



WAVEFRONT ROTATION (WFR) AS A WAY TO CONTROL INTENSE LOCALIZED SURFACE PLASMA WAVES AND OBTAIN ENERGETIC ELECTRON BUNCHES

**PAULA S. KLEIJ¹, S. MARINI^{1,2}, F. PISANI³, F. AMIRANOFF²
M. GRECH², A. MACCHI^{3,4}, C. RICONDA² AND M. RAYNAUD¹**

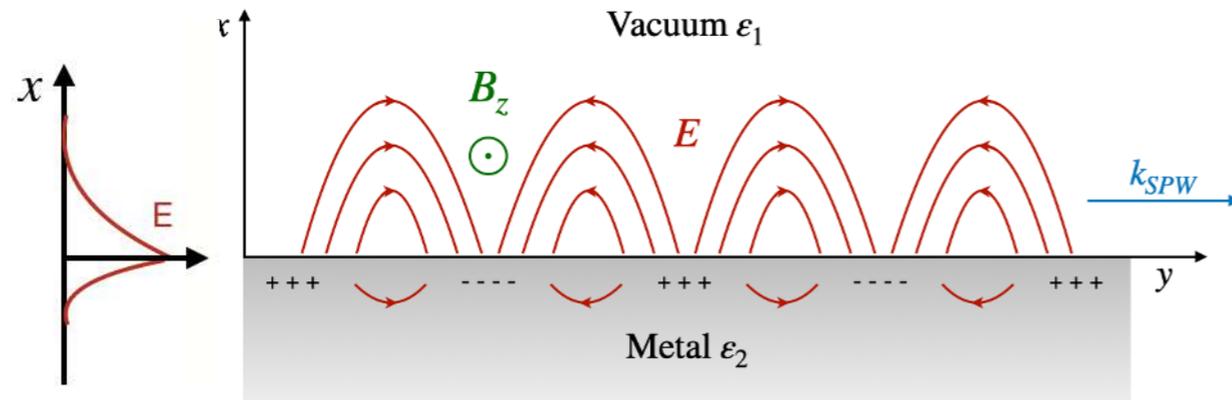
¹ LSI, CEA/DRF/IRAMIS, CNRS, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, F-91128 Palaiseau, France

² LULI, Sorbonne Université, CNRS, CEA, École Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, F-75252 Paris, France

³ Enrico Fermi Department of Physics, University of Pisa, largo Bruno Pontecorvo 3, 56127 Pisa, Italy

⁴ National Institute of Optics, National Research Council (CNR/INO), Pisa, Italy

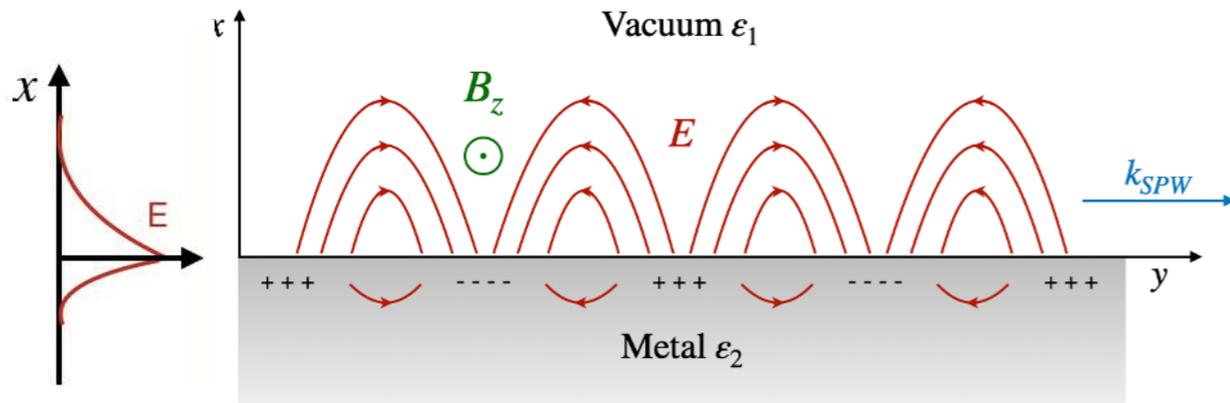
ONDE PLASMA DE SURFACE (SPW) : ONDE ELECTROMAGNETIQUE (EM) DE SURFACE QUI SE PROPAGE À L'INTERFACE DU VIDE ET PLASMA 2



- ▶ confinement du champ EM à l'échelle $< \lambda$
- ▶ composante longitudinale du champ E
- ▶ $v_{SPW,phase} < c$

Applications : détection bio/chimique, conception de dispositifs photoniques de petite taille, production de faisceaux de particules énergétiques

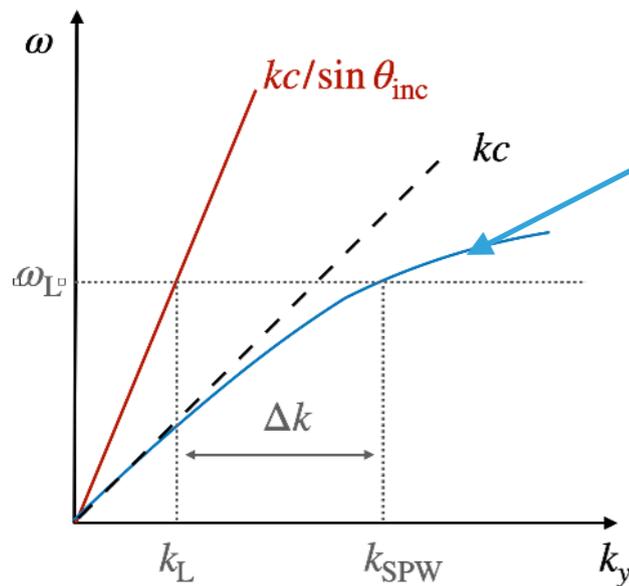
ONDE PLASMA DE SURFACE (SPW) : ONDE ELECTROMAGNETIQUE (EM) DE SURFACE QUI SE PROPAGE À L'INTERFACE DU VIDE ET PLASMA 3



- confinement du champ EM à l'échelle $< \lambda$
- composante longitudinale du champ E
- $v_{SPW,phase} < c$

Applications : détection bio/chimique, conception de dispositifs photoniques de petite taille, production de faisceaux de particules énergétiques

- On peut exciter un SPW avec un laser → couplage entre la relation de dispersion du **laser** et du **SPW**

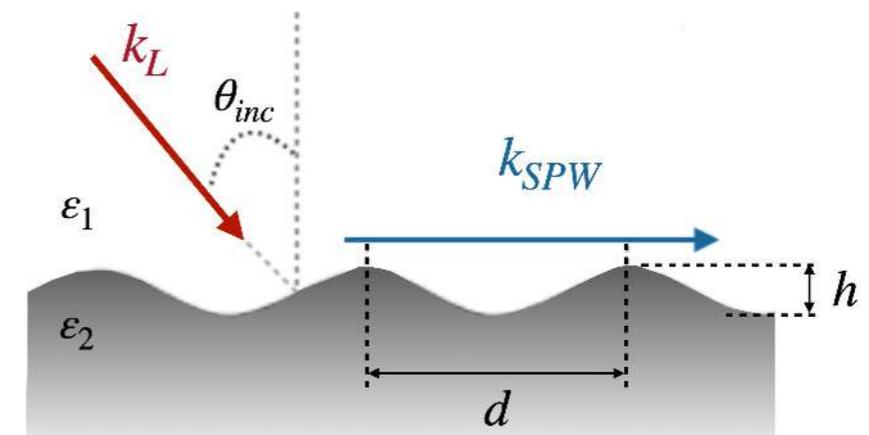


$$k_{SPW} = \pm \frac{\omega_L}{c} \sqrt{\frac{1 - \omega_p^2/\omega_L^2}{2 - \omega_p^2/\omega_L^2}}$$

$$\omega_L = \omega_{SPW}$$

Solution: réseau périodique :

$$k_L \sin \theta_{inc} = k_{SPW} \pm m \frac{2\pi}{d}$$



Ex: $d = 2\lambda_0 \rightarrow \theta_{inc} = 30^\circ$

LES SPW PEUVENT PIÉGER LES ÉLECTRONS ET ACCÉLÉRER DES PAQUETS D'ÉLECTRONS À DES ÉNERGIES RELATIVISTES

▸ Différents régimes de laser:

$$a_0 = 0.85 \sqrt{\frac{I \lambda_0^2}{10^{18} \text{ W cm}^{-2} \mu\text{m}^2}}$$

- $a_0 \ll 1 \rightarrow$ Regime non relativiste
- $a_0 \geq 1 \rightarrow$ Regime relativiste

Simulations° + expériences*

° Bigongiari et al. , PoP (2013)

* Fedeli et al. , PRL (2016).

° Riconda et al. , PoP(2015)

* Cantono et al. , PoP (2018).

° Raynaud et al. , Sci. Rep. (2020).

° Marini et al. , PoP (2021).

LES SPW PEUVENT PIÉGER LES ÉLECTRONS ET ACCÉLÉRER DES PAQUETS D'ÉLECTRONS À DES ÉNERGIES RELATIVISTES

▶ Différents régimes de laser: $a_0 = 0.85 \sqrt{\frac{I \lambda_0^2}{10^{18} \text{ W cm}^{-2} \mu\text{m}^2}}$

- $a_0 \ll 1 \rightarrow$ Regime non relativiste
- $a_0 \geq 1 \rightarrow$ Regime relativiste

Simulations° + expériences*

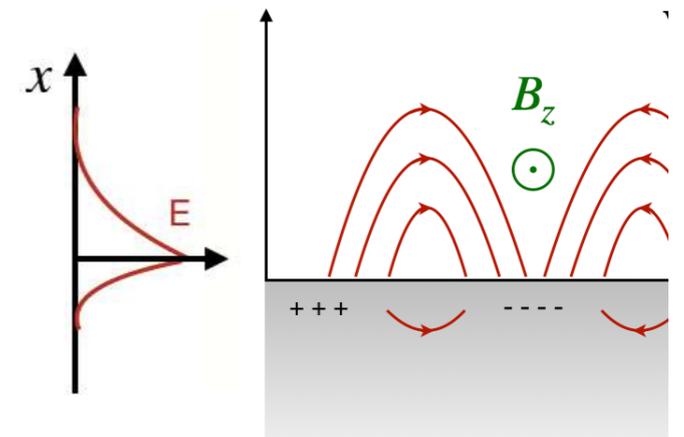
- ° Bigongiari et al. , PoP (2013)
- ° Riconda et al. , PoP(2015)
- ° Raynaud et al. , Sci. Rep. (2020).
- ° Marini et al. , PoP (2021).

- * Fedeli et al. , PRL (2016).
- * Cantono et al. , PoP (2018).

▶ Avec des lasers intenses ($> 10^{19} \text{ Wcm}^{-2}$) et courts ($< 25 \text{ fs}$) on excite des SPW dans un **plasma sur-dense** en régime relativiste

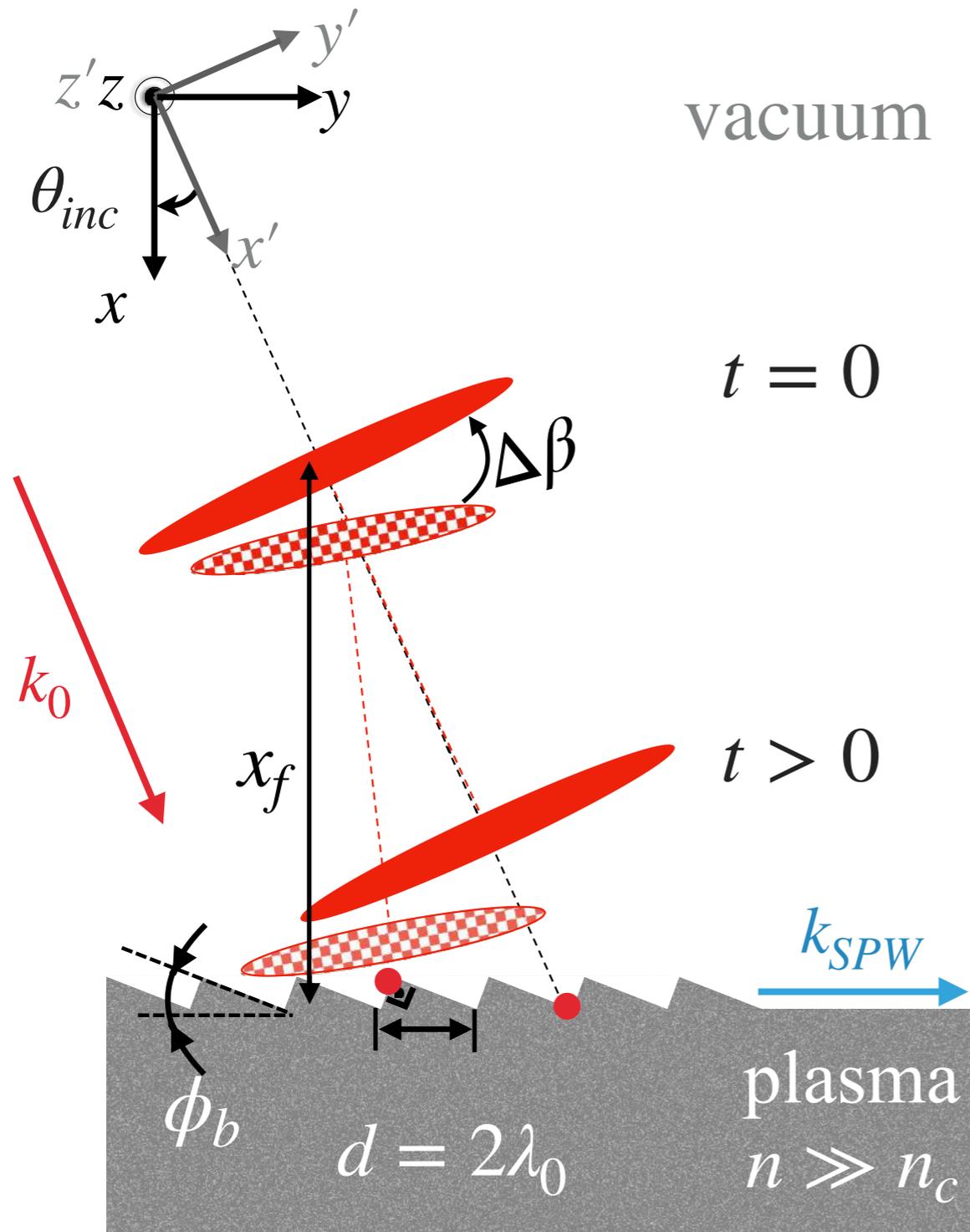
$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n e^2}{m_e}} \gg \omega_L \quad n_0 \gg \frac{\epsilon_0 m_e \omega_L^2}{e^2} = n_c$$

▶ Component E longitudinal + $v_{SPW,phase} = c(1 - n_c/2n_0) \sim c$
 → accélérer des paquets d'électrons



Intérêt: sources synchronisées de lumière ultra-rapide et d'électrons ultra-courts avec des applications dans les processus électroniques ultra-rapides et production des rayons XUV.

UN LASER WFR + UN RÉSEAU OPTIMISÉ PERMET D'EXCITER DES SPW PLUS INTENSES ET DE COURTE DURÉE

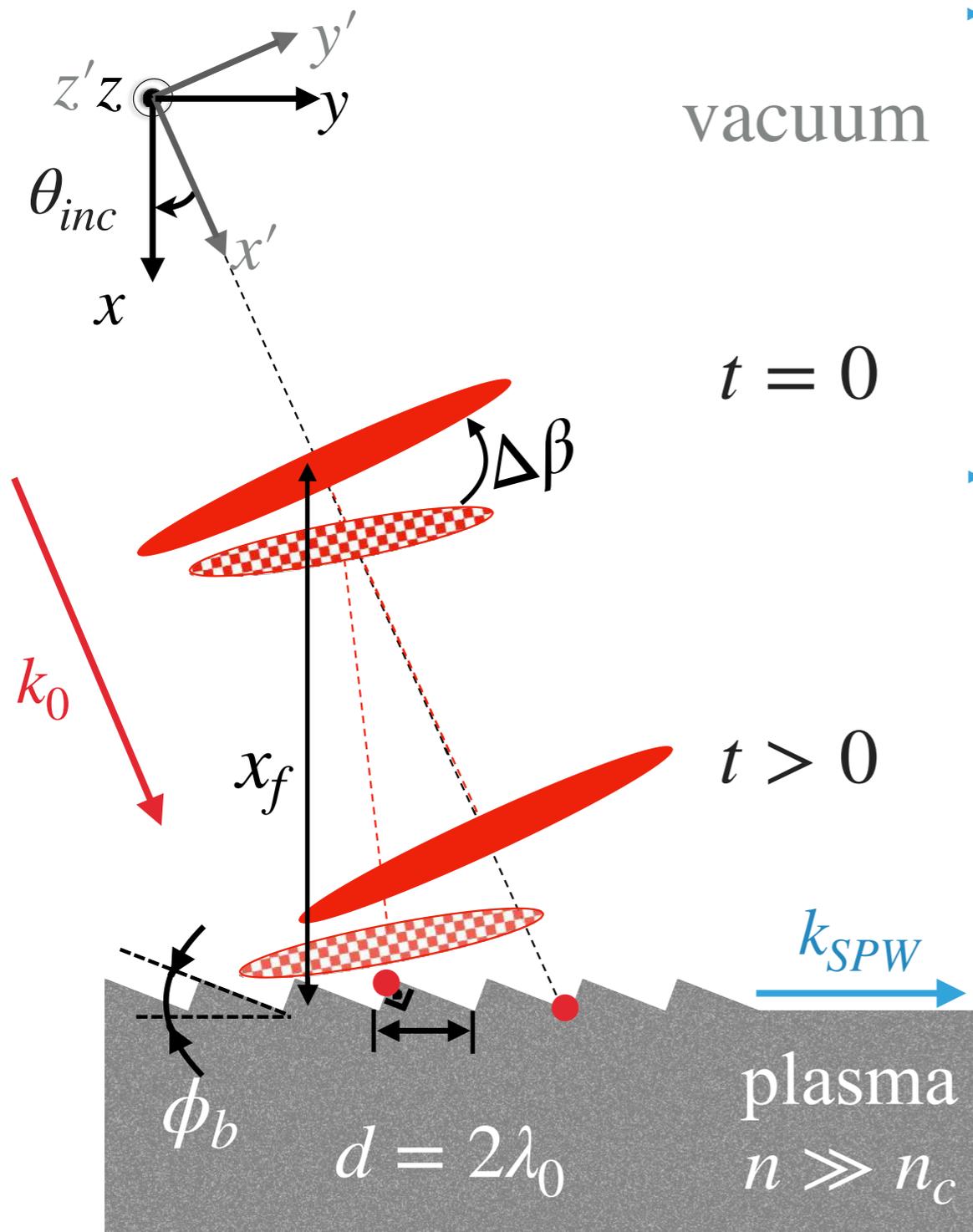


- ▶ WFR: variation temporelle de l'angle d'incidence du laser [1]
- ▶ Le centre de chaque front d'onde (où l'amplitude du champ est maximal) se propage le long de la surface
- ▶ Pour un $\Delta\beta$ donné \rightarrow WFR se déplacera dans la même direction que le SPW et soutiendra sa croissance [2]
- ▶ Réseau mixte (modulation périodique + surface plane)
 - \rightarrow optimise la propagation du SPW sur la surface plane
 - \rightarrow réduit les pertes radiatives par diffraction

[1] H. Vincenti and F. Quéré, Phys. Rev. Lett. (2012)

[2] F. Pisani et al., ACS Photon. (2018)

ON A DÉVELOPPÉ UN MODÈLE ANALYTIQUE POUR OBTENIR LES PARAMÈTRES OPTIMAUX POUR L'EXCITATION DES SPW



- On a un **sliding focus velocity** quand la focalisation n'est pas sur la surface :

$$v_{sl} \simeq \frac{\Delta\beta x_f / \lambda_0}{\cos^2\theta_{inc} + \sin\theta_{inc} \Delta\beta x_f / \lambda_0} c$$

- Quand v_{sl} est selon la propagation du SPW

↓
WFR soutient la croissance de l'amplitude du SPW

- La valeur optimale du paramètre $\Delta\beta$ est obtenu quand $v_{sl} = v_{SPW,phase} \approx c$:

$$\Delta\beta_{opt} \simeq \frac{\lambda_0}{x_f} (1 + \sin\theta_{inc})$$



a Collaborative, Open-Source, Multi-Purpose
Particle-In-Cell Code for Plasma Simulation



Open-source & Collaborative

<https://github.com/SmileiPIC/Smilei>



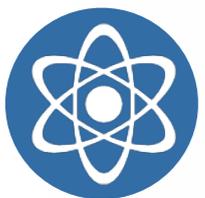
Modern & High-performance

C++/Python3 • MPI/OpenMP • SIMD • HDF5/OpenPMD
a platform for Exascale (GPU porting under way)



Community-Oriented

advanced documentation • online tutorials • post processing & visualization
training workshops • summer school & master trainings

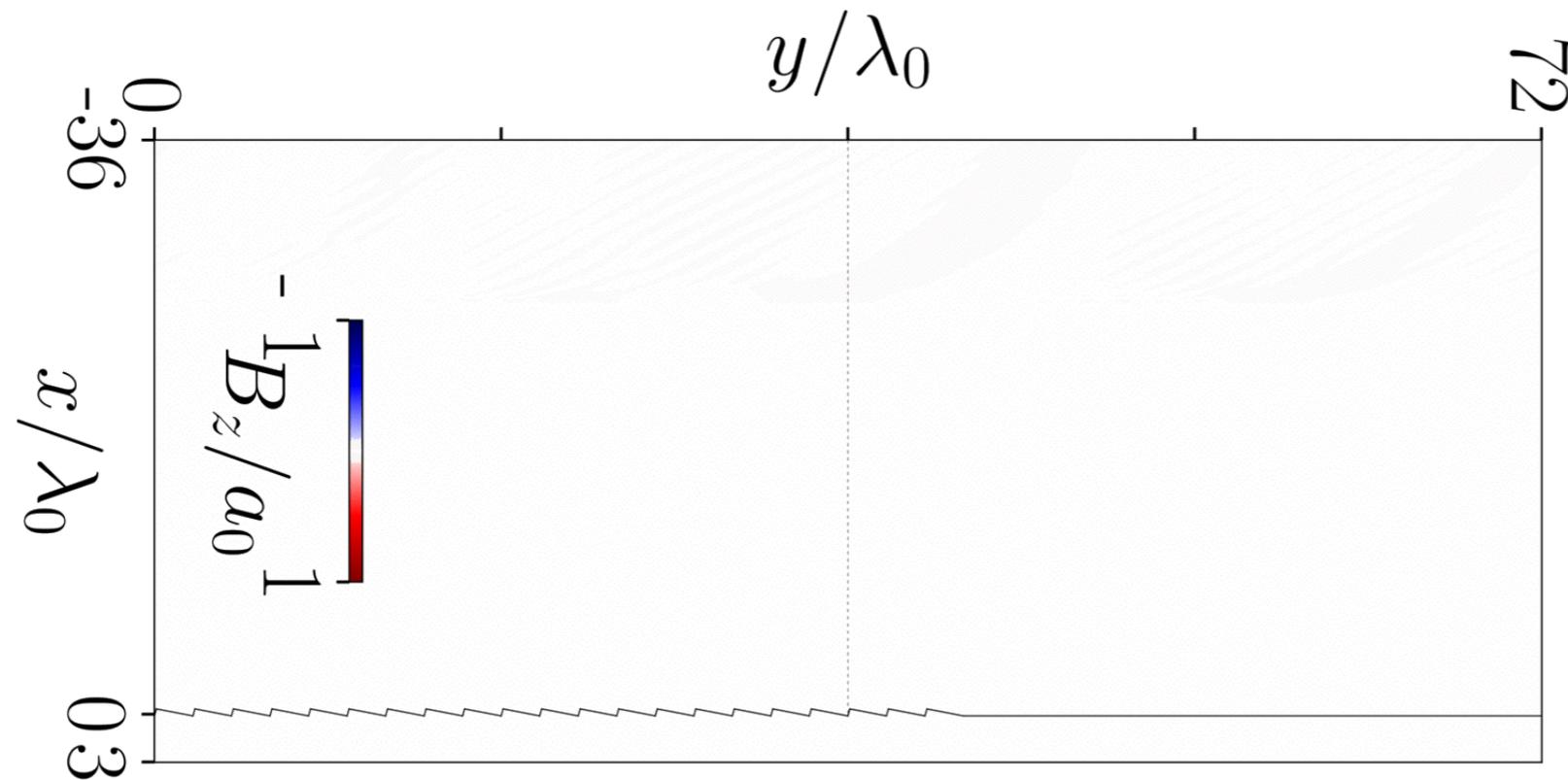


Multi-Physics & Multi-Purpose

advanced physics modules: geometries, collisions, ionization, QED
broad range of applications: from laser-plasma interaction to astrophysics



LES SIMULATIONS PIC DÉCRIVENT LA DYNAMIQUE DES PARTICULES ET LES EFFETS NON LINÉAIRES



Laser

$a_0 = 0.1, 5^*$
 $\theta_{inc} = 30^\circ$
 Waist = $5.2\lambda_0$
 Durée = $10\tau_0$ (FWHM)

Plasma

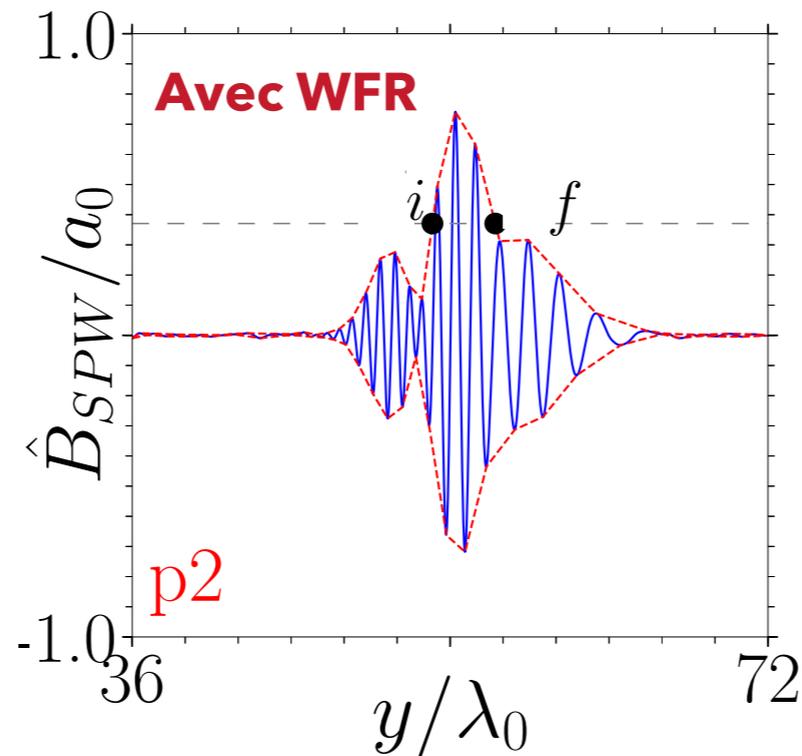
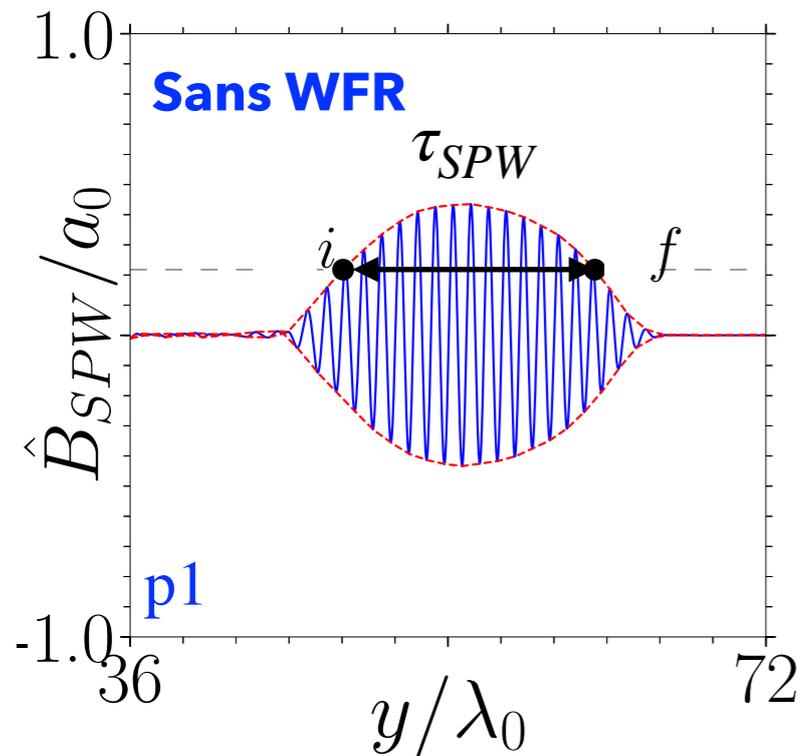
$n_0 = 100n_c$
 Cible avec profile blazed:
 $\theta_b = 13^\circ$ $h = 0.44\lambda_0$ $d = 2\lambda_0$

* $\leftrightarrow I\lambda_0^2 = 10^{16}, 10^{19} \text{ Wcm}^{-2}\mu\text{m}^2$

▶ **SPW sont des ondes TM $\rightarrow B_z$ représentatif de SPW (B_{SPW})**

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{\perp} = |E_x| \sim c|B_{SPW}| \\ E_{\parallel} = |E_y| \sim c\sqrt{\frac{n_c}{n_0}}|B_{SPW}| \end{array} \right.$$

WFR DIMINUE LA DURÉE ET AUGMENTE L'INTENSITÉ DE L'AMPLITUDE DU SPW ($a_0 = 0.1$)

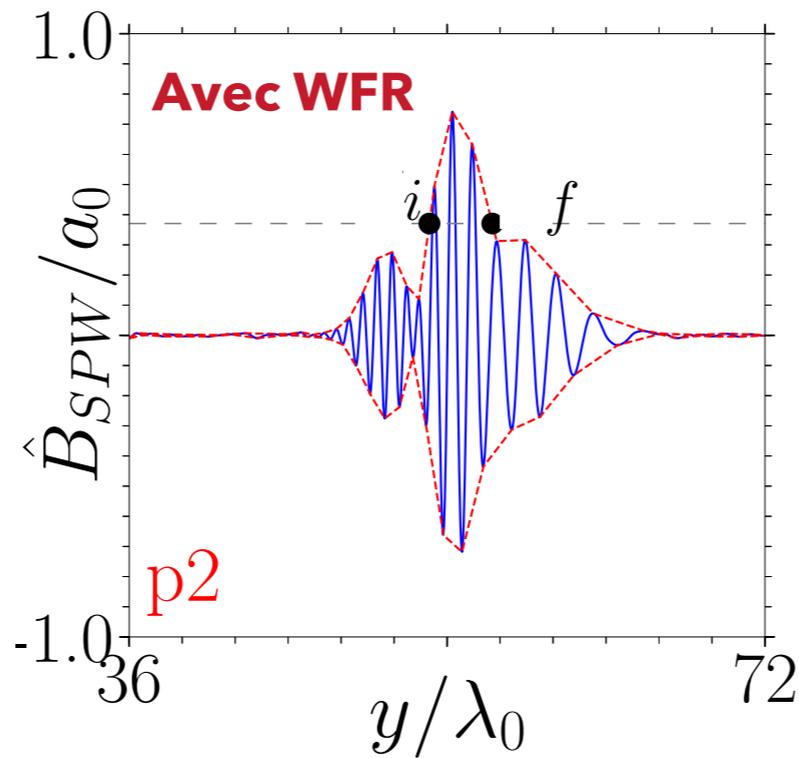
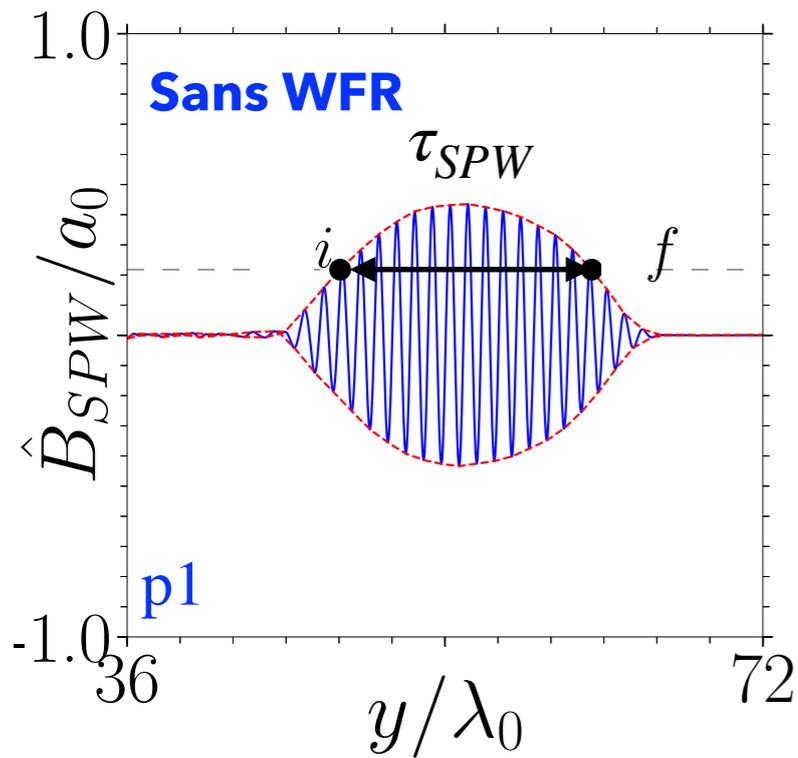


$$\Delta\beta = 0 \rightarrow \tau_{SPW} \simeq 14.2\lambda_0/c$$

$$\Delta\beta_{opt}^{sim} = 67 \text{ mrad} \rightarrow \tau_{SPW} \simeq 3.6\lambda_0/c$$

→ $\Delta\beta_{opt}$ donne le SPW la plus courte et intense

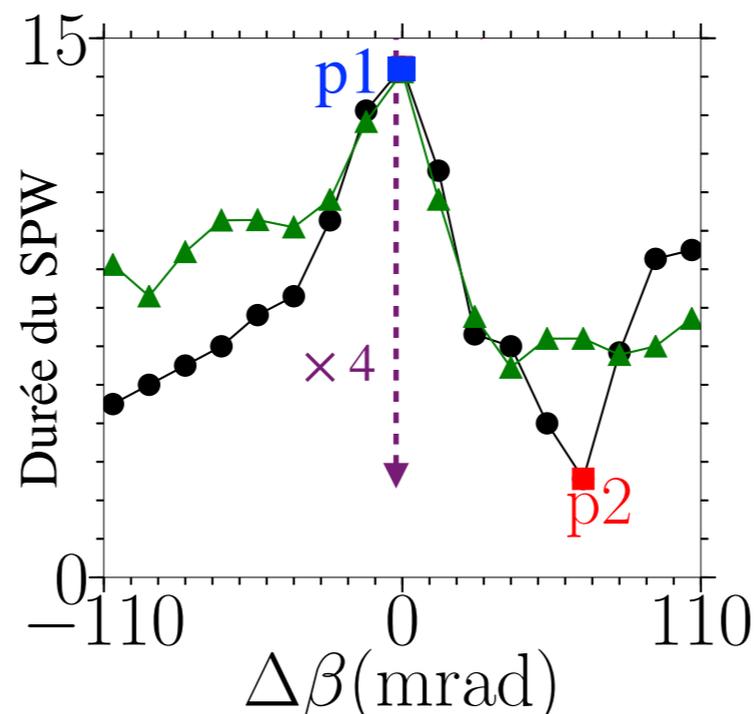
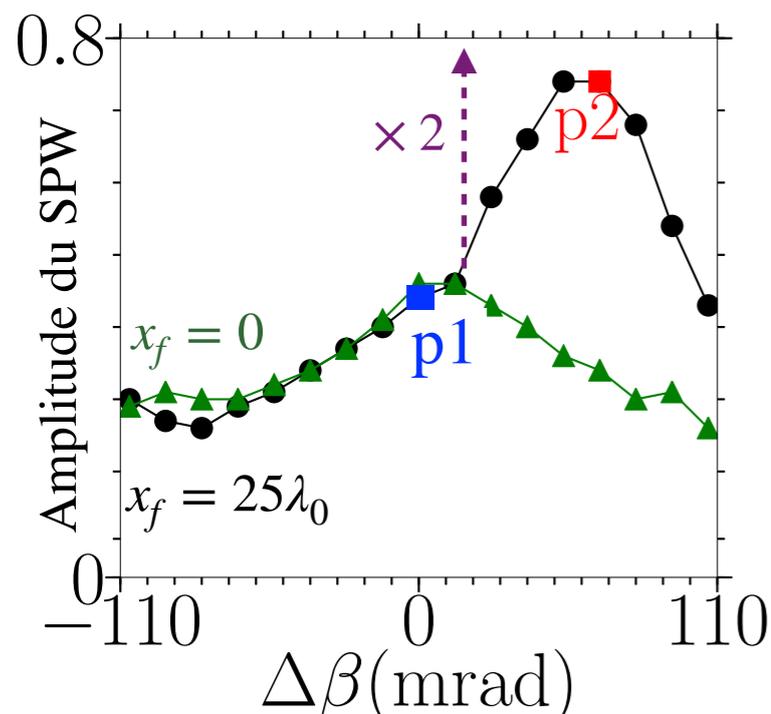
WFR DIMINUE LA DURÉE ET AUGMENTE L'INTENSITÉ DE L'AMPLITUDE DU SPW ($a_0 = 0.1$)



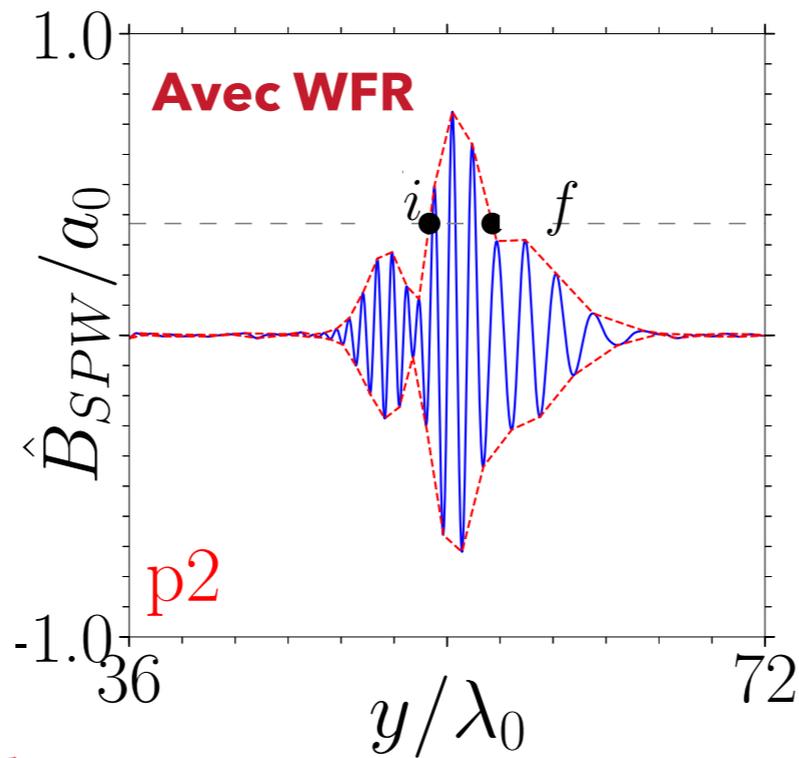
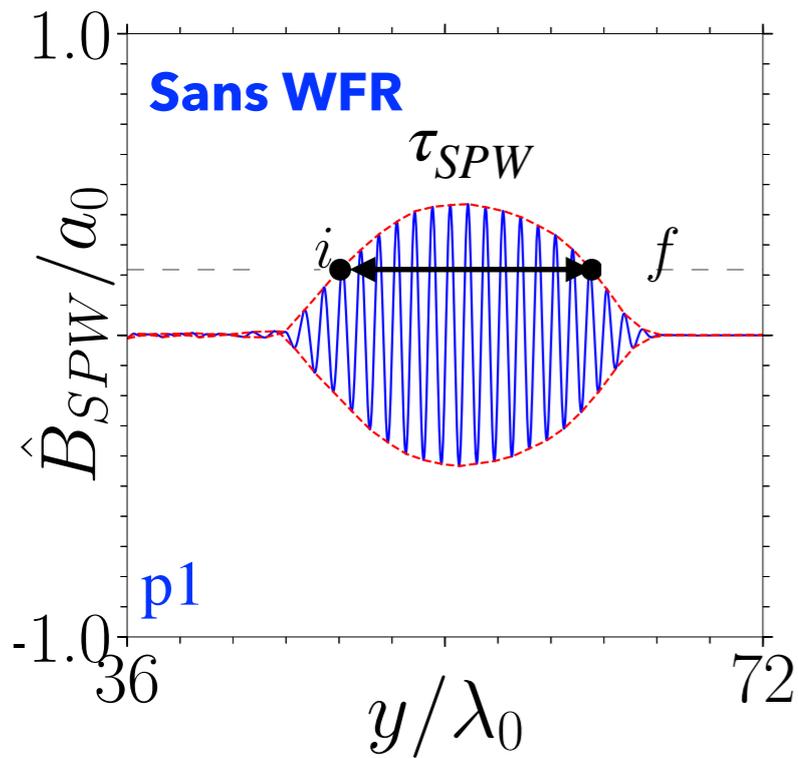
$\Delta\beta = 0 \rightarrow \tau_{SPW} \simeq 14.2\lambda_0/c$

$\Delta\beta_{opt}^{sim} = 67 \text{ mrad} \rightarrow \tau_{SPW} \simeq 3.6\lambda_0/c$

$\rightarrow \Delta\beta_{opt}$ donne le SPW la plus courte et intense



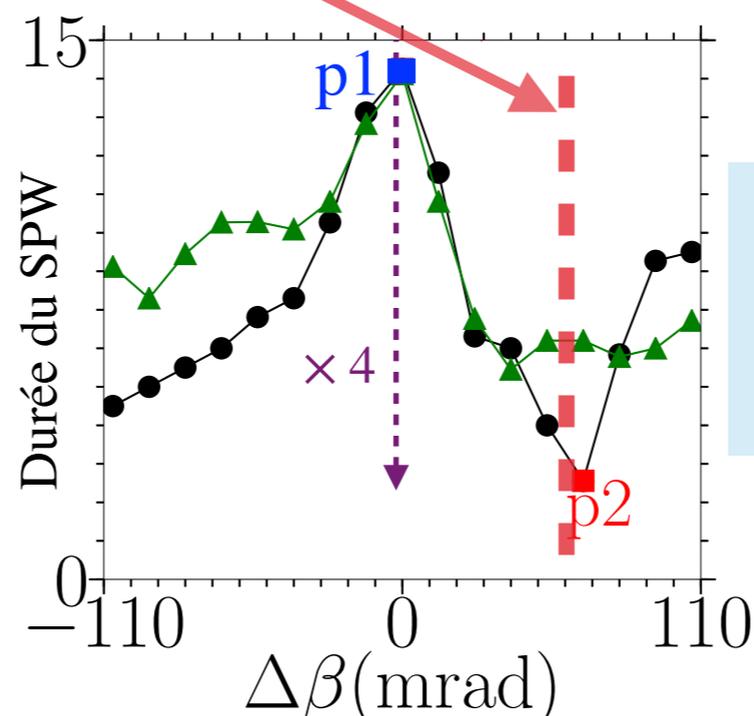
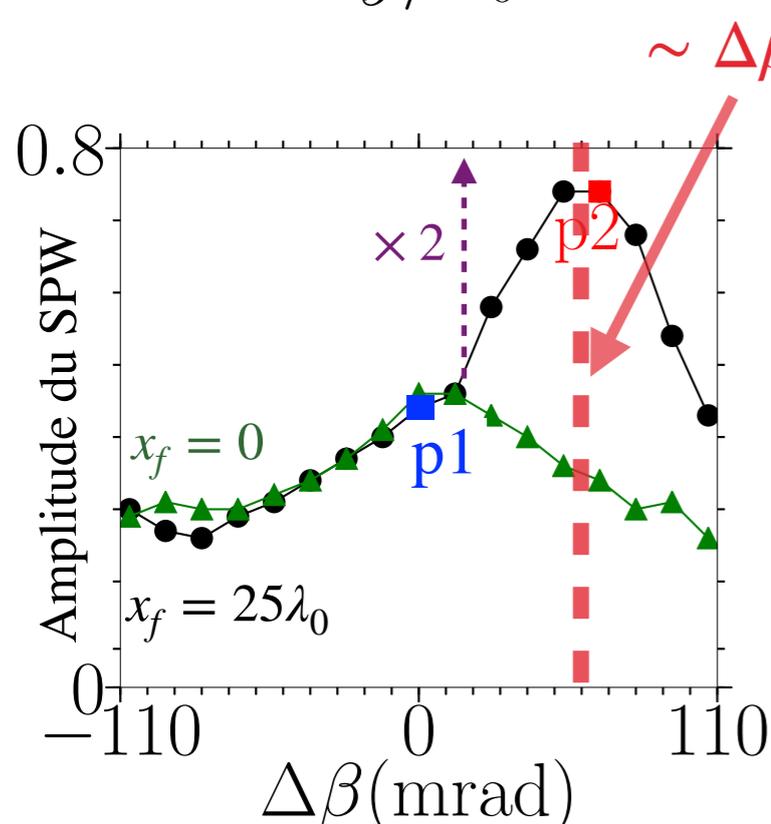
WFR DIMINUE LA DURÉE ET AUGMENTE L'INTENSITÉ DE L'AMPLITUDE DU SPW ($a_0 = 0.1$)



$\Delta\beta = 0 \rightarrow \tau_{SPW} \simeq 14.2\lambda_0/c$

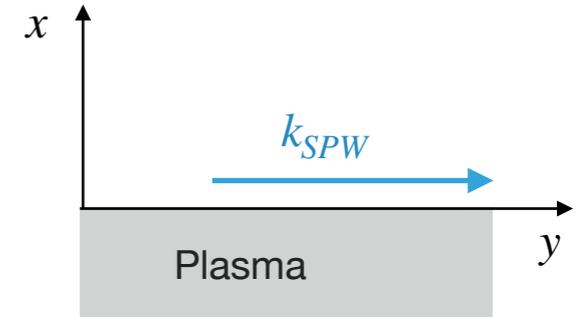
$\Delta\beta_{opt}^{sim} = 67 \text{ mrad} \rightarrow \tau_{SPW} \simeq 3.6\lambda_0/c$

→ $\Delta\beta_{opt}$ donne le SPW la plus courte et intense

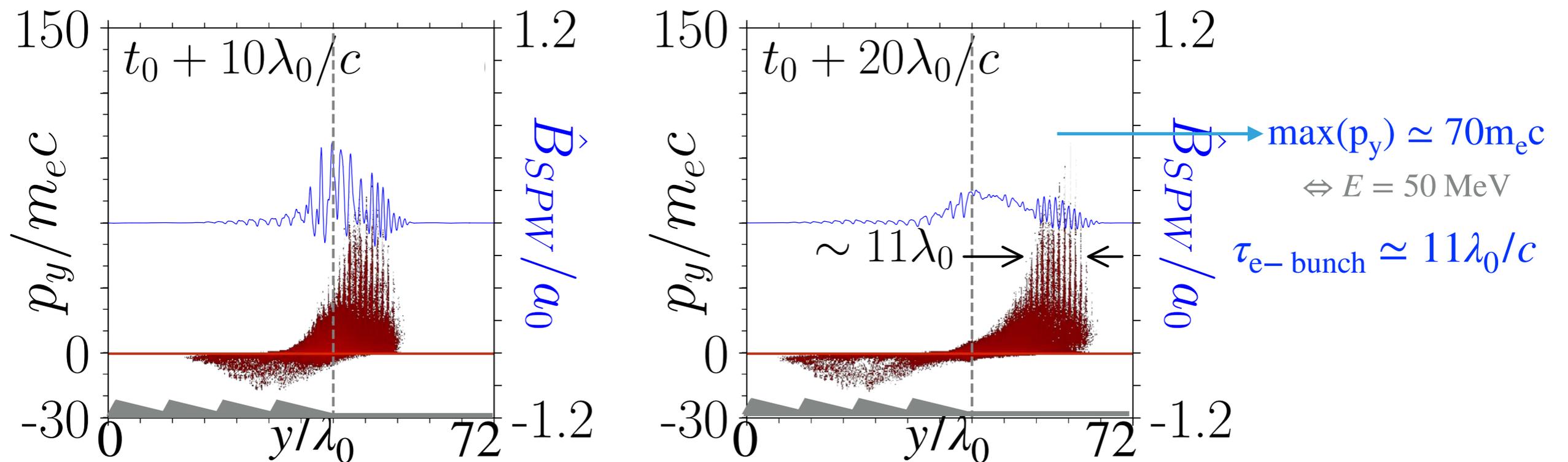


→ $\Delta\beta$ permet de contrôler l'amplitude et la durée du SPW

WFR OPTIMISE L'ACCÉLÉRATION DES ÉLECTRONS DANS LE RÉGIME UHI ($a_0 = 5$)



Sans WFR ($\Delta\beta = 0$)

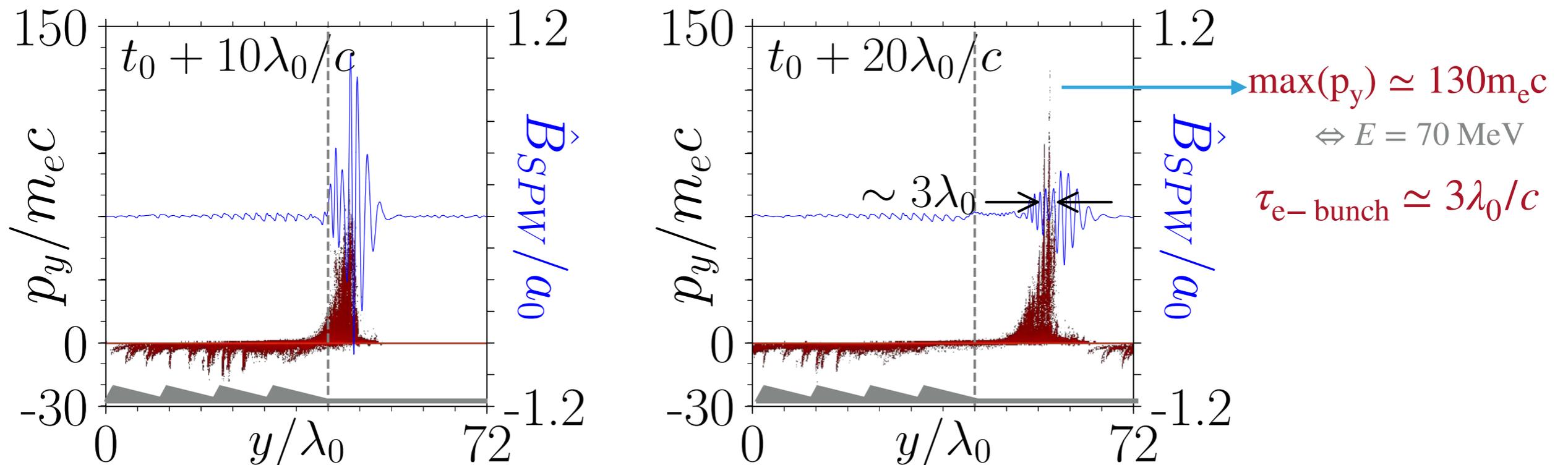


----- début du surface plane
 t_0 : temps où le maximum du pulse arrive à la cible

- B_{SPW} est amorti au cours du temps, les électrons sont accélérés

WFR OPTIMISE L'ACCÉLÉRATION DES ÉLECTRONS DANS LE RÉGIME UHI ($a_0 = 5$)

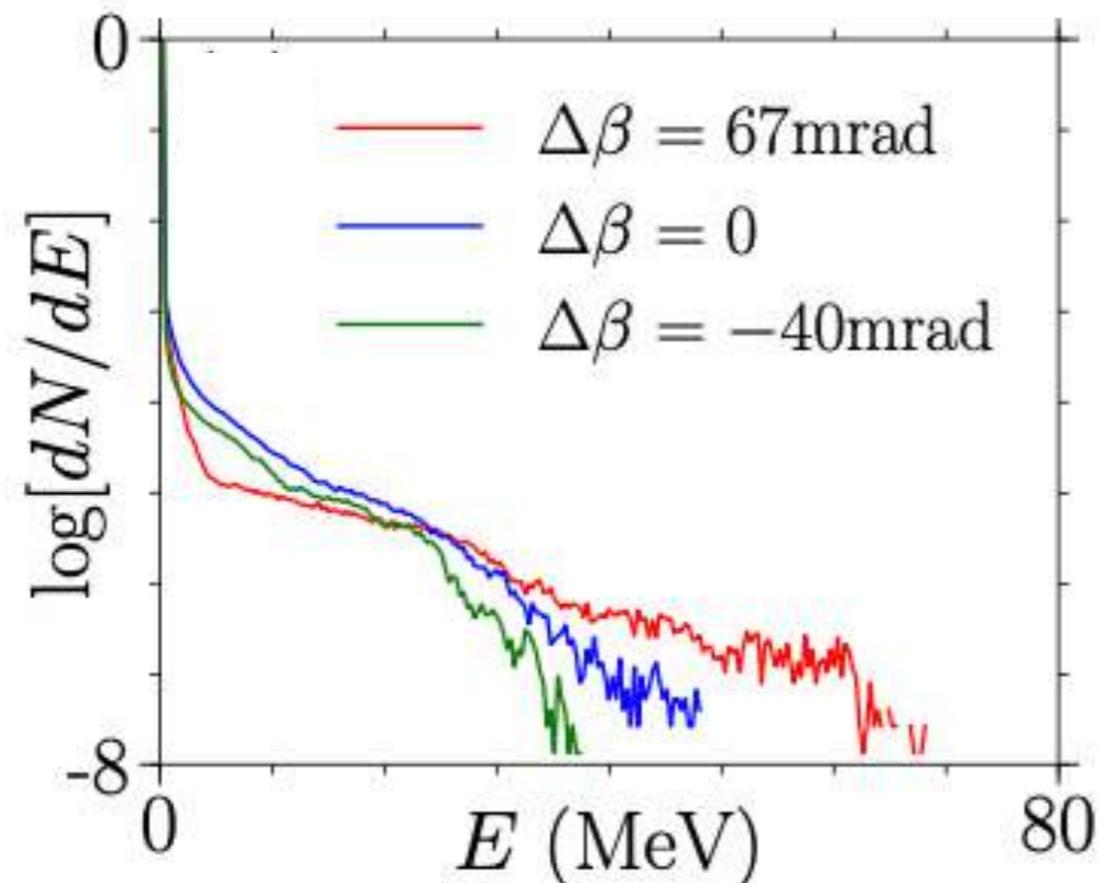
Avec WFR ($\Delta\beta = 67$ mrad)



Durée paquet d'électron \propto durée SPW

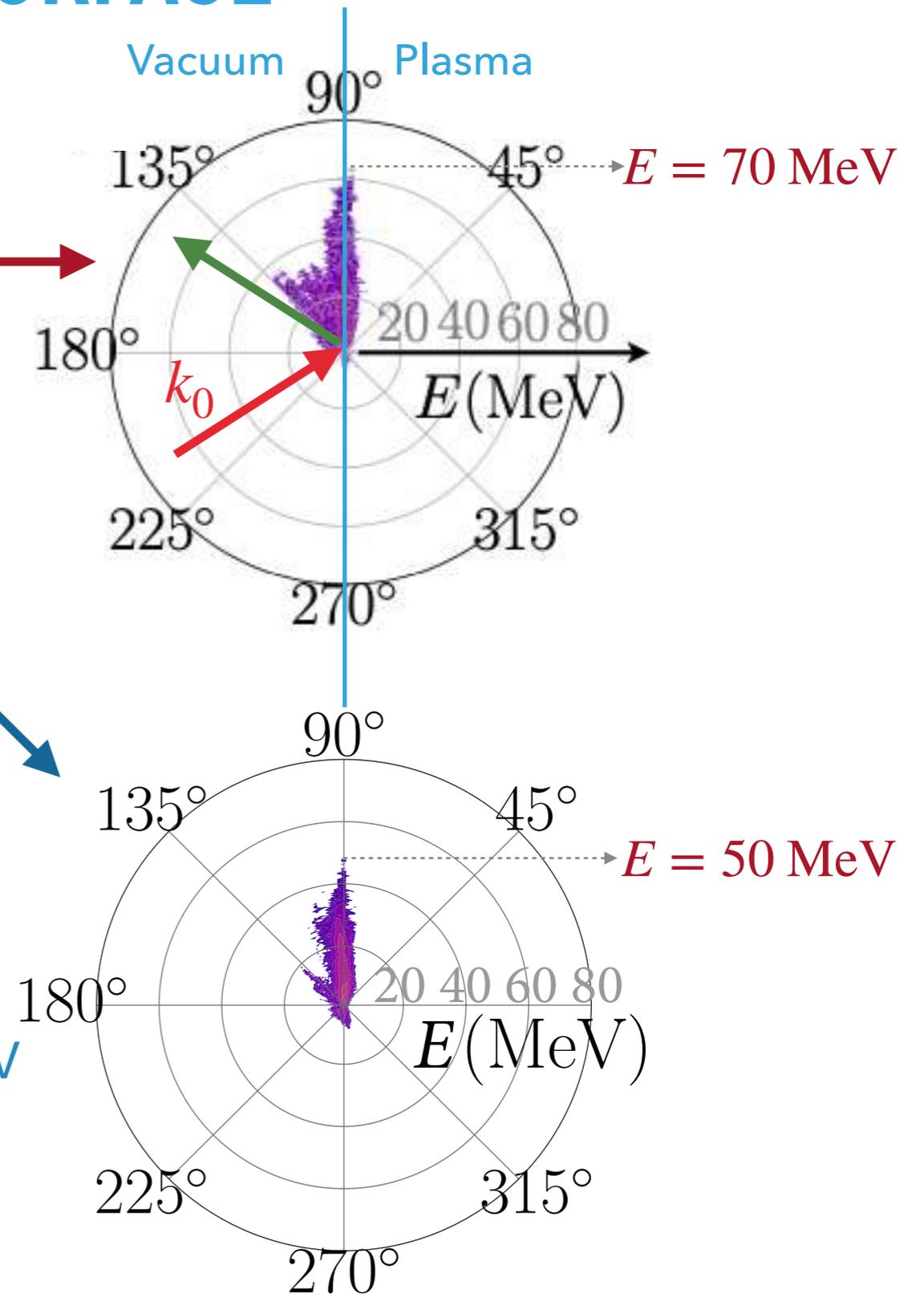
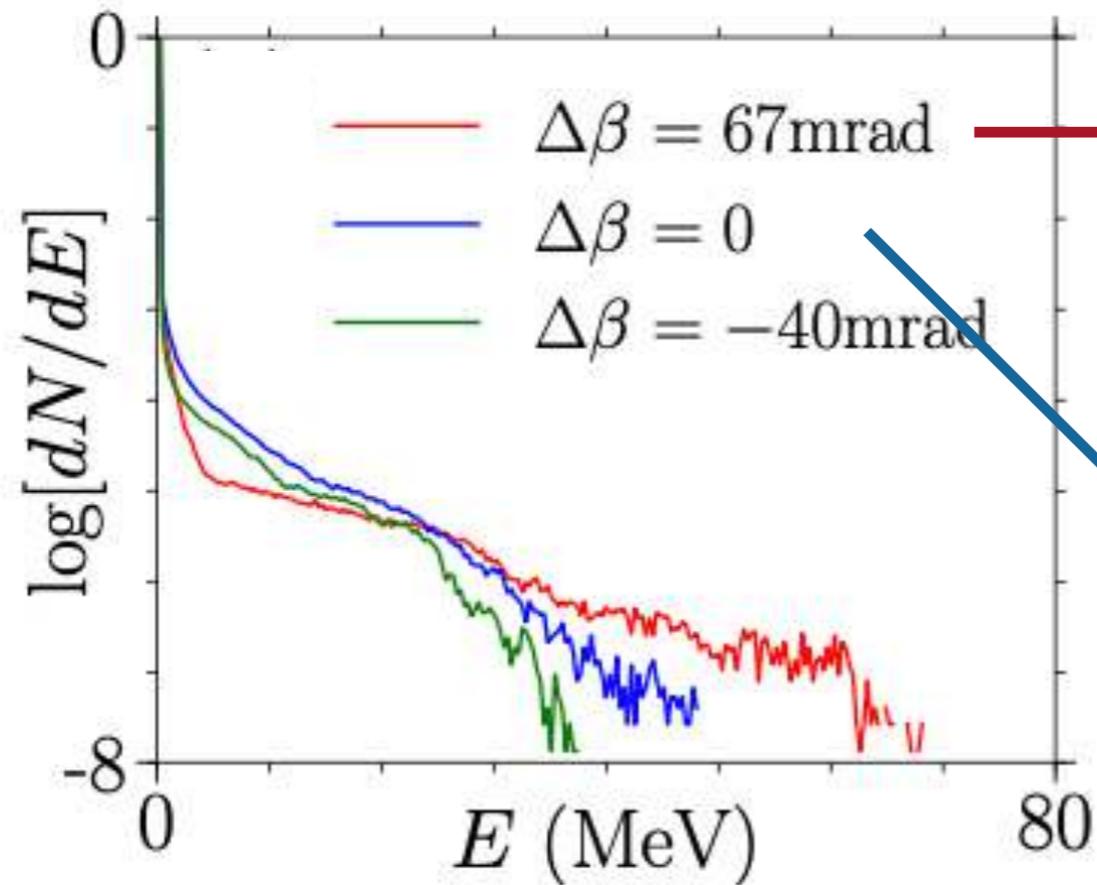
- SPW plus intense → paquet d'électrons plus énergétique
- Le $\Delta\beta_{opt}$ paquet d'électrons plus court et plus énergétique

LES ÉLECTRONS LES PLUS ÉNERGÉTIQUES SE PROPAGENT LE LONG DE LA SURFACE



- ▶ Charge totale $\simeq 10 \text{ pC}/\lambda_0$ entre 30 et 70 MeV

LES ÉLECTRONS LES PLUS ÉNERGÉTIQUES SE PROPAGENT LE LONG DE LA SURFACE



- Charge totale $\simeq 10\text{ pC}/\lambda_0$ entre 30 et 70 MeV

- ▶ L'interaction d'une impulsion laser avec WFR avec une cible plasma possédant un réseau périodique optimisé permet de contrôler la durée et l'amplitude des SPW dans les régimes non relativiste et relativiste.
- ▶ Dans le régime relativiste, ce schéma génère des paquets d'électrons très courts (~ 8 fs for $\lambda_0 = 0.8 \mu\text{m}$), énergétiques (jusqu'à 70 MeV) et avec une charge importante (10's pC)

LETTRE DANS PHYSICAL REVIEW E : S. Marini, P. S. Kleij *et al.*, « Ultrashort high energy electron bunches from tunable surface plasma waves driven with laser wavefront rotation » (2021)

PAPIER DANS PHYSICS OF PLASMAS: S. Marini, P. S. Kleij *et al.*, « Ultra-high laser intensity threshold regime in surface plasma wave excitation » (2021)

PERSPECTIVES

- ▶ Etudier le rayonnement des particules accélérés dans le régime ultra relativiste

MERCI POUR VOTRE ATTENTION