



Laboratoire Leprince-Ringuet

Ecole Polytechnique, Palaiseau

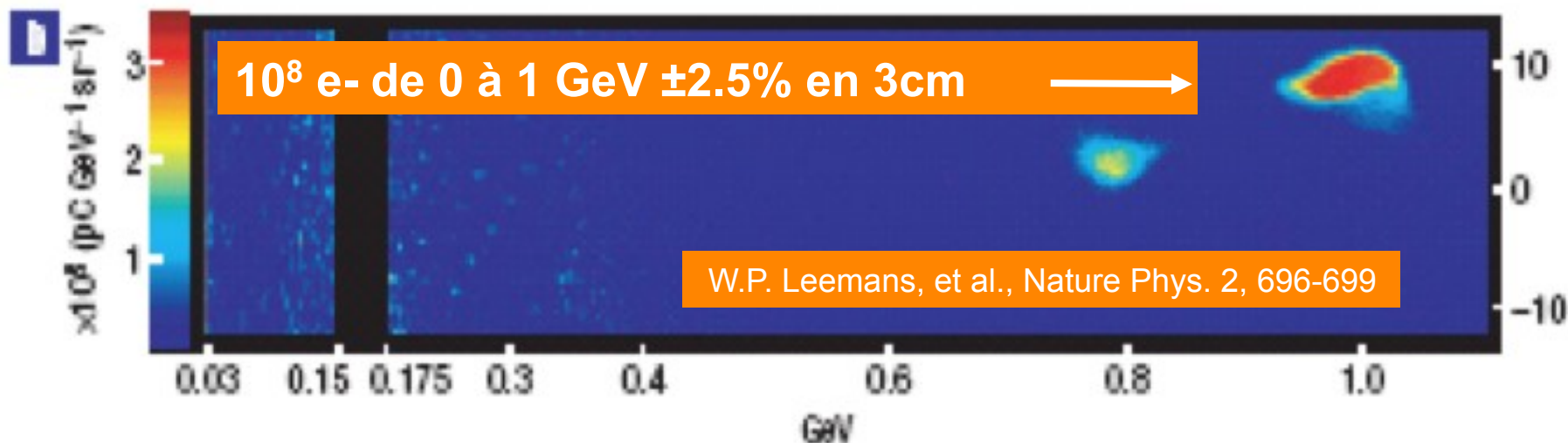


Groupe d'Accélération par Laser et Ondes Plasma



Exploration de nouvelles techniques d'accélération de particules (surtout d'électrons)

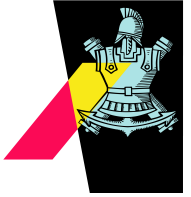
Est-ce que l'on peut ignorer ceci?





Laboratoire Leprince-Ringuet

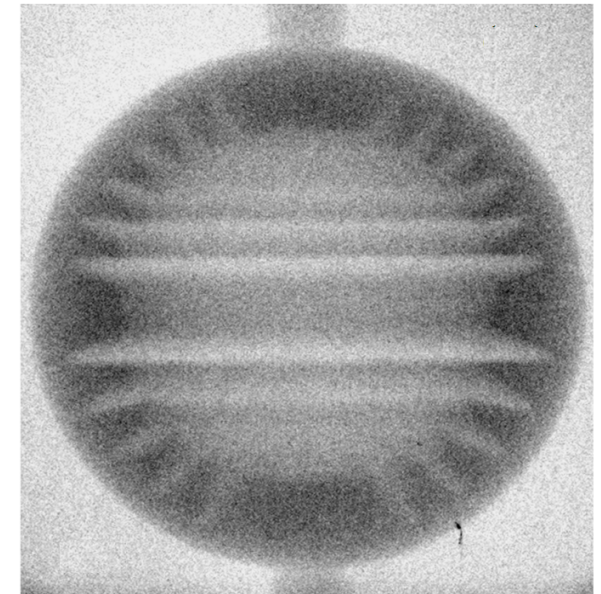
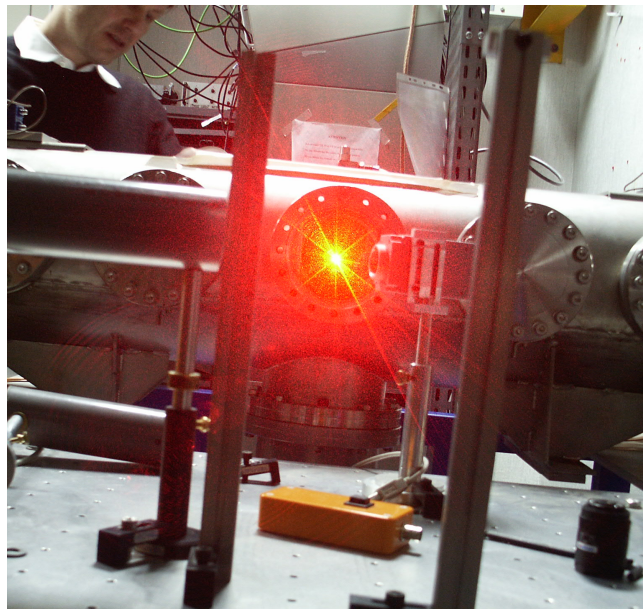
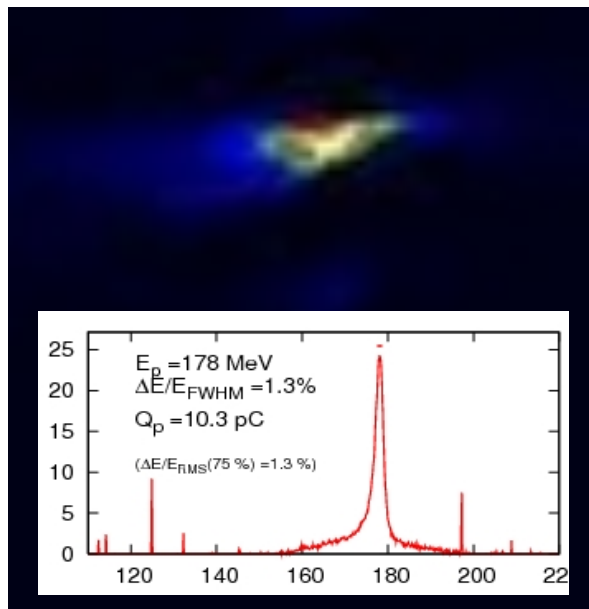
Ecole Polytechnique, Palaiseau



Groupe d'Accélération par Laser et Ondes Plasma



Développements récents et défis futurs
dans l'accélération de particules par ondes plasma



introduction et concepts

défis presents and futurs pour accelerateurs plasma

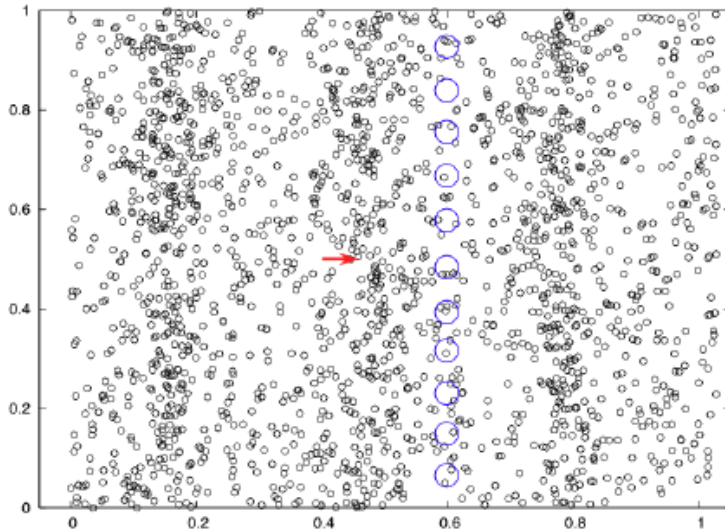
développements récents en acceleration laser-plasma

programme actuel et contexte futur

what is a plasma wave?

Periodic variation (in x and t) of the electron density n_e !

sound wave

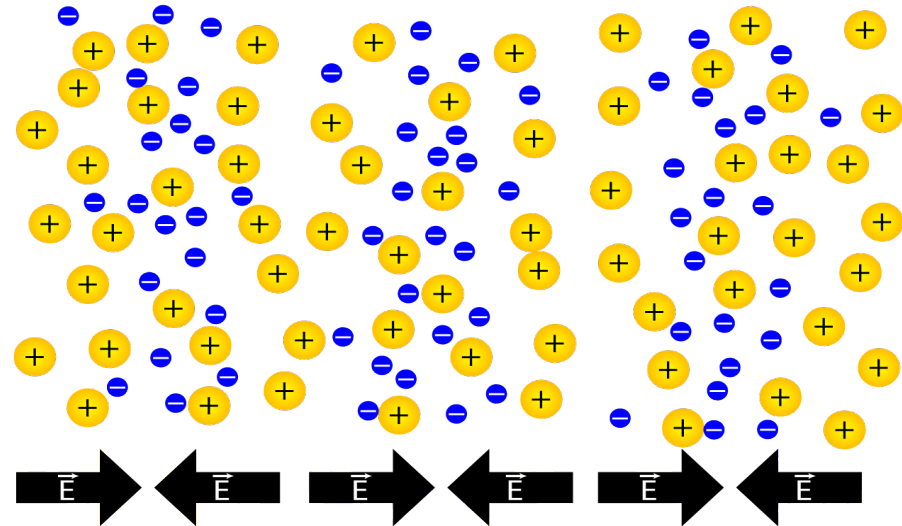


neutral molecular gas

collisions : short range force

sound speed $v \propto 1/\sqrt{\rho}$

plasma wave



(fully or partly) ionized gas

electrostatic interaction: long range force

plasma frequency: $\omega_p \propto \sqrt{n_e}$

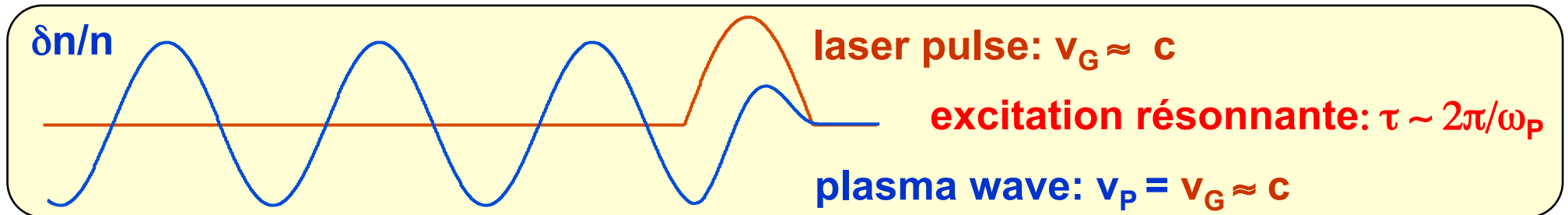
The plasma wave is accompanied
by a strong electric field

$$E_z = \frac{m_e c \omega_p}{e} \frac{\delta n_e}{n_e} \approx 300000 \text{ MV/m}$$

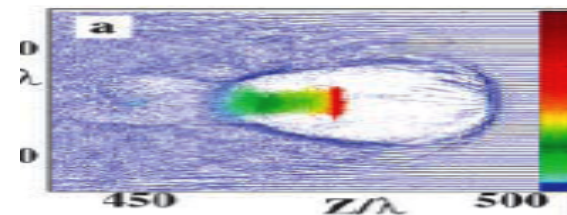
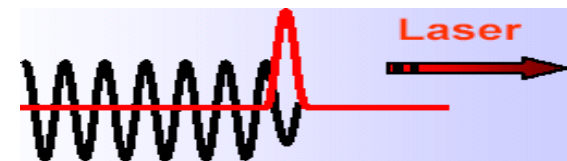
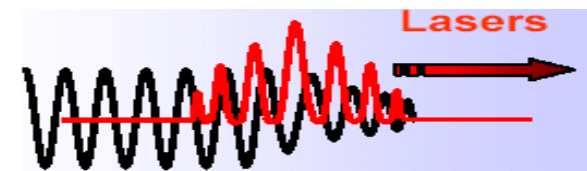
(for $n_e = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) $\delta n_e / n_e = 1$

comment exciter une onde plasma

force ponderomotive force (mouvement «en huit» des electrons plasma) $F \propto \nabla I$



- Battement laser (PBWA)
1ère génération, impulsion longues
- Sillage laser linéaire (LWFA)
impulsion courtes, CPA, Ti-Sapphire
- Sillage « plasma » (PWFA)
faisceau chargé, UCLA/SLAC 24→80GeV
- Blowout- (Bubble-, Cavitation-) regime
 $\delta n_e/n_e > 1$, piégeage massif d'e- du plasma



acceleration of electrons by the plasma wave

- external injector (e.g. RF photocathode gun)
- injection of «thermal» plasma electrons



Tajima, T. & Dawson, J.M., Phys.Rev.Lett. **43** 267 (1979)

scaling laws in linear regime ($\Delta n_e/n_e \ll 1$)

- optimisation for $P_{\text{LASER}} = P_{\text{crit}}$ (relativistic autofocussing) fixes n_e (hence pulse duration) free parameters:

- P, λ laser pulse power, laser wavelength

- $\delta = \Delta n_e/n_e$ plasma wave amplitude

- scaling laws [example: $\lambda=800\text{nm}$, $P=1\text{PW}$, $\delta=0.2$]

- plasma wave-length: $\lambda_p \sim \lambda \cdot P^{1/2} = 200\mu\text{m}$ (“ $\approx$ ” 1.5 THz)

- max. longitudinal field: $E_z \sim \lambda^{-1} \cdot P^{-1/2} \cdot \delta = 17\text{GV/m}$

- dephasing length: $L_\phi \sim \lambda \cdot P^{3/2} = 11\text{m}$

- max. energy gain: $\Delta W \sim P = 170\text{GeV}$

- increase P_{LASER} at fixed pulse energy $\Rightarrow$ reduce pulse duration

- *not considered*:

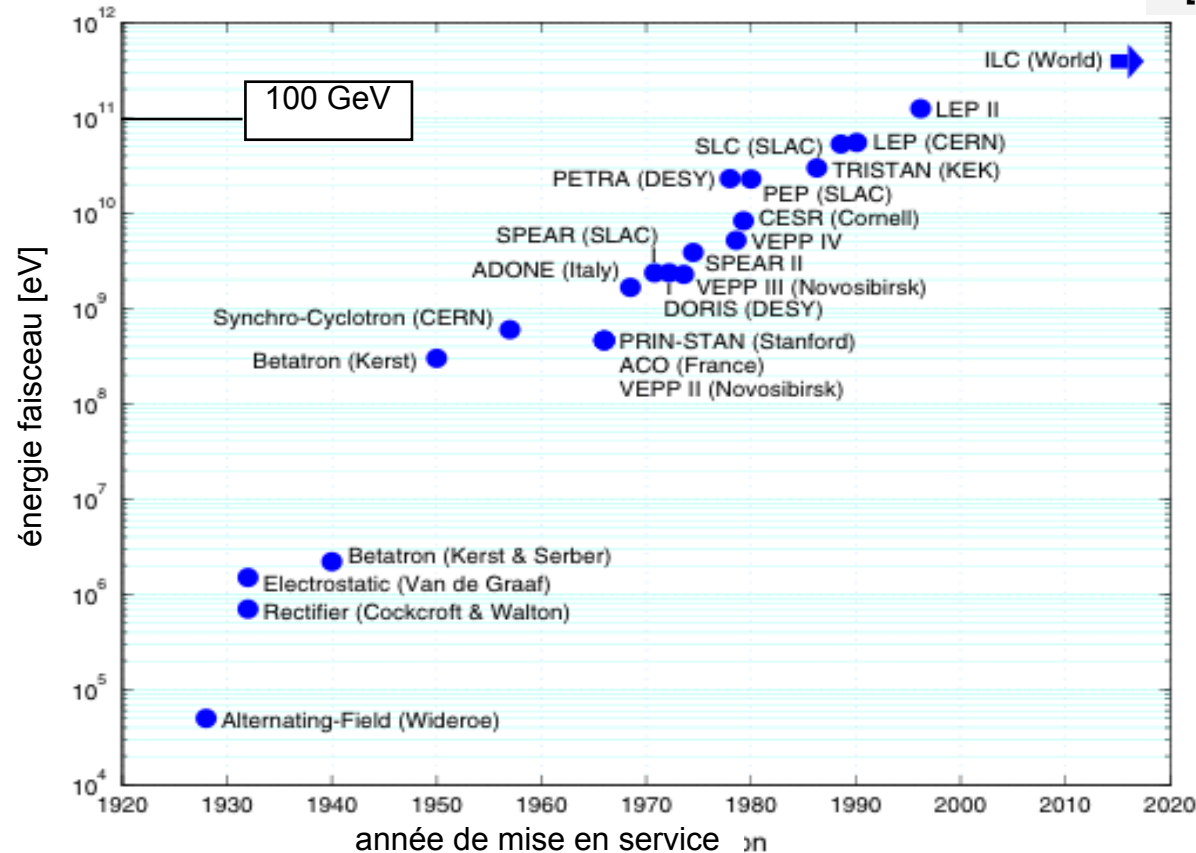
- *beam-loading* : modification of plasma wake field by the field of the bunch

- *pump-depletion* : laser pulse energy drops as it propagates

- multi-stage acceleration

why get interested in laser acceleration?

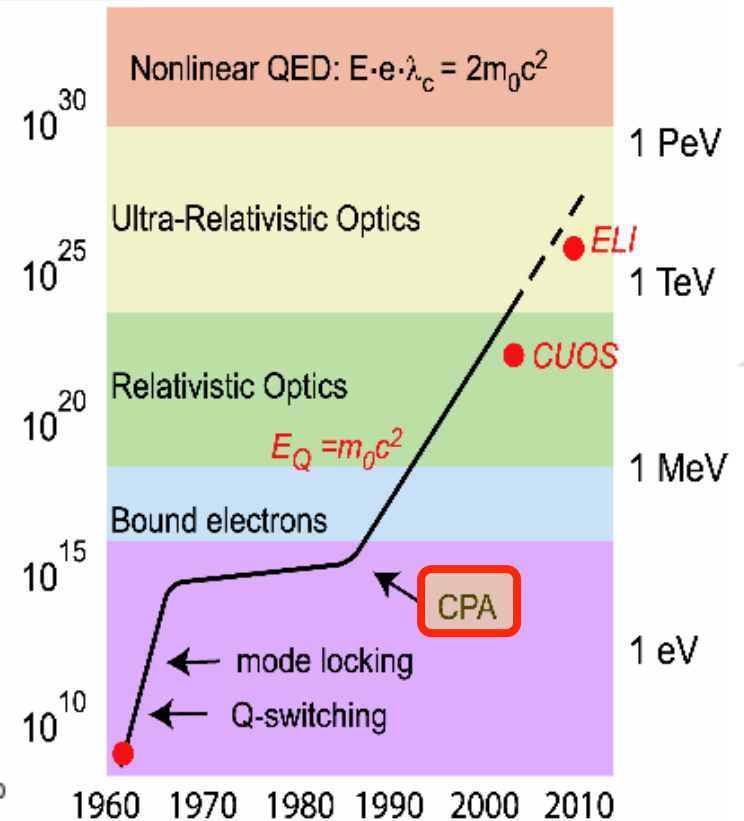
RF accelerators (e-/e+)



focussed intensity
[Wcm⁻²]

LASERS

e- osc.
energy



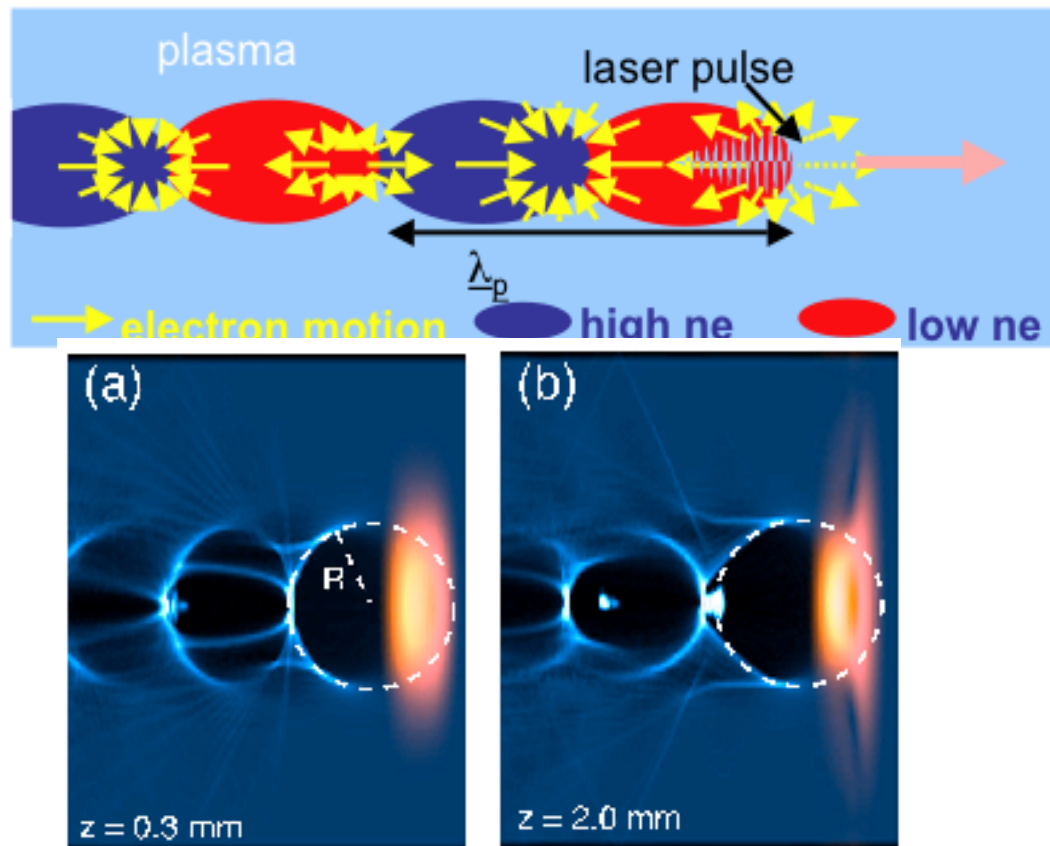
- LINACS: energy = gradient $\times$ length $\rightarrow$ long machines
- LASERS: progression in intensity $\rightarrow$ technology breakthrough

CPA: chirped pulse amplification

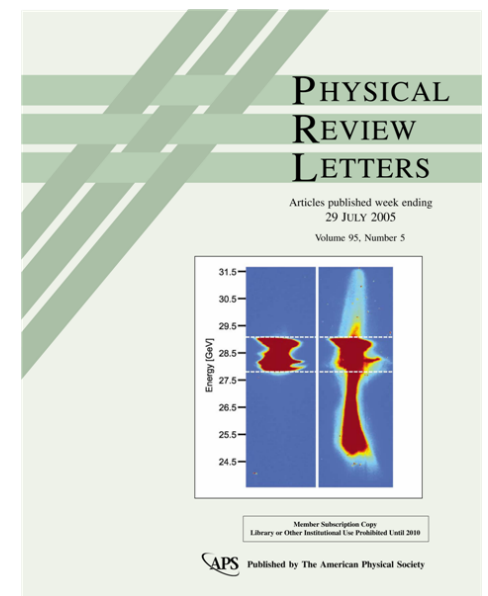
major breakthrough in 2004: bubble regime

four groups reach “bubble” regime (a.k.a. blowout or cavitation)

- in LWFA: RAL (UK), LOA (France), LBL (US)
 - in PWFA: UCLA/SLAC (US) “energy doubling” of SLAC beam
- total blowout of plasma electrons**
self-injection of plasma electrons behind wake

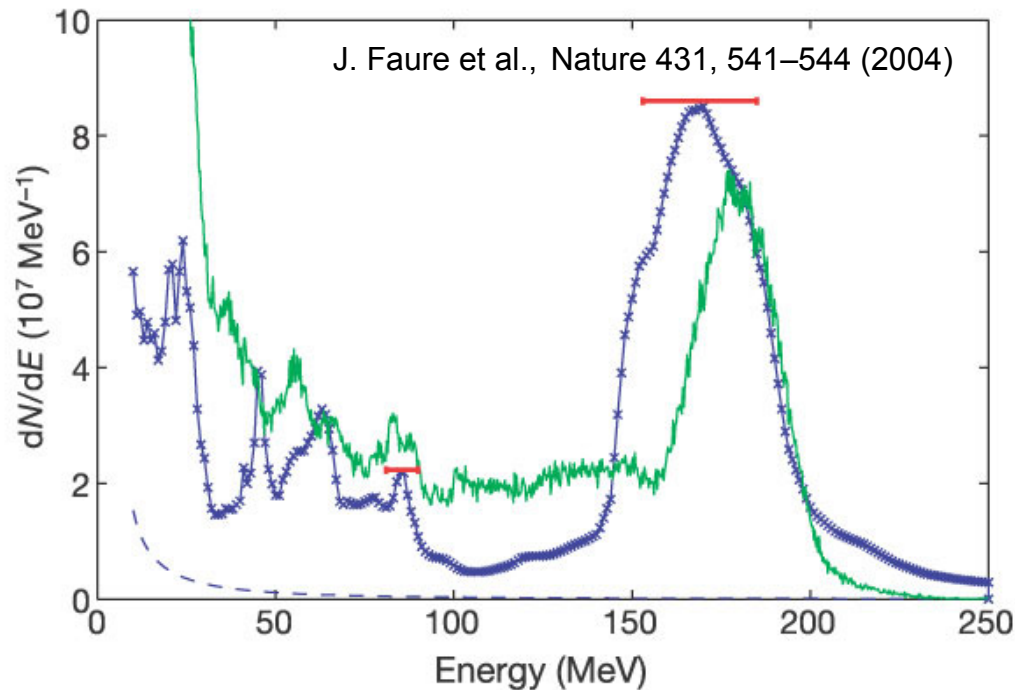


Wei Lu (UCLA), AAC2006, Lake Geneva



high-gradient electron acceleration in the bubble regime

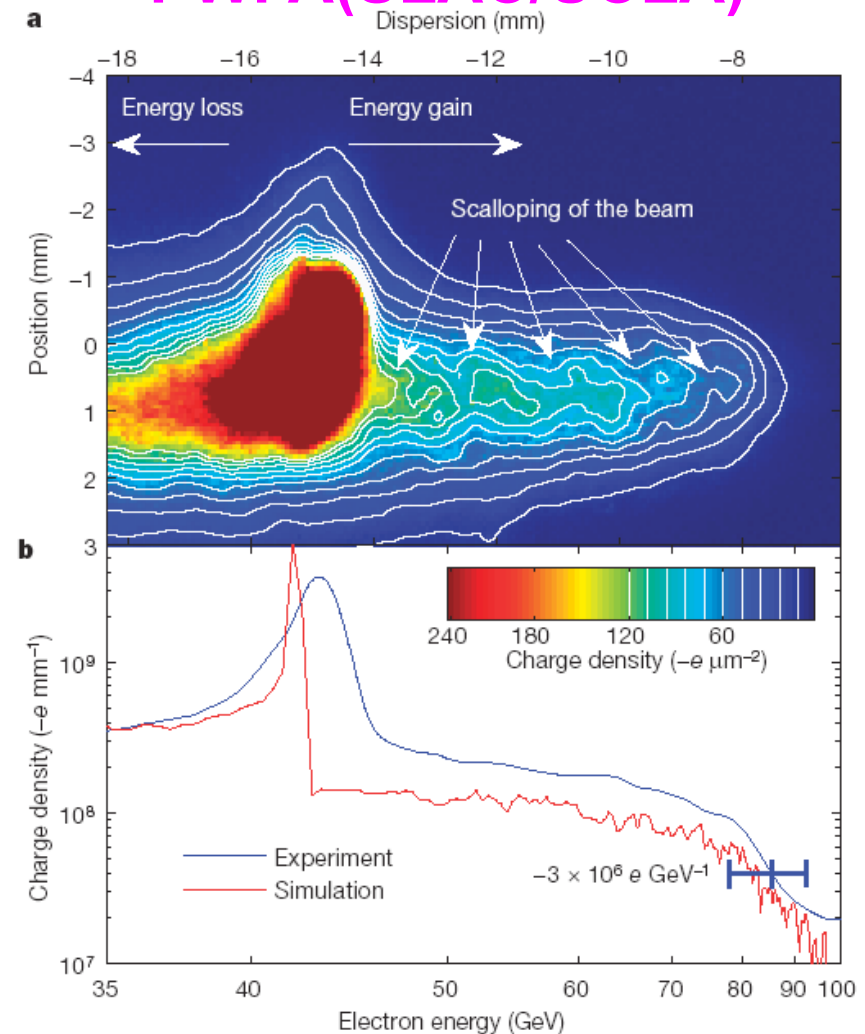
LWFA (LOA, France)



self-injection of plasma electrons:

- very nonlinear
- induces fluctuations
- hard to control / lack of flexibility
- not reproducible: 1 out of 3-5 shots

PWFA (SLAC/UCLA)



J.M. Hogan et al., Phys. Rev. Lett. 95, 054802 (2005)

introduction et concepts

défis presents and futurs pour accelerateurs plasma

développements récents en acceleration laser-plasma

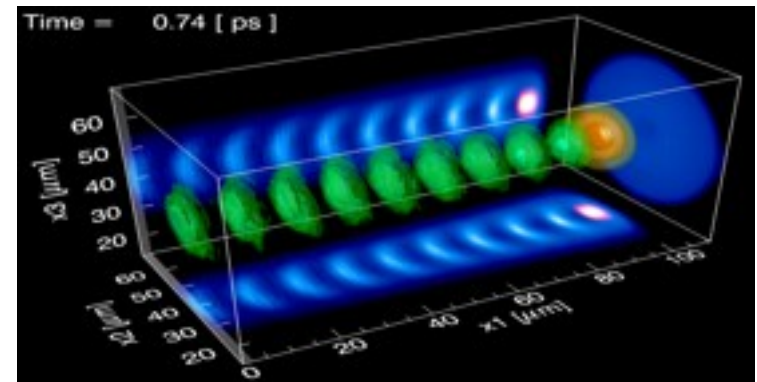
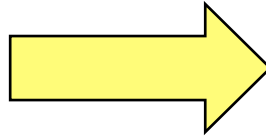
programme actuel et contexte futur

Augmenter le gradient: des ondes RF aux ondes plasma

→ diminuer les dimensions des structures acc.



$$E_z < 100 \text{ MV/m}$$



$$E_z = m_e c \omega_p / e \approx 100 \text{ GV/m}$$

klystron



laser de haute puissance (impulsion courtes)

- $E=O(10\text{J})$, $\Delta t=O(10\text{fs}) \Rightarrow P=O(10\text{PW})$
- taux de répétition et rendement énergétiques : **problématiques**

cavité RF



jet de gaz, décharge, capillaire ($n \approx 10^{17}-10^{19}\text{cm}^{-3}$)

- **stabilité** : → maîtrisé ✓ (contre-propagatif)
- **guidage** : *beam-loading, pump-depletion*
- **couplage** du laser à l'entrée

onde RF



onde plasma ($\lambda_p \approx 10-100\mu\text{m}$)

- **régime**: linéaire, déferlement, bulle (*blow-out*)
- **focalisation** transverse, $\Delta E/E$, ε_T ,
- **stabilité**, mouvement des ions, baquets utiles

Les défis présents et futurs pour l'accélération par laser

paramètres d'un paquet d'un faisceau de particules :

charge, $\langle$ position $\rangle$, $\langle$ angle $\rangle$, $\langle$ énergie $\rangle$, dispersion en E, émittance transverse, longueur

	LWFA	ILC	unit
○ augmenter l'énergie ➤ allonger la distance d'accélération	0.2–1	250	GeV
○ augmenter la charge ➤ haute densité de gaz? injection externe?	0.01–0.1	3	nC
○ réduire l'espacement des paquets ➤ laser rep. rate: “10Hz”, multi plasma-wave buckets?	0.1–10	$370 \cdot 10^{-9}$	s
○ dispersion en énergie (“monochromaticité”)	1%	0.1%	
○ longueur (ou durée) des paquets ➤ «aubaine ou handicap?», mesure difficile	<3 (?)	300	μm
○ émittance transverse (“concentrabilité”)	<3 (?)	19/0.07	mm.mrad
○ stabilité et contrôle des faisceaux (“reproductibilité”) charge, angle (pointé), énergie			

introduction et concepts

défis presents and futurs pour accélérateurs plasma

développements récents en accélération laser-plasma

programme actuel et contexte futur

maîtrise de l'énergie du faisceau: Injection contrôlée (LOA,2006)

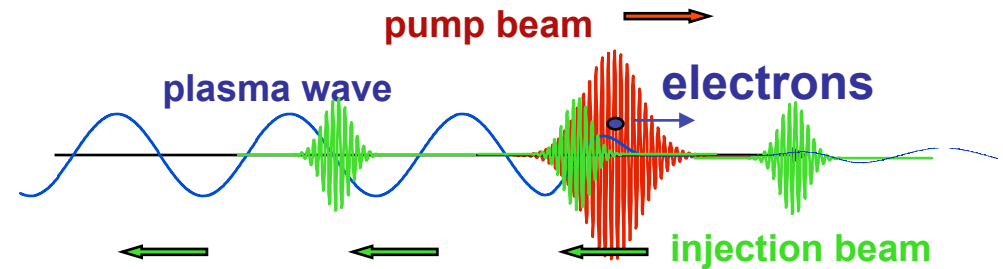
- **2 impulsions contra-propagatives**

laser existant: 30fs, ~1J, ~30TW

faisceau pompe: 700mJ

faisceau injection: 250mJ

- **injection contrôlée d'e- dans plasma: ajustement de l'énergie**



$Z_{inj}=225\text{ }\mu\text{m}$ Faure et al 2007 Plasma Phys. Control. Fusion 49 B395-B402

$Z_{inj}=125\text{ }\mu\text{m}$

$Z_{inj}=25\text{ }\mu\text{m}$

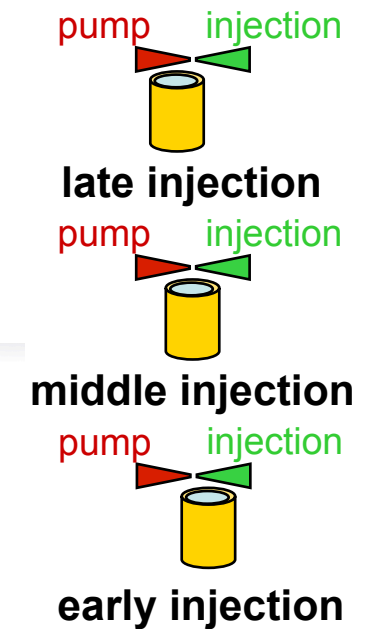
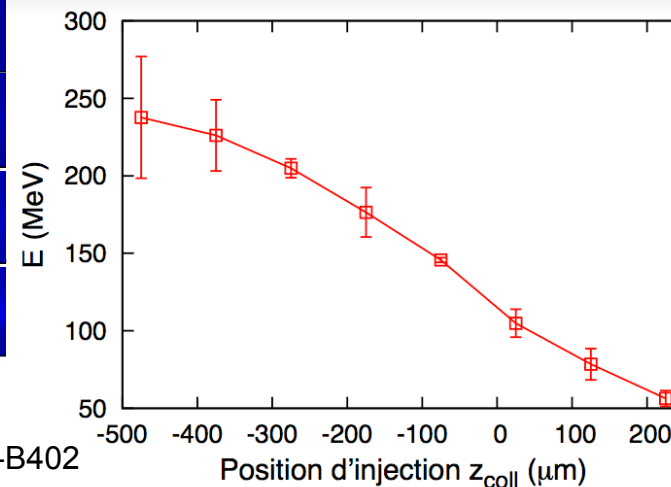
$Z_{inj}=-75\text{ }\mu\text{m}$

$Z_{inj}=-175\text{ }\mu\text{m}$

$Z_{inj}=-275\text{ }\mu\text{m}$

$Z_{inj}=-375\text{ }\mu\text{m}$

400 300 200 100
Energy (MeV)



J Faure et al 2007 Plasma Phys. Control. Fusion 49 B395-B402
J.Faure et al., Nature 444, 737-739

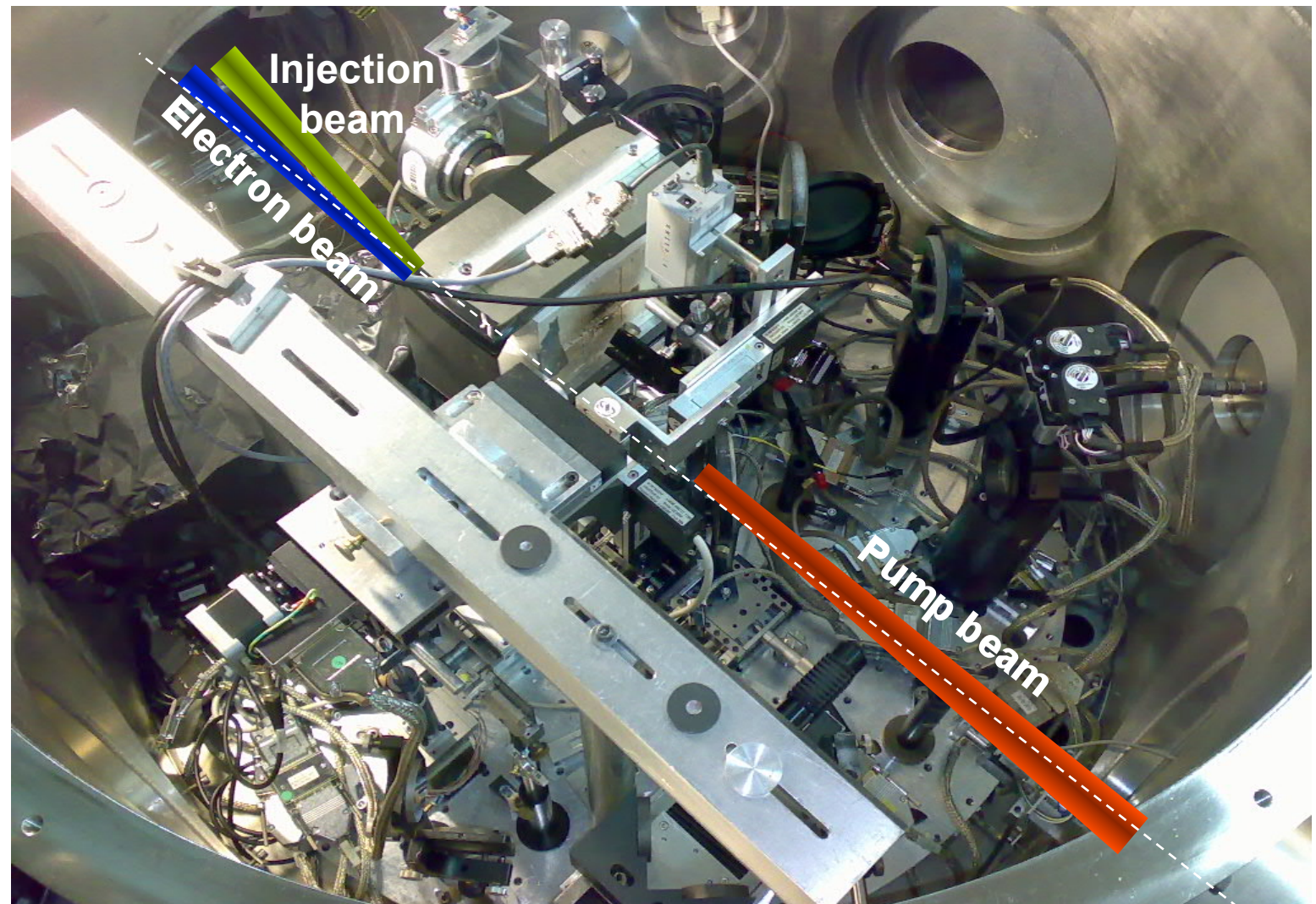
colliding pulse injection: experimental setup (2008)

○ LASER

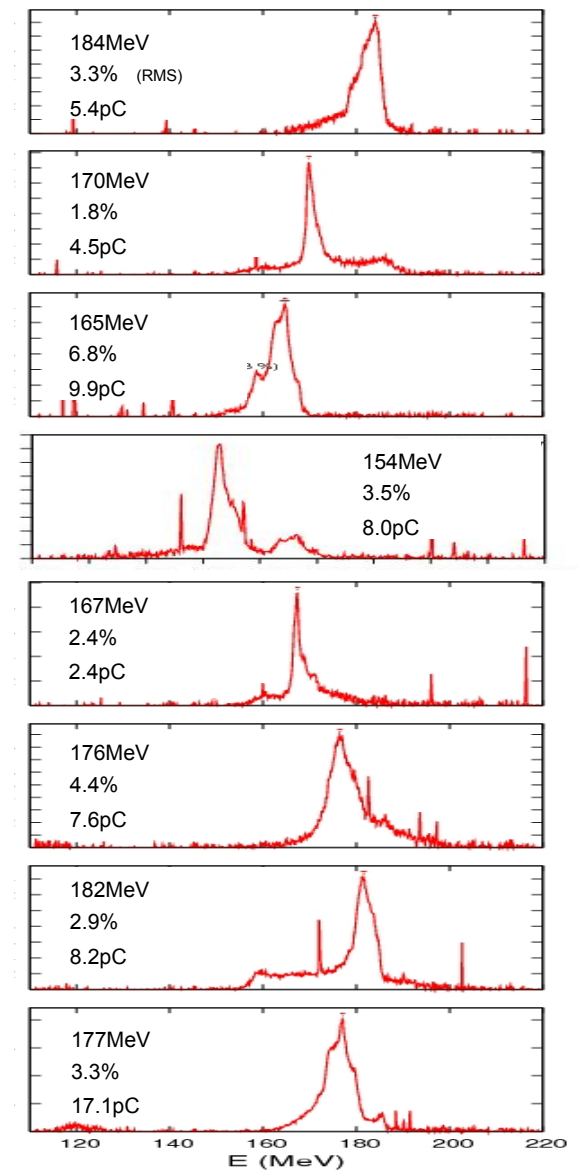
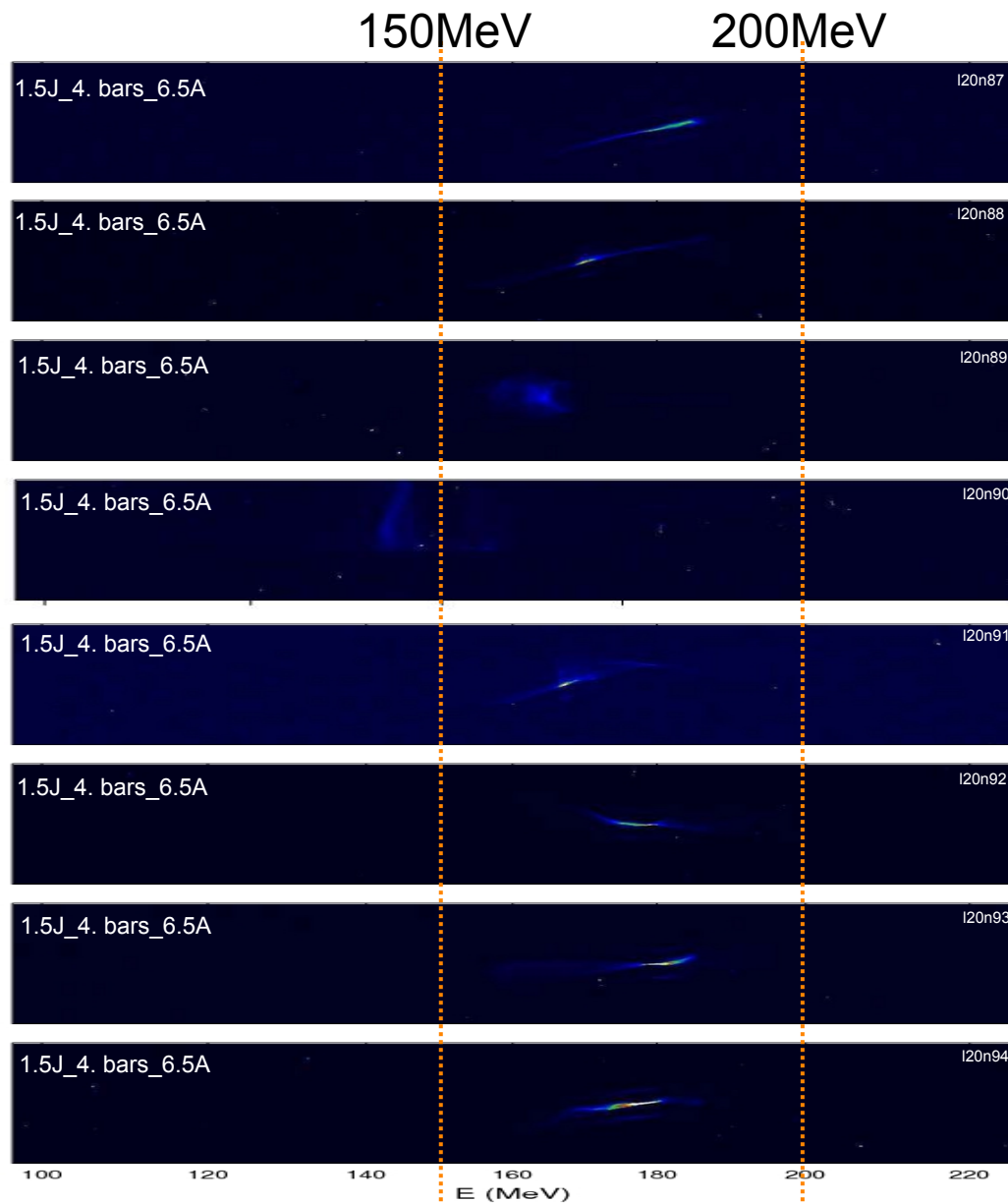
- TiSaph: 50TW 30fs
- 2 beams
 $a_0=1.3$ $a_1=0.6$
- non-collinear
angle= 7°
- <1 shot/ 10sec

○ gas jet

- length = 3mm
- e⁻ density
 $n_e=3.10^{18}-2.10^{19}\text{cm}^{-3}$
(via pressure)



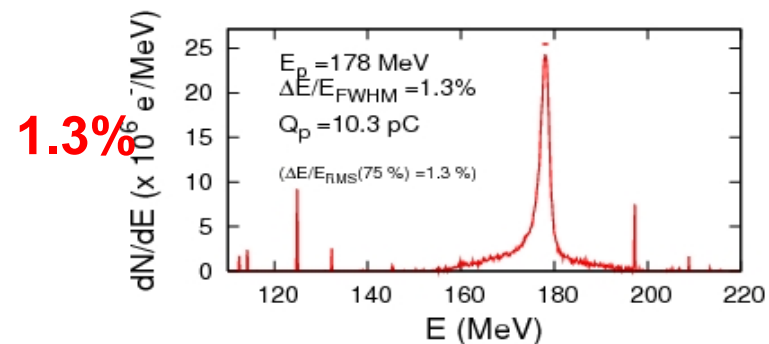
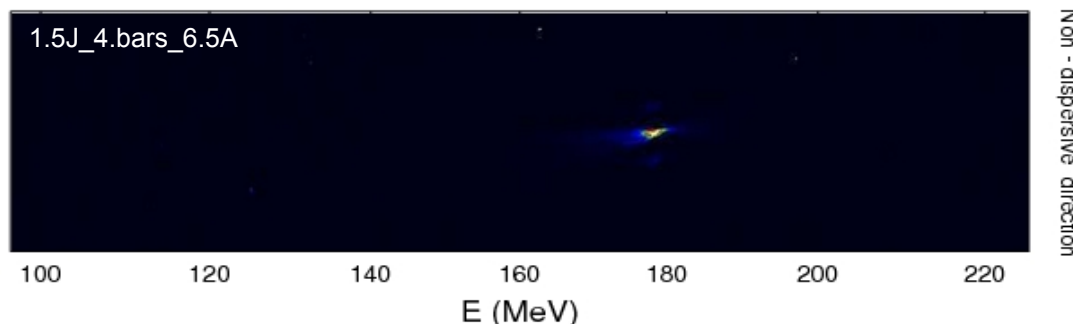
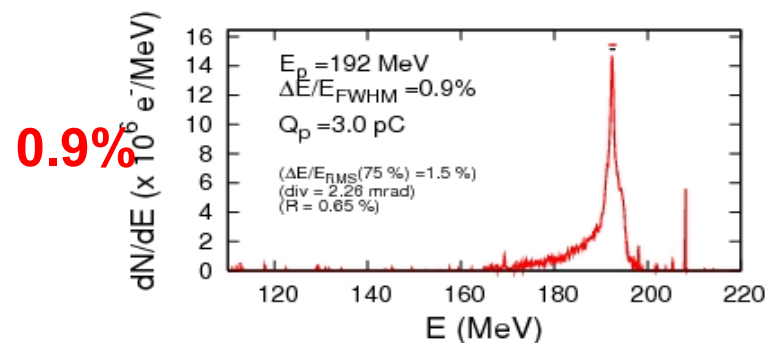
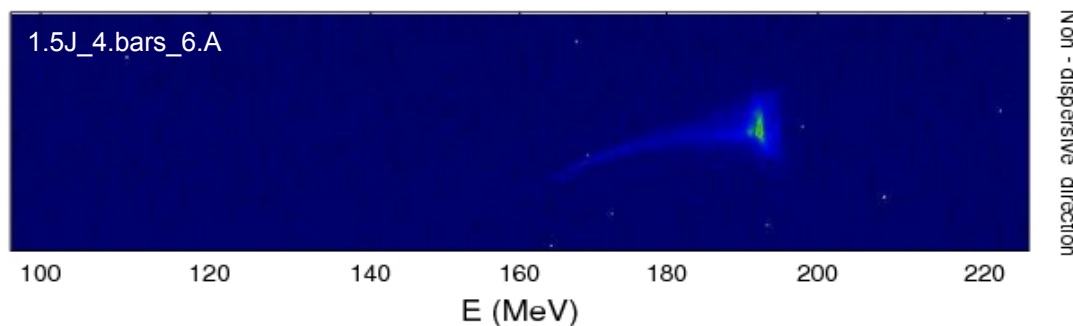
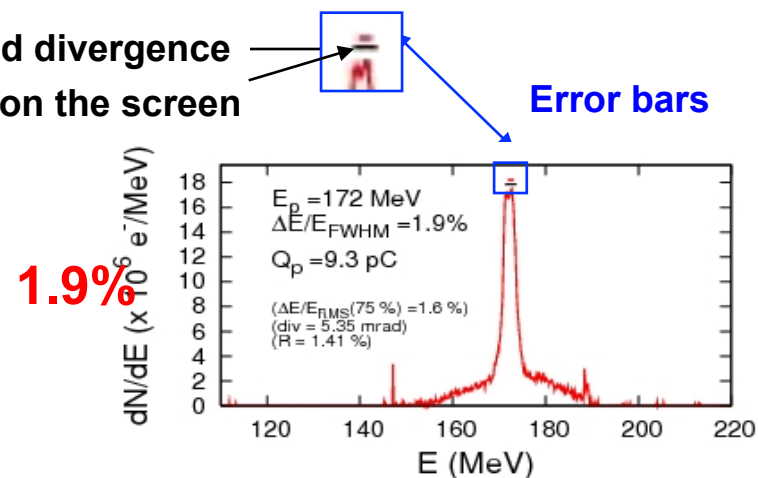
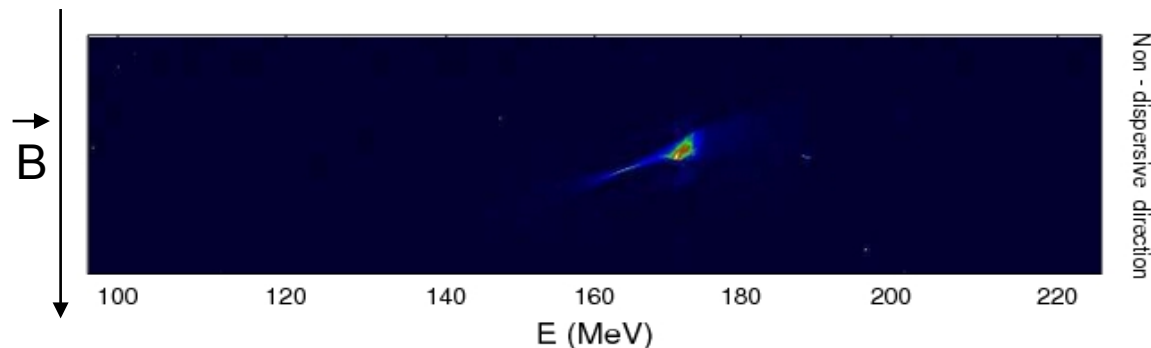
Stabilité du faisceau : 8 tirs consécutifs (AAC08, A.B.)



A. Ben Ismail, Advanced Accelerator Concepts, 2008, Santa Cruz, USA

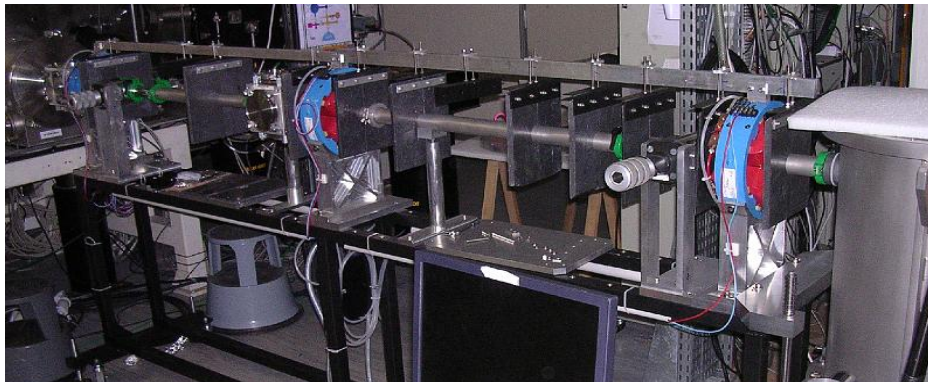
Monochromaticité : observat° de dispersions $\Delta E/E$ de 1%

- assuming 3mrad divergence
- deduced from direct measurements on the screen

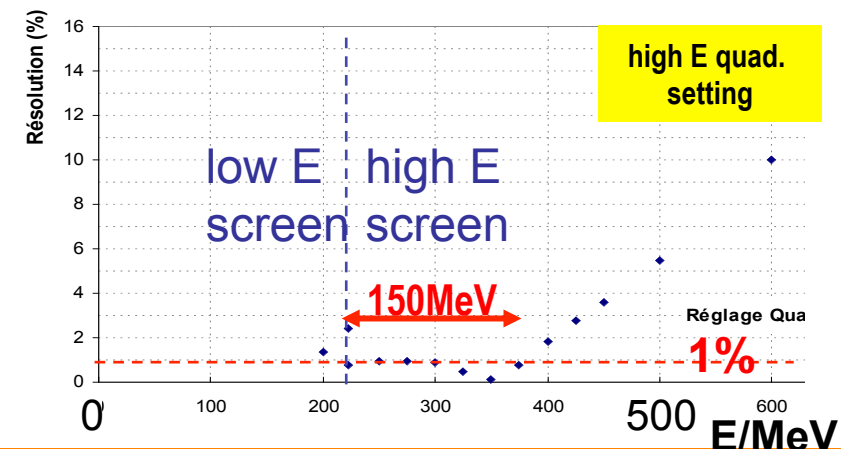
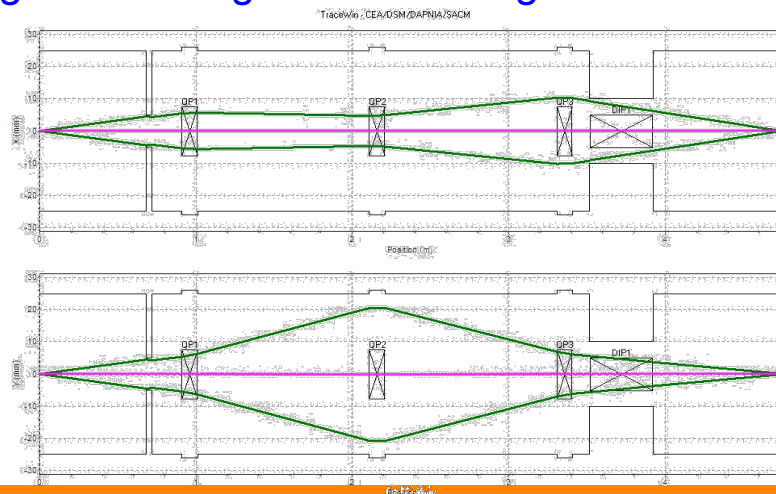


A. Ben Ismail, Advanced Accelerator Concepts, 2008, Santa Cruz, USA

Diagnostics électrons (LLR): spectromètre haute résolution en E

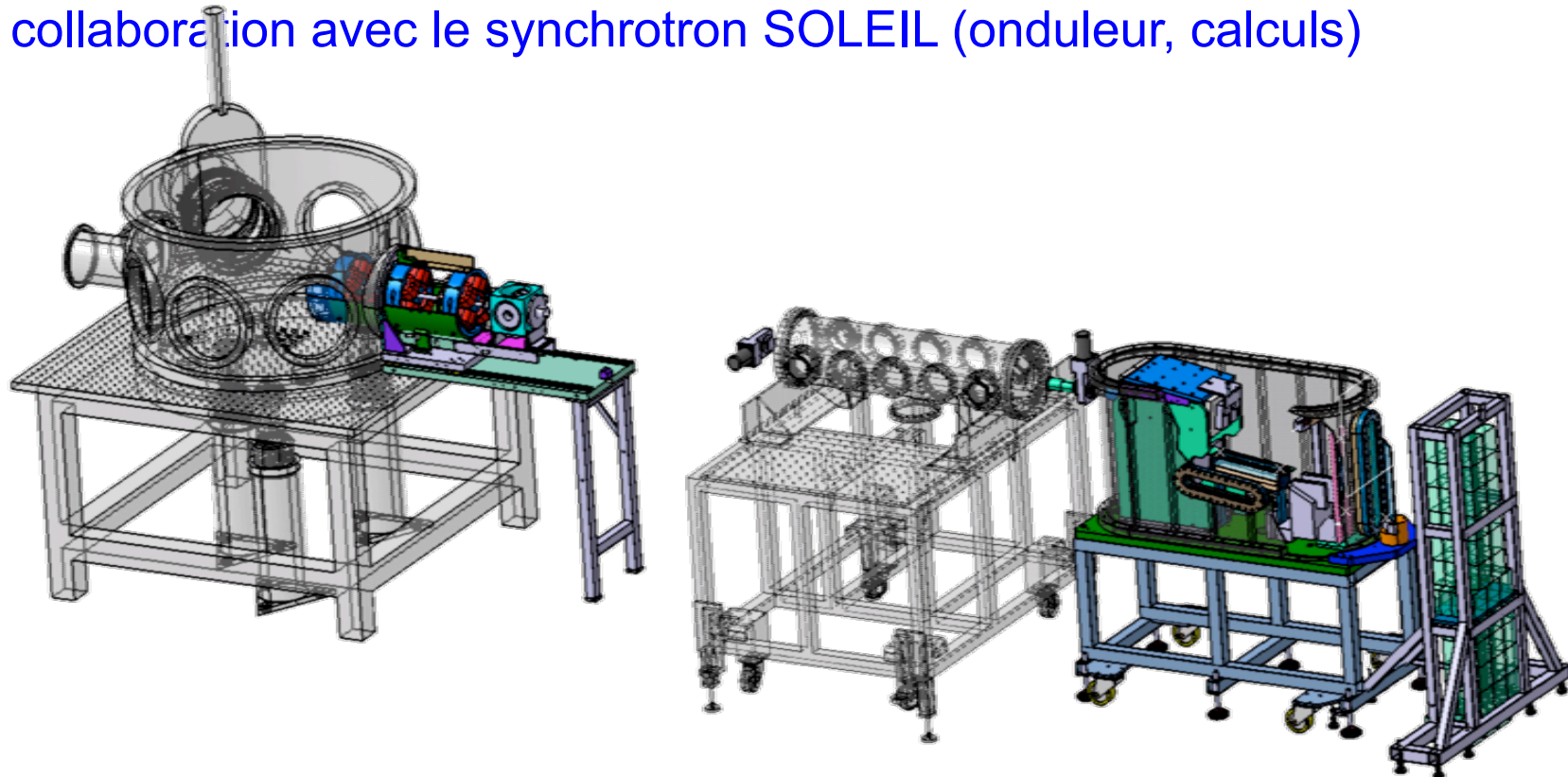


- quadrupole triplet (FODOF, $\int |dB/dx| dz = 50 \text{ T}$) + permanent dipole ($\int B dz = 0.36 \text{ Tm}$)
- E resolution $< 1\%$ over 100-150 MeV over 100-400 MeV range
- 2 energy ranges: 100-220 MeV, 220-1200 MeV $\Rightarrow$ 2 phosphor screens
- avoid resolution degradation by multiple scattering $\Rightarrow$ transport in vacuum
- stigmatic imaging for particular energy values
- in general: astigmatic $\Rightarrow$ divergence estimation $\Rightarrow$ **E resolution** shot to shot

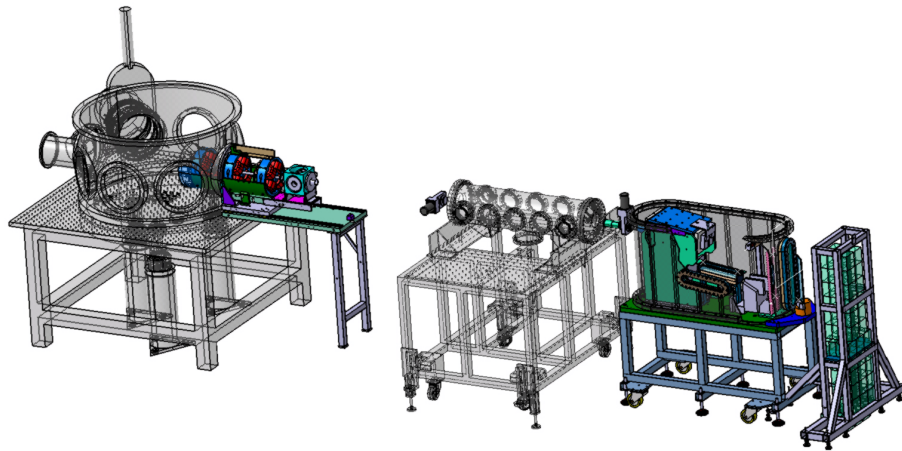


applications: injection dans un onduleur (→ laser à e- libres)

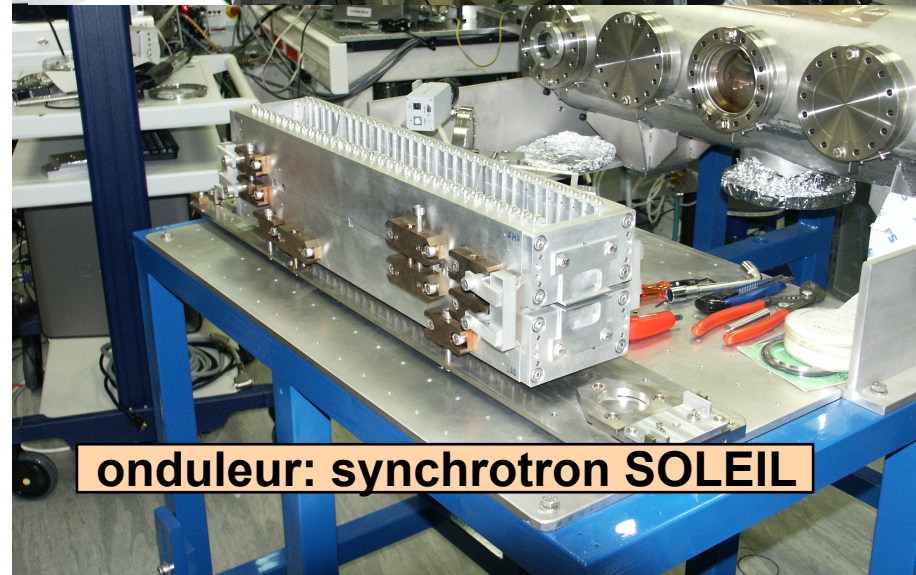
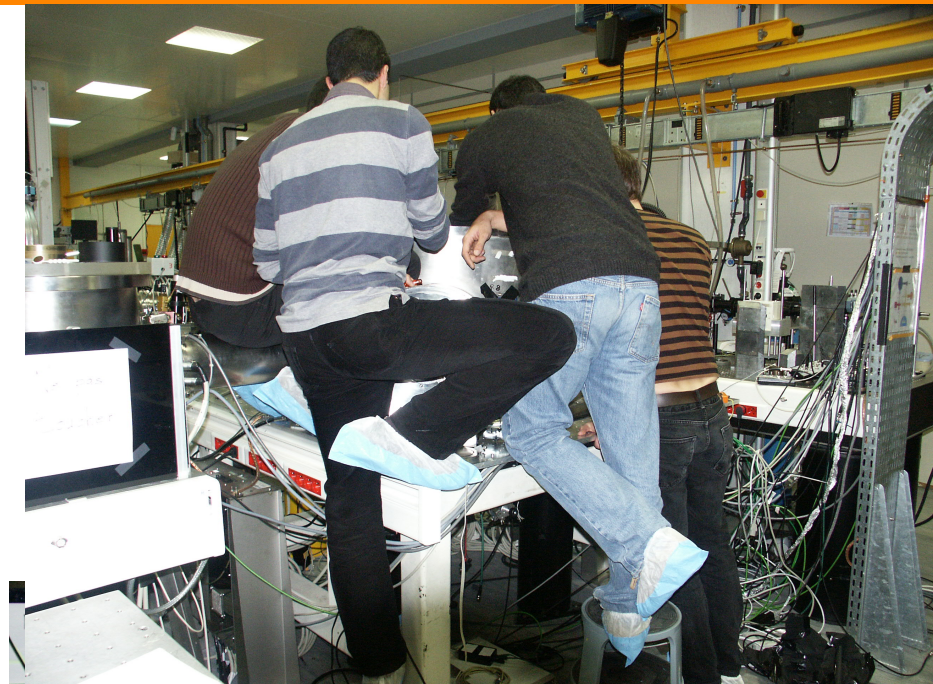
- exploiter la haute brillance des électrons pour générer de rayons X (XUV)
- uniquement émission spontanée (pas de SASE-XFEL)
- rayonnement onduleur comme diagnostic de faisceau d'e⁻ (émittance?)
- bon exercice pour l'injection dans un 2ème étage
- modification de la
- collaboration avec le synchrotron SOLEIL (onduleur, calculs)



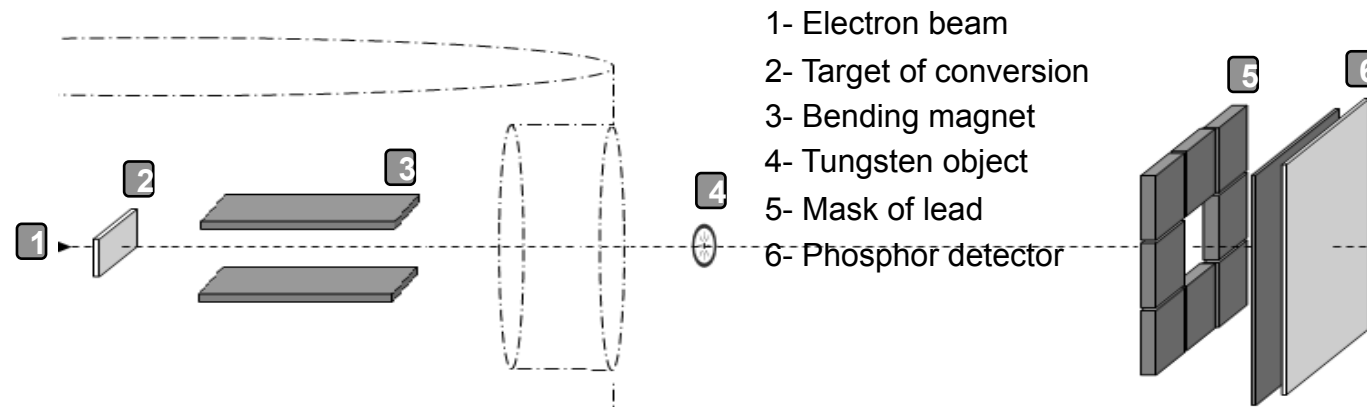
applications: expérience onduleur au LOA (2009/2010)



ligne e- : plus compacte, plus puissante



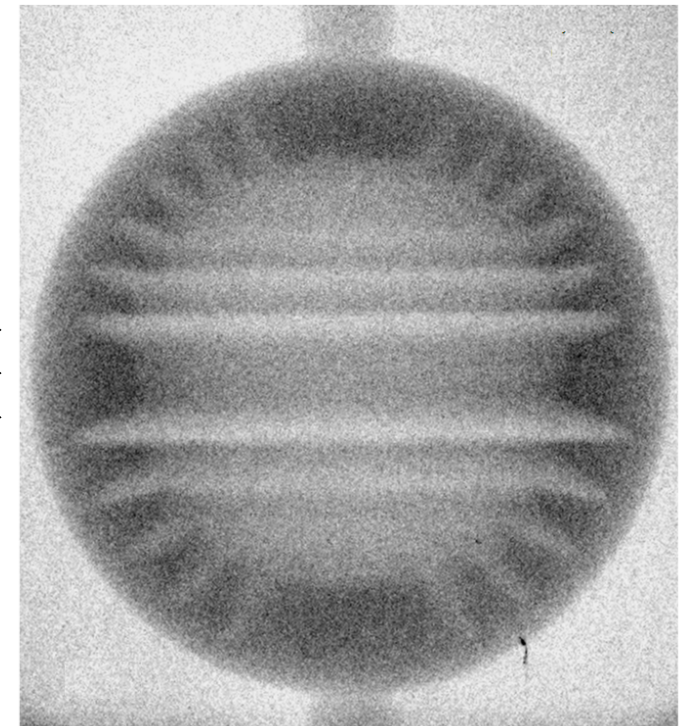
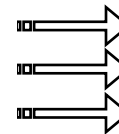
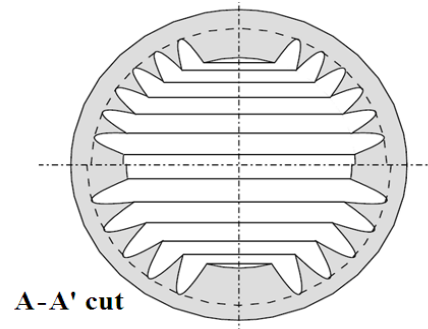
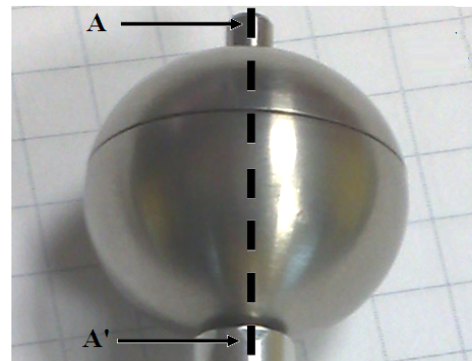
applications : la radiographie gamma



LOA & LLR

Ahmed BEN ISMAIL, 13th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing (APCNDT 09)

Conversion Bremsstrahlung
source



Frontière de l'énergie : augmenter la longueur d'accélération

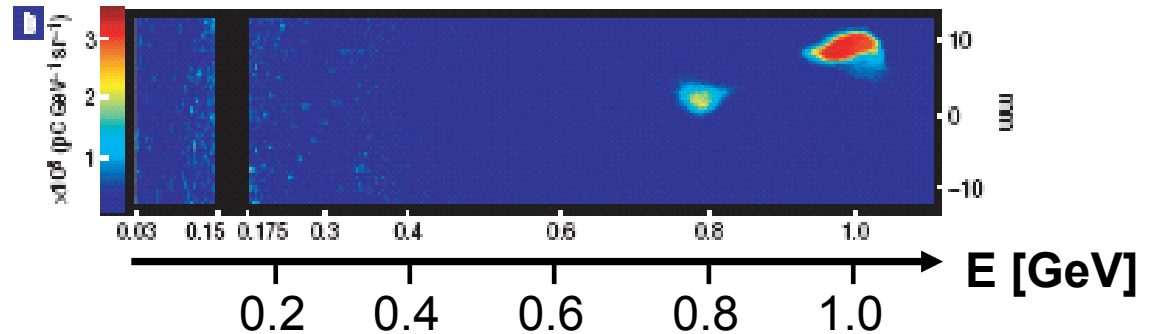
○ guidage de l'onde plasma (et du laser):

- auto-focalisation dans une cellule de gaz
- canaux plasma créés par laser
- capillaires « passifs »
- **décharge dans un capillaire**

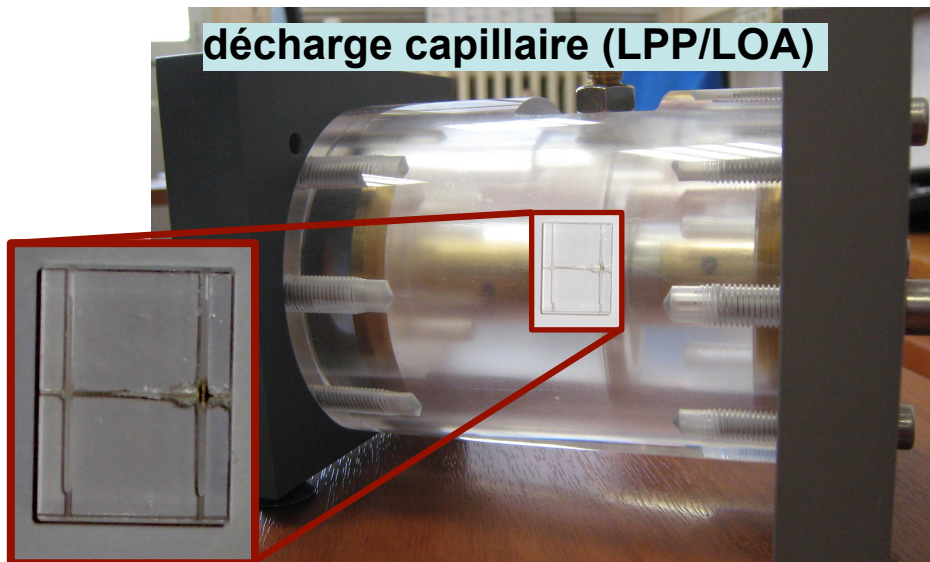
○ régime d'auto-injection (= bulle plasma = *blowout*)

○ opération stable à 450 MeV

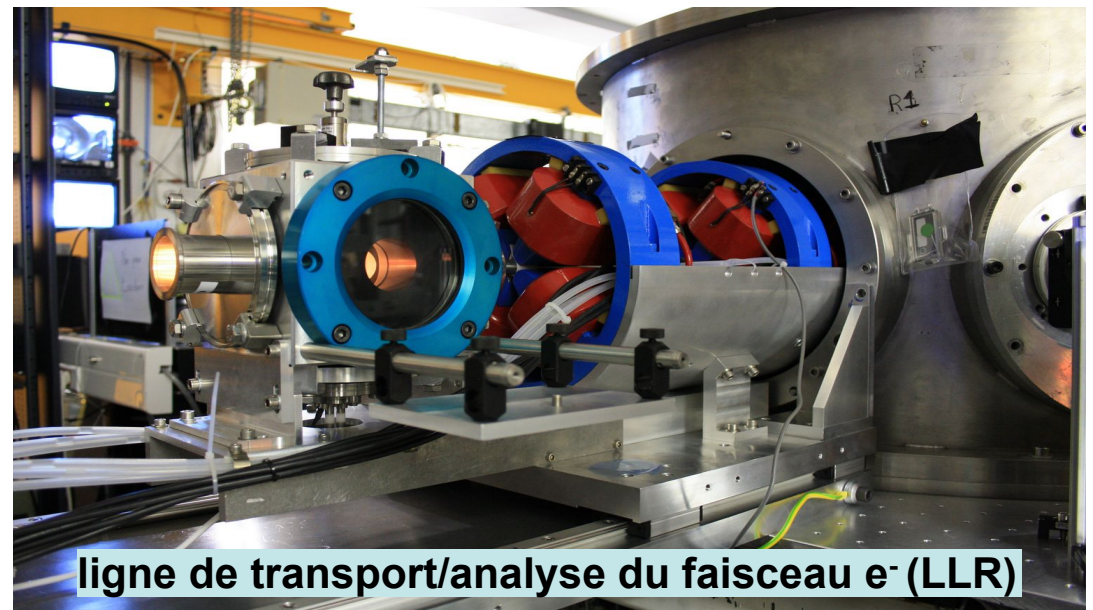
○ **décharge capillaire développé par LOA & LPP, manip en cours**



W.P. Leemans, et al., Nature Phys. 2, 696-699



décharge capillaire (LPP/LOA)



ligne de transport/analyse du faisceau e^- (LLR)

introduction et concepts

défis presents and futurs pour accélérateurs plasma

développements récents en accélération laser-plasma

programme actuel et contexte futur

le plat suivant : l'émittance

mesure de l'émittance transverse (à ~ 100–200 MeV)

- motivation: emittance supposed to be small $\Rightarrow$ high luminosity (one day)
transverse size of accelerating zone $\ll$ laser spot (plasma simulations)
 $\Rightarrow \varepsilon_{N,x} \approx \Delta x \times \Delta \theta_x \times \gamma \approx 20 \mu\text{m}/10 \times 3 \text{mrad} \times 350 \approx 2 \text{ mm.mrad}$
- what physics determines the transverse emittance?
- can one efficiently control the phase space volume at injection?
- small repetition rate & strong shot-to-shot fluctuations of beam parameters
 $\Rightarrow$ need **single-shot measurement** (phase-space sampling, MS / PP)

mesure de l'émittance longitudinale (à ~ 100–200 MeV)

- motivation: reduction longueur de bunchs
- limite supérieure connue, par $\Delta E/E$ et mesure de la durée des bunchs

Accélération Laser & Plasma partout dans le monde

forte concentration des R&D Accélération

Laser & Plasma sur le plateau de Saclay :

- o LOA: Laboratoire d'Optique Appliquée (ENSTA)
- o LULI: Laboratoire d'Utilisation des Lasers Intenses (Polytechnique)
- o CEA/DSM/DRECAM/SPAM (Saclay)
- o LPGP: Laboratoire de Physique des Gaz et Plasmas (Orsay)
- o **Et bientôt maintenant: L'Institut de la Lumière Extrême (ILE)**

Contexte présent et futur

- **LOA** : laser de la salle jaune «salle jaune» 40TW, 30fs
 - injection dans un onduleur
 - guidage du laser dans une décharge capillaire (augmentation de l'énergie)
 - mesure de l'émittance du faisceau d'e⁻
- **CEA (SPAM) : IRAMIS UHI 100TW 25fs, 100TW, 2 salles**
- **ILE (Institut de la Lumière Extrême): CNRS,ENSTA,X,... (~50M€)**
 - implantation à partir de 2012 à l'Orme des Merisiers (CEA)
 - deux lasers: LUIRE: 1PW 15fs, début 2012 (installé à l'ENSTA)
APOLLON:10 PW, 15fs 2014 (installat° au CEA Orme des Merisiers)
 - applications: e⁻, p, XFEL compact, physique exotique
 - accélération d'électrons: O(10GeV), caractérisation complète, 2 étages
 - 1 tir/minutes nominal -> importance des «centrales de proximité»
- **ELI (Extreme Light Infrastructure)**
 - 10 fois ILE (100PW)
 - projet européen (Roumanie, Hongrie,
 - **LLR «membre » d'ELI**



laser wakefield acceleration: conclusions et perspectives

LWFA laser wakefield acceleration, accélération par sillage laser

- LWFA: >1990: exotique >2000: « faisceaux » >2010: études systématiques
- efficacité wallplug-to-beam & taux de rép. des lasers restent des intimidants
- mesurer finement et contrôler les paramètres du faisceau d'électrons :
 - spectre en énergie, longueur bunch,
 - colliding laser pulse injection -> forte utilité, contrôle
- injection à partir d'une externe (e.g. RF photogun) à démontrer
- accélération sur des longues distances (guidage laser)
accélération en plusieurs étages plasma
- pas couvert par cette présentation:
 - accélération de protons et d'ions (cible solide)
 - source lumière X cohérente, compacte «5ème génération» (forte demande)
 - applications: radiographie, sciences de la vie, science des matériaux, médical
 - NNLC: accélération de positrons, dynamique faisceaux e- femto-sec., design, polarisation.....