

Accélération laser-plasma à l'échelle du microcoulomb sur LMJ-PETAL

Benoît Mahieu



Equipe



CEA :

**X. Davoine, W. Cayzac, G. Boutoux, L. Gremillet, L. Ribotte, M-O. Frégeau
W. Duchastenier, B. Vauzour, I. Lantuéjoul, V. Hénot, E. Journot**

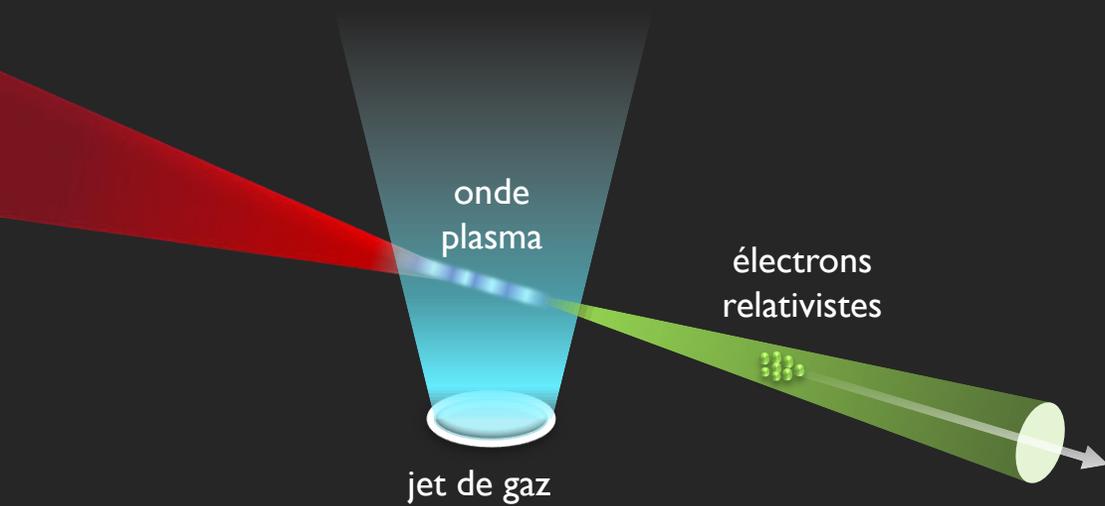
Laser PETAL **N. Blanchot, F. Audo, S. Cavarro, C. Chappuis, F. Scol, W. Vaillant**

Cibles **E. Lamoine, M. Brochier, J. Carty, R. de Mollerat du Jeu, R. Diaz, P. Dupré,
L. Le Déroff, B. Etchessahar, J. Gastineau, R. Parreault, T. Caillaud**

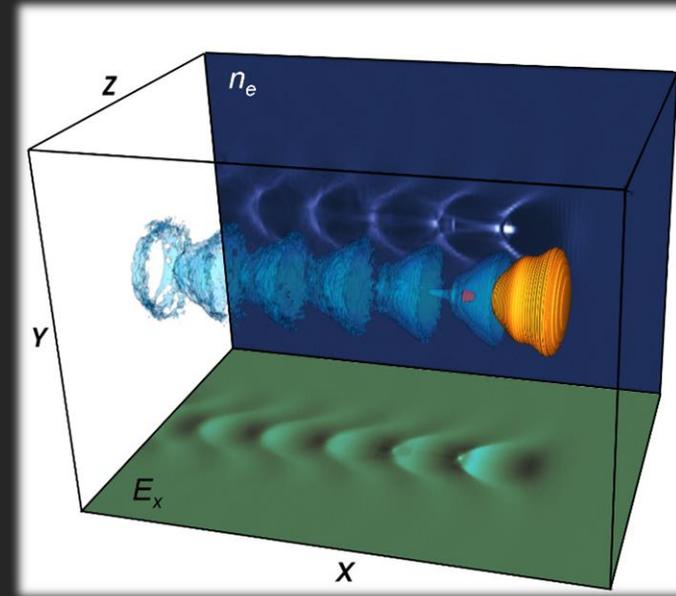
Collaborateurs extérieurs :

**K. Ta Phuoc (LOA/CELIA), D. Batani (CELIA), J-C. Kieffer (INRS), J-L. Bourgade,
R. Babjak (IST Lisbon), F. Albert (LLNL)**

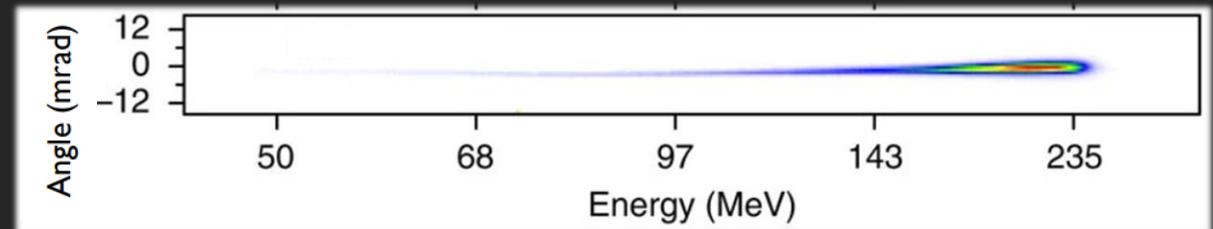
L'accélération laser-plasma permet de créer des électrons relativistes en quelques *mm* de propagation dans un gaz



Simulation
particle-in-cell
code CALDER

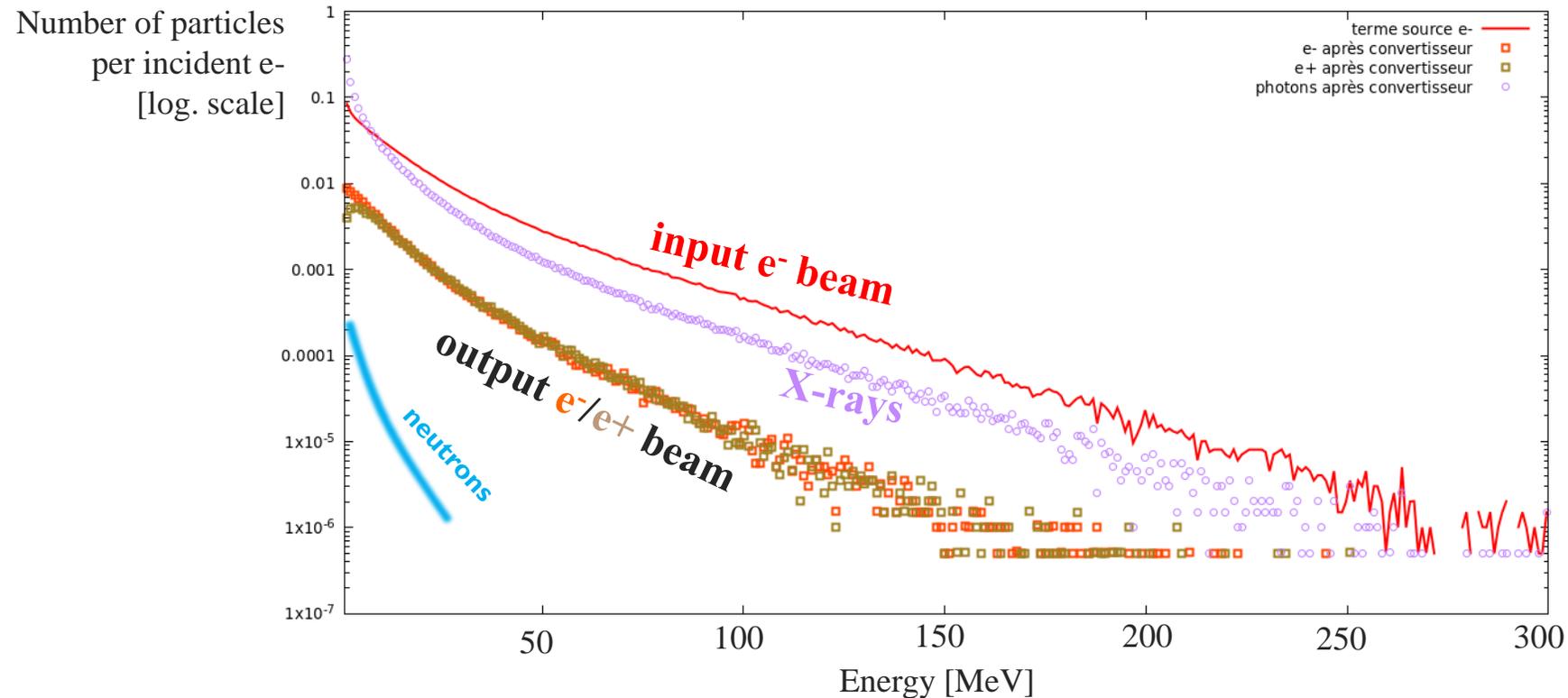
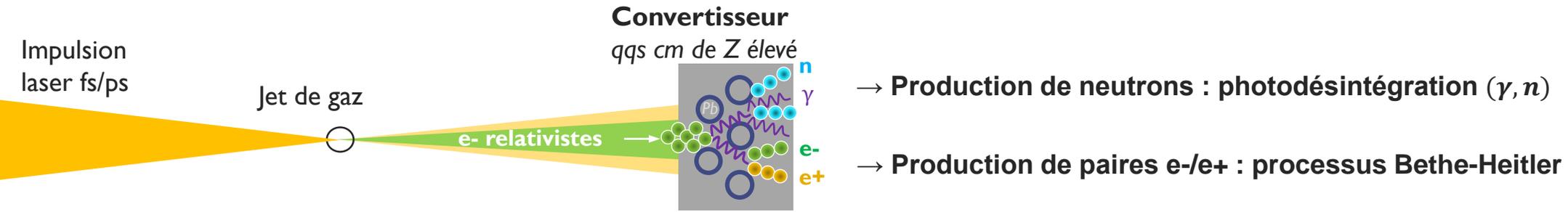


Spectre
mesuré
@LOA



Corde et al., *Nature Comm.* (2013)

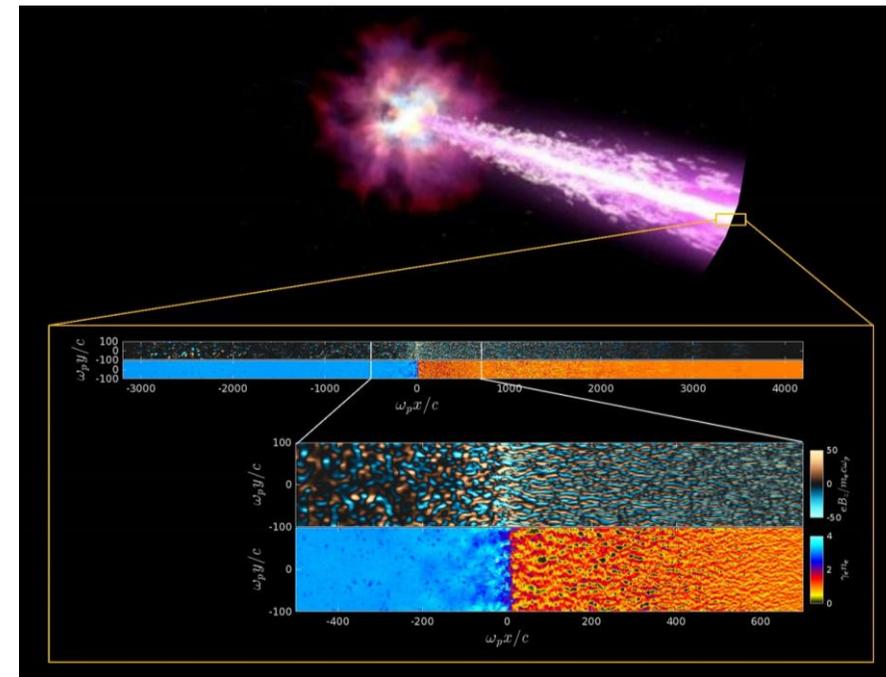
Simulation Monte-carlo de l'interaction d'un spectre d'électrons typique avec un convertisseur d'épaisseur centimétrique



Motivation scientifique : exemple de la création de paires e^-/e^+

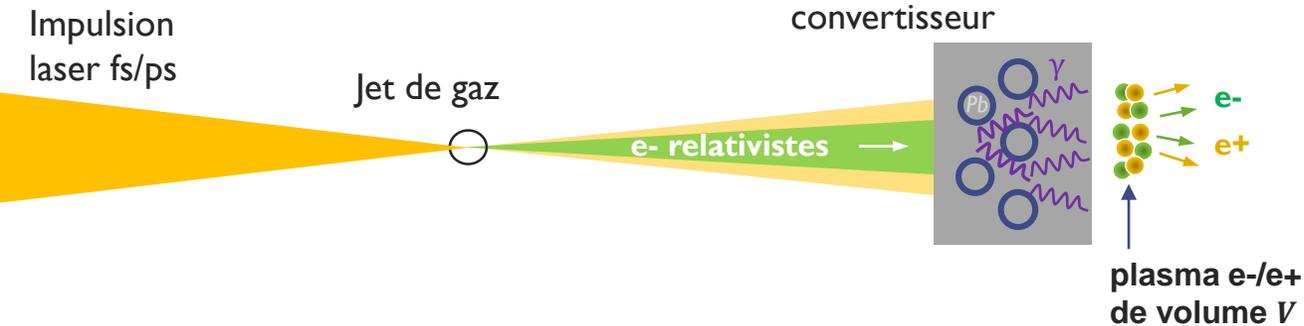
- L'interaction entre jets de paires électron-positron ou avec des plasmas électron-ion est tenue pour responsable des sources les plus brillantes du cosmos (sursauts gamma, blazars) [Piran 2005].
- La création de jets de paires denses et quasi neutres (**plasmas de paires e^-/e^+**) est un objectif important en astrophysique de laboratoire en vue d'étudier leur interaction collective (via des instabilités) et radiative (par émission synchrotron) mutuelle ou avec un plasma cible [Lobet 2015, Sinha 2019, Shukla 2020, San Miguel Claveria 2022].

Vue d'artiste d'un sursaut gamma et simulation PIC de l'interaction entre le jet de paires issu de la source centrale (supernova ou coalescence d'objets compacts) et le milieu ambiant [Lemoine 2019].



L. Gremillet

Pour créer un véritable plasma de paires e-/e+, leur densité doit être suffisamment élevée



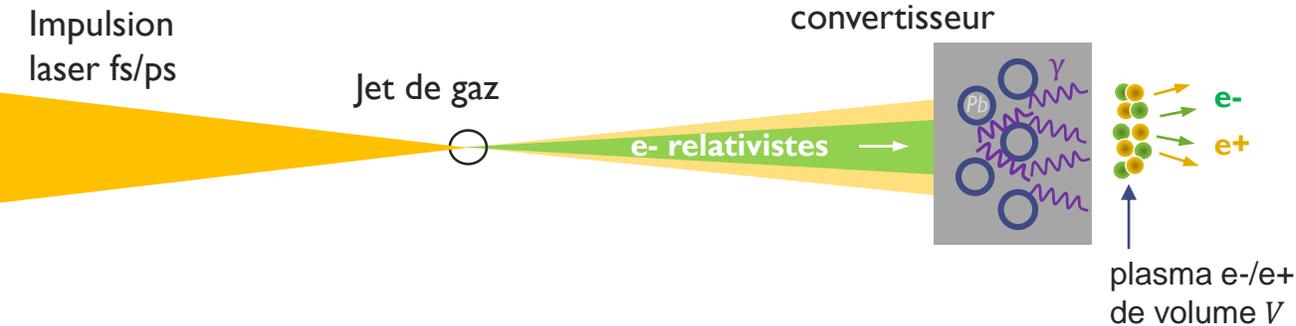
La dimension caractéristique L du plasma de paires doit être typiquement supérieure à l'épaisseur de peau :
(profondeur de pénétration du rayonnement dans le plasma)

$$L > \frac{c}{\omega_p} ; \text{ ou en terme de volume : } V > \left(\frac{c}{\omega_p} \right)^3$$

avec la fréquence du plasma de paires : $\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 \cdot n_{\text{paires}}}{\epsilon_0 \cdot \gamma \cdot (m_e/2)}}$

→ On obtient une condition sur le nombre de paires voulu : $N_{\text{paires}} > \frac{\epsilon_0 \cdot m_e \cdot c^2}{2 \cdot e^2} \cdot \gamma \cdot V^{\frac{1}{3}}$

Il faut donc un paquet d'électrons de forte charge



La dimension caractéristique L du plasma de paires doit être typiquement supérieure à l'épaisseur de peau :
(profondeur de pénétration du rayonnement dans le plasma)

$$L \gg \frac{c}{\omega_p} ; \text{ ou en terme de volume : } V \gg \left(\frac{c}{\omega_p} \right)^3$$

avec la fréquence du plasma de paires : $\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 \cdot n_{\text{paires}}}{\epsilon_0 \cdot \gamma \cdot (m_e/2)}}$

→ On obtient une condition sur le nombre de paires voulu : $N_{\text{paires}} > \frac{\epsilon_0 \cdot m_e \cdot c^2}{2 \cdot e^2} \cdot \gamma \cdot V^{\frac{1}{3}}$

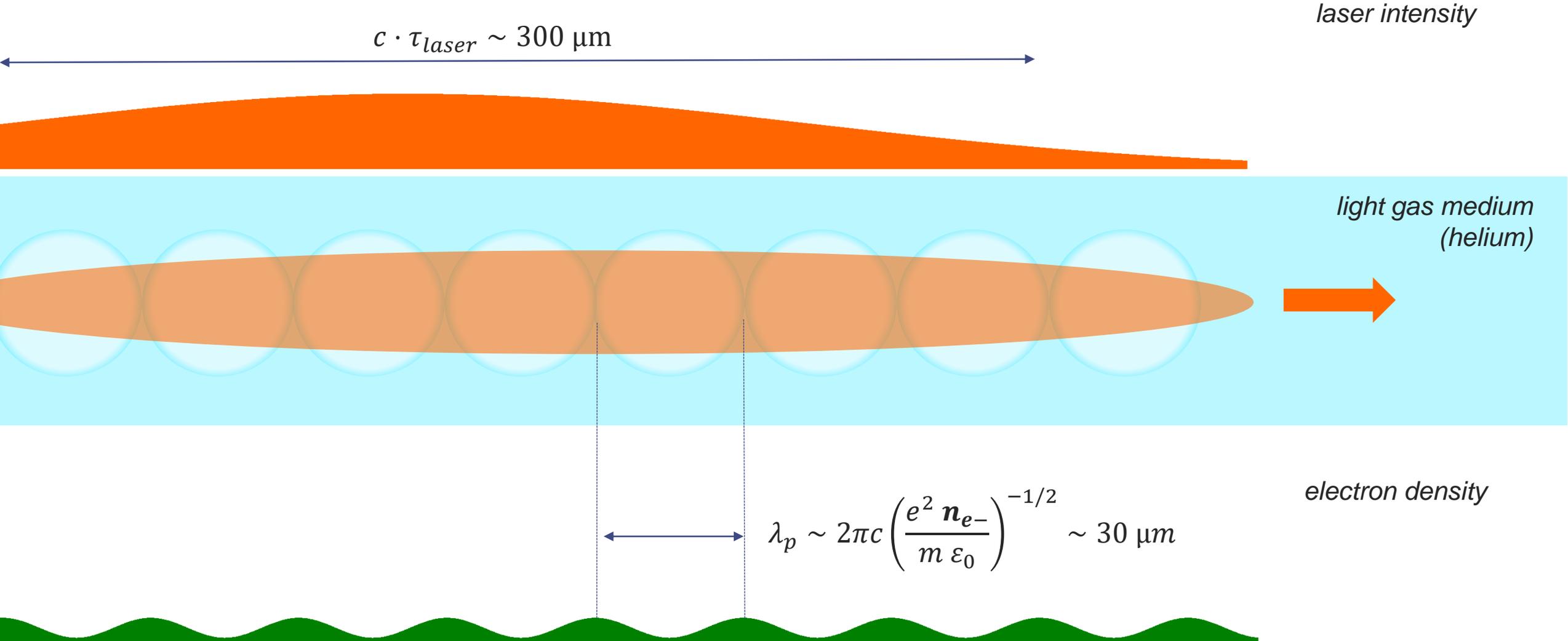
→ On va chercher à créer un nombre maximum de paires e-/e+,
et donc un nombre maximum d'électrons incidents (charge élevée)
dans un volume V suffisamment petit et avec un facteur de Lorentz γ modéré.

H. Chen & F. Fiuza, Physics of Plasmas (2023)

Plan de la présentation

1. Description du régime d'accélération par sillage auto-modulé
2. Mise en œuvre au Laser MégaJoule et principales caractéristiques du faisceau d'électrons
3. Rayonnements secondaires
 - a. Mesures X/ γ
 - b. Mesures neutroniques
 - c. Perspectives pour la création de paires e⁻/e⁺

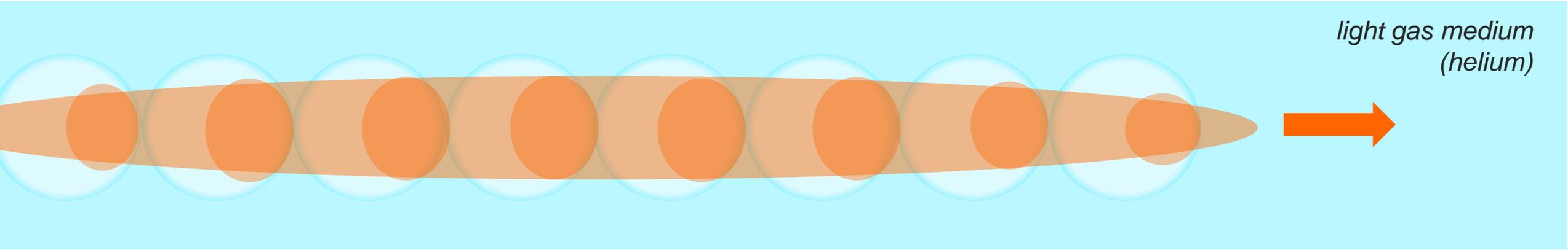
Pour une impulsion laser ps qui crée un plasma de densité $n_e \sim 10^{18-19} cm^{-3}$, le laser recouvre plusieurs périodes plasma



L'échange d'énergie entre les électrons du plasma et le champ laser entraîne la modulation de ce dernier



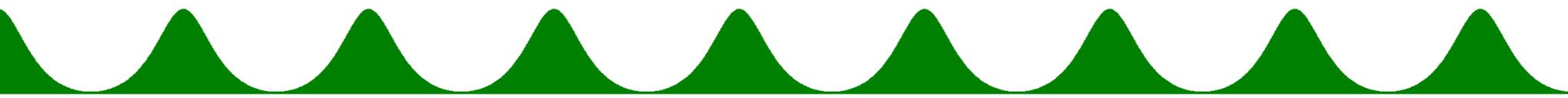
laser intensity



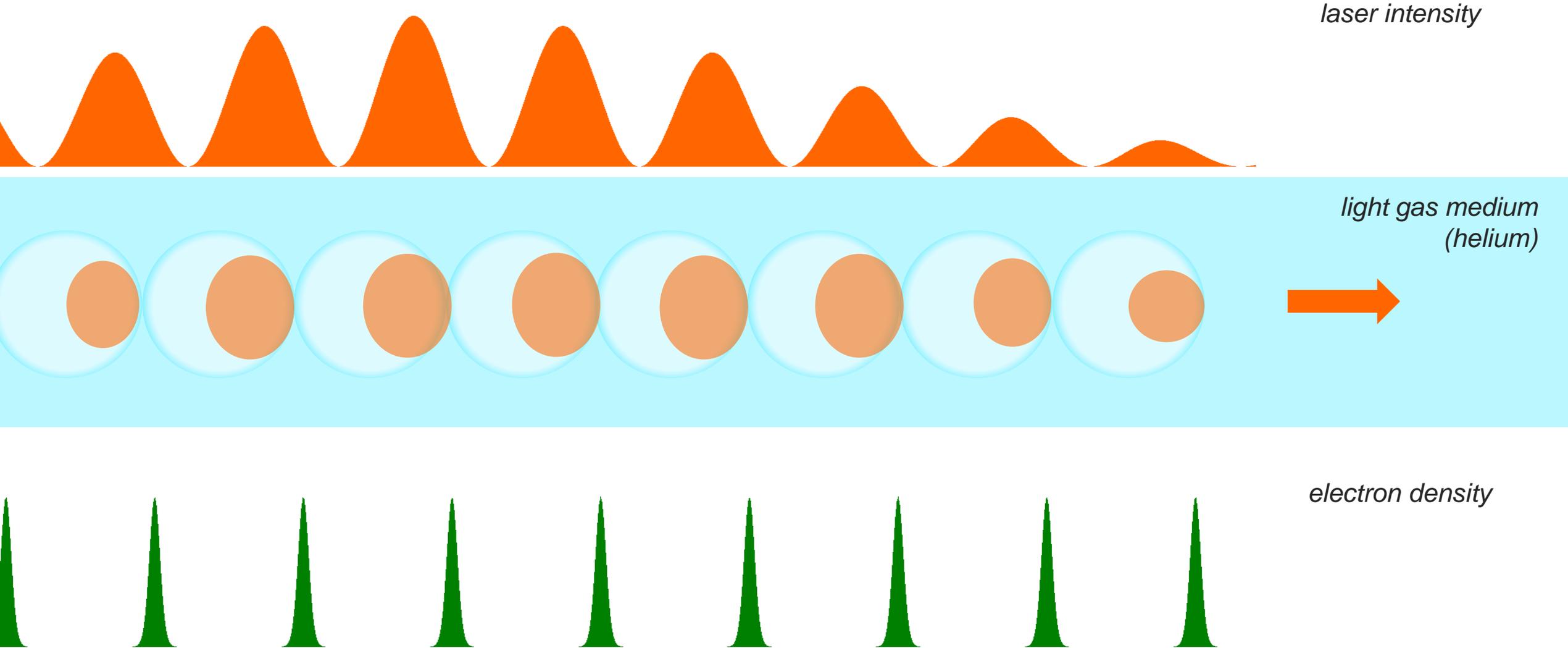
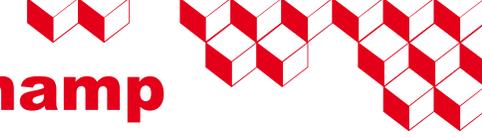
*light gas medium
(helium)*



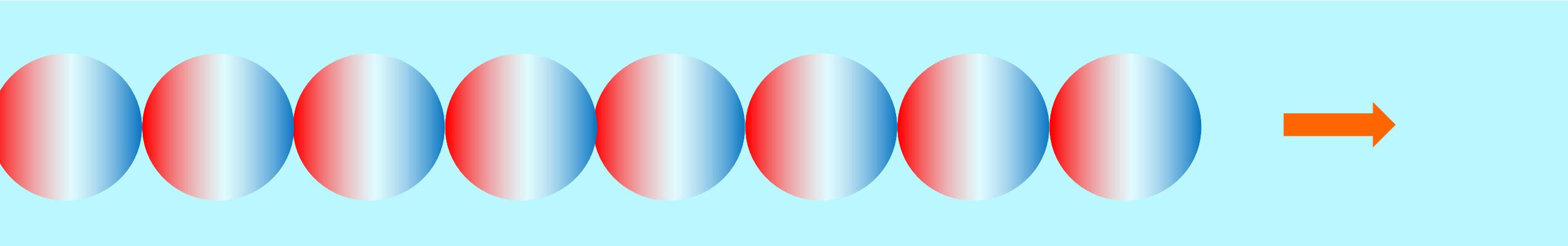
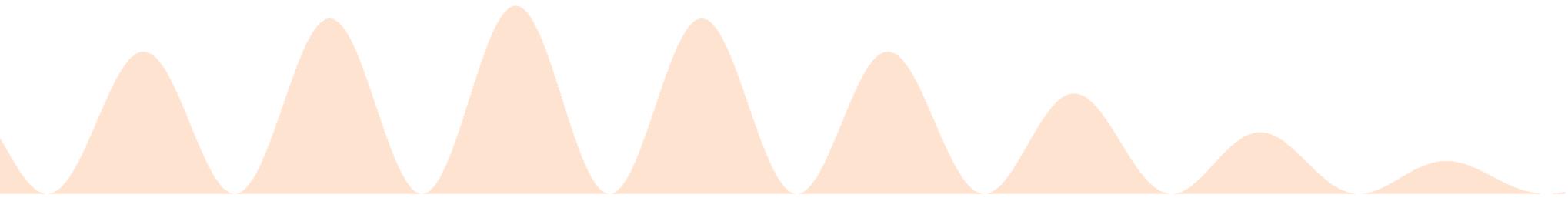
electron density



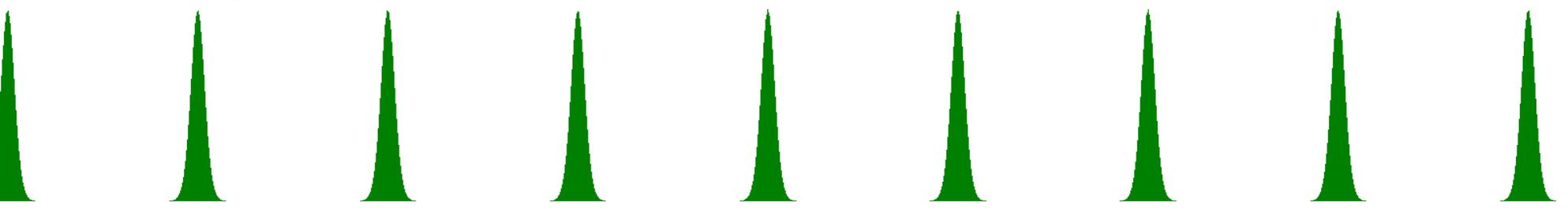
L'échange d'énergie entre les électrons du plasma et le champ laser entraîne la modulation de ce dernier



Les importants gradients de densité créent de forts champs électriques longitudinaux

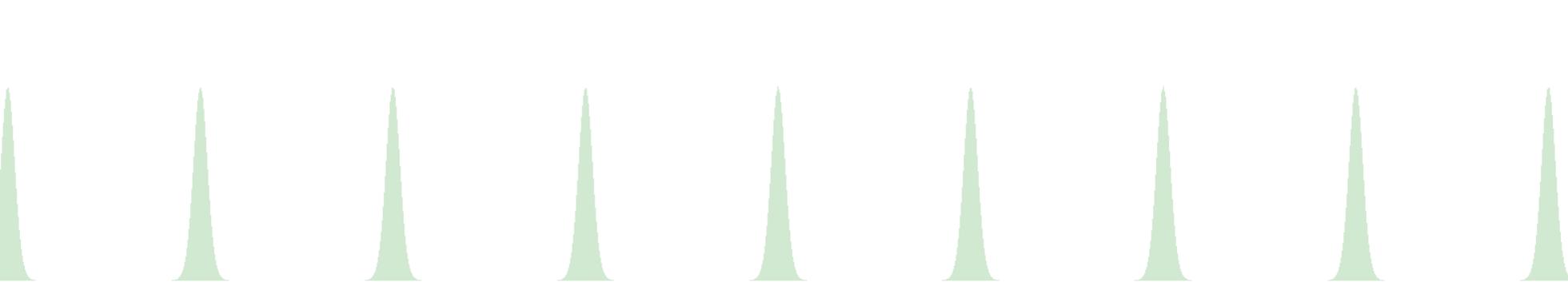
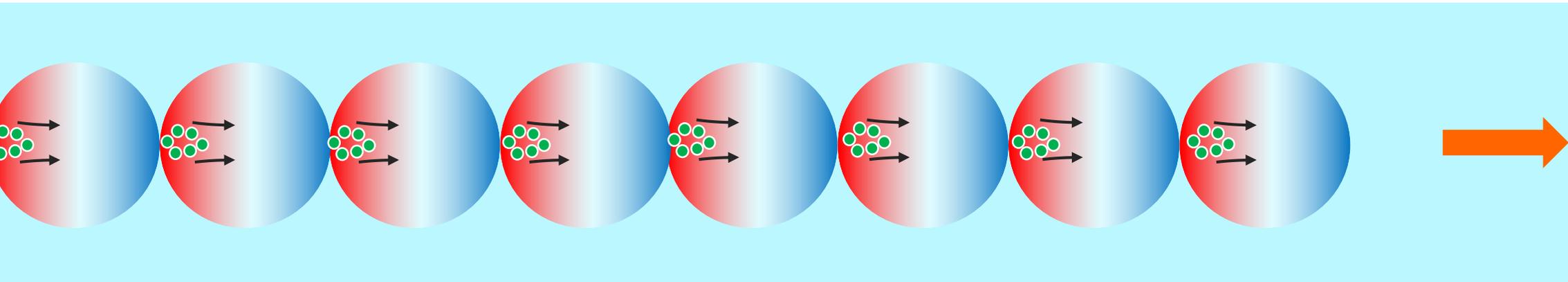
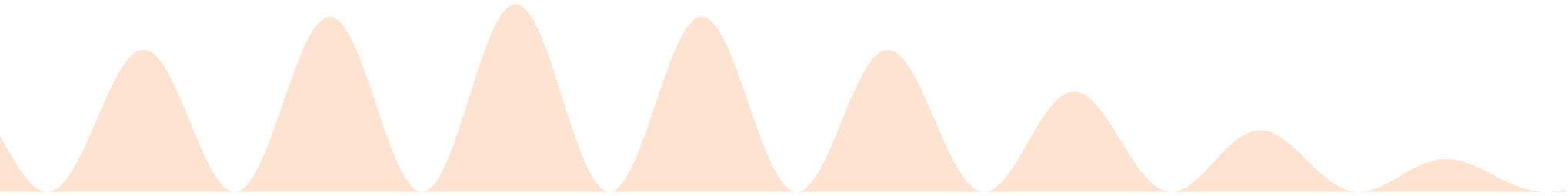


electron density



Longitudinal electric field
accelerating decelerating
(for electrons)

Les électrons ayant une énergie initiale suffisante peuvent être happés dans la cavité précédente, et ainsi être accélérés (jusqu'à la moitié de la cavité)



Longitudinal electric field
accelerating
(for electrons)

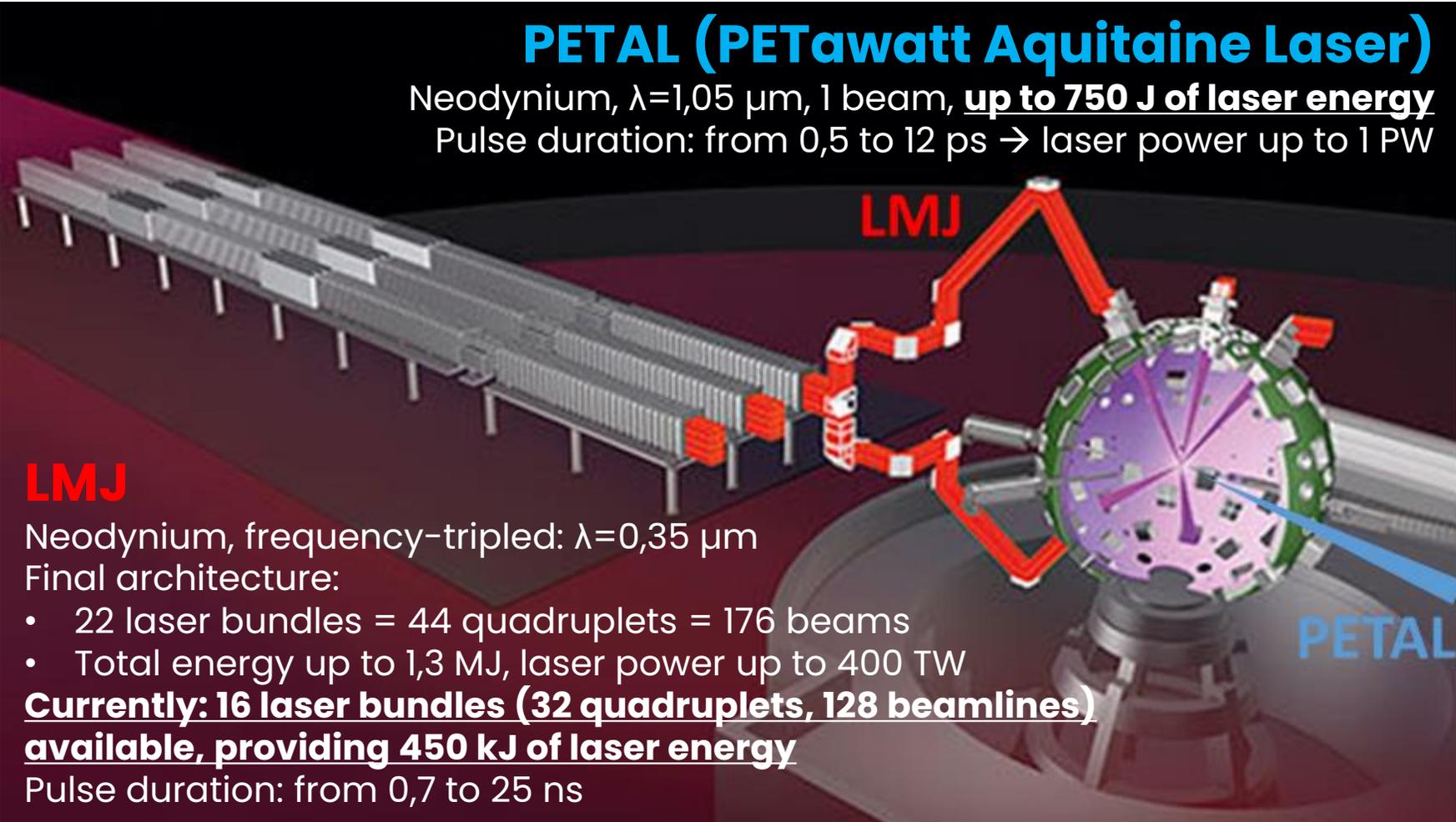
Plan de la présentation

1. Description du régime d'accélération par sillage auto-modulé
- 2. Mise en œuvre au Laser MégaJoule et principales caractéristiques du faisceau d'électrons**
3. Rayonnements secondaires
 - a. Mesures X/ γ
 - b. Mesures neutroniques
 - c. Perspectives pour la création de paires e⁻/e⁺

Installation Laser MégaJoule (LMJ)

PETAL (PETawatt Aquitaine Laser)

Neodymium, $\lambda=1,05 \mu\text{m}$, 1 beam, up to 750 J of laser energy
Pulse duration: from 0,5 to 12 ps \rightarrow laser power up to 1 PW



LMJ

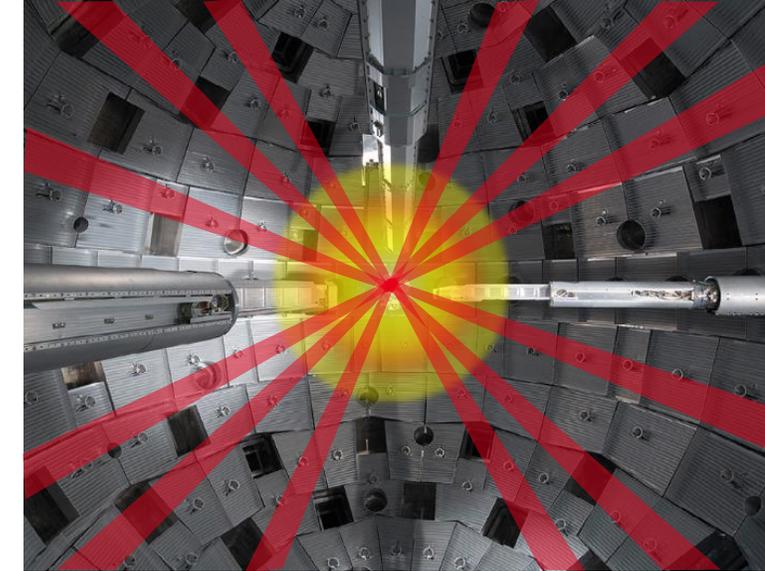
Neodymium, frequency-tripled: $\lambda=0,35 \mu\text{m}$

Final architecture:

- 22 laser bundles = 44 quadruplets = 176 beams
- Total energy up to 1,3 MJ, laser power up to 400 TW

Currently: 16 laser bundles (32 quadruplets, 128 beamlines) available, providing 450 kJ of laser energy

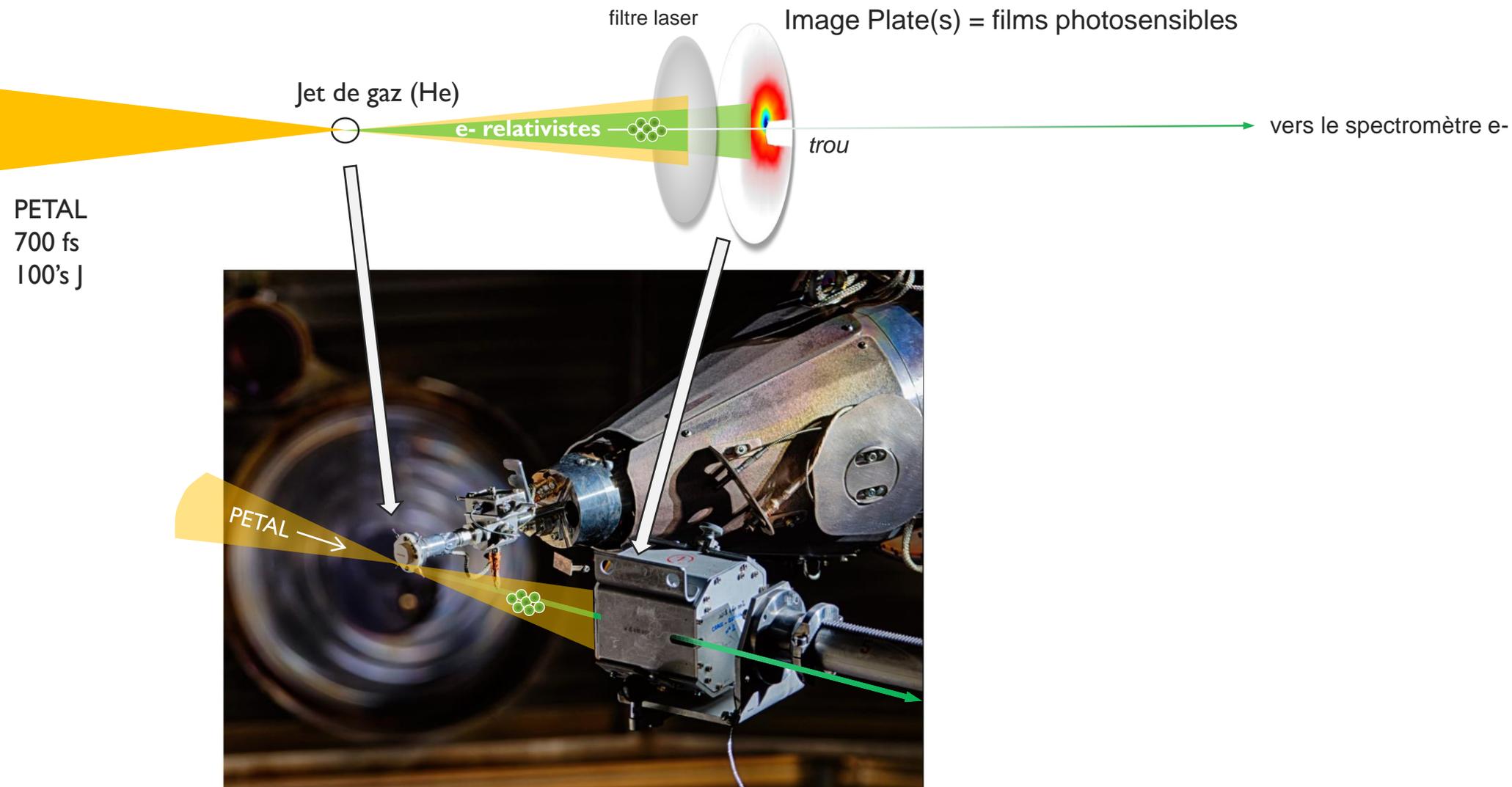
Pulse duration: from 0,7 to 25 ns



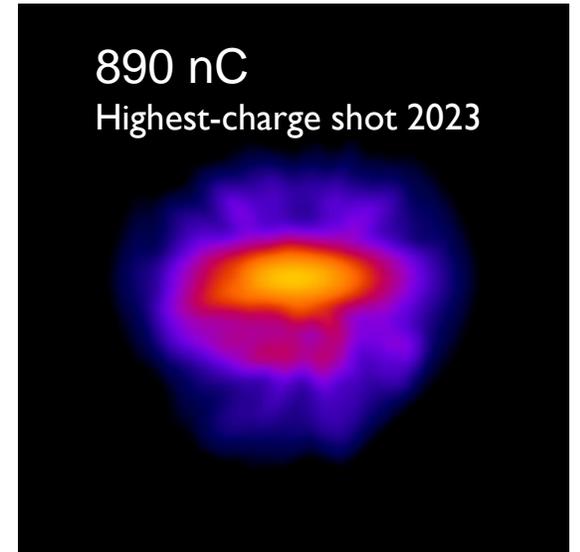
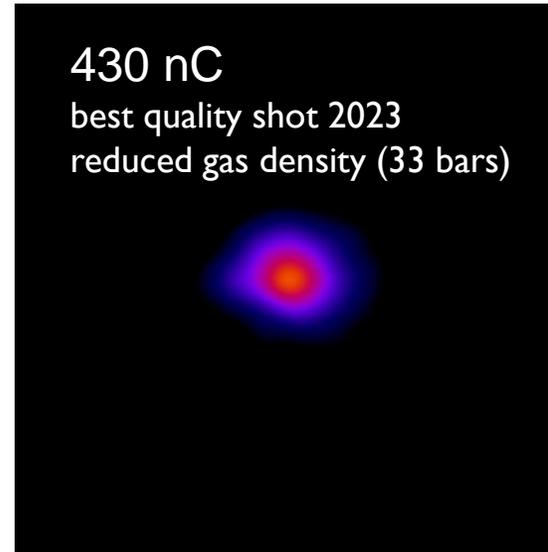
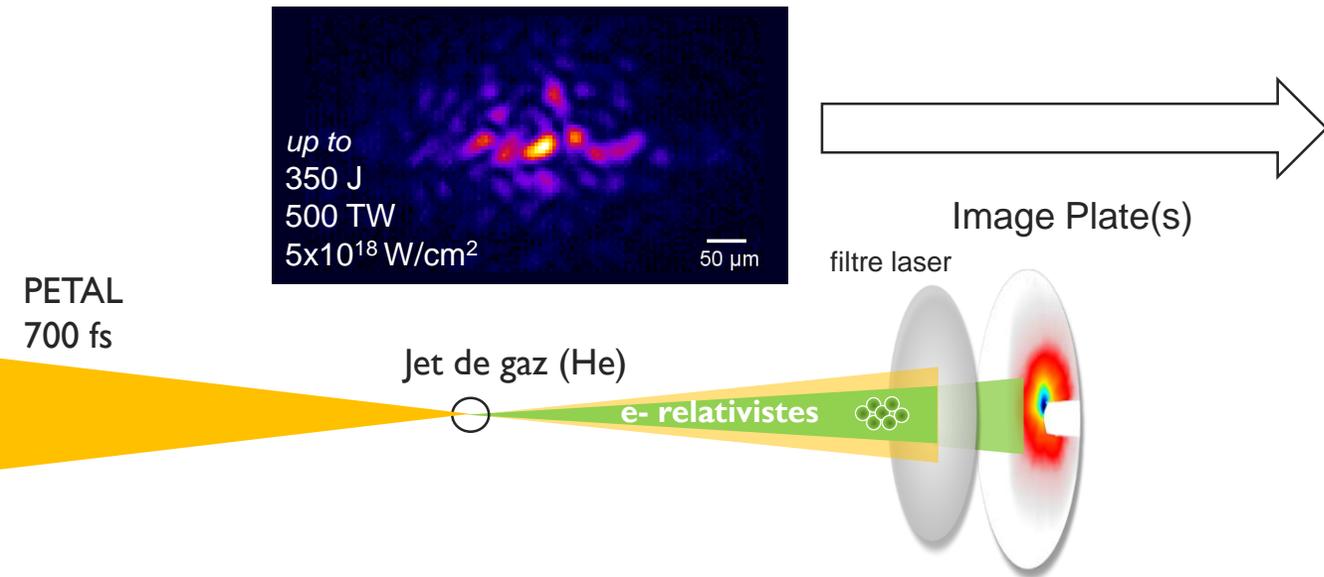
10 m de diamètre



Mise en œuvre de l'expérience d'accélération laser-plasma au LMJ

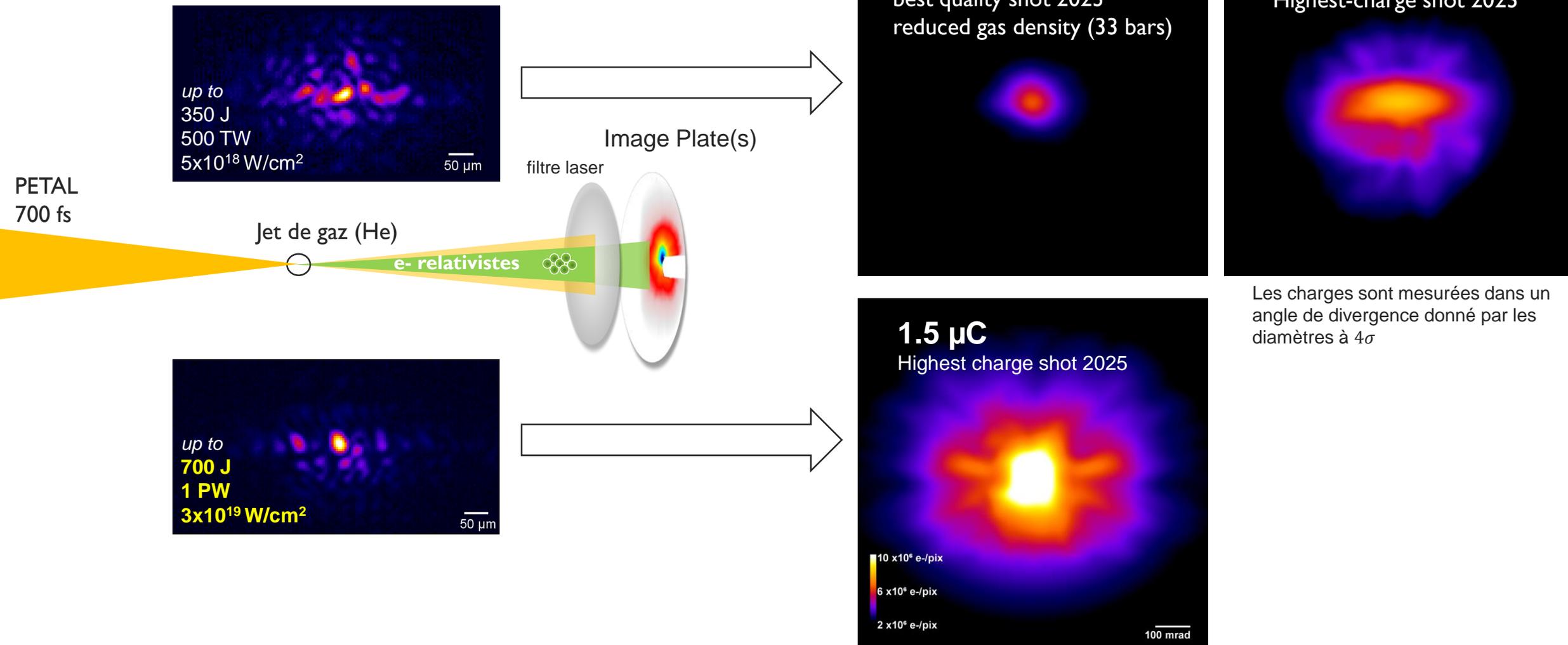


Première expérience (2023)



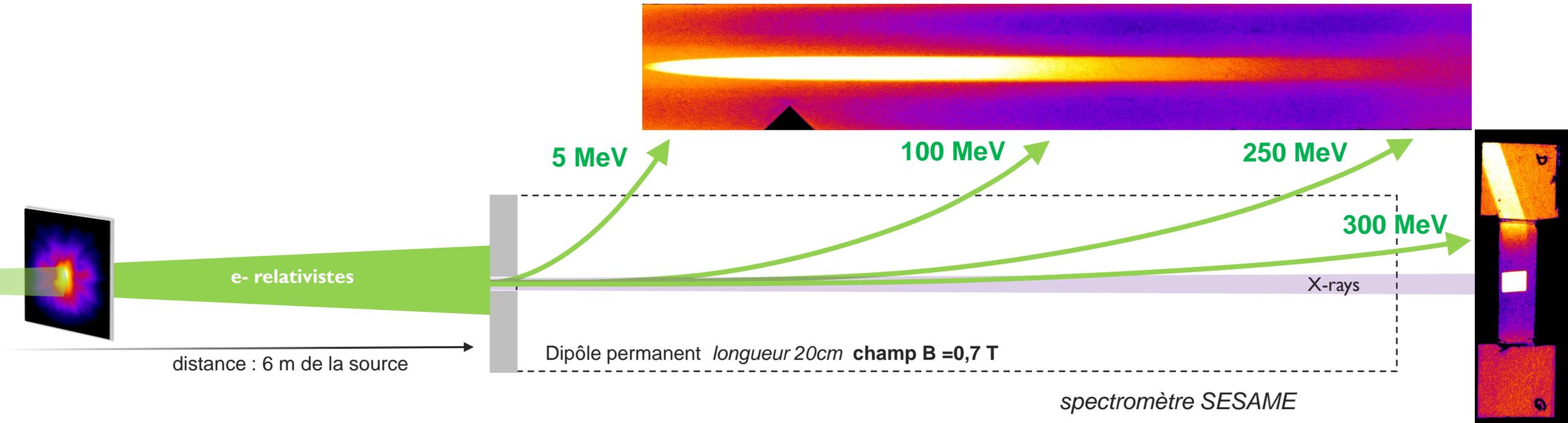
Les charges sont mesurées dans un angle de divergence donné par les diamètres à 4σ

L'upgrade de PETAL en 2025 a permis d'atteindre un niveau record de charge



Les charges sont mesurées dans un angle de divergence donné par les diamètres à 4σ

Spectre mesuré (2025)



→ on mesure un spectre large jusqu'à environ **300 MeV** (calibration précise en cours)

→ environ **5 % de l'énergie laser est transférée aux électrons**

Mesure de la dynamique d'évolution du canal plasma par la diffusion du laser



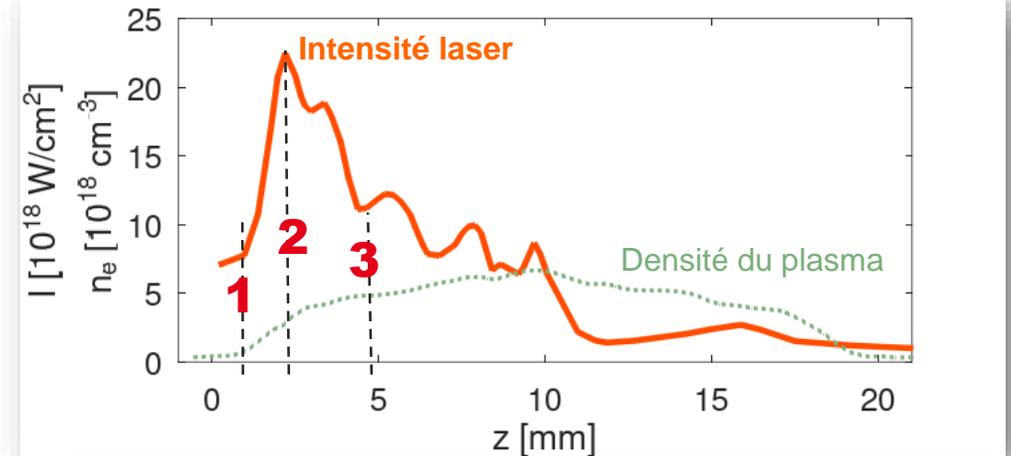
Les simulations corroborent les mesures de diffusion laser dans le plasma

simulations : Xavier Davoine

1 Focalisation géométrique
→ diffusion radiale du laser par les e- du plasma

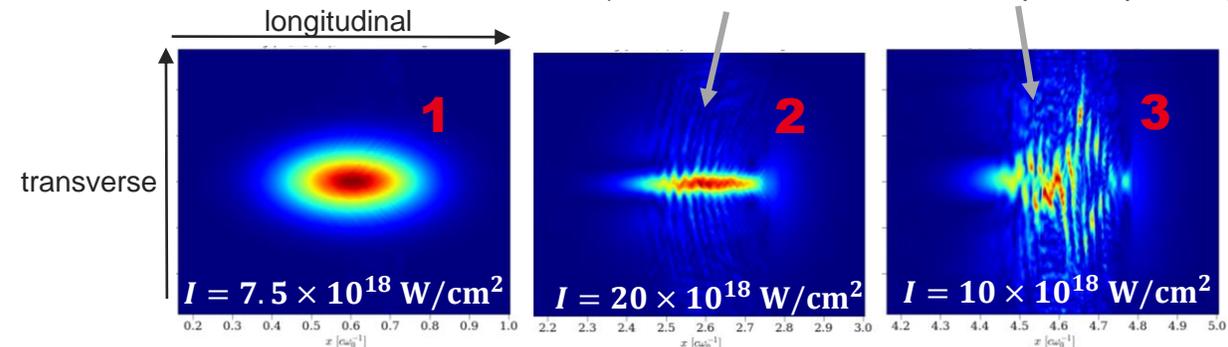
2 Auto-focalisation
→ second signal intense

3 et après Défocalisation laser
→ perte progressive du canal plasma



Amplitude spatio-temporelle du champ laser

(modulations du laser à la fréquence plasma)



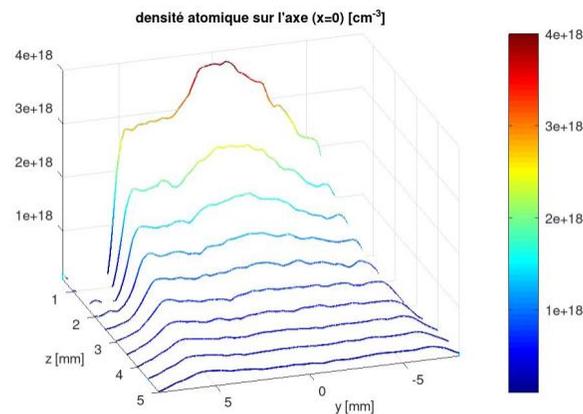
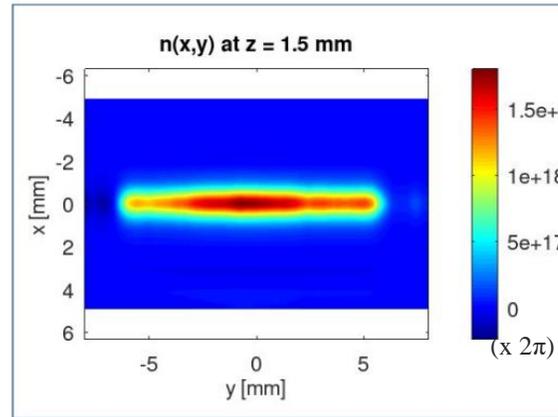
E. Journot

Le profil de densité du jet de gaz est caractérisé expérimentalement et via des simulations

Mesures interférométriques

R. Parreault, J. Gastineau

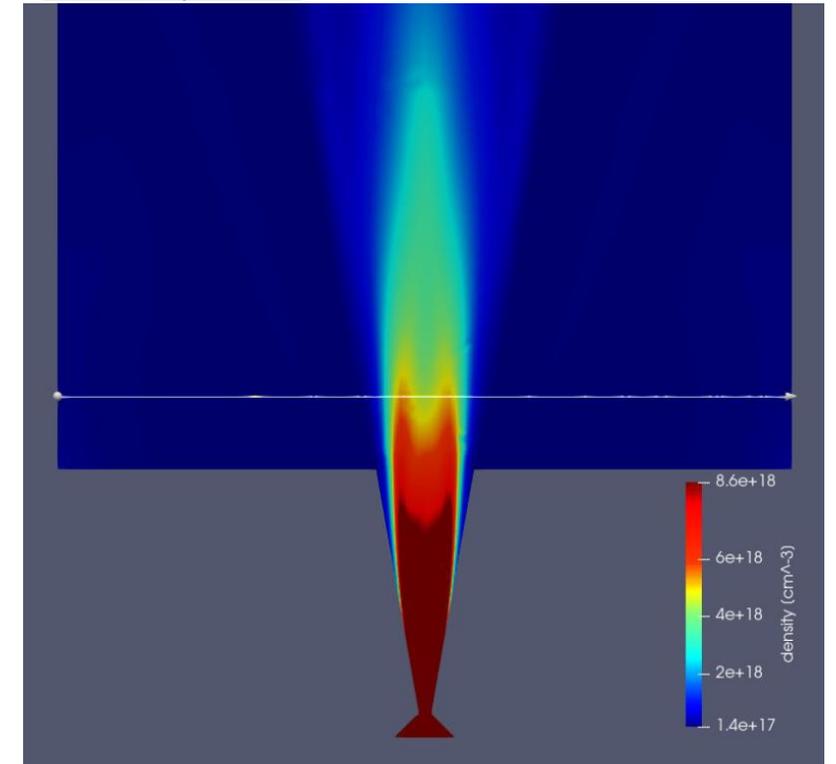
Buse fente 10 mm



Simulations de dynamique des fluides

stage de M. Garandeau

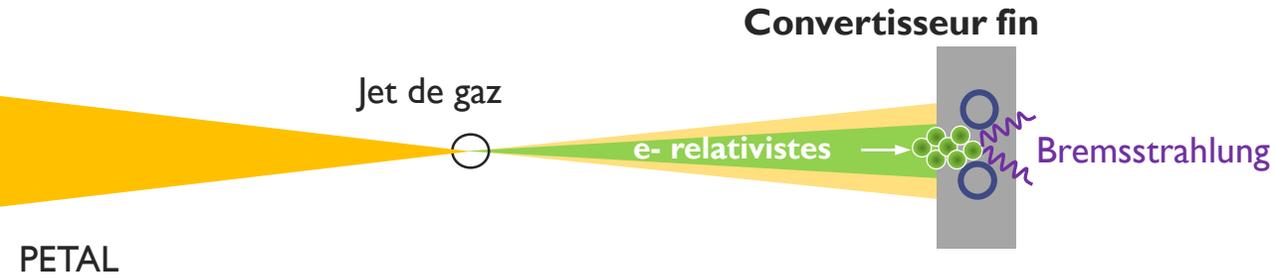
Buse conique 4 mm



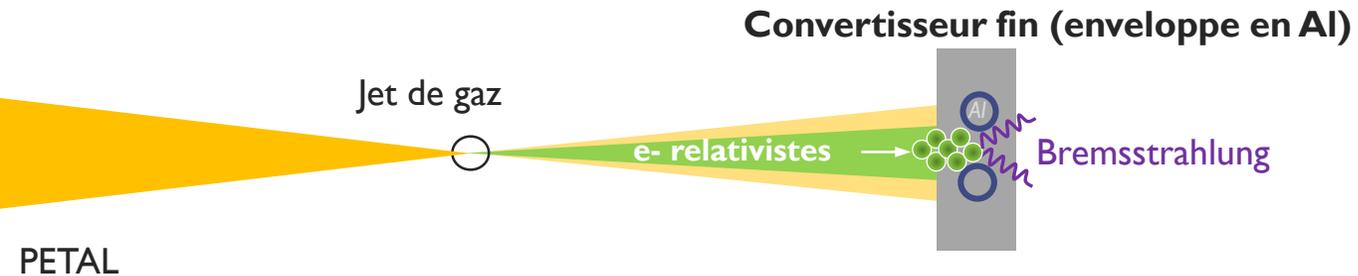
Plan de la présentation

1. Description du régime d'accélération par sillage auto-modulé
2. Mise en œuvre au Laser MégaJoule et principales caractéristiques du faisceau d'électrons
- 3. Rayonnements secondaires**
 - a. Mesures X/ γ
 - b. Mesures neutroniques
 - c. Perspectives pour la création de paires e⁻/e⁺

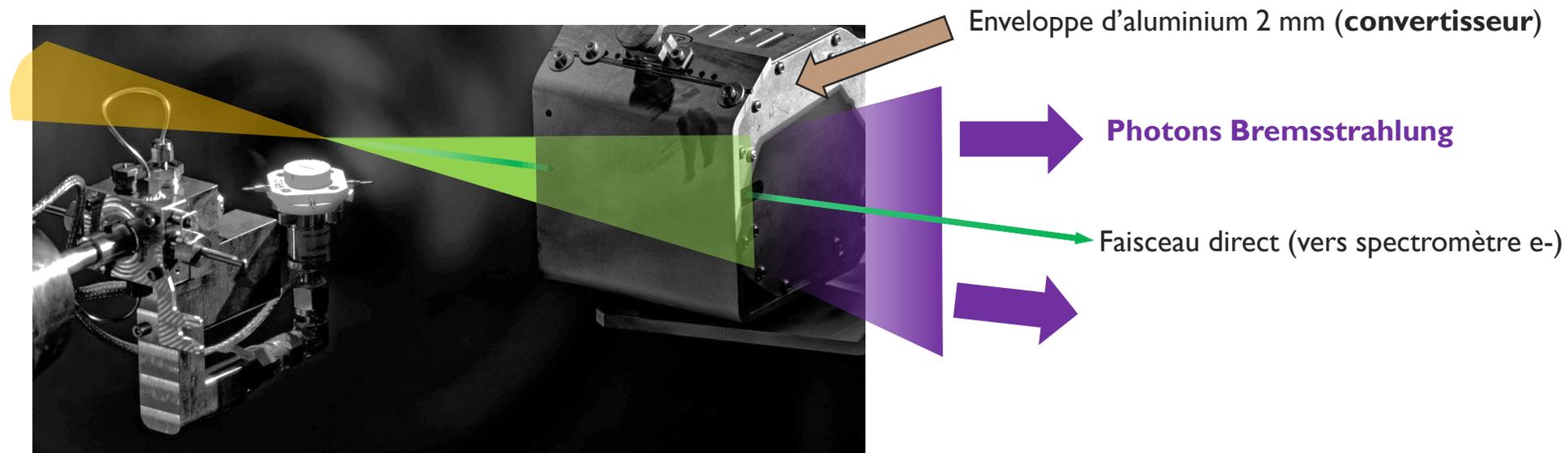
Du rayonnement X dur peut facilement être produit par Bremsstrahlung dans une cible métallique



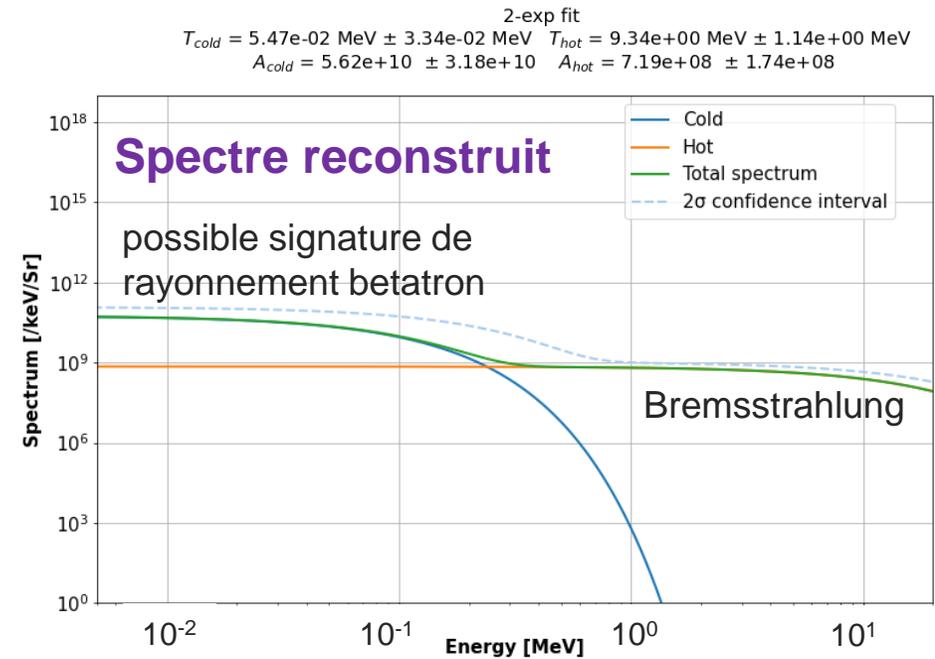
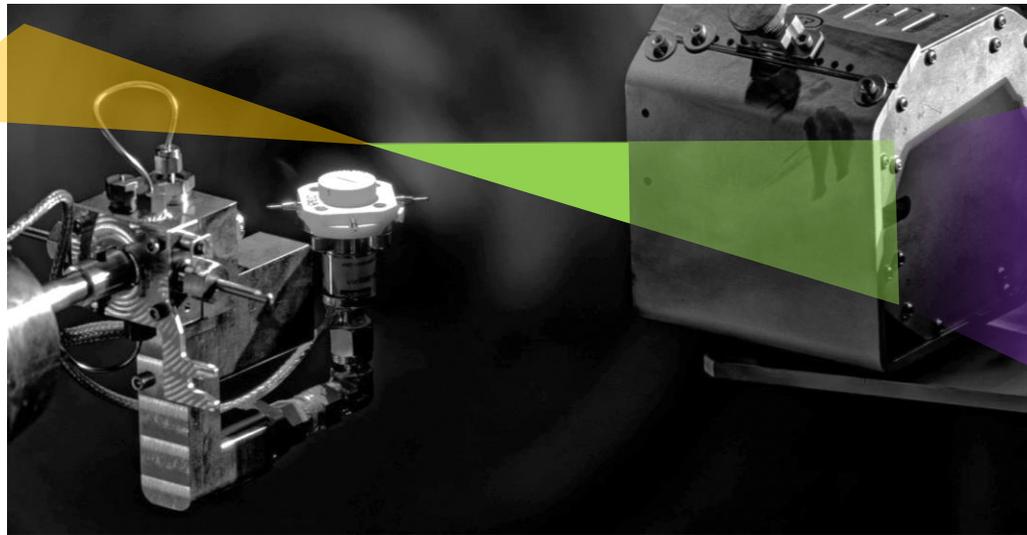
L'enveloppe de notre détecteur a joué le rôle d'un convertisseur inattendu mais très efficace



PETAL



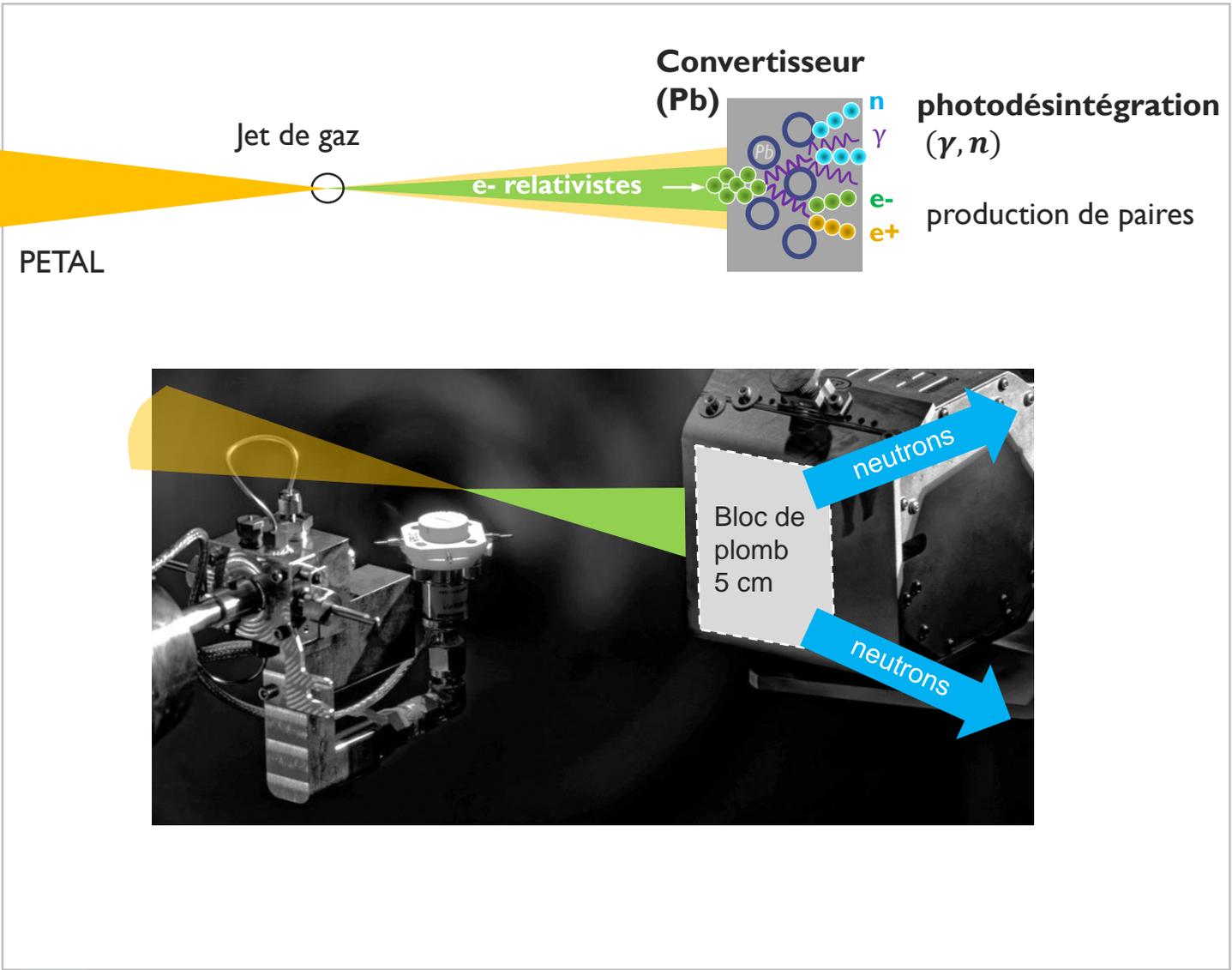
Un spectre de rayonnement X très intense a été mesuré, interpolé par un fit à 2 températures



→ on peut estimer une **énergie totale de ~5-10 J dans le faisceau X/γ**
 (~1% de l'énergie laser)

traitement G. Boutoux

En utilisant un convertisseur plus épais, de Z élevé, ce rayonnement X/ γ induit la production de particules secondaires



En utilisant un convertisseur plus épais, de Z élevé, ce rayonnement X/ γ induit la production de particules secondaires

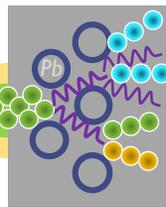


Jet de gaz



e- relativistes

Convertisseur
(Pb)

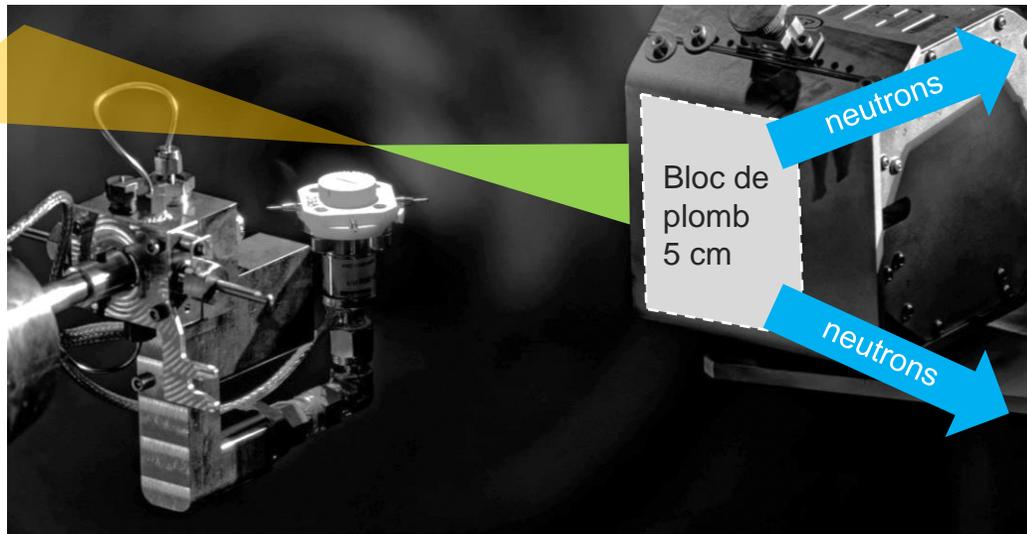
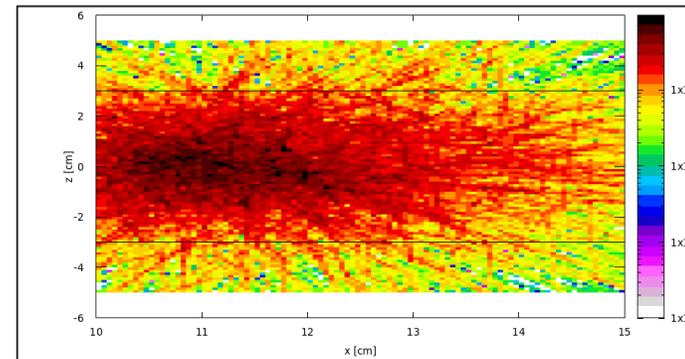


photodésintégration
(γ, n)

production de paires

PETAL

Simulation Monte-Carlo du flux de neutrons émis dans le convertisseur

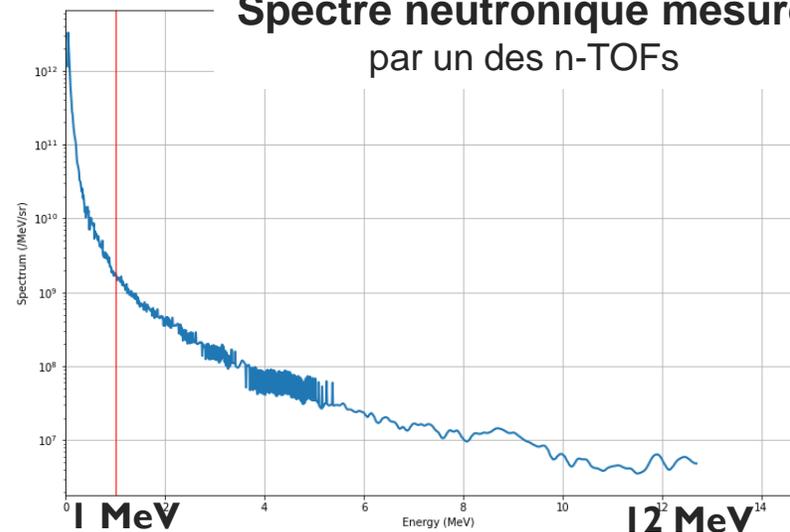


Bloc de plomb
5 cm

neutrons

neutrons

Spectre neutronique mesuré par un des n-TOFs

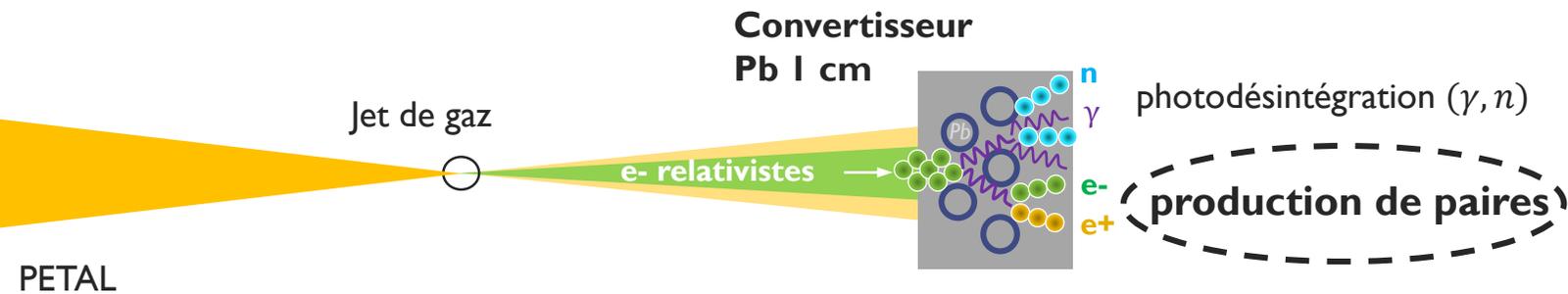


Comparaison des sources neutroniques par laser intense

Schéma	Cible laser primaire	Nombre de neutrons	Énergie moyenne des neutrons [MeV]	Énergie laser [J]	Installation	référence
$\{\gamma, n\}$	Jet de gaz	$4,2 \times 10^{10}$	0,64	542	LMJ-PETAL	(exp. 2025)
	Feuille CH	$1,2 \times 10^9$	1	25	Texas Petawatt laser	Pomerantz <i>et al.</i> , PRL 2014
	Mousse CHO	$1,4 \times 10^{10}$	2	20	PHELIX (GSI, Allemagne)	Günther <i>et al.</i> , Nat. Commun. 2022
$\{p, n\}$	Feuille CH	$9,7 \times 10^{10}$	0,82	639	LMJ-PETAL	(exp. 2024)
	Mousse CHO	$6,2 \times 10^{10}$	0,75	20	PHELIX (GSI, Allemagne)	Günther <i>et al.</i> , Nat. Commun. 2022
$\{d, n\}$	Feuille CD	3×10^{11}	0,45	900	LFEX (ILE, Japon)	Yogo <i>et al.</i> , PRX 2023

- un nombre record de neutrons dans le schéma $\{\gamma, n\}$ sur LMJ
- mais avec un taux de conversion plus faible
- les schémas $\{p, n\}$ et $\{d, n\}$ sont plus efficaces

Estimation de la production de paires e-/e+

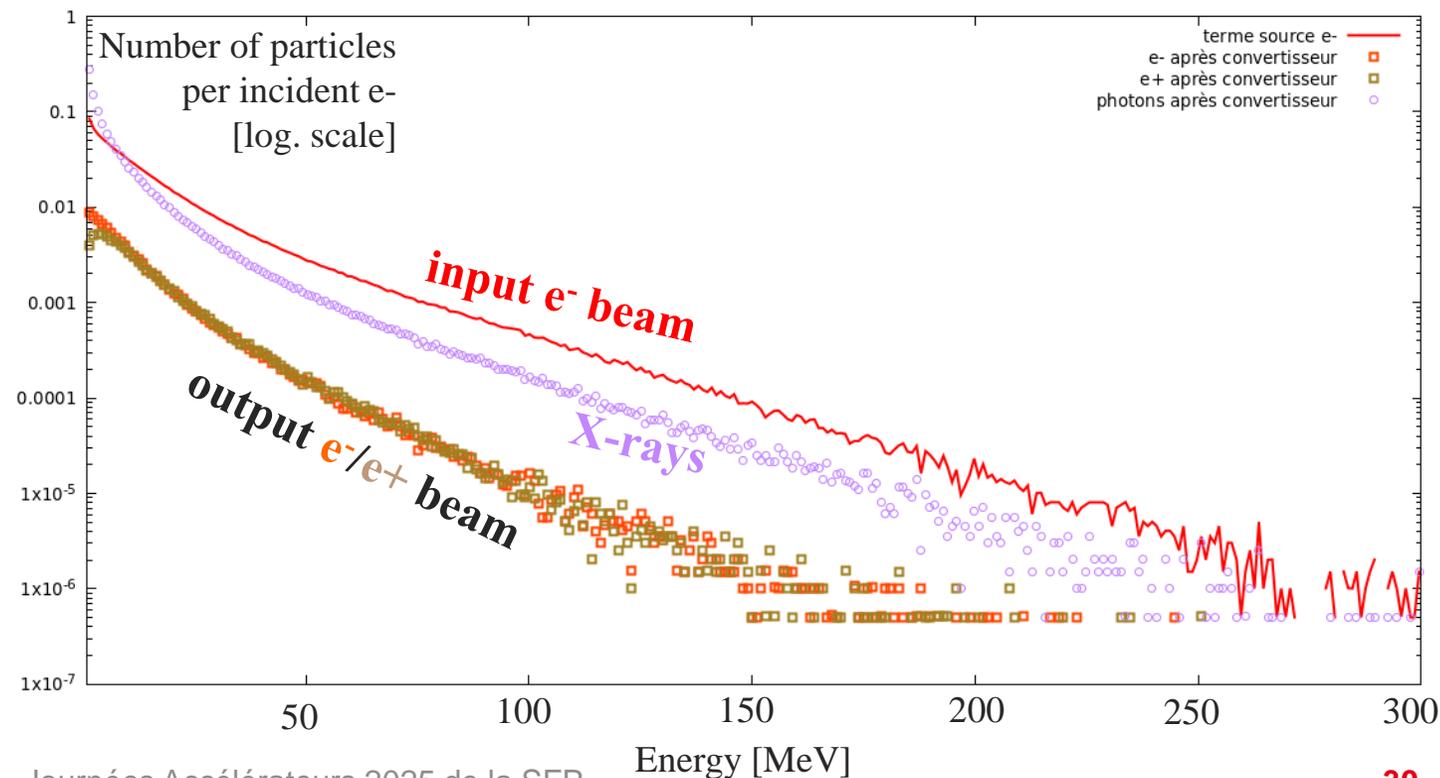


D'après les calculs Monte-Carlo :

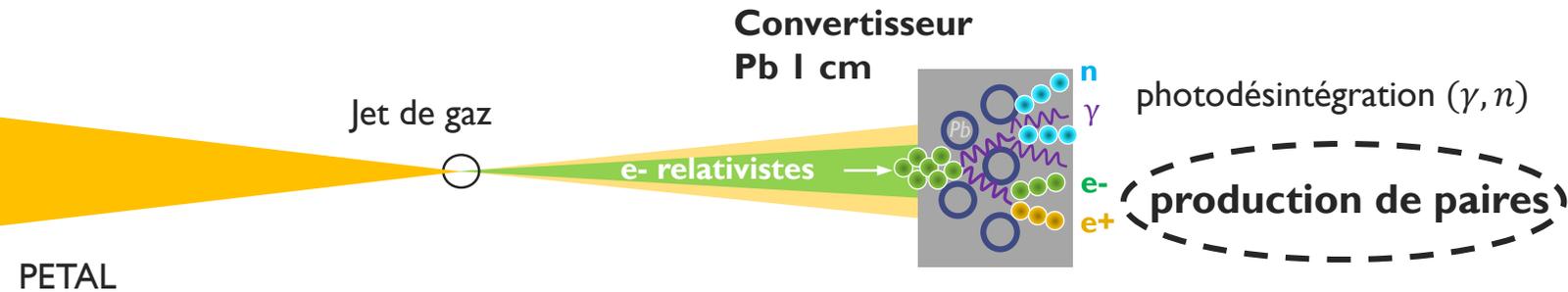
$1,5 \mu C \approx 10^{13} e^-$ (incidentes)

↓

(estimé)
 $N_{\text{paires}} \sim 10^{11}$ (e-/e+ secondaires)



Nos conditions expérimentales permettent d'approcher les conditions de création d'un plasma de paires e-/e+



D'après les calculs Monte-Carlo :

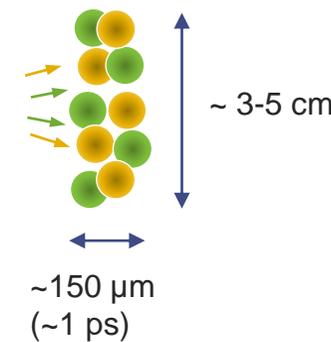
$$1,5 \mu C \simeq 10^{13} \text{ e- (incidentes)}$$

↓

$$N_{\text{paires}}^{(\text{estimé})} \sim 10^{11} \text{ (e-/e+ secondaires)}$$

→ Rappel de la condition sur le nombre de paires : $N_{\text{paires}}^{(\text{requis})} > \frac{\epsilon_0 \cdot m_e \cdot c^2}{2 \cdot e^2} \cdot \gamma \cdot V^{\frac{1}{3}}$

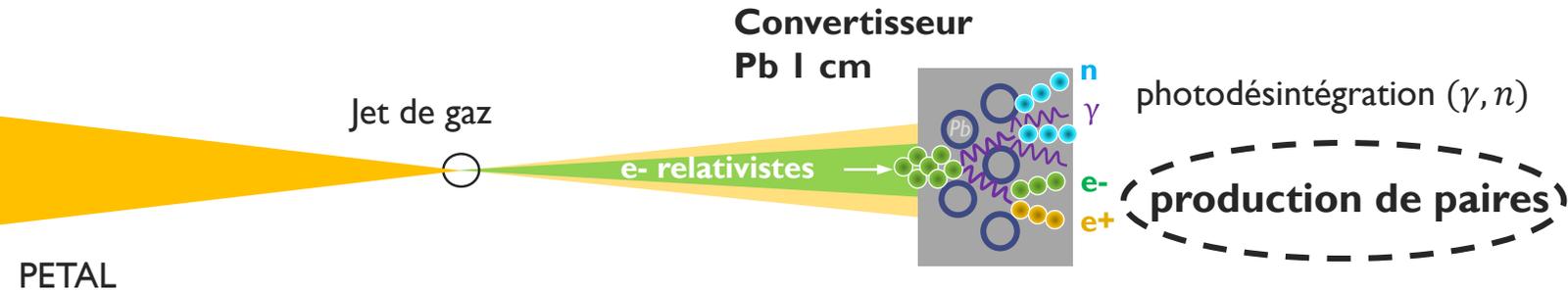
Pour $\gamma \sim 10$ et un volume V défini par :



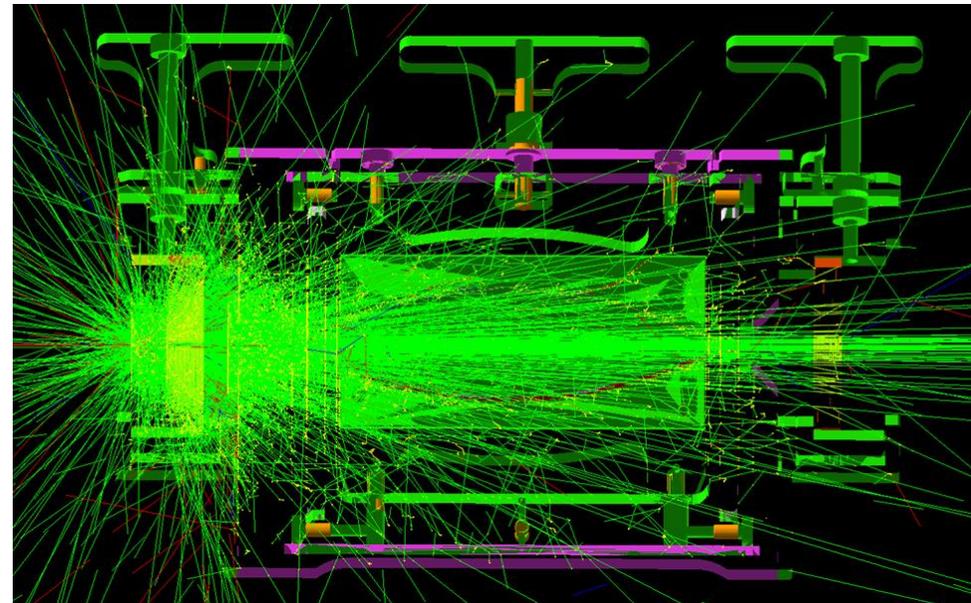
$\Rightarrow N_{\text{paires}}^{(\text{requis})} > \sim 5 \cdot 10^{11}$

→ Ce schéma semble viable pour créer sur le LMJ un plasma d'e-/e+ d'intérêt pour l'astrophysique de laboratoire

Mais la détection est un défi, à cause du bruit causé par le rayonnement de freinage dans le convertisseur



→ Un nouveau spectromètre compact, plus proche de la zone d'interaction (centre de l'enceinte LMJ), sera testé lors de la prochaine campagne expérimentale.



Simulation GEANT4 du spectromètre e-/e+

Résumé

→ **La plateforme d'accélération laser-plasma développée au LMJ permet de produire des paquets d'électrons relativistes (jusque 300 MeV), ultracourts, de divergence modérée, et de charge très élevée (1,5 μC)**

transfert d'énergie laser $\rightarrow e^- \sim 5 \%$

→ **Les progrès du laser PETAL ont permis une amélioration significative**

1 PW sur cible atteint (700 J, 700 fs)

→ **L'énergie des e^- peut être convertie très efficacement et simplement en rayonnement X dur,** potentiellement utilisable pour des expériences de radiographie

transfert d'énergie laser $\rightarrow e^- \rightarrow \text{photons } X/\gamma \sim 1 \%$

Applications et perspectives

- **Production de neutrons rapides : expérience 2025**
- **Astrophysique de laboratoire : mesure des paires e^-/e^+ prévue en 2026**
- **Développement des sources X (Bremsstrahlung, Compton) et utilisation en radiographie ou spectroscopie**
- **Utilisation des électrons pour sonder des champs électromagnétiques dans la matière**
collaboration LLNL (Livermore), LLE (Rochester), LANL (Los Alamos), CEA via le dernier appel à proposition LMJ-PETAL
PI Félicie Albert

benoit.mahieu@cea.fr

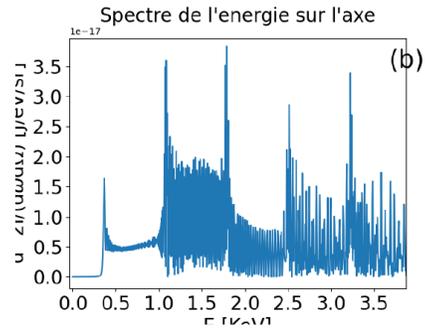


■ Backup

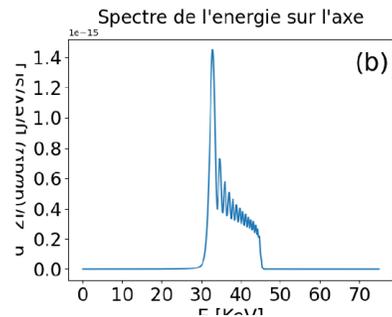
Preliminary inverse Compton scattering studies

X-ray photons emitted by relativistic electrons and a counter-propagating secondary PETAL pulse

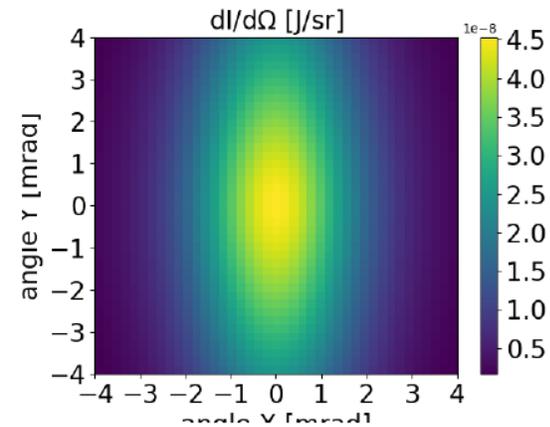
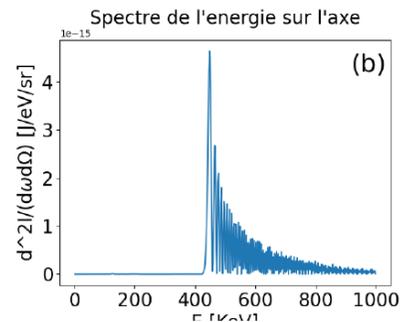
$E_{e^-} = 10 \text{ MeV}$



$E_{e^-} = 50 \text{ MeV}$

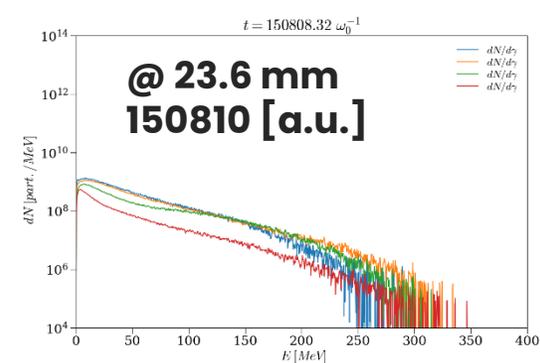
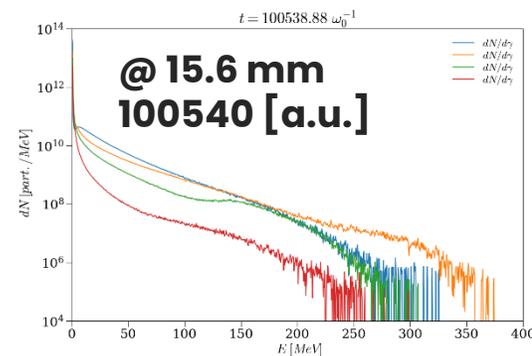
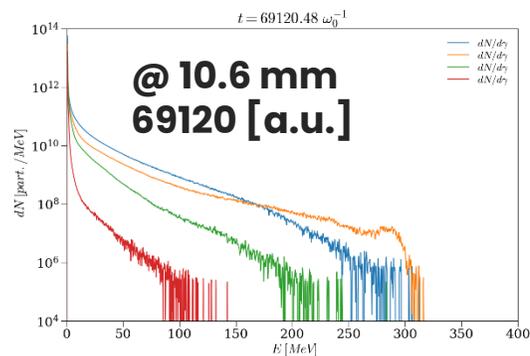
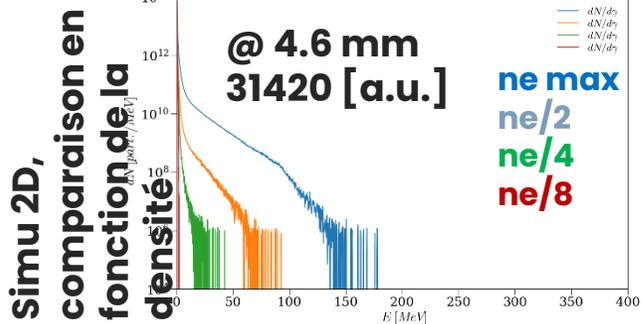
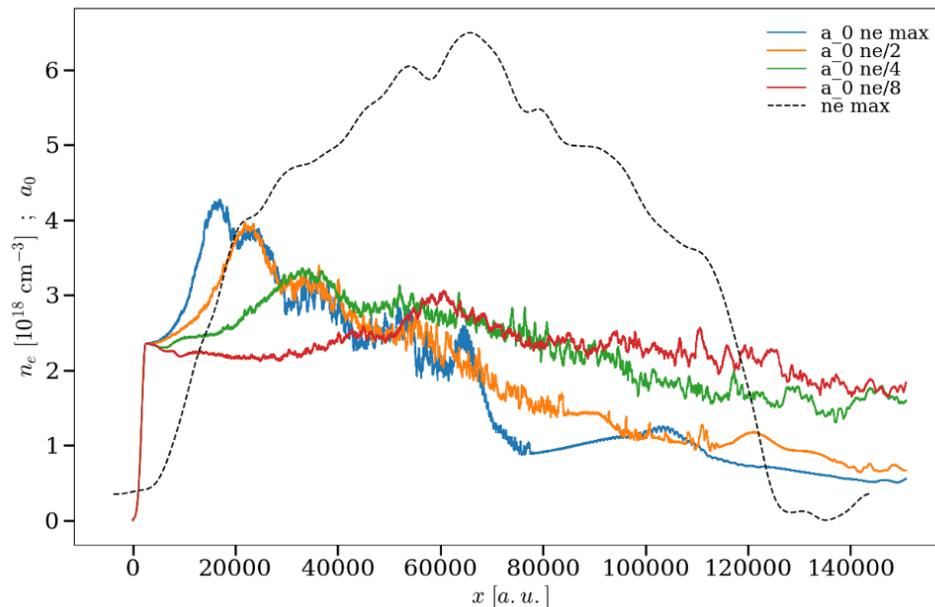


$E_{e^-} = 200 \text{ MeV}$



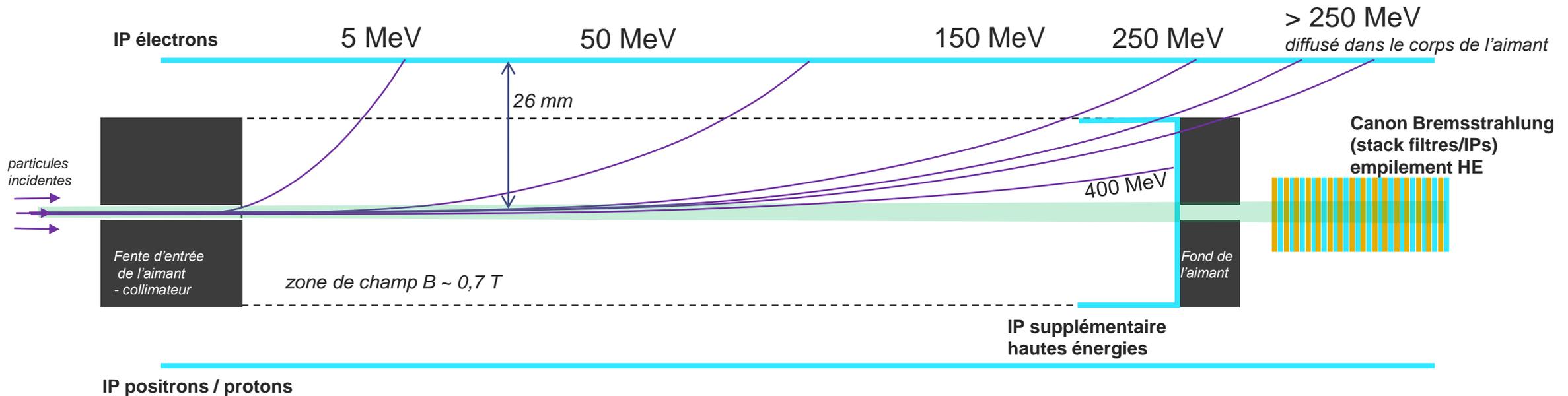
internship work of C. Salu

Results of PIC simulations

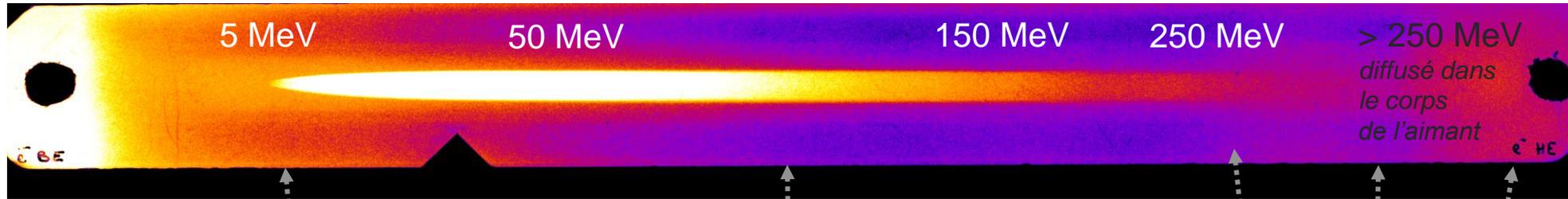


SESAME1 (0°) : configuration et trajectoires des e-

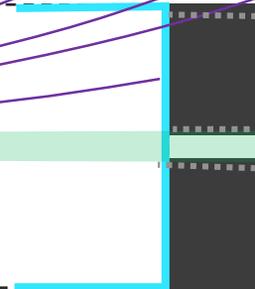
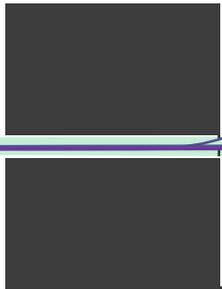
- SESAME1 se situe dans l'axe de PETAL et des électrons accélérés.
- Les IPs latérales ont été placées dans la position la plus proche de l'axe (26 mm) pour capter les particules les plus énergétiques.
- Une IP supplémentaire a été placée au fond afin de mesurer les e- d'énergie >250 MeV.
- **Le champ magnétique de l'aimant (installé l'année dernière) est en cours de calibration. Aussi les positions des énergies sont données à titre indicatif, avec une incertitude de l'ordre de ~10 %.**



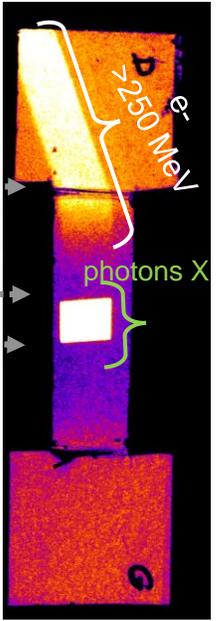
SESAME1 (0°) : exemple tir 3 (sans convertisseur)



IP électrons



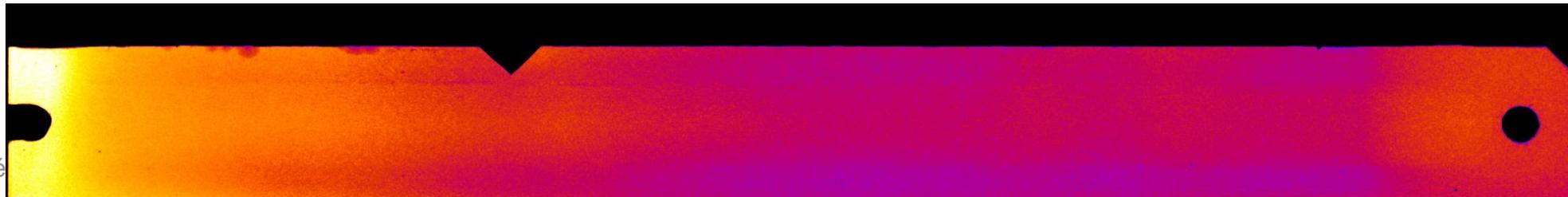
(stack illu empileme



IP supplémentaire hautes énergies ...

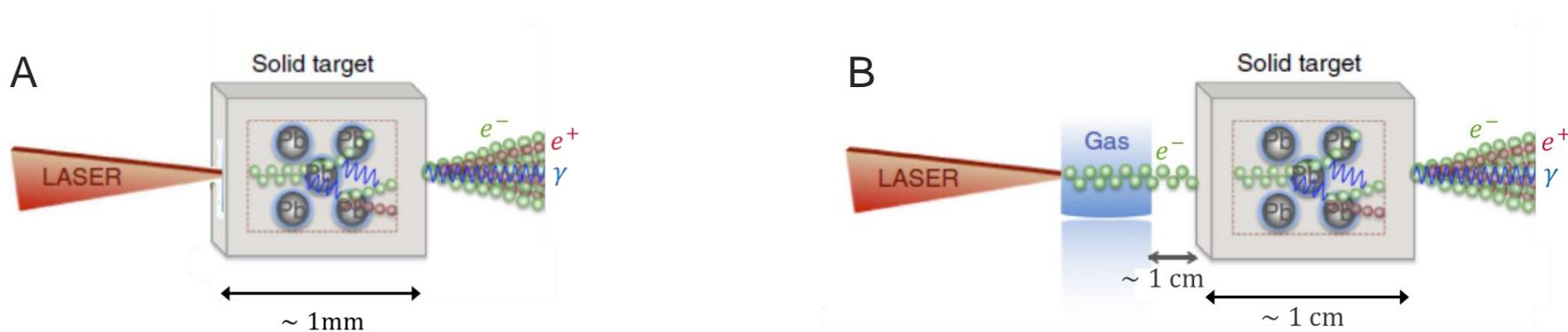
... dépliée

IP positrons / protons



Principe de la génération de paires e^-/e^+ par laser intense

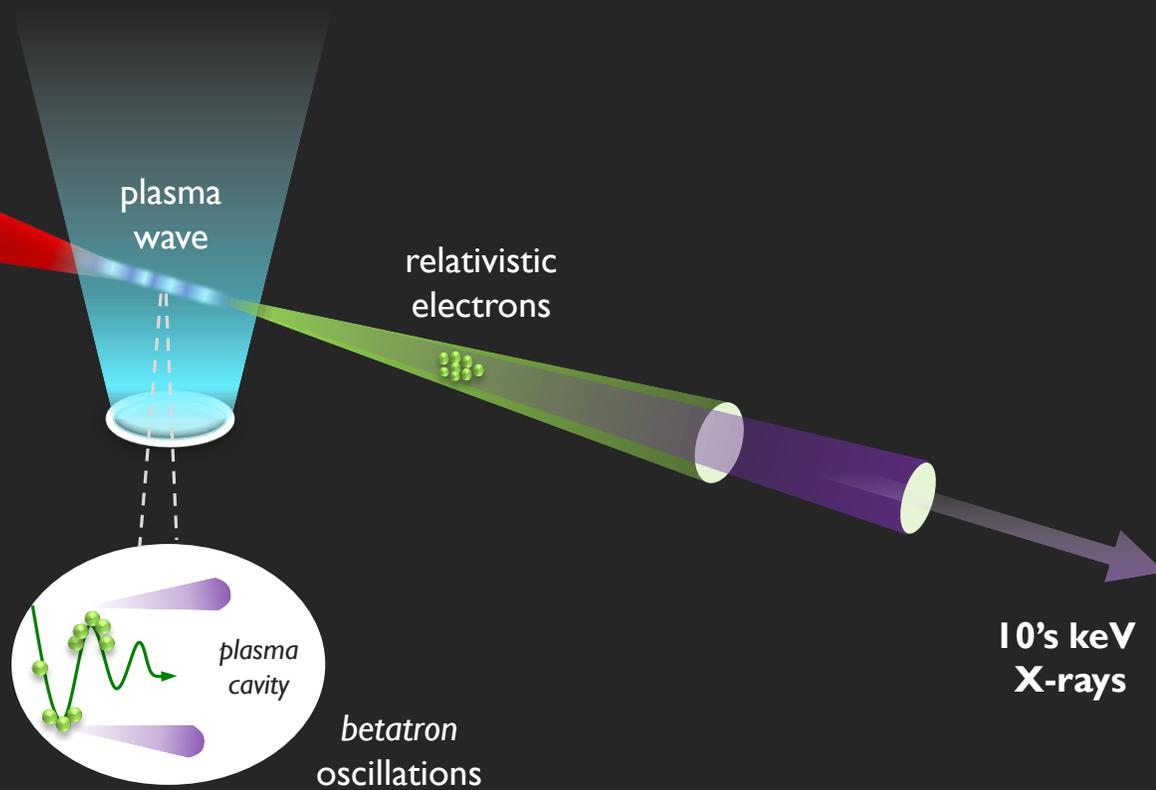
- Les paires sont créées dans un convertisseur (de $Z \gg 1$) en trois temps :
(i) Interaction UHI : $L \rightarrow e^-$ rapides, (ii) Bremsstrahlung : $e^- + Z \rightarrow \gamma$; (iii) Bethe-Heitler : $\gamma + Z \rightarrow e^- + e^+$
- Deux configurations ont été étudiées :
 - A. Les électrons rapides sont directement produits à la surface du convertisseur par un laser ps de « grande » énergie (≥ 100 J) [Chen 2015, Jiang 2021].
 - B. Les électrons rapides sont produits par un laser fs de plus faible énergie (~ 10 J) dans un jet de gaz en amont du convertisseur [Sarri 2015, Williams 2015, Warwick 2017].



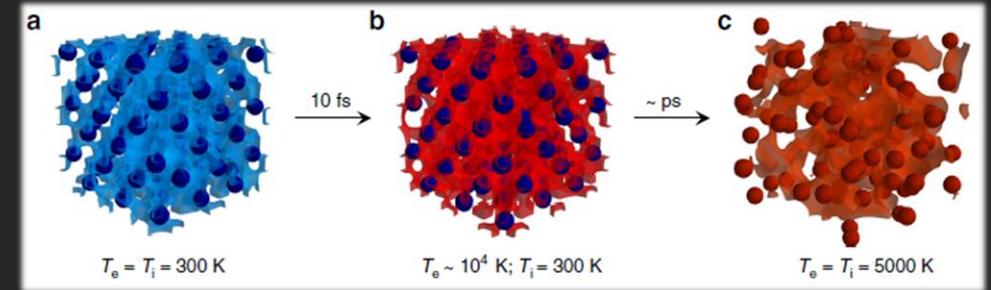
Les électrons rapides créés en A sont généralement plus nombreux ($\sim 10^{11-12}$ vs $\sim 10^9$) mais moins énergétiques (~ 10 MeV vs $\sim 0.1-1$ GeV) et collimatés (~ 1 rad vs ~ 10 mrad) qu'en B.

L. Gremillet

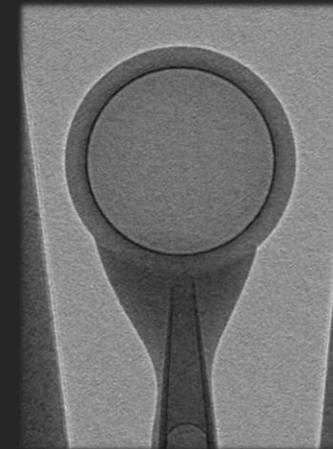
Le rayonnement X betatron émis durant ce processus est un outil prometteur pour sonder la matière à haute densité d'énergie



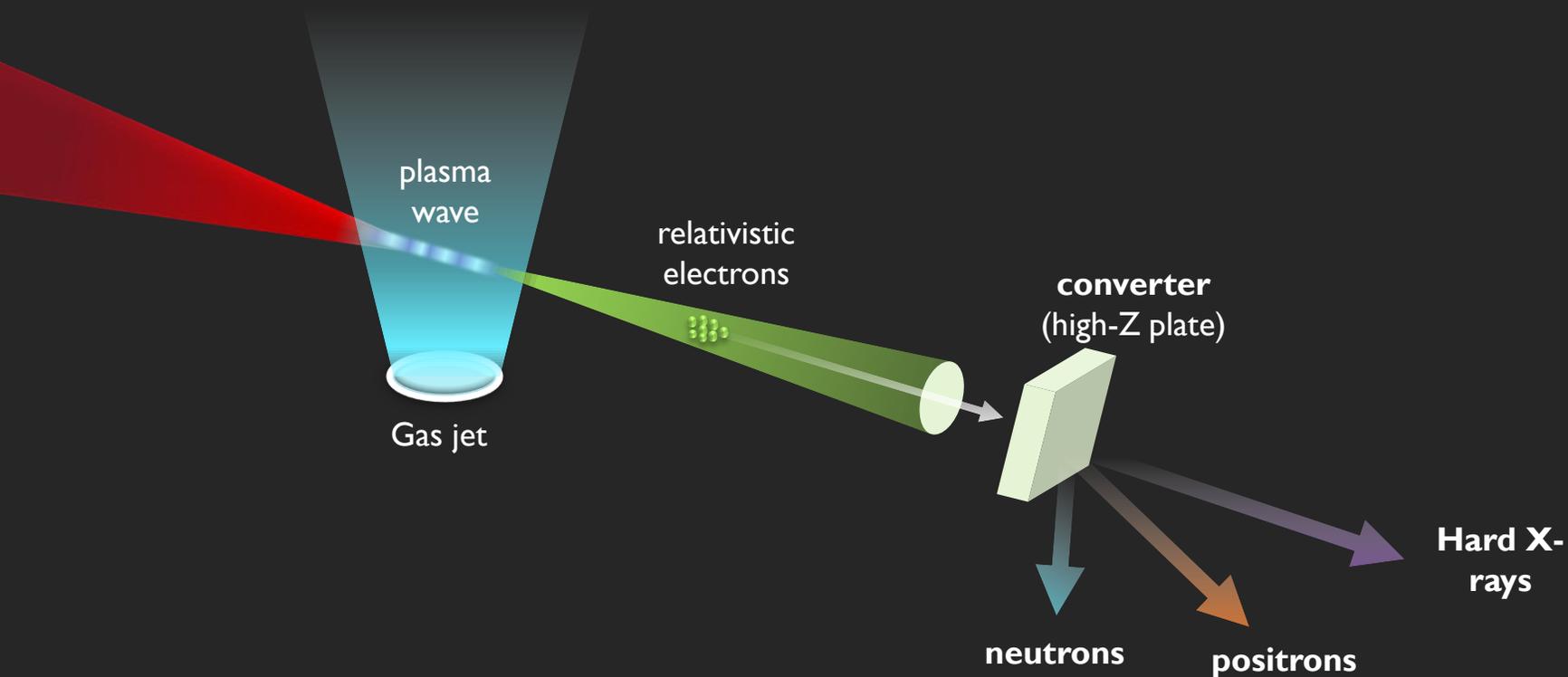
Ultrafast spectroscopy of WDM (experiment)
Mahieu et al., Nature Comm. (2018)
Grolleau et al., PRL (2021)



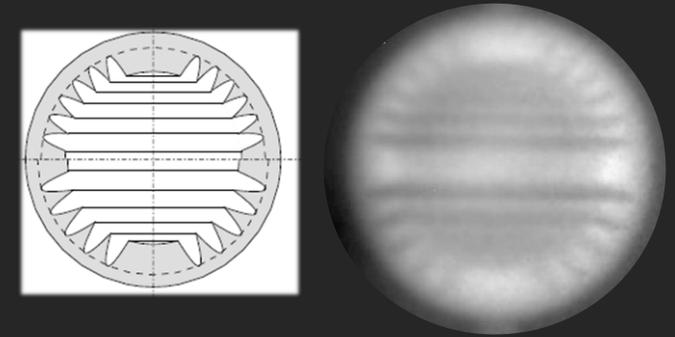
Phase contrast imaging of ICF capsule (experiment)
Fourmaux et al., Optics Express (2020)



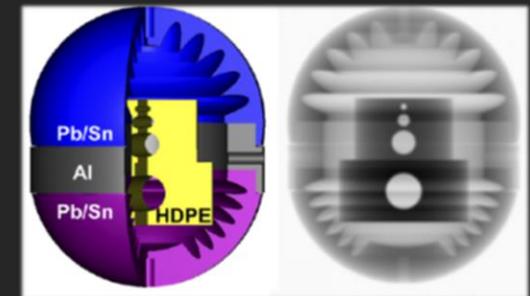
Des particules énergétiques secondaires peuvent également être produites et utilisées pour sonder des milieux denses



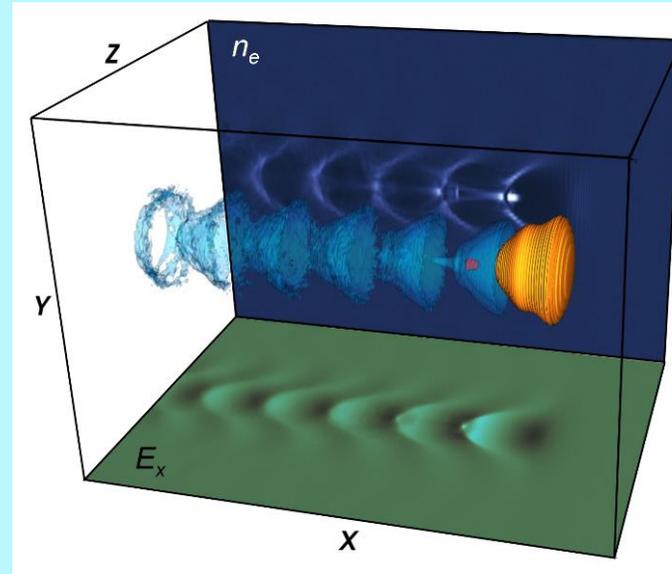
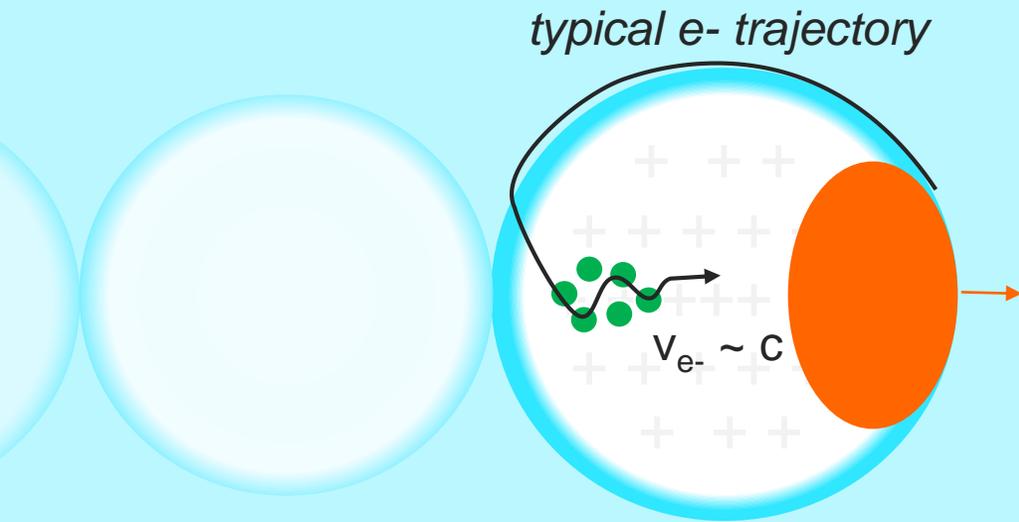
X-ray imaging (experiment)
Glinec et al., PRL (2005)



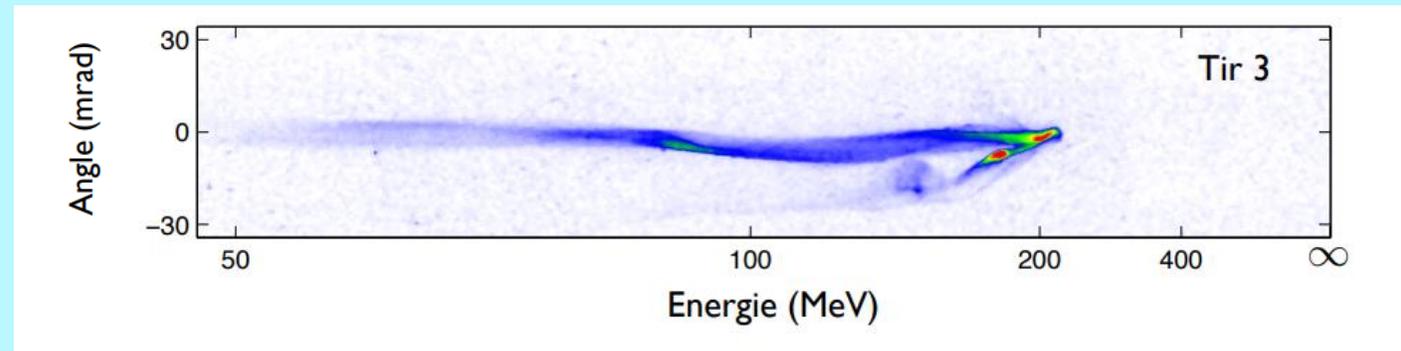
neutron imaging (simulations)
Williams et al., RSI (2022)



Laser-wakefield acceleration in the blowout regime

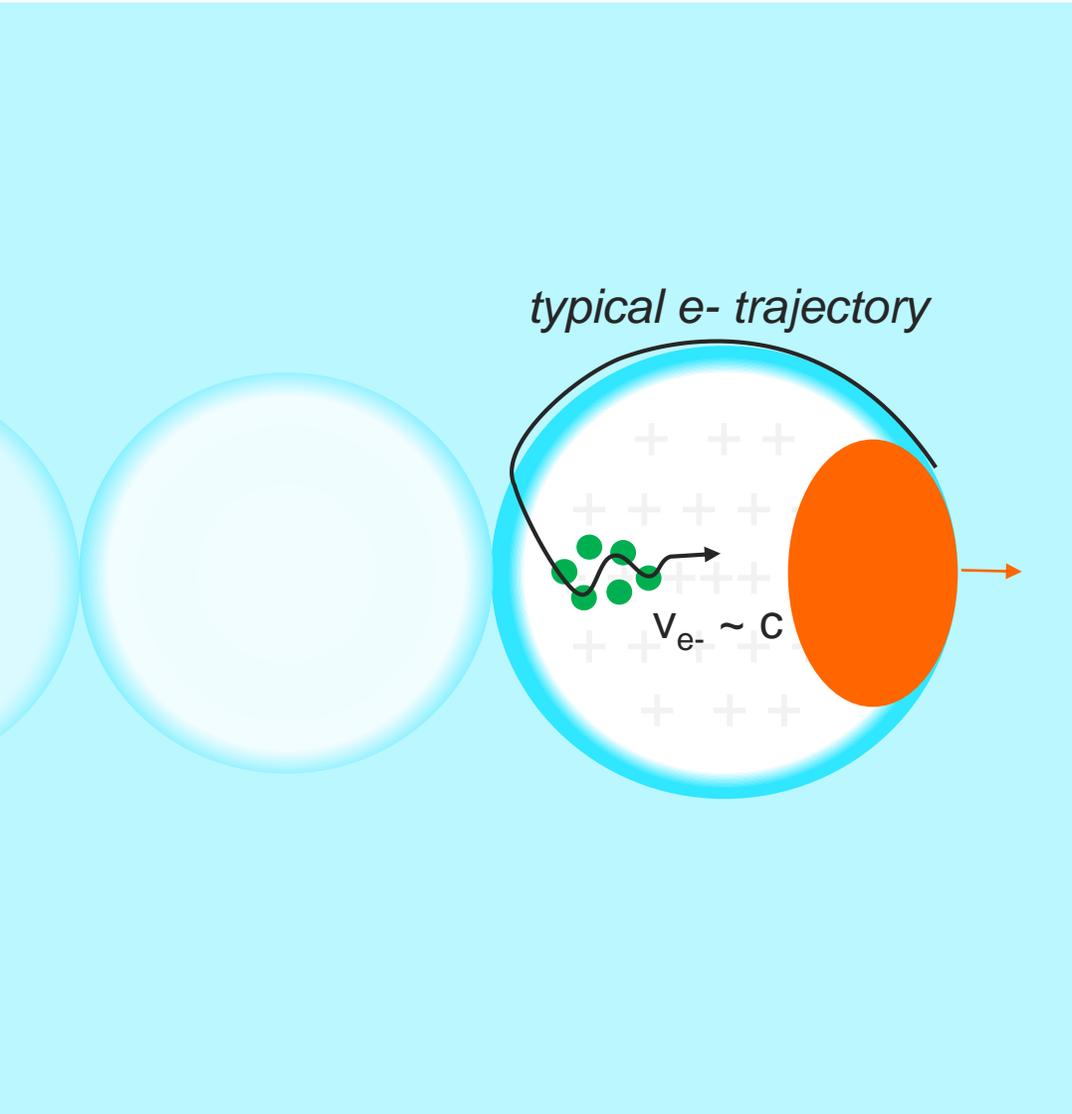


PIC simulation
X. Davoine



Example of experimental spectrum

Laser-wakefield acceleration in the blowout regime



This regime occurs if :

- the laser pulse duration is smaller than the plasma period:

$$\tau_{laser} < 2\pi \left(\frac{e^2 n_{e^-}}{m \epsilon_0} \right)^{-1/2}$$

- the laser power is high enough for self-guiding:

$$P_{laser} \gg P_{cr} = 17 \frac{\omega_0^2}{\omega_p^2} [GW]$$

Pulse duration	Maximum e- density	Required laser power	Required laser energy
30 fs	10^{19} cm^{-3}	$\gg 3 \text{ TW}$	$\gg 0.1 \text{ J}$
1 ps	10^{16} cm^{-3}	$\gg 2 \text{ PW}$	$\gg 2 \text{ kJ}$

→ The blowout regime is not accessible to current ps/kJ lasers

