

Le CIP et l'électrodynamique quantique en champ fort

De l'utilisation de champs fortement focalisés

Joey Dumont*, François Fillion-Gourdeau, Catherine Lefebvre, Denis Gagnon et Steve MacLean

Université du Québec – INRS-ÉMT, Varennes, Québec, Canada

* joey.dumont@emt.inrs.ca

INRS
UNIVERSITÉ DE RECHERCHE

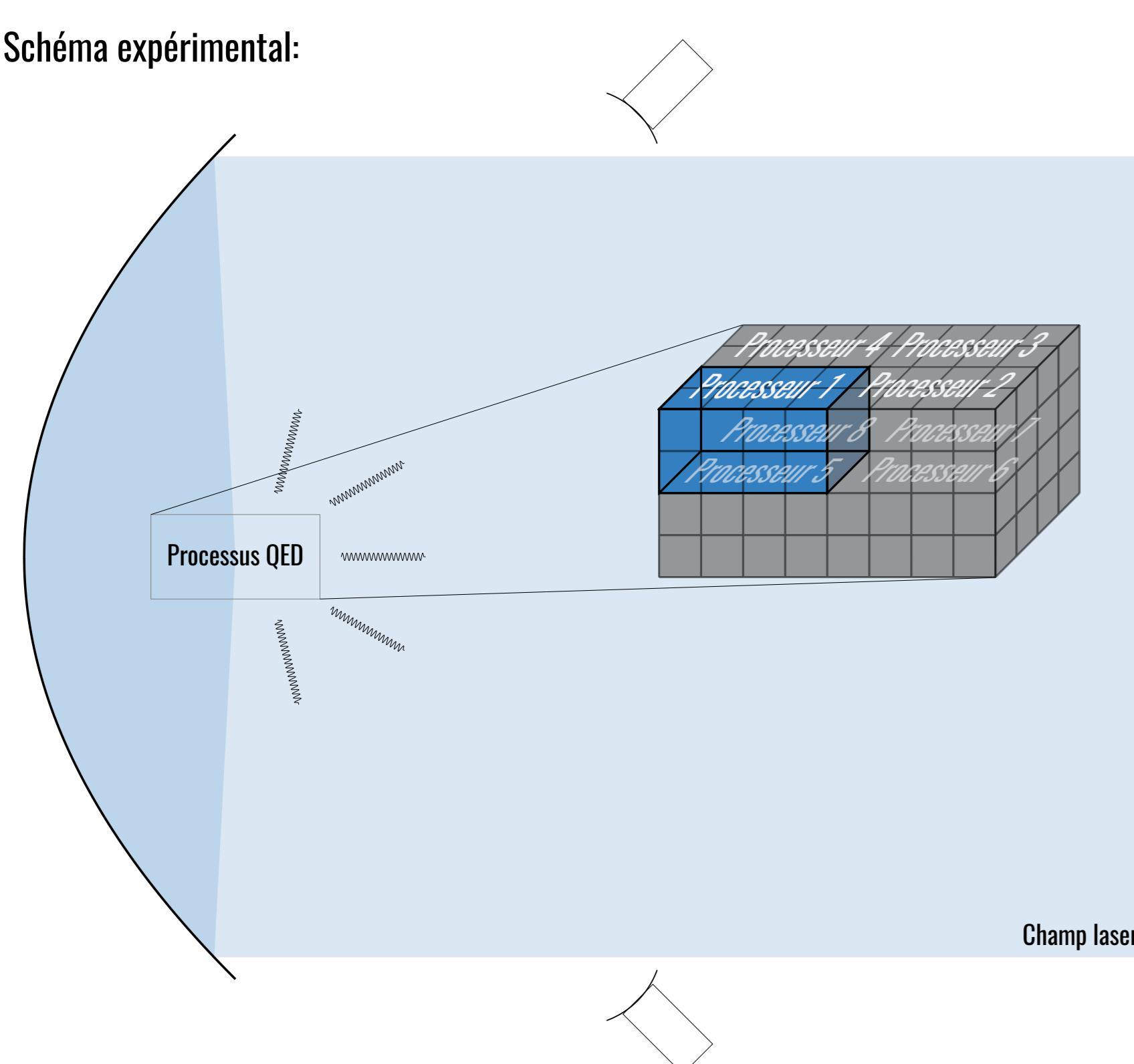
Lasers fortement focalisés pour l'observation d'effets QED

Des avancées récentes dans la technologie laser ont permis d'obtenir des intensités atteignant 10^{22} W/cm^2 , nous rapprochant ainsi de la possibilité de sonder expérimentalement la structure du vide dans la théorie de l'électrodynamique quantique en champ fort (SF-QED).

Deux avancées technologiques permettent d'obtenir cette intensité [1]:

- Compression temporelle du faisceau laser, jusqu'à quelques **femtosecondes** (10^{-15} s);
- Focalisation extrême du laser (jusqu'à un volume de λ^3).

Schéma expérimental:



Modélisation réaliste des configurations expérimentales

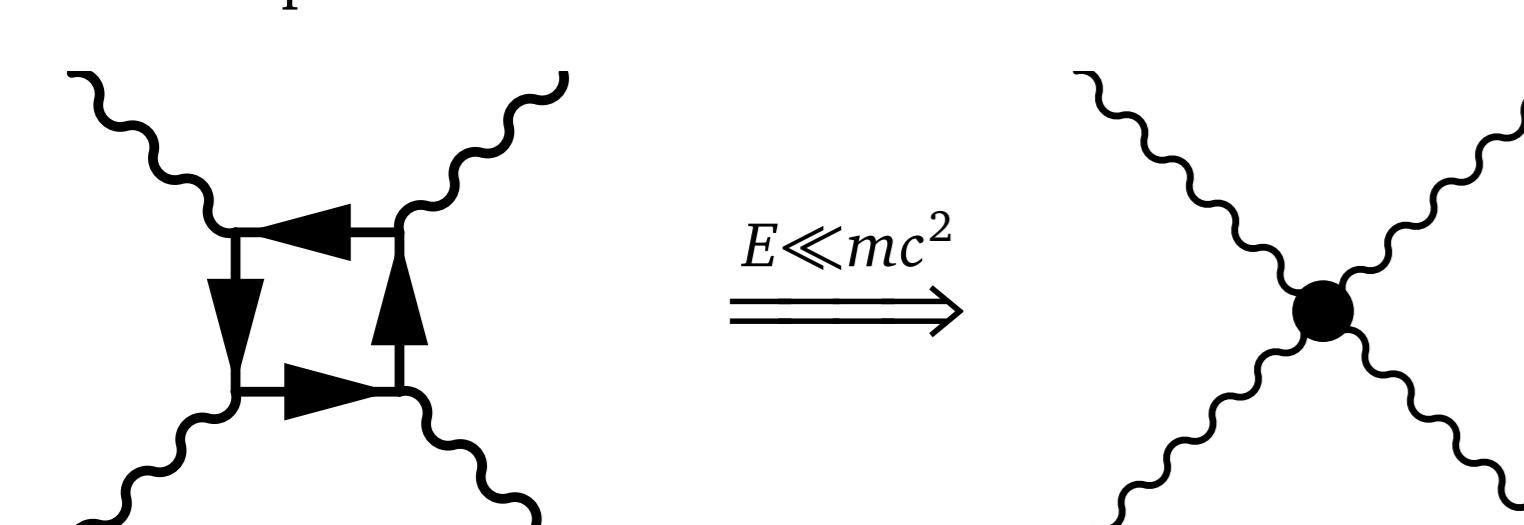
But principal: Développer des modèles de différents processus SF-QED en présence de champs lasers de formes temporelles et spatiales arbitraires.

Outil I: Modélisation réaliste de champs électromagnétiques fortement focalisés à l'aide des équations de **Stratton-Chu**.

Outil II: Théorie effective décrivant la physique de l'interaction du laser et le vide quantique: le **Lagrangien d'Euler-Heisenberg**.

Processus I: Polarisation du vide en présence de lumière laser. Le vide se comporte comme un **milieu diélectrique non-linéaire** [2].

Processus II: Désintégration du vide par production de paires électron-positron. Des particules virtuelles extraient assez d'énergie du laser pour être émises.



Parallélisation efficace

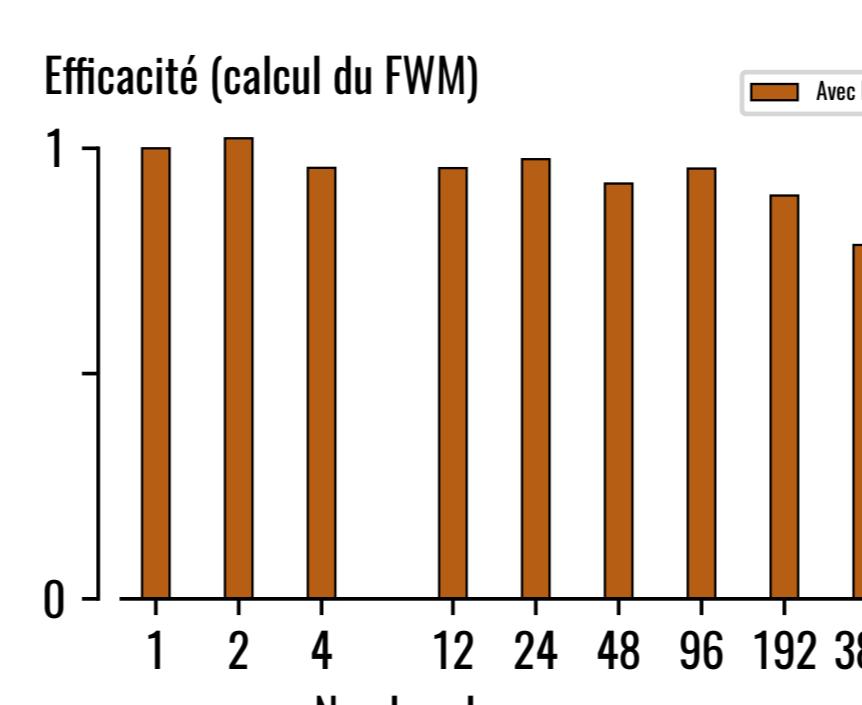
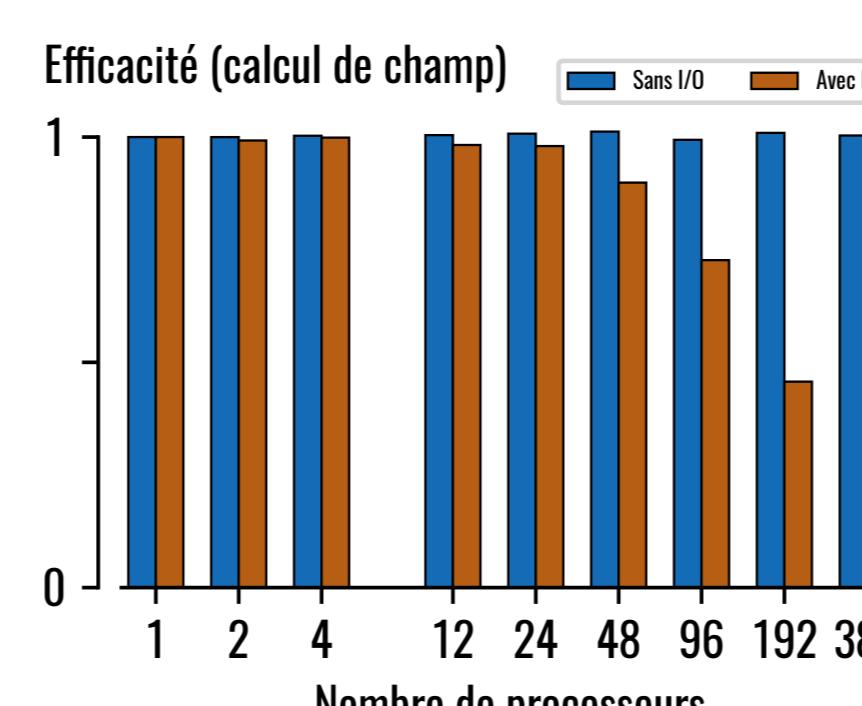
La simulation théorique d'effets SF-QED suit le schéma suivant:

- Caractérisation du champ laser incident.
- Calcul du champ laser fortement focalisé avec le formalisme de Stratton-Chu.
- Opération de réduction sur le champ laser calculé selon l'observable SF-QED désiré.

Chaque processus se parallélise différemment.

- Calcul du champ: parfaitement parallèle.
- Calcul du mélange à 4 ondes: chaque processeur effectue des opérations de réduction sur tous les autres processeurs [3].

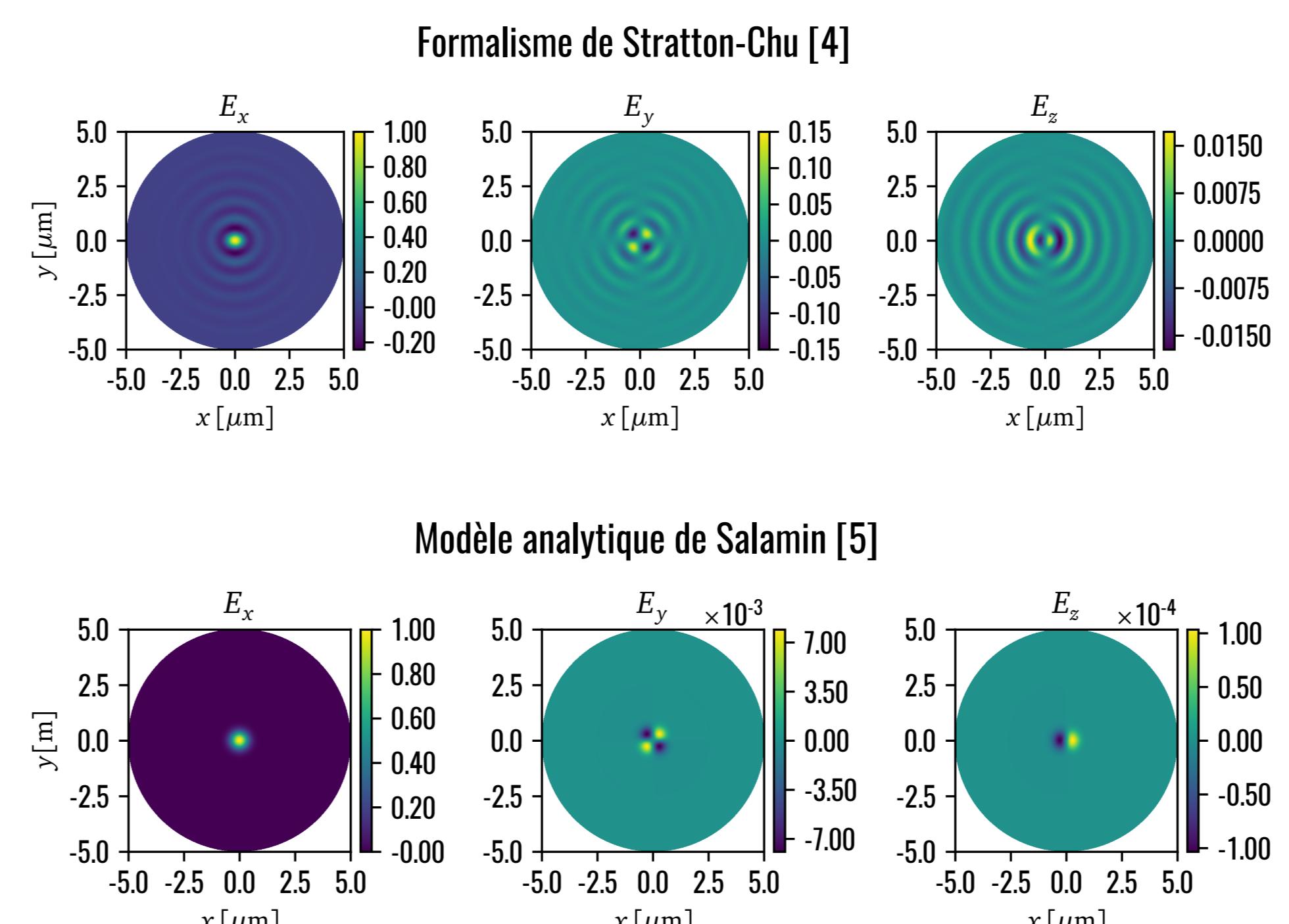
Calcul du nombre de paires: réduction simple.



Calcul de champ

Notre code a montré que les **modèles de champs analytiques** sont **insuffisants** pour décrire le régime de forte focalisation [4]. Dans ce régime, les champs:

- montrent une structure interférométrique étendue;
- possèdent des composantes longitudinales plus importantes lorsque comparées à des solutions exactes de l'équation de Maxwell.

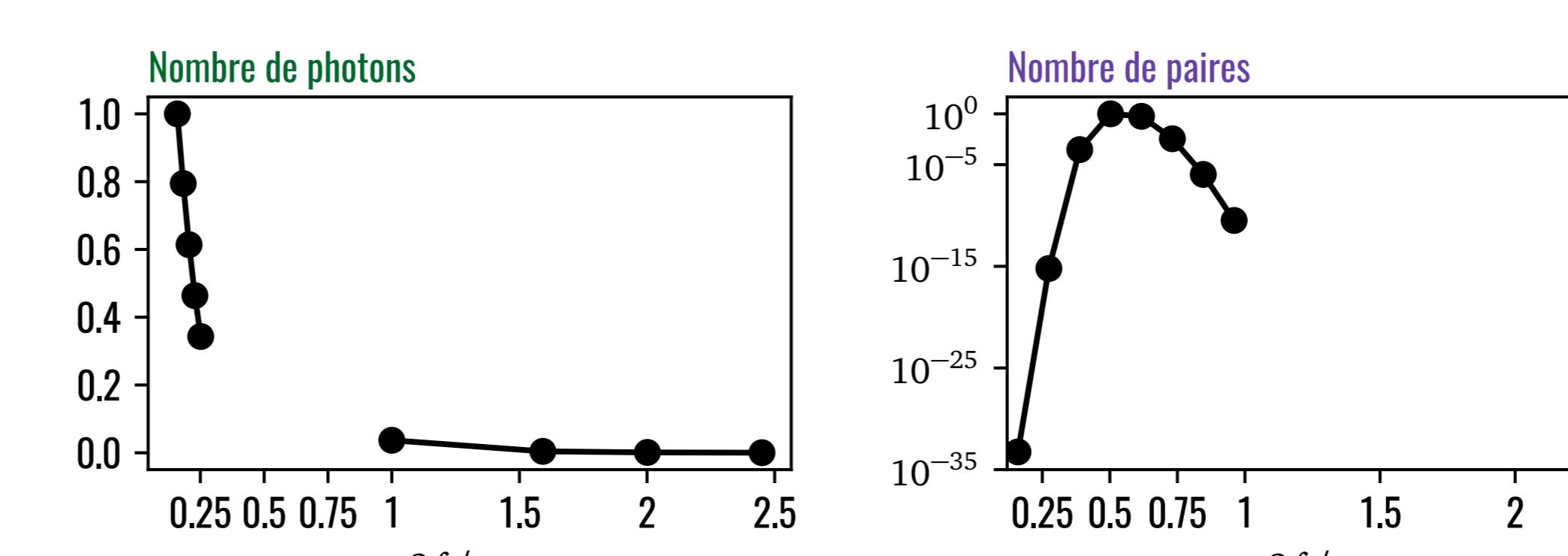


Étude de l'effet de la longueur focale

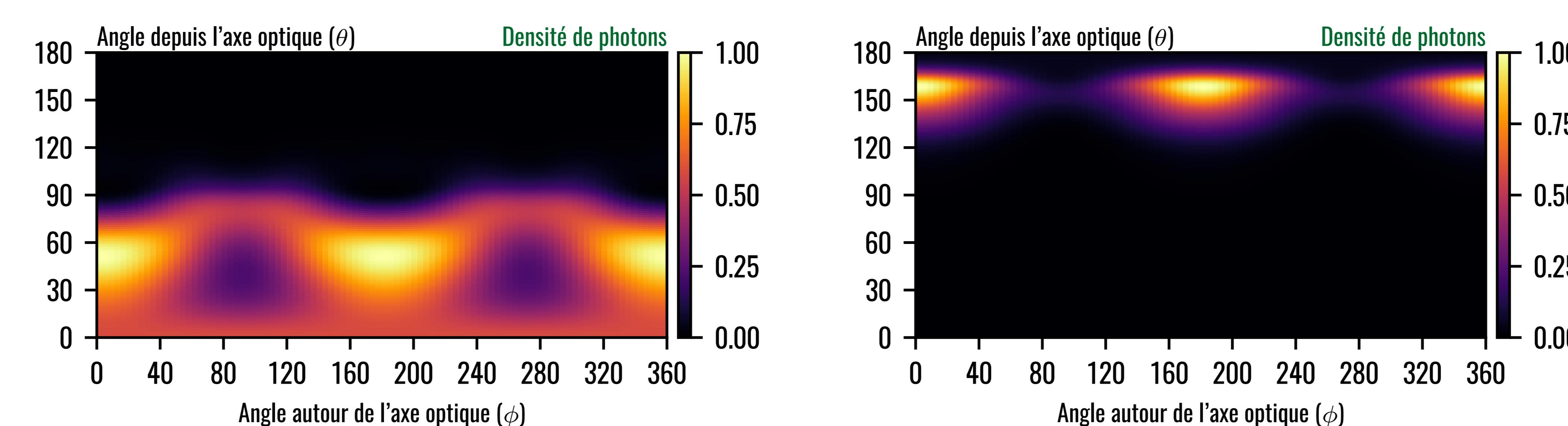
Une étude paramétrique montre une **forte dépendance** de l'efficacité du mélange à 4 ondes et de la production de paires **sur le rapport $2f/r_{\max}$** [6].

L'efficacité du mélange à 4 ondes augmente de manière quadratique lorsque $2f/r_{\max}$ diminue. Ceci est causé par une **diminution de $E \cdot B$** , une quantité qui apparaît dans le Lagrangien d'Euler-Heisenberg.

L'efficacité de la production de paires possède un optimum à $f \sim r_{\max}/4$ dû à un **minimum du champ magnétique B** dans cette configuration.



Détection du mélange à 4 ondes



Conclusion

- Nous avons développé un code **hautement parallèle** basé sur une solution **quasi-exacte** des équations de Maxwell qui permet de modéliser le régime d'**extrême focalisation**.
- Nous avons montré que certains processus QED peuvent être modélisés par une opération de réduction sur le champ électromagnétique focalisé. La parallélisation du calcul du mélange à 4 ondes implique plus de communications que celle du calcul de la production de paires.
- Nous avons exploré de **nouvelles** configurations expérimentales qui facilitent l'observation de phénomènes de SF-QED.
- Nous avons montré que le mélange à quatre ondes et la production de paires possèdent des **optimums paramétriques** bien différents qui dépendent de leur **dépendance fonctionnelle** sur le champ focalisé.

Perspectives

Le futur des lasers haute puissance

Des intensités de plus en plus élevées nous permettent de sonder des structures de plus en plus petites [1]: de l'atome jusqu'au quark!

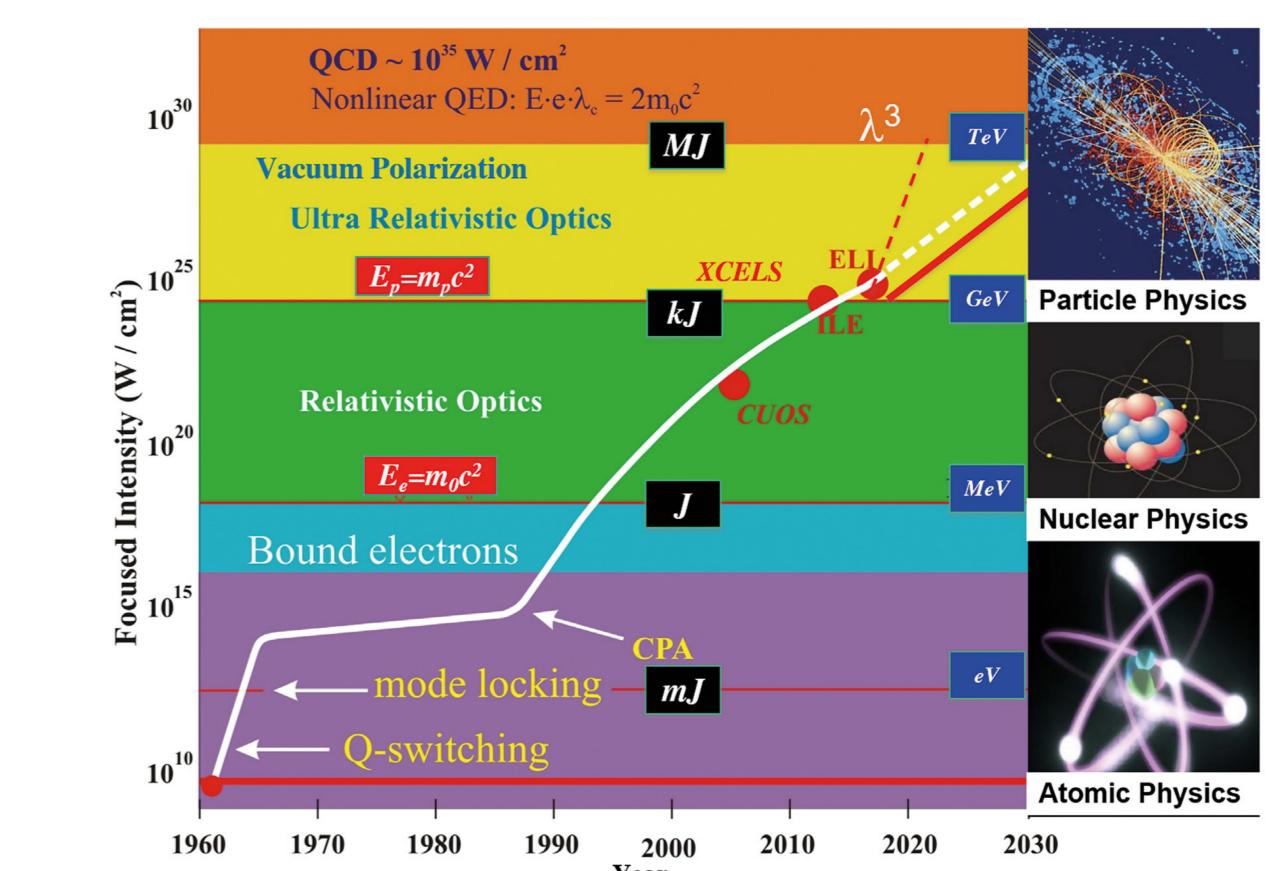


Figure tirée de [1]

Autres processus SF-QED

Il existe d'autres processus SF-QED qu'il est possible de modéliser avec notre **Outil I**, tant que nous pouvons trouver leur dépendance fonctionnelle sur le champ laser focalisé, comme

- la production de photons;
- la diffusion de Compton non-linéaire;

Bibliographie

- G. A. Mourou, T. Tajima, et S. V. Bulanov, Rev. Mod. Phys. **78**, 309 (2006).
- R. Battesti et C. Rizzo, Rep. Prog. Phys. **76**, 016401 (2013).
- F. Fillion-Gourdeau, C. Lefebvre, et S. MacLean, Phys. Rev. A **91**, 031801(R) (2015).
- J. Dumont, F. Fillion-Gourdeau, C. Lefebvre, D. Gagnon et S. MacLean, J. Opt. **19**(2), 025604 (2017).
- Y. I. Salamin, Phys. Rev. A **92**, 063818 (2015).
- J. Dumont, F. Fillion-Gourdeau, D. Gagnon, C. Lefebvre, et S. MacLean, en préparation (2017).
- A. M. Fedotov, Laser Phys. **19**, 214 (2009).