

Accélération d'électrons au foyer d'une impulsion TM_{01} ultra-intense

Un point de vue théorique

Charles Varin, Michel Piché

Centre d'optique photonique et laser, Université Laval, Québec, Canada

Miguel A. Porras

Département de physique appliquée, Université polytechnique de Madrid,
Madrid, Espagne

Contact : charles.varin@phy.ulaval.ca



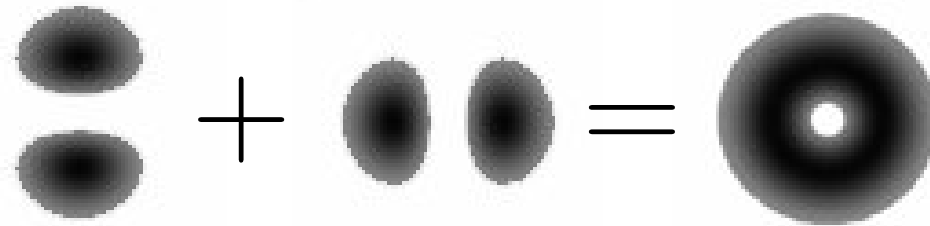
Introduction

- Dans le vide, la divergence du champ électrique d'une impulsion laser doit être nulle ($\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$) menant ainsi à une composante longitudinale, parallèle au vecteur de Poynting.
- Le champ longitudinal d'une impulsion TM_{01} peut accélérer un électron le long de son axe de propagation.
($\text{TM} \rightarrow B_z = 0$ et $01 \rightarrow \partial_\theta \mathbf{E} = 0$)
- Pour des intensités élevées ($\sim 10^{22} \text{ W/cm}^2$), l'électron est accéléré à des énergies de l'ordre du GeV.

Profil d'une impulsion TM_{01}

1. Profil transversal

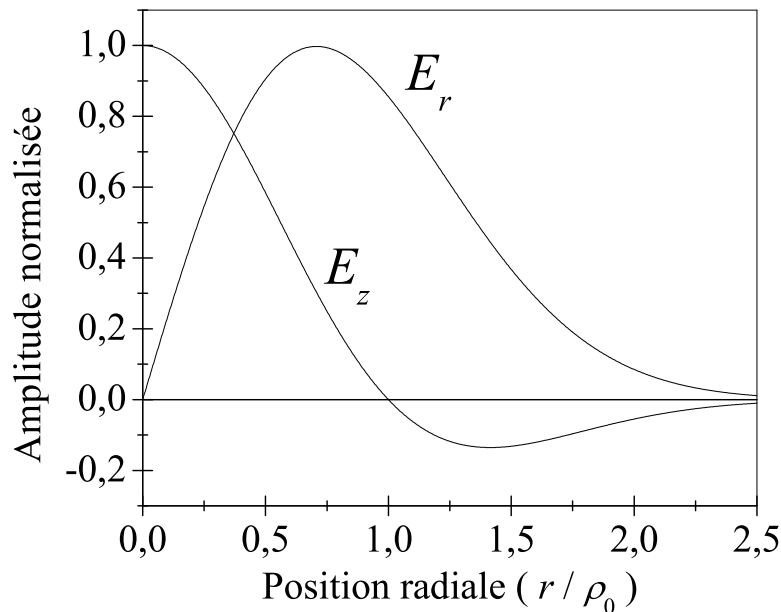
- Une impulsion TM_{01} peut être générée en superposant deux impulsions gauss-hermite TM_{10} :



- Sur l'axe de propagation ($r = 0$), l'intensité est nulle.

Profil d'une impulsion TM_{01}

2. Champ longitudinal



- Le champ longitudinal E_z est maximal sur l'axe de propagation ($r = 0$).
- Celui-ci est faible par rapport au champ transversal E_r :

$$|E_z| \propto \lambda/\rho_0 |E_r|$$

λ : longueur d'onde

ρ_0 : dimension du faisceau au foyer

Accélération d'un électron

1. Équations du mouvement

Sur l'axe de propagation d'une impulsion TM_{01} , un électron subit une force parallèle au vecteur de Poynting :

$$F_{//} = q \left[1 - \frac{v_z^2}{c^2} \right]^{3/2} E_z(r = 0)$$

$$E_z(r = 0) = \frac{2|E_r|}{k_0 \rho_0} \left[1 + z^2/z_R^2 \right]^{-1} \exp\left(\frac{-t'^2}{T^2}\right) \sin(\omega_0 t' + 2\Psi_G + \phi_0)$$

q : charge de l'électron v_z : vitesse de l'électron

$|E_r|$: amplitude du champ transversal ρ_0 : dimension du faisceau au foyer

$k_0 = \omega_0/c$: nombre d'onde ω_0 : fréquence angulaire T : durée de l'impulsion

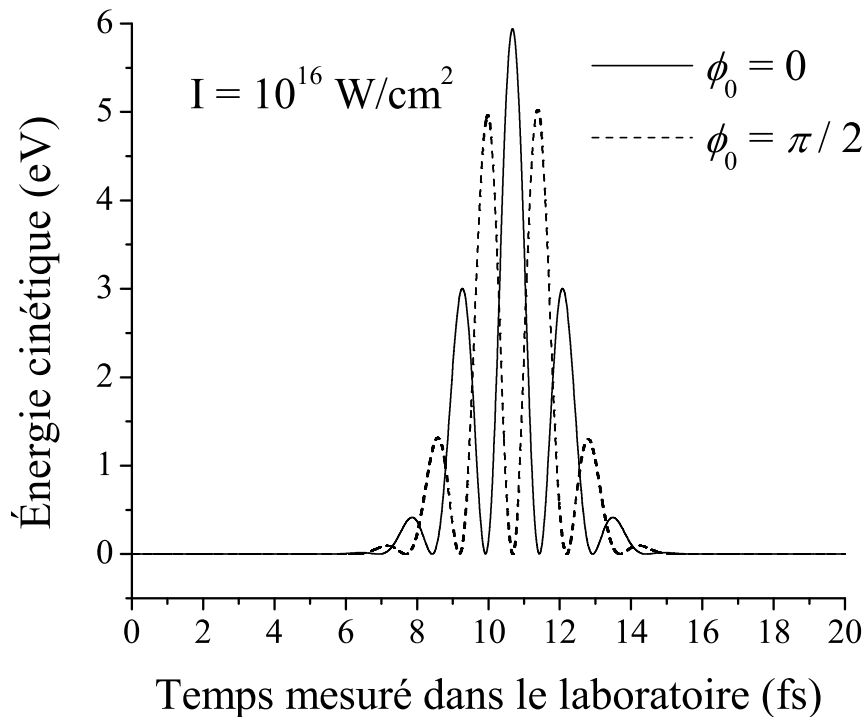
$z_R = k_0 \rho_0^2/2$: distance de Rayleigh $\Psi_G = \tan^{-1}(z/z_R)$: déphasage de Gouy

ϕ_0 : phase du champ au foyer $t' = t - z/c$: temps retardé

c : vitesse de la lumière dans le vide

Accélération d'un électron

2. Régime oscillatoire



- En-dessous d'un certain seuil d'intensité, l'électron oscille avec le champ à la fréquence ω_0 .
- Suite au passage de l'impulsion, l'électron revient à son état initial.

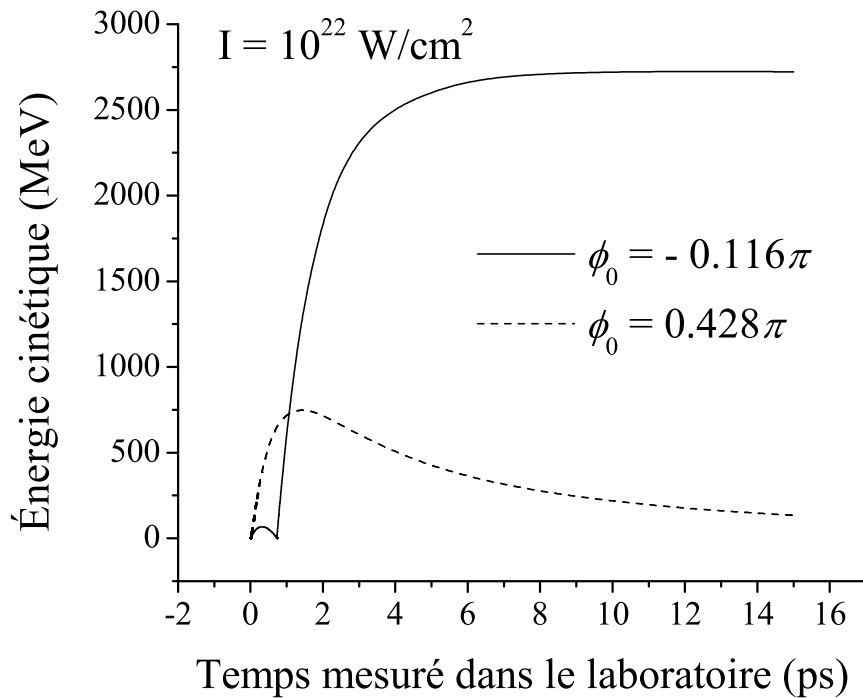
Conditions initiales

$$\lambda = 0.8 \mu\text{m} \quad \rho_0 = 10 \mu\text{m}$$

$$T = 2\pi/\omega_0 \quad v_z(t=0) = 0$$

Accélération d'un électron

3. Régime d'accélération



- Pour des intensités extrêmes, l'électron atteint des vitesses relativistes ($v_z \simeq c$) dans un délai de l'ordre de $2\pi/\omega_0$.
- Alors qu'il voyage avec l'impulsion, l'électron est fortement accéléré.

Conditions initiales

$$\lambda = 0.8\mu\text{m} \quad \rho_0 = 10\mu\text{m}$$

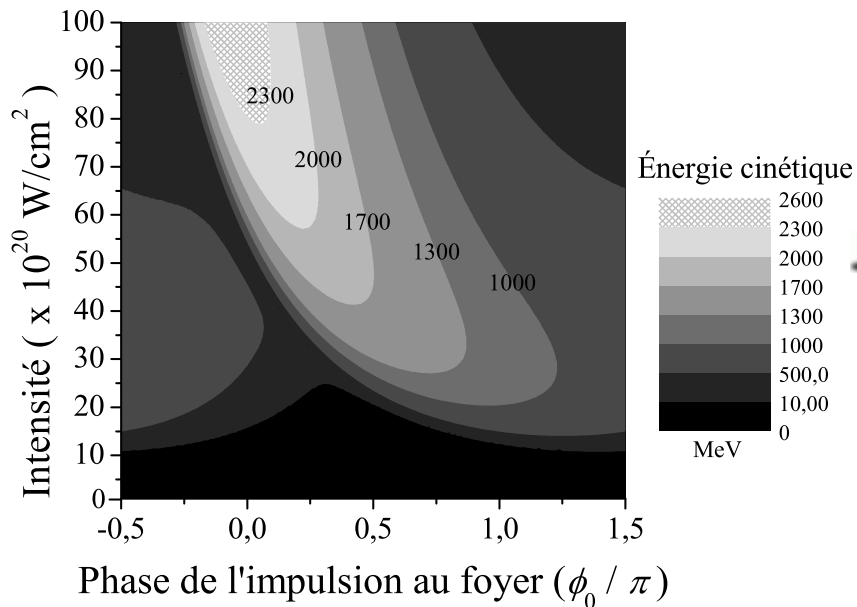
$$T = 2\pi/\omega_0 \quad v_z(t=0) = 0$$

Accélération d'un électron

4. Seuil d'intensité et sensibilité à la phase

● Une accélération notable se produit pour des intensités excédant 10^{21} W/cm².

● L'énergie transférée à l'électron est optimale autour d'une certaine valeur de phase qui dépend de l'intensité.



Conditions initiales

$$\lambda = 0.8\mu\text{m} \quad \rho_0 = 10\mu\text{m}$$

$$T = 2\pi/\omega_0 \quad v_z(t=0) = 0$$

Conclusion

- Une impulsion TM_{01} possède un champ électrique longitudinal sur son axe de propagation.
- Ce champ longitudinal peut accélérer des électrons se trouvant immobiles au foyer de l'impulsion jusqu'à des énergies de l'ordre du GeV. Les électrons super-relativistes alors produits peuvent être utilisés :
 - comme milieu de gain dans les lasers à électrons libres.
 - comme projectile pour la physique des hautes énergies.
 - pour générer du rayonnement synchrotron et des rayons-X.

Remerciements

Nous tenons à remercier :

- le Fonds québécois de recherche sur la nature et les technologies
- le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada
- l'Institut canadien pour les innovations en photonique pour leur support financier.