

Préface

La matière « ordinaire », celle qui compose les étoiles, les planètes, vous et moi ou encore le livre que vous tenez entre les mains, est composée d'atomes. Ceux-ci sont classés à ce jour dans le tableau périodique des éléments en 118 éléments, dont seuls 80 sont considérés comme stables. Chaque élément se distingue par le nombre de protons qui constituent son noyau, lequel est entouré d'un nombre égal d'électrons, assurant ainsi la neutralité électrique des atomes. Cependant, dans tout l'univers, la matière « ordinaire » est constituée en très grande majorité (à près de 99 %) d'ions, des atomes chargés, qui ont perdu (parfois gagné) un ou plusieurs électrons. Ils se regroupent dans des plasmas, des mélanges d'atomes ou de molécules neutres ou ionisés, d'électrons libres et de photons interagissant entre eux. Plus le plasma est chaud, plus ses constituants possèdent une grande énergie et plus les ions perdent des électrons par collisions mutuelles, ou avec les électrons libres, ou encore par absorption de photons. L'étude depuis la Terre des plasmas astrophysiques tels que les étoiles ou le milieu interstellaire ne peut se faire essentiellement que par observation des photons qu'ils émettent ou absorbent. Ainsi, l'étude des processus d'interaction photons-ions comme la photo-absorption (processus global où l'ion absorbe un photon, l'énergie apportée par le photon absorbé pouvant servir à arracher un ou des électrons à l'ion – on parle dans ce cas de photo-ionisation – ou encore à exciter un ou des électrons du cortège électronique de l'ion – on parle alors de photo-excitation) présente un intérêt tout particulier.

Si les ions sont partout dans l'univers, produire en laboratoire en grand nombre des ions de masse dans un état de charge bien défini reste cependant une gageure. Une méthode couramment utilisée par les physiciens consiste à produire un plasma dans une source d'ions, d'en extraire les ions par application d'un champ électrique, puis de les sélectionner en charge et en masse à l'aide d'un champ magnétique. Sont ainsi formés des faisceaux d'ions sélectionnés, que l'on fait interagir avec des faisceaux d'autres particules (atomes, ions, électrons, photons) pour étudier finement

les différents processus d'excitation et d'ionisation dans les ions. En plus de leur intérêt fondamental, les résultats de ces études servent également à la physique des plasmas, en particulier pour la modélisation de leur opacité spectrale, la mesure de leur impénétrabilité au rayonnement électromagnétique.

Le lancement de satellites (Chandra, XMM Newton...) au début des années 2000 pour l'observation des plasmas astrophysiques dans le domaine des rayons X (des énergies des photons comprises entre 0,1 et 10 keV) a été l'une des motivations pour la construction en laboratoire d'expériences visant l'étude des processus d'interaction ions-photons dans cette gamme d'énergie. Le rayonnement synchrotron émis par les électrons circulant dans les anneaux de stockage constitue la source idéale de photons X grâce à sa forte intensité, émise sur une très large gamme spectrale. Ainsi, des expériences ont vu le jour dans différents centres de rayonnement synchrotron de par le monde (Daresbury en Angleterre, ASTRID au Danemark, ALS aux États-Unis, Photon Factory et SPring8 au Japon, BESSY et PETRA III en Allemagne, LURE et SOLEIL en France). Elles ont toutes en commun la propriété de mélanger des faisceaux d'ions sélectionnés avec un faisceau de photon X monochromatique et d'étudier les processus de photo-ionisation/photo-excitation essentiellement par détection de la charge des ions après leur interaction avec les photons X. Les paramètres atomiques mesurés vont des sections efficaces de photo-ionisation – la probabilité avec laquelle le photon va arracher un (ou des) électron(s) à l'ion – aux énergies des résonances de photo-excitation – l'énergie que doit avoir le photon pour exciter un électron du cortège électronique de l'ion vers une orbitale atomique supérieure – ou encore à la largeur spectrale de ces résonances d'excitation qui est liée à la durée de vie des états électroniques excités produits. Une des difficultés inhérentes à ces expériences réside dans la très faible densité d'ions cibles (typiquement 10^3 à 10^5 ions/cm³, comparable à la densité de l'ionosphère terrestre). Les faibles taux de comptage qui en résultent requièrent en compensation des temps d'acquisition des données excessivement longs, peu compatibles avec les temps d'expérience très limités disponibles dans les centres de rayonnement synchrotron. Il devient alors primordial de disposer, avant la réalisation des expériences, d'une estimation aussi précise que possible des énergies de photon auxquelles rechercher les résonances de photo-excitation. C'est là que la méthode de la constante d'écran par unité de charge nucléaire, développée par le D^r Ibrahim Sakho, révèle toute sa puissance. En dépit de, mais surtout grâce à un formalisme extrêmement simple ne requérant pas l'utilisation de supercalculateurs, elle fournit rapidement, et avec une précision proche de celle donnée par les méthodes beaucoup plus sophistiquées de calculs atomiques détaillés, la position des résonances d'excitation ainsi que leur largeur. Cette méthode semi-empirique bénéficie en retour des apports des expériences, chaque nouvelle donnée expérimentale permettant d'affiner la précision de ces prédictions.

Le lecteur trouvera dans cet ouvrage un exposé clair de la méthode de la constante d'écran par unité de charge nucléaire qui peut être appliquée de façon simple et immédiate à de nombreux domaines de la physique, en relation avec la spectroscopie atomique.

Jean-Marc BIZAU

Avant-propos

La matière visible dans l'univers est à environ 99 % sous forme de plasma. La connaissance des processus d'interaction ion-photon revêt ainsi un caractère déterminant pour la compréhension des observations astrophysiques telles que l'opacité des étoiles, l'abondance des éléments chimiques, etc. Du point de vue théorique, l'application du modèle des particules indépendantes s'est avérée inappropriée à la description des phénomènes de corrélation électroniques dans les plasmas d'astrophysique et de laboratoire. De façon générale, les méthodes de calculs théoriques et expérimentales donnent des valeurs précises des énergies de résonance et des largeurs naturelles des séries de Rydberg des systèmes atomiques à plusieurs électrons. Cependant, nombre de méthodes *ab initio* (c'est-à-dire non empiriques) utilisent des développements mathématiques excessifs et des programmes informatiques fastidieux *via* des codes de calculs pour obtenir des valeurs précises des paramètres de résonance. Il n'est donc pas possible d'exprimer analytiquement ni les énergies de résonance ni les largeurs naturelles des états excités des systèmes atomiques à partir des méthodes *ab initio* existantes. Dans cet ouvrage, nous décrivons le formalisme de la méthode de la constante d'écran par unité de charge nucléaire (CEUCN) appliqué à la description correcte des phénomènes de corrélation électroniques dans les systèmes atomiques complexes à partir de formules analytiques simples. Cependant, la photo-ionisation résonante étant le principal processus gouvernant l'interaction photons-ions dans les plasmas, ce présent ouvrage comporte de nombreuses rubriques permettant de comprendre plusieurs aspects physiques liés aux processus de photo-ionisation des systèmes atomiques multichargés.

Dans le premier chapitre, sont décrits les différents processus de photo-ionisation ainsi que les séries de Rydberg. Le deuxième chapitre est réservé à une revue succincte des principales méthodes théoriques et expérimentales appliquées à l'étude de la photo-ionisation résonante des systèmes atomiques. Les notions fondamentales

de section efficace de photo-ionisation et de défaut quantique sont élucidées dans ce chapitre. Le troisième chapitre est consacré à l'exposé du formalisme de la méthode de la CEUCN. L'application du formalisme de la CEUCN aux calculs des énergies de résonance et des largeurs naturelles des systèmes atomiques fait l'objet du quatrième chapitre. Ce présent ouvrage est le premier du genre, car, pour la première fois, les étudiants disposent d'une méthode théorique leur permettant le calcul direct et précis des énergies de résonance et des largeurs naturelles des séries de Rydberg des systèmes atomiques des moins complexes (systèmes héliumoides) aux plus complexes (systèmes atomiques polyélectroniques multichargés) à partir de formules analytiques simples. Pour cette raison, les applications sont proposées sous forme d'exercices corrigés à divers endroits du quatrième chapitre. Sont aussi proposés dans cet ouvrage de nombreux exercices permettent de comprendre les propriétés des séries de Rydberg dans le cadre de la nouvelle interprétation des supermultiplets à partir de l'introduction des nouveaux nombres quantiques de corrélations angulaires (K et T) et radiale (A). De plus, des données précises de références sur les énergies de résonance et les largeurs naturelles des séries de Rydberg de divers systèmes atomiques sont présentées sous forme de tableaux dans la dernière partie du livre. En annexes, nous exposons le calcul détaillé de la constante d'écran par unité de charge nucléaire relative à l'état fondamental des systèmes atomiques à deux électrons. De plus, nous décrivons, sous forme d'un résumé, le formalisme de la théorie des orbitales atomiques de Slater qui n'est applicable qu'au calcul de l'énergie des états fondamentaux des systèmes atomiques. La théorie modifiée des orbitales atomiques de Slater applicable aux calculs précis des énergies de résonance et des largeurs naturelles des séries de Rydberg des systèmes atomiques multichargés est aussi présentée en annexe. Enfin, une comparaison des formalismes de la constante d'écran par unité de charge nucléaire et de la théorie modifiée des orbitales atomiques de Slater est proposée sous forme d'articles publiés en anglais à la fin de l'ouvrage.

Ce présent ouvrage constitue ainsi un bon outil de travail pour les étudiants en Licence 3 de physique, en Master de physique fondamentale ainsi que pour les doctorants ayant un sujet en rapport avec la spectroscopie atomique. De plus, cet ouvrage est une très bonne source de documentation pour les théoriciens et expérimentateurs ayant comme objet l'étude de l'interaction du rayonnement électromagnétique avec les systèmes atomiques neutres et multichargés présents dans les plasmas astrophysiques ainsi que ceux présents dans les plasmas de laboratoire.

Pour finir, nous exprimons nos sincères remerciements au D^r Jean-Marc Bizau de l'université Paris Sud pour nous avoir accepté dans son groupe de recherche au centre du rayonnement synchrotron à SOLEIL et pour avoir accepté de préfacer ce

présent ouvrage. Notre collaboration très fructueuse depuis 2012 a fait l'objet, à cette date, de cinq publications internationales. Les diverses campagnes d'expériences à SOLEIL ont permis de tester la méthode de la constante d'écran par unité de charge nucléaire qui, grâce à un formalisme analytique extrêmement simple, a fourni à chaque test et avec une bonne précision la position des résonances d'excitation ainsi que leurs largeurs à mesurer. Le D^r Bizau fut aussi membre de mon jury de thèse de doctorat d'État (2013) comme examinateur. Sa relecture et ses critiques constructives ont beaucoup contribué à l'affinement du formalisme de la CEUCN.

Nous exprimons également notre profonde gratitude au professeur Mamadi Biaye, doyen de la Faculté des sciences et technologies de l'éducation et de la formation (FASTEF) de l'université Cheikh Anta Diop de Dakar, ainsi qu'aux professeurs Djibril Diop et Issakha Youm du Département de physique de la Faculté des sciences et techniques de l'université Cheikh Anta Diop de Dakar, pour leurs contributions à l'amélioration du formalisme de la CEUCN à travers leurs critiques et suggestions en leur qualité de membres de jury de notre thèse de doctorat d'État (2013). Que l'on nous permette de rendre un vibrant hommage au professeur Ahmadou Wagué de l'université Cheikh Anta Diop de Dakar, notre directeur de thèse de 3^e cycle (2007) et de thèse d'État (2013). C'est sous sa direction que le formalisme de la constante d'écran par unité de charge nucléaire a germé et fleuri.

Enfin, nous remercions par avance tous ceux qui nous feront parvenir suggestions et critiques à l'adresse électronique ci-dessous.

Ibrahima SAKHO
aminafatima_sakko@yahoo.fr

*Je dédie ce travail
au professeur Ahmadou Wagué.*

*Pour avoir guidé mes premiers pas dans la recherche,
pour avoir encadré ma thèse de doctorat 3^e cycle (2007) ainsi que ma thèse
de doctorat d'État ès sciences physiques (2013).*

*Qu'il trouve ici exprimées en ces quelques lignes toute ma reconnaissance ainsi que
toutes mes félicitations en sa qualité de premier Africain élu au conseil
de la Société américaine de physique (American Physical Society, APS) en août 2017.*

Introduction

Globalement, environ 99 % de la matière visible dans l'univers est sous forme de plasmas froids (électrons plus énergétiques que les espèces neutres et les ions) et chauds (électrons et ions très énergétiques) en interaction avec le rayonnement électromagnétique constitué de photons. La connaissance des processus d'interaction ion-photon revêt ainsi un caractère déterminant pour la compréhension des observations astrophysiques telles que l'opacité des étoiles, l'abondance des éléments chimiques, etc., et pour la compréhension des processus évoluant dans les plasmas de laboratoire comme ceux produits par laser ainsi que dans les plasmas de fusion thermonucléaire.

De plus, le transport d'énergie dans les plasmas denses et chauds est principalement gouverné par la photo-absorption par les ions du plasma. Ce processus de photo-absorption a une intensité maximale dans la gamme d'énergie XUV des photons. Par exemple, dans les étoiles, et en particulier dans le Soleil, ce sont les ions du fer qui contribuent essentiellement au transport de l'énergie du centre de l'étoile vers l'extérieur, les éléments légers ayant déjà perdu tous ou une grande partie de leurs électrons (El Hassan, 2010).

La photo-ionisation des atomes neutres et des ions est ainsi l'un des processus fondamentaux se produisant dans le cœur des étoiles. Par conséquent, il est important de disposer de données numériques des paramètres de résonance (énergies et largeurs naturelles notamment) utiles surtout pour le Projet Opacité, « Opacity Project » (Seaton, 1987), qui est une large collaboration internationale créée en 1984 et qui a comme objectif principal de calculer et de compiler sous forme de catalogues les propriétés collisionnelles et radiatives de tous les états d'ionisation des éléments légers du tableau de classification périodique.



Figure I.1. *Nébuleuse du Crabe, issue de l'explosion d'une étoile*

Vers 1054, des Chinois et des Indiens avaient observé l'explosion d'une étoile dont les restes observables aujourd'hui constituent la nébuleuse du Crabe (figure I.1). Dans ce vestige stellaire, on constate nettement que la lumière émise au cœur de l'étoile est absorbée au niveau des couches supérieures. Ce manque de transparence affecte la structure des étoiles, ce qui rend difficile l'étude de la composition chimique de leurs cœurs. C'est ainsi que les astrophysiciens utilisent l'opposé de la transparence, c'est-à-dire l'opacité, pour mesurer la capacité des photons à traverser une couche de gaz stellaire, une faible opacité traduisant une haute transparence des couches superficielles des étoiles tandis qu'une forte opacité implique une faible transparence. De plus, l'opacité d'une couche de matière dépend de sa composition chimique, de sa densité (l'opacité augmente avec la pression du gaz) et de sa température (les photons s'échappent plus facilement dans un plasma très chaud où les atomes ont perdu tous leurs électrons que dans un plasma froid constitué entre autres d'espèces neutres). Une classification des plasmas suivant leurs densités électroniques et leurs températures est indiquée sur la figure I.2. Parmi les plasmas les plus chauds figurent ceux du cœur solaire avec une densité électronique d'environ 10^{25} électrons/cm³ et une température intérieure de l'ordre de 10^7 K. Les plasmas froids tels que les nuages interstellaires ont une densité électronique inférieure à 1 électron/cm³ et une température inférieure à 10^4 K.

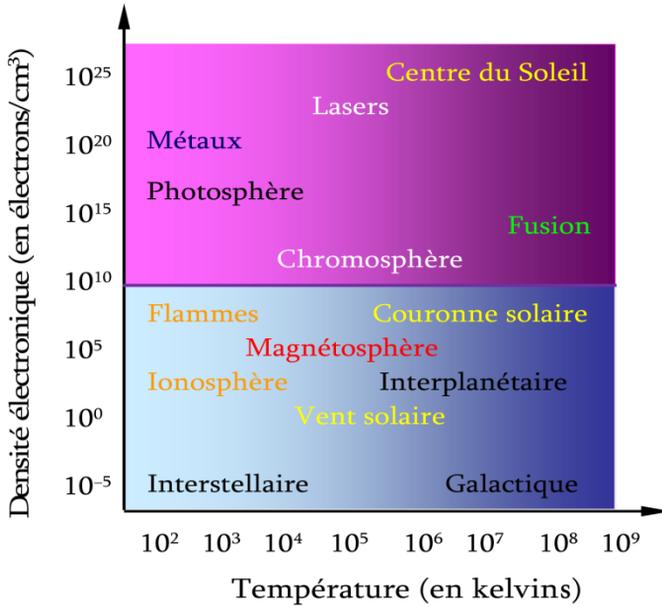


Figure I.2. Classification des plasmas selon leurs densités électroniques et leurs températures

Concernant notamment les plasmas chauds, les températures sont telles que les espèces chimiques perdent tous ou une partie de leurs cortèges électroniques pour se retrouver dans plusieurs états d'ionisation. C'est ainsi que des éléments légers tels que l'oxygène O, le fluor F et le chlore Cl qui, à l'état naturel ionisé, se trouvent sous forme d'anions stables O^{2-} , F^{-} et Cl^{-} , peuvent se retrouver dans les plasmas sous forme de cations à plusieurs états d'oxydation O^{+} , O^{2+} , ..., O^{8+} , F^{+} , F^{2+} , ..., F^{9+} et Cl^{+} , Cl^{2+} , ..., Cl^{17+} lorsque la température du gaz stellaire devient de plus en plus élevée.

Ainsi, les systèmes astrophysiques tels que les étoiles et les nébuleuses émettent des spectres caractéristiques des éléments chimiques qui les composent. Mais si la lumière traverse de la matière froide, comme les couches extérieures des étoiles, on observe à la place un spectre d'absorption. Les raies sombres obtenues caractérisent alors les éléments présents dans la matière traversée.

En outre, du point de vue expérimental, les mesures quantitatives des paramètres de résonance de photo-ionisation des ions légers fournissent des données précises et utiles pour le développement de modèles théoriques adaptés à la description correcte des processus d'interaction à électrons multiples (Covington *et al.*, 2011). Ces mesures expérimentales utilisent un rayonnement synchrotron (rayonnement

électromagnétique émis par des particules chargées, notamment des électrons en mouvement accéléré) dans de grands centres internationaux de recherche, tels ASTRID (*Aarhus Storage Ring in Denmark*) au Danemark (Kjeldsen *et al.*, 1999), SOLEIL (Source optimisée de lumière d'énergie intermédiaire du LURE [Laboratoire pour l'utilisation du rayonnement électromagnétique]) en France (Bizau *et al.*, 2011), ALS (*Advanced Light Source*) aux États-Unis (Covington *et al.*, 2011), SPring-8 au Japon (Oura *et al.*, 2000), etc. Le développement de ces sources de rayonnements synchrotrons a fourni des données expérimentales de haute précision servant de base pour le perfectionnement des méthodes théoriques. Parmi les méthodes *ab initio* (c'est-à-dire non empiriques) les plus couramment utilisées, citons l'approche multiconfigurationnelle de type Dirac-Fock, *Dirac-Fock Multi-Configurational* (MCDF) (Bruneau, 1984 ; Simon *et al.*, 2010), la théorie du défaut quantique, *Quantum Defect Theory* (QDT) (Dubau et Seaton, 1984), l'approche de la matrice-*R* (McLaughlin et Ballance, 2012 ; Liang *et al.*, 2013) (largement utilisée dans les collaborations internationales telles que le Projet Opacité, l'approche relativiste multiconfigurationnelle de phase aléatoire), et *Relativistic Multi-Configuration Random-Phase Approximation* (MCRRPA) (Hsiao *et al.*, 2009), et tant d'autres méthodes théoriques.

Parmi les systèmes atomiques ayant un intérêt majeur en astrophysique et qui font l'objet d'intenses recherches à l'échelle internationale tant au plan théorique qu'au plan expérimental, figurent les systèmes à plus de deux électrons. Nous citons quelques exemples de ces systèmes atomiques en guise d'illustration de nos propos. Récemment, des investigations considérables ont été menées au double plan théorique et expérimental pour étudier les processus de photo-ionisation de l'ion B^+ . Utilisant un rayonnement synchrotron à ALS, Schippers *et al.* (2003) ont mesuré les énergies et largeurs de résonance des séries de Rydberg ($2pns$) $^1P^\circ$ et ($2pnd$) $^1P^\circ$ ($n = 3 - 10$) de l'ion bérylliumoïde B^+ . Utilisant l'approximation relativiste multiconfigurationnelle de phase aléatoire (MCRRPA), Hsiao *et al.* (2009) ont calculé les énergies et largeurs des séries de Rydberg $2pns$ $^1,3P^\circ$, $2pnd$ $^1,3P^\circ$ et $2pnd$ $^3D^\circ$ ($n = 3 - 20$) dans le spectre de photo-ionisation de l'ion B^+ . Par ailleurs, l'approche de la matrice-*R* a été utilisée pour déterminer les énergies de résonance et les largeurs naturelles des séries de $2pns$ $^1P^\circ$ et $2pnd$ $^1P^\circ$ Rydberg des ions O^{4+} ($n = 6 - 10$) par Kim et Manson (2010), F^{5+} ($n = 6 - 10$) ions par Kim et Kim (2011) et Ne^{6+} ($n = 7 - 9$) ions par Kim et Kwon (2010).

En outre, dans l'espace interstellaire, le magnésium Mg apparaît comme l'un des métaux les plus importants (Sofia *et al.*, 1994). De plus, des vapeurs chaudes de magnésium ont été détectées dans l'exosphère de la planète Mercure (Killen *et al.*, 2010) et dans la photosphère solaire (MacAdam *et al.*, 2012). L'étude de la photo-ionisation du magnésium demeure ainsi un défi majeur, car, en tant qu'espèce neutre, il peut contribuer notablement à l'opacité des gaz interstellaires. Dans un

passé récent, des études expérimentales (Wehlitz *et al.*, 2007) et théoriques (Wang *et al.*, 2010) ont été effectuées sur le calcul des énergies et largeurs de résonance des séries de Rydberg $3pns\ ^1P$, $3pnd\ ^1P$, $3pns\ ^3P$, $3pnd\ ^3P$ et $3pnd\ ^3D$ dues aux transitions électroniques $3s^2\ ^1S_0 \rightarrow 3pnl\ ^{2S+1}L$ ($l = s$ ou d) dans Mg.

Par ailleurs, d'importants processus de photo-absorption à partir des états métastables de basses énergies ont été observés aussi bien dans les couches supérieures de l'atmosphère terrestre (Meier, 1991) que dans les plasmas astrophysiques (Raju et Dwivedi, 1990). Parmi les états doublement excités de l'ion F^{2+} , les énergies de résonance des séries de Rydberg $2s^22p^2\ (^1D)nd\ (^2L)$, $2s^22p^2\ (^1S)nd\ (^2L)$ et $2s^22p^3\ (^3D)np$ relativement aux états métastables $2s^22p^3\ (^2P^o)$ et $2s^22p^3\ (^2D^o)$ et celles des séries $2s2p^3\ (^5S^o)np\ (^4P)$ relativement à l'état fondamental $2s^22p^3\ (^4S^o)$ de l'ion F^{2+} ont été mesurées expérimentalement (Aguilar *et al.*, 2005) en utilisant un rayonnement synchrotron dans la gamme d'énergie photonique allant de 56,3 eV à 75,6 eV. Jusqu'à présent, il n'existe pas, à notre connaissance, de données théoriques à confronter à ces premières valeurs expérimentales.

Les ions du néon Ne sont considérés comme jouant un rôle très important dans le diagnostic des plasmas de laboratoire du fait de l'utilisation fréquente du néon dans les tokamaks (appareils destinés au confinement inertiel des plasmas) pour sonder les plasmas de fusion thermonucléaire (Janev, 1993). De plus, le néon est le sixième élément le plus abondant dans l'univers et ses ions contribuent à l'opacité des étoiles (O'Dell, 1963). Comme l'ont souligné Covington *et al.* (2002), dans la gamme des ondes ultraviolettes de 300-90 Å correspondant à une gamme d'énergie photonique de 41-138 eV, les radiations lumineuses peuvent porter le néon à différents stades d'ionisation pour donner des ions Ne^+ , Ne^{2+} , Ne^{3+} et Ne^{4+} , laissant l'ion résiduel dans un ou différents états excités. Utilisant le rayonnement synchrotron à ALS, Covington *et al.* (2002) ont réalisé les premières mesures expérimentales sur les énergies de résonance des séries de Rydberg $2s^22p^4\ (^1D_2)ns, nd$, $2s^22p^4\ (^1S_0)ns, nd$ et $2s2p^5\ (^3P_2)np$ relativement à l'état métastable $2s^22p^5\ ^2P_{1/2}$ et à l'état fondamental $2s^22p^5\ ^2P_{3/2}$ de l'ion Ne^+ . Des calculs théoriques à comparer aux résultats expérimentaux précédents n'ont pas été signalés dans la littérature consultée.

En outre, parmi les éléments présents à l'état de traces dans les systèmes astrophysiques figure l'argon Ar. La surabondance de cet élément dans le spectre-X de jeunes supernovas est révélée par le satellite Chandra (Lewin, 2005). De plus, des raies spectrales de l'argon ont été observées dans le spectre d'émission des étoiles et des nébuleuses planétaires (Kraus *et al.*, 2005 ; Kniazev *et al.*, 2005) et son abondance fut déterminée à partir des spectres des raies des étoiles comme le Soleil (Anders et Grevesse, 1989). Ces observations stellaires témoignent de l'intérêt que revêt le calcul des paramètres de résonance (énergies d'excitation, largeurs

naturelles, longueurs d'onde, etc.) de l'atome d'argon et de ses ions pour la modélisation des plasmas astrophysiques. Récemment, Covington *et al.* (2011) ont réalisé les premières mesures expérimentales sur les énergies et largeurs de résonance des séries de Rydberg $3s^23p^4 (^1D_2)ns, nd$ et $3s^23p^4 (^1S_0)ns, nd$ de l'ion Ar^+ en utilisant le rayonnement synchrotron; d'autres travaux n'ont pas été faits concernant les séries de Rydberg suscitées de l'ion Ar^+ .

Pour $Z > 30$, des réactions de capture de neutrons par des éléments lourds tels que Se, Kr, Br, Xe, Rb, Ba et Pb ont été détectées dans de nombreuses nébuleuses ionisées (Sharpee *et al.*, 2007; Sterling *et al.*, 2007; Sterling et Dinerstein, 2008). Dans le cas particulier du sélénium, les premières mesures expérimentales de photo-ionisation sur l'ion Se^+ ont été réalisées par Esteves *et al.* (2011) grâce au rayonnement synchrotron. Les mesures ont été faites avec une résolution de 5,5 meV, l'énergie des photons variant de 17,75 à 21,85 eV et effectuées relativement à l'état fondamental $4s^24p^3 (^3S_{3/2}^o)$ et aux états métastables $4s^24p^3 (^2P_{3/2}^o)$, $4s^24p^3 (^2P_{1/2}^o)$, $4s^24p^3 (^2D_{5/2}^o)$ et $4s^24p^3 (^2D_{3/2}^o)$ de l'ion Se^+ . L'analyse de la texture des états de résonance a permis d'identifier de nombreuses séries de Rydberg, dont plus de 19 membres ayant pour origine les transitions électroniques $4p \rightarrow nd$ et $4p \rightarrow ns$ dans Se^+ . Utilisant une approximation de la matrice- R , McLaughlin et Ballance (2012) ont effectué les premiers calculs théoriques sur les énergies de résonance des séries de Rydberg $4s^24p^2 (^1D_2)nd$ et $4s^24p^2 (^1S_0)nd$ séries de l'ion Se^+ . De plus, toujours à partir du rayonnement synchrotron, Esteves *et al.* (2012) ont mesuré les énergies de résonance des ions Se^{3+} et Se^{5+} et un nombre important de séries de Rydberg dues aux transitions $4s \rightarrow np$ et ayant comme origine l'état fondamental $4s^24p (^2P_{1/2}^o)$ et l'état métastable $4s^24p (^2P_{3/2}^o)$ et convergeant vers les séries limites $^3P_{2,1,0}$ de l'ion Se^{4+} ont été identifiées. Pour l'ion Se^{3+} , les séries identifiées sont les états $4s4p (^3P_{1,0})np$, $4s4p (^3P_2)np (^2P_{3/2})$, $4s4p (^3P_2)np (^4D_{7/2})$ et $4s4p (^3P_2)np (^2D_{5/2})$. Ces premières données expérimentales n'ont pas été comparées à d'autres résultats théoriques à cette date.

De façon générale, les méthodes de calculs théoriques et expérimentales donnent des valeurs précises des énergies et des largeurs de résonance des séries de Rydberg des systèmes atomiques à plusieurs électrons. Cependant, nombre de méthodes *ab initio* utilisent des développements mathématiques excessifs et des programmes informatiques fastidieux *via* des codes de calculs pour obtenir des valeurs précises des paramètres de résonance. Par exemple, la méthode MCDF est basée sur le code MCDF de Bruneau (Bruneau, 1984) et l'approche de la matrice- R , largement utilisée, met à profit le *Dirac Atomic R-Matrix Codes* (DARC) (Wang *et al.*, 2010; Berrington *et al.*, 1995). De plus, l'approche relativiste MCDHF (*Multi-Configuration Dirac-Hartree-Fock*) utilise le GRASP2K code (Jönsson *et al.*, 2007).

Or, comme l'ont souligné Utpal et Talukdar (1999), il est généralement admis qu'il est très avantageux d'élaborer des modèles analytiques simples permettant d'alléger la lourdeur du développement mathématique qui sous-tend l'application des méthodes *ab initio*.

C'est ainsi que dans notre thèse de doctorat 3^e cycle (Sakho, 2007) nous avons présenté une nouvelle méthode de calcul approché permettant le calcul précis des énergies totales des systèmes atomiques à deux électrons à partir de formules analytiques simples. Cette méthode est appelée « méthode de la constante d'écran par unité de charge nucléaire » (CEUCN) ou, sous sa dénomination anglaise, *Screening Constant by Unit Nuclear Charge (SCUNC) Method*. Entre 2006 et 2010, la méthode de la CEUCN/SCUNC a été appliquée avec succès au sein du laboratoire Atomes Laser dirigé par le professeur Ahmadou Wagué du Département de physique de la Faculté des sciences et techniques de l'université Cheikh Anta Diop de Dakar et directeur de l'Institut de technologie nucléaire appliquée (ITNA), aux calculs des énergies de l'état fondamental et des états doublement excités des systèmes atomiques à deux électrons (Sakho *et al.*, 2006 ; Sakho *et al.*, 2008a ; Sakho *et al.*, 2008b ; Sakho *et al.*, 2010) et à trois électrons (Sakho et Wagué, 2010). De plus, au sein du Département de physique de l'UFR des Sciences et techniques de l'université Assane Seck de Ziguinchor, la méthode de la CEUCN/SCUNC a été appliquée entre 2010 (date coïncidant avec notre recrutement à l'université Assane Seck de Ziguinchor) et 2012 aux calculs des énergies d'excitation des systèmes atomiques à plusieurs électrons (Sakho, 2010 ; Sakho, 2011a ; Sakho, 2011b ; Sakho, 2012). Par la suite, à partir de 2013, le formalisme général de la méthode de la CEUCN/SCUNC a été décliné (Sakho, 2013c) puis appliqué à l'étude de la photo-ionisation résonante d'un grand nombre de systèmes atomiques (voir sections B et C de la bibliographie). De plus, diverses campagnes d'expériences à SOLEIL ont permis de tester la méthode de la CEUCN/SCUNC qui, grâce à un formalisme analytique extrêmement simple, a fourni, à chaque test et avec une bonne précision, la position des résonances d'excitation ainsi que leur largeur à mesurer. Cette collaboration internationale, initiée en 2012 avec le D^r Jean-Marc Bizau, a fait l'objet, à cette date, de cinq publications internationales.