



Laboratoire Leprince-Ringuet

Congrès du LLR 15-17 octobre 2012

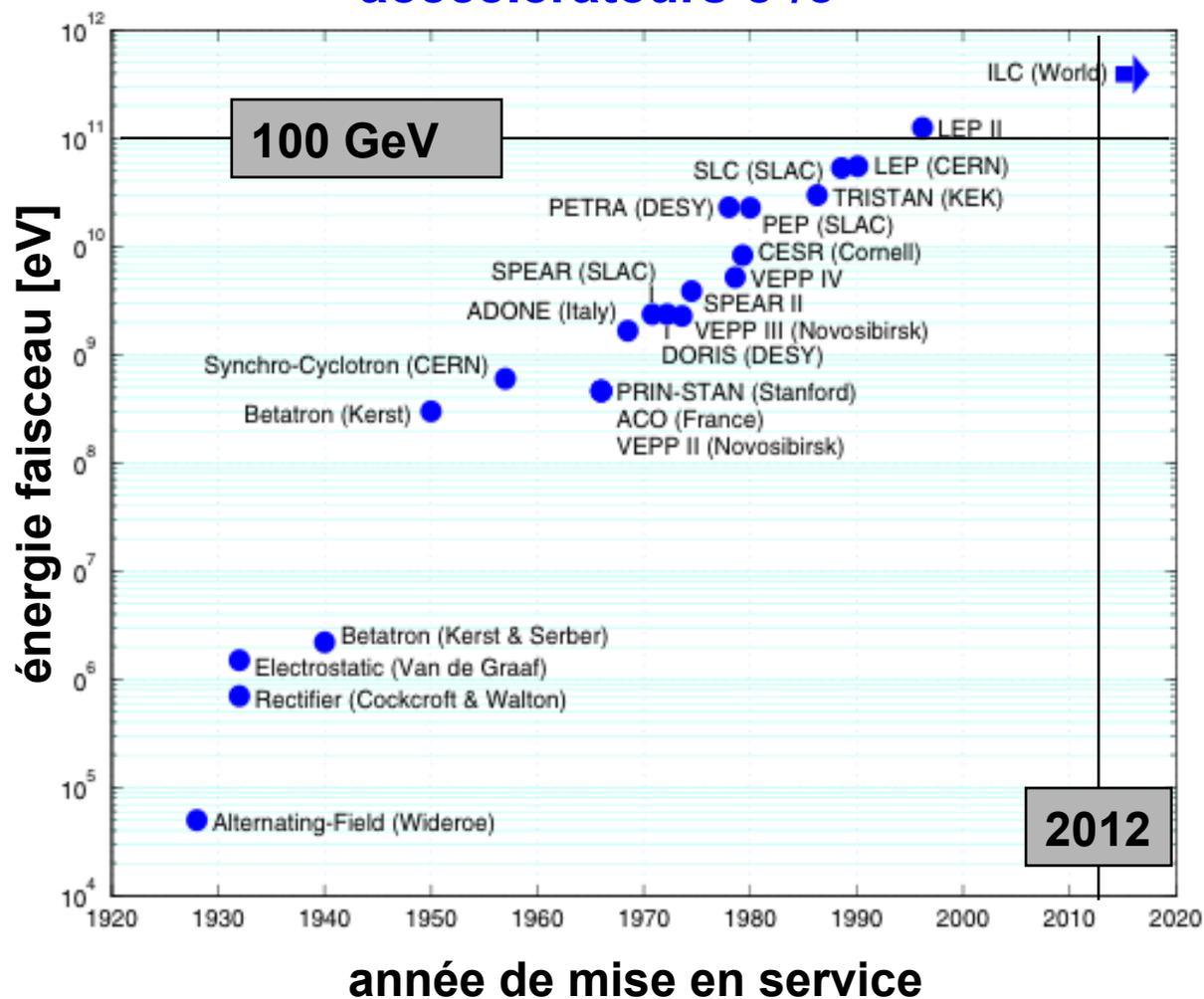
Groupe d'Accélération par Laser et Ondes Plasma



Avenir de l'activité «accélérateurs plasma» au LLR

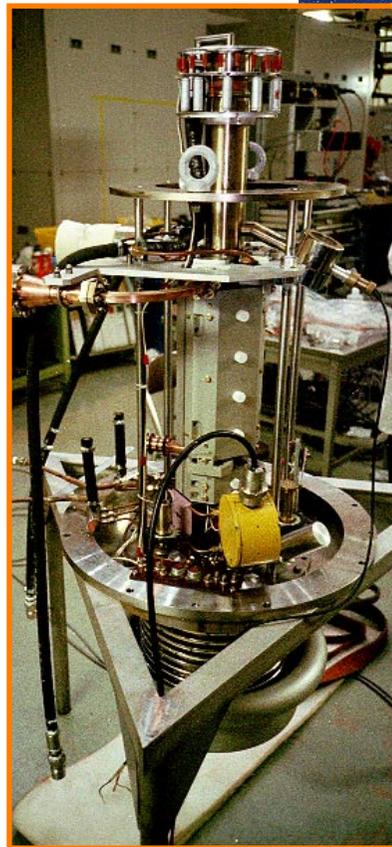
Le futur d'aujourd'hui est le passé de demain

accélérateurs e-/e+

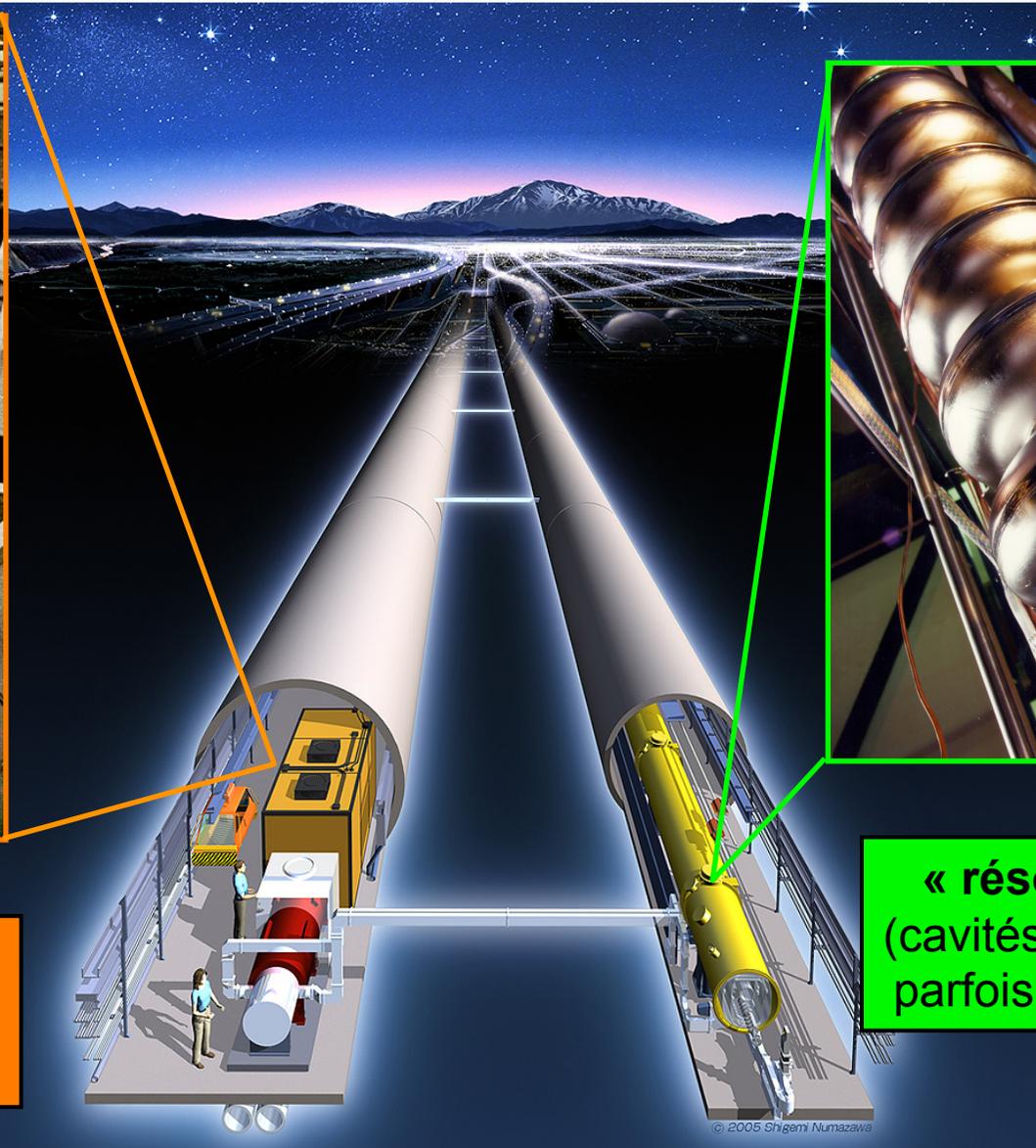


- énergie = gradient × longueur → machines de plus en plus longues
- progression en énergie → rupture technologique

Accélérateur de particules: Comment ça marche?



« klystrons »
(tubes radiofréq.
haute puissance)

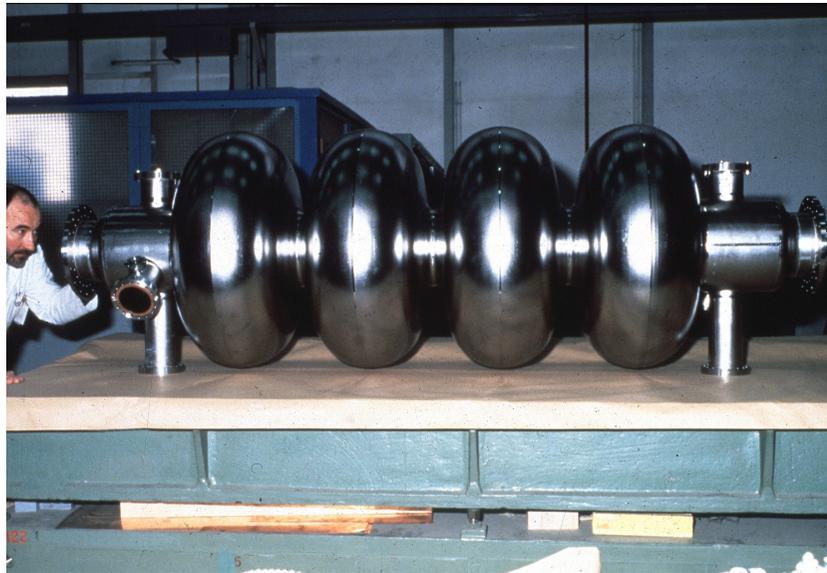


« résonateurs »
(cavités métalliques,
parfois supracond.)

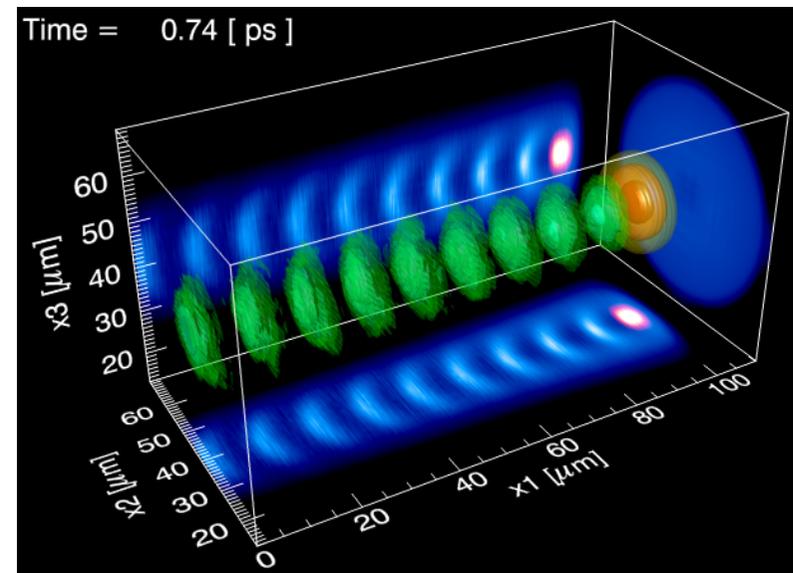
Ondes radiofréquences (RF) v/s ondes plasma

gradient d'accélération [eV/m] = charge × champ électrique (E_z)

résonateur = cavité RF



résonateur = plasma



ILC: $E_z \approx 30 \text{ MV/m}$
CLIC: $E_z \approx 100 \text{ MV/m}$

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

(pour $n_e = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) $\omega_p \propto \sqrt{n_e}$

LWFA record du monde 2012 : ~2GeV in 7cm (U Texas Austin)



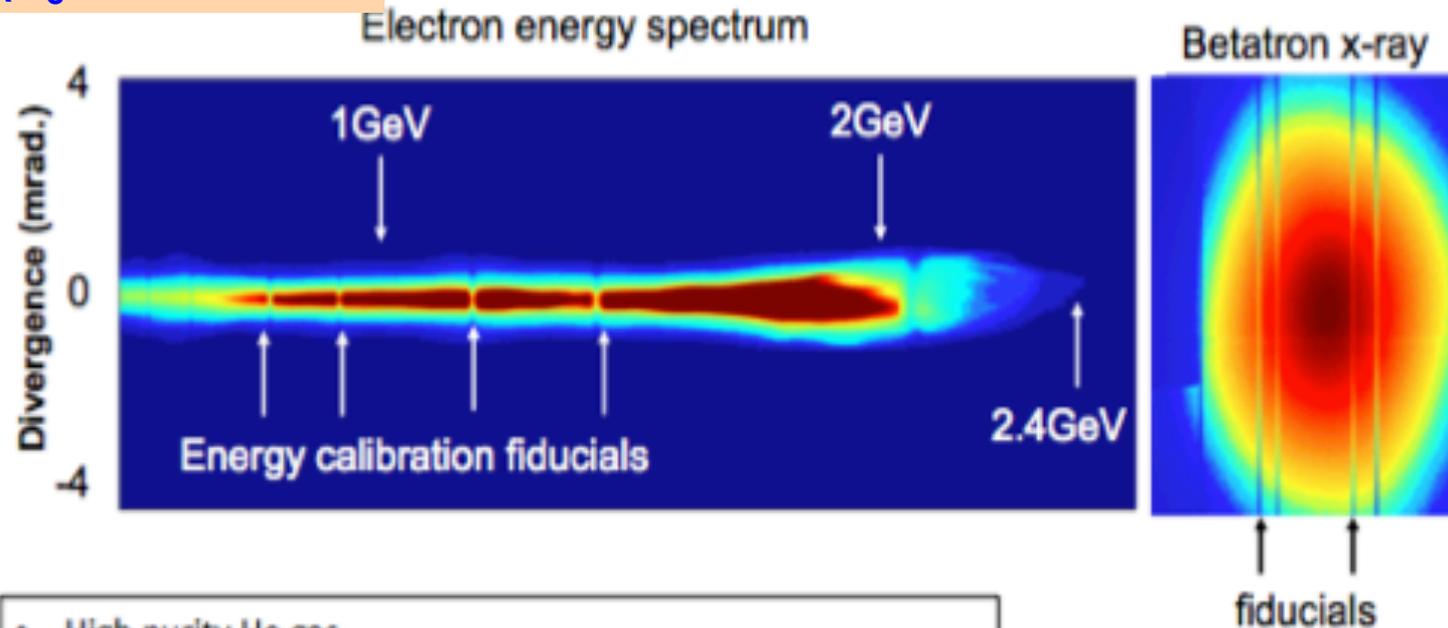
15th Advanced Accelerator Concepts Workshop, June 10-15 2012, Austin Texas

Experimental results of TPW driven LPA



1 Petawatt (10^{15} W) laser
plasma d'He ($n_e = 10^{17}$ cm⁻³)

I. > 2 GeV e⁻ bunches

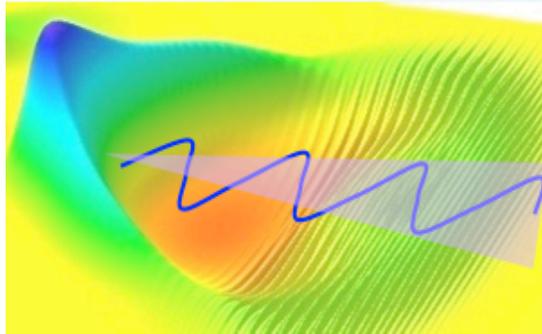


- High purity He gas
- Plasma density 3.3×10^{17} cm⁻³
- e⁻ energy up to 2.4 GeV, peak around 2.0 GeV
- Betatron x-ray radiation observed
- Continuous electron energy distribution
- Total e⁻ charge ~1.8 nC
- Highly collimated e⁻ beam with divergence <1 mrad

slide: X. Wang (U Texas)

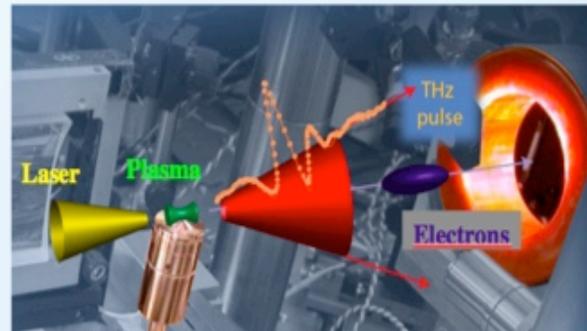
Applications: électrons accélérés par laser comme sources de photons

Betatron radiation during acceleration – Multi keV



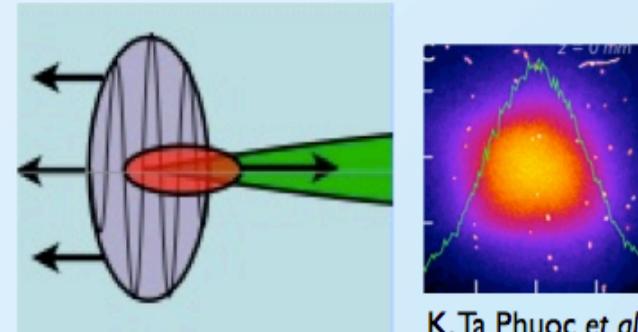
Rousse et al., Phys. Rev. Lett. 93, (2004)
Esarey et al., Phys. Rev. E 65, (2002)

Transition radiation from beam exiting plasma – MV/cm THz



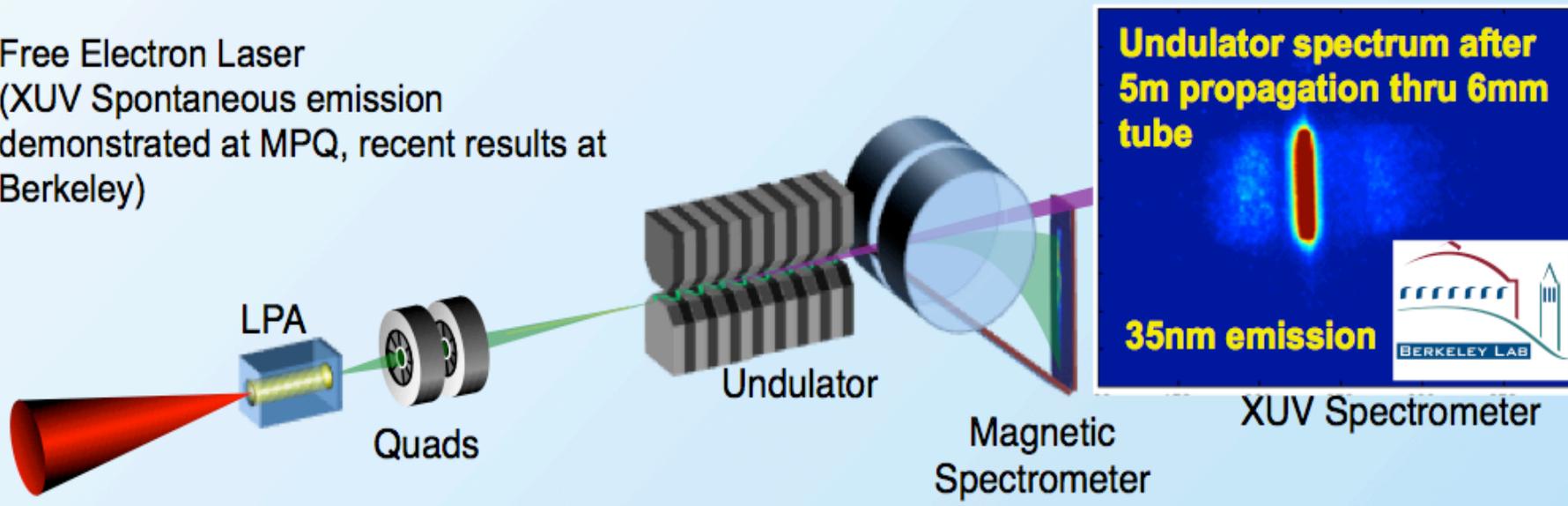
Leemans et al., Phys. Rev. Lett. 91, (2003)

Thomson Scattering – Multi keV/
MeV x-ray/gamma ray

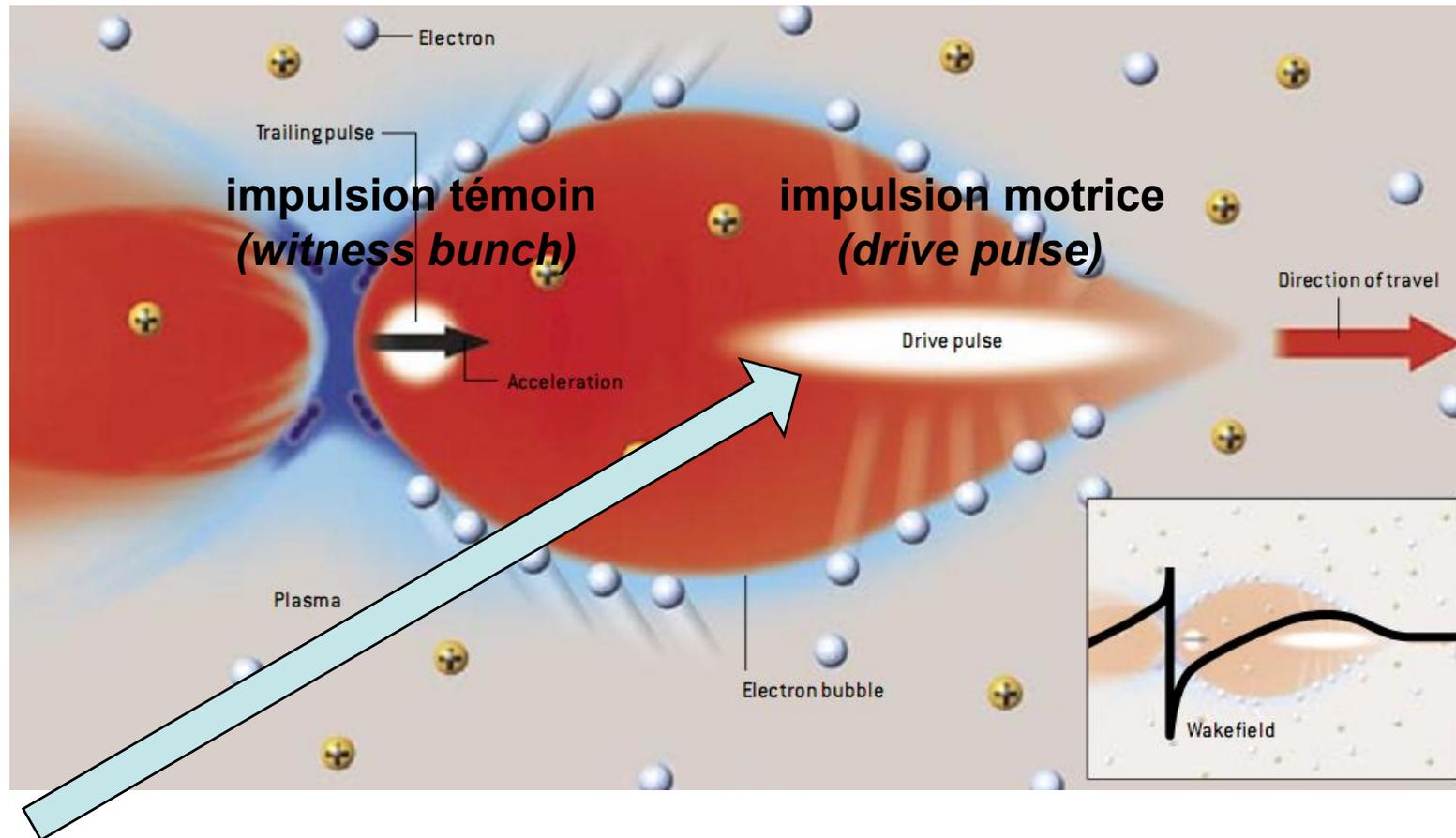


K. Ta Phuoc et al.,
Nature Photonics (2012)

Free Electron Laser
(XUV Spontaneous emission
demonstrated at MPQ, recent results at
Berkeley)



Aujourd'hui: régime de la cavitation (ou de la bulle)



- impulsion laser (fs), Petawatt: Berkeley, Corée, CILEX,...
- paquet d'électrons (ou positrons) très court: SLAC, DESY, Frascati
- paquet de protons: CERN (SPS)

Moteur = électrons: SLAC E-167 – doublage d'énergie 45GeV->90GeV



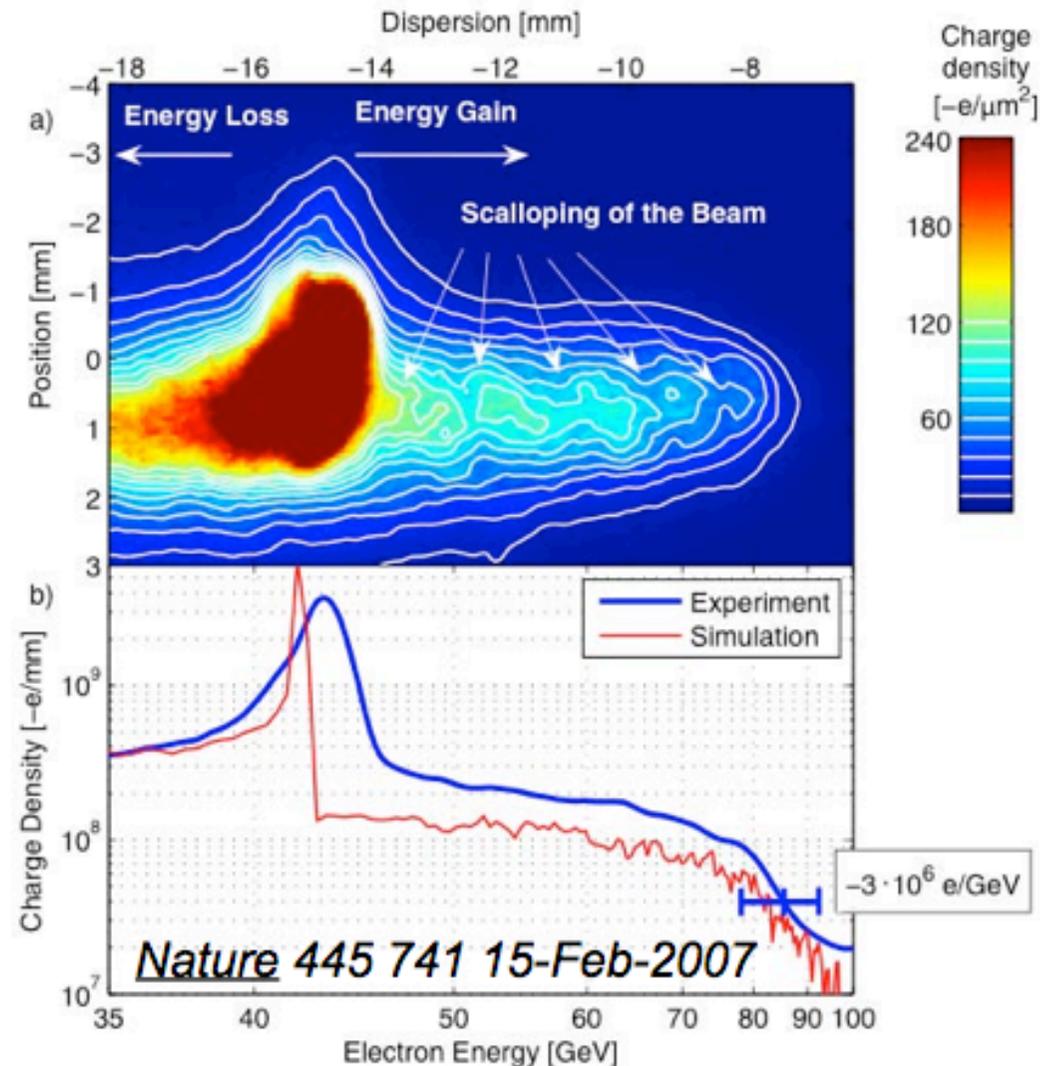
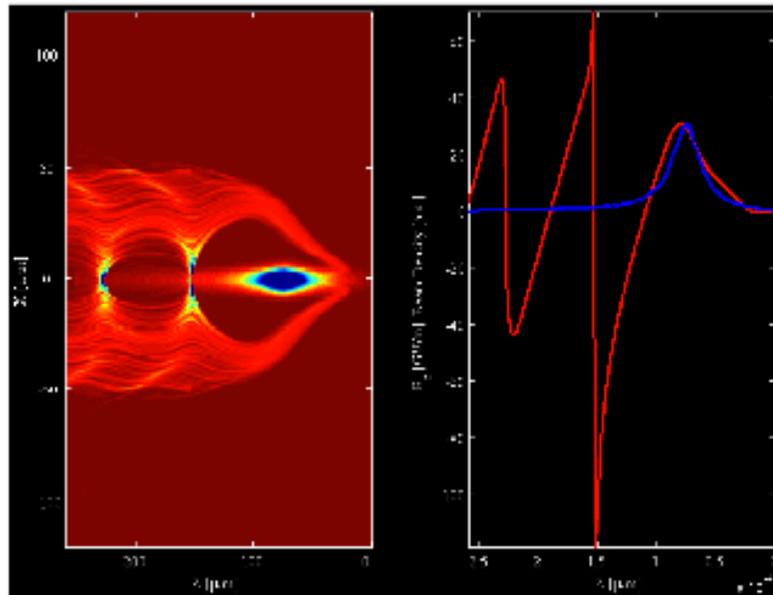
E-167: Energy Doubling with a Plasma Wakefield Accelerator in the FFTB



□ Acceleration Gradients of $\sim 50\text{GeV/m}$ (3,000 x SLAC)

- Doubled energy of 45 GeV electrons in 1 meter plasma

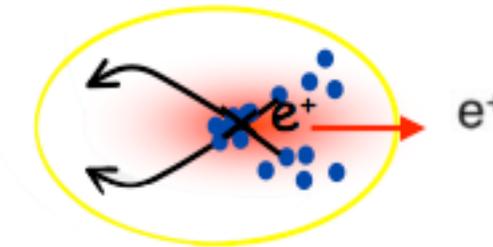
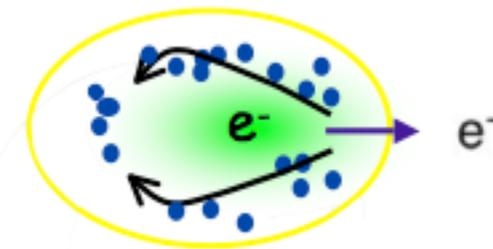
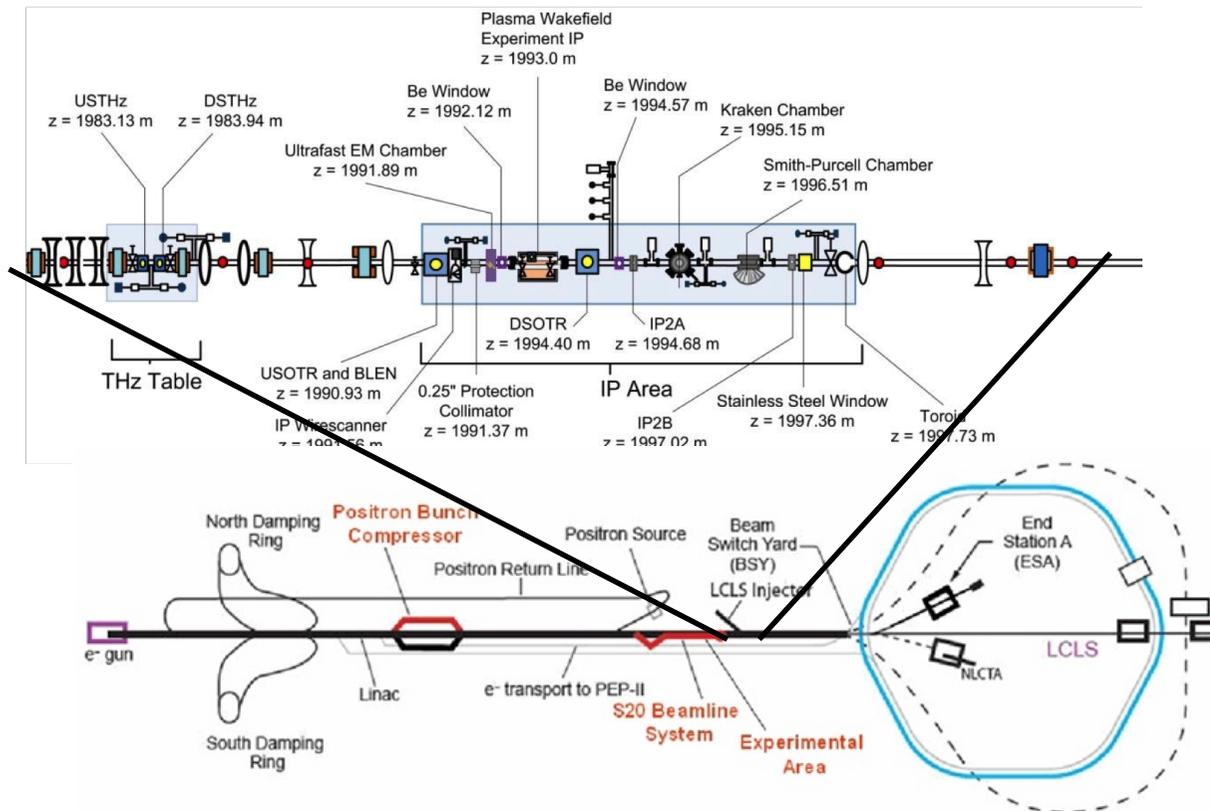
□ Single Bunch



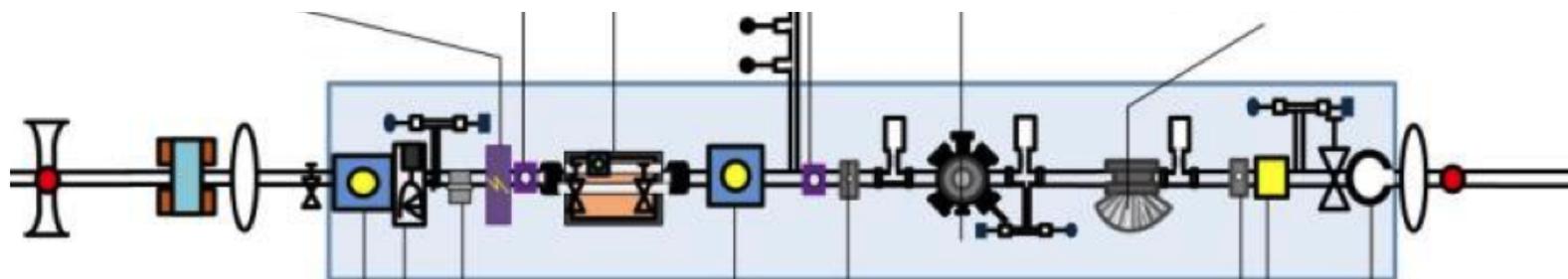
Moteur = faisceau d'électrons: FACET facility (SLAC)

As of June 2012

Parameter	Design	June 2012 "best" ¹	June 2012 "typical"
Energy	23 GeV	21.1 GeV	20.35 GeV
Charge/pulse	3.2 nC	3.2 nC	2.5 – 2.9 nC
IP Spot Size ²	< 20 μm x 20 μm	20 μm x 23 μm	35 μm x 35 μm
Bunch Length ³	< 20 μm	16 - 25 μm	16 - 25 μm
Rep. Rate ⁴	30 Hz	10 Hz	10 Hz



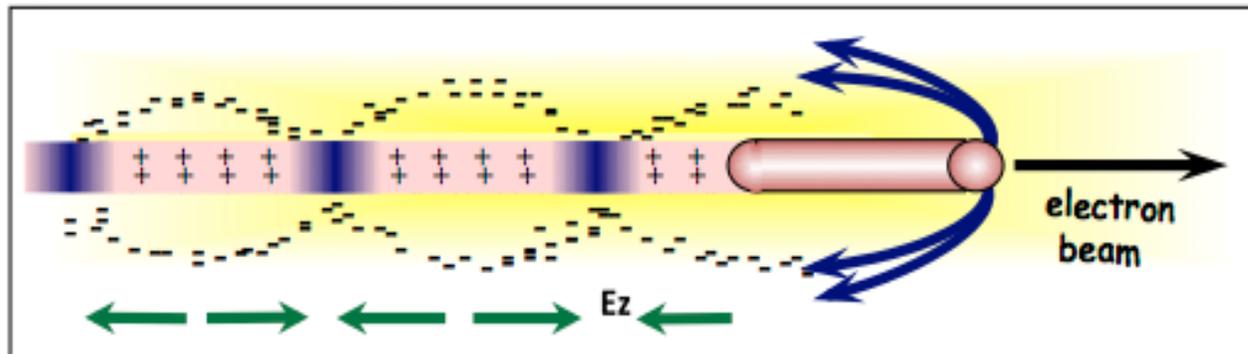
FACET – installation de R&D accélérateurs



E-200	Multi-GeV Plasma Wakefield Acceleration Experiments
E-201	Wakefield Acceleration in Dielectric Structures
E-202	Ultrafast processes in Magnetic Materials
E-203	Single-shot determination of the time profile of fs long bunches by means of coherent Smith-Purcell radiation
E-204	Proposal for testing of metallic structures periodic structures at FACET
E-205	High Gradient Dielectric Wakefield Measurement at FACET
E-206	Characterizing Terahertz Radiation from the FACET Beam
E-207	High-Gradient THz-scale Two-Channel Coaxial Dielectric Wake Field Accelerator Experiment
E-208	Direct measurements of the transverse long-range wake-fields of CLIC main linac accelerating structures
E-209	Study of the Self-Modulation of Long Lepton Bunches in Dense Plasmas and its Application to Advanced Acceleration Techniques
E-210	Trojan Horse Plasma Wakefield Acceleration

Moteur=faisceau de protons: projet AWAKE (CERN-MPI Munich)

- faisceaux protons véhiculent 100-1000 fois plus d'énergie que des lasers de puissance
- guidage plus facile que pour les lasers
- proton driven plasma wakefield acceleration



$$\lambda_p \approx 1 \text{ mm} \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}}{n_p}}$$

$$E_{z,\text{max}} \approx 2 \text{ GeV/m} \cdot \left(\frac{N_b}{10^{10}}\right) \cdot \left(\frac{100 \text{ } \mu\text{m}}{\sigma_z}\right)^2$$

- demanderait des paquets de protons très courts, très intenses: $\sigma_z=200\mu\text{m}$ & $2 \cdot 10^{10} \text{ p}$ for $E_z \approx 1 \text{ GeV/m}$

Drive beam: p^+

$E=1 \text{ TeV}$, $N_p=10^{11}$

$\sigma_z=100 \text{ } \mu\text{m}$, $\sigma_r=0.43 \text{ mm}$

$\sigma_\theta=0.03 \text{ mrad}$, $\Delta E/E=10\%$

Witness beam: e^-

$E_0=10 \text{ GeV}$, $N_e=1.5 \times 10^{10}$

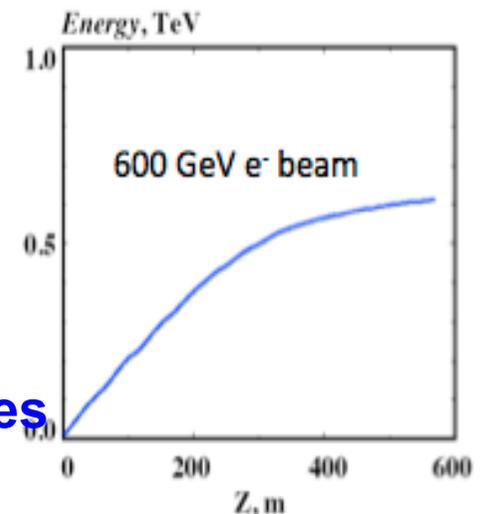
Plasma: Li^+

$n_p=6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

External magnetic field:

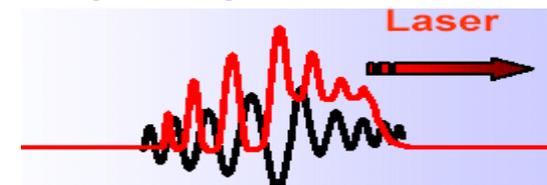
Field gradient: 1000 T/m

Magnet length: 0.7 m

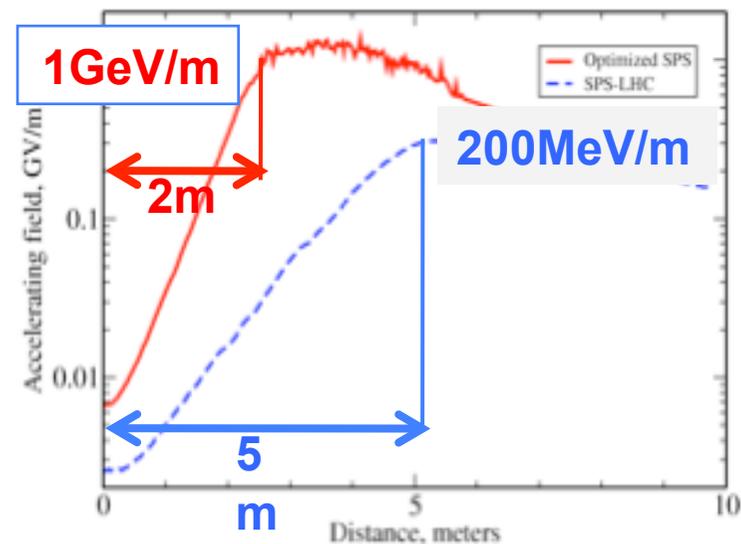
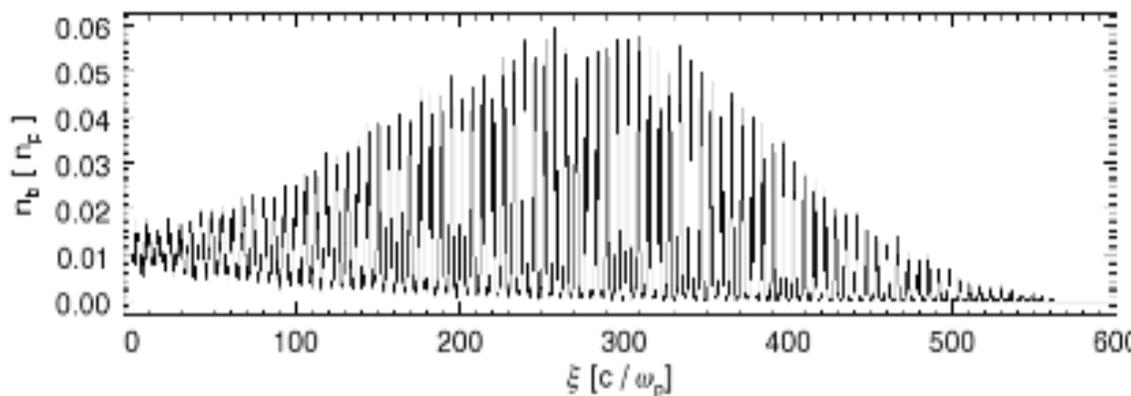


Exploiter l'automodulation du faisceau des p dans un plasma

- SPS beam: rms length of $\sim 12\text{cm}$
- modulation transverse de la densité de charge of the bunch
-> microbunching à la longueur d'onde plasma $\lambda_p \approx 0(1\text{mm})$
- analogue: automodulation d'impulsions laser dans plasmas denses
- croissance exponentielle et saturation pousse onde plasma de manière résonante



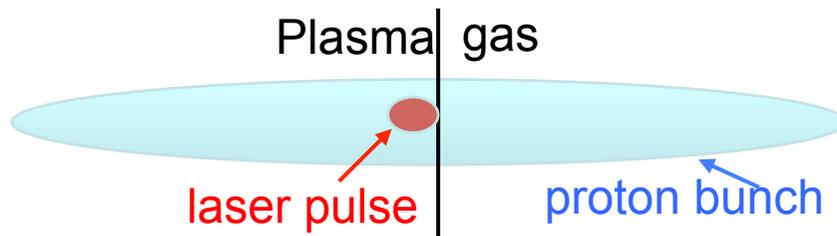
p-beam density profile after 4.8m propagation in plasma.



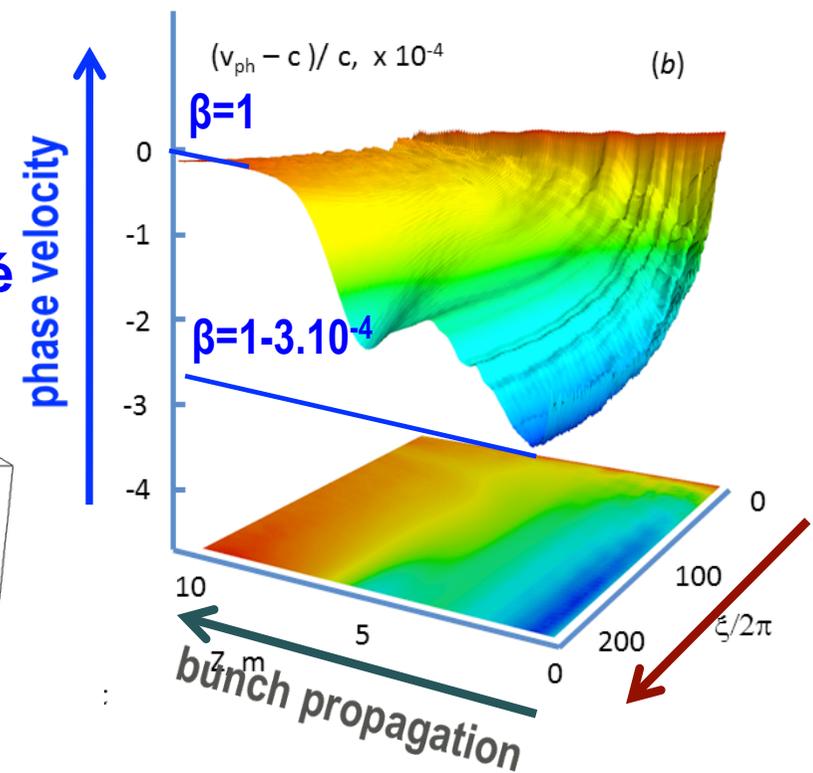
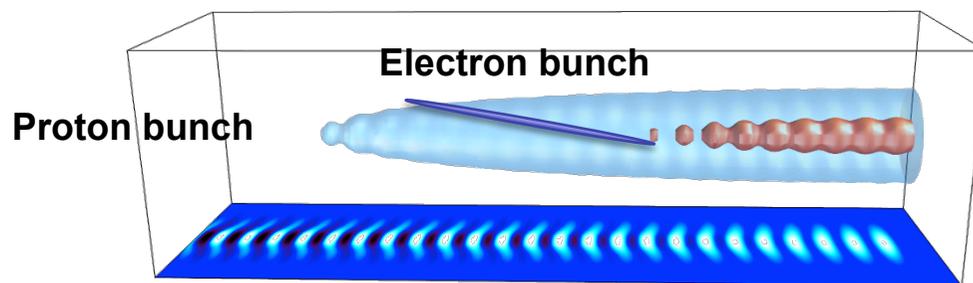
N. Kumar, A. Pukhov, and K. Lotov, Phys. Rev. Lett. 104, 255003 (2010)

PD-PWFA: Contrôle de l'instabilité et injection des électrons

- démarrage de la modulation avec une impulsion laser au maximum du paquet de protons

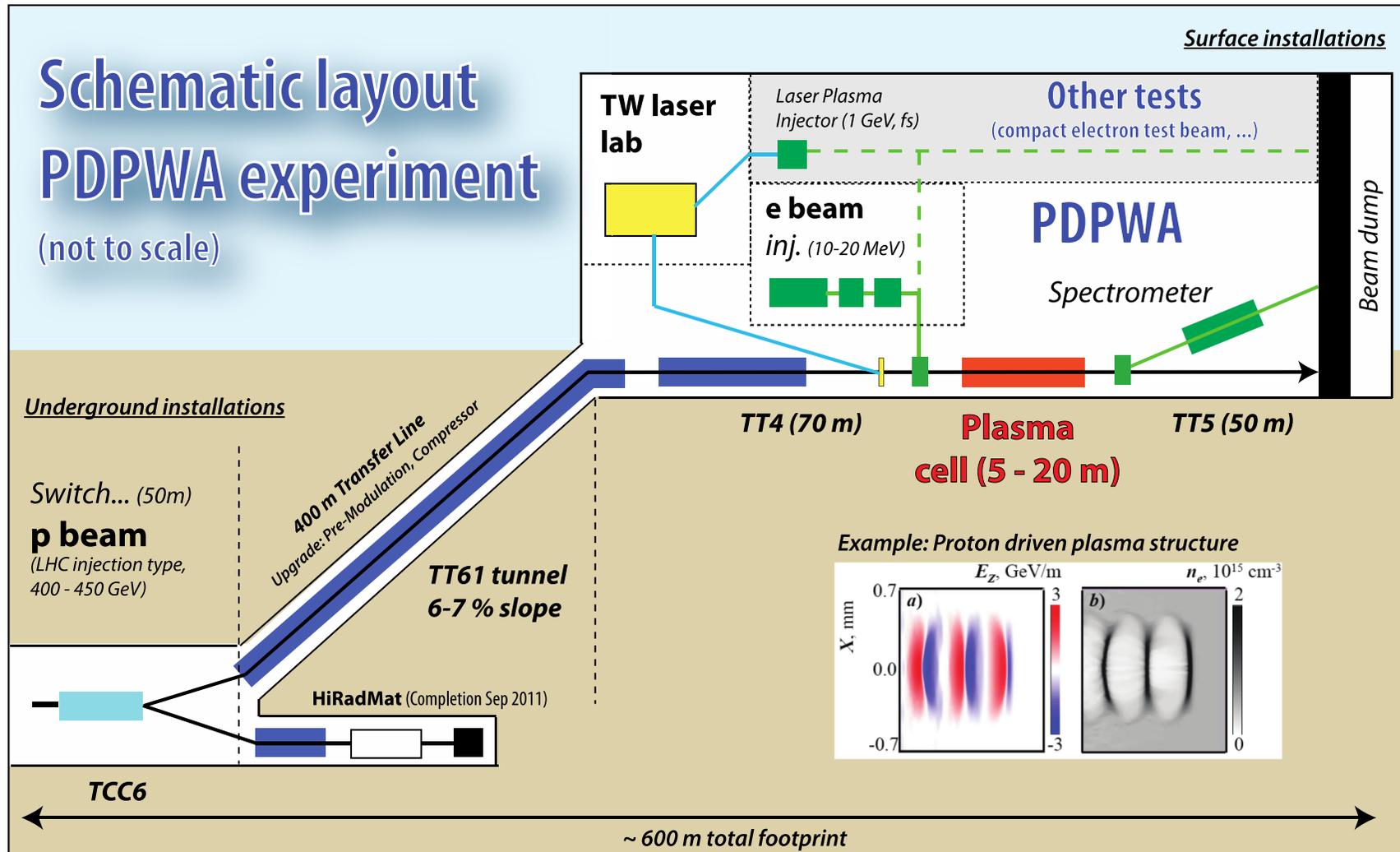


- injection des électrons dès que l'onde plasma est relativiste
-> nécessite injection des e^- par le côté



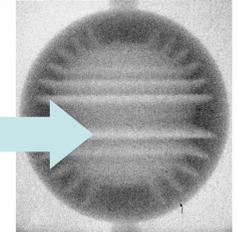
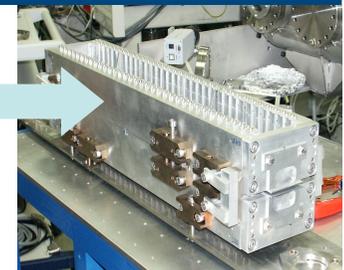
Deux sites d'installations au CERN possibles: West area et CNGS

1. Lol proposal: **West Area TT61/TT4/TT5** (surface)
 2. Alternative: **CNGS** (souterrain)
- decision on continuation of CNGS not yet taken → start with West Area studies.

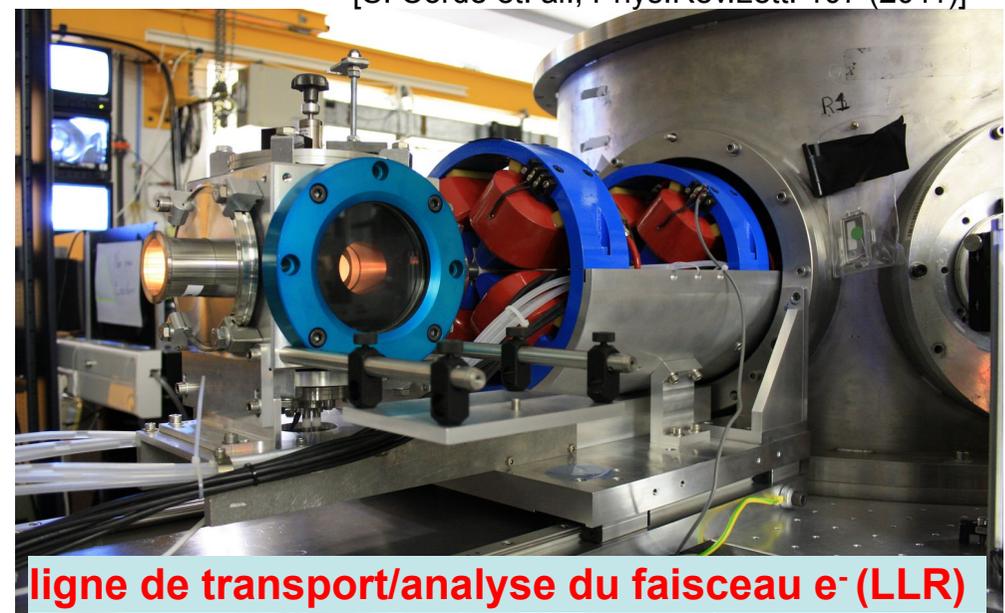
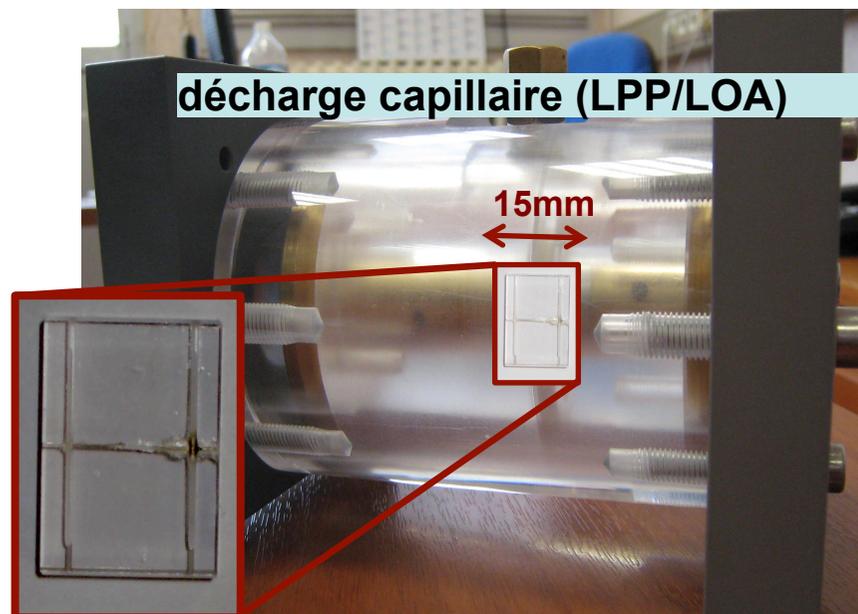


GALOP: accélération par sillage laser au LLR

- **Expérience d'injection dans un onduleur**
 - collaboration avec le LOA et Synchrotron SOLEIL
 - signal observé (faible), validation ligne transp. améliorée.
- **Expériences d'application de radiographie X**
 - résultats présentés à la conférence APCNDT en 2009
 - dépôt de brevet (LOA/LLR)
- **Expérience d'injection dans décharge capillaire (LOA/LPP/LLR)**
 - premiers tests (2010/11) peu concluants
 - localisation de l'injection grâce à l'émission X («bétatron»)



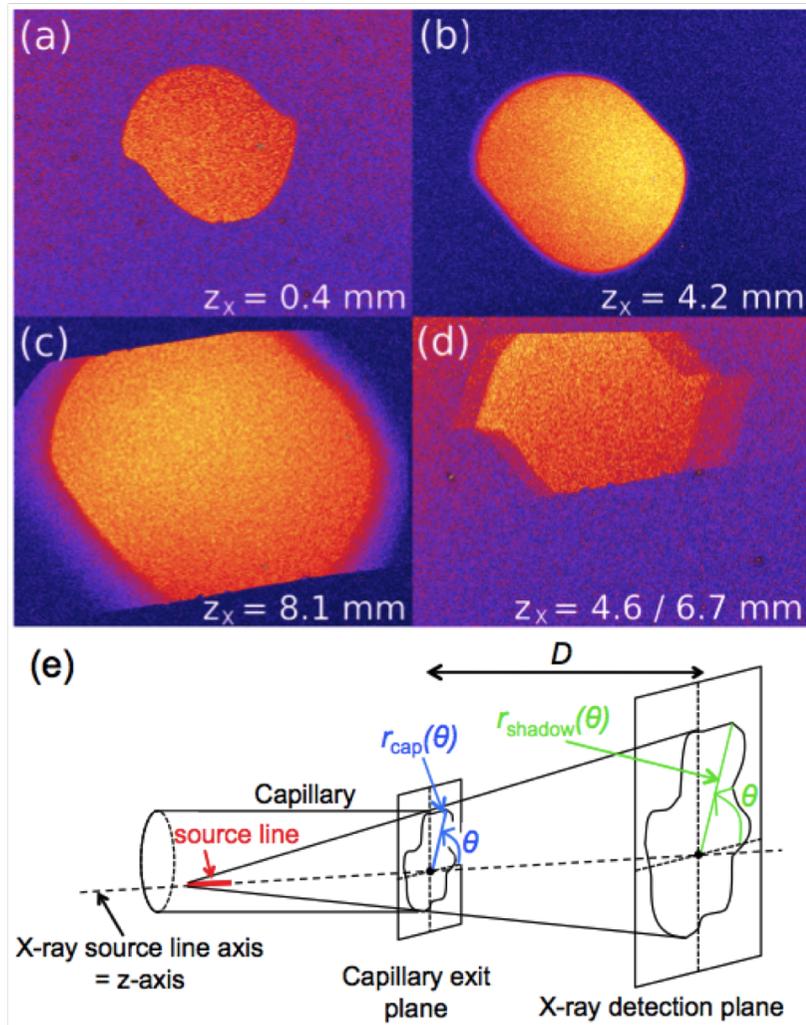
[S. Corde et. al., Phys.Rev.Lett. 107 (2011)]



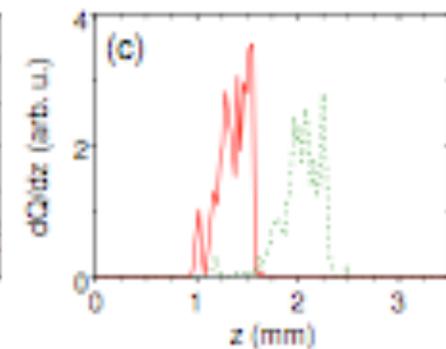
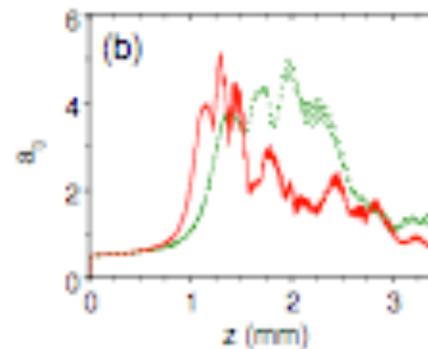
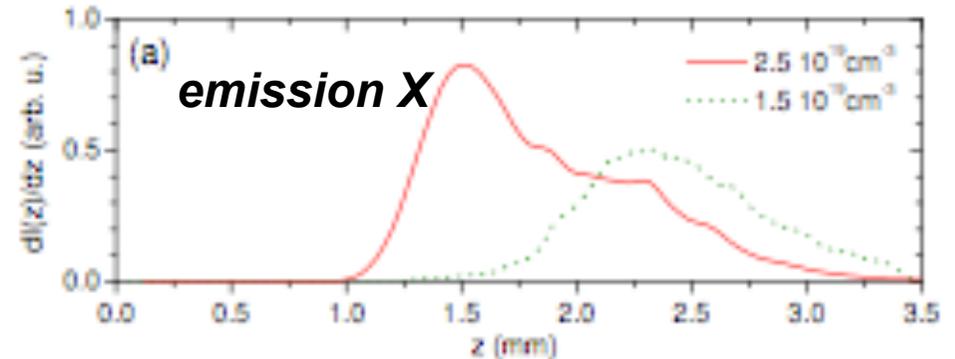
Cartographie de l'émission des rayons X dans l'accélérateur plasma

ombre de la sortie du capillaire
en rayons X émis pendant l'accélération

[S. Corde et. al., Phys.Rev.Lett. 107 (2011)]



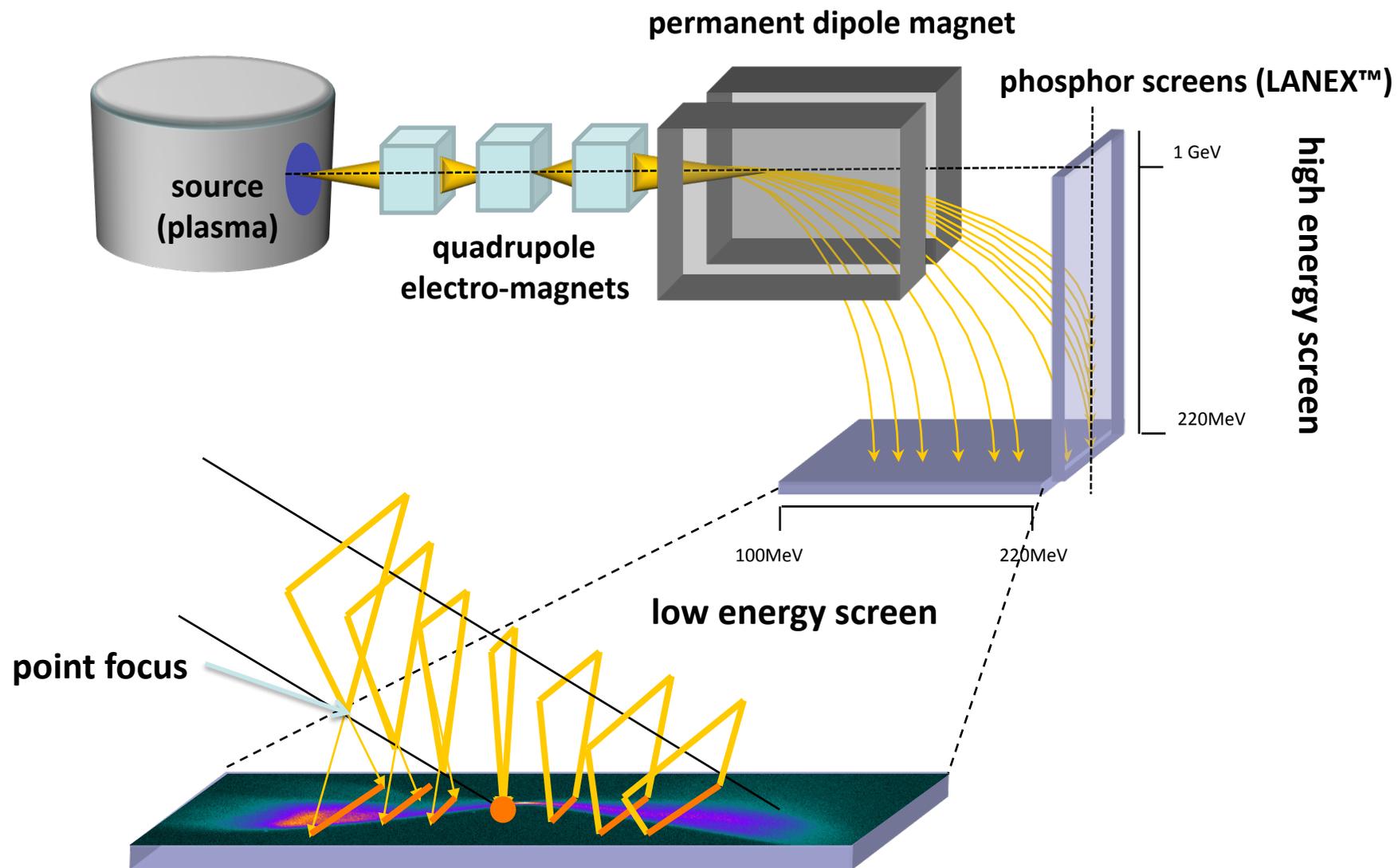
simulation



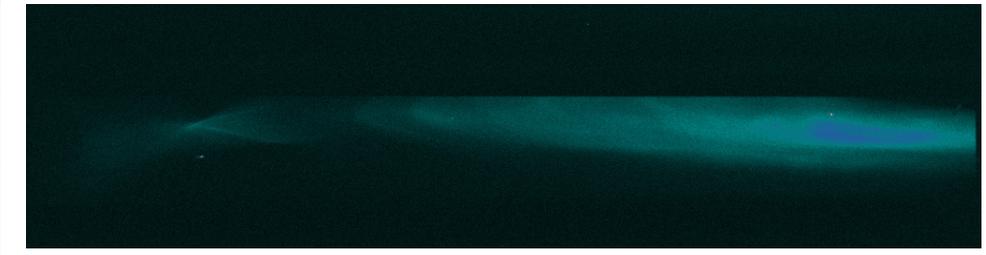
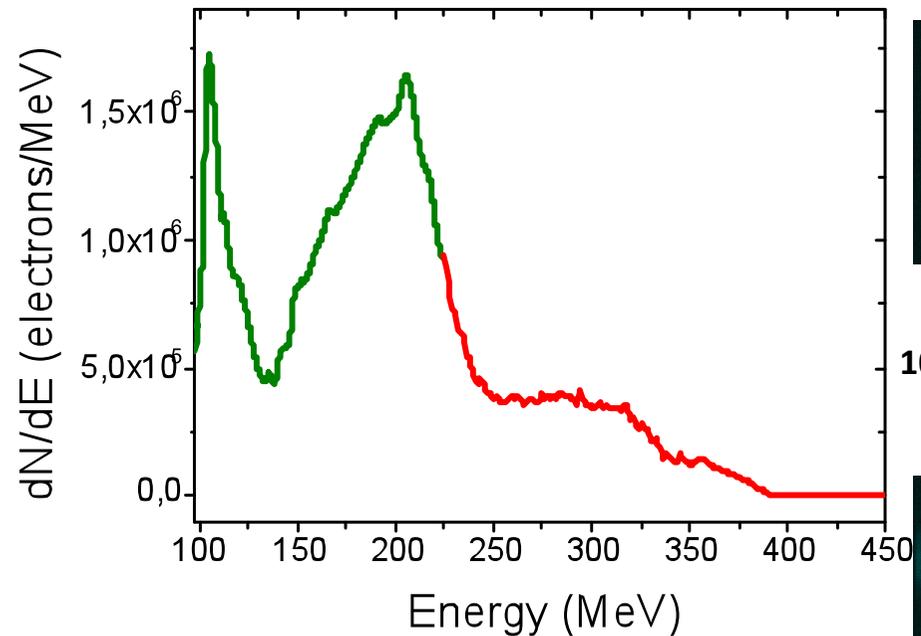
evolution laser

charge injectée

Spectromètre à électrons avec focalisation stigmatique



Spectre en énergie des électrons: gas jet (3mm)



100MeV

220MeV



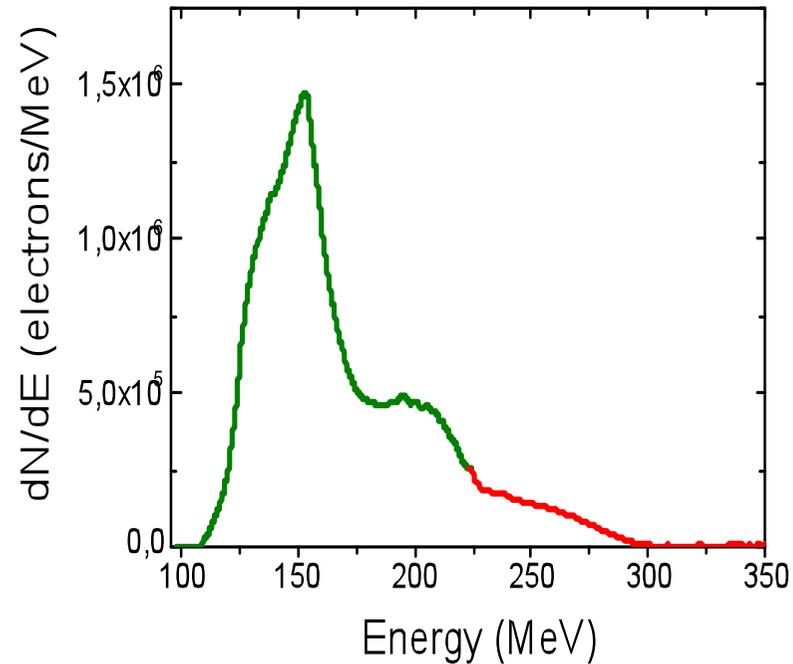
220MeV

1 GeV

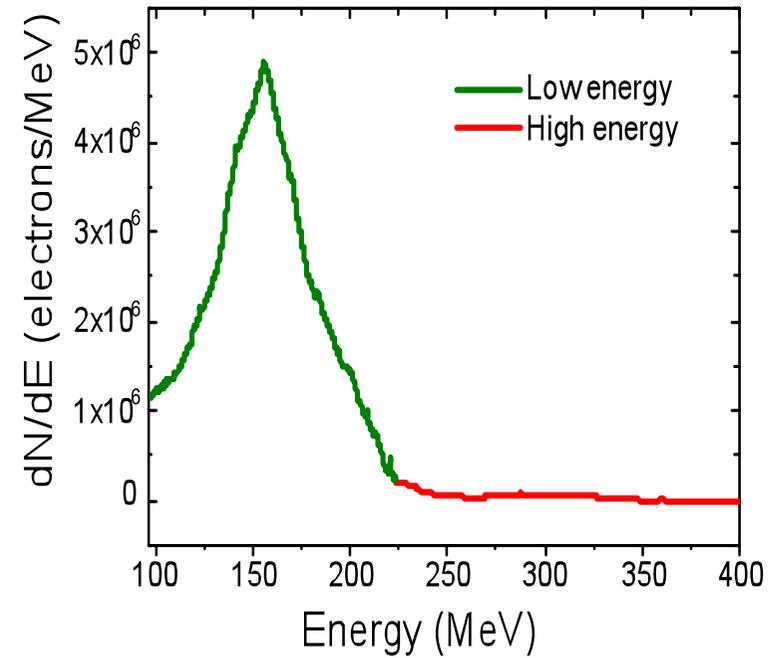
Gas jet
Pression 7.5 Bar
Stigmatic focusing at 320 MeV

Spectre en énergie des électrons: décharge capillaire

décharge capillaire allumée



décharge capillaire éteinte

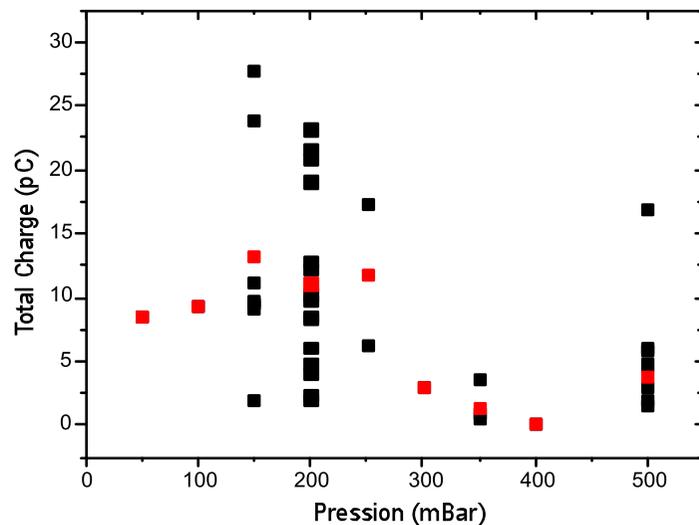


Spectre des electrons: scan de pression décharge capillaire

décharge capillaire allumée

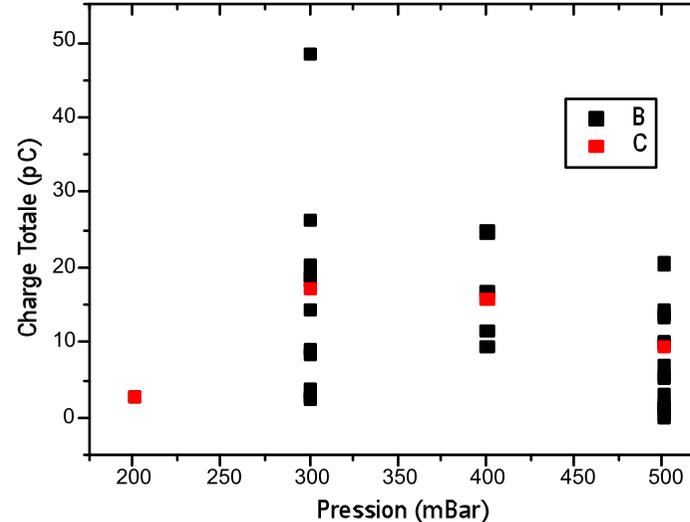
22 Oct 2010 with discharge

Charge totale [pC]



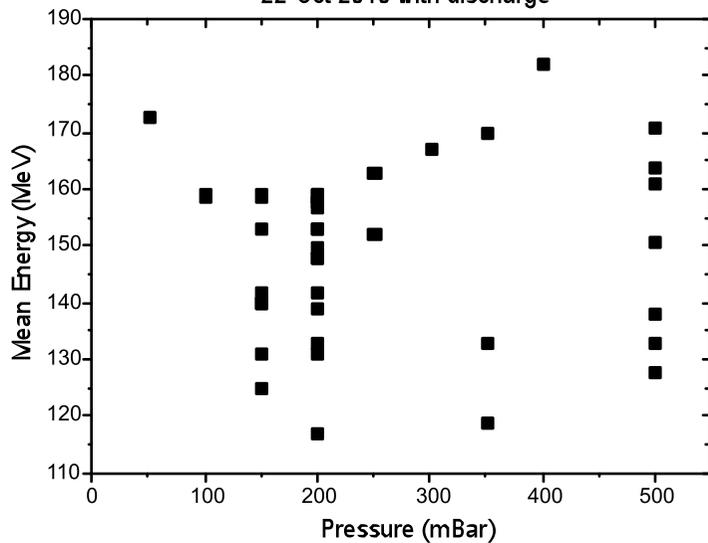
décharge capillaire éteinte

22 Oct 2010 without discharge

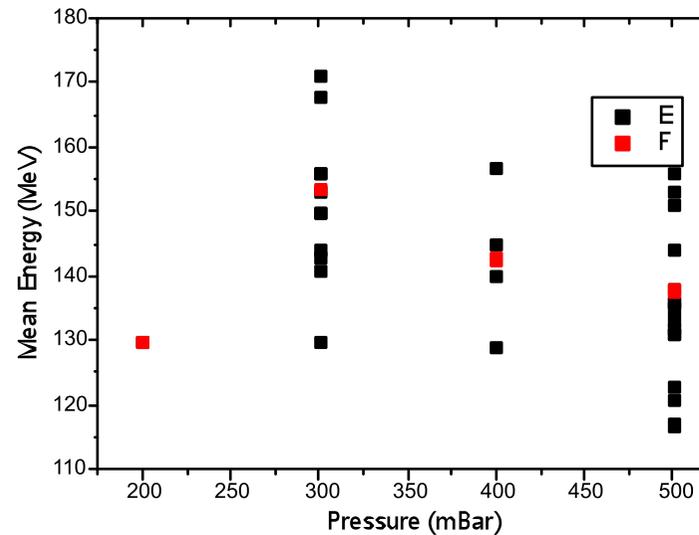


energie moyenne [MeV]

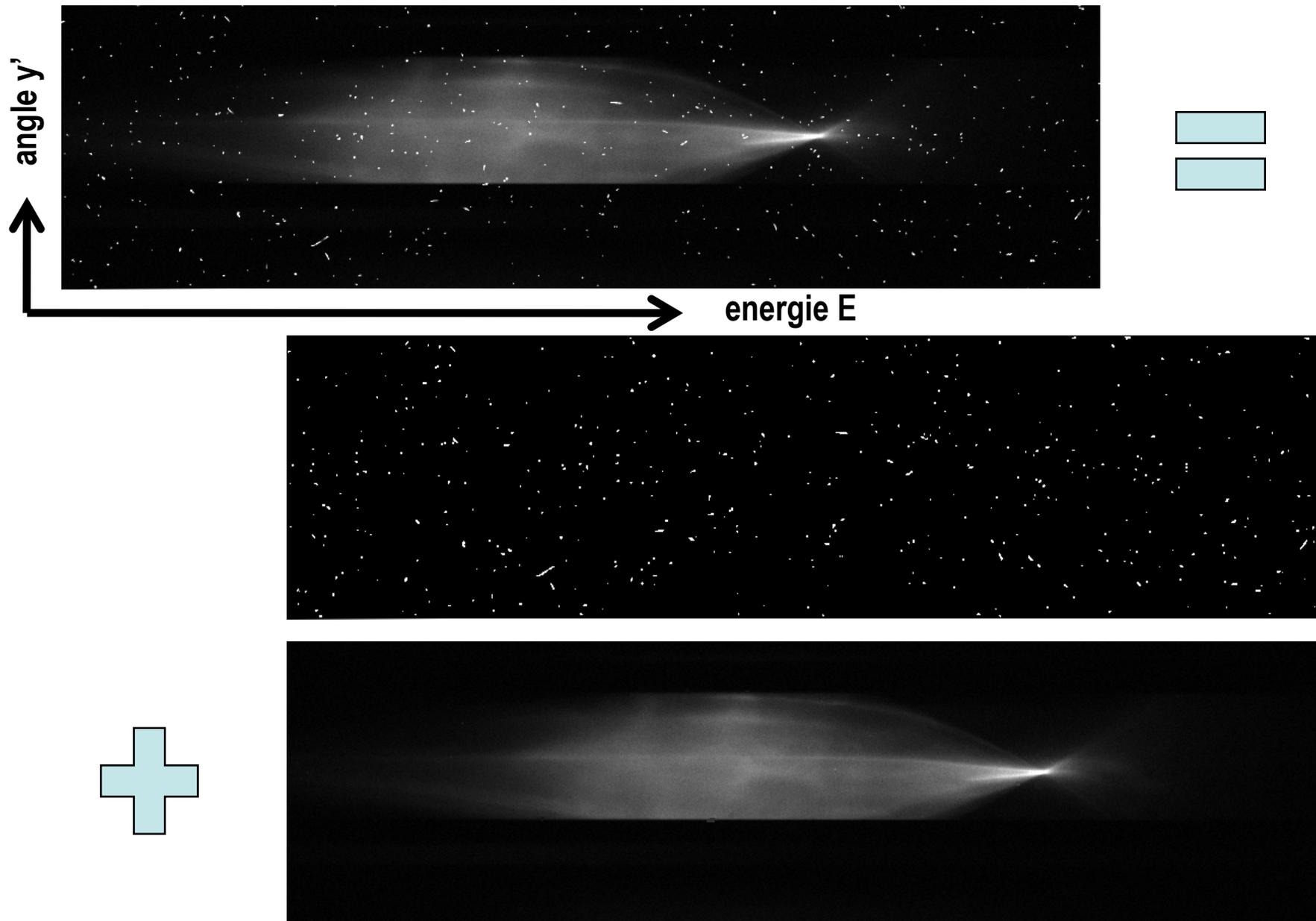
22 Oct 2010 with discharge



22 Oct 2010 without discharge

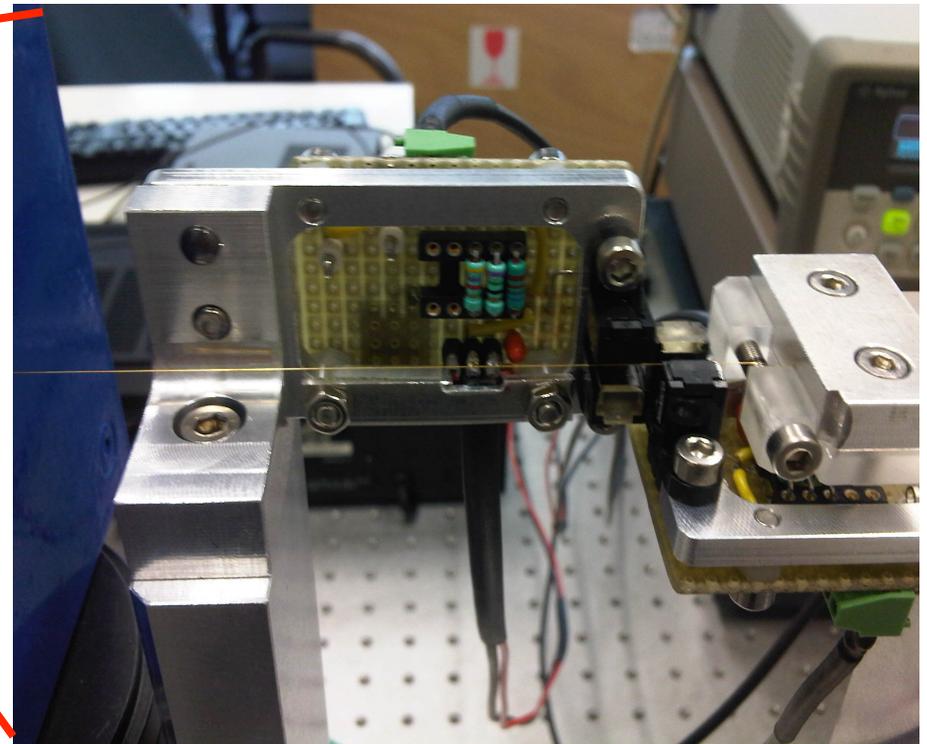
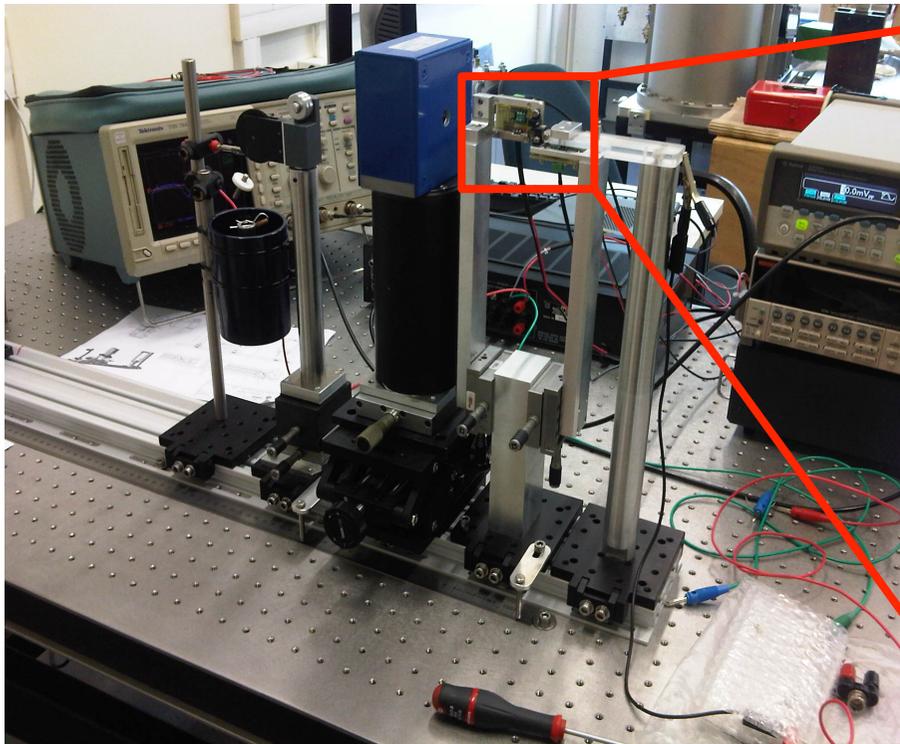


Depouillement: Filtrage des X plus sophistiqué (Vasily Séredov)



R&D instrumentation: banc de mesure des aimants

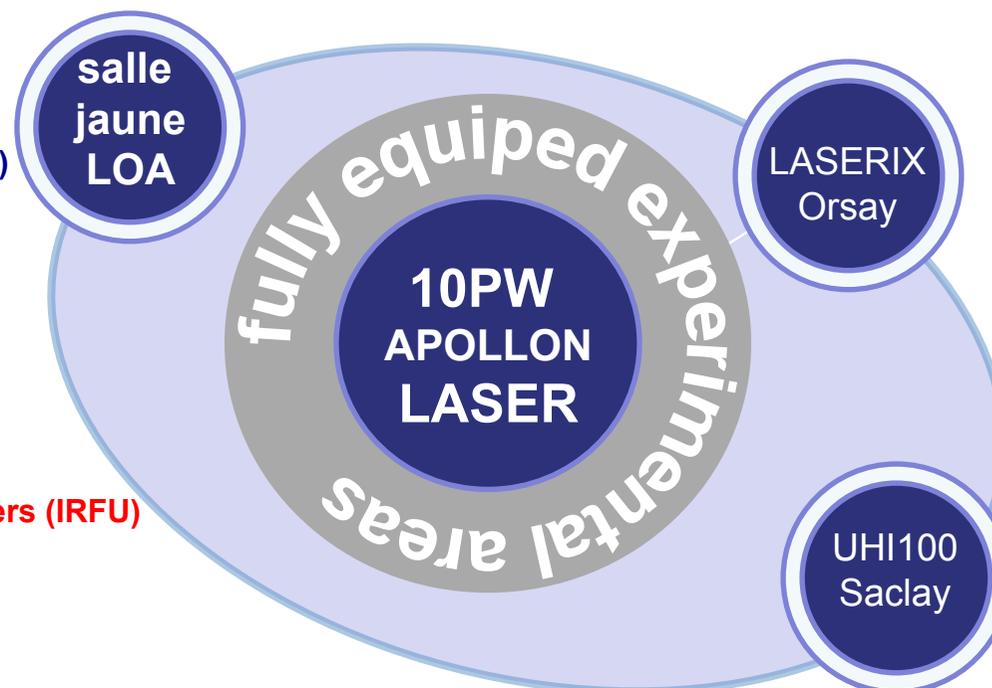
- methode du fil vibrant (Temnykh 1998), dispositif simple
- reconstruction du champ $B(x,y,z)$: decomposition Fourier -> précision=?
- complementaire a la sonde Hall, mieux pour petits aimants
- projet scientifique collectif (PSC) de 6 élèves X2009: proto No 1.
- mécanique: Alain B., Antoine C., électronique/DAQ: Antoine M



Centre Interdisciplinaire de Lumière EXtreme: CILEX

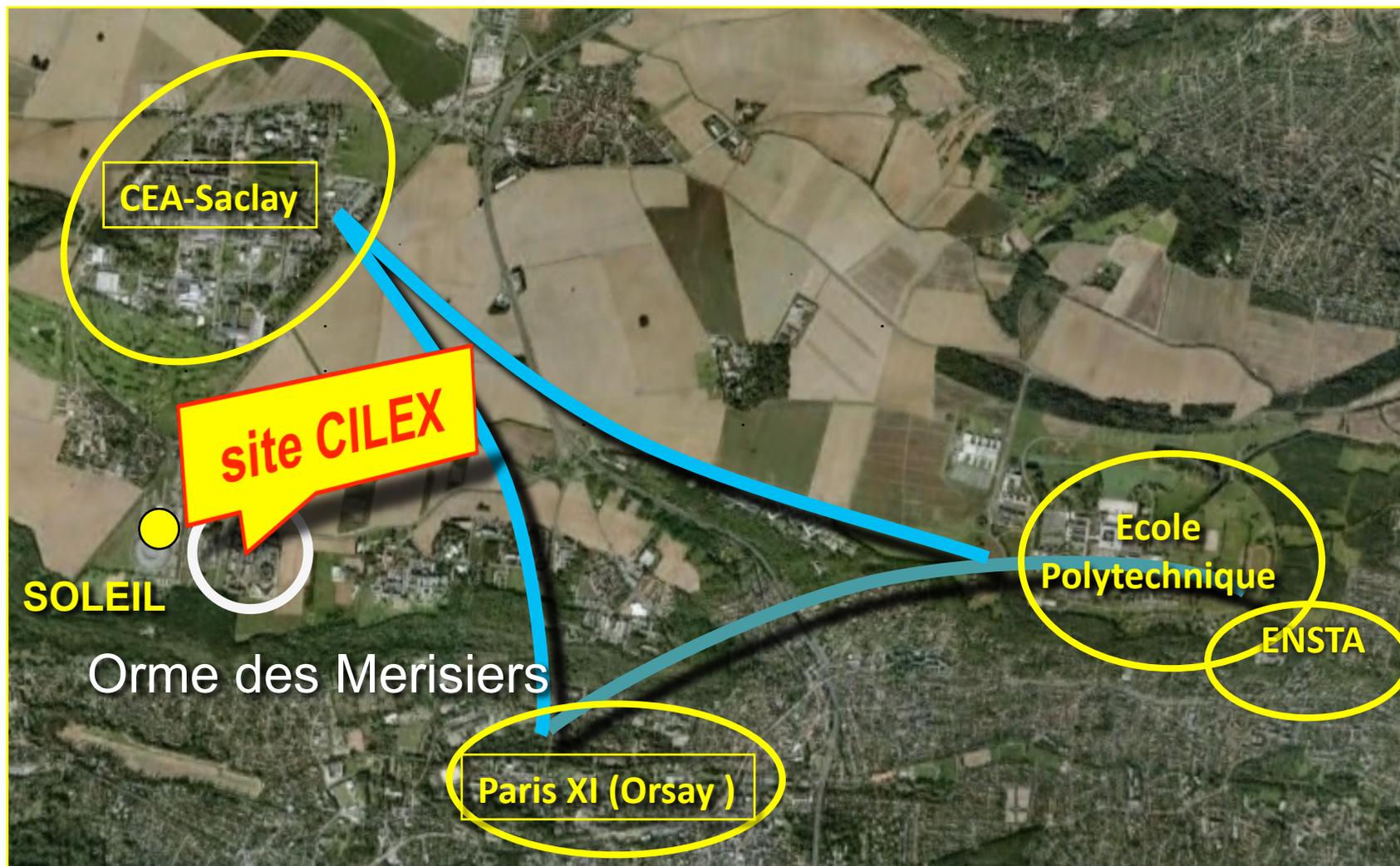
12 partner laboratories :

Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas (LPGP)
Fédération Lumière Matière Fédération (LUMAT-LASERIX)
Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique (LCFIO)
Laboratoire de l'accélérateur linéaire (LAL)
Synchrotron Soleil
Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA)
Laboratoire Leprince-Ringuet (LLR)
Centre de Physique Théorique (CPht)
Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses (LULI)
Institut Rayonnement Matière de Saclay (IRAMIS)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'univers (IRFU)
DSM Saclay



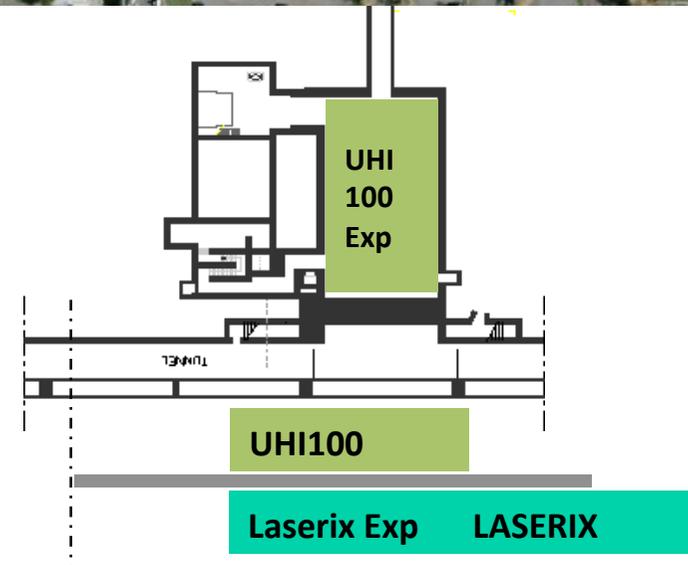
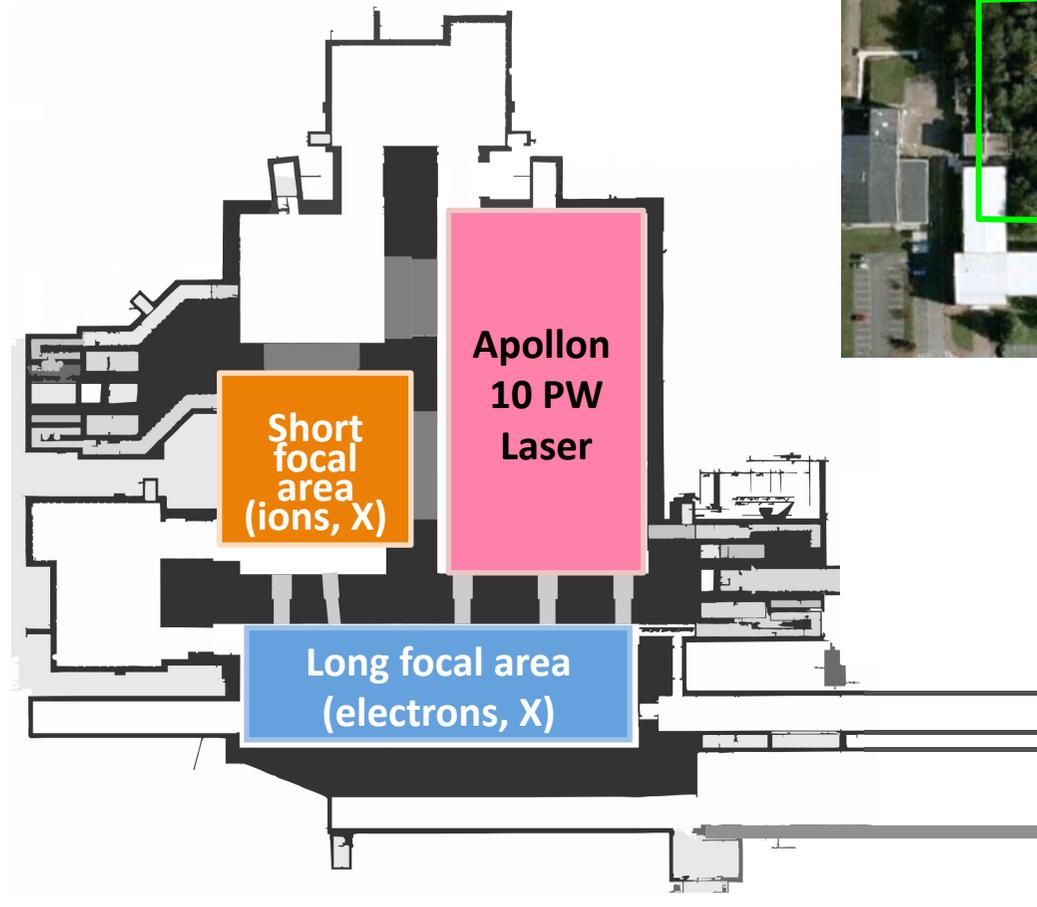
CILEX = LASER APOLLON (20 M€) + Rehabilitation bâtim't+ infrastructures expérimentales + centrales de proximité (20 M€)

Centres laser haute puissance/ courte durée sur le plateau



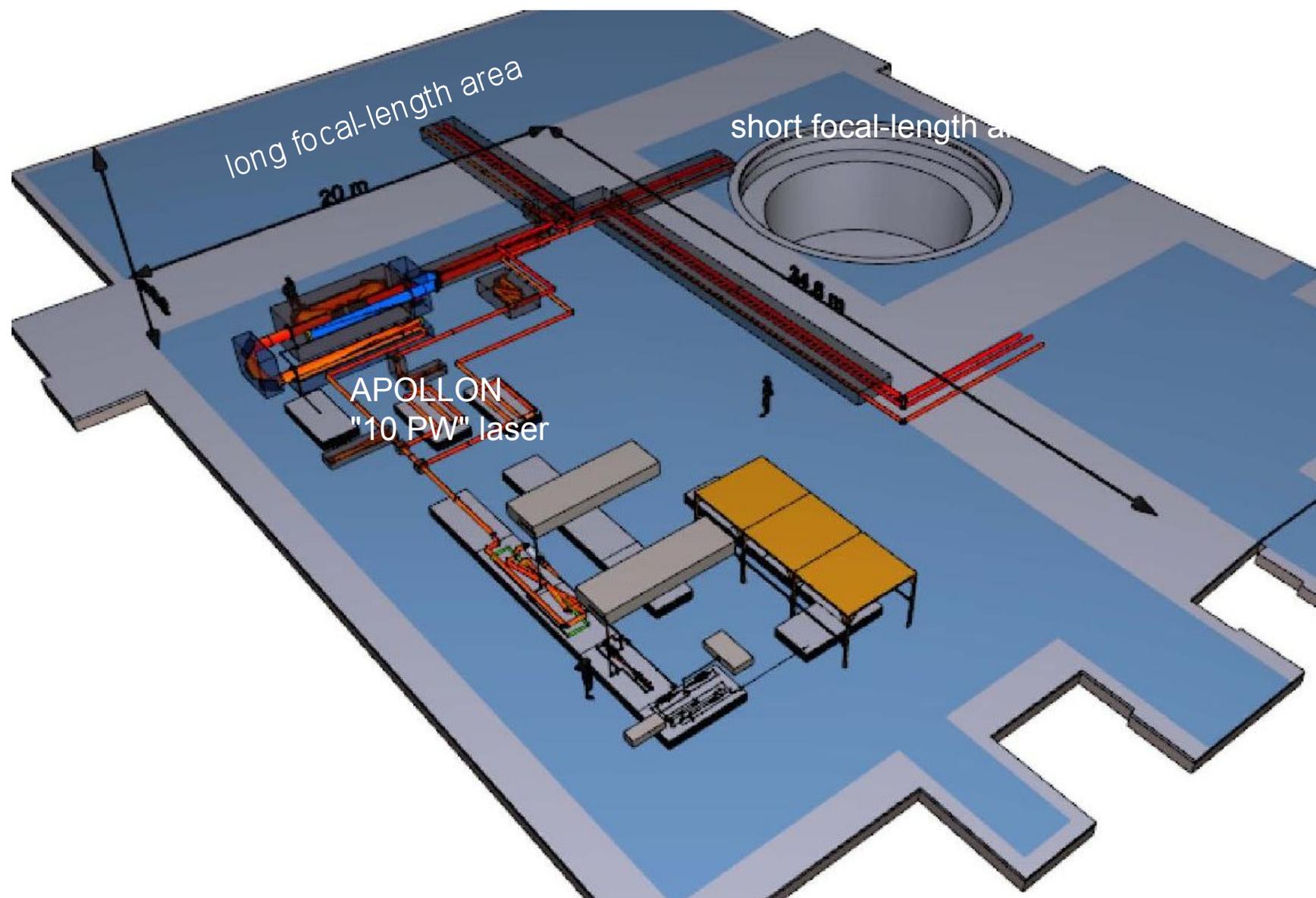
Site de « l'Orme des Merisiers » (à côté du synchrotron SOLEIL)

- ❑ bâtiment de l'ancien ALS (démantelé en 2006)
- ❑ rénovation jusqu'à fin 2013 (selon calendrier): 5000m² total
- ❑ **2 zones expérimentales souterraines radio-protégés**

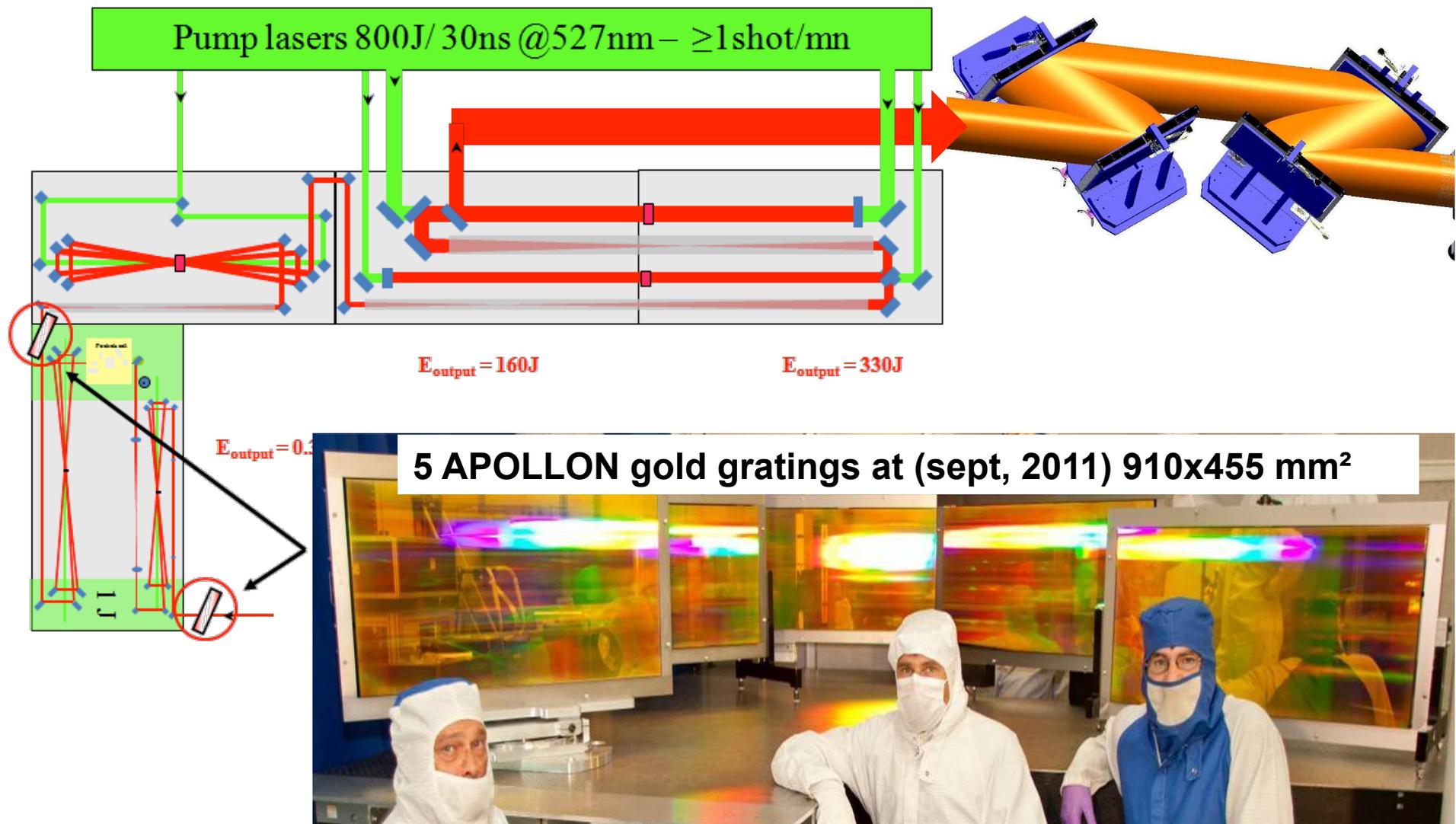


APOLLON: 10 PW laser and 2 experimental areas

CILEX

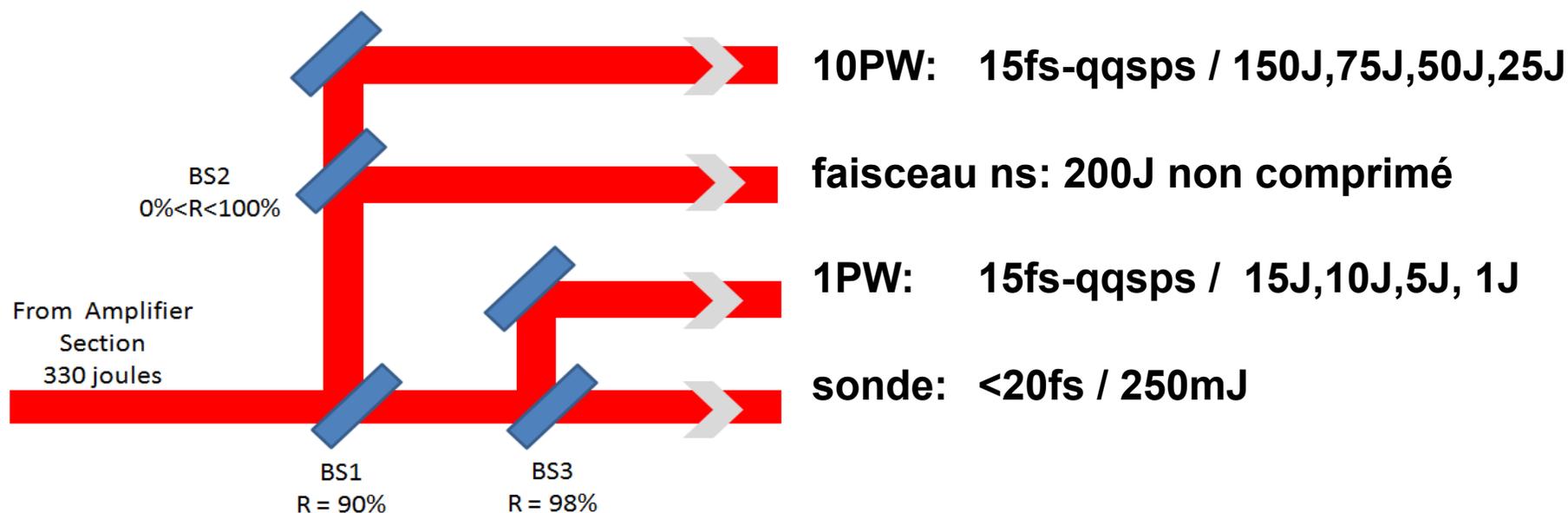


Laser APOLLON: amplification et compression



Les faisceaux laser d'APOLLON

- 4 faisceaux indépendents, énergies variables (discret)



- Stabilité du pointé (angle)
- Synchronisation des faisceaux
- «haute» cadence : 1 tir/min

1 laser, 2 zones expérimentales équipées et radioprotégées

salle HE1 : courtes focales

- accélération d'ions
- génération harmoniques (HHG), flying mirror, laser X
- high-field physics (solid, gas, vacuum)
- cibles solides mais non exclusivement
- focales courtes : $f=1-5\text{ m}$
- intensité: $a_0 \approx 10-10000$
- contrast temporel très élevé

salle HE3 : APOLLON LASER

- f. laser 1: 15fs-qq ps / 150J-70J
- f. laser 2: 15fs-qq Ps/ 15J-2J
- f. non-compressé 200J-0J
- f. sonde: 15fs 0.2-1J

- accélération d'électrons
 - mono-étage et multi-étage
 - régimes « bulle » et quasi-linear
- production de photon X
 - onduleur plasma (« betatron »)
 - onduleur magnétique avec seeding
 - diff Thomson non-lin.; Compton inverse
- HHG, flying mirror (sur cibles gazeuses)

salle HE0 : longues focales

- cibles gazeuses
- focales longues : $f=10-20\text{ m}$
- intensité modérée: $a_0 \approx 1-10$
- bon contrast

Est-ce que la LWFA est utilisable pour construire des « vrais » accélérateurs?

Etude de la physique de l'accélération par onde plasma (pertinente pour PWFA, PDWFA)

Phasage des faisceaux laser

- **raison: désengagement de l'état du CPER ILE (3.2M€) (mars 2012)**
- recherche de financements de substitution en cours
- **L'objectif 10PW + 1 PW maintenu à long terme**
- **phasage de disponibilité des lasers**
 - **T0: bâtiment prêt à accueillir les équipes laser pour montage**
 - **T0+18m faisceau Apollon "1P" Ø140mm 1 PW (15-20 J/15-20fs), le reste de l'énergie disponible en non comprimé**
 - **T0+24m faisceau sonde pour les utilisateurs**
 - **T0+30m faisceau Apollon "10P" en Ø140mm de 1PW en 15fs**
 - **après augmentation de la puissance en fonction des financements jusqu'à P=10PW en Ø400mm**
- **T0 = mars 2014 (disponibilité des locaux réhabilités)**

Phasage des expériences d'accélération d'électrons sur APOLLON

○ Phase 1 @T0+18m (= 2015):

- régime bulle, 1 faisceau beam: 15J–20J, 15-10fs
- plasmas homogènes & guidage laser, auto-injection
- caractérisation complète des e⁻ et and diagnostics betatron

○ Phase 2 @T0+24m (= debut 2016):

- colliding pulse injection, cold injection
- 2 laser beams : 100 mJ/20J

○ Phase 3 @T0+30m (= fin 2016):

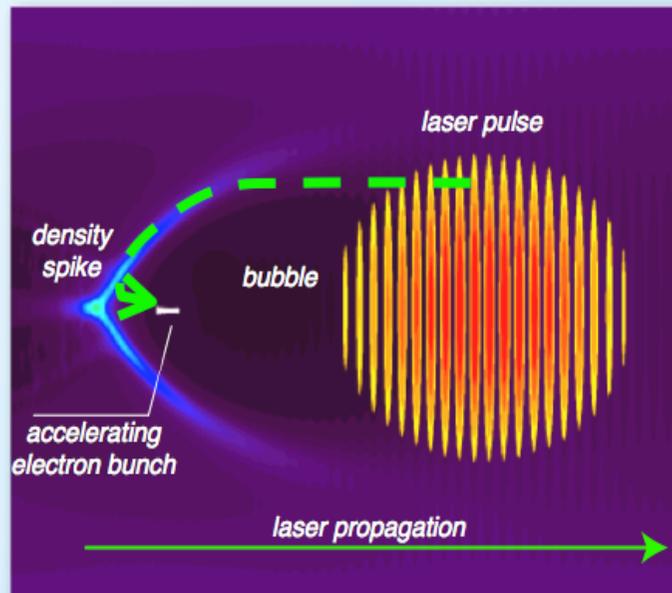
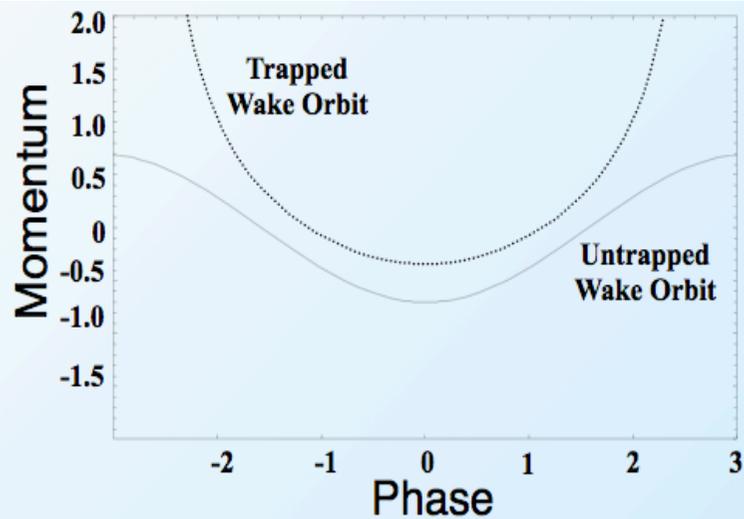
- accélération en 2 étages (injecteur tout-optique)
- 3 faisceaux laser beams : 100mJ/15J/15J-150J

Apollon E=100 J Diamètre = 30 cm	$n_e(\text{cm}^{-3})$	$L_{\text{acc}}(\text{cm})$	$\tau_{\text{laser}}(\text{fs})$	a_0	w_0 (micron)	Energy (GeV)	Q(nC)	Focal length(m)
Régime auto injecté Plasma homogène	5.2×10^{18}	9.8	81	5.2	36.6	6.9	0.77	11
Régime Injection externe ou multi-étage canal plasma	4.8×10^{16}	170	151	2	70.9	25		21

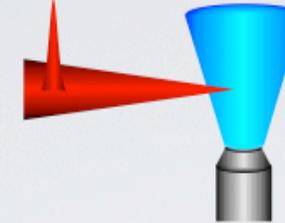
Injection d'électrons dans le champs accélérateur de l'onde plasma

-injection of background plasma e^-

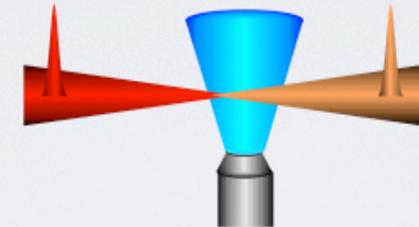
controlled injection



• External Injection



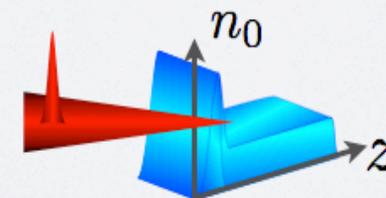
• Colliding pulse



• Ionization



• Density tailoring



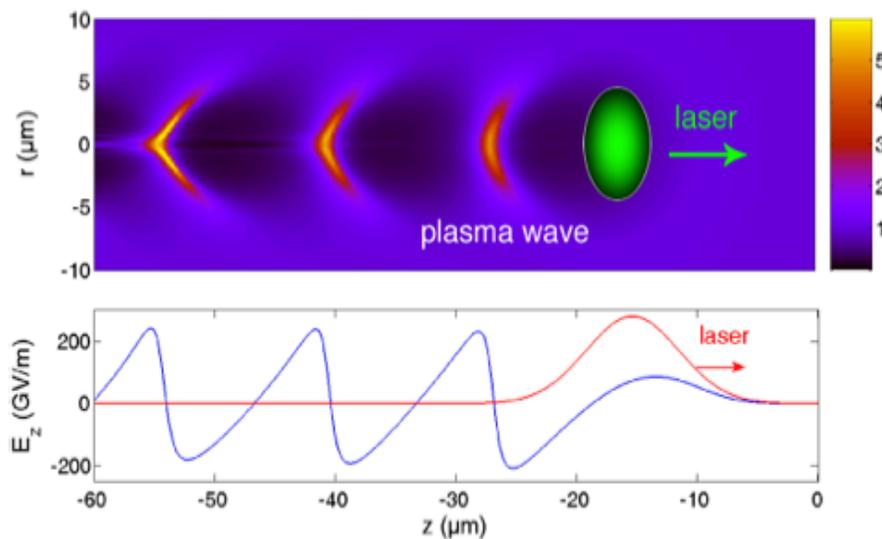
figures: A. Gonsalves (LBNL)

exemple: Phase 2 (2017): accélération multi-étage « tout-optique»

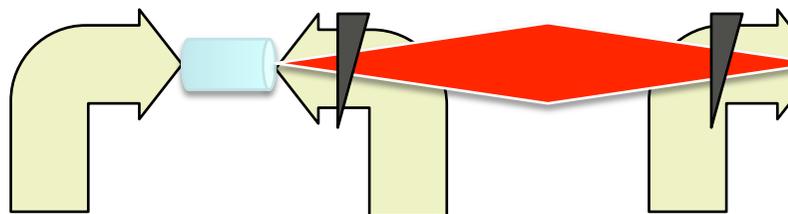
régime non-linear «bulle»

deferlement -> e⁻ blowout

champ acc. max., focalisat° au pic du champ



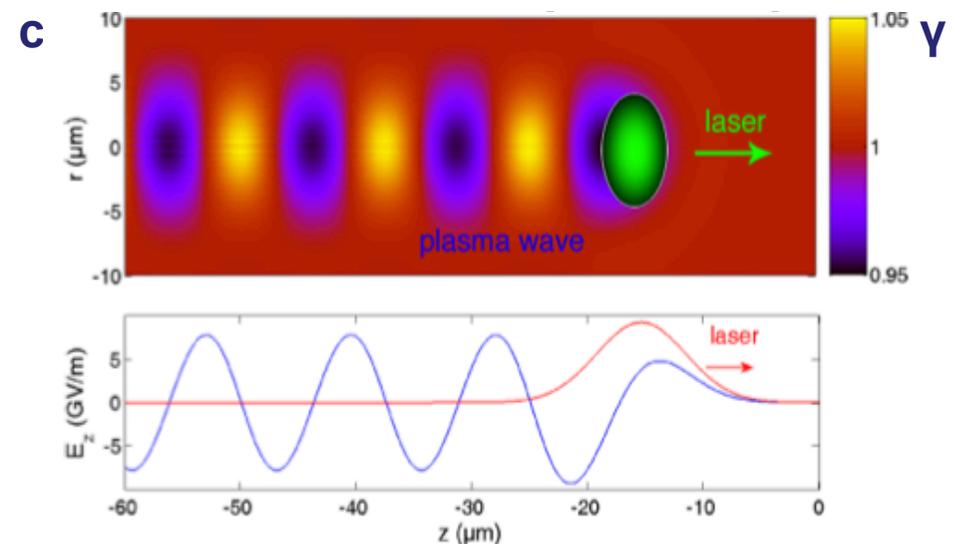
LWFA e⁻ transp. +diagn.



regime quasi-lineaire :

laser intensities (Wm⁻²) plus petits

ampl. onde plasma plus faible, champ acc. moindre

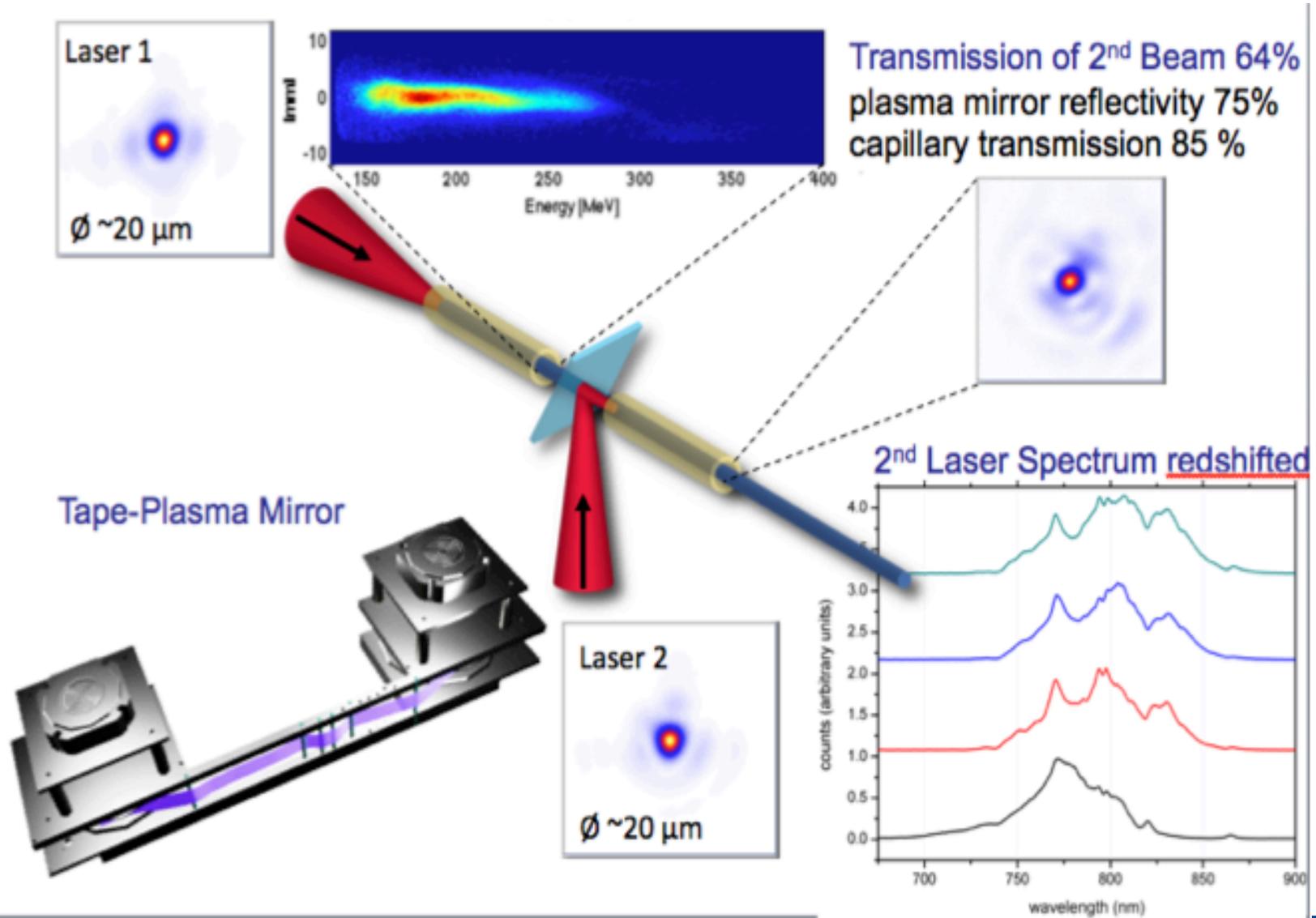


LWFA e⁻ diagn. e⁻ dump



Injection du laser en accélération multi-étages

T. Sokollik (LBNL) - Staged Laser Plasma Accelerators



Conclusion

- **l'accélération plasma entre dans la phase «facility» avec exploration de tous les "moteurs" (laser, electrons, protons)**
 - **CILEX, BELLA, FACET(SLAC), LAOLA (DESY), AWAKE (CERN), ...**
 - **l'application HEP n'est plus la seule motivation (ce qui crée aussi des synergies)**
- **Le LLR est positionné sur CILEX (laser 10PW in finé)**
 - **engagement contractuel dans le cadre de l'Equipex**
 - **thématique electrons importante, mais pas la seule**
 - **participation aux campagnes préparatoires**
- **Le R&D de diagnostics électrons ouvre la possibilité de collaborations avec d'autres partenaires**

Reseau EuroNNAC (créé en 2011)

- **Objectif: fédérer les acteurs européen en accélération plasma et les grand centres d'accélérateurs pour définir un projet PWFA a l'horizon du FP8 (2013-14?)**

- **reseau EuroNACC au sein d'EUCARD, coordination :**

Ralph Assmann (CERN, now)
Henri Videau -> A.S.
Jens Osterhoff (U HH and DESY)

- **Statement to the European Strategy Group (Cracow Sept 2012)**

"On the Prospect and Vision of Ultra-High Gradient Plasma Accelerators for High Energy Physics"

<https://indico.cern.ch/contributionDisplay.py?contribId=110&confId=175067>

- **Organisation du premier workshop advanced accelerator concepts européen (EAAC) 4-8 juin 2013, Ile d'Elbe, Italie**

Statement from the European Network for Novel Accelerators (EuroNNAC) to the European Strategy Preparatory Group (ESPG)

On the Prospect and Vision of Ultra-High Gradient Plasma Accelerators for High Energy Physics

July 31st, 2012

Editors: R. Assmann (CERN), A. Caldwell (MPI), M. Ferrario (INFN), J. Osterhoff (DESY), T. Tajima (LMU), H. Videau (Ecole Polytechnique)

The European Network for Novel Accelerators (EuroNNAC) is part of the EU-funded European Coordination of Accelerator R&D (EuCARD) and includes representatives from the following research institutes as members:

Astec (UK), BNL (US), Budker INP (Russia), CERN (Europe), Cockcroft Institute (UK), Consiglio Nazionale delle Ricerche INO (Italy), DESY (Germany), Ecole Polytechnique CNRS/IN2P3 (France), Eindhoven University of Technology (Netherlands), ELI (EU), ESRF (Europe), FNAL (US), Helmholtz Institute Jena (Germany), Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (Germany), International Committee on Ultra-Intense Lasers (ICUIEL), Institute of Applied Physics RAS (Russia), Instituto Superior Tecnico de Lisboa (Portugal), IRAMIS/CEA (France), JINR (Russia), Jyväskylä University (Finland), KEK (Japan), MPPM-RMKI (Hungary), LAL (France), Lancaster University (UK), LLNL (US), Liverpool University (UK), LMU Munich (Germany), LOA (France), LPGP (France), LULI (France), Lund University (Sweden), Manchester University (UK), Max Planck Institute for Physics (Germany), Pisa University (Italy), PSI (Switzerland), Shanghai Jiao Tong University (China), SLAC (US), Soleil (France), STFC (UK), Tsinghua University Beijing (China), TU Darmstadt (Germany), UCL (UK), UCLA (US), University of Duesseldorf (Germany), University of Hamburg (Germany), University of Oxford (UK), University of Rome La Sapienza (Italy), University of Strathclyde (UK)