d'électrons avec $T \approx 20 \text{ MeV}$

$\Delta\theta \approx 15^\circ$ pour $E_{e^-} > 10 \text{ MeV}$

Emittance de l'ordre de $3\pi \text{ mm.mrad}$
 pour $E_{e^-} = 55 \text{ MeV}$

(acc. ELBE; Dresde;
 20 MeV, $3 - 10 \pi \text{ mm.mrad}$)

V.Malka et al., Science, 298 (2002) 1596



$I \approx 10^{19} \text{ W.cm}^{-2}$

G.Malka et al., Phys. Rev. E, 66 (2002) 066402

Depuis 2004; Recherches actuelles

Meilleure définition en énergie:

- Focalisation du faisceau laser sur des dimensions $<$ longueur d'onde plasma

Régime de la bulle

Meilleure définition en énergie

C.G.R. Geddes et al., Nature 431, 535 (2004)

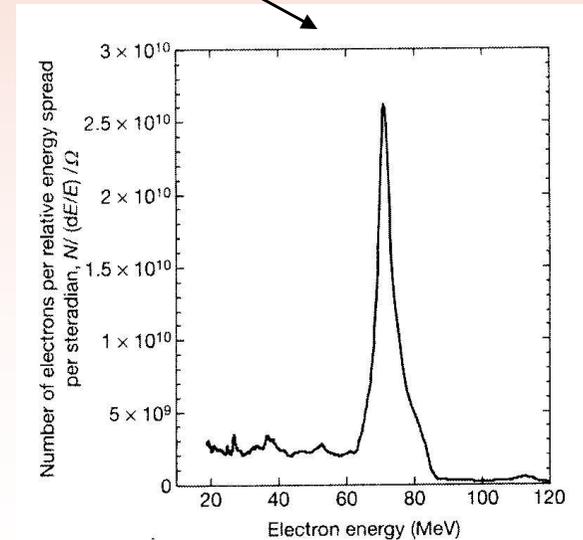
J.Faure et al., Nature 431, 541 (2004)

S.P.D. Mangles et al., Nature 431, 538 (2004)

- contrôle de la phase d'injection via
l'utilisation de plusieurs faisceaux.....

Une augmentation de l'énergie:

augmenter la longueur de plasma:
utilisation de capillaire



Partie 3:

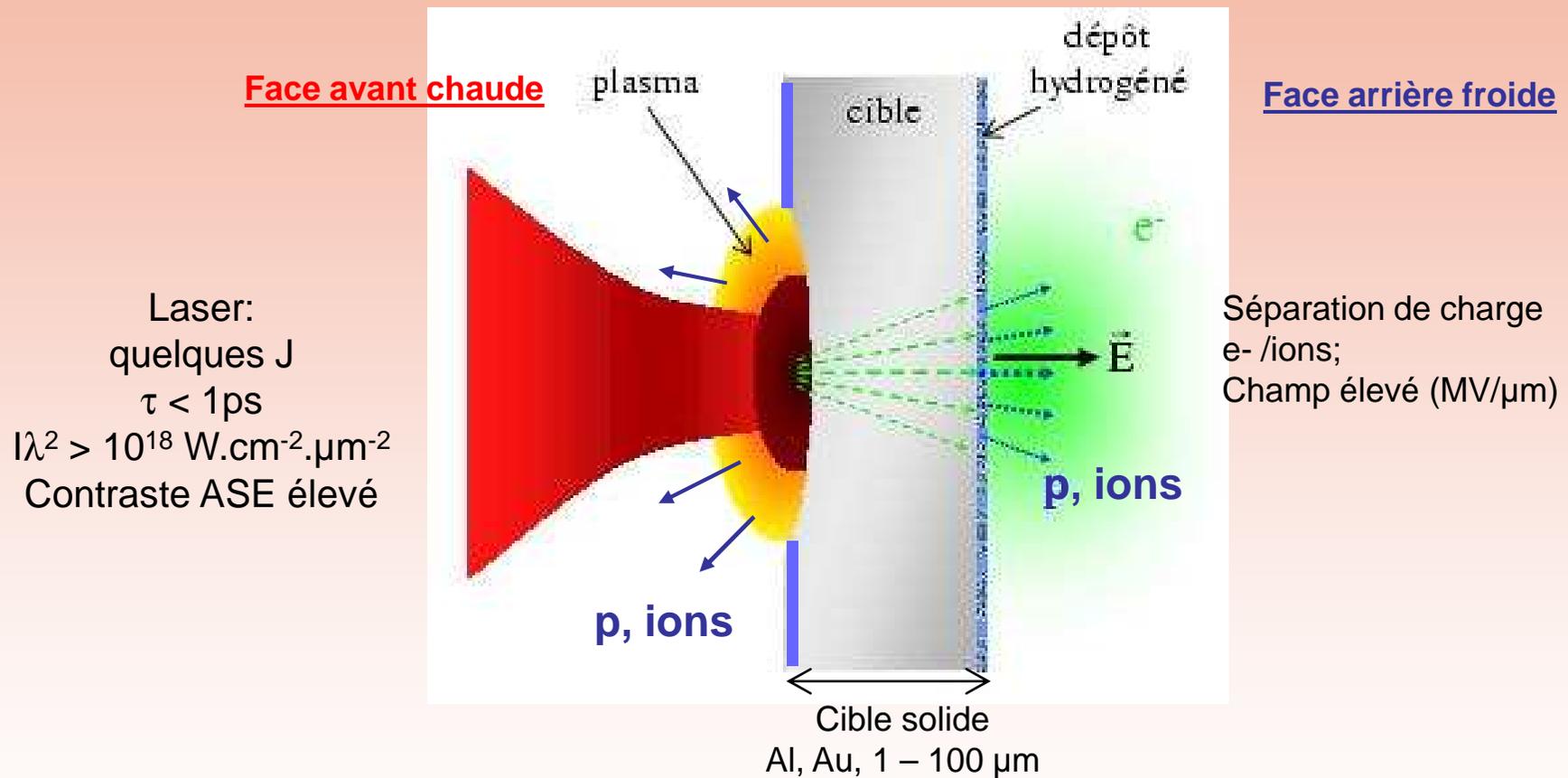
Accélération d'ions

par laser

Principe général de l'accélération de protons et d'ions

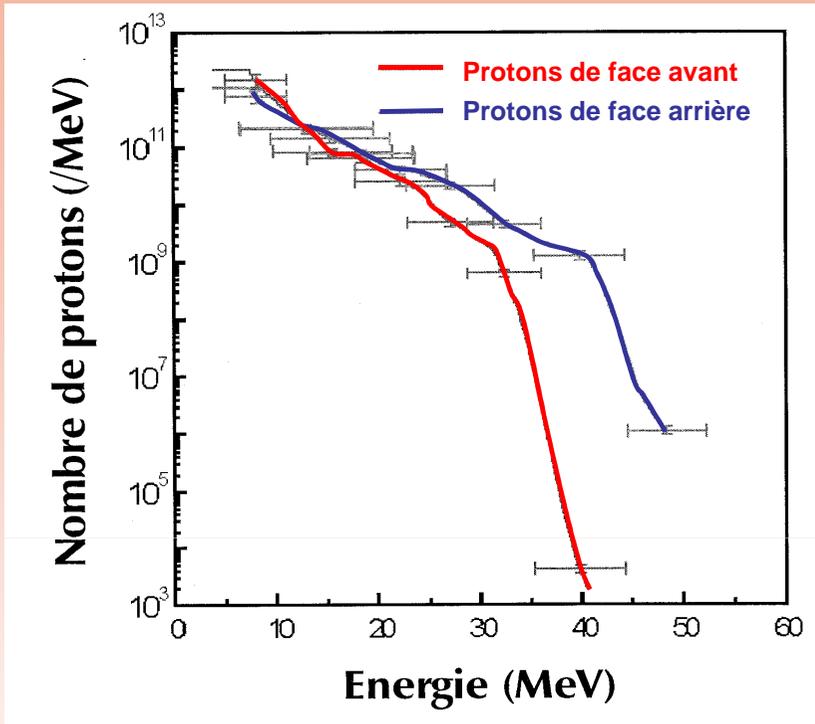
Démonstration expérimentale: R.A. Snavely et al., Phys. Rev. Lett. 85, 2945 (2000)

Théorie: P.Mora, Phys. Rev. Lett. 90, 185002 (2003); Phys. Rev. E 72, 056401 (2005)



- 1) Le laser ionise l'avant de la cible et génère une population d'électrons de quelques keV
- 2) l'émission de ces électrons crée une forte charge d'espace sur les 2 faces
- 3) Le champ électrique (de l'ordre du MV/ μm) qui en résulte accélère les ions en surface

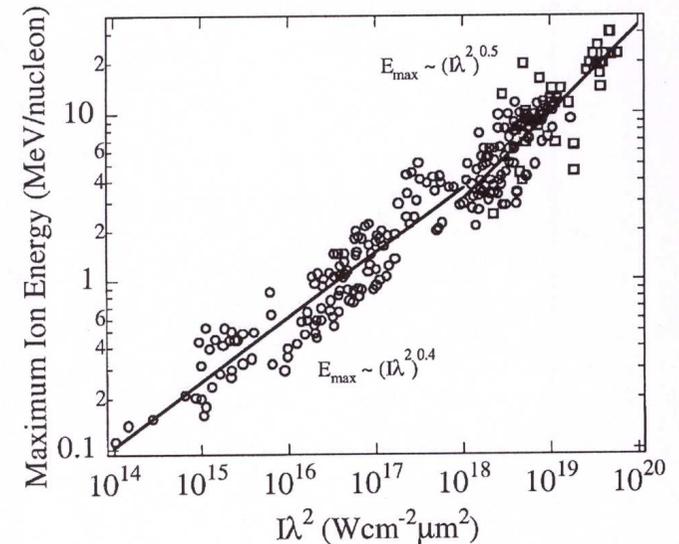
Spectres en énergie des protons



K.W.D. Ledingham
Nuclear Physics A 752, 633c (2005)

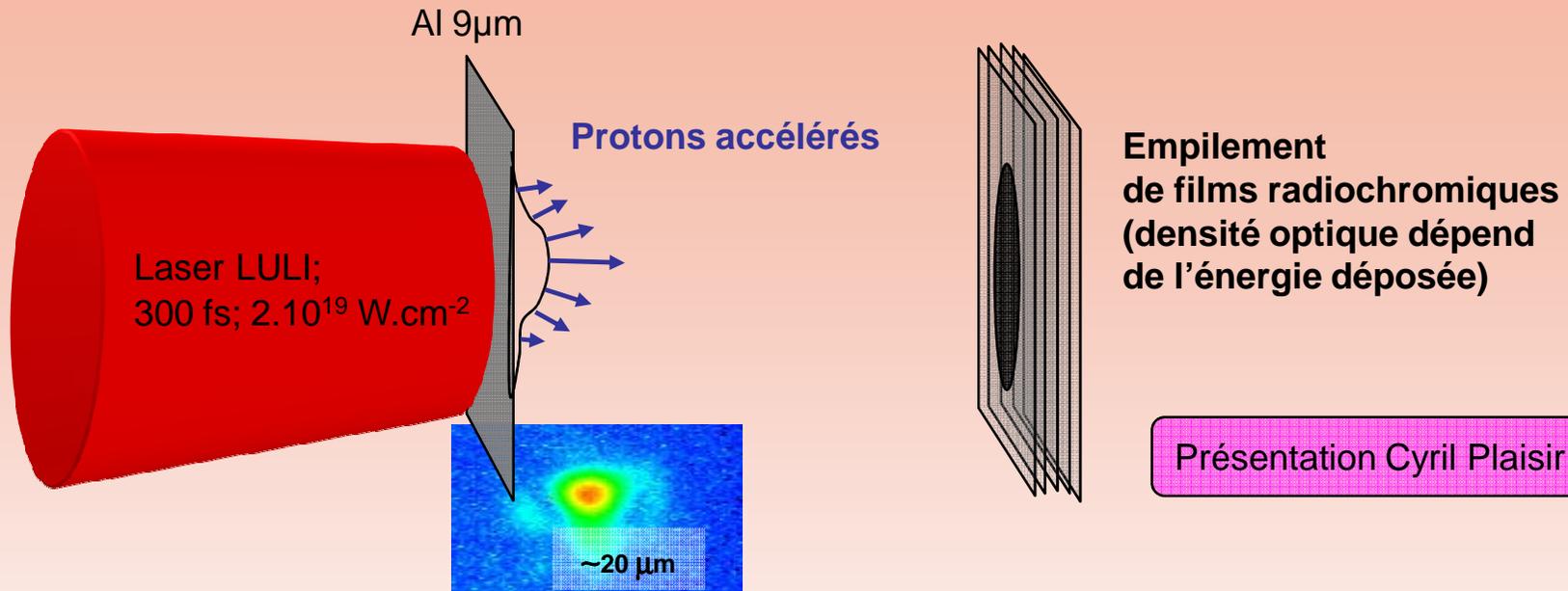
Cible d'Al 200 μm
 $E = 300 \text{ J}$, $\tau = 750 \text{ fs}$, $2 \cdot 10^{20} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$

- 1) Le spectre en énergie des protons suit une loi de Boltzmann avec une coupure à haute énergie
- 2) L'énergie de coupure est plus faible en face avant (écranage du champ électrique par le plasma)
- 3) L'énergie de coupure augmente avec l'intensité laser et suit des lois d'échelle

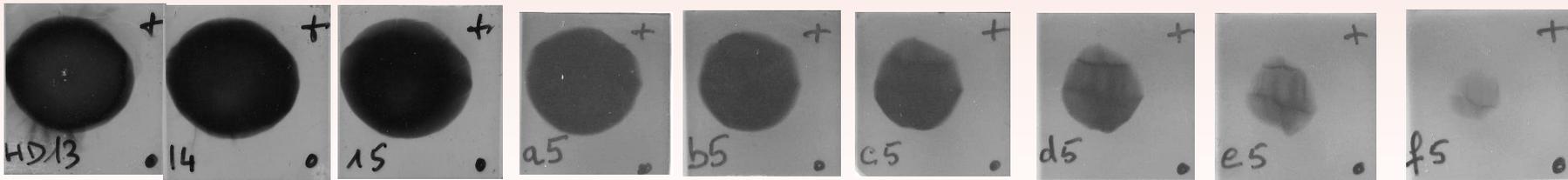


E.L.Clark et al.,
Phys. Rev. Lett. **85**, 085002 (2002)

Spectres angulaires



> 500 keV > 3 MeV > 4 MeV > 6 MeV > 8 MeV > 9,5 MeV > 11 MeV > 12 MeV > 13 MeV



Le faisceau est d'autant plus collimaté que les protons sont énergétiques

Propriétés des sources d'ions de type « laser – plasma »

- **divergence** pour une cible plane $\approx 10 - 20^\circ$
(peut être focalisé en jouant sur la géométrie de la cible)
- taille de source **petite** $\approx 15 \mu\text{m}$
- **faible émittance** $\approx 0,002 \pi \text{ mm.mrad}$
- **énergie maximum** atteinte : 75 MeV
- **$10^{11} - 10^{13}$ protons** de plus de 3 MeV par tir laser
- efficacité de conversion laser – ion : $< 1\%$
- source **ultrabrève** $\approx 1 \text{ ps}$

Développements actuels

Définition en énergie
du faisceau de protons

structuration des cibles

T.Zh.Esirkepov et al., Phys. Rev. Lett., 89 (2002) 175003

B.M.Hegelich et al., Nature, 439 (2006) 441

H.Schwoerer et al., Nature, 439 (2006) 445

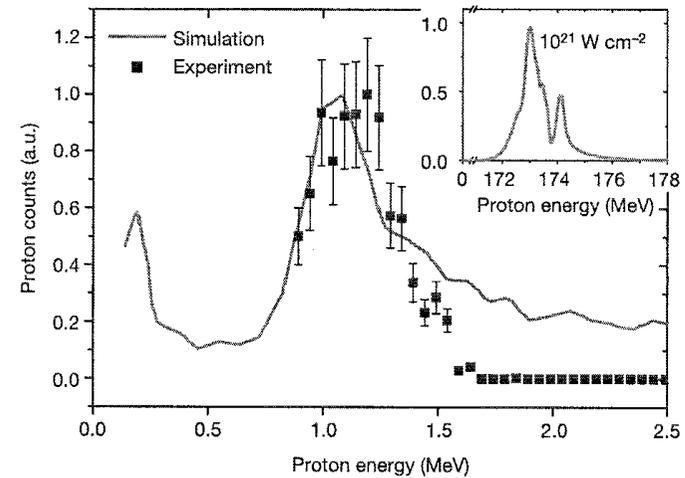
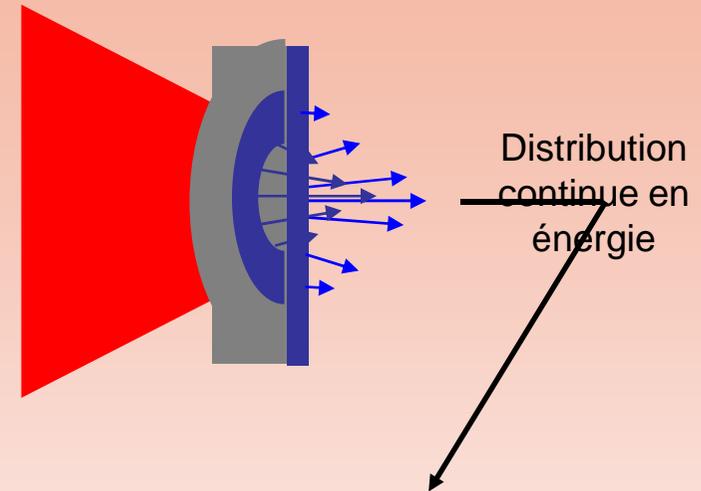
Focalisation du faisceau de protons:

cible à géométrie non plane

S.C.Wilks et al., Phys. Plasmas 8 (2001) 542

utilisation de lentille plasma

T.Toncian et al., Science, 312 (2006) 445



H.Schwoerer et al., Nature, 439 (2006) 445

Conclusion et perspectives

Une histoire vieille de 15 ans pour les électrons
de 8 ans pour les protons

Caractéristiques des faisceaux

gain en énergie maximal:

électrons: de 1 MeV à près de 1 GeV en 15 ans!

protons: quelques dizaines de MeV

d'une distribution en énergie continue vers une **définition $\Delta E/E \sim \text{qq}\%$**

faisceaux pulsés (10 Hz pour les électrons, 0.5 Hz pour les protons)

durée des paquets de particules: \approx ps

taille de la source: \approx 10 – 30 μm

divergence de quelques degrés

quantité: quelques nC \rightarrow $10^{10} - 10^{11}$ particules par « paquets »

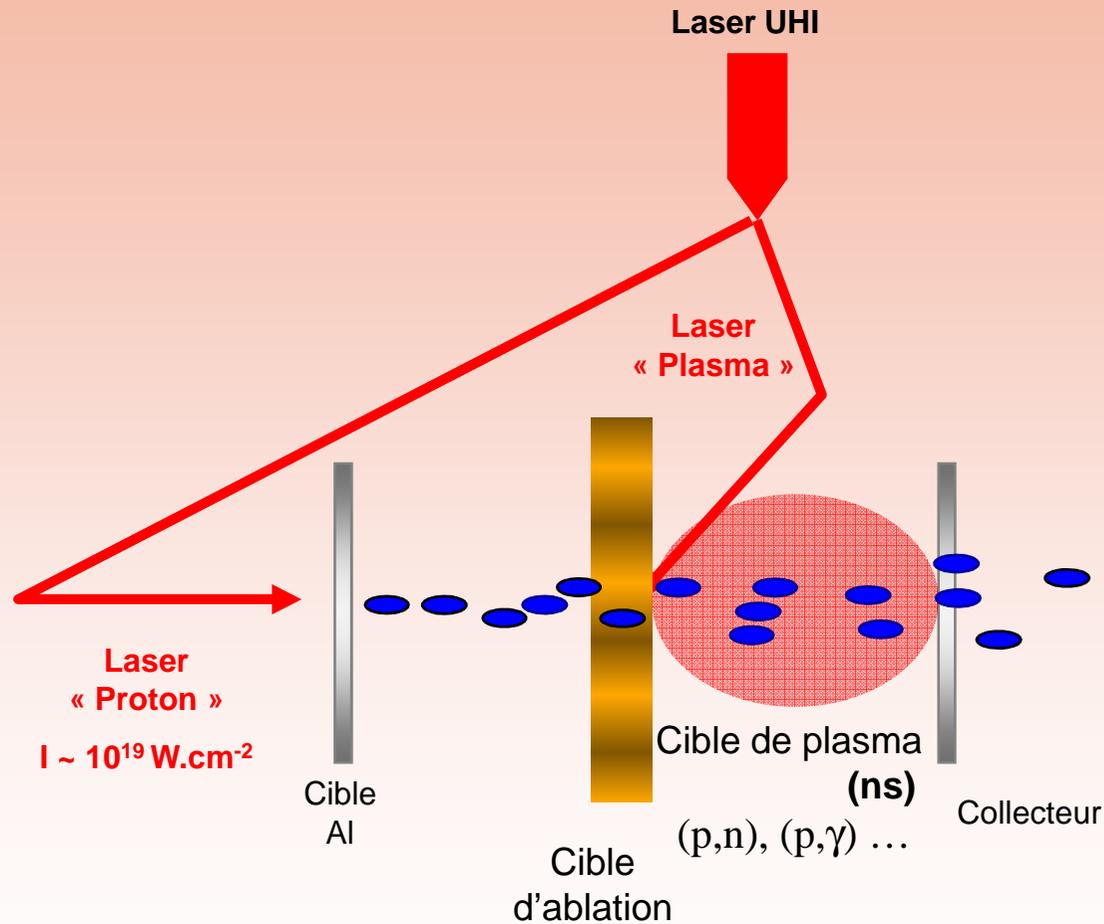
Futur proche:

augmentation des intensités lasers ($10^{23} - 10^{26} \text{ W.cm}^{-2}$) ELI, ILE,
augmentation de l'énergie dans une impulsion laser; PETAL, HIPER

+ de particules à des énergies plus élevées

DIAGNOSTICS à développer (cf Présentation de Cyril Plaisir)

Perspectives: application de ces faisceaux en physique nucléaire:
étude de propriétés nucléaires dans des cibles à l'état de plasma



Ionisation dans un plasma:

- Modification de pouvoir d'arrêt
- perturbation de processus de conversion interne

Effet d'un champ électromagnétique fort sur le couplage entre le noyau et le cortège électronique