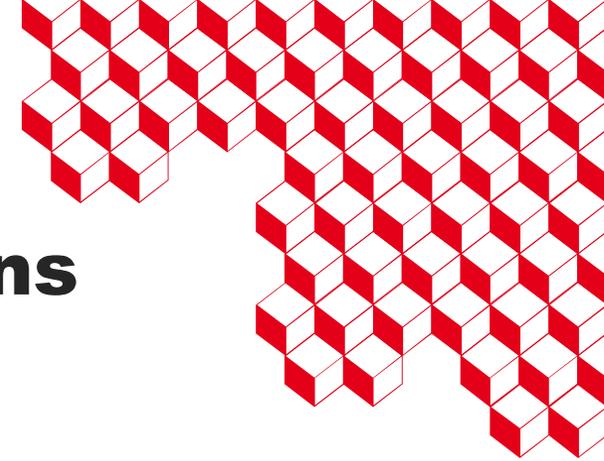




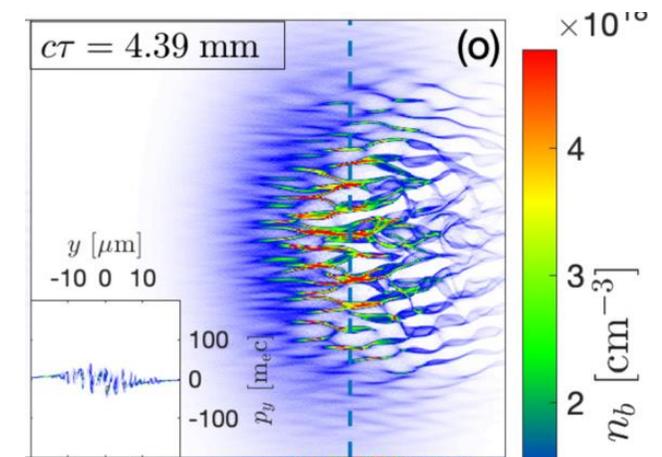
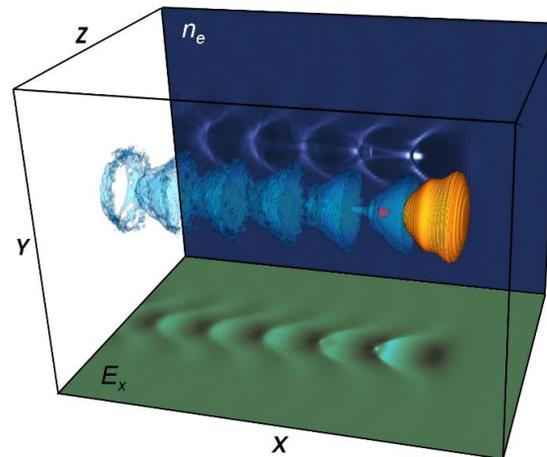
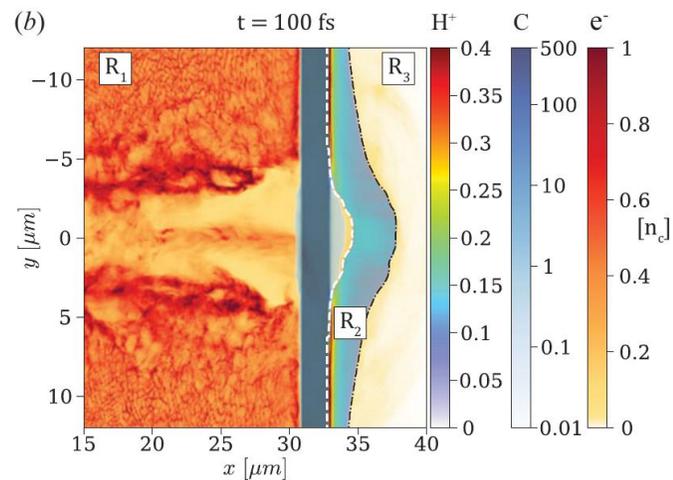
Ajout de processus physiques dans les codes PIC : intérêt pour la simulation d'accélérateurs



X. Davoine

CEA, DAM, DIF, 91297 Arpajon, France

Université Paris-Saclay, CEA, LMCE, 91680 Bruyères-le-Châtel, France

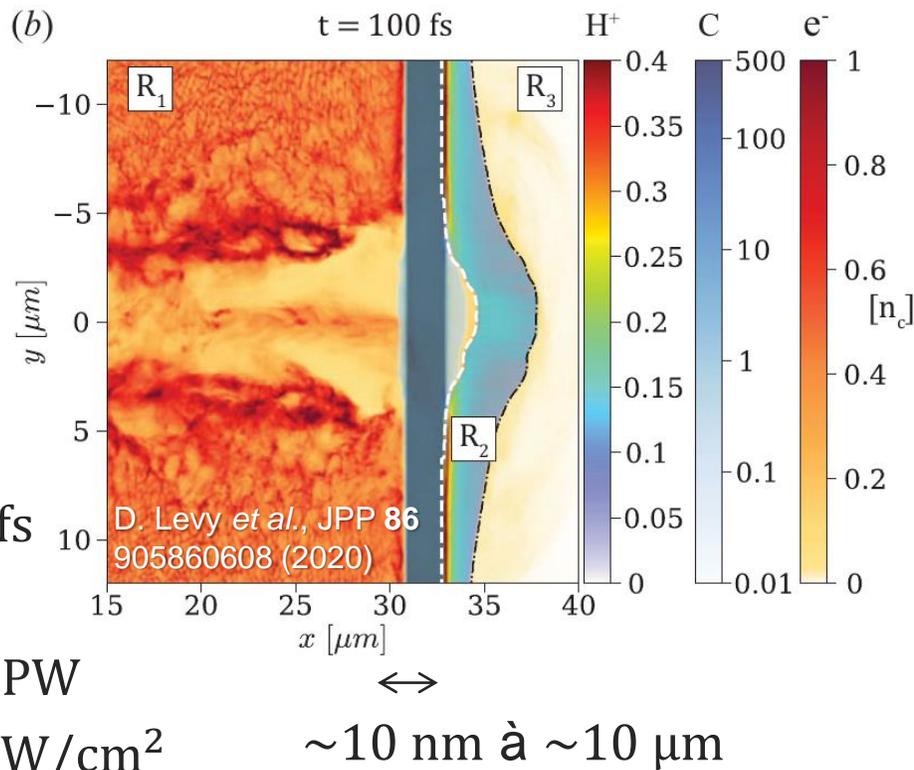


We acknowledge the "Grand Equipement de Calcul Intensif" GENCI-TGCC for granting us access to the supercomputer IRENE under the project No. A0150512993

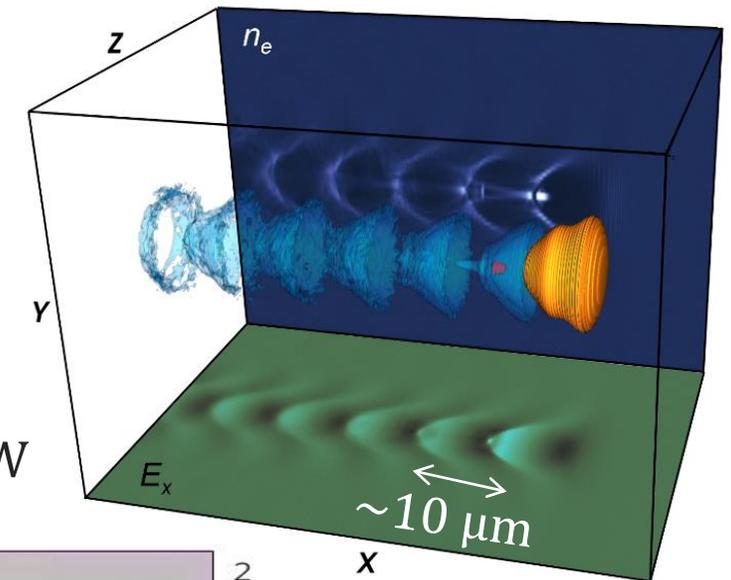
Accélérateurs plasma

- Accélération d'ions sur cible solide :
 - TNSA (*Target Normal Sheath Acceleration*)
 - protons : ~ 150 MeV (actuellement)

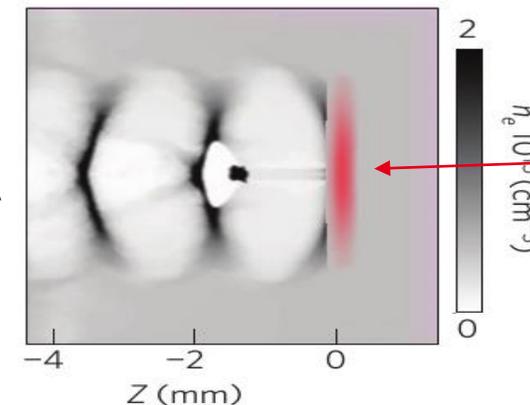
- Accélération d'électrons sur cible gazeuse :
 - LWFA (*Laser WakeField Acceleration*)
 - ~ 10 GeV en qq cm (actuellement)



Laser:
 durée: ~ 30 fs
 tache ~ 10 μm
 $\sim 10^{19}$ W/cm²
 10 TW à > 10 PW



- PWFA



Faisceau d'électrons ou protons

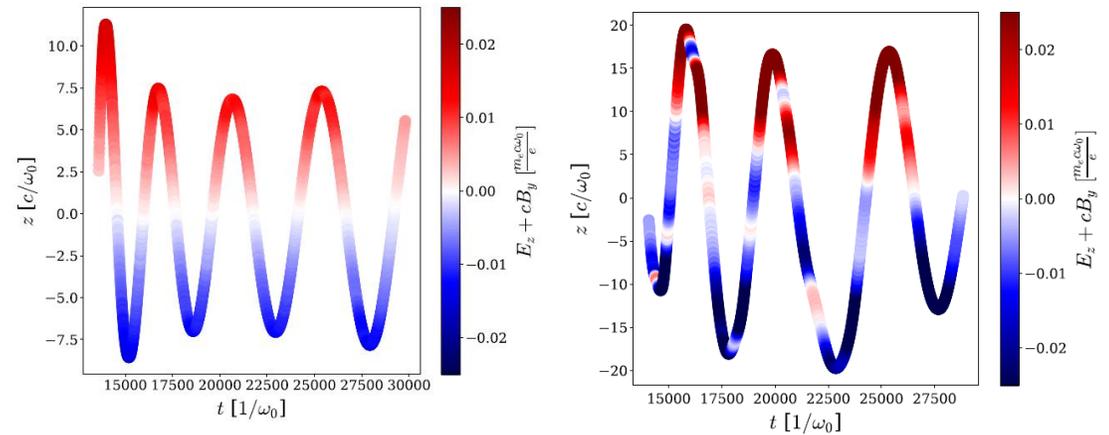
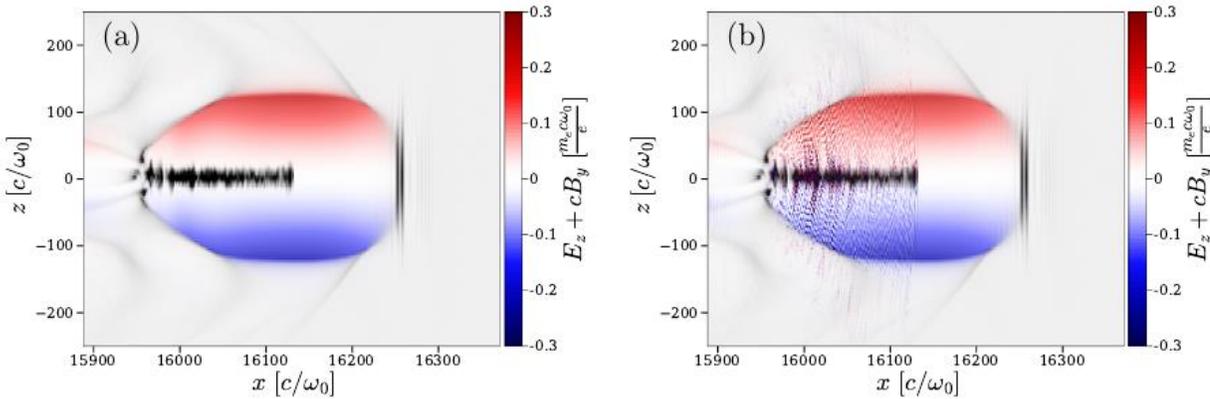
Plan

- 1. Modules de physique additionnels dans CALDER**
- 2. Applications aux plasmas gazeux ou solides**
- 3. Utilisation des faisceaux : interaction faisceau-plasma**
Instabilités faisceau-plasma, source γ , QED en champ fort, XFEL...



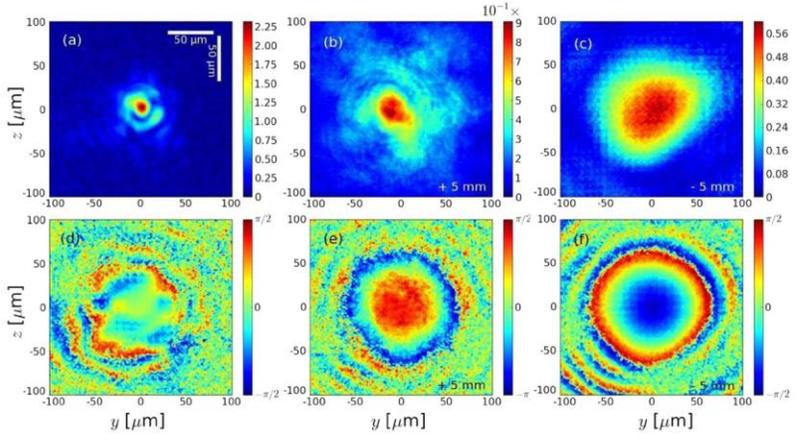
Simulations plus réalistes : modules de physique, schémas numériques, initialisation

- Dans la suite : présentation uniquement de modules de physique, mais pas de :
 - Schémas numériques (e.g. Cerenkov numérique)

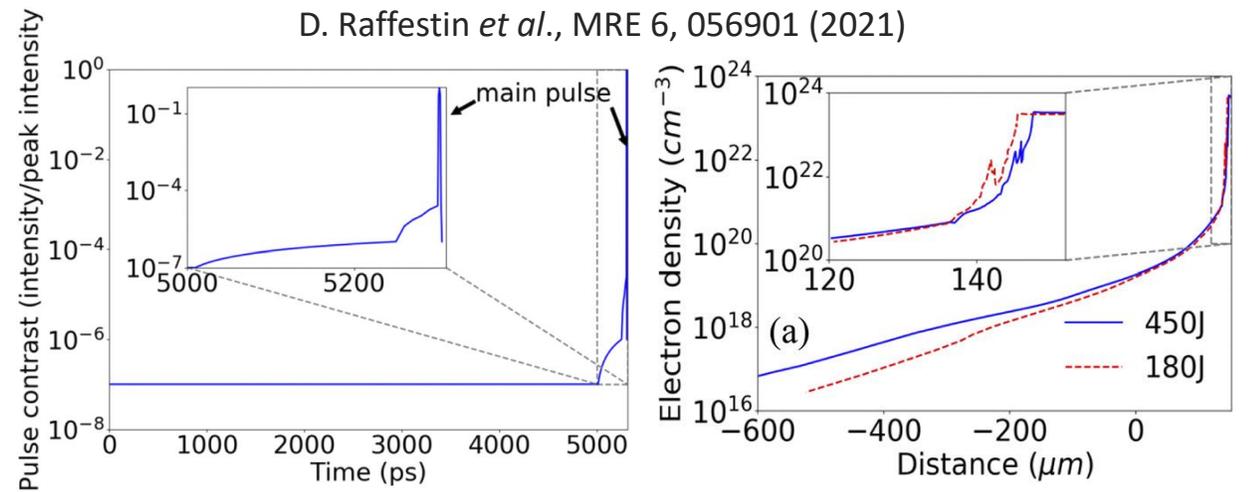


P.-L. Bourgeois *et al.*, JCP **413** 109426 (2020)
 P.-L. Bourgeois *et al.*, JPP **89** 905890206 (2023)

■ Méthodes d'initialisation du laser et du plasma



J. Ferri *et al.*, Scientific Reports **6**, 27846 (2016)



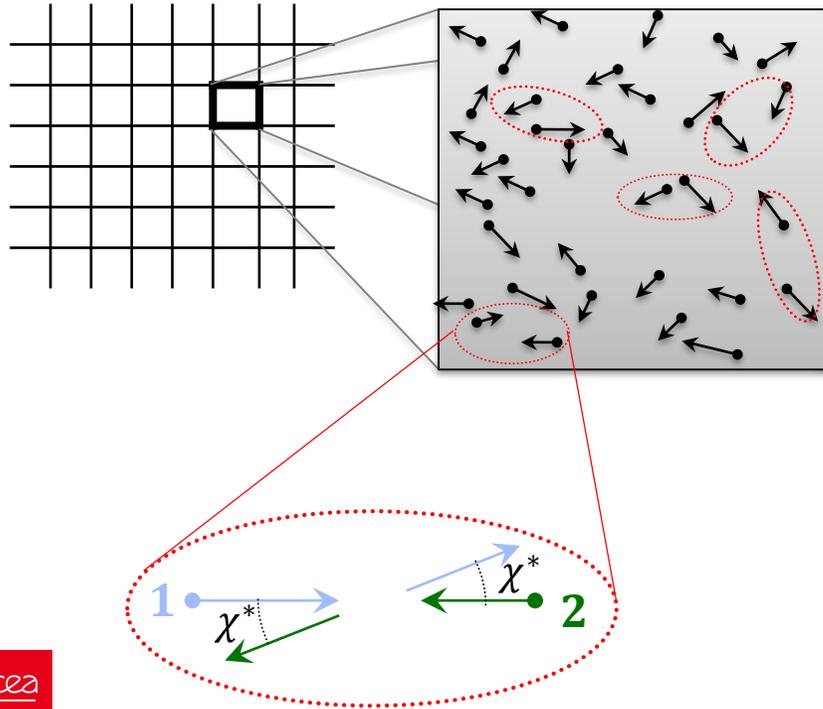
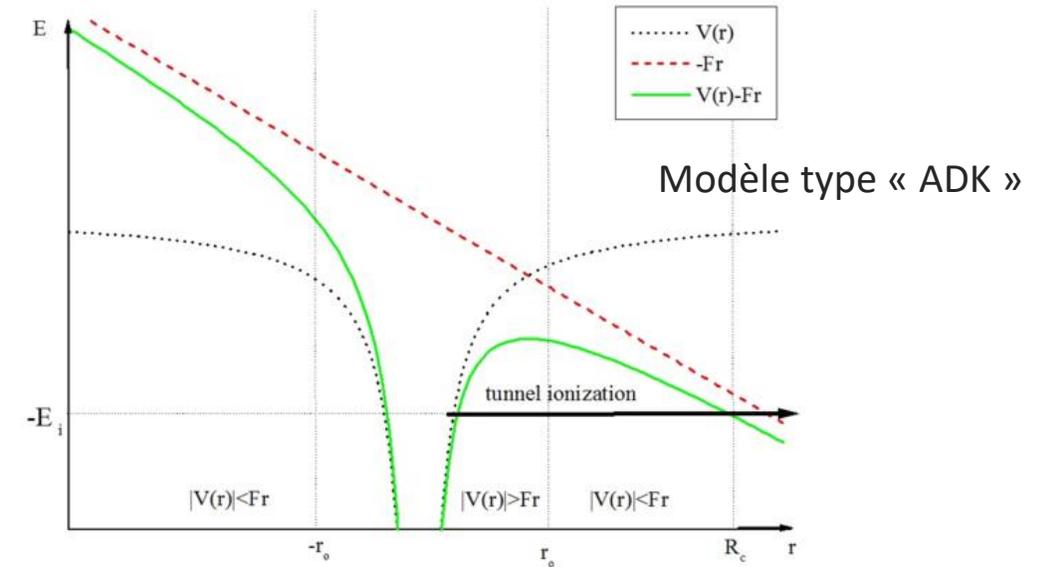
D. Raffestin *et al.*, MRE **6**, 056901 (2021)



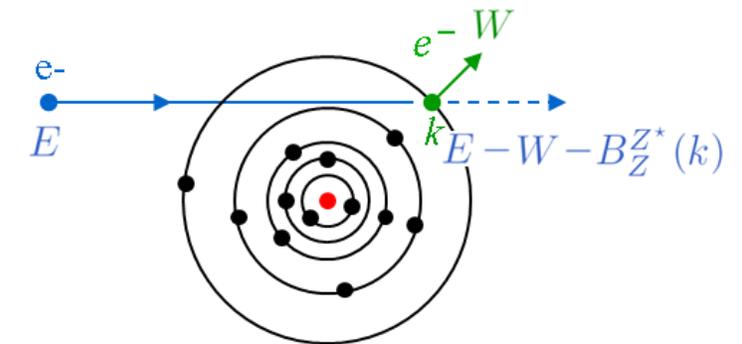
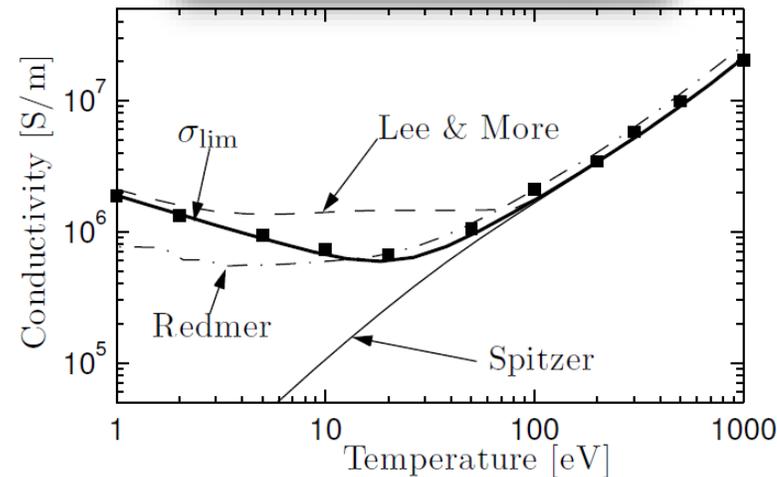
CALDER : modules de physique supplémentaires



- Ionisation par champ¹ (champ E de grande amplitude)
 - Collisions élastiques (faibles angles de déflexion)²
 - Ionisation par impact (collisions)²
- [1] R. Nuter et al., POP (2011) [2] F. Pérez et al., POP (2012)



Thermal dependence of electrical conductivity



CALDER : modules de physique supplémentaires

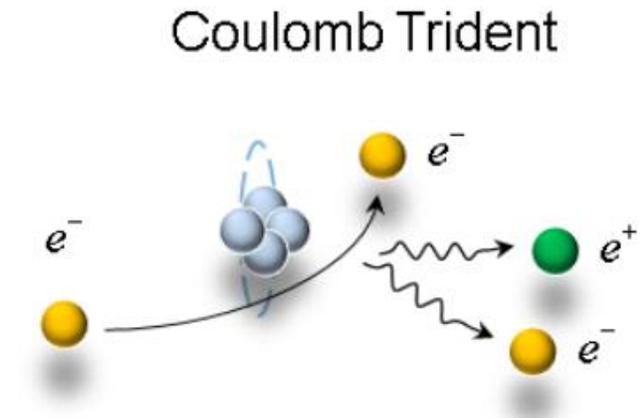
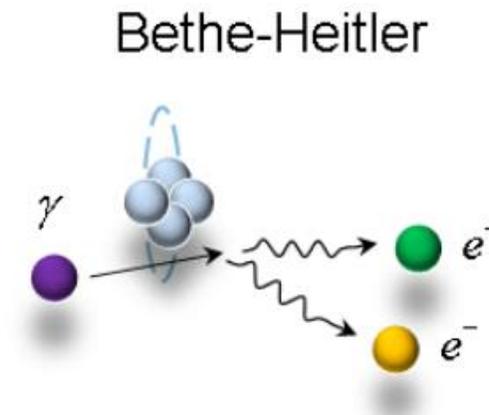
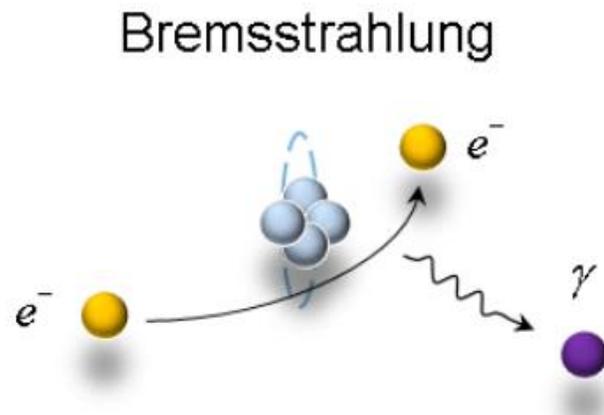


- Ionisation par champ¹ (champ E de grande amplitude)
- Collisions élastiques (faibles angles de déflexion)²
- Ionisation par impact (collisions)²

[1] R. Nuter et al., POP (2011) [2] F. Pérez et al., POP (2012)

B. Martinez, thèse, Univ. De Bordeaux (2018)

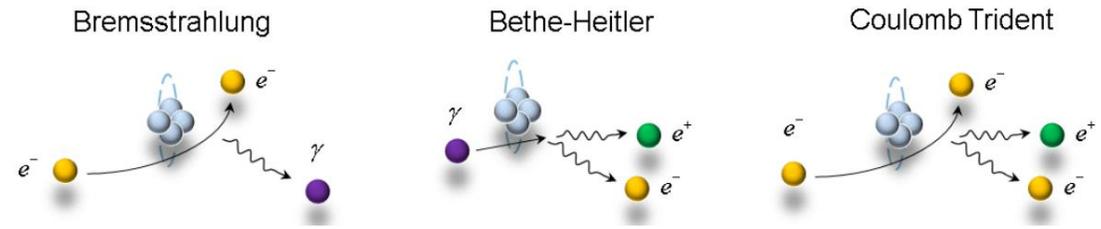
B. Martinez, POP (2019)



CALDER : modules de physique supplémentaires



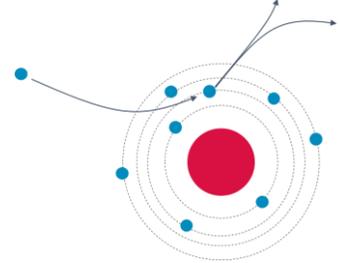
- Ionisation par champ¹ (champ E de grande amplitude)
 - Collisions élastiques (faibles angles de déflexion)²
 - Ionisation par impact (collisions)²
- [1] R. Nuter et al., POP (2011) [2] F. Pérez et al., POP (2012)



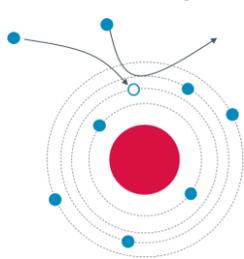
B. Martinez, thèse, Univ. De Bordeaux (2018)
B. Martinez, POP (2019)

- IPD (*Ionization potential depressions*) D. Tordeux, thèse, Univ. Paris-Saclay (2022)

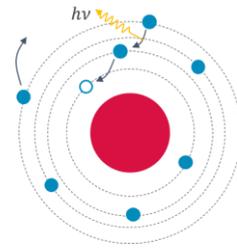
Ionisation collisionnelle résolue sur les couches



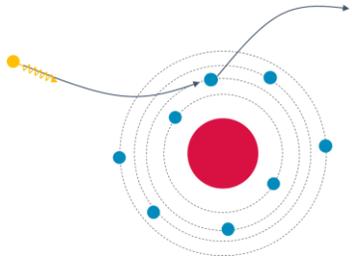
Recombinaison à 3 corps



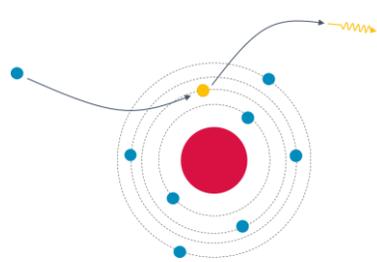
Désexcitation atomique (émission de raies + électrons Auger)



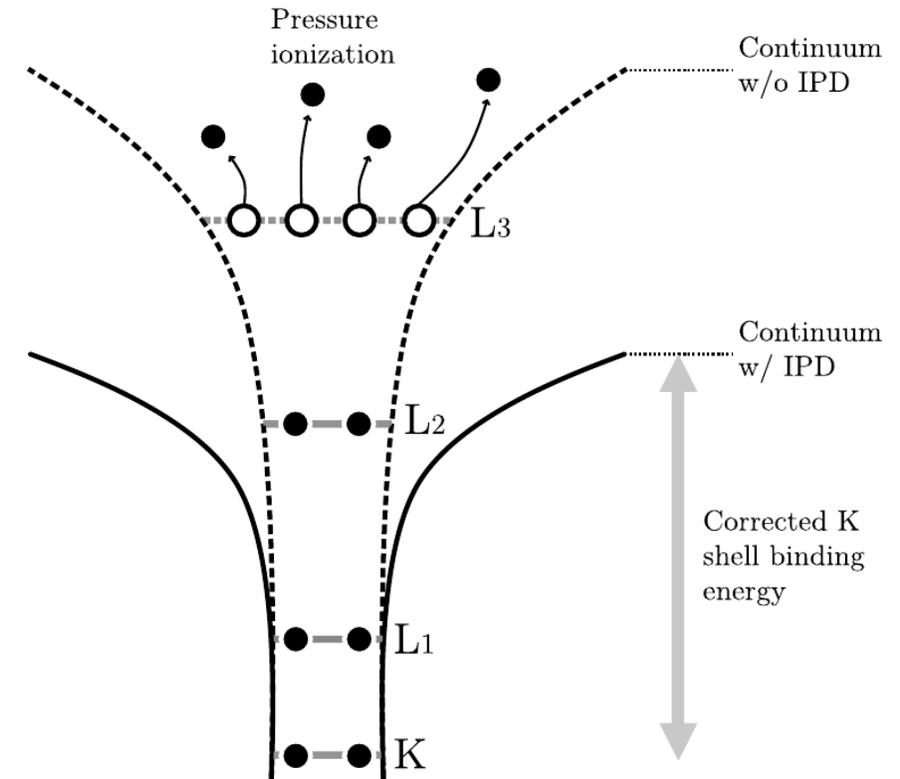
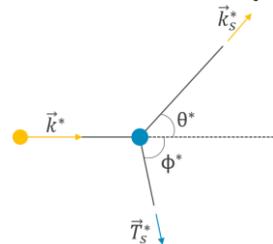
Photoionisation (par des X)



Recombinaison radiative



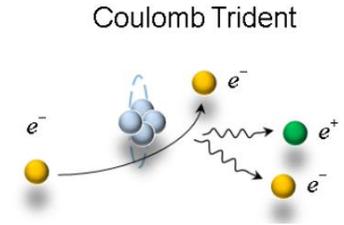
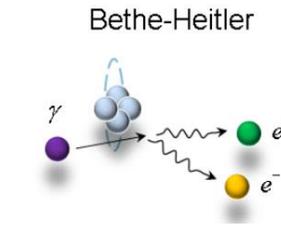
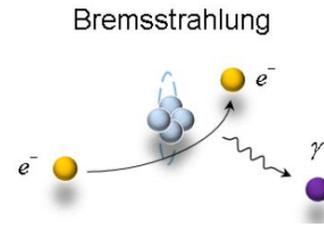
Diffusion Compton



CALDER : modules de physique supplémentaires



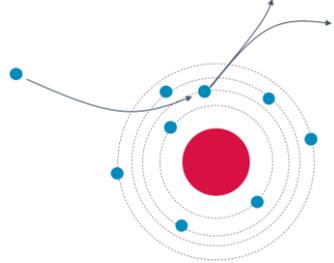
- Ionisation par champ¹ (champ E de grande amplitude)
 - Collisions élastiques (faibles angles de déflexion)²
 - Ionisation par impact (collisions)²
- [1] R. Nuter et al., POP (2011) [2] F. Pérez et al., POP (2012)



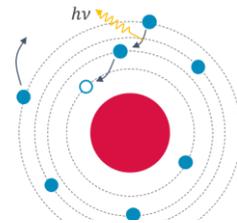
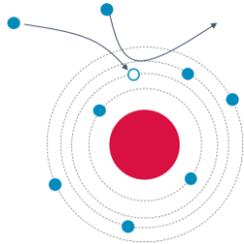
B. Martinez, thèse, Univ. De Bordeaux (2018)
B. Martinez, POP (2019)

- IPD (*Ionization potential depressions*) D. Tordeux, thèse, Univ. Paris-Saclay (2022)

Ionisation collisionnelle
résolue sur les couches



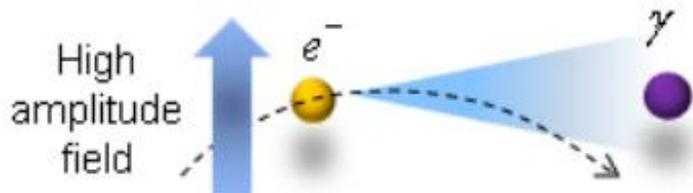
Recombinaison
à 3 corps
Désexcitation atomique
(émission de raies +
électrons Auger)



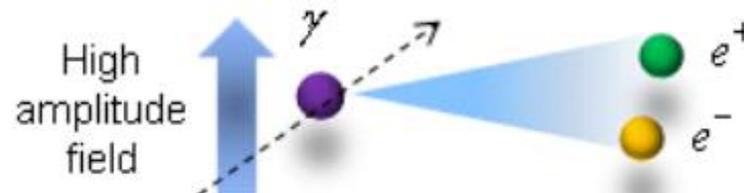
M. Lobet, J. Phys.: Conf. Ser. (2016)
M. Lobet, thèse, Univ. De Bordeaux (2015)

- Ajout récent de la librairie SFQEDtoolkit

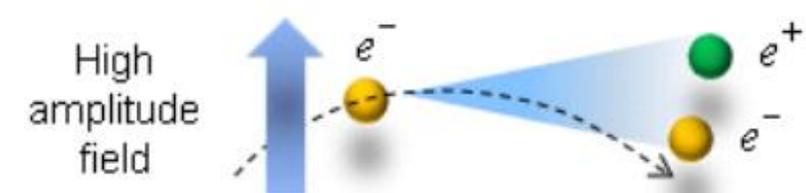
Nonlinear inverse
Compton



Nonlinear
Breit-Wheeler



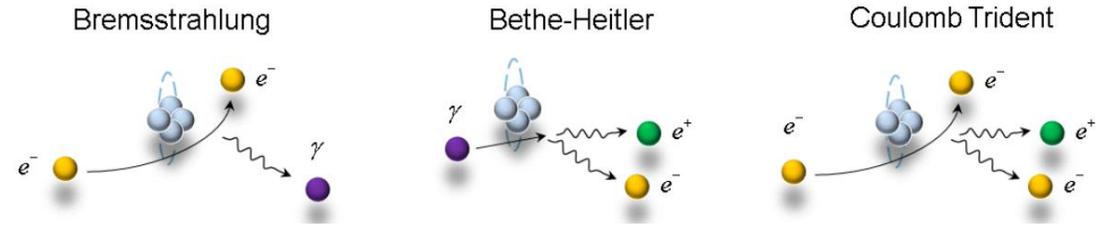
Electromagnetic Trident



CALDER : modules de physique supplémentaires



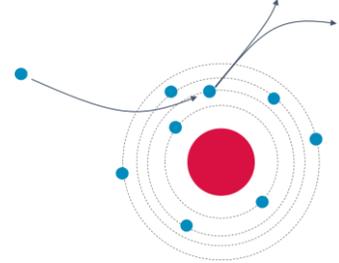
- Ionisation par champ¹ (champ E de grande amplitude)
 - Collisions élastiques (faibles angles de déflexion)²
 - Ionisation par impact (collisions)²
- [1] R. Nuter et al., POP (2011) [2] F. Pérez et al., POP (2012)



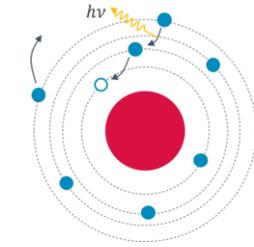
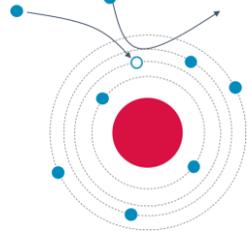
B. Martinez, thèse, Univ. De Bordeaux (2018)
B. Martinez, POP (2019)

- IPD (*Ionization potential depressions*) D. Tordeux, thèse, Univ. Paris-Saclay (2022)

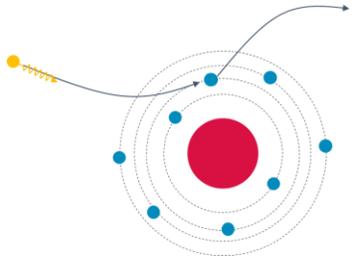
Ionisation collisionnelle
résolue sur les couches



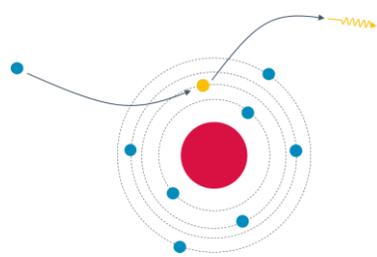
Recombinaison à 3 corps
Désexcitation atomique
(émission de raies +
électrons Auger)



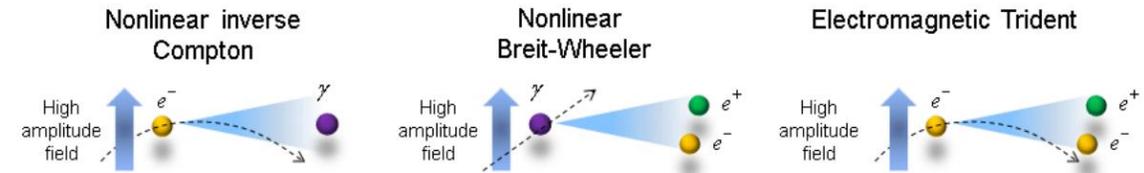
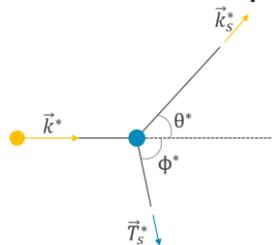
Photoionisation
(par des X)



Recombinaison
radiative



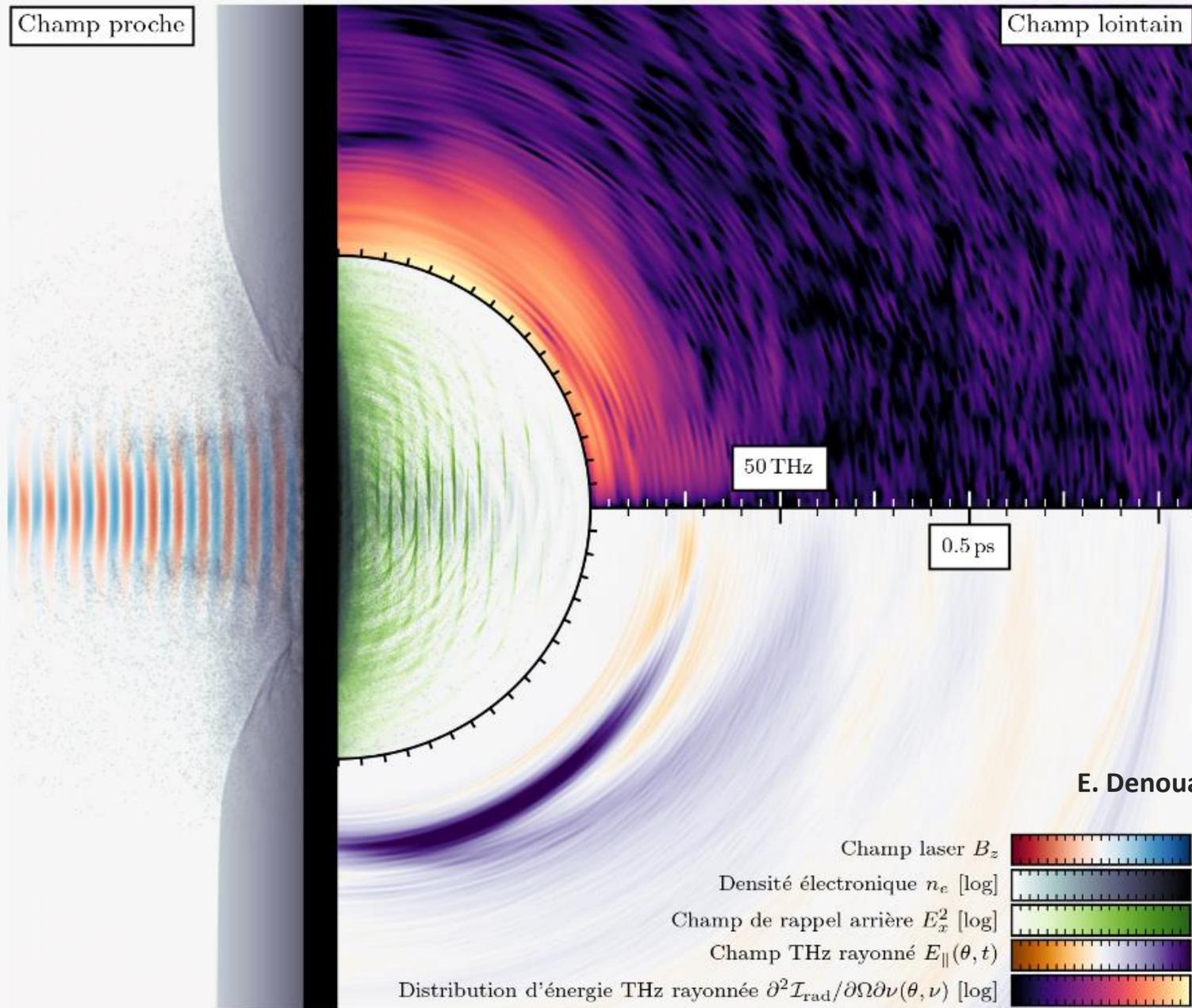
Diffusion Compton



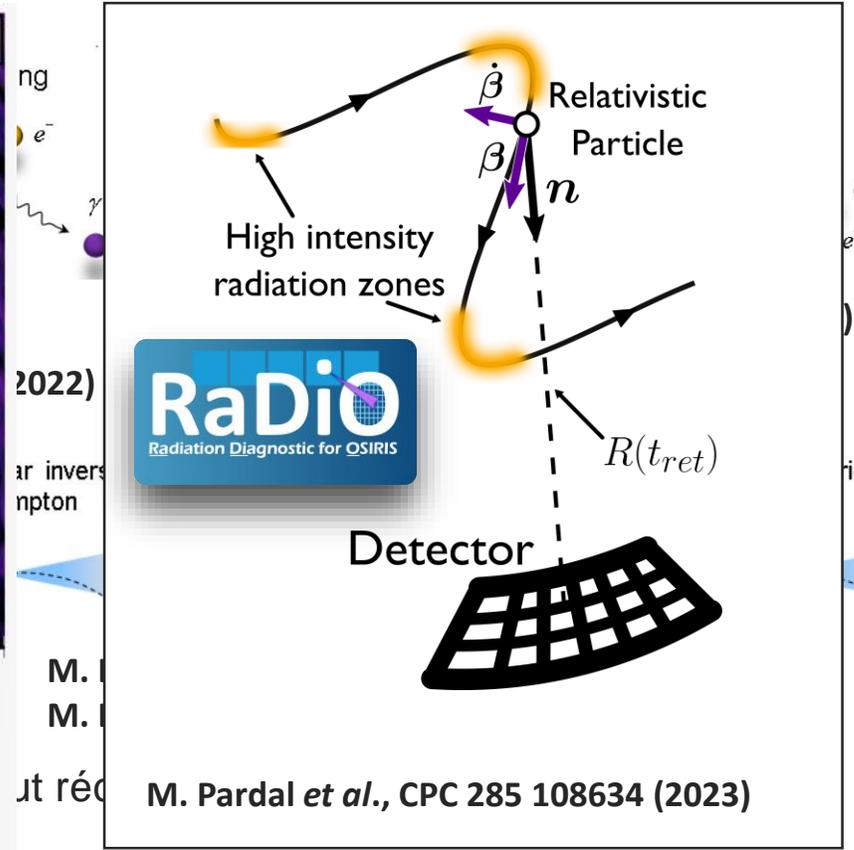
M. Lobet, J. Phys.: Conf. Ser. (2016)
M. Lobet, thèse, Univ. De Bordeaux (2015)

- Ajout récent de la librairie SFQEDtoolkit

CALDER : modules de physique supplémentaires



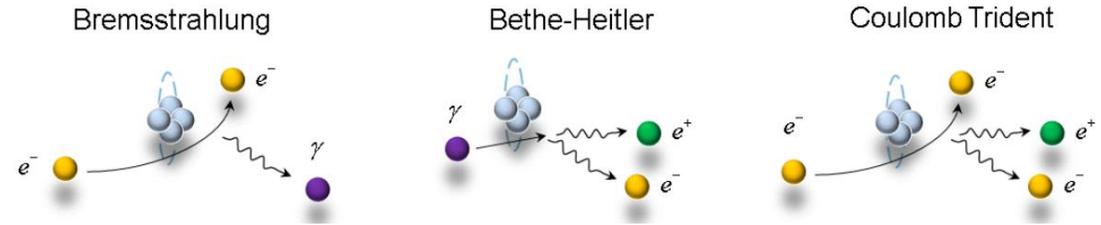
E. Denoual, thèse, Univ. Paris-Saclay (2024)



CALDER : modules de physique supplémentaires



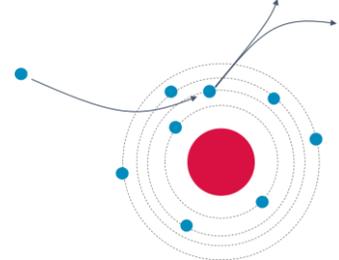
- Ionisation par champ¹ (champ E de grande amplitude)
 - Collisions élastiques (faibles angles de déflexion)²
 - Ionisation par impact (collisions)²
- [1] R. Nuter et al., POP (2011) [2] F. Pérez et al., POP (2012)



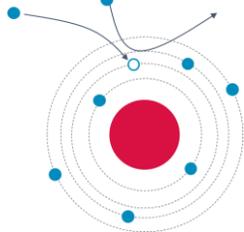
B. Martinez, thèse, Univ. De Bordeaux (2018)
B. Martinez, POP (2019)

- IPD (*Ionization potential depressions*) D. Tordeux, thèse, Univ. Paris-Saclay (2022)

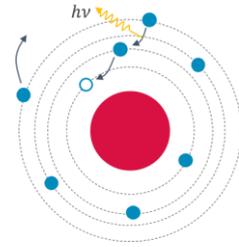
Ionisation collisionnelle résolue sur les couches



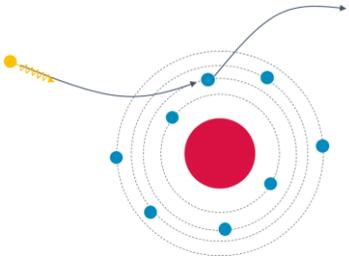
Recombinaison à 3 corps (émission de raies + électrons Auger)



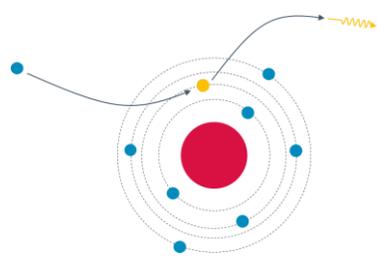
Désexcitation atomique (émission de raies + électrons Auger)



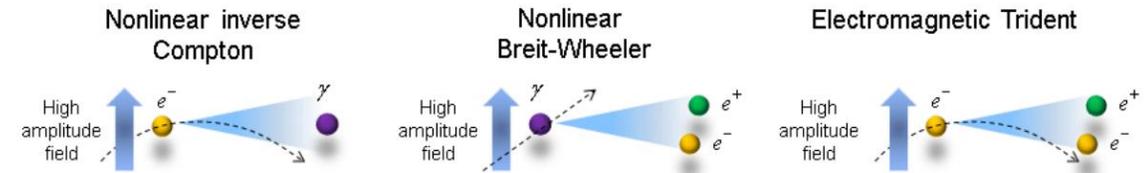
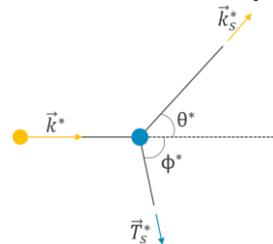
Photoionisation (par des X)



Recombinaison radiative



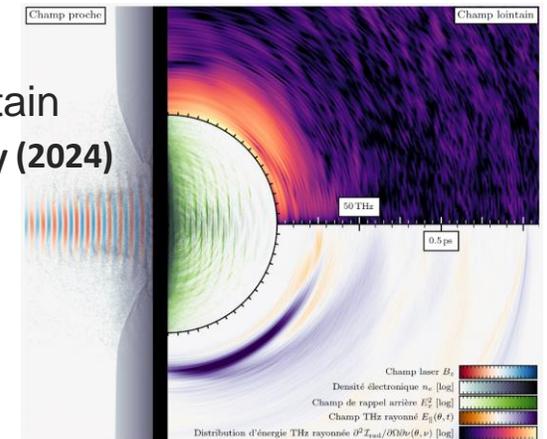
Diffusion Compton



M. Lobet, J. Phys.: Conf. Ser. (2016)
M. Lobet, thèse, Univ. De Bordeaux (2015)

- Ajout récent de la librairie SFQEDtoolkit

- Emission en champ lointain
E. Denoual, thèse, Univ. Paris-Saclay (2024)

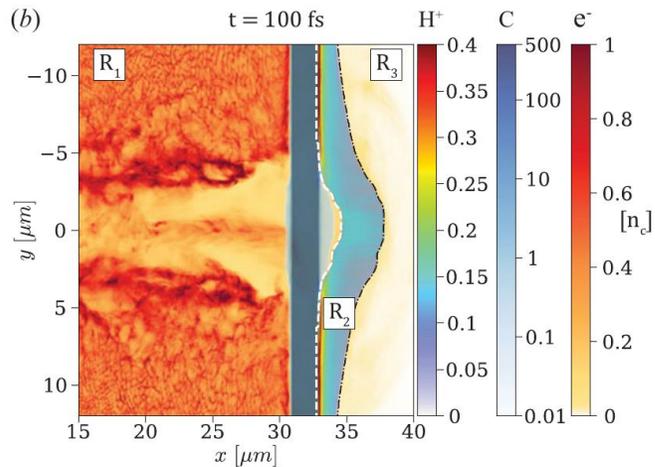


Plan

1. Modules de physique additionnels dans CALDER
2. Applications aux plasmas gazeux ou solides
3. Utilisation des faisceaux : interaction faisceau-plasma
Instabilités faisceau-plasma, source γ , QED en champ fort, XFEL...

Utilisation des modules additionnels pour l'accélération plasma

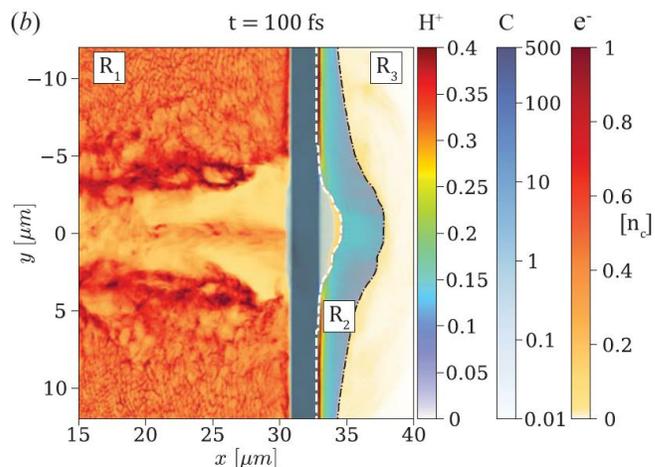
■ Interaction laser-solide (protons, ions)



- Ionisation (par champ et collisionnel)
- Collisions élastiques
- Diagnostics de l'interaction / perturbation :
 - Environnement radiatif X et γ
 - CTR, OTR, ...

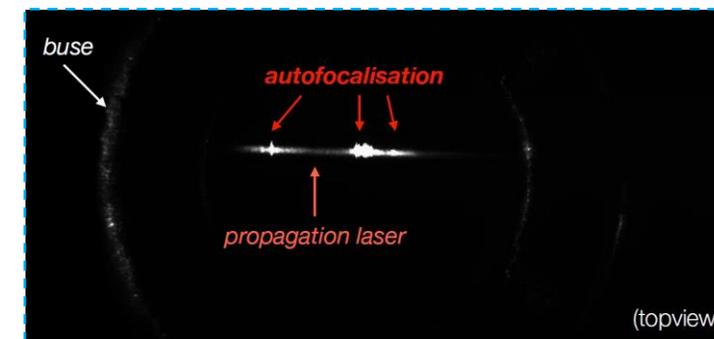
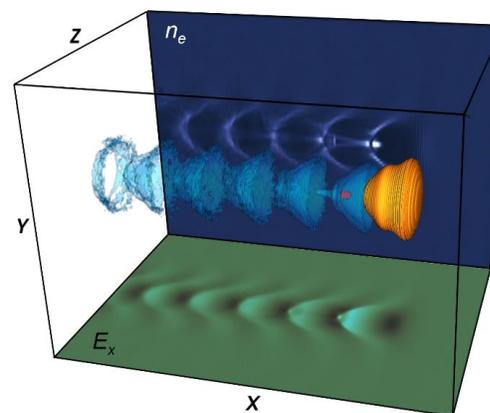
Utilisation des modules additionnels pour l'accélération plasma

■ Interaction laser-solide (protons, ions)

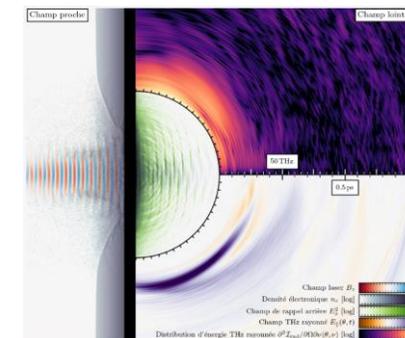


- Ionisation (par champ et collisionnel)
- Collisions élastiques
- Diagnostics de l'interaction / perturbation :
 - Environnement radiatif X et γ
 - CTR, OTR, ...

■ Interaction laser-gaz (LWFA, PWFA, protons dans des cibles gazeuses)



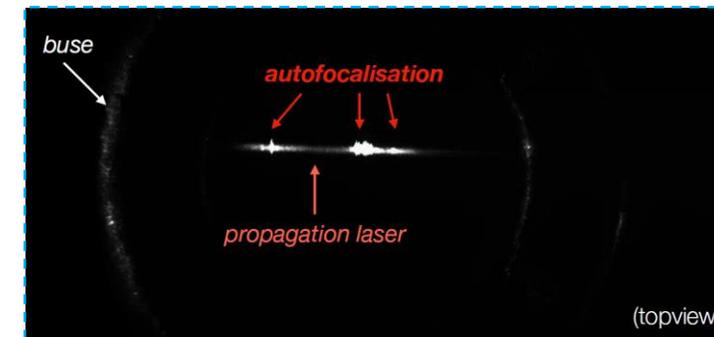
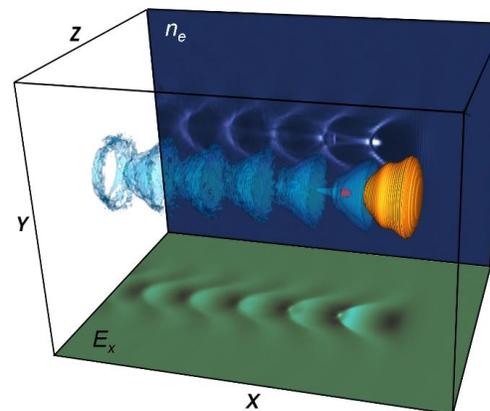
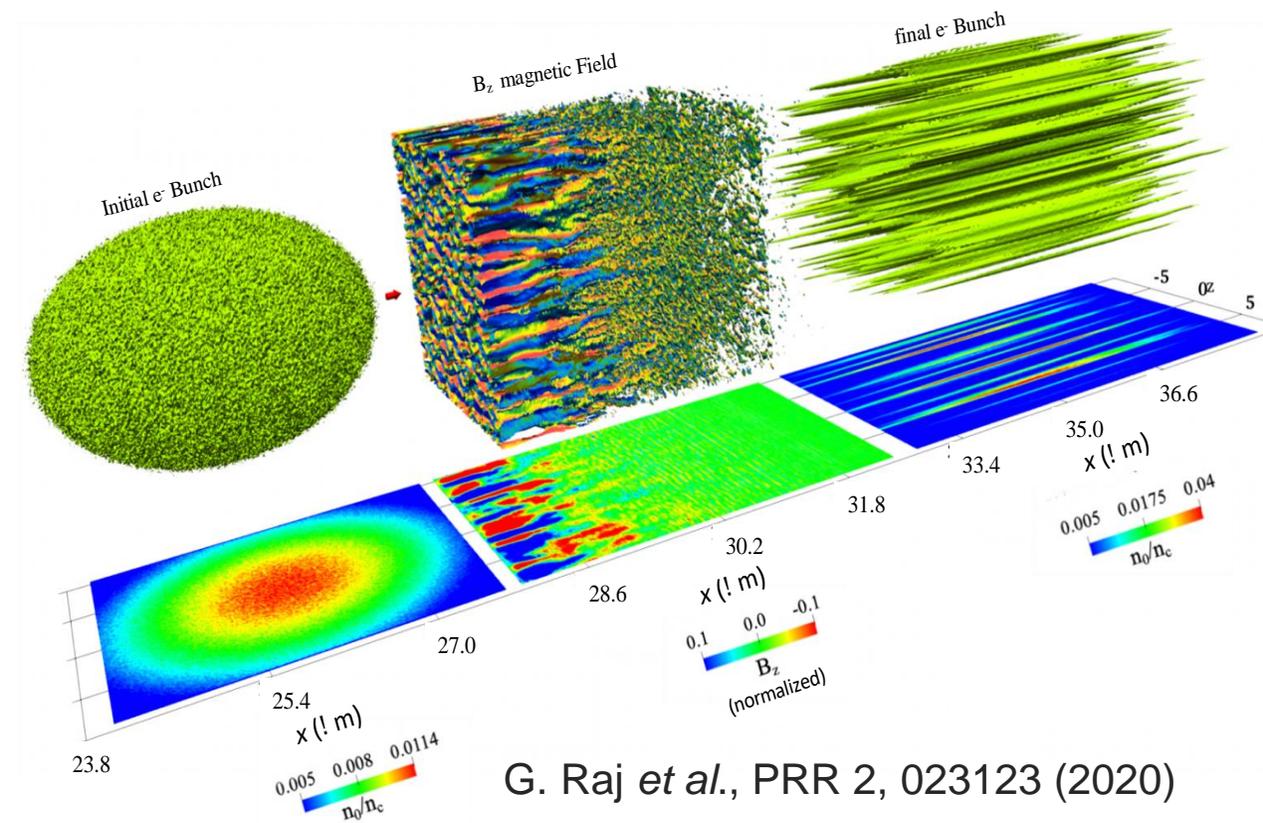
- Ionisation par champ (injection par ionisation)
- Source de positrons
- Diagnostics:
 - CTR, OTR, Top view ?



Utilisation des modules additionnels pour l'accélération plasma

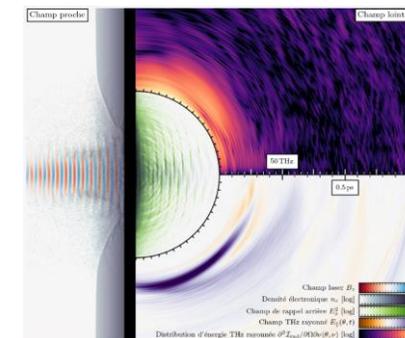
- Coulage LWFA/PWFA : cible solide ?

- Interaction laser-gaz (LWFA, PWFA, protons dans des cibles gazeuses)



- Sensible à l'ionisation et aux collisions

- Ionisation par champ (injection par ionisation)
- Source de positrons
- Diagnostics:
 - CTR, OTR, Top view ?

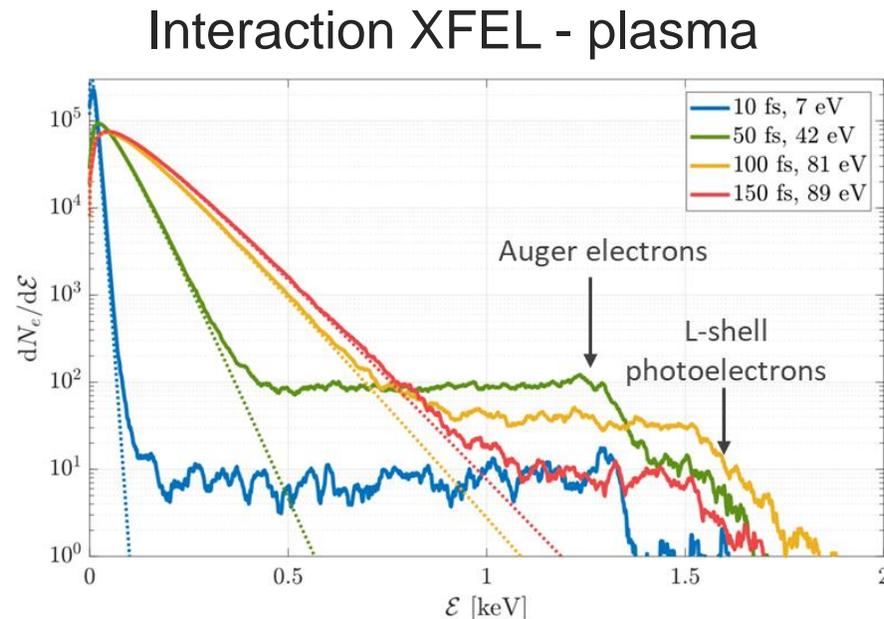


+ Interaction faisceau – cible structurée :
 R. Ariniello *et al.*, arXiv:2203.07459v1 (2022)

Plan

1. Modules de physique additionnels dans CALDER
2. Applications aux plasmas gazeux ou solides
3. **Utilisation des faisceaux : interaction faisceau-plasma**

Instabilités faisceau-plasma, source γ , QED en champ fort...

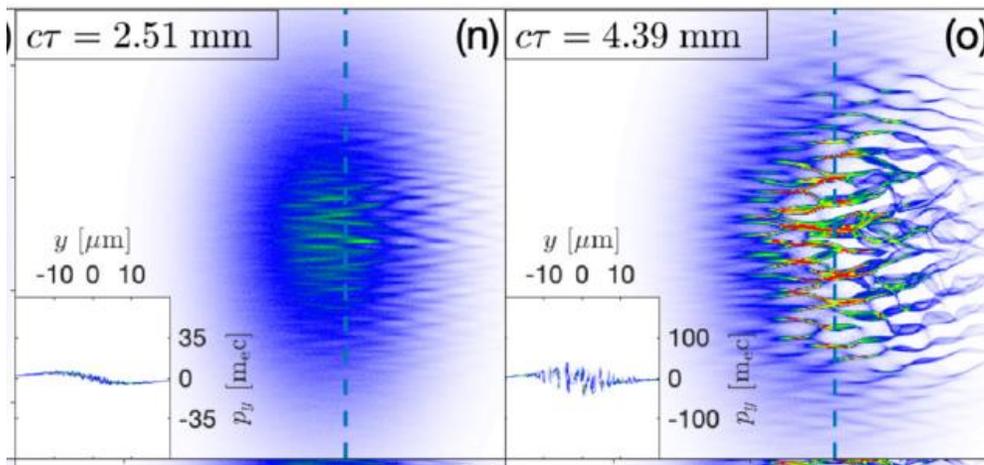


D. Tordeux, PhD, Université Paris-Saclay (2022)
R. Royle *et al.*, Phys. Rev. E **95**, 063203 (2017).



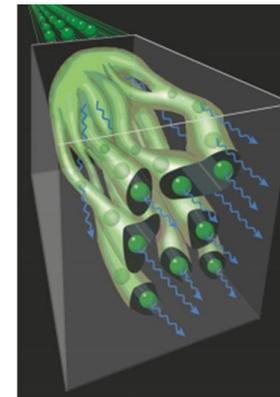
Etude d'instabilités faisceau-plasma à l'aide d'accélérateurs conventionnels

- Expérience E305 au SLAC (PI: S. Corde, LOA):
 - Propagation du faisceau du SLAC (10 GeV, 2 nC, $\sim \mu\text{m}$) dans un gaz ionisé ou une cible solide.
 - Étude fondamentale sur la propagation de faisceau dans un plasma
 - Etude des instabilités faisceau-plasma



P. San Miguel Claveria *et al.*, PRR 4 023085 (2022)

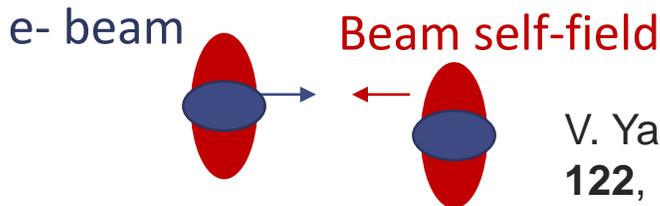
- Source γ de grande brillance : A. Benedetti *et al.*, Nat. Phot. 12 319–323 (2018)



Etude de la QED en champ fort

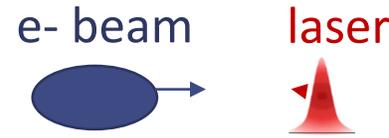
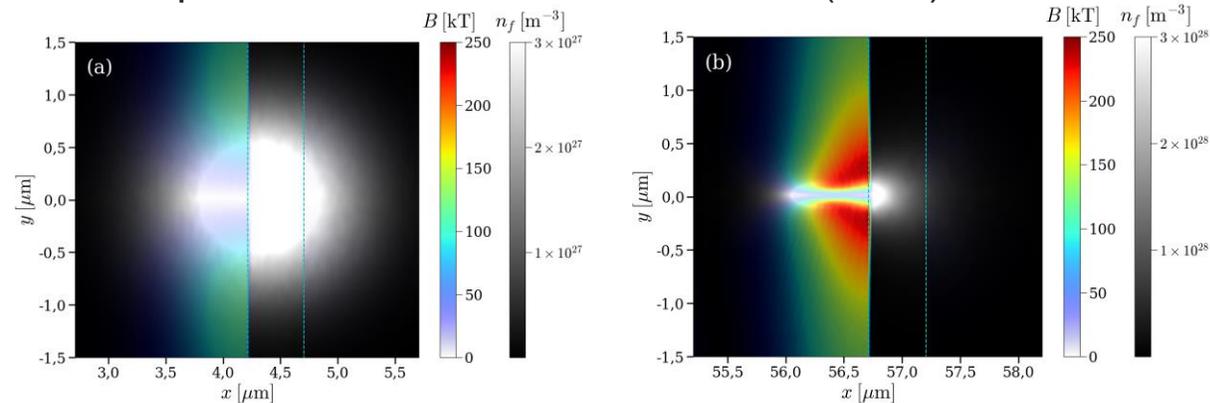
Motivation:

- Etude fondamentale de ce régime extrême
- Source γ énergétique et intense
- Source de paires e^-/e^+ .

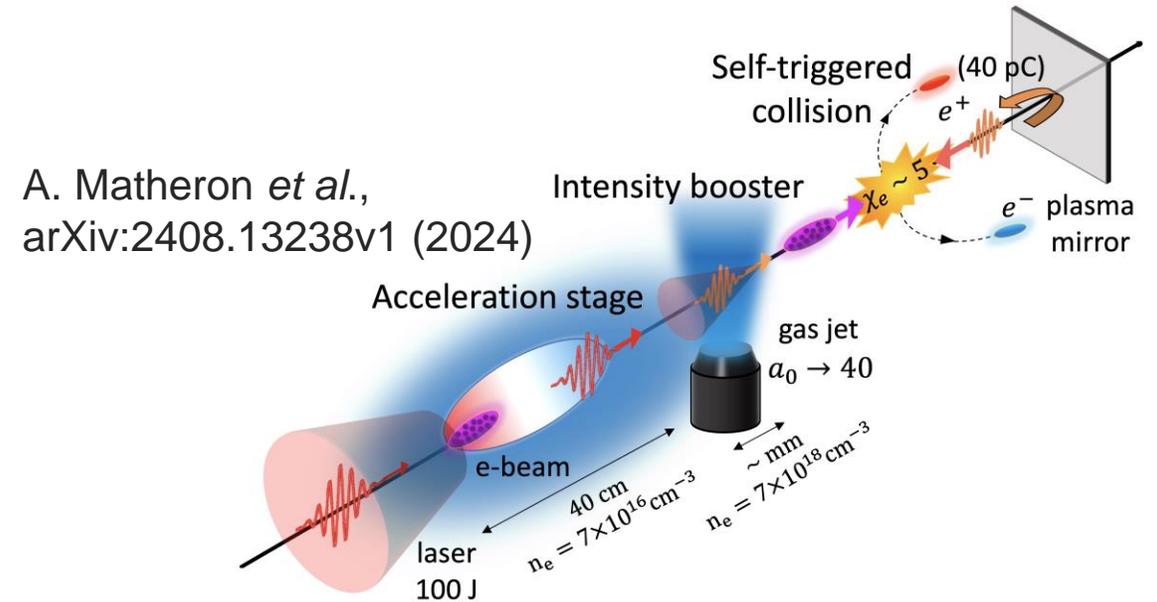


V. Yakimenko *et al.*, PRL **122**, 190404 (2019)

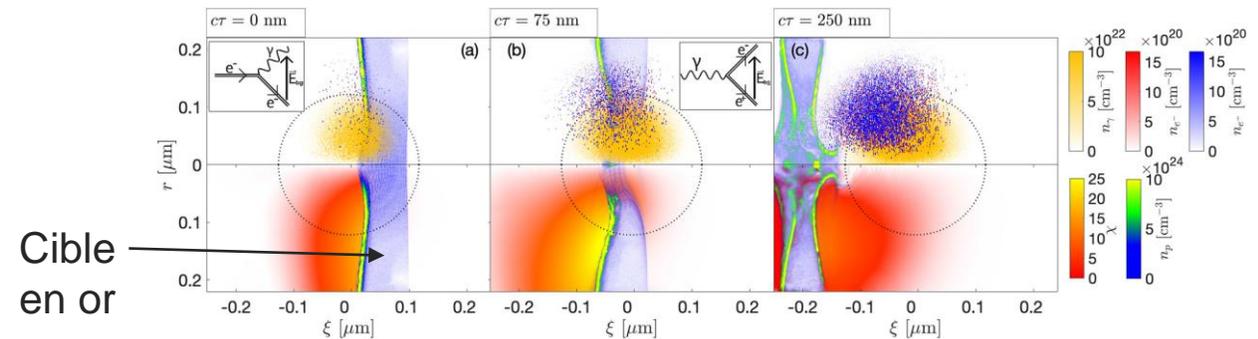
A. Sampath *et al.*, PRL **126**, 064801 (2021)



M. Lobet *et al.*, PRAB **20** 043401 (2017), ...



A. Matheron *et al.*, Communications Physics **6** 141(2023)
(Plus prospectif : 10 GeV, 2 nC, $\sigma = 55 \text{ nm}$)



Conclusions

- Utilisation de divers modules de physique pour simuler les accélérateurs plasma
- Les principaux sont :
 - L'ionisation (par champ ou collisionnel)
 - Les collisions élastiques (pour certaines cibles solides)
- Selon les cas et le besoin de réalisme, de nombreux autres modules peuvent être activés
 - SF-QED, émission en champ lointain, rayonnement X et γ , ...
- D'autres modules possibles... (ajout du spin, ...)