

University of Bordeaux, Center of Lasers Intenses and Applications
West University of Timisoara, Faculty of Physics

DOCTORAL THESIS

Scientific coordinators:

Prof. dr. Daniel Vizman

Prof. dr. Emmanuel d'Humières

PhD student:

Iuliana-Mariana VLADISAVLEVICI

2022

THÈSE EN COTUTELLE PRÉSENTÉE

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

**DE L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX ET DE
L'UNIVERSITÉ D'OUEST DE TIMISOARA**

École doctorale: UBX - Sciences Physiques et de l'Ingénieur et UVT - Physique

Spécialité: UBX - Astrophysique, Plasmas, Nucléaire et UVT - Physique

Par Iuliana-Mariana VLADISAVLEVICI

**Theoretical investigation of the interaction of ultra-high
intensity laser pulses with near critical density plasmas
towards the optimization of secondary sources**

Direction: Prof. dr. Emmanuel D'HUMIÈRES et Prof. dr. Daniel VIZMAN

Soutenue le 16 décembre 2022

Membres du jury:

Mme. Dana PERCEC	Professeure	UVT (Romania)	Présidente (UVT)
M. João Jorge SANTOS	Professeur	UBX (France)	Président (UBX)
Mme. Michèle RAYNAUD-BRUN	Directrice de recherche	CNRS - LSI (France)	Rapporteur
M. Daniel URSESCU	Directeur de recherche	ELI-NP (Romania)	Rapporteur
M. Calin UR	Directeur de recherche	ELI-NP (Romania)	Examineur
M. Paolo TOMASSINI	Directeur de recherche	ELI-NP (Romania)	Examineur
M. Emmanuel d'HUMIÈRES	Professeur	UBX (France)	Direction de thèse
M. Daniel VIZMAN	Professor	UVT (Romania)	Direction de thèse
M. Gheorghe ADAM	Directeur de Recherche	IFIN-HH (Romania)	Invité
M. Xavier RIBEYRE	Ingénieur Chercheur	UBX (France)	Invité

EN

Title: Theoretical investigation of the interaction of ultra-high intensity laser pulses with near critical density plasmas towards the optimization of secondary sources

Summary: The main goal of this thesis is to develop a theoretical model for the transfer of energy from the laser pulse to plasma constituents in the ultra-high intensity laser pulse regime and for near critical density targets with focus on the optimization of the secondary sources. As a first application of our model, we studied the proton acceleration for a laser of intensity $10^{22}W/cm^2$ which will be soon available on experiments at laser facilities like Apollon and ELI. Laser driven proton acceleration is important for various applications like hadron therapy, radioisotope production, and ion fast ignition for inertial confinement fusion. As a second application of our model, we investigated the emission of high energy radiation in laser-plasma interaction for a laser intensity up to $5 \cdot 10^{23}W/cm^2$, towards the creation of electron-positron pairs through the linear Breit-Wheeler process, which is an extremely important phenomena occurring in astrophysical scales.

Keywords: ultra-high intensity regime, near-critical density targets, laser energy absorption, electron and proton acceleration, high energy photons, electron-positron pair creation

FR

Titre : Étude théorique de l'interaction des impulsions laser à ultra-haute intensité avec des plasmas à densité presque critique vers l'optimisation des sources secondaires

Résumé : L'objectif principal de cette thèse est de développer un modèle théorique pour le transfert d'énergie de l'impulsion laser aux constituants du plasma dans le régime d'impulsion laser à ultra-haute intensité et pour des cibles de densité quasi critique en mettant l'accent sur l'optimisation des sources secondaires. Comme première application de notre modèle, nous avons étudié l'accélération de proton pour un laser d'intensité $10^{22}W/cm^2$ qui sera disponible dans des installations laser Apollon et ELI. L'accélération des ions par laser est importante pour les applications comme : la protonthérapie, la production de radio-isotopes, et l'allumage rapide des ions pour la fusion par confinement inertiel. Comme deuxième application de notre modèle,

nous avons étudié l'émission de rayonnement de haute énergie dans l'interaction laser-plasma pour une intensité laser jusqu'à $5 \cdot 10^{23} \text{W/cm}^2$, utilisable pour étudier la création de paires électron-positon par le processus linéaire de Breit-Wheeler, qui est un phénomène extrêmement important se produisant à des échelles astrophysiques.

Mots clés : régime ultra-haute intensité, cibles de densité quasi-critiques, absorption d'énergie laser, accélération des électrons et des protons, photons de haute énergie, création de paires électron-positon

RO

Titlu: Studiul teoretic al interacțiunii unui impuls laser de intensitate ultra-înaltă cu plasmă de densitate cvasi-critică spre optimizarea surselor secundare

Rezumat: Obiectivul principal al acestei teze este de a dezvolta un model teoretic pentru transferul de energie de la impulsul laser la constituenții plasmei în regimul de impulsuri laser de intensitate ultra-înaltă și pentru ținte de densitate cvasi-critică, cu accent pe optimizarea surselor secundare. Ca o primă aplicație a modelului nostru, am studiat accelerația protonilor pentru un laser de intensitate 10^{22}W/cm^2 care va fi disponibil în instalațiile laser Apollon și ELI. Accelerarea ionilor cu laser este importantă pentru aplicații precum: terapia cu protoni, producerea de radioizotopi și aprinderea rapidă a ionilor pentru fuziunea inertială. Ca o a doua aplicație a modelului nostru, am studiat emisia de radiații de înaltă energie în interacțiunea laser-plasmă pentru intensitatea laser de până la $5 \cdot 10^{23} \text{W/cm}^2$, utilizabilă pentru a studia crearea de perechi electron-positron prin procesul liniar Breit-Wheeler, care este un fenomen extrem de important ce are loc la scala astrofizică.

Cuvinte cheie: regim de intensitate ultra-înaltă, ținte cu densitate cvasi-critică, absorbție de energie laser, accelerare a electronilor și protonilor, fotoni de înaltă energie, crearea de perechi electron-positron

Table of Contents

EN

- Introduction 15
- 1. Laser-plasma interaction on ultra-high intensity regime 23
 - 1.1 Introductory Notions
 - 1.1.1 Electromagnetic field & Maxwell equations
 - 1.1.2 Plasma kinetic description - Vlasov equation
 - 1.1.3 Electron motion in an electromagnetic field
 - 1.2 Laser energy absorption in plasma
 - 1.2.1 Electron plasma frequency & critical density
 - 1.2.2 Laser energy absorption mechanisms
 - 1.3 Ion acceleration mechanisms
 - 1.3.1 Target Normal Sheath Acceleration
 - 1.3.2 Radiation Pressure Acceleration
 - 1.3.3 Optimization of laser-driven ion acceleration
 - 1.3.4 Applications of laser-driven ion acceleration
 - 1.4 High energy radiation
 - 1.4.1 Emission of high energy radiation by a moving particle
 - 1.4.2 Radiation Reaction
 - 1.4.3 Thomson scattering
 - 1.4.4 Inverse Compton scattering
 - 1.5 Electron-positron pair creation
 - 1.5.1 Linear Breit-Wheeler pair production

1.5.2 Nonlinear Breit-Wheeler pair production	
1.5.3 Bethe Heitler pair production	
• 2 Particle-in-cell simulations	46
2.1 PIC method	
2.1.1 SMILEI	
2.2 Numerical integration of particles and fields	
2.2.1 Macroparticles	
2.2.2 Characteristic equations of motion	
2.2.3 Integration of fields	
2.2.4 Numerical Cherenkov	
2.3 Boundary conditions	
2.4 Normalized units	
2.5 Diagnostics	
2.6 Additional physical modules in PIC codes using the Monte Carlo method	
2.6.1 Field ionization	
2.6.2 Collisions	
2.6.3 Nuclear Reaction	
2.6.4 Radiation Reaction	
2.6.5 Nonlinear Breit-Wheeler pair creation	
2.7 Convergences studies	
2.7.1 The influence of the cell length	
2.7.2 The influence of the number of particles per cell	
2.8 Energy scope project: optimization of energetic profile of HPC calculation	
• 3 Theoretical model of laser-energy absorption	69
3.1 Analytical model	
3.2 2D PIC simulation setup	
3.3 Results	
3.3.1 Absorption of the laser energy	
3.3.2 Average energy of the hot electrons	
3.3.3 Optimum target thickness for maximizing laser energy absorption	
3.4 Perspectives	
3.4.1 Model applicability	

3.4.2 Model applications	
3.5 Summary of the results	
• 4 Proton acceleration for $a_0=85$	94
4.1 2D PIC simulation setup	
4.2 Electron heating and proton acceleration mechanisms	
4.2.1 Electron characteristics	
4.2.2 Proton acceleration mechanisms	
4.3 Proton acceleration results	
4.3.1 Electron influence on the proton cutoff energy	
4.3.2 Origin of the most energetic protons	
4.4 Summary of the results on proton acceleration	
• 5 High energy synchrotron radiation and electron-positron pair creation	109
5.1 Emission of high energy radiation	
5.1.1 Study case: laser - electron beam interaction	
5.1.2 Study case: laser - plasma interaction	
5.2 Electron-positron pair generation	
5.2.1 Experimental setup	
5.2.2 Pair creation for $a_0 = 85$	
5.3 High energy radiation and pair creation for higher laser intensities	
5.4 Summary of the results	
• 6 Conclusions	129
• Bibliography	143
• Acknowledgements	144
• Appendix A	147
A.1 Variation of the absorption coefficient with target density and laser pulse duration	
A.2 Variation of the absorption coefficient with target density and laser normalized field amplitude	
A.3 Variation of the saturation point of the absorption coefficient with target density and laser parameters	

A.4 Variation of the average energy of hot electrons with target density and laser parameters	
A.5 Variation of the optimum target thickness with target density and laser parameters	
• Appendix B	159
B.1 Typical electron trajectories from 2D PIC simulations	
B.2 Density change in laser-plasma interaction	
• Appendix C	163
C.1 Positron characteristics from 2D PIC simulations	
C.2 Electron energy angular distribution	
• Appendix D Scientific Activity	166
D.1 Articles	
D.2 International Conferences	
D.2.1 Oral Presentations	
D.2.2 Poster Presentations	
D.3 French National Conferences	
D.4 Romanian National Conferences	
D.5 Seminars	
D.6 Summer Schools	
D.7 Workshops	
D.8 International collaborations	
• Appendix E Extended French Summary	171
E.1 Introduction	
E.2 Thesis objectives	
E.3 Results	
E.4 Conclusions	

FR

• Introduction	15
• 1. Interaction laser-plasma en régime d’ultra-haute intensité	23
1.1 Notions d’introduction	
1.1.1 Champ électromagnétique & Équations de Maxwell	
1.1.2 Description de la cinétique du plasma - Équation de Vlasov	
1.1.3 Mouvement des électrons dans un champ électromagnétique	
1.2 Absorption d’énergie laser dans le plasma	
1.2.1 Fréquence du plasma d’électrons & densité critique	
1.2.2 Mécanismes d’absorption d’énergie laser	
1.3 Mécanismes d’accélération des ions	
1.3.1 Accélération normale cible de la gaine	
1.3.2 Accélération de la pression de rayonnement	
1.3.3 Optimisation de l’accélération des ions par laser	
1.3.4 Applications de l’accélération d’ions par laser	
1.4 Rayonnement à haute énergie	
1.4.1 Émission de rayonnement de haute énergie par une particule en mouvement	
1.4.2 Réaction aux radiations	
1.4.3 Diffusion Thomson	
1.4.4 Diffusion Compton inverse	
1.5 Création de paires électron-positon	
1.5.1 Production de paires Breit-Wheeler linéaires	
1.5.2 Production de paires de Breit-Wheeler non linéaires	
1.5.3 Production de paires de Bethe Heitler	
• 2 Simulations particules dans cellule	46
2.1 Méthode PIC	
2.1.1 SMILEI	
2.2 Intégration numérique des particules et des champs	
2.2.1 Macroparticules	
2.2.2 Équations caractéristiques du mouvement	
2.2.3 Intégration des champs	

2.2.4	Chérenkov numérique	
2.3	Conditions aux limites	
2.4	Unités normalisées	
2.5	Diagnostics	
2.6	Modules physiques supplémentaires dans les codes PIC utilisant la méthode de Monte Carlo	
2.6.1	Champ d'ionisation	
2.6.2	Collision	
2.6.3	Réaction nucléaire	
2.6.4	Réaction aux rayonnements	
2.6.5	Création de paires Breit-Wheeler non linéaires	
2.7	Etudes de convergences	
2.7.1	L'influence de la longueur de cellule	
2.7.2	L'influence du nombre de particules par cellule	
2.8	Projet de Energy Scope : optimisation du profil énergétique du calcul HPC	
• 3	Modèle théorique d'absorption d'énergie laser	69
3.1	Modèle analytique	
3.2	Configuration de la simulation PIC 2D	
3.3	Résultats	
3.3.1	Absorption de l'énergie laser	
3.3.2	Énergie moyenne des électrons chauds	
3.3.3	Épaisseur de cible optimale pour maximiser l'absorption d'énergie laser	
3.4	Perspectives	
3.4.1	Applicabilité du modèle	
3.4.2	Applications modèles	
3.5	Synthèse des résultats	
• 4	Accélération des protons pour $a_0=85$	94
4.1	Configuration de la simulation PIC 2D	
4.2	Mécanismes d'échauffement des électrons et d'accélération des protons	
4.2.1	Caractéristiques électroniques	
4.2.2	Mécanismes d'accélération des protons	
4.3	Résultats de l'accélération des protons	

4.3.1	Influence des électrons sur l'énergie de coupure des protons	
4.3.2	Origine des protons les plus énergétiques	
4.4	Synthèse des résultats sur l'accélération des protons	
• 5	Rayonnement synchrotron de haute énergie et création de paires électron-positon . . .	109
5.1	Émission de rayonnement à haute énergie	
5.1.1	Cas d'étude : interaction laser - faisceau d'électrons	
5.1.2	Cas d'étude : interaction laser - plasma	
5.2	Génération de paires électron-positon	
5.2.1	Montage expérimental	
5.2.2	Création de paires pour $a_0 = 85$	
5.3	Rayonnement à haute énergie et création de paires pour des intensités laser plus élevées	
5.4	Synthèse des résultats	
• 6	Conclusions	129
•	Bibliographie	143
•	Remerciements	144
•	Annexe A	147
A.1	Variation du coefficient d'absorption avec la densité cible et la durée de l'impulsion laser	
A.2	Variation du coefficient d'absorption avec la densité cible et l'amplitude de champ laser normalisée	
A.3	Variation du point de saturation du coefficient d'absorption avec la densité cible et les paramètres laser	
A.4	Variation de l'énergie moyenne des électrons chauds avec densité cible et laser paramètres	
A.5	Variation de l'épaisseur optimale de la cible avec la densité de la cible et les paramètres laser	
•	Annexe B	159
B.1	Trajectoires typiques d'électrons issues de simulations PIC 2D	
B.2	Changement de densité dans l'interaction laser-plasma	

- Annexe C 163
 - C.1 Caractéristiques des positrons issues des simulations PIC 2D
 - C.2 Distribution angulaire de l'énergie des électrons

- Annexe D Activité scientifique 166
 - D.1 Articles
 - D.2 Conférences internationales
 - D.2.1 Présentations orales
 - D.2.2 Présentations par affiches
 - D.3 Conférences nationales françaises
 - D.4 Conférences nationale roumaine
 - D.5 Séminaires
 - D.6 Écoles d'été
 - D.7 Ateliers
 - D.8 Collaborations internationales

- Annexe E Résumé détaillé 171
 - E.1 Introduction
 - E.2 Objectifs de la thèse
 - E.3 Résultats de la thèse
 - E.4 Conclusion

RO

• Introducere	15
• 1. Interacțiunea laser-plasmă în regim de intensitate ultra-înaltă	23
1.1 Noțiuni introductive	
1.1.1 Câmp electromagnetic & Ecuații Maxwell	
1.1.2 Descrierea cinetică a plasmei - ecuația Vlasov	
1.1.3 Mișcarea electronilor într-un câmp electromagnetic	
1.2 Absorbția energiei laser în plasmă	
1.2.1 Frecvența plasmei de electroni & densitatea critică	
1.2.2 Mecanisme de absorbție a energiei laser	
1.3 Mecanisme de accelerare a ionilor	
1.3.1 Accelerația normală a protonilor TNSA	
1.3.2 Accelerația protonilor în urma presiunii laserului RPA	
1.3.3 Optimizarea accelerației ionice cu laser	
1.3.4 Aplicații ale accelerației ionice cu laser	
1.4 Radiații de înaltă energie	
1.4.1 Emisia de radiații de înaltă energie de către o particulă în mișcare	
1.4.2 Efectul radiației în dinamica electronilor	
1.4.3 Împrăștierea Thomson	
1.4.4 Imprăștierea inversă Compton	
1.5 Crearea perechii electron-positron	
1.5.1 Producția de perechi liniare Breit-Wheeler	
1.5.2 Producția de perechi neliniare Breit-Wheeler	
1.5.3 Producția de perechi Bethe-Heitler	
• 2 Simulări de tip particulă în celulă	46
2.1 Metoda PIC	
2.1.1 SMILEI	
2.2 Integrarea numerică a ecuațiilor pentru particule și câmpuri	
2.2.1 Macroparticule	
2.2.2 Ecuații caracteristice ale mișcării	
2.2.3 Integrarea ecuațiilor pentru câmpuri	

2.2.4	Radiația numerică Cherenkov	
2.3	Condiții la limită	
2.4	Unități normalizate	
2.5	Diagnostice	
2.6	Module fizice suplimentare în codurile PIC folosind metoda Monte Carlo	
2.6.1	Ionizare câmp	
2.6.2	Coliziuni	
2.6.3	Reacția nucleară	
2.6.4	Reacția la radiații	
2.6.5	Crearea perechii Breit-Wheeler neliniare	
2.7	Studii de convergențe	
2.7.1	Influența lungimii celulei	
2.7.2	Influența numărului de particule în celulă	
2.8	Proiectul Energy Scope: optimizarea profilului energetic al calculului HPC	
• 3	Model teoretic de absorbție laser-energie	69
3.1	Model analitic	
3.2	Configurarea simulării PIC 2D	
3.3	Rezultate	
3.3.1	Absorbția energiei laser	
3.3.2	Energia medie a electronilor	
3.3.3	Grosimea optimă a țintei pentru maximizarea absorbției de energie laser	
3.4	Perspective	
3.4.1	Aplicabilitatea modelului	
3.4.2	Aplicații model	
3.5	Rezumatul rezultatelor	
• 4	Accelerația protonilor pentru $a_0=85$	94
4.1	Configurarea simulării PIC 2D	
4.2	Încălzirea electronilor și mecanismele de accelerare a protonilor	
4.2.1	Caracteristicile electronilor	
4.2.2	Mecanisme de accelerare a protonilor	
4.3	Rezultatele accelerației protonilor	
4.3.1	Influența electronilor asupra energiei maxime a protonilor	

4.3.2 Originea celor mai energici protoni	
4.4 Rezumatul rezultatelor privind accelerația protonilor	
• 5 Radiația sincrotron de înaltă energie și crearea perechii electron-pozitron	109
5.1 Emisia de radiații de înaltă energie	
5.1.1 Studiu de caz: interacțiunea laser - fascicul de electroni	
5.1.2 Studiu de caz: interacțiunea laser - plasmă	
5.2 Generarea perechilor electron-pozitron	
5.2.1 Configurare experimentală	
5.2.2 Crearea perechilor pentru $a_0 = 85$	
5.3 Radiație de mare energie și creare de perechi pentru intensități mai mari ale laserului	
5.4 Rezumatul rezultatelor	
• 6 Concluzii	129
• Bibliografie	143
• Mulțumiri	144
• Anexa A	147
A.1 Variația coeficientului de absorbție cu densitatea țintei și durata impulsului laser	
A.2 Variația coeficientului de absorbție cu densitatea țintei și amplitudinea câmpului normalizat cu laser	
A.3 Variația punctului de saturație al coeficientului de absorbție cu densitatea țintă și parametrii laser	
A.4 Variația energiei medii a electronilor cu densitatea țintei și laserul parametri	
A.5 Variația grosimii optime a țintei cu densitatea țintei și parametrii laser	
• Anexa B	159
B.1 Traiectorii tipice de electroni din simulări PIC 2D	
B.2 Modificarea densității în interacțiunea laser-plasmă	
• Anexa C	163
C.1 Caracteristicile pozitronilor din simulări PIC 2D	
C.2 Distribuția unghiulară a energiei electronice	
• Anexa D Activitatea științifică	166
D.1 Articole	

D.2 Conferințe internaționale	
D.2.1 Prezentări orale	
D.2.2 Prezentări poster	
D.3 Conferințe naționale franceze	
D.4 Conferințe naționale românești	
D.5 Seminarii	
D.6 Școli de vară	
D.7 Ateliere	
D.8 Colaborări internaționale	
• Anexa E Rezumatul tezei extins în franceză	171
E.1 Introducere	
E.2 Obiectivele tezei	
E.3 Rezultatele tezei	
E.4 Concluzii	