

Génération de rayonnement X cohérent et incohérent par décharges et micro-décharges capillaires : progrès récents et perspectives

J.M. Pouvesle

GREMI, CNRS, Université d'Orléans, BP. 6759, 45067 Orléans cedex 2, France

Résumé: Des avancées très importantes ont été réalisées au cours des dernières années dans le domaine des « laser X » pompés par décharge grâce au développement de décharges et micro-décharges capillaires permettant d'obtenir des plasmas chauds, denses et homogènes à grand rapport d'aspect (longueur sur diamètre) à partir de systèmes de petite taille. Nous présenterons ici les développements en cours ainsi que les derniers résultats obtenus sur ce sujet.

1. INTRODUCTION

La course aux petites dimensions dans le secteur industriel (lithographie, micro-nanotechnologies), les besoins sans cesse croissants dans le domaine de la biologie ou en imagerie médicale ont contribué à rendre de plus en plus fréquente l'utilisation de photons de très courte longueur d'onde $\lambda < 500 \text{ \AA}$ dans le domaine des X-mous (ou XUV). A l'heure actuelle, les chercheurs ou industriels utilisent essentiellement le rayonnement synchrotron fourni par quelques grands accélérateurs à travers le monde. Il est clair que l'accès restreint à ces machines limite le champ des applications potentielles. L'idéal serait bien sûr de pouvoir disposer de sources X très intenses de petite taille facilement disponibles à l'échelle d'un laboratoire. Les décharges capillaires à basse pression, connue depuis longtemps comme source intense de rayonnement UV-VUV, semblent pouvoir permettre d'apporter des réponses tout à fait intéressantes à ce problème.

Au cours des deux dernières années, des progrès spectaculaires ont été réalisés dans ce domaine, et l'on peut espérer pouvoir disposer de nouvelles sources XUV compactes de forte brillance dans un avenir très proche, basée sur ce principe. En effet, une voie très prometteuse vient de s'ouvrir avec l'obtention récente d'une amplification de l'émission spontanée (AES) dans des plasmas créés par décharge capillaire [1,2]. La démonstration de ces « Lasers X », dont les plasmas sont produits par décharge directe, a été faite pour les deux principaux modes de pompage, par recombinaison et excitation collisionnelle, par exemple, dans C VI à 18.2 nm et dans Ar IX à 46.9 nm, respectivement. Les dispositifs utilisés sont « relativement » simples à mettre en œuvre, de petites dimensions et fonctionnent avec des énergies stockées dans tous les cas inférieures à 200 J. Même si pour l'instant les énergies rayonnées sont encore modestes (dans le cas de l'argon néonoïde, à partir des indications des auteurs, on peut raisonnablement penser que la centaine de μJ a été atteinte), ces résultats sont tout à fait encourageants dans la mesure où les recherches dans ce domaine n'en sont qu'à leurs débuts.

Les décharges capillaires très énergétiques sont avant tout des sources très intenses de rayonnement VUV ou X-mou incohérent. Elles sont propres à de nombreuses

applications où la cohérence n'est pas indispensable ou non souhaitable. Des sources de grande brillance peuvent être obtenues avec des microdécharges capillaires à grand rapport d'aspect [3].

Après quelques généralités et un bref rappel sur les principaux mécanismes de pompage des lasers X rencontrés dans les expériences à base de décharges, on présentera les développements en cours et les derniers résultats obtenus ainsi que les perspectives dans les divers domaines évoqués ci-dessus.

2. LASER X ET DECHARGE CAPILLAIRE

La première démonstration [4] d'une amplification d'émission spontanée dans le domaine X remonte à plus de dix ans. Depuis lors, des progrès considérables ont été réalisés conduisant maintenant à des systèmes capables d'émettre des impulsions de plusieurs millijoules avec des puissances atteignant plusieurs dizaines de mégawatts [5-7]. Ces résultats tout à fait exceptionnels ont été obtenus en utilisant des lasers de très grande puissance (domaine kJ) pour pomper le milieu amplificateur avec des rendements "à la prise" de l'ordre de 10^{-8} . Ces lasers de pompe ne sont disponibles que dans le cadre de grands laboratoires nationaux. Cela pose, bien sûr, un réel problème quand on aborde le domaine des applications. Celles-ci sont nombreuses et concernent des domaines très variés tels que la photochimie, les matériaux, la physique atomique, la biologie, la micro-électronique, l'holographie, ... Pratiquement, en parallèle avec les grands instruments, il faudrait pouvoir disposer de sources laser de petite taille compatibles avec des applications industrielles ou de laboratoire. De nombreuses recherches en ce sens sont réalisées, notamment avec des lasers de pompe de beaucoup plus faible énergie, par exemple ref. [8], [9]. Cependant compte tenu du très faible rendement des processus mis en jeu, l'énergie rayonnée dans les impulsions laser produites par ces méthodes reste pour l'instant assez petite.

Une réponse intéressante au problème posé est en train de voir le jour peut être là où on l'attendait le moins: du côté des décharges électriques. En effet, depuis plus de vingt ans, l'obtention d'une amplification d'émission spontanée pour des longueurs d'ondes inférieures à 100 nm dans des plasmas créés par décharge, essentiellement de type Z-pinch, s'était avérée impossible, les expérimentateurs se heurtant à de sérieux problèmes d'instabilités et d'inhomogénéités des plasmas obtenus. La solution est venue des décharges de type capillaire avec effet de pinch [1,2,10-30]. Deux expériences récentes réalisées dans des conditions très différentes, l'une aux Etats Unis [1] par l'équipe de J.J. Rocca de l'Université du Colorado à Fort-Collins, l'autre en Corée [2] par H.J. Shin de l'Université de Pohang, ont permis une percée spectaculaire dans ce domaine de par les longueurs d'onde atteintes, 46.9 et 18.2 nm respectivement, et la taille extrêmement réduite des systèmes, même si les puissances extraites sont encore faibles. La notion de laser X de table devient tout à fait réaliste. L'intérêt de ces expériences est renforcé par le fait qu'elles font chacune appel à un schéma de pompage différent: pompage par recombinaison [2,21], et pompage par excitation collisionnelle [1,16-20].

Dès 1988, Rocca [10] avait proposé l'utilisation de décharges capillaires pour la mise au point de lasers X. Pourquoi un tel type de décharge? En fait les critères indispensables pour obtenir une amplification dans le domaine des X mous correspondant à des transitions d'ions multichargés sont sévères. Il est nécessaire d'avoir une valeur élevée de la densité de puissance déposée, un plasma chaud et dense, une très bonne uniformité axiale, une colonne de plasma de faible diamètre et un grand rapport d'aspect

(longueur sur diamètre). Parmi l'ensemble des décharges directes connues, pratiquement seules les décharges avec effet de pinch dans des capillaires de petit diamètre (\ll qq. mm) peuvent permettre de répondre à l'ensemble de ces exigences. Cela implique bien sûr de savoir créer des décharges très rapide, favorisant l'effet de peau, sous un courant très élevé (qq. dizaines de kA), favorisant l'effet de pinch et le chauffage du plasma, sans apparition trop rapide d'instabilités au sein du milieu amplificateur. La self du système de décharge doit donc être extrêmement faible entraînant de manière quasi-obligatoire l'intégration du capillaire au système de stockage de l'énergie.

L'un des premiers résultats probant [2] paru dans la littérature a été publié en août 1994 par H.J. Shin et al. Les chercheurs coréens ont montré une amplification d'émission spontanée à 18.2 nm sur la raie H α de C VI, l'inversion de population étant obtenue par recombinaison collisionnelle des ions C VII. Kunze [22-25, 31,32], qui avec Rocca est l'un des deux pionniers et principaux investigateurs dans ce domaine, avait déjà présenté [22-23] des travaux, alors très controversés, évoquant une amplification sur cette transition. Une reprise de leur expérience par Morgan et al. [26] sur un montage identique, dans les mêmes conditions avait conduit à un échec. Le résultat le plus médiatique [1] est à mettre à l'actif de J.J. Rocca et de son équipe qui, dans un article publié en octobre 1994, ont rapporté la première observation en régime de décharge d'une amplification dans les X mous à 46.9 nm de l'argon néonoïde (voir figure 1). Dans ce cas, le peuplement du niveau supérieur de la transition a été obtenu par excitation collisionnelle du niveau fondamental de l'ion Ar IX par les électrons.

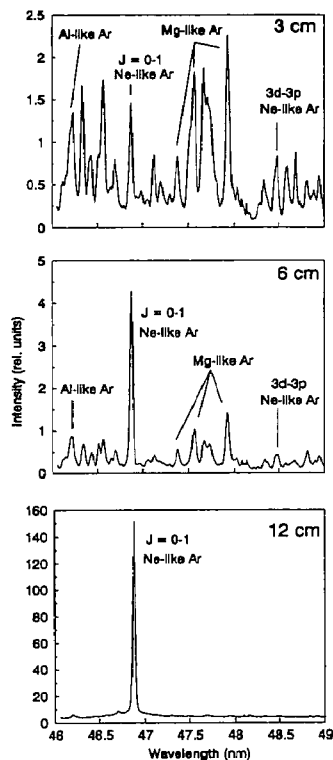


figure 1: Intensité de la raie J=0-1 de Ar IX à 46.9 nm en fonction de la longueur du capillaire ($I=38$ kA, \varnothing 4 mm) d'après J.J. Rocca et al, ref. [16]

3. PRINCIPAUX MECANISMES DE POMPAGE

Avant d'aborder les expériences et les divers résultats obtenus, il est intéressant de revenir rapidement sur les principaux mécanismes de pompage des lasers X que l'on rencontre dans les plasmas créés par décharges capillaires. Ces mécanismes ont été abondamment décrits dans la littérature, notamment par Klisnick [7] dont les deux paragraphes suivants s'inspirent directement.

Le pompage par recombinaison [7] se produit pendant la phase de refroidissement rapide d'un plasma en expansion. Les niveaux excités des ions d'une configuration donnée sont peuplés par recombinaison rapide des ions multichargés de charge

immédiatement supérieure avec les électrons libres du plasma. Ce type de pompage a permis d'obtenir une AES sur des transitions d'ions hydrogénéoïdes, lithiuoïdes et sodiuoïdes entre 39 et 300 Å avec des produits gain-longueur (GL) relativement faibles ≤ 5 . Les principaux avantages du pompage par recombinaison résident, d'une part, dans la possibilité d'extrapoler aux courtes longueurs d'onde en utilisant des atomes de plus en plus lourds dans leur état hydrogénéoïde, et d'autre part, dans le besoin d'une énergie pompe relativement modeste. Ce dernier point est important pour le cas des très courtes longueur d'onde sachant que la puissance nécessaire pour obtenir une amplification est approximativement proportionnelle à $1/\lambda^5$ [8].

Le *pompage par excitation collisionnelle* [7] est pour l'instant celui qui permet d'obtenir les produits gain-longueur (15 à 20) les plus élevés et d'atteindre le fonctionnement en mode saturé avec une brillance maximale. Dans ce mode de pompage, les collisions des électrons libres très énergétiques du plasma avec des ions dans leur état fondamental sont directement à l'origine des inversions de population. Cette inversion a été réalisée dans le cas d'ions néonoïdes et nikeloides sur des transitions $2p^5 3p - 2p^5 3s$ (donc intra-configuration) et $3d^9 4d - 3d^9 4p$, respectivement, les états inférieurs de ces transitions étant très fortement dépeuplés par transition radiative sur le fondamental. Les inversions de population se produisant entre état de la même configuration, $\Delta n=0$, il est nécessaire d'utiliser des éléments relativement lourds pour obtenir une AES avec des photons d'énergie supérieure à 40 eV. Le pompage collisionnel est à l'origine de tous les « records » en lasers X, (puissance, brillance, produit gain-longueur) mais est relativement "gourmand" en énergie, 10 à 100 fois plus que le pompage par recombinaison pour une même longueur d'onde [7]. Le domaine spectral atteint avec ce type de pompage s'étend jusqu'à la fenêtre de l'eau.

Un autre schéma de pompage a été récemment proposé par Kunze et al [24] dans le cas d'expériences avec des décharges capillaires. Il s'agit d'un *pompage par transfert de charge*, pouvant a priori s'appliquer aux ions hydrogénéoïdes (par exemple $\text{CVII} + \text{CIII}(2s^2) \rightarrow \text{CVI}(n=3) + \text{CIV}$, qui sous certaines conditions de températures (≈ 150 eV) et de densité électroniques ($\approx 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) pourrait présenter une probabilité de pompage beaucoup plus grande que celle du pompage par recombinaison. Pour l'instant ce mode de pompage aurait été observé dans des plasmas de décharge présentant une instabilité $m=0$, les conditions d'inversion étant obtenues au endroits de pincement maximum. Cette voie paraît intéressante, mais devra sans doute être abordée dans d'autres types de plasmas avec les bonnes conditions de température et de densités mais sans instabilité permettant d'obtenir des GL acceptables.

4. METHODES EXPERIMENTALES ET PRINCIPAUX RESULTATS

D'un point de vue général, les systèmes actuellement utilisés pour tenter d'obtenir une AES dans le domaine des X mous par décharge sont de trois types: Z-pinches, Z-pinches à injection annulaire et décharges et micro-décharges capillaires (\varnothing entre 0.5 et 6 mm), ces dernières fonctionnant soit sous vide avec ablation des parois ($(\text{CH}_2)_n$, $(\text{CH}_2\text{O})_n$, TiH_2 , CaH_2 , Li_2CO_3 , SiO_2 , ...), soit sous faible pression résiduelle d'un gaz, d'un mélange de gaz ou d'une vapeur. L'énergie électrique stockée varie de qq. joules à qq. centaines de joules avec des tensions de claquage allant de 15 à 200 kV. Les courants crête atteignent de 10 à 60 kA avec des fronts de montée allant de $5 \cdot 10^{11}$ à qq. 10^{12} A/s. Comme nous l'avons déjà signalé, dans les systèmes présentant les fronts de montée en courant les plus rapides, la self du système doit être extrêmement faible, entraînant

pratiquement forcé l'intégration du capillaire au système de stockage de l'énergie comme le montre la figure 2 représentant un premier système en cours de développement au GREMI à Orléans. Concernant les décharges capillaires, on peut revenir un plus en détail sur les systèmes de Shin et al et de Rocca et al qui sont caractéristiques des deux principales méthodes utilisées.

Dans l'expérience de Shin et al [2,21], le plasma est créé par ablation de la paroi d'un capillaire de polyéthylène de 1.2 mm de diamètre après une décharge glissante de très forte intensité dans le vide. Le stockage de l'énergie est réalisé au moyen de deux condensateurs de 60 nF chacun connectés aux électrodes du capillaire par deux lignes de transmissions identiques. La décharge est déclenchée par l'intermédiaire d'une troisième électrode à laquelle

est appliquée une impulsion haute tension. La tension de charge des condensateurs peut être fixée entre 17 et 27 kV, ce qui correspond à une énergie maximale stockée de 44 J. La demi-période de la décharge est de 220 ns. Après ablation de la paroi, un plasma de carbone chaud et dense (>50 eV, $>10^{19}$ cm $^{-3}$) est formé le long de l'axe du capillaire par compression magnétique. Cette période de compression est suivie d'une expansion rapide au cours de laquelle le plasma se refroidit brutalement quand il entre de nouveau en contact avec la paroi. La température électronique tombe alors aux environs de 13 eV, favorisant les processus de recombinaison à trois corps. C'est à ce moment qu'intervient l'inversion de population entre les états $n=3$ et $n=2$ de CVI. L'amplification a lieu environ 40 ns après le maximum de courant de la première demi-période. L'AES ne se produit qu'au cours des premiers tirs suivant la mise en place d'un nouveau capillaire. Les auteurs ne donnent aucune indication de l'énergie lumineuse émise dans la transition laser.

Contrairement à l'expérience précédente, le dispositif de Rocca [1,16-20] fait appel à une décharge dans un milieu à une pression résiduelle de plusieurs centaines de mtorr et à des capillaires de plus grand diamètre (\varnothing 4 mm). Cette solution a été adoptée après plusieurs essais utilisant des techniques proches de celles utilisées par les coréens ou par l'équipe de Kunze.

Dans ce travail, mis à part la valeur du courant crête, de 36 à 40 kA, les paramètres expérimentaux sont fondamentalement différents de ceux rencontrés dans toutes les autres expériences visant à obtenir une AES dans le domaine X par décharge. Le plasma est créé par une décharge très rapide (temps de montée \approx 20 ns, $dI/dt \approx 2 \cdot 10^{12}$ A/s) très haute tension, entre 100 et 700 kV, dans des capillaires dont les longueurs varient entre 3 et 20 cm dans de l'argon pur ou des mélanges argon-hydrogène à des pressions entre 0.2 et 1 torr (valeur optimale vers 700 mtorr). L'impulsion de courant est fournie par la décharge d'un condensateur de 3 nF lui-même chargé impulsivement par un générateur de Marx. L'énergie stockée peut varier entre 15 et 700 joules. Les

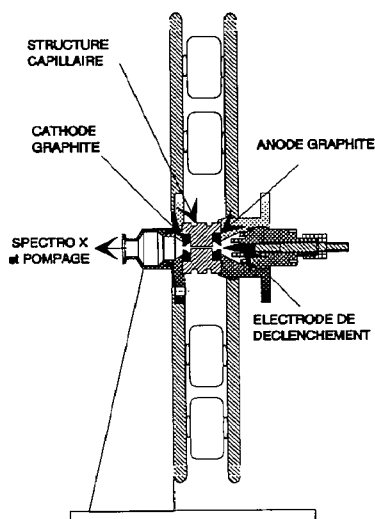


figure 2: Représentation schématique du système de décharge capillaire en cours de développement au GREMI à Orléans.

expériences ont été réalisées pour des valeurs allant de 100 à 200 joules. La décharge est commandée par un éclateur très haute tension (SF_6 à haute pression). Le milieu est préionisé par une décharge de 10 A appliquée pendant quelques microsecondes. L'impulsion de courant de la décharge principale à une demi-période d'environ 60 ns.

Dans ces conditions, le plasma crée par effet de peau le long de la paroi est comprimé sur son axe sous l'effet des forces électromagnétiques et atteint rapidement un diamètre de l'ordre de qq. centaines de microns (rapport d'aspect au moment du pinch ≈ 500) et présente un très fort degré d'ionisation. A l'instant de la compression maximale, une AES apparaît sur la raie $J=0-1$ de l'argon néonoïde à 46.9 nm avec un gain $> 1 \text{ cm}^{-1}$. Dans la référence [1] le produit GL max obtenu était de 7.2. Depuis lors des progrès considérables (GL de 18 en simple passage) ont été réalisés et la saturation a été obtenue [17,20]. Le laser fonctionne avec une demi cavité, conduisant en double passage à un GL record de 27 [20.]. Dans les meilleures conditions, la divergence du faisceau est de 5.6 mrad et l'énergie rayonnée dans le transition laser est de l'ordre 30 μJ dans des impulsions d'environ 0.8 ns. Il est très important de souligner que le rendement "à la prise" est de l'ordre de 10^{-6} , ce qui est environ deux ordres de grandeur plus grand que dans le cas des systèmes pompés par laser. Ces résultats ont été obtenus en monocoup ou à très faible taux de répétition (1 tir/min), mais cette limitation est essentiellement due au temps de charge du générateur de Marx utilisé. D'autre part, comme nous l'avons mentionné plus avant, dans sa configuration actuelle, le système utilisé impose l'emploi d'un éclateur très haute tension.

Pour l'instant, l'équipe de Rocca est la seule à s'être lancée dans ce type d'excitation THT pour la production de rayonnement X cohérent. Ceci n'est pas le cas pour l'autre méthode (type Kunze), a priori plus simple à mettre en œuvre, récemment développée dans plusieurs laboratoire à travers le monde. Outre les équipes déjà mentionnées, Shin et al. [1,21], Kunze et al. [22-25], Morgan et al [26], on peut citer, liste non exhaustive, l'équipe de Knight et Panin [27] de Brigham Young University, USA, en collaboration avec l'Institut de Spectroscopie de Moscou (Ivanov), l'équipe de Aumayr [29-30] de Institut für Allgemeine Physik de Vienne, Autriche. D'autre part, l'équipe de Langhoff du Physikalisches Institut der Universität Würzburg, RFA [34] et celle de Hoffmann [35] du Physikalisches Institut der Universität Erlangen travaillent sur des dispositifs de type Z-pinch dynamique. En France, un programme d'expériences, financé par la DRET, le CNRS et la Région Centre, vient d'être lancé par le GREMI, CNRS/Université d'Orléans, en collaboration avec le laboratoire PMI de l'Ecole Polytechnique. Au GREMI à Orléans, des dispositifs des deux types de décharge capillaire (ablative et à faible pression résiduelle) sont en cours de réalisation. Au sein du PMI à Palaiseau, c'est l'aspect décharge à grand rapport d'aspect initiée par une décharge à cathode creuse qui sera étudiée.

L'ensemble des transitions sur lesquelles une AES a déjà été obtenue en pompage par décharge sont indiquées dans le tableau I. La plupart des transitions laser obtenues sont à des longueurs d'ondes assez grandes, à la limite du domaine VUV-XUV. Il apparaît évident qu'un travail important devra être fait pour obtenir des transitions dans une gamme de longueurs d'onde beaucoup plus courtes en dessous de 30 nm.

Les décharges capillaires très énergétiques, telles que celles que nous venons de mentionner, sont aussi des sources intenses de rayonnement X mou incohérent dont les caractéristiques les rendent particulièrement attractives pour un certain nombre d'applications, notamment pour le diagnostics des plasmas denses. Un effort particulier doit être fait pour développer des systèmes de forte brillance et de très petite taille facilement intégrables à des expériences de laboratoire. Des avancées significatives ont été faite dans ce domaine avec le développement de décharges présentant des inductances extrêmement faibles permettant de générer des impulsions de courant très

rapide de plusieurs kA à partir de dispositifs où l'énergie stockée atteint seulement quelques joules. Les études menées actuellement par le laboratoire PMI, mentionnées plus avant, sur des décharges à grand rapport d'aspect initiées par cathode creuse sont caractéristiques des travaux menés dans cette direction. Des décharges présentant des fronts de montée en courant supérieurs à 10^{12} A/s avec des intensités crêtes au dessus de 10 kA ont été obtenues avec des dispositifs dont les dimensions, hors alimentation HT, ne dépassent pas 20 cm. Ces systèmes sont en cours d'optimisation pour permettre des décharges à des taux de répétition suffisamment élevés propres à des applications industrielles.

Tableau I: Transitions pour lesquelles une AES a été obtenue en pompage par décharge

ION	λ nm	Transition	GL	Ref.
Li III	72.9	H α	-	30
Ar IX	69.8	3p-3s	3.2	25
O VI	52.0	4f-3d	2.5	35
O VI	52.0	4f-3d	4.5	31
O VI	49.8	4d-3p	2.2	35
Ar IX	46.9	3p-3s	27	20
F VII	31.9	4f-3d	-	31
C VI	18.2	H α	3.9	2
C VI	18.2	H α	3.6	23
C VI	18.2	H α	2.4	34

5. PERSPECTIVES

Le but de ces expériences est bien sûr de pouvoir mettre au point de véritables lasers X de table, transportables, pompés par décharge, facilement intégrables dans l'environnement industriel ou scientifique, d'un prix de revient moins élevés que les machines actuelles. Ceci est tout à fait envisageable compte tenu du très bon rendement entre l'énergie électrique consommée et la production de rayonnement X dans les décharges capillaires.

En se référant aux travaux en cours, aux Etats Unis notamment, on peut penser que des énergies supérieures au millijoule par impulsion laser sont accessibles avec des systèmes dont la taille, alimentation et pompage compris, ne devrait pas dépasser celle d'une table de travail avec des énergies stockées inférieures à 200 J. Les systèmes avec ablation très réduite des parois du capillaire, tels que ceux développés par Rocca peuvent parfaitement se prêter à une utilisation à un taux de répétition non négligeable si l'alimentation H.T. et le générateur impulsionnel employés ont des performances suffisantes.

Le but ultime en longueur d'onde est bien sûr de pouvoir atteindre la fenêtre de l'eau entre 2.3 et 4.4 nm en utilisant des éléments lourds. Compte tenu du coût en énergie nécessaire pour atteindre ce domaine spectral, il est plus raisonnable, tout au moins dans un premier temps, de penser que de nouvelles AES seront obtenues dans le domaine de longueur d'onde, 10-50 nm (par exemple sur des transitions de Xe IX à 41.8 nm, Ca XI à 38.2 nm, Ti XIII à 32.6 nm, N VI à 18.5 nm, C VI à 13.5 nm et O VIII à 10.2 nm) couvrant un domaine intéressant pour la micro-électronique (entre 10 et 20 nm).

Références

- [1] J.J. Rocca, V Shlyaptsev, F.G. Tomasel, O.D. Cortazar, D. Hartshorn and J.L.A. Chilla, *Phys. Rev. Lett.* **73** (1994) 2192-2195
- [2] H.J. Shin, D.E. Kim and T.N. Lee, *Phys. Rev. E* **50**, (1994) 1376-1382
- [3] P. Choi, M. Favre and C. Dumitrescu-Zoita, "Hollow cathode triggered capillary discharge" THCDP, Paris, 14-16 septembre 1994
- [4] D.L. Matthews et al, *Phys. Rev. Lett.* **54** (1985) 110-113
- [5] L. B. Da Silva et al, *Opt. Lett.* **18** (1993) 1174-1177
- [6] R.C. Elton, *X-ray lasers* (Academic Press Inc, 1990)
- [7] A. Klisnick, *Ann. Phys.* **19** (1994) C1-119-126
- [8] J. Zhang et al, *Phys. Rev. Lett.* **74** (1995) 1335-1338
- [9] B.E. Lemoff et al, *Phys. Rev. Lett.* **74** (1995) 1574-1577
- [10] J.J. Rocca, D.C. Beethe and M.C. Marconi, *Optics Lett.* **13** (1988) 565-567
- [11] M.C. Marconi and J.J. Rocca, *Appl. Phys. Lett.* **6** (1989) 2180-2183
- [12] J.J. Rocca, M.C. Marconi and F.G. Tomasel, *IEEE J. Quant. Elec.* **29** (1993) 182-191
- [13] J.J. Rocca et al, *Phys. Rev. E* **47** (1993) 1299-1304
- [14] F.G. Tomasel et al, *Phys. Rev. E* **47** (1993) 3590-3597
- [15] J.J. Rocca et al, *Phys. Rev. E* **48** (1993) R2378
- [16] J.J. Rocca et al, *Phys. Plasma* **2** (1995) 2547-2554
- [17] J.J. Rocca et al, *SPIE* **2520** (1995) 201-208
- [18] V.N Shlyaptsev, J.J. Rocca and A.L. Osterheld, *SPIE* **2520** (1995) 365-372
- [19] J.J. Rocca, M.C. Marconi, J.L.A. Chilla, D.P. Clark, F.G. Tomasel, and V.N Shlyaptsev, *IEEE Sel. Top. Quant. Elec.* **1** (1995) 945-948
- [20] J.J. Rocca, D.P. Clark, F.G. Tomasel, V.N Shlyaptsev, J.L.A. Chilla, B. Benware, C. Moreno, and J.J. Gonzales, "Advances in discharge pumped soft x-ray lasers", 5th International Conference on x-ray lasers, Lund, Sweden, 10-14 june 1996
- [21] H.J. Shin "Soft-X-ray amplification using a capillary discharge", Thèse, Pohang, Corée, novembre 1994
- [22] C. Steden and H.J. Kunze, *Phys. Lett. A* **151** (1990) 534
- [23] C. Steden et al, *Inst. Phys. Conf. Ser.* **125** (1992) 423-426
- [24] H.J. Kunze et al, *Phys. Lett. A* **193** (1994) 183-187
- [25] A. Hildebrand et al, "Amplified spontaneous emission on the $J=2 \rightarrow 1$, $3p-3s$ transition of neonlike argon in a capillary discharge", International Conference on x-ray lasers, Lund, Sweden, 10-14 june 1996
- [26] C.A. Morgan, H.R. Griem and R.C. Elton, *Phys. Rev. E* **49** (1994) 2282-2290
- [27] A.M. Panin et al, *SPIE* **2520** (1995) 222-230
- [28] M. Pöckl, M. Hebenstreit, T. Neger, and F. Aumayr, *J. Appl. Phys.* **76** (1994) 733
- [29] M. Pöckl et al, *SPIE* **2520** (1995) 379-387
- [30] M. Hebenstreit et al, *J. Phys. D: Appl. Phys* **29** (1996) 1933-1940
- [31] S. Glenzer and H.J. Kunze, *Phys. Rev. E* **49** (1994) 1586-1593
- [32] E. Schmieder and H.J. Kunze, *Phys. Rev. E* **51** (1995) 5143-5146
- [33] D.E. Kim and K.T. Lee, "Study of C VI balmer- α 18.2 nm line in a Z-pinch carbon plasma by computer simulation", 5th International Conference on x-ray lasers, Lund, Sweden, 10-14 june 1996
- [34] J. Metzner, T. Böss, J. Wolf and H. Langhoff, *J. Phys. D* **29** (1996) 1532-1539
- [35] E. Eberl, T. Wagner, D. H. Hoffmann, "Demonstration of amplification for Li-like-Oxygen in a z-pinch plasma" Rapport interne Physikalisches Institut Universität Erlangen, 1995, p. 27