

Les impulsions électromagnétiques ultracourtes

espace-temps et rayonnement

Jean-François Eloy

 **hermes**

Lavoisier

2-539-35-1

2-539-35-1

Les impulsions électromagnétiques ultracourtes

espace-temps et rayonnement

Jean-François Eloy

hermes
Science
— publications —

Table des matières

Avant-propos	11
Chapitre 1. Introduction	19
1.1. Les ondes électromagnétiques	21
1.2. Le concept de cohérence	26
1.3. Le domaine espace-temps et approche temps-fréquence	33
1.4. Les sources de lumière cohérente laser	36
1.5. L'interaction laser-matière	41
1.5.1. L'absorption..	47
1.5.2. Les effets : génération et émission de particules.	50
1.6. Les impulsions électromagnétiques ultracourtes à ultralarge bande.	55
1.6.1. Missile électromagnétique.	57
1.6.2. Génération d'impulsions ultracourtes de rayons-X	59
1.7. Les sources de rayonnement synchrotron	60
1.8. Les domaines d'applications de l'interaction des ondes électromagnétiques ultracourtes avec la matière	64
1.8.1. Applications en instrumentation de diagnostic	64
1.8.2. Applications comme nouvelles sources d'énergie électromagnétique de puissance	69
Chapitre 2. Génération et interaction des impulsions électromagnétiques ultracourtes avec la matière	79
2.1. Approches théorique et analytique	79
2.1.1. Approche dynamique des effets des impulsions ultracourtes par analyse de Fourier	81
2.1.1.1. Effets électro-optiques.	88
2.1.1.2. Phénomène de survitesse électronique (ou <i>overshoot</i> , en terminologie anglo-saxonne)	92

6 Les impulsions électromagnétiques ultracourtes

2.1.1.3. Effets de génération d'harmoniques d'ordre élevé	98
2.1.1.4. Effets d'émission de rayons-X et gamma par interaction des faisceaux laser de haute puissance	101
2.1.1.5. Effets d'émission de rayonnement synchrotron	102
2.1.1.6. Auto-amplification d'émission spontanée de rayonnement (AAES)	103
2.1.2. Représentations analytiques alternatives des impulsions ultracourtes	103
2.1.2.1. Localisation dans le temps, type représentation de Gabor . .	104
2.1.2.2. Méthode des ondelettes	105
2.1.2.3. Méthode symbolique inverse	108
2.1.3. Etudes analytiques et numériques de cas particuliers de propagation d'impulsions ultracourtes.	114
2.1.4. Principe de compression d'impulsions optiques et de rayons-X .	116
2.1.4.1. Première étape : l'étirement temporel du paquet d'ondes . .	118
2.1.4.2. Seconde étape : la compression temporelle proprement dite	119
2.2. Tendances en instrumentation pour la génération des impulsions ultracourtes et le traitement du signal.	123
2.2.1. Dans le domaine des fréquences micro-ondes	125
2.2.1.1. Systèmes opto-électroniques pour la génération d'impulsions électromagnétiques ultracourtes.	125
2.2.1.2. Photocommutateurs rapides comme générateur d'impulsions ultracourtes micro-ondes	127
2.2.1.3. Mesures en espace libre dans le domaine temporel, d'antenne opto-électronique pulsée	144
2.2.1.4. Générateurs d'impulsions micro-ondes de puissance.	154
2.2.1.5. Propagation des impulsions type fonction- δ dans les milieux dispersifs avec ou sans perte.	156
2.2.1.6. Traitement de données des signaux EM à ultralarge bande .	162
2.2.2. Dans le domaine des fréquences infrarouges et visibles	164
2.2.2.1. Méthodes de mesures avec impulsion de référence.	165
2.2.2.2. Méthodes de mesures sans impulsion de référence.	166
2.2.3. Dans le domaine de fréquences des rayons-X	170
2.2.3.1. Différents processus physiques de génération d'impulsions ultracourtes de rayons-X	170
2.2.3.2. Méthodes de mesures des impulsions ultracourtes de rayons-X : Spectroscopie de rayons-X résolue en temps	181
2.3. Principes d'application des impulsions ultracourtes à large bande . . .	183
2.3.1. Diagnostics pour les mesures résolues en temps.	184
2.3.1.1. Dans le domaine des fréquences micro-ondes et submillimétriques	184
2.3.1.2. Dans le domaine des fréquences infrarouges et visibles . . .	189
2.3.1.3. Dans le domaine des rayons-X.	193

2.3.2. Nouveau concept de générateur d'impulsions ultracourtes de rayons-X pour applications aux études de plasma ou autres domaines	196
2.3.3. Applications potentielles pour les études dynamiques en biologie et biochimie	201
Chapitre 3. Interactions impulsions ultracourtes : lasers et matière.	205
3.1. Fusion nucléaire et plasmas produits par laser	210
3.1.1. Fusion et énergie nucléaires : sommaire des Relations Fondamentales	211
3.1.1.1. Fusion nucléaire par confinement magnétique	214
3.1.1.2. Fusion nucléaire par confinement inertiel électrostatique	215
3.1.1.3. Fusion nucléaire par confinement inertiel induit par Laser, FCIL.	216
3.1.2. Caractéristiques d'un plasma résultant de son interaction avec le rayonnement électromagnétique laser.	224
3.1.2.1. Le plasma induit par laser.	224
3.1.2.2. Echelles de temps et paramètres physiques	226
3.1.2.3. Mouvement des particules chargées dans un plasma produit par laser	229
3.1.2.4. Rayonnement électromagnétique et propagation d'ondes de choc conduisant au confinement inertiel par impact laser	232
3.1.2.5. Principe du confinement inertiel par laser	249
3.1.3. Lasers de puissance et leurs interactions	258
3.1.3.1. Cavités optiques pour oscillateurs laser.	259
3.1.3.2. Pompage Optique.	263
3.1.3.3. Obtention de puissance-crête laser élevée par mode déclenché	269
3.1.3.4. Amplificateur de lumière laser à l'état solide	271
3.1.3.5. Chaîne d'amplification laser	274
3.1.3.6. Convertisseur de fréquences laser	276
3.1.4. Cible pour confinement inertiel par rayons-X produits par plasma-laser.	278
3.1.5. Architecture de chaînes laser et installation à multibras laser	280
3.1.6. Diagnostics de rayons-X et de plasmas produits par laser	284
3.1.6.1. Instruments optiques.	285
3.1.6.2. Diagnostics de rayons-X	285
3.1.6.3. Diagnostics de particules	285
3.1.7. Projets de programmes laser nationaux pour le confinement inertiel.	289
3.2. Impulsions laser ultracourtes et interactions avec la matière	294
3.2.1. Montée en puissance du laser petawatt : les lasers du futur	297

3.2.1.1. Perspectives sur les nouveaux lasers de pompe pour laser femtoseconde	298
3.2.1.2. Perspectives sur les nouveaux systèmes de pompage par diode pour laser femtoseconde [GEO 01]	298
3.2.1.3. Les nouvelles chaînes laser femtosecondes de haute intensité	300
3.2.2. Aspect temporel des interactions laser ultracourtes d'intensité élevée	302
3.2.2.1. Interactions des impulsions laser ultracourtes avec la matière	305
3.2.2.2. Interactions des impulsions laser ultracourtes à intensité élevée	312
3.2.3. Applications de l'interaction des impulsions ultracourtes laser à faible énergie	320
3.2.3.1. Interaction laser-matière à faible énergie en régime thermique	321
3.2.3.2. Interaction laser-matière à faible énergie en régime non linéaire	324
3.2.4. Concepts avancés de diagnostics pour plasmas-laser intégrant des générateurs d'impulsions ultracourtes de rayons-X	327
3.2.5. Diverses autres applications d'interactions laser à échelle réduite	328
3.2.6. Plasmas produits par laser associé à des sources de rayonnement synchrotron	329

Chapitre 4. Aspects temporels des sources de rayonnement synchrotron. Interaction d'impulsions ultracourtes de rayons-X avec la matière 335

4.1. Nouveaux développements et tendances en instrumentation et optiques de rayons-X	339
4.1.1. Nouveau concept de sources de rayons-X pour la génération d'impulsions ultracourtes	339
4.1.2. Possible dérive de fréquence et possibilité de compression d'impulsions de rayonnement synchrotron	344
4.1.3. Structure temporelle de la source de l'Installation Européenne de Rayonnement Synchrotron (ESRF)	348
4.1.3.1. Rappel des bases théoriques de l'émission et de la propagation du rayonnement synchrotron	350
4.1.3.2. Dépendance spatiotemporelle des amplitudes et phases du champ électrique généré par un paquet d'électrons relativistes déviés par un aimant de courbure, type dipôle magnétique	352
4.1.3.3. Instrumentation de spectroscopie résolue en temps appliquée à la mesure de faisceau de rayonnement synchrotron	356

4.1.3.4. Exemple de mesures du décalage temps-espace effectuées sur la ligne de lumière BM5 à l'ESRF	361
4.1.3.5. Méthode de traitement des données appliquée aux impulsions de rayonnement synchrotron sur des signaux discriminés en temps	364
4.1.4. Nouvelles méthodes de mesure spectroscopique de rayonnement synchrotron résolues en temps par une technique d'anticorrélation.	371
4.1.4.1. Principe d'échantillonnage appliqué à des mesures temporelles d'impulsions de rayons-X	372
4.1.4.2. Echantillonneur optique pour faisceau de rayons-X durs	373
4.1.4.3. Projet d'un dispositif optique expérimental pour l'application du principe de mesures par anticorrélation aux rayons-X	377
4.1.4.4. Caractéristiques des détecteurs rapides pour la mesure des impulsions de rayons-X durs	379
4.2. Modulation temporelle des faisceaux de rayons-X pour les études dynamiques en biologie, biochimie et médecine.	381
4.2.1. Aspects instrumentaux avancés concernant les sources de rayonnement synchrotron	385
4.2.2. Perspectives d'applications : nouveaux domaines d'intérêt pour les impulsions ultracourtes de rayonnement synchrotron	391
4.2.2.1. En cristallographie	391
4.2.2.2. En physique atomique et moléculaire	396
4.2.2.3. En physique nucléaire des particules	397
4.2.2.4. En physique des surfaces	399
4.2.2.5. En médecine.	400
4.2.2.6. En femtochimie.	404
4.2.2.7. En physique des plasmas	405
Solutions des exercices	409
Conclusion	427
Remerciements	431
Glossaire	433
Symboles, préfixes, et abréviations	437
Symboles grecs	449
Abréviations et acronymes.	457
Bibliographie	461
Index	495
Lexique technique français-anglais	525

Le sujet des impulsions électromagnétiques ultracourtes et de leurs interactions avec la matière est d'un intérêt croissant, à la fois scientifique et technique. Cela est dû à leurs applications potentielles qui s'étendent depuis l'étude des phénomènes dynamiques transitoires jusqu'aux propriétés physiques intrinsèques de toutes les sortes de matériaux et variétés de milieux physiques soumis à des conditions extrêmes de radiations électromagnétiques. Cet intérêt résulte de la soif et du désir de progrès dans la compréhension et la connaissance des systèmes atomiques, moléculaires, photoniques, électroniques, magnétiques, et biologiques. Par ailleurs, les impulsions électromagnétiques ultracourtes produisent des plasmas hyperdenses et des rayonnements de toutes les longueurs d'onde et énergies.

Leurs propriétés spécifiques peuvent conduire à de nouvelles découvertes scientifiques majeures et aux développements de nouvelles technologies utilisables en recherche appliquée et fondamentale pour faire avancer la science.

Les domaines concernés par ces nouvelles connaissances sont plus particulièrement la biochimie, la biologie, la cristallographie, la physique des surfaces, des plasmas et nucléaire.

L'auteur

Jean-François Eloy, docteur ès sciences, diplômé de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg, a fait toute sa carrière scientifique au Commissariat à l'Énergie Atomique puis à l'Installation Européenne de Rayonnement Synchrotron à Grenoble.

Depuis 1990, il est Membre de l'Académie Internationale d'Électromagnétisme (MIT, Cambridge, MA, USA), et a été élu en décembre 2003, Membre étranger de la Société Royale des Arts et des Sciences de Göteborg, Suède.

hermes
Science
— publications —

www.hermes-science.com

ISBN 2-7462-0923-3



9 782746 209237