الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الشهيد حمه لخضر- الوادي
كليـــة العلـــــــــوم الدقيقة
قسم الفيزياء

رقم الترتيب:
رقم التسلسل:

مذكرة تخرج لنيل شهادة

ماستر أكاديمي

مجال : علوم المادة

تخصص : فيزياء تطبيقية إشعاع وطاقة

من إعداد : بكاكرة يوسف

الموضوع:

تأثير دوال توزيع الطاقة على حساب معدلات التأين لأيون اللثيوم الشبيه بالهليوم (Li^{+})

نوقشت يوم: 2021/06/21م

أمام لجنة المناقشة المكونة من:

مفتاح نسيمة	أستاذ محاضر صنف أ	جامعة الوادي	رئيسا
عسكري سهيلة	أستاذ محاضر صنف ب	جامعة الوادي	مناقشا
ديلمي سامية	أستاذ محاضر صنف أ	جامعة الوادي	مؤطرا

الموسم الجامعي : 2021/2020م

إهداء

أهدي ثمرة جهدي إلى:

عائلتي و أشكرهم على الدعم و التشجيع.

كل أساتذتي الأفاضل الكرام.

كل طالب علم مجتهد.

تشكرات

الشكر أولا وأخيرا إلى الله عز وجل الذي كان خيرعون لي.

أود بشكل خاص أن أعبر عن امتناني العميق لأستاذتي الفاضلة الدكتورة **"ديلمي سامية"**، من المؤكد أن هذا العمل لم يكن ليتم بدون مساعدتها المستمرة ولطفها غير المسبوق. كان العمل معها متعة حقيقية.

كما أشكر أعضاء اللجنة على قبولهم مناقشة هذا العمل بداية برئيس اللجنة الأستاذة **"مفتاح نسيمة"** وكذلك المناقشة الأستاذة **" عسكري سهيلة"** على قبولها تقييم هذا العمل وأتمنى أن تفيدني بآرائها القيمة .

و أخيرا أتوجه بالشكر الخالص للأستاذ **"بسر الزبير"**.

فهرس المحتويات

قائمة الأشكال I

قائمة الجداول II

قائمة الرموز III

مقدمة عامة 1

الفصل الأول: مفاهيم أساسية حول البلازما الساخنة

1-1 مقدمة..... 6

2-1 البلازما الساخنة المنتجة داخل المخبر..... 6

1-2-1 إنتاج البلازما 6

2-2-1 انصهار نووي حراري محكوم 7

3-2-1 المولد المغناطيسي الهيدروديناميكي 9

4-2-1 دفع البلازما 10

5-2-1 أجهزة البلازما..... 10

3-1 البلازما الطبيعية..... 11

1-3-1 بلازما طبيعية كونية..... 12

1-1-3-1 الشمس 12

2-3-1 بلازما طبيعية أرضية..... 13

1-2-3-1 الأيونوسفير..... 13

2-2-3-1 الشفق القطبي..... 14

4-1 نموذج التوازن..... 14

1-4-1 نموذج التوازن الترموديناميكي المحلي..... 14

2-4-1 النموذج التاجي..... 15

3-4-1 نموذج التوازن التصادمي الإشعاعي الثابت 15

5-1 خلاصة..... 16

المراجع..... 17

الفصل الثاني : العمليات الذرية الشائعة في البلازما الساخنة

2-1 مقدمة..... 20
2-2 الانتقالات الإشعاعية..... 20
2-2-1 الامتصاص الإشعاعي..... 20
2-2-2 الانبعاث التلقائي..... 21
2-2-3 الانبعاث المحرض(المحفز)..... 21
2-3 الإثارة التصادمية..... 22
2-4 التأين بواسطة الإلكترون الصادم..... 23
2-5 التأين التصادمي وإعادة التركيب الثلاثي الأجسام..... 24
2-6 التأين الضوئي وإعادة التركيب الإشعاعي..... 24
2-7 خلاصة..... 25
المراجع..... 26

الفصل الثالث: تأثير دوال توزيع الطاقة على حساب معدلات التأين بواسطة إلكترون التصادم

3-1 مقدمة 29
3-2 الأساس النظري للحساب..... 29
3-2-1 مختلف الطرق لحساب المقاطع الفعالة للتأين بواسطة التصادم الإلكتروني..... 30
3-2-1-1 الطرق التقليدية..... 30
3-2-1-2 تقريب كولوم-بورن..... 30
3-2-1-3 المعادلات شبه التجريبية..... 31
3-2-2 المحاكات العددية وبرامج الحساب..... 33
3-2-2-1 برنامج FAC 34
3-2-2-2 المقاطع الفعالة للتأين بالتأثير الإلكتروني لأيون اللثيوم الشبيه بالهليوم..... 34
3-3 حساب معدلات التأين بواسطة التصادم الإلكتروني..... 36
3-3-1 دوال التوزيع..... 36

3-3-1-1 دالة التوزيع الماكسويلي..... 37
3-3-1-2 دالة التوزيع غير الماكسويلي..... 37
3-3-2 حساب معدل التأين بواسطة التصادم الإلكتروني لأيون Li الشبيه بالهليوم..... 38
3-3-2-1 النتائج ومناقشتها..... 38
3-3-2-2 الاستنتاج..... 41
3-4 خلاصة 42
المراجع..... 43
خلاصة عامة..... 46

قـائمة الأشكـــال

الشكل(1- 1) الاندماج النووي..... 7
الشكل(1- 2) نظام المرآة المغناطيسية..... 8
الشكل(1- 3) التوكاماك..... 8
الشكل(1- 4) قرصة $\boldsymbol{\theta}$ الخطية..... 8
الشكل(1- 5) اندماج الحبيبات بالليزر..... 8
الشكل (1- 6) رسم تخطيطي يوضح المبدأ الأساسي لـمولد الطاقة المغناطيسية الهيدروديناميكية 9
الشكل (1- 7) أساس عمل مولدات MHD 9
الشكل (1- 8) أساس عمل محركات الدفع النفاث بالبلازما..... 10
الشكل (1- 9) جهاز الدفع الصاروخي بالبلازما..... 10
الشكل(1- 10) شكل يوضح عملية قطع المعدن بتقنية البلازما..... 11
الشكل(1- 11) مختلف أشكال البلازما..... 12
الشكل (1- 12) توزيع ارتفاع الإلكترونات وأيونات موجبة للغلاف الجوي المتأين أثناء النهار.... 13
الشكل(2- 1) وصف مختلف الإنتقالات الإشعاعية..... 21
الشكل(2- 2) عملية الإثارة بالتصادم الإلكتروني والعملية العكسية لها..... 22
الشكل(2- 3) عملية التأين بالتصادم الإلكتروني 23
الشكل(2- 4) عمليتي إعادة التركيب الإشعاعي والتأين الضوئي 24
الشكل(3- 1) رسم بياني مبسط يتعلق بمفهوم القسم الفعال..... 33
الشكل (3- 2) منحنيات المقاطع الفعالة للتأين بالتأثير الإلكتروني لـ Li بدلالة الطاقة..... 35
الشكل (3- 3) معدلات التأين بالتأثير الإلكتروني لـ Li باستخدام دالة توزيع الطاقة الماكسويلي وتأثير مختلف قيم معدل الإلكترونات الساخنة f_{hot}..... 39
الشكل (3- 4) معدلات التأين بالتأثير الإلكتروني لـ Li باستخدام دالة توزيع الطاقة القاوسي وتأثير مختلف قيم معدل الإلكترونات الساخنة f_{hot}..... 40
الشكل (3- 5) معدلات التأين بالتأثير الإلكتروني لـ Li باستخدام دالة توزيع الطاقة لقانون الاستطاعة لثوابت الانحلال المختلفة: $\gamma = 2$ (1) ، $\gamma = 3$ (2) ، $\gamma = 4$ (3) وتأثير مختلف قيم معدل الإلكترونات الساخنة f_{hot}..... 41
الشكل(3- 6) معدلات التأين بالتأثير الإلكتروني لـ Li باستخدام دالتي التوزيع الغاوسي وقانون الاستطاعة لمختلف ثوابت الانحلال γ و معدل الإلكترونات الساخنة $f_{hot} = 0.01$ 42

قائمة الجداول

الجدول(1-1) مختلف قيم المقاطع الفعالة للتأين بالتأثير الإلكتروني لـ Li التي تم الحصول عليها بواسطة برنامج FAC و بعض النتائج التجريبية..... 35

قائمة الرموز

الرموز اللاتينية :

a_0 نصف قطر بور.
A_i معامل أينشتاين للانبعاث التلقائي.
β_i معامل أينشتاين للامتصاص.
β_j معامل أينشتاين للانبعاث المحرض.
C_{ij} معامل الإثارة.
Ca ذرة الكالسيوم.
D_{ij} معدل إعادة تركيب ثنائي الإلكترون.
ΔE الفرق الطاقوي الموافق للانتقال.
E_j طاقة المستوى الذري j.
E_i طاقة المستوى الذري i.
E_{ion} طاقة التأين للأيون.
F_M دالة توزيع ماكسويل لطاقة الإلكترونات.
f_{hot} معدل الإلكترونات الساخنة.
h ثابت بلانك.
H ذرة الهيدروجين.
I_{ij} معامل التركيب الثلاثي الأجسام.
g_i الوزن الإحصائي للذرة في المستوي الطاقوي i.
k_β ثابت بولتزمان.
m_e كتلة الإلكترون.
n_s العدد الكلي للحالات.
N_e كثافة الإلكترونات.
N_i كثافة الأيونات.
N_j كثافة الإسكان في الحالة j.
N_i كثافة الإسكان في الحالة i.
N عدد الالكترونات.
$n(\upsilon)$ عدد الفوتونات $h\upsilon$.
N_{sc} عدد الطبقات الفرعية.
R_{ij} معامل التأين التصادمي.
Sc ذرة السكانديوم.
T درجة الحرارة.
T_{ij} معامل التركيب الإشعاعي.
T_e درجة حرارة الإلكترونات.

T_{hot} درجة حرارة الإلكترونات الساخنة.
T_{bulk} درجة حرارة الإلكترونات الباردة.
W مصفوفة الانتقال التصادمي الإشعاعي.
X_Z طاقة التأين للأيون .
Z العدد الذري.
Zn ذرة الزنك.

الرموز اليونانية :

ε_0 طاقة الإلكترون.
ε_j طاقة الربط للإلكترون في الطبقة الفرعية j.
ξ عدد الإلكترونات المحيطية في القشرة الفرعية المدروسة (من العدد المداري l_0) التي لها طاقة χ_Z .
ξ_j عدد الإلكترونات المكافئة في الطبقة الفرعية j.
δE الفرق الطاقوي.
Γ_{ij} معامل التأين التلقائي.
$\rho(h\upsilon_{ij})$ كثافة الطاقة الطيفية للإشعاع.
γ ثابت انحلال.

المؤشرات :

T_{bulk}	درجة حرارة الإلكترونات الباردة .
j	مستوى مثار.
i	مستوى أساسي.
ion	التأين.
F_G	دالة توزيع غاوسي.
T_{hot}	درجة حرارة الإلكترونات الساخنة.
F_M	دالة توزيع ماكسويلي.
F_{NM}	توزيع غير ماكسويلي.
F_P	دالة توزيع قانون الاستطاعة.
Sc	ذرة السكانديوم.

الاختصارات :

ATOM	محرر النصوص البرمجية وشفرة المصدر.
BED	ثنائي القطب.
CBE	تبادل بورن كولومب.
CM	النموذج التاجي.
CR	نموذج التصادم الإشعاعي.
DW	الموجة المشوهة.
ETL	نموذج التوازن الديناميكي الحراري المحلي.
DWBA	تقريب الموجة المشوهة.
FAC	برنامج الذري المرن.
MHD	مولد الطاقة المغناطيسي الهيدروديناميكي.

مقدمة عامة

مقدمة عامة :

عندما يتعرض الغاز لحقل كهربائي قوي أو يتم تسخينه بشدة، يتم فصل الإلكترونات عن ذرات الغاز. الوسط الذي يتم الحصول عليه محايد بشكل عام ولكنه يتكون من جسيمات مشحونة وأيونات وإلكترونات. هذا الوسط عبارة عن بلازما والتي تعتبر الحالة الرابعة للمادة. هناك العديد من أنواع البلازما حيث يمكن إيجادها بشكل طبيعي في النجوم, الشفق القطبي و هي موجودة أيضًا في العديد من التطبيقات الصناعية المختلفة: أنابيب النيون، شاشات البلازما، أقمار الاتصالات، إنتاج الأشعة السينية أو الطاقة، الخ.

إن درجات الحرارة المطلوبة للحصول على بعض البلازما تجعل دراستها التجريبية باهظة الثمن ولا يمكن الوصول إليها بسهولة [1، 2]. حيث تظهر الفيزياء الذرية أهميتها في تشخيص البلازما الساخنة, و تستخدم هذه التشخيصات علاقة انبعاث الإشعاع الأيوني بخصائص البلازما. تعتمد شدة الخطوط على درجة الحرارة وكثافة الإلكترون في البلازما، بينما يتأثر شكلها بالمجالات الكهربائية والمغناطيسية، ودرجة الحرارة الأيونية والحركة الكلية للأيونات الناتجة عن انتشارها أو من تمدد البلازما [3، 4].

تطورت فيزياء البلازما من خلال دمج جميع التطورات في الفيزياء الحديثة وتشمل جميع مجالات الفيزياء تقريبًا (الديناميكا المغناطيسية، نظرية الاصطدام، الفيزياء الذرية والجزيئية، الفيزياء النووية، النظرية الحركية، الديناميكا الحرارية، انتشار الموجات، الإشعاع والتحليل الطيفي ...)، وتؤدي صياغتها الرياضية عمومًا إلى معادلات صعبة الحل. يتطلب تشخيصها ثروة من البيانات الموثقة حول العمليات الإشعاعية و التصادمية التي تتحكم في تأين البلازما وإثارة الأيونات [3، 4]. ومع ذلك، فإن تطبيقاتها تحظى باهتمام كبير مثل إنتاج الطاقة عن طريق تفاعل الاندماج، ولهذا تم تطوير دراستها النظرية والمحاكاة العددية على نطاق واسع [1، 2].

بفضل طرق التحليل الطيفية الفعالة من يمكن الحصول على تقدير دقيق للكثافة, درجة الحرارة وكذلك تسليط الضوء على عمليات نقل الطاقة داخل البلازما, وبالتالي ندخل في مفهوم المقطع الفعال الكلي والذي هو دراسة واسعة من حيث تأثير التصادمات, والتأين بالتأثير الإلكتروني والذي هو عملية ذرية أساسية في محاكاة انبعاث الإشعاع من الخطوط وأيضًا لدراسة التوازن الأيوني.

ركز الباحثون على تطوير التقنيات وطرق التقريب أين يمكن وصف عمليات التصادم المختلفة بشكل مناسب. وتوالت العديد من البحوث التي قدمت نظريات وأساليب تقريبية وتجريبية لحساب المعطيات الذرية المتمثلة في العديد من المقاطع الفعالة و معدلات التأين بالتأثير الإلكتروني للذرات من طرف "Burgess"و"Seaton"سنة 1964م, "Lotz"سنة 1966م, "Moores"سنة 1972م, "Burgess" وآخرون سنة 1977م, وغيرهم [5]. إنّ الحساب المباشر لهذه المعطيات الذرية غير ممكن للعديد من الذرات متعددة الإلكترونات والتي تمتلك أعداد كمية كبيرة لذلك تستخدم العديد من البرامج الذرية لمعالجة وتحديد مختلف المعطيات الذرية ومن أهمها برنامج "FAC"نظرا لطواعيته وسهولة استخدامه[6].

تعتبر ذرة الهيدروجين أو بشكل عام نظام أيوني للإلكترون الواحد ذو أهمية أساسية للوصف النظري للهياكل الذرية, كما تعتبر دراسة ظاهرة التأين(التأين الضوئي و / أو التأين الاصطدام) في البلازما مهمة جدا من أجل التعرف على طبيعة البلازما, وهناك العديد من الأنظمة العددية و النماذج الرياضية المناسبة لأنواع مختلفة من البلازما[7, 8]. تعتبر التأثيرات الحرارية مهمة في عدد من الأنظمة, لذلك ليس من السهل التنبؤ بتوزيع درجات الحرارة عن طريق القياسات التجريبية. ولكن إذا تم أخذ التأثيرات الفيزيائية المتعددة في الاعتبار فإن المحاكاة ستصبح أداة فعالة للتنبؤ و التحسين.

حضت الإلكترونات الساخنة باهتمام كبير في فيزياء البلازما لأن هذه الإلكترونات تؤثر على أطياف الانبعاث وغيرها من الخصائص الديناميكية للبلازما. فقد تم الكشف في العديد من المصادر بما فيها بلازما المختبر, بلازما التوكماك, بلازما المنتجة بالليزر وكذلك في مصادر الفيزياء الفلكية مثل الانفجارات الشمسية وغيرها على أن توزيع الطاقة للإلكترونات الساخنة غير ماكسويلى [9, 14].

و على هذا الأساس كان الهدف من وراء هذا العمل هو معرفة تأثير دوال توزيع الطاقة على حساب معدلات التأين وذلك من خلال دراسة معدل التأين **بواسطة إلكترون التصادم للبلازما الساخنة** وتطبيقه على أيون اللثيوم الشبيه بالهليوم.

و عليه تم تنظيم هذا العمل وفقا لما يلي:

- الفصل 1: يتناول **مفاهيم أساسية حول البلازما الساخنة,** حيث سيتم التطرق للبلازما الساخنة المنتجة داخل المختبر والطبيعية بالإضافة لنماذج التوازن التي تسمح بتشخيص و نمذجة البلازما.

-الفصل 2: مخصص للعمليات **الذرية الشائعة في البلازما الساخنة**. حيث سيتم التعرف على بعض العمليات الذرية الشائعة في البلازما الساخنة, بدءًا بالانتقالات الإشعاعية, ثم الإثارة التصادمية, وأيضا التأين بواسطة الإلكترون الصادم, وكذلك عملية التأين التصادمي وإعادة التركيب الثلاثي الأجسام, وأخيرا التأين الضوئي و إعادة التركيب الإشعاعي.

-الفصل 3: **تأثير دوال توزيع الطاقة على حساب معدلات التأين بواسطة إلكترون التصادم**, أين سيتم التطرق إلى الأساس النظري لمختلف طرق حساب المقاطع الفعالة للتأين بواسطة التصادم الإلكتروني (الطرق التقليدية, تقريب كولوم-بورن, المعادلات شبه التجريبية), والمحاكاة العددية وبرامج الحساب (برنامج FAC), ثم إلى حساب معدلات التأين بواسطة التصادم الإلكتروني لأيون الليثيوم الشبيه بالهليوم و تأثير دوال توزيع الطاقات المختلفة على هذا الحساب وأخيرا مناقشة النتائج.

أخيرا، سنختم المذكرة بخاتمة عامة أين سيتم من خلالها تسجيل أهم النقاط التي تم التعرض لها في هذا العمل.

مراجع

[1] C.K. Birdsall and A.B. Langdon.Plasma Physics via Computer Simulation. Institute of Physics (IOP), Series in Plasma Physics, (1991).

[2] Francis Filbet.Contribution à l‘analyse et la simulation numérique de l‘équation deVlasov. PhD thesis, Université Henri Poincaré - Nancy I, (2001).

[3] A.H. Gabriel and C. Jordan, Interpretation of solare Helium-like ion line intensities, Mon. Not.R. Astron. Soc., 145, 241 (1969).

[4] C. Jordan, The ionization equilibrium of element between C and Ni, Mon. Not. R. Astron. Soc., 142, 501 (1969).

[5] J. Franco and E. Daltbuit, On collisional ionization rate coefficients, NASA, Volume 2, (1978).

[6] E.H. Guedda, Contribution à l’étude des structures atomiques et processus élémentaires dans les plasmas: Applications aux hydrogénoïdes et aux héliumoïdes, thèse de doctorat, (université Badji Mokhtar Annaba, (2006).

[7] J. Rentsch. J. Jaus, K. Roth and R. Preu, ―Economical and ecological aspects of plasma processing for industrial solar cell fabrication‖, 31th IEEE Photovoltaic Specialists Conference pp, 931- 934, (2005).

[8] D. Porquet, J. Dubau and N. Grosso, He-like ions as practical astrophysical plasma diagnostics: from stellar coronae to active galactic nuclei, Space. Sci. Rev., 157, 103 (2010).

[9] S. B. Hansen and A. S. Shlyaptseva, Effects of the electron energy distribution function on modeled x-ray spectra, The American Physical Society (2004).

[10] R. W. Harvey, V. S. Chan, S. C. Chiu, T. E. Evans, M. N. Rosenbluth, and D. G. Whyte, Phys. of Plasmas 7, 4590 (2000).

[11] P. Choi, C. Deeney, and C.S. Wong, Physics Letters A 128, 80 (1988).

[12] J. Abdallah, Jr., A.Ya. Faenov, D. Hammer, S.A. Pikuz, G. Csanak, and R.E.H. Clark, Phys. Scr. 53, 705 (1996).

[13] S. B. Hansen and A. S. Shlyaptseva, Physical Review E 70, 36402 (2004).

[14] A.S. Shlyaptseva, S.B. Hansen, V.L. Kantsyrev, D.A. Fedin, N. Ouart, K.B. Fournier, and U.I. Safronova, Phys. Rev. E 67, 026409 (2003).

الفصل الأول:

مفاهيم أساسية حول البلازما الساخنة

1-1 مقدمة

اكتشفت البلازما في القرن العشرين وبالضبط عام 1928[1], وبعد خمسين سنة تقريبا تم تحديد معالمها. فالبلازما كلمة اغريقية اطلقت على الغاز في حالة تأين وهي الحالة الرابعة للمادة كونها تختلف عن الحالة الصلبة,السائلة والغازية , وهي تشكل حوالي 99% من المادة المعروفة, كما أن بعض الكواكب تشكل البلازما أغلب مادتها. في المصطلحات الحديثة يشير مصطلح البلازما إلى غاز محايد كهربائيا متأين جزئيا أو كليا ذات خصائص مختلفة جدًا.

سيتم التطرق في هذا الفصل للبلازما الساخنة المنتجة والطبيعية ونماذج التوازن.

2-1 البلازما الساخنة المنتجة داخل المخبر

البلازما الساخنة (البلازما الحرارية) هي بلازما تامة التأين وتعد الوسط الملائم الذي يمكن أن يحدث فيه الاندماج النووي. لقد كان الإتحاد السوفيتي سبّاقا في إنشاء مفاعلات التوكاماك الذي تتراوح فيه درجة الحرارة بين المئات إلى عدة ملايين كالفن ,ثم تبعته دول أخرى في هذا المضمار نذكر مفاعل البلازما الاندماجي مثل جهاز JET الموجود ببريطانيا,TFTR بالولايات المتحدة,JT-60 باليابان والعديد من الأجهزة ذات الأنظمة المختلفة مثل نظام الاحتواء المغناطيسي للبلازما الذي يستخدم مغانط ضخمة و نظام الاحتواء القصوري الذاتي الذي يعتمد على أشعة الليزر ,في كثير من الدول التي يعمل على تطويرها لأجل الحصول على الطاقة الكهربائية بشكل اقتصادي من التفاعلات الاندماجية [1].

1-2-1 إنتاج البلازما

يمكن إنتاج البلازما برفع درجة حرارة المادة أين يتم الحصول على تأين كسري مرتفع بشكل معقول. في ظل ظروف التوازن الديناميكي الحراري، درجة التأين و درجة حرارة الإلكترون ترتبطان ارتباطًا وثيقًا. يتم إعطاء هذه العلاقة من خلال معادلة Saha.

يمكن أيضًا إنتاج البلازما من خلال عمليات التأين التي ترفع درجة التأين أعلى بكثير من قيمة توازنها الحراري, هناك طرق عديدة ومختلفة لتكوين البلازما في المختبر. واعتمادًا على الطريقة, قد تكون للبلازما كثافة عالية أو منخفضة، درجة حرارة عالية أو منخفضة، قد تكون ثابتة أو عابرة أو مستقرة أو غير مستقرة إلخ... .

فيما يلي وصف موجز يتم من خلاله تقديم أكثر للعمليات المعروفة للتأين الضوئي والتفريغ الكهربائي في الغازات.

- **في عملية التأين الضوئي:** يحدث التأين عن طريق امتصاص الفوتونات الساقطة التي تساوي طاقتها التأين أو تفوق طاقتها إمكانية امتصاص الذرة. يتم تحويل الطاقة الزائدة للفوتون إلى طاقة حركية الزوج إلكترون- أيون المتكون. على سبيل المثال، الطاقة الكامنة للتأين للإلكترون الخارجي للأكسجين الذري هي13.6 ev، والتي يمكن توفيرها عن طريق إشعاع بطول موجة أصغر من حوالي 91 nm، أي في الأشعة فوق البنفسجية البعيدة. يمكن أيضًا أن يكون التأين ناتجًا عن الأشعة السينية أو أشعة جاما، والتي لها أطوال موجية أصغر بكثير.
- **تفريغ الغاز**(في التفريغ الكهربائي للغاز)**:** يتم تطبيق مجال كهربائي عبر الغاز المتأين، مما يسرع الإلكترونات الحرة حيث ينتج طاقات عالية بما يكفي لتأين ذرات أخرى عن طريق الاصطدامات. إحدى

سمات هذه العملية هي أن ينقل المجال الكهربائي المطبق الطاقة بشكل أكثر كفاءة إلى الإلكترونات من الأيونات الثقيلة نسبيًا.

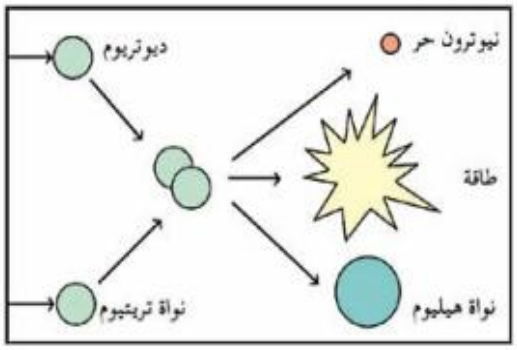
عندما يتم إيقاف تشغيل المصدر المؤين، ينخفض التأين تدريجيا بسبب إعادة التركيب حتى تصل إلى قيمة التوازن بما يتوافق مع درجة حرارة الوسط. في المختبر، تحدث إعادة الدمج عادة بسرعة كبيرة بحيث تختفي البلازما تمامًا في جزء صغير من الثانية.

فيما يلي نعرض أهم مجالات العملية التطبيقية للبلازما:

2-2-1 انصهار نووي حراري محكوم

أهم تطبيق للبلازما من صنع الإنسان هو في السيطرة على تفاعلات الاندماج النووي الحراري ، والتي تنطوي على إمكانات هائلة لتوليد الطاقة.
الاندماج النووي هو العملية التي يتم بواسطتها إتحاد النوى لتكوين نواة أثقل، وتكون الكتلة النهائية الكلية أقل من الكتلة الأولية, ويظهر فرق الكتلة (Δm) على شكل طاقة (E) وفقًا لقانون أينشتاين الشهير

$E = (\Delta m)\, c^2$، حيث تشير c لسرعة الضوء, و تفاعل الاندماج النووي هو مصدر الطاقة في النجوم بما فيها الشمس. في الاندماج النووي للهيدروجين ، تشتمل التفاعلات الرئيسية على نظائر الديوتيريوم (H_2) والتريتيوم (H_3) للهيدروجين[2] الشكل(1-1).



الشكل(1-1): الاندماج النووي [3].

المشكلة الأساسية في تحقيق الاندماج هو توليد بلازما عند درجات حرارة عالية جدا وتبقى جزيئاتها معًا لفترة طويلة تكفي لعدد كبير من تفاعلات الاندماج. و الحاجة لدرجات حرارة عالية تأتي من حقيقة أنه من أجل الخضوع للانصهار، يجب أن تقترب النوى الموجبة الشحنة من بعضها، والتي تتطلب طاقة حركية كافية للتغلب على التنافر الإلكتروستاتيكي كولوم, ويمكن تقديرها فقط للجسيمات الساقطة ذات الطاقات فوق 10 keV على الأقل. وهذا يعني أن البلازما يجب أن تحتوي على درجات حرارة تساوي 10^8K. تم اقتراح وبناء العديد من أنواع مخططات الحبس (الاحتواء) لتكوين المجال المغناطيسي, ويمكن تصنيف الجهود التجريبية الرئيسية لتحقيق ظروف الاندماج للبلازما في أربعة أنظمة:

(أ) أنظمة مفتوحة (مرايا مغناطيسية)؛ (ب) أنظمة مغلقة (توروس)؛ (ج) أنظمة خطية؛ (د) اندماج الحبيبات بالليزر.

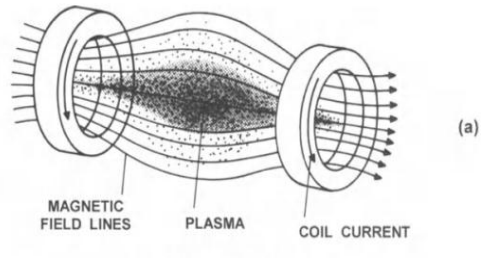
تختلف الأنظمة الحلقية الرئيسية الأربعة في طريقة تحريفها خطوط المجال المغناطيسي.

أ) أنظمة مفتوحة (مرايا مغناطيسية): هي أجهزة خطية ذات مجال مغناطيسي محوري تبقي الجسيمات بعيدة عن الحائط، ومع المرايا المغناطيسية (مناطق من خطوط المجال المغناطيسي المتقاربة) في النهايات لتقليل عدد الجسيمات التي تتسرب من كل طرف الشكل(1-2).

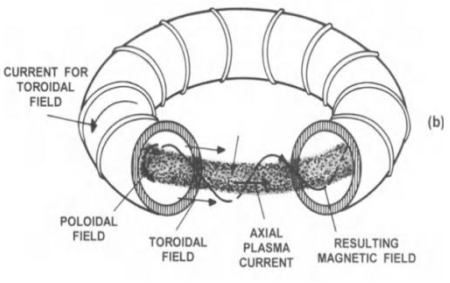
ب) أنظمة مغلقة (توروس): النجوم (حيث يتم إنتاج خطوط المجال بواسطة موصلات حلزونية خارجية)، توكاماك (التي يتم في تراكب مجال poloidal الناتج عن تيار بلازما داخلي على المجال الحلقي), الأقطاب المتعددة (التي لها خطوط مجالها المغناطيسي في المقام الأول في اتجاه poloidal وتنتج بواسطة الموصلات الداخلية)، و Astron (حيث تقوم حزم الجسيمات النسبية الداخلية بتعديل حقل المرآة في شكل له مناطق حبس مستقرة مع إغلاق خطوط القوة) الشكل (1-3).

ج) أنظمة خطية (Linear θ pinch**):** تيار بلازما في اتجاه خطي وينتج المجال المغناطيسي الطولي قوة تضغط على منطقة المقطع العرضي للبلازما الشكل(1-4).

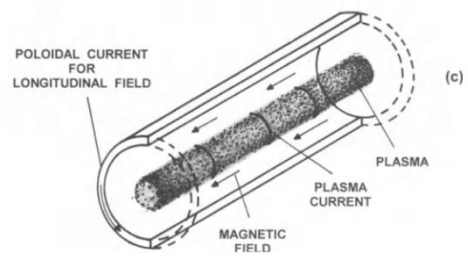
د) اندماج الحبيبات بالليزر: مخطط إشعال تفاعل الاندماج باستخدام الليزر النبضي يتكون من تركيز أشعة الليزر المتقاربة على حبيبة صغيرة من المادة الصلبة مادة الديتيريوم-تريتيوم تنتج تسخينًا مثاليا سريعًا للبلازما، يليه توسع في الغلاف الساخن المحيط و ضغط قلب الحبيبات بواسطة الارتداد الشكل(1-5).[2]



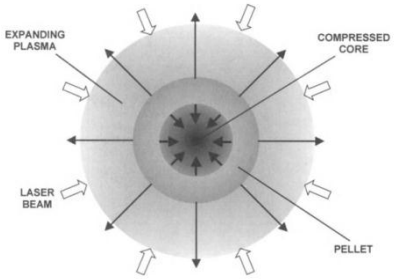
الشكل(1- 2): نظام المرآة المغناطيسية [2].



الشكل(1- 3): التوكاماك [2].



الشكل(1- 4): قرصة $\boldsymbol{\theta}$ الخطية [2].



الشكل(1- 5): اندماج الحبيبات بالليزر [2].

بالإضافة إلى مشاكل تسخين البلازما وحبسها، يجب الانتباه إلى فقدان الطاقة عن طريق الإشعاع (في الغالب إشعاع الإلكترون وإشعاع السيكلوترون الإلكتروني). و هذه الإشعاعات تشكل مشكلة خطيرة في الحفاظ على الاندماج الذاتي للجهاز و لتوليد الطاقة عن طريق الاندماج أكثر مما هو مطلوب للتسخين و حصر البلازما، ولتوفير خسائر الإشعاع، يتم فرض شرط على كثافة البلازما (N) ووقت الحبس (T)، أيضًا

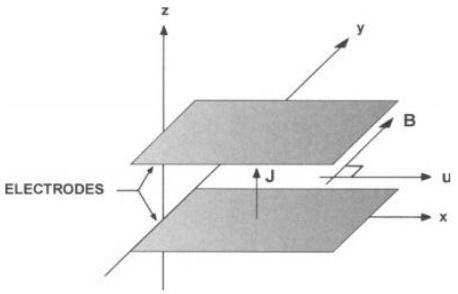
كما في درجة الحرارة اتضح أن رقم المنتج يجب أن يكون أعلى من الحد الأدنى للقيمة، على سبيل المثال: يقدر بحوالي 10^{20} m^{-3} s للديتيريوم-التريتيوم (مع $T> 10^7$ K) وحوالي 10^{22} $m^{-3}s$ للديتيريوم - الديتيريوم (مع $T> 10^8$ K)، و تُعرف هذه الحالة باسم معيار لوسون[2].

يمكن تحقيق الاندماج المتحكم فيه أيضًا من خلال وجود عدد كبير من كثافة جزيئات البلازما الساخنة المحصورة في فترة زمنية قصيرة، أو من خلال وجود عدد أقل من كثافة الجسيمات محصورة لفترة أطول من الزمن. لهذا السبب، تعمل بعض تجارب الاندماج في نظام الكثافة العالية ووقت الحبس القصير باستخدام وضع التشغيل النبضي.

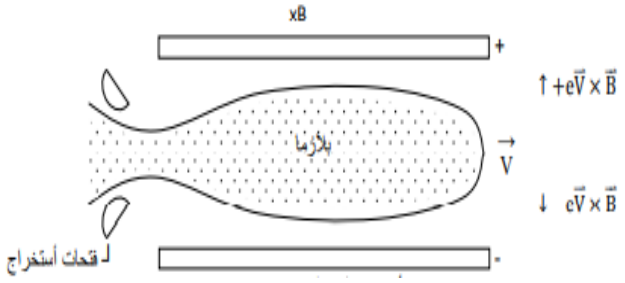
بما أن الاندماج النووي الخاضع للرقابة يمكن أن يوفر مصدرًا غير محدود تقريبًا من الطاقة، فهو بالتأكيد أحد أهم التحديات العلمية التي يواجهها الإنسان اليوم، وإنجازه سيكون له تأثير هائل على حضارتنا[2].

3-2-1 المولد المغناطيسي الهيدروديناميكي

يقوم مولد الطاقة المغناطيسي الهيدروديناميكي (MHD) بتحويل الطاقة الحركية لبلازما كثيفة تتدفق عبر مجال مغناطيسي إلى طاقة كهربائية، مبدأها الأساسي بسيط للغاية, يقوم على افتراض أن البلازما تتدفق بسرعة $\vec{u}$ (على طول الاتجاه $\vec{x}$) عبر مجال مغناطيسي مطبق $\vec{B}$ (في اتجاهها)، كما هو موضح في الشكل (1-6). تتسبب قوة لورنتز ($q(\vec{u} \times \vec{B})$) في انجراف الأيونات للأعلى (في اتجاه $\vec{z}$) والإلكترونات للأسفل بحيث إذا تم وضع أقطاب كهربائية في جدران القناة وتوصيلها بمنفذ خارج الدائرة، و من ثم كثافة التيار $\vec{J} = \sigma\overrightarrow{E_{ind}} = \sigma(\vec{u} \times \vec{B})$ (حيث $\overrightarrow{E_{ind}}$ هو المجال الكهربائي المستحث) يتدفق عبر تيار البلازما في اتجاه $\vec{z}$. هذه الكثافة الحالية تنتج بدورها كثافة القوة $\vec{J} \times \vec{B}$ (في الاتجاه $\vec{x}$) ، مما يؤدي إلى إبطاء تدفق البلازما. والنتيجة النهائية هي تحويل بعض الطاقة الحركية للبلازما التي تدخل للمولد إلى طاقة كهربائية يمكن تطبيق حمولة خارجية عليها[2].(أنظر الشكل (1- 6) والشكل (1-7)[2, 4]).



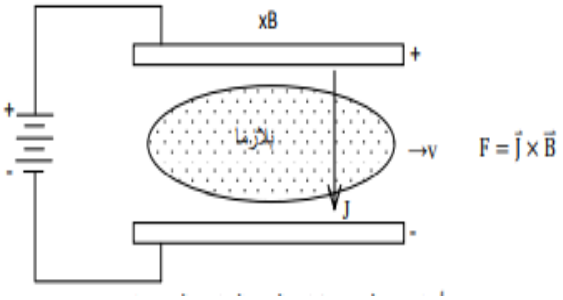
الشكل (1- 6): رسم تخطيطي يوضح المبدأ الأساسي لمولد الطاقة المغنطيسية الهيدروديناميكية [2].



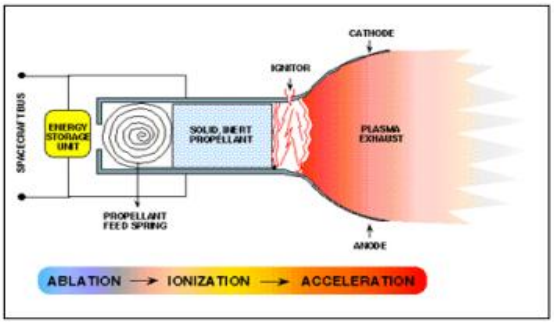
الشكل (1- 7): أساس عمل مولدات MHD [4].

4-2-1 دفع البلازما

تعتمد أنظمة الدفع بالبلازما لمحركات الصواريخ على العملية التي تحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة حركية للبلازما، أي عكس عملية مولد MHD, ويتم إنجاز محرك صاروخ البلازما من خلال وجود كلاهما كهربائي والمجالات المغناطيسية المطبقة عموديًا على بعضها البعض عبر البلازما (انظر الشكل (1-8)). تتدفق كثافة التيار الناتج $\vec{J}$ في اتجاه ينتج عن المجال $\vec{E}$ والمطبق قوة $\vec{J}x\vec{B}$ لكل وحدة حجم، والتي تسرع خروج البلازما من الصاروخ . قوة رد الفعل المصاحبة بسبب الحفاظ على الزخم، تسرع الصاروخ في الاتجاه المعاكس لتدفق البلازما. يجب أن تكون البلازما المقذوفة دائمًا محايدة، وإلا سيصبح الصاروخ مشحونًا بجهد كهربائي كبير, ومن الخصائص المهمة لأنظمة الدفع بالبلازما أنها قادرة على توليد قدر معين من الدفع (على الرغم من صغرها) لفترة زمنية طويلة جدًا، على عكس أنظمة الدفع الكيميائية، حيث القوة التي يوفرها محرك صاروخ البلازما متواضعة جدًا للتغلب على مجال جاذبية الأرض. والصواريخ الكيميائية يجب أن تستخدم كأول مرحلة أي نظام دفع البلازما من أجل إنتاج قيم عالية من الدفع لترك الجاذبية الأرضية. بلازما محرك الصاروخ مناسب للفضاء في السفر الطويل بين الكواكب وبين النجوم [2] الشكل(1-9).



الشكل (1- 8):أساس عمل محركات الدفع النفاث بالبلازما [4].



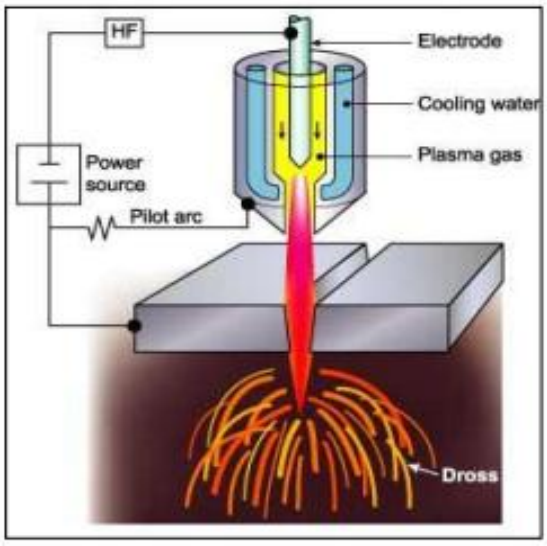
الشكل (1- 9): جهاز الدفع الصاروخي بالبلازما [3].

5-2-1 أجهزة البلازما

هناك عدد من التطبيقات العملية الأخرى لفيزياء البلازما بالإضافة إلى الانصهار المتحكم فيه، وتحويل طاقة MHD، و دفع البلازما نذكر منها :

- محول الطاقة الحرارية: هو جهاز يستخدم بلازما السيزيوم بين قطبين لتحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة كهربائية. يتم تسخين الكاثود، بحيث تنبعث الإلكترونات من السطح، ويتم تبريد القطب الموجب. بسبب وجود بلازما السيزيوم، يمكن إنتاج تيارات كهربائية كبيرة جدًا على حساب جزء كبير من الطاقة الحرارية المطبقة على الكاثود.
- من الأمثلة على التطبيقات التي تتضمن تصريفات الغاز: الأنابيب الفلورية العادية وأضواء النيون المستخدمة للإضاءة وللإشارات ، عدد من الأنابيب المتخصصة مثل ثيراترونات الهيدروجين والإشعال، والتي تستخدم للتبديل وتصريفات القوس أو نفاثات البلازما، والتي هي مصدر درجات

الحرارة مرتان أو أكثر بارتفاع أعلى للهب الغاز الأكثر سخونة والذي يستخدم فيه المعادن لقطع وصهر ولحم المعادن[2] الشكل(1- 10).

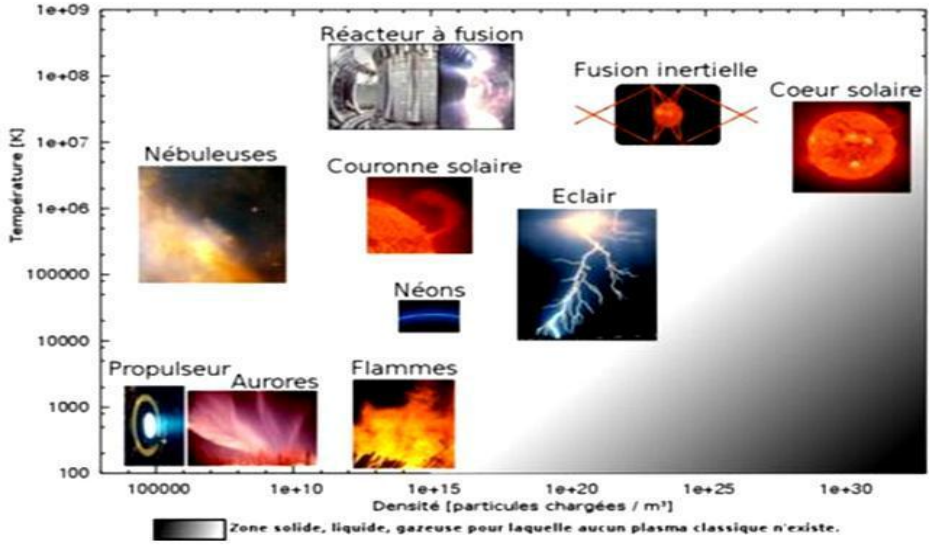


الشكل(1- 10): شكل يوضح عملية قطع المعدن بتقنية البلازما[3].

1-3 البلازما الطبيعية

تعد الشمس أول ما شوهد من البلازما بالنسبة للبشر منذ آلاف السنين قبل اكتشاف العالم لانغميور (I.Langmuir) لمصطلح البلازما الذي استخدم للمرة الأولى سنة 1928م للدلالة على غاز مضيء يحوي إلكترونات وعدة أنواع من الأيونات وبعض الذرات المتعادلة كهربائيا. لقد كانت الملاحظات الأولى حول الغاز المؤين حول الأرض قد درست من قبل O.Heaviside منذ أكثر من 1000 سنة حيث افترض وجود طبقة حول الأرض وعلى ارتفاع 300-400 Km ذات غاز مؤين عالي الكثافة تعكس أمواج الراديو ,وقد عرفها باسم الأيونوسفير, وقدم شرحا يفيد أن مصدر هذه الطبقة هو الأشعة فوق البنفسجية والأشعة X الصادرة عن الشمس. وقد بينت الأبحاث أن 99% من الكون في حالة بلازما ,بدءًا من الشمس والنجوم الساخنة بما يكفي لتكون تقريبا متأينة بالكامل مع كثافة هائلة ($N_e \simeq 10^{33}\,m^{-3}$) إلى كواكب ورياح شمسية. وابتداء من علو حوالي 60 Km من الشمس ,تغمر الغلاف الجوي مجموعة متنوعة من الإشعاع فوق البنفسجي الذي يمتصه الغاز الموجود في الغلاف الجوي, و خلال هذه العملية تستقبل أعدادا كبيرة من جزيئات الهواء و الذرات ما يكفي من الطاقة لتصبح متأينة, وينشأ عن الإلكترونات الحرة والأيونات الموجبة تشكل طبقة الأيونوسفير. إن الحد الأقصى لكثافة التأين تحدث في المنطقة F من الأيونوسفير في حوالي علو 350 Km, حيث $N_e \simeq 10^{12}\,m^{-3}$ و $N_n \simeq 3.3\times10^{14}\,m^{-3}$, وبالتالي تكون درجة التأين في حدود 10^{-2}. عند ارتفاعات أعلى من ذلك, يكاد يكون الهواء متأينا تماما, ويهيمن على حركة الجسيمات المشحونة الحقل المغناطيسي للأرض, في منطقة تعرف باسم المغنيتوسفير [1, 5].

إذن البلازما الحالة الغالبة في هذا الكون الفسيح لأن أغلبه متأين, ويمكن تقسيمها إلى (انظر الشكل (1-11))[6]:



الشكل(1- 11): مختلف أشكال البلازما [7].

1-3-1 بلازما طبيعية كونية

مثل الشمس, النجوم, الرياح الشمسية, سديم المجرات, المذنبات, الفراغ الكوني..., وسنخص الدراسة عند الشمس.

1-1-3-1 الشمس

الشمس هي أقرب نجم لنا والتي عليها يعتمد وجود الحياة على الأرض بشكل أساسي، وهي ظاهرة للبلازما, طاقتها الناتجة مشتقة من تفاعلات الاندماج النووي الحراري لتشكيل بروتونات أيونات الهليوم في أعماقها الداخلية، حيث تتجاوز درجات الحرارة 1.2×10^7 K. إن ارتفاع درجة الحرارة من الداخل وما يترتب على ذلك من ردود الفعل للتفاعل النووي الحراري تبقي الشمس غازية بأكملها. بسبب كتلتها الكبيرة (2×10^{30} Kg)، تكون قوة جاذبية الشمس كافية لمنع هروب الجميع حتى الجسيمات الأكثر نشاطًا، وبالطبع الإشعاع القادم من الحرارة[2].

أ) البلازما الشمسية

لا يوجد سطح حدودي يحد الشمس. الجزء المرئي منها يُعرف باسم الغلاف الجوي الشمسي، والذي ينقسم عموما إلى ثلاث مناطق أو طبقات. الغلاف الضوئي، مع درجة حرارة حواليK 6000، يشمل القرص المرئي، الطبقة التي تصبح فيها الغازات غير شفافة، ويبلغ سمكها بضع مئات من الكيلومترات. يحيط الفوتوسفير حلقة ضاربة إلى الحمرة تسمى الكروموسفير، يبلغ سمكها حوالي 10000 Km، التي فوقها ترتفع النتوءات الشبيهة باللهب مع درجات حرارة تصل إلى 100000K يحيط بالكروموسفير بلازما ساخنة ضعيفة، تمتد ملايين الكيلومترات في الفضاء، والمعروفة باسم الهالة. انحدار يمتد تدرج درجة الحرارة من الكروموسفير إلى الهالة الأكثر سخونة، حيث تتجاوز درجة الحرارة 10^6 K.

تمتلك الشمس مجالًا مغناطيسيًا متغيرًا على سطحها عادة يصل إلى 10^4 tesla، ولكن في مناطق البقع الشمسية (مناطق الغازات الأكثر برودة نسبيًا) يرتفع إليها المجال المغناطيسي الشمسي حوالي 0.1 tesla [2].

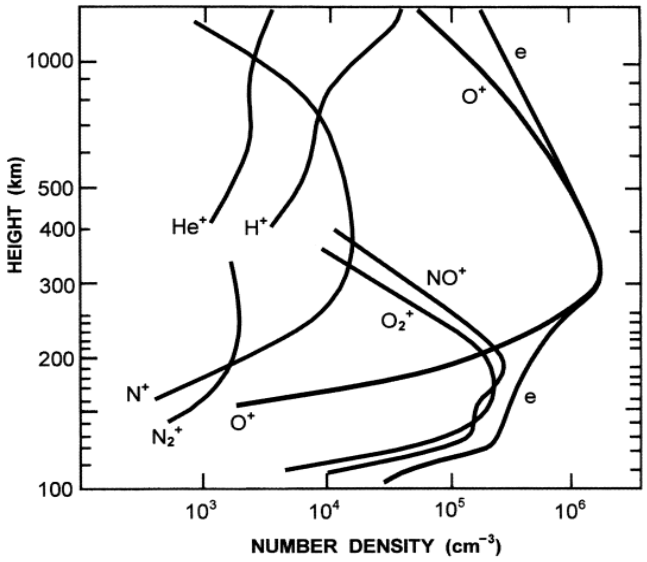
ب) الرياح الشمسية

تتكون الرياح الشمسية بشكل أساسي من البروتونات والإلكترونات، تنبعث باستمرار من الشمس عند سرعات عالية جدًا في الفضاء بين الكواكب، نتيجة السرعة الأكثر من سرعة الصوت تتوسع الهالة الشمسية الساخنة. يميل المجال المغناطيسي الشمسي إلى البقاء مجمد في البلازما المتدفقة بسبب الموصلية العالية جدًا [2].

2-3-1 بلازما طبيعية أرضية

1-2-3-1 الأيونوسفير

يعتبر الأيونوسفير البطانية الطبيعية الكبيرة من البلازما في الغلاف الجوي، والتي تغلف الأرض من ارتفاع حوالي 60Km إلى عدة آلاف الكيلومترات، تسمى الأيونوسفير. يتم إنتاج الجسيمات المتأينة في الأيونوسفير خلال النهار من خلال امتصاص الأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية الشديدة. عندما يخترق الإشعاع المؤين من الشمس أعماق الغلاف الجوي للأرض، فإنه يواجه كثافة أكبر من غاز الجسيمات، وتنتج المزيد من الإلكترونات لكل وحدة حجم. ومع امتصاص الإشعاع في هذه العملية، هناك ارتفاع لمعدل إنتاج الإلكترون يصل إلى الحد الأقصى. يقدم (الشكل 1-12) بعض المعلومات عن التركيز النسبي وتوزيع الإلكترونات والأيونات الموجبة الرئيسية على الارتفاع [2].



الشكل (1- 12): توزيع ارتفاع الإلكترونات وأيونات موجبة للغلاف الجوي المتأين أثناء النهار[2].

1-3-2-2 الشفق القطبي

الشفق القطبي هو ظاهرة مثيرة للاهتمام تحدث في المناطق القطبية الأيونوسفيرية. يتكون من الإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث من الأنواع الموجودة في الغلاف الجوي والناجم عن طاقة جسيمات من أصل شمسي وكوني تخترق الغلاف الجوي على طول خطوط المجال المغنطيسي الأرضي بالقرب من القطبين[2].

1-4 نموذج التوازن

لقد سعى العلماء منذ بداية القرن العشرين لمعرفة معاني البلازما, ولدراستها بشكل صحيح اقترحوا نماذج تعتمد على عدة معايير ومن أهمها كثافة ودرجة حرارة الإلكترونات, وتتمثل هذه النماذج التقريبية في نموذج التوازن الترموديناميكي المحلي, النموذج التاجي و نموذج التوازن التصادمي الإشعاعي الثابت [8, 9].

1-4-1 نموذج التوازن الترموديناميكي المحلي (ETL)

يطبق هذا النموذج على أنواع معينة من البلازما الثابتة والتي تمتاز بكثافة إلكترونية عالية ودرجة حرارة منخفضة نسبيا, ومن خلاله يتم تحديد كثافة الإسكان في جميع المستويات الذرية في عملية الإثارة التصادمية.

نقول أن البلازما في حالة توازن ترموديناميكي محلي لما يكون معدل الإثارة التصادمية في المستويات الذرية يخضع لمبدأ التوازن في غياب الانبعاث التلقائي وذلك عندما تصبح كثافة الإلكترونات عالية($N_e > 10^{-23}$ cm^{-3}). وفي هذه الحالة يتم استخدم قوانين التوازن الإحصائي لبولتزمان من أجل حساب نسبة إسكان المستويات الذرية للأيون. ولتحديد توزيع درجة التأين للمستويات تستخدم معادلة [8, 9, 10]Saha, من الشكل:

$$\frac{N_i^{(Z,N-1)} N_e}{N_i^{(Z,N)}} = \frac{2g_i^{(Z,N-1)}}{g_i^{(Z,N)}} \frac{(2\pi m_e k_\beta T)^{3/2}}{h^3} e^{-\frac{(E_{ion}-\delta E)}{k_\beta T}} \qquad (1\text{-}1)$$

حيث:

$N_i^{(Z,N-1)}$: عدد الأيونات في المستوي الطاقوي i.

$N_i^{(Z,N)}$:عدد الذرات في المستوي الطاقوي i.

N_e: كثافة الإلكترونات.

$g_i^{(Z,N-1)}$: تمثل الوزن الإحصائي للأيون في المستوي الطاقوي i.

$g_i^{(Z,N)}$: تمثل الوزن الإحصائي للذرة في المستوي الطاقوي i.

m_e: كتلة الإلكترون.

k_{β}: ثابت بولتزمان.

T: درجة الحرارة.

h: ثابت بلانك.

E_{ion}: طاقة التأين للأيون.

δE: الفرق الطاقوي.

1-4-2 النموذج التاجي (CM)

يطبق هذا النموذج على البلازما ذات درجة حرارة عالية وكثافة منخفضة نسبيا, وهو أمر شائع في الفيزياء الفلكية مثلا في دراسة الهالة الشمسية, وكذلك في الأجهزة المخبرية مثل التوكوماك ..., ونظرا لعدم وجود التوازن الحراري نتيجة درجة الحرارة العالية والكثافة المنخفضة نسبيا تستخدم قوانين أنسب من قوانين بولتزمان و ساها لوصف ظاهرة الإثارة والتأين .

إن هذا النموذج يصف الحالات المستقرة للبلازما (أغلب الأيونات في الحالة الأساسية) والتي تتلخص في العمليات التالية: الإثارة التصادمية, الإثارة الضوئية (الإشعاعية), التأين وإعادة التركيب الإشعاعي ثنائي الإلكترون [8, 10, 11, 12].

1-4-3 نموذج التوازن التصادمي الإشعاعي الثابت (CR)

يعد هذا النموذج وسيط بين النموذجين السابقين(نموذج التوازن الترموديناميكي المحلي (ETL) والنموذج التاجي (CM) إذ يطبق على بلازما كثيفة ($10^{-12}\mathrm{cm}^{-3} \leq N_e \leq 10^{-22}\mathrm{cm}^{-3}$) ومعتدلة مما لا يمكن تجاهل العمليات التصادمية و الإشعاعية, مثل البلازما المنتجة في المختبر بواسطة أشعة الليزر.

ويتم تحديد كثافة الإسكان من المستويات الذرية من خلال المعادلة التالية [8, 9, 10, 13]:

$$\frac{dN}{dt} = N_j \sum_{k=1}^{n_s} W_{jk} - \sum_{i=1}^{n_s} N_i W_{ij} \qquad (1\text{-}2)$$

حيث

N_j: كثافة الإسكان في الحالة j.

N_i: كثافة الإسكان في الحالة i.

n_s: العدد الكلي للحالات.

W: مصفوفة الانتقال التصادمي الإشعاعي.

وتعطى عناصر مصفوفة الانتقال التصادمي الإشعاعي بالعلاقة التالية[14]:

$$W_{ij} = C_{ij} + R_{ij} + I_{ij} + T_{ij} + \Gamma_{ij} + D_{ij} \qquad (1\text{-}3)$$

حيث أن:

C_{ij}: معامل الإثارة.

R_{ij}: معامل التأين التصادمي.

I_{ij}: معامل التركيب الثلاثي الأجسام.

T_{ij}: معامل التركيب الإشعاعي.

Γ_{ij}: معامل التأين التلقائي.

D_{ij}: معدل إعادة تركيب ثنائي الإلكترون.

4-1 خلاصة

تضمن هذا الفصل البلازما الساخنة المنتجة داخل المخبر و هي بلازما تامة التأين وتعد الوسط الملائم الذي يمكن أن يحدث فيه الاندماج النووي, ثم إلى تقسيمات البلازما الطبيعية إلى بلازما كونية داخل النظام الشمسي والموجودة في الكون مثل الشمس والنجوم وغيرها وأخرى أرضية وهي محصورة على مستوى الكرة الأرضية, وأخيرا تم التطرق لبعض نماذج التوازن المعمول بها في البلازما.

المراجع

[1] وليد مصطفى صهيوني, مقدمة في فيزياء البلازما, سلطنة عمان ,190-193, يونيو.(2006).

[2] J.A. Bittencourt, Fundamentals of Plasma Physics, Springer-Ver1ag, New York ,p.13- 25, (2004).

[3] تطبيقات فيزياء البلازما pdf موقع الفيزياء.كوم .pdf .

[4] انتصار هاتو, محاضرات في فيزياء البلازما موقع الفيزياء.كوم .pdf .

https://www.physics-pdf.com/2018/05/Lectures-books-plasma-physics-pdf.html

[5] S. Chandrasekhar, Principles of Stellar Dynamics (Chicago: University of Chicago Press, (1942).

[6] J.J. Thomson, Philosophicall Magazine, 44,p.293,(1897).

[7] Seaton, M. J, Mon. Not. Roy, Astr. Soc. 119, 81 (1959).

[8] D. Salzmann, Atomic Physics in Hot Plasmas, Oxford University Press, New york, (1998).

[9] F.G. Dortan, Thèse de doctorat, Université Paris XI, (2003).

[10] A.K. Ferouani, Effets d'électrons suprathermiques directifs sur le diagnostic en température de plasmas chauds basé sur le rapport d'intensité des raies d'émission d'ions héliumoïdes, thèse de doctorat, (Université Abou Bekr belkaid de Tlemcen, Juin (2013).

[11] E.H. Guedda, Contribution à l'étude des structures atomiques et processus élémentaires dans les plasmas: Applications aux hydrogénoïdes et aux héliumoïdes, thèse de doctorat, université Badji Mokhtar Annaba, (2006).

[12] S. Dilmi, Etude de quelques processus atomiques affectant la cinétique atomique : Application à l'ionisation de l'hélium neutre et quelques ions héliumoïdes, thèse de doctorat, université Badji Mokhtar , Annaba, (2014).

[13] F.B. Rosmej, A.Escarguel, C.Brault, Th.Pierre, R.Stamm and K.Quotb, Neutral helium line emission for edge plasma conditions, Journal of Nuclear Materials 337–339 (2005).

[14] V.P.Shevelko and L.A.Vainshtein, Atomic Physics for hot plasmas, London, (1993).

الفصل الثاني:

العمليات الذرية الشائعة في البلازما الساخنة

1-2 مقدمة

إن التفاعل بين الجسيمات (الإلكترونات, الأيونات, الذرات, الفوتونات) من أهم العمليات الذرية التي تحدث في البلازما. وينتج عن هذا التفاعل عدة عمليات ذرية حيث تصنف هذه الأخيرة إلى عمليات إشعاعية و أخرى تصادمية. وسنتعرف في هذا الفصل على بعض العمليات الذرية الشائعة في البلازما الساخنة.

2-2 الانتقالات الإشعاعية

تحدث الانتقالات الإشعاعية بين سويات الطاقة التي تتوافق مع الفرق الطاقوي (ΔE) لقانون بلانك, نتيجة التفاعل بين الإشعاع والإلكترونات الذرية و يكون هذا الانتقال مصحوب بامتصاص أو انبعاث للطاقة على شكل إشعاع [1, 2, 3, 4]:

$$\Delta E = E_i - E_j = h\upsilon_{ij} \qquad (2\text{-}1)$$

ΔE: الفرق الطاقوي الموافق للانتقال.

E_j: طاقة المستوى الذري j.

E_i: طاقة المستوى الذري i.

h: ثابت بلانك.

υ_{ij}: تردد الإشعاع.

1-2-2 الامتصاص الإشعاعي: هو عملية إنتقال للطاقة من الوسط الخارجي إلى الذرة أي عندما تمتص(تكتسب) ذرة كمية من الطاقة ($h\upsilon_{ij}$) تثار وتصعد إلى مستوي j طاقته (E_j) أعلى من(E_i) للمستوي i الذي كانت فيه ويمكن تمثيله بالمعادلة التالية [5]:

$$(Z , N) + h\upsilon_{ij} \longrightarrow (Z , N)^* \qquad (2\text{-}2)$$

تمثل (Z , N): ذرة في الحالة الأساسية ,Zعددها الذري ,Nعدد إلكتروناتها.

*(Z , N) : ذرة مثارة.

- احتمال الامتصاص بالنسبة للزمن يعطى بـ:

$$\frac{dp}{dt} = \beta_i \rho(\upsilon) \qquad (2\text{-}3)$$

حيث:

β_i: معامل أينشتاين للامتصاص.

$\rho(\upsilon)$: الكثافة الطيفية للإشعاع.

$n(\upsilon)$: عدد الفوتونات $h\upsilon$.

2-2-2 الانبعاث التلقائي: هو عملية فقدان طاقة بشكل تلقائي للذرة المثارة بدون تأثير خارجي أي عندما تكون ذرة في حالة إثارة (j) تعود إلى المستوى الأساسي (i) وتبعث كمية من الطاقة ($h\upsilon_{ij}$) لتعود لحالة الاستقرار وتمثل بالتفاعل التالي:

$$(Z , N)^* \longrightarrow (Z , N) + h\upsilon_{ij} \qquad (2\text{-}3)$$

-احتمال الانبعاث التلقائي في وحدة الزمن يعطى بـ:

$$\frac{dp}{dt} = A_i \qquad (2\text{-}4)$$

A_i: معامل أينشتاين للانبعاث التلقائي.

2-2-3 الانبعاث المحرض(المحفز): هو عملية فقدان الطاقة من الذرة المثارة تحت تأثير خارجي, أي عندما تكون ذرة في حالة إثارة (j) يمكن أن تمتص كمية من الطاقة ($h\upsilon_{ij}$) وترجع إلى المستوى الأساسي (i) وتبعث كميتين من الطاقة, وتمثل بالتفاعل التالي:

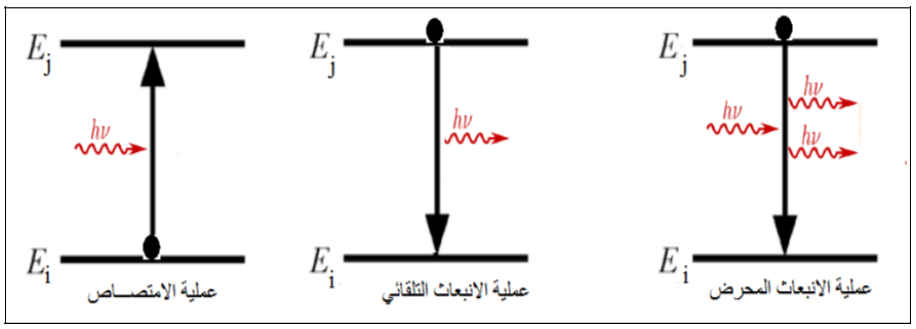
$$(Z , N)^* + h\upsilon_{ij} \longrightarrow (Z , N) + h\upsilon_{ij} + h\upsilon_{ij} \qquad (2\text{-}5)$$

-احتمال الانبعاث المحرض في وحدة الزمن يعطى بـ:

$$\frac{dp}{dt} = \beta_j \rho(\upsilon) \qquad (2\text{-}6)$$

β_j: معامل أينشتاين للانبعاث المحرض.

ويوضح الشكل(2-1) مختلف الانتقالات الإشعاعية التي تحصل على المستوى الذري.



الشكل(2- 1):وصف مختلف الإنتقالات الإشعاعية[5].

➢ **حالة خاصة :**

عند التوازن الحراري معدل الامتصاص يساوي معدل الانبعاث (التلقائي+المحرض) ونكتب:

$$N_i\ \beta_i\rho(\upsilon) = (\beta_i\rho(\upsilon) + A_i)\ N_i \qquad (2\text{-}7)$$

N_i:عدد الذرات في إحدى المستويات الطاقوية.

و الكثافة الطيفية للإشعاع بالنسبة لجميع الترددات (υ)عند نفس درجة الحرارة (T) تعطى بالشكل:

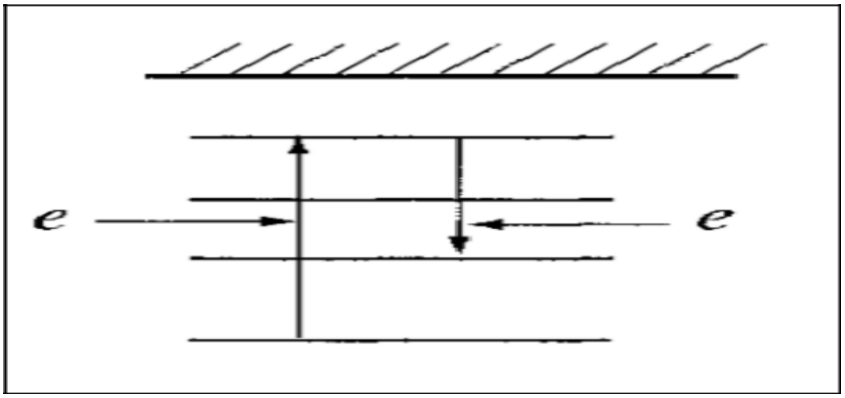
$$\rho(\upsilon) = \frac{8\pi h\upsilon^3}{c^3\left(e^{\frac{h\upsilon}{K_\beta T}} - 1\right)} \qquad (2\text{-}8)$$

حيث إن هذه العلاقات مهمة وتعطينا نظرة أعم عن الانتقالات الإشعاعية وخاصة الامتصاص والانبعاث التلقائي [1, 3, 6].

3-2 الإثارة التصادمية

في حالة الإثارة يعطي الإلكترون الساقط جزءا من طاقته إلى ذرة لتنتقل بذلك إلى حالة أعلى طاقة والعملية العكسية لها هي العودة من الإثارة, وتعطى بالتفاعل التالي[7]:

$$(Z , N) + e \longleftrightarrow (Z , N)^* + e \qquad (2\text{-}9)$$



الشكل(2- 2):عملية الإثارة بالتصادم الإلكتروني والعملية العكسية لها[7].

4-2 التأين بواسطة الإلكترون الصادم

إن التأين بواسطة الإلكترون الصادم يعتبر من أهم عمليات التصادم الإلكتروني لتأين ذرة أو أيون أو جزيء, ولضمان نقل الطاقة وكمية الحركة يجب أن تكون طاقة الإلكترون الوارد أعلى من طاقة التأين للذرة, حيث ينتج عنها زوج أيون-إلكترون حر, ويمكن التعبير عنها [5, 8]بالتفاعل التالي:

$$(Z , N) + e \longrightarrow (Z , N-1) + e + e \qquad (2\text{-}10)$$

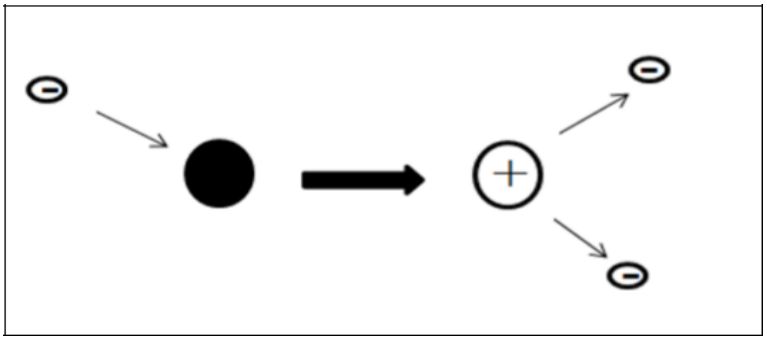
وفي حالة الأيون:

$$X^{z+} + e \longrightarrow X^{(z-1)} + e + e \qquad (2\text{-}11)$$

أما التأين بواسطة الإلكترون الصادم فهو ينقسم إلى نوعين:

- **التأين المباشر:** تحدث عملية التأين بالتأثير الإلكتروني المباشر بين ذرة أو أيون وإلكترون حر, حيث يتشتت الإلكترون الوارد مقتلعا معه إلكترونا من الذرة أو الأيون المستهدف, وهذا يستلزم أن تكون طاقة الإلكترون الوارد أكبر من طاقة(جهد) التأين للذرة. إن الإلكترون المقتلع أثناء عملية التأين يمكن أن يكون من إلكترونات الطبقة الخارجية أو من إلكترونات الطبقة الداخلية, ويعتبر التأين المباشر من أهم العمليات التي تحدث في البلازما الساخنة حيث توجد بها إلكترونات حرة طاقتها عالية جدا قادرة على استخراج الإلكترونات التي تنتمي إلى الطبقات الفرعية الداخلية [8, 9].
- **التأين غير المباشر:** لقد درست هذه العملية منذ منتصف 1960م, حيث تحدث هذه العملية عندما تكون طاقة الإلكترون الوارد عالية, فيثار الإلكترون إلى الطبقة الفرعية الداخلية للذرة أو الأيون المستهدف مما يؤدي إلى الإثارة المضاعفة والتي يمكن أن يتبعها تأين تلقائي, وهذا يتطلب أن تكون طاقة الإلكترون الوارد أكبر من أو مساوية لطاقة التأين الأولى للذرة أو الأيون.

كما تلعب هذه العملية دورا حاسما في تحديد حالة تأين البلازما الساخنة[3, 9].



الشكل(2- 3):عملية التأين بالتصادم الإلكتروني [10].

2-5 التأين التصادمي وإعادة التركيب الثلاثي الأجسام

يعتبر التأين التصادمي وإعادة التركيب الثلاثي الأجسام عمليتان متعاكستان, حيث تحدث هذه العملية الأخيرة عندما يتفاعل إلكترونين من الإلكترونات الحرة مع أيون في نفس الوقت, حيث يلتقط أحدهما من طرف الأيون أما الآخر فينتشر ويحمل معه طاقة إضافية, ونعبر عنهما بالتفاعل التالي [11]:

$$(Z , N-1) + e + e \longleftrightarrow (Z , N) + e \qquad (2\text{-}12)$$

إن احتمال إعادة التركيب الثلاثي الأجسام كبير في البلازما الكثيفة لأن كثافة الإلكترونات $N_e \geq 10^{19} cm^{-3}$ [12].

2-6 التأين الضوئي و إعادة التركيب الإشعاعي

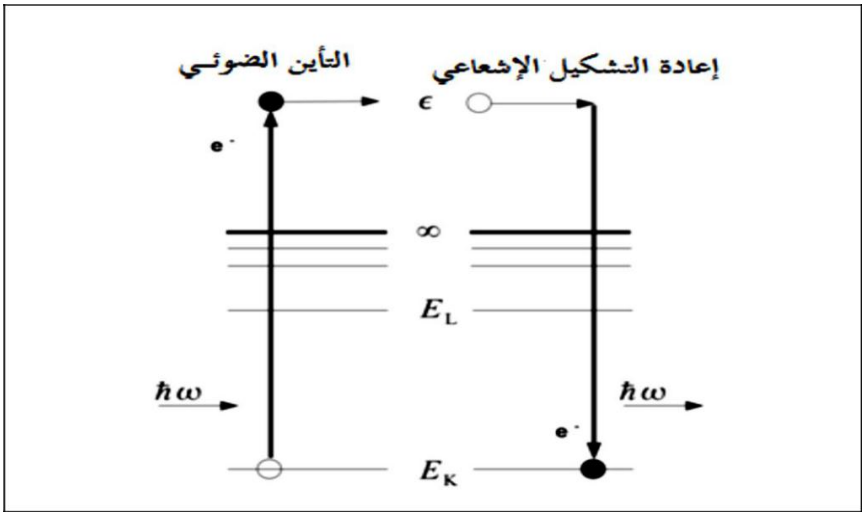
تعد عمليتا التأين الضوئي و إعادة التركيب الإشعاعي إحدى العمليات الأساسية التي تميز تفاعل الإشعاع الكهرومغناطيسي مع الذرات أو الأيونات, واللذان كثيرا ما يستخدما في البحوث المتعلقة بالتفاعلات الإشعاعية و التصادمات الأساسية ولتشخيص البلازما[12]. إن عملية التأين الضوئي والتي هي عبارة عن تحرير إلكترون نتيجة امتصاص فوتون طاقته ($h\upsilon$) أكبر من طاقة تأين الذرة , وأما عملية إعادة التركيب الإشعاعي تتمثل في التقاط إلكترون حر بواسطة أيون ($Z , N-1$) ويتم إرسال فوتون ($h\upsilon$), وبالتالي عملية إعادة التركيب الإشعاعي تتوافق مع العملية العكسية للتأين الضوئي, ونعبر عنهما بالتفاعل التالي [12, 13]:

$$(Z , N) + (h\upsilon) \longleftrightarrow (Z , N-1) + e \qquad (2\text{-}13)$$

وطاقة الفوتون المنبعث وفقا لمبدأ إنحفاظ الطاقة تعطى بالعلاقة التالية[11]:

$$h\upsilon = E - X_Z \qquad (2\text{-}14)$$

حيث X_Z: تمثل طاقة التأين للأيون.



الشكل(2- 4): عمليتي إعادة التركيب الإشعاعي والتأين الضوئي [12].

7-2 خلاصة

لقد تناولنا في هذا الفصل بعض العمليات الذرية الشائعة في البلازما الساخنة, حيث بدأنا بالانتقالات الإشعاعية وتم التفصيل فيها, ثم عرجنا إلى الإثارة التصادمية والتأين بواسطة الإلكترون الصادم, مرورا بعملية التأين التصادمي وإعادة التركيب الثلاثي الأجسام, وصولا للتأين الضوئي و إعادة التركيب الإشعاعي.

المراجع

[1] W. Demtröder , Atoms ,Molecules and Photons An Introduction to Atomic, Molecular and Quantum-Physics, Springer Verlag Berlin Heidelberg Germany, (2006).

[2] J. Tennyson, Astronomical Spectroscopy An Introduction to the Atomic and Molecular Physics of Astronomical Spectra,University College London ,(2005).

[3] A. Corney, Atomic and Laser Spectroscopy,Oxford University Press, New York, (1977).

[4] V. P. Krainov and H. R. Reiss, B. M. Smirnov, Radiative Processes in Atomic America,(1997).

[5] E.H. Guedda, Contribution à l'étude des structures atomiques et processus élémentaires dans les plasmas: Applications aux hydrogénoïdes et aux héliumoïdes, thèse de doctorat,université Badji Mokhtar Annaba,(2006).

[6] P.F. Bernath, Spectra of Atoms and Molecules,Oxford University Press,(1995).

[7] D. Salzmann, Atomic Physics in Hot Plasmas, Oxford University Press, New York, (1998).

[8] A.K. Ferouani, Effets d'électrons suprathermiques directifs sur le diagnostic en température de plasmas chauds basé sur le rapport d'intensité des raies d'émission d'ions héliumoïdes, thèse de doctorat, Université Abou Bekr belkaid de Tlemcen,(Juin 2013).

[9] J.V. Paradijs and A.M. Bleeker, X-Ray Spectroscopy in Astrophysics, Springer, Netherlands, (1997).

[10] W. Demtröder, Atoms, Molecules and Photons An Introduction to Atomic, Molecular and Quantum-Physics, Springer Verlag Berlin Heidelberg Germany, (2006).

[11] Latifa Geuzen،" Diagnostic en température des plasma chaud à partir des raies Ly man et des rais satellites de recombinaison d'électronique des ions hydrogénoides Ca^{19+}،Thése de Magister ،université Abou – Bekr Belkaid de Tlemcen, P.27 – 28, (2011).

[12] Latifa Battade, "Recombinaison radiative des ions fortement charge dans des états existe polarisation des raies de florence X" ،Thése de doctorat, université Abou – Bekr Belkaid, Tlemcen, ،P.25-26,(2010).

[13] H.J. Kunze, Introduction to Plasma Spectroscopy, Springer, Berlin, (2009).

الفصل الثالث:

تأثير دوال توزيع الطاقة على حساب معدلات التأين بواسطة التصادم الإلكتروني

1-3 مقدمة

تعتبر الإثارة التصادمية والتأين من العمليات الإسكانية الرئيسية في فيزياء البلازما. وفي السنوات الأخيرة تم اقتراح العديد من النماذج العددية و النماذج الرياضية المناسبة لأنواع مختلفة من البلازما, نتيجة تطور فيزياء البلازما من خلال دمج جميع التطورات في الفيزياء الحديثة. و كلها تؤدي بشكل عام إلى معادلات، يصعب حلها حتى مع التقنيات الرقمية الحالية [1, 2], التي تتطلب ثروة من البيانات الموثقة حول العمليات الإشعاعية و التصادمية التي تتحكم في تأين البلازما وإثارة الذرات لتشخيصها.

في هذا الفصل سنهتم بمعرفة تأثير دوال توزيع الطاقة على حساب معدلات التأين بواسطة إلكترون التصادم بالنسبة لأيون اللثيوم (Li) الشبيه بالهليوم في البلازما.

وسيتم التطرق إلى الأساس النظري لمختلف طرق حساب المقاطع الفعالة للتأين بواسطة التصادم الإلكتروني و المحاكاة العددية وبرامج الحساب, ثم إلى حساب معدلات التأين بواسطة التصادم الإلكتروني(دوال التوزيع, معدلات التأين بواسطة التصادم الإلكتروني لأيون الشبيه بالهليوم), وأخيرا النتائج والمناقشة.

2-3 الأساس النظري للحساب

يعتبر الأساس النظري لحساب المقاطع الفعالة للتأين بالتبادل الإلكتروني على أنه النسبة بين طاقة الإلكترون الصادم ($\mathcal{E}$) وطاقة (جهد)التأين (χ_Z) للأيون ذو الشحنة (Z), وهناك ثلاثة طرق مختلفة للتقيّم النظري للمقاطع الفعالة للتأين بواسطة التصادم الإلكتروني: الطرق التقليدية, تقريب كولومب-بورن والمعادلات شبه التجريبية [3, 4].

انطلق الحساب النظري من أجل تحديد المقاطع الفعالة في وقت مبكر سنة 1912م من قبل "Thomson", ثم تتالت العديد من المنشورات من طرف الباحثين منهم "Bethe"سنة 1930م ,"Secton"سنة 1959م, "Trefftez"وآخرون سنة 1963م, "Yong"وآخرون سنة 1965م من أجل تحسين وتطوير نظريات المقاطع الفعالة [5].

و بعد العديد من الدراسات والحسابات الخاصة تم اعتماد صيغ تقريبية لحساب معاملات معدل التأين والمقاطع الفعالة للتأين بالتأثير الإلكتروني. حيث وضعت الصيغة شبه التجريبية لمعامل معدل التأين سنة 1964م من طرف "Secton" وذلك بعد التعقيب عن دراسة "Elwert" المنجزة سنة 1952م, وفي نفس السنة وضع كذلك الأسلوب الكلاسيكي (التقليدي) من قبل "Burgess", وقد اعتمد "Beigman" وآخرون سنة 1971م استخدام تقريبات كولوم-بورن المبسطة. كما طوِّر الحساب النظري لهذا الأخير من طرف "Moores" سنة 1972م, ودرس إنتاج القيم التجريبية سنة 1975م عن طريق "Presnyakov" الذي أظهر العلاقة بين المقاطع الفعالة لـ"كولوم-بورن" وصيغة "Secton ". وعمل "Burgess" وآخرون سنة 1977م على المقاطع الفعالة التجريبية للتأين التصادمي [6, 7].

3-2-1 مختلف الطرق لحساب المقاطع الفعالة للتأين بواسطة التصادم الإلكتروني

هناك ثلاثة طرق مختلفة للتقييم النظري للمقاطع الفعالة للتأين بواسطة التصادم الإلكتروني: الطرق التقليدية, تقريب كولومب- بورن والمعادلات شبه التجريبية [8].

3-2-1 -1 الطرق التقليدية

الطريقة التقليدية الأكثر استخدامًا هي طريقة معامل تأثير التبادل الكلاسيكي(طريقة تحديد تبادل التصادم الكلاسيكي), التي تعود بدايتها لـ "Burgess" [9], حيث تتم بواسطة تقريب شبه كلاسيكي, أو بواسطة نظرية الاضطراب مع اقتراح مدار كلاسيكي للإلكترون المضطرب لمعالجة المقاطع الفعالة للتأين المحسوبة من أجل التصادمات الثنائية (معاملات التصادم الثنائية الصغيرة) والمقاطع الفعالة لتصادم ذات معاملات تصادم كبيرة [10].

3-2-1-2 تقريب كولومب-بورن

إن تتبع تأثير إلكترونات الهدف على الإلكترونات المقذوفة و المنتشرة بالنسبة لدوال الموجة مهم نظرا لأن التفاعل بين الإلكترونات له مدى طويل. كما يستند تقريب الموجة المشوهة (DW) على هذه الفكرة. حيث يتم تمثيل الإلكترون الساقط بموجة محسوبة عن طريق حل معادلة شرودنجر التي تحتوي على تقديرات الهدف, بينما يتم تمثيل الإلكترونات المقذوفة و المبعثرة بموجات محسوبة بدقة من معادلة شرودنجر التي تحتوي على تقديرات الأيون, ومع ذلك على الرغم من أن هذا التقريب يأخذ في الاعتبار تفاعل الإلكترونات الحرة مع إلكترونات الهدف, يظل تقديرًا تقريبيًا من الدرجة الأولى لأنه يعتبر المقذوف يتفاعل مع الهدف مرة واحدة فقط. وعندما تكون طاقة المقذوف منخفضة، فإن التفاعل مع إلكترونات الهدف لم يعد مهملاً كما في حالة تقريب كولومب- بورن. تتأثر ودالة الموجة للقذيفة بعد ذلك بتشويه محتمل قبل الاصطدام بالهدف و بعده. هذه التقديرات قصيرة المدى وتصبح عمليًا صفرًا بعد مسافة معينة، يمكن تمثيل الإلكترونات المنتشرة والمبعثرة والمقذوفة بموجات. وعندما تكون طاقات الإصابة والتشتت كبيرة جدًا، تصبح تأثيرات التشويه والتبادل ضعيفة [8].

ولقد تم إنجاز العديد من الأعمال لحساب المقاطع الفعالة للتأين باستخدام تقريب كولوم-بورن, وقد لخصت من قبل "Vainshtein" وآخرين [10, 11]. و المعادلات المقترحة من أجل حساب المقاطع الفعالة ومعاملات معدل التأين هي كالتالي:

$$\sigma_Z^{ion} = \pi a_0^2 \frac{\xi}{2l_0+1}\left(\frac{\chi_H}{\chi_Z}\right)^2 \emptyset_i(u) \qquad (cm^2) \qquad (3\text{-}1)$$

$$C_Z = 10^{-8} \frac{\xi}{2l_0+1}\left(\frac{\chi_H}{\chi_Z}\right)^{3/2} \; e^{-\beta} G_i(\beta) \qquad (cm^3.S^{-1}) \qquad (3\text{-}2)$$

حيث:

a_0: نصف قطر بور.

ξ: عدد الإلكترونات المحيطية في القشرة الفرعية المدروسة (من العدد المداري l_0) التي لها طاقة χ_Z

و $u = \frac{\varepsilon}{\chi_Z}$, $\beta = \frac{\chi_Z}{T_e}$, كما أنه تعطى قيم ε , T_e, χ_Z بالإلكترون فولط (ev).

يتم تعريف الدالة $\emptyset_i$, G_i من خلال:

$$\emptyset_i(u) = \left(\frac{u-1}{u}\right)\frac{c_1}{(u+1)+c_2} \qquad (3\text{ -}3)$$

$$G_i(\beta) = \frac{c_3\sqrt{\beta}}{\beta+c_4} \qquad (3\text{-}4)$$

حيث يتم الحصول على المعاملات c_1 , c_2, c_3 و c_4 بطريقة المربعات الصغرى (الدنيا) انطلاقا من حساب عددي ويتم تقديمها على شكل رسوم بيانية أو جداول [11].

3-1-2-3 المعادلات شبه التجريبية

لقد تم تقديم العديد من المعادلات من طرف "Kato. Al" و آخرين لحساب المقاطع الفعالة ومعاملات معدل التأين [8]. من بينها معادلة "Lotz" [5]، "Arnaud" وآخرون [12] ومجموعة "Belfast" [3].

-وتستخدم معادلة "Lotz" على نطاق واسع لحساب المقاطع العرضية ومعاملات معدل التأين. حيث استنتج "Lotz" المقاطع الفعالة من البيانات التجريبية للأيونات ضعيفة التأين ومنخفضة الشحنة Z بالشكل التالي:

$$\sigma = \sum_{j=1}^{Nsc} a_j \xi_j \frac{\ln u_j}{u_j \chi_j^2}\{1 - b_j \exp[-c_j(u_j - 1)]\} \qquad (3\text{-}5)$$

ولدينا $u_j = \frac{\varepsilon}{\chi_j}$

حيث:

ε: طاقة الربط للإلكترون في الطبقة الفرعية j.

ξ_j: هو عدد الإلكترونات المكافئة في الطبقة الفرعية j.

a_j و b_j و c_j : ثوابت يمكن تعديلها من معطيات تجريبية (البيانات التجريبية وقوانين النطاق).

N_{sc}: عدد الطبقات الفرعية.

ولقد وضع "Lotz" المعطيات التالية خصوصا للأيونات المتأينة أكثر من أربع مرات:

$a_j = 4.5 \times 10^{-14}(cm^2 ev^2)$, $b_j = c_j = 0$ و $N_{sc} = 2$ بالنسبة للأيونات من الهيدروجين (H) إلى الكالسيوم (Ca), و $N_{sc} = 3$ بالنسبة للأيونات من السكانديوم (Sc) إلى الزنك (Zn) [13].

كما أنه يتم الحصول على معامل معدل التأين من خلال مكاملة المقطع الفعال باستعمال توزيع ماكسويل [3]:

$$C = 6.710^{7} \sum_{j=1}^{N} \frac{a_j \xi_j}{T_e^{3/2}} \left\{ \frac{1}{\chi_j/T_e} \int_{\chi_j/T_e}^{\infty} \frac{\exp(-x)}{x} dx - \frac{b_j \exp(c_j)}{\chi_j/T_e + c_j} \int_{\chi_j/T_e}^{\infty} \frac{\exp(-y)}{y} dy \right\} \quad (3\text{-}6)$$

-و قدم كل من "Arnaud" و "Rothenflug " حسابات للمقاطع الفعالة للأيونات H, He, C, N, O, Na, Mg, Al, Si, S, Ar, Ca, Fe, Ni, C-Si وذلك باستعمال المعادلة الحدودية لـ"Younger" من أجل حساب المقطع الفعال للتأين المباشر(cm^2) [12, 13]:

$$\sigma = \sum_j \frac{1}{u_j \chi_j^2} \left[a_j \left(1 - \frac{1}{u_j}\right) + b_j \left(1 - \frac{1}{u_j}\right)^2 + c_j \ln(u_j) + d_j \frac{\ln(u_j)}{u_j} \right] \quad (3\text{-}7)$$

المعاملات a_j, b_j, c_j, d_j: ثوابت مجدولة قدمها "Arnaud" وآخرون [12].

ويعطى معامل التأين المباشر بالعبارة:

$$C_{DI} = \frac{6.69 \times 10^{7}}{T_e^{3/2}} \sum_j \frac{\exp(-x_j)}{-x_j} F(x_j) \quad (3\text{-}8)$$

وتعطى $F(x)$ بالعبارة التالية:

$$F(x_j) = a_j[1 - x_j f_1(x_j)] + [1 + x_j - x_j(2 + x_j) f_1(x_j)] + c_j f_1(x_j) + d_j f_2 \quad (3\text{-}9)$$

حيث:

$$f_2(x) = e^{x} \int_1^{\infty} \frac{dt}{t} e^{-tx} \ln(t) \quad , \quad f_1(x) = e^{x} \int_1^{\infty} \frac{dt}{t} e^{-tx} \quad , \quad x_j = \frac{\chi_j}{T_e}$$

- كما قدم كل من "Bell", "Lennon " و آخرين المقاطع الفعالة للتأين للأيونات H-O و F-Ni [14, 15] عن طريق المعادلة التالية:

$$\sigma = \frac{1}{u\chi^2} \left[a \ln u + \sum_{i=1}^{N} b_i \left(1 - \frac{1}{u}\right)^i \right] \quad (3\text{-}10)$$

حيث المعاملان a, b_i نحصل عليهما من طريقة المربعات الدنيا و(N=5) [14, 15].

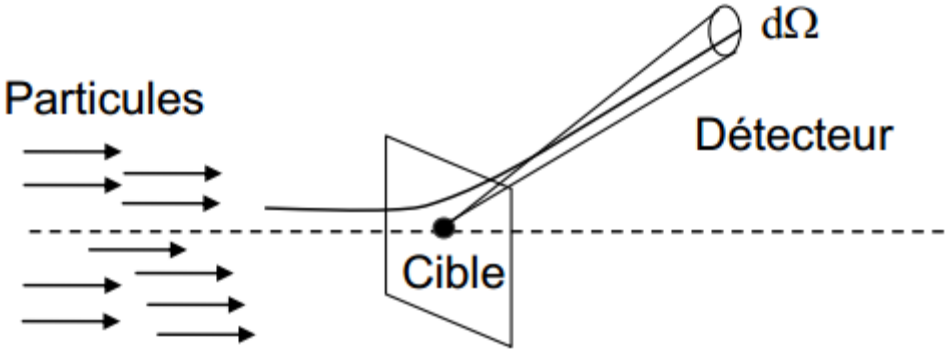
كما أنه تعطى معاملات معدل التأين من أجل درجات الحرارة في المجال ($\chi/10 \le T \le 10\chi$) كما يلي :

$$C = \exp\left(-\frac{\chi}{T_e}\right) \left(\frac{T_e}{\chi}\right)^{1/2} \sum_{n=0}^{5} a_n \left[\log_{10}\left(\frac{T_e}{\chi}\right)\right]^n \quad (3\text{-}11)$$

ومن أجل: $T > 10\ \chi$ تعطى كالتالي:

$$C = \left(\frac{\chi}{T_e}\right)^{1/2}\left[a \ln\left(\frac{T_e}{\chi}\right) + \sum_{n=0}^{2} \beta_n \left(\frac{\chi}{T_e}\right)^n\right] \qquad (3\text{-}12)$$

حيث أن قيم كل من a والمعاملات $a_0 ... a_5$,β_0, β_1, و β_2 معطاة في المرجع [14, 15].



الشكل(3- 1): رسم بياني مبسط يتعلق بمفهوم المقطع الفعال [2].

3-2-2 المحاكاة العددية وبرامج الحساب

تتطلب دراسة بلازما المختبرات والفيزياء الفلكية والانصهار النووي الحراري وإيجاد الحلول للمشاكل المتعلقة بها معرفة مسبقة بالمعطيات الذرية مثل الطاقات, الدوال الموجية لمختلف المستويات, المقاطع الفعالة ومعاملات المعدل للجسيمات و العمليات الابتدائية في البلازما.

لكن الحساب المباشر لهذه المعطيات يصبح صعبا (مستحيلًا) بالنسبة للذرات متعددة الإلكترونات والأعداد الكمية الكبيرة. وفي هذه الحالة نلجأ إلى برامج للحساب لمعالجة المعطيات الذرية نذكر منها :

ATOM, MZ [15] و FAC [16] حيث يكمن الاختلاف بينها في الطرق و التقريبات المعتمدة لإجراء الحساب وكذلك نوع الذرات والأيونات المراد دراستها, وتسعى جميعها إلى إعطاء نتائج قريبة من النتائج التجريبية.

وفي هذه الدراسة سيتم اختيار العمل وفق برنامج FAC "Flexible atomic code" نظرا لمرونته وسهولة استخدامه.

3-2-2-1 برنامج "FAC "

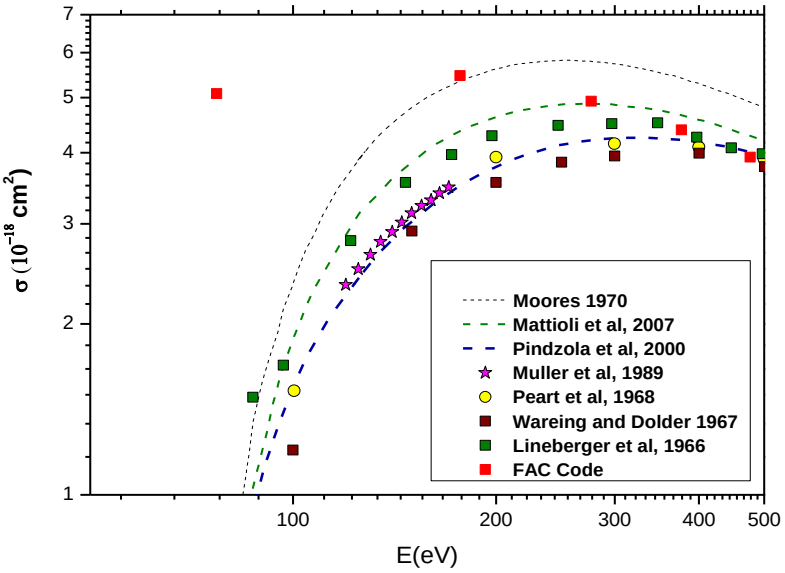
طور برنامج FAC من قبل "Gu. Ming-Feng"[16]. يعتمد برنامج FAC على حزمة من البرامج المتكاملة التي تمكن من حساب البنية الذرية ومختلف العمليات الذرية الإشعاعية والتصادمية بما فيها مستويات الطاقة, الانتقالات الإشعاعية ومعدلات الانتقال الإشعاعي, الإثارة بالتصادم والتأين بالتصادم الإلكتروني, التأين الضوئي, التأين الذاتي ومختلف عمليات التركيب الإشعاعي. من أجل عدد كمي كبير n من المستويات الطاقوية, هذه العمليات ضرورية لتفسير ونمذجة الانبعاث الطيفي من البلازما (بلازما الفيزياء الفلكية, بلازما الانصهار المغناطيسي, بلازما المختبرات), تحليل أطياف الأشعة السينية و لنمذجة الخصائص الطيفية للأيونات المشحونة, و يتضمن نموذج تصادمي إشعاعي من أجل إنشاء أطياف البلازما تحت شروط فيزيائية مختلفة. كما يعتبر من أكثر برامج حساب المعطيات الذرية فعالية [16].

كما يعتمد حساب البنية الذرية في برنامج FAC على التفاعل بين التشكيلات النسبية مع أسس الدوال الموجية للجسيمات المستقلة, ويتم الحصول على هذه الأسس من الدوال الموجية انطلاقا من كمون مركزي محلي(يحدد بطريقة منتظمة ذاتيا) والتي هي مشتقة منه أساسا. ويتم توظيف نهج النسبية بشكل كامل استنادا إلى معادلة ديراك التي تسمح بالتعامل مع الأيونات ذات القيم الكبيرة في الشحنة, مع تطبيق طرق تقريب الأمواج المشوهة (DW) [16].

ويتم حساب المقاطع الفعالة للتأين بالتأثير الإلكتروني في برنامج FAC باستخدام التقريب النسبي للأمواج المشوهة (DW) التي تعتمد على تقريب التبادل كولوم-بورن(CBE) أو تقريب لقاء ثنائي القطب (BED) في حساب تكامل المقاطع الفعالة, وتعطى قيم المقاطع الفعالة في برنامج FAC بدلالة (10^{-20} . cm^2) [16].

3-2-2-2 المقاطع الفعالة للتأين بالتأثير الإلكتروني لأيون اللثيوم الشبيه بالهليوم

بناءا على ما سبق و بهدف الحصول على قيم المقاطع الفعالة والمقارنة بين النتائج (النظرية والتجريبية) لقيم المقاطع الفعالة للتأين بالتأثير الإلكتروني لأيون الليثيوم الشبيه بالهليوم, ترجمة هذه الدراسات في الشكل(3-2), حيث استخرجت قيم المقاطع الفعالة والطاقات الموافقة لها لأيونات الليثيوم الشبيهة بالهليوم من برنامج FAC وأخذت القيم التجريبية من المراجع [21-22]:



الشكل (3- 2): منحنيات المقاطع الفعالة للتأين بالتأثير الإلكتروني لـ Li بدلالة الطاقة.

يوضح الشكل (3-2) منحنيات المقاطع الفعالة للتأين بالتأثير الإلكتروني لـ Li تم الحصول عليها بواسطة برنامج FAC, والبيانات التجريبية المأخوذة من المراجع [21-22]. حيث يلاحظ أنه يوجد تقارب وتطابق كبير بين النتائج التجريبية و النتائج النظرية و خاصة في المجال الطاقوي [300-500] eV

ويمكن توضيح نقاط التقارب والتطابق بين قيم بعض المقاطع الفعالة المتحصل عليها عن طريق برنامج FAC وبعض قيم النتائج التجريبية و ذلك بالنسبة لمجموعة من قيم الطاقة التي تمسح المجال[100-500] eV في الجدول(1-1).

الجدول(1-1): مختلف قيم المقاطع الفعالة للتأين بالتأثير الإلكتروني لـ Li التي تم الحصول عليها بواسطة برنامج FAC و بعض النتائج التجريبية.

E(eV)	σ (10^{-18} cm^2) FAC	σ (10^{-18} cm^2) Moores [21]	σ (10^{-18} cm^2) Pindzola et al [23]	σ (10^{-18} cm^2) Mattioli et al [24]
176	5.4	5.35	--	--
279	4.9	--	4.9	4.9
377	4.3	--	4.2	4.6
480	3.9	--	4.0	4.2

من الجدول(1-1) يمكن ملاحظة وجود اتفاق كبير بين الحسابات النظرية لـFAC وبعض النتائج التجريبية.

3-3 حساب معدلات التأين بواسطة التصادم الإلكتروني

الهدف من نظرية الاصطدام هو إيجاد نموذج يمكنه تحديد تطور نظام التصادم في منطقة التفاعل. يجب أن تكون النتائج التي يقدمها هذا النموذج قابلة للمقارنة مع الملاحظات المقاسة بالتجارب.

لبناء هذا النوع من النماذج، من الضروري إنشاء علاقة بين ودوال الموجة التي تصف الحالات الأولية والنهائية للنظام.

يمكن أن توفر النماذج النظرية المبسطة فهمًا لعملية التأين، حيث تخضع ديناميكيات نظام الاصطدام لمبادئ ميكانيكا الكم.

وعليه تعطى عبارة معامل معدل (احتمال) حدوث أي آلية ذرية أساسية بدلالة المقطع الفعال من خلال دمج المقطع الفعال مع دالة توزيع طاقة الإلكترون كما يلي [10]:

$$\tau = <\sigma_v> = \int_{\Delta\varepsilon}^{\infty} v\sigma(\varepsilon)f(\varepsilon)d\varepsilon \quad ; \quad [cm^3.s^{-1}] \qquad (3\text{-}13)$$

حيث:

$\sigma(\varepsilon)$: المقطع الفعال.

v : سرعة الجسيمات المتصادمة ($v = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{M}}$).

M : كتلة الجسيمات.

$f(\varepsilon)$: دالة توزيع الطاقة.

ε : طاقة الإلكترون.

3-3-1 دوال التوزيع

تعتمد نماذج التصادم الإشعاعي الذري على حركة الذرات من أجل تشخيص و نمذجة البلازما, كما أنه تعتمد على إسكان المستويات الطاقوية التي بدورها تعتمد على دالة توزيع الإلكترون من خلال تأثيره على معدل التصادم. وتحسب معدلات التصادم في النماذج الذرية باستخدام أحد أشكال توزيع طاقة الإلكترونات[17]:

- توزيع ماكسويلي:

$$F_M(\varepsilon, T_e) = 2\sqrt{\frac{\varepsilon}{\pi T_e^3}}\exp\left[-\varepsilon/T_e\right] \qquad (3\text{-}14)$$

حيث :

T_e : درجة حرارة الإلكترونات عبارة عن طاقة.

ε : طاقة الإلكترونات.

- توزيع غاوسي:

$$F_G(\varepsilon,\ T_e) = \frac{1}{T_e\sqrt{\pi}}\left(\frac{2}{1+\mathrm{erf}\left({}^{+\varepsilon_0}/_{T_e}\right)}\right)\exp\left[-\left(\frac{(\varepsilon-\varepsilon_0)}{T_e}\right)^2\right] \qquad (3\text{-}15)$$

حيث :

ε_0 :طاقة الإلكترون.

- قانون الاستطاعة:

$$F_p(\varepsilon, T_e) = \left(\frac{\gamma-1}{{T_e}^{1-\gamma}}\right)\varepsilon^{-\gamma} \quad ;\ \varepsilon \geq T_e \qquad (3\text{-}16)$$

حيث γ : ثوابت انحلال.

3-3-1-1 دالة التوزيع الماكسويلي

في نماذج التصادم الإشعاعي الذري توزيع سرعة الجسيمات يتبع توزيع ماكسويل, الذي يعتمد في تعريف دالة التوزيع على درجة الحرارة Tو يعطى القانون العام لماكسويل كالتالي [17, 18]:

$$f(v)dv = 4\pi v^2\left(\frac{m}{2\pi T}\right)^{3/2}\exp\left(-\frac{mv^2}{2T}\right)dv \qquad (3\text{-}17)$$

ويمكن التعبير عن المعادلة (3-17) بدلالة الطاقة حيث $E = \frac{1}{2}mv^2$, كما يلي:

$$f(v)dE = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\frac{m^{1/2}}{T^{3/2}}\exp\left(-\frac{E}{T}\right)dE \qquad (3\text{-}18)$$

3-3-1-2 دالة التوزيع غير الماكسويلي

للإلكترونات الساخنة دور مهم في البلازما وذلك بسبب تأثيرها على ديناميكيتها واستقرارها, كما يمكن لهذه الإلكترونات أن تفقد طاقة كبيرة خلال عمليات التصادم, وللتحقيق في تأثير الإلكترونات الساخنة على الخصائص الإشعاعية للبلازما, اقترح "Escarguel. al" [19] التوزيع غير الماكسويلي لحساب معدلات التأين بدلالة المقاطع الفعالة عند درجتي حرارة مختلفتين [20] والذي يعطى بالشكل التالي:

$$F_{NM}(\varepsilon) = (1-f_{hot})F_M(\varepsilon)T_{bulk} + f_{hot}F_X(\varepsilon)T_{hot} \qquad (3\text{-}19)$$

حيث:

$F_M(\varepsilon)$: دالة توزيع ماكسويل لطاقة الإلكترونات.

f_{hot}: نسبة الإلكترونات الساخنة.

T_{hot}: درجة حرارة الإلكترونات الساخنة.

T_{bulk}: درجة حرارة الإلكترونات الباردة (المتبقية).

$F_X(\varepsilon)$: دالة التوزيع المراد تعويضها لطاقة الإلكترونات.

3-3-2 حساب معدل التأين بواسطة التصادم الإلكتروني لأيون اللثيوم الشبيه بالهليوم

هناك جهود كبيرة من طرف العلماء لفهم انبعاث الإلكترونات أثناء التأين الذري بواسطة التصادم من منظور التجريبية والمحاكاة. إذ يعد توزيع طاقة الإلكترون موضوعًا ذا أهمية كبيرة لفيزياء البلازما لأنها تلعب دورًا مهمًا في تطوير دراسة البلازما, وتعد معدلات التأين للأيونات المختلفة في البلازما ضرورية لفهم توازن التأين. حيث ساهمت تجارب وأبحاث محددة على الإلكترونات الساخنة في تثبيت أنواع معينة من دوال توزيع الطاقة, بمعنى داخل البلازما يتم تمثيل الإلكترونات الحرة بتوزيع معين للطاقة. ويتم حساب معدلات التأين من خلال دمج مقطع التصادم مع الطاقة ومع دوال توزيع الطاقة.

وفي هذا الجزء تم حساب ورسم منحنيات معدلات التأين بواسطة التصادم الإلكتروني لأيون Li الشبيه بالهليوم المحسوبة بواسطة توزيع غير مكسويلي, بتوظيف دوال توزيع الطاقة للإلكترونات و باستخدام المعطيات التجريبية لـ kato.al و برنامج FAC. حيث تم تعويض المعادلة (3-19) في المعادلة (3-13):

فتصبح بالشكل التالي:

$$\tau = \int v\sigma(\varepsilon)F_{NM}(\varepsilon)d\varepsilon \quad ; \quad (cm^3s^{-1}) \qquad (3\text{-}20)$$

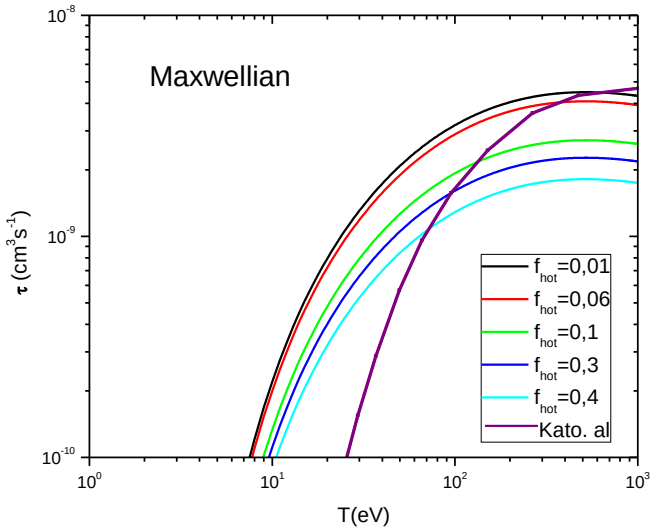
وحيث في كل مرة نعوض مكان $F_X(\varepsilon, T_e)$ بدالة توزيع طاقة الإلكترون المراد الحساب بها ماكسويلي (3-14) أو غاوسي (3-15) أو قانون الاستطاعة (3-16), وتغير قيم f_{hot} وγ على حسب دالة التوزيع في كل مرة وتعرض مع النتائج ليتم مقارنتها مع المنحنى التجريبي (Kato et al).

3-3-2-1 النتائج ومناقشتها

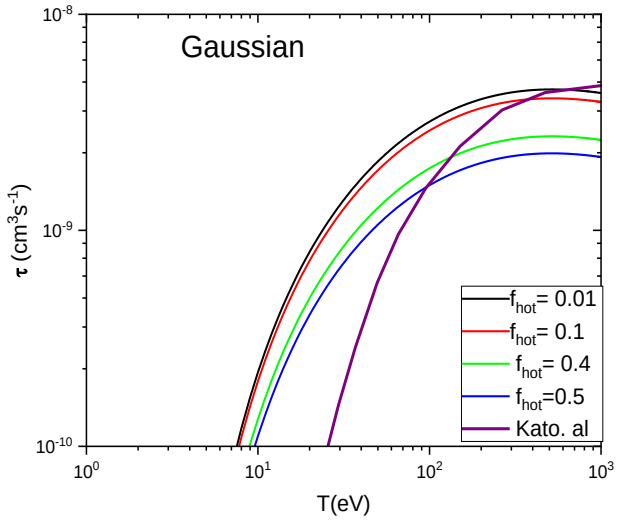
يعرض الشكل (3-3) والشكل (3-4) نتائج قياس معدلات التأين بواسطة التأثير الإلكتروني لـ Li لدوال توزيع الطاقة الماكسويلي و الغاوسي و لقيم مختلفة من معدل الإلكترونات الساخنة.

الشكل (3-5) يعرض نتائج قياس معدلات التأين بواسطة التأثير الإلكتروني لـ Li لدوال توزيع الطاقة لقانون الاستطاعة و لمختلف قيم معدل الإلكترونات الساخنةf_{hot} ولثوابت انحلال γ مختلفة كذلك.

والشكل (3-6) يعرض معدلات التأين بواسطة التأثير الإلكتروني لـ Li وتم استخدام دوال توزيع طاقة الإلكترونات: الغاوسي و قانون الاستطاعة لمختلف قيم ثوابت الانحلال γ و معدل الإلكترونات الساخنة $f_{hot} = 0.01$.

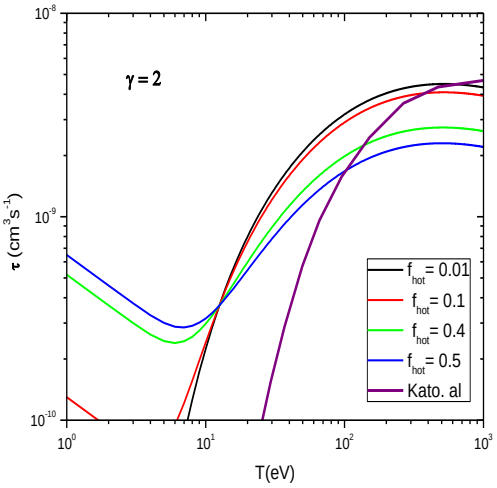


الشكل (3- 3): معدلات التأين بالتأثير الإلكتروني لـ Li باستخدام دالة توزيع الطاقة الماكسويلي وتأثير مختلف قيم معدل الإلكترونات الساخنة f_{hot}.

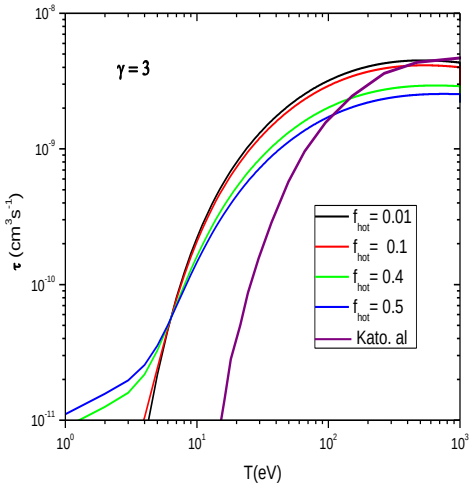


الشكل (3- 4): معدلات التأين بالتأثير الإلكتروني لـ Li باستخدام دالة توزيع الطاقة الغاوسي وتأثير مختلف قيم معدل الإلكترونات الساخنة f_{hot}.

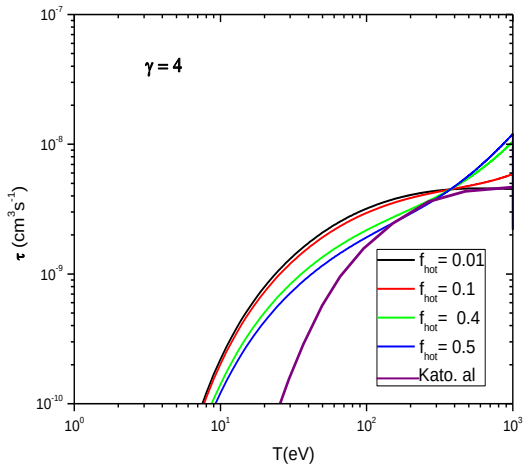
في الشكل (3-3) والشكل (3-4)، تزداد قيم معدلات التأين بسرعة كبيرة عند درجات الحرارة المنخفضة. في حالة ارتفاع درجات الحرارة، يُلاحظ أن منحنيات معدلات التأين حساسة جدًا للإلكترونات الساخنة، ويلاحظ أيضا أن المنحنيات تبتعد تدريجياً عن بعضها البعض مع زيادة نسبة الإلكترونات الساخنة, ويلاحظ أيضا أن المنحنى ذو القيم التجريبية يتقاطع مع المنحنيات الأخرى في درجات الحرارة المرتفعة.



(1)



(2)

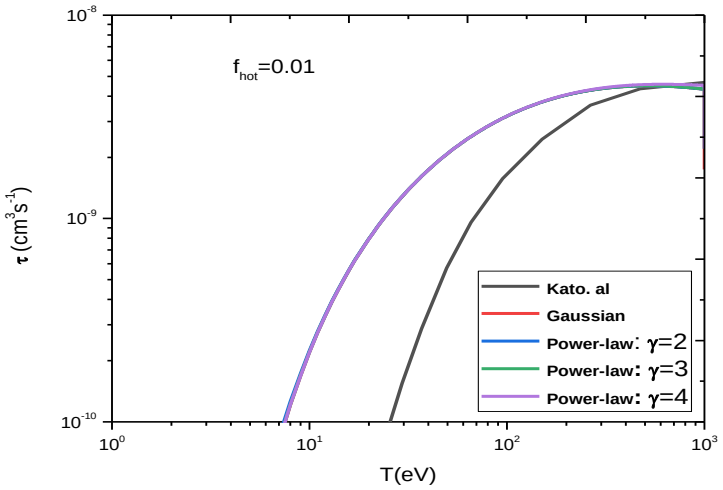


(3)

الشكل (3- 5): معدلات التأين بالتأثير الإلكتروني لـ Li باستخدام دالة توزيع الطاقة لقانون الاستطاعة لثوابت الانحلال المختلفة: $\gamma = 2$ (1) ، $\gamma = 3$ (2) ، $\gamma = 4$ (3) وتأثير مختلف قيم معدل الإلكترونات الساخنة f_{hot}.

يوضح الشكل (3-5) معدلات التأين بواسطة التأثير الإلكتروني لـ Li لدالة توزيع طاقة الإلكترونات لقانون الاستطاعة لقيم مختلفة لثابت الانحلال γ و f_{hot}. في الشكل (3-5) (1) و(2)، و في درجات الحرارة المنخفضة، تشير المنحنيات إلى القابلية للتأثر بالإلكترونات الساخنة بالإضافة إلى زيادة قيمة ثابت الانحلال γ. في الشكل (3-5) (3), على الرغم من التقارب بين المنحنيات بداية من 500 eV، يلاحظ الاختلاف بينها و ذلك في المجال (ev) [10-100]. إلى ان يحدث التقارب الكبير أو التطابق بين المنحنيات و ذلك من اجل قيمة $\gamma = 4$.

-وبالمقارنة بين دوال توزيع طاقة الإلكترونات: الغاوسي و قانون الاستطاعة في شروط معينة تم الحصول على الشكل(3- 6):



الشكل(3- 6): معدلات التأين بالتأثير الإلكتروني لـ Li باستخدام دالتي التوزيع الغاوسي و قانون الاستطاعة لمختلف ثوابت الانحلال γ و معدل الإلكترونات الساخنة $f_{hot} = 0.01$.

في الشكل(3-6) يلاحظ تطابق بين منحني معدلي التأين باستخدام دالتي التوزيع الغاوسي وقانون الاستطاعة على كامل مجال الطاقة, وتقارب المنحنى التجريبي منهما كلما ارتفعت درجة الحرارة إلى الوصول إلى التطابق عند درجة الحرارة 1000eV.

3-2-3-2 الاستنتاج

من خلال النتائج السابقة التي ناقشت تأثيرات التواجد المتزامن للإلكترونات ذات الطاقة المنخفضة والإلكترونات ذات الطاقة الأعلى على حساب معدلات التأين وكذلك دوال توزيع الطاقة للإلكترونات بالنسبة لأيونات Li^+, يستنتج حساسية معدلات التأين بالتأثير الإلكتروني لأنواع دوال توزيع طاقة الإلكترون ولقيم معدل الإلكترونات الساخنة المنخفضة f_{hot} .كما أظهر التوزيع الغير ماكسويلي تحسنًا كبيرًا في المنحنيات، لا دالتي التوزيع الغاوسي وقانون الاستطاعة ويستنتج أيضا الاختلافات الكبيرة بين الطرق النظرية و / أو التجريبية, والانحرافات الكبيرة في درجات الحرارة المنخفضة.

وبالعودة للهدف من وراء هذا العمل وهو معرفة تأثير دوال توزيع الطاقة على حساب معدلات التأين وذلك من خلال دراسة معدل التأين بواسطة إلكترون التصادم للبلازما الساخنة, لوحظ حساسية معدلات التأين بالتأثير الإلكتروني لأنواع دوال توزيع طاقة الإلكترون, لوحظ أيضا أن بعض الإلكترونات (الساخنة) يحكمها توزيع طاقة غير ماكسويلي, لاسيما دالتي التوزيع الغاوسي وقانون الاستطاعة.

4-3 خلاصة

في هذا الفصل تمت دراسة تأثير دوال توزيع الطاقة على حساب معدلات التأين بواسطة إلكترون التصادم بالنسبة لأيون الليثيوم (Li) الشبيه بالهليوم في البلازما. حيث تم التطرق إلى الأساس النظري لمختلف طرق حساب المقاطع الفعالة للتأين بواسطة التصادم الإلكتروني(الطرق التقليدية, تقريب كولوم-بورن, المعادلات شبه التجريبية) والمحاكاة العددية وبرامج الحساب (برنامج FAC), ثم إلى حساب معدلات التأين بواسطة التصادم الإلكتروني(دوال التوزيع (دالة التوزيع الماكسويلي, دالة التوزيع غير الماكسويلي, مختلف الأشكال لدوال توزيع الطاقة, معدلات التأين بواسطة التصادم الإلكتروني لأيون Li الشبيه بالهليوم), وأخيرا الاستنتاج بعد عرض النتائج ومناقشتها.

المراجع

[1] J. P. Boeuf and L. C. Pitchford,‖Two-dimensional model of a capacitively coupled rf discharge and comparisons with experiments in the Gaseous Electronics Conference reference reactor‖, Phys. Rev. E51, 1376,(1995).

[2] M. Davoudabadi , J. S. Shrimpton , F. Mashayek,‖ On accuracy and performance of highorder finite volume methods in local mean energy model of non-thermal plasmas‖, Journal of Computational Physics, v.228 n.7, p.2468-2479, April, (2009).

[3] K.L. Bell, H.B .Gilbody, J.G .Hughes, A.E .Kingston and F.J .Smith, Recommended Data on the Electron Impact Ionization of Light Atoms and Ions, J.Phys.Chem.Ref.Data,Vol.12, No.4, (1983).

[4] C. D. Michelis and M. Mattioli, Nuclear Fusion, 21(1981).

[5] W. Lotz, Electron-Impact ionization cross-sections and ionization rate coefficients for atoms and ions, Germany , (November 1966).

[6] A. Burgess, H.P .Summers, D.M .Cochrane and R.W.P .Mcwhirter, Cross sections for ionization of positive ions by electron impact, Mon. Not. R. astr . Soc. (1977).

[7] T. D. Mark and G. H. Dunn, Electron Impact Ionization, Springer Verlag Wien-New York (January 1985).

[8] T. Kato, T. Fujiwara, and Y. Hanaoka, Astrophys. J. 492, 822, (1998).

[9] A. Burgess and I. C. Percival, Advances in Atomic and molecular Physics, Academic Press, NY, (1968).

[10] E.H. Guedda, Contribution à l'étude des structures atomiques et processus élémentaires dans les plasmas: Applications aux hydrogénoïdes et aux héliumoïdes, thèse de doctorat, (université Badji Mokhtar Annaba 2006).

[11] L. A. Vainshtein, I. I. Sobelman and E. A. Yukov, Cross-Sections of Excitation of Atoms and Ions by Electrons, Nauka Moscow (1973).

[12] M. Arnaud and R. Rothenflug, Astron, Astrophys. Supp. Ser. 60 (1985).

[13] T. Kato, K. Masai and M. Arnaud, Comparison of Ionization Rate Coefficients of Ions from Hydrogen through Nickel, NIFS-Data-14 (1991).

[14] M. A. Lennon, K. L. Bell, H.B. Gilbody, J.G. Hughes, A.E. Kingston, M.J. Murry and F.J. Smith, J. Phys. Chem. Ref. Data, 17(1988).

[15] V.P. Schevelko and L.A. Vainshtein , Atomic Physics for Hot Plasmas, Institute of Physics , Bristol, USA, (1993).
[16] M.F. Gu , FAC 1.0.8 Manual, http ://kipac-tree.stanford.edu/fac/.

[17] S. B. Hansen and A. S. Shlyaptseva, Effects of the electron energy distribution function on modeled x-ray spectra, The American Physical Society (2004).
[18] S. Dilmi, E.H. Guedda and A.M. Boumali, Calcul des coefficients des taux d'ionisation de l' Helium neutre, Canadian Journal of Physics (2013)

[19] A. Escarguel, F. B. Rosmej, C. Brault, Th. Pierre, R. Stamm and K. Quotb, Plasma Phys. Control. Fusion 49, 85–93, (2007).

[20] S .B. Hansen and A. S. Shlyaptseva, Effects of the electron energy distribution function on modeled x-ray spectra, The American Physical Society(2004).

[21] D L. Moores, H.Nussbaumer. J. Phys. B: At. Mol. Phys. 3, 161–72 (1970).
[22] W C. Lineberger, J W .Hooper, E W. McDaniel. Phys. Rev. 141,151–64 (1966).
[23] M S. Pindzola, D M. Mitnik, J. Colgan. Phys. Rev. A. 61, 052712 (2000).
[24] M. Mattioli, G. Mazzitelli, M. Finkenthal ,P. Mazzotta, K B. Fournier, J. Kaastra, M E .Puiatti. J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 40, 3569–99 (2007).

خلاصة عامة

خلاصة عامة

تعتبر المعطيات الذرية الناتجة من حدوث إحدى العمليات الذرية الأساسية في البلازما أدوات مهمة لتشخيص و نمذجة كل من الخصائص الإشعاعية للأيونات والذرات من أجل دراسة وتحليل الأطياف, تحليل ومعالجة انبعاث البلازما, بلازما المخابر, الفيزياء الفلكية, تجارب الانصهار النووي الحراري.

خلال هذا العمل، درسنا نظريًا الطرق المختلفة لتقييم المقاطع الفعالة للتأين للذرات الشبيهة بالهليوم وبعض العمليات الذرية الأولية في البلازما، ولا سيما التأين بالتأثير الإلكتروني. حيث تم الاهتمام بشكل خاص بمدى تأثير **دوال توزيع الطاقة على حساب معدلات التأين (في البلازما الساخنة)** على أيون Li^+، باستخدام التوزيع الماكسويلي وغير الماكسويلي, ومن ناحية أخرى، تم استخدام توزيع غير ماكسويلي لدراسة تأثير الإلكترونات الساخنة على أيونات Li^+.

خلال هذه الدراسة تم تقديم مفاهيم أساسية حول البلازما الساخنة في الفصل الأول, حيث تضمن هذا الفصل البلازما الساخنة المنتجة داخل المخبر و التي هي بلازما تامة التأين وتعد الوسط الملائم الذي يمكن أن يحدث فيه الاندماج النووي, ثم إلى تقسيمات البلازما الطبيعية إلى بلازما كونية والموجودة في الكون مثل الشمس والنجوم وغيرها وأخرى أرضية وهي محصورة على مستوى الكرة الأرضية, وتم التطرق لبعض نماذج التوازن المعمول بها في البلازما.

تم التطرق فيما بعد إلى العمليات الذرية الشائعة في البلازما الساخنة, حيث تم التعرض إلى الانتقالات الإشعاعية وتم التفصيل فيها, ثم إلى الإثارة التصادمية والتأين بواسطة الإلكترون الصادم, ثم إلى عملية التأين التصادمي وإعادة التركيب الثلاثي الأجسام, وأخيرا التأين الضوئي و إعادة التركيب الإشعاعي.

وأخيرا تأثير دوال توزيع الطاقة على حساب معدلات التأين بواسطة إلكترون التصادم في الفصل الثالث, حيث تمت دراسة تأثير دوال توزيع الطاقة على حساب معدلات التأين بواسطة إلكترون التصادم بالنسبة لأيون (Li) الشبيه بالهليوم في البلازما. أين تم التطرق إلى الأساس النظري لمختلف طرق حساب المقاطع الفعالة للتأين بواسطة التصادم الإلكتروني(الطرق التقليدية, تقريب كولوم-بورن, المعادلات شبه التجريبية) و المحاكاة العددية وبرامج الحساب (برنامج FAC), ثم إلى حساب معدلات التأين بواسطة التصادم الإلكتروني(دوال التوزيع (دالة التوزيع الماكسويلي, دالة التوزيع غير الماكسويلي, مختلف الأشكال لدوال توزيع الطاقة), معدلات التأين بواسطة التصادم الإلكتروني لأيون Li الشبيه بالهليوم), وأخيرا الاستنتاج بعد النتائج ومناقشتها.

وبعد كل هذه الدراسة تم التمكن من معرفة أثر دوال التوزيع على معدلات التأين بالتصادم الإلكتروني, وذلك بناءا على قيم المقاطع الفعالة المتحصل عليها والتي مكنت من حساب معدل التأين بالتصادم الإلكتروني لأيون اللثيوم (Li) الشبيه بالهليوم بواسطة المحاكاة العددية وذلك باستخدام توزيعات طاقة الإلكترون الماكسويلي وغير الماكسويلي, ودرجات حرارة مختلفة للإلكترونات, وبالمقارنة مع النتائج يلاحظ أن نسبة الإلكترونات الساخنة في البلازما تؤثر في حساب معدل التأين, وأن التوزيع غير الماكسويلي يبدي توافقا كبيرا وخاصة مع دوال التوزيع الغاوسي و قانون الاستطاعة في شروط معينة.

من كل ما سبق نأمل بأن تكون هناك دراسات أوسع وأشمل في هذا الموضوع, وتطبق هذه الدراسة على أكبر عدد ممكن من الذرات الأخرى الشبيهة بالهليوم من أجل التحقق من مدى تأثير مختلف المعطيات الذرية وحسن استغلالها.

ملخص:

يهدف هذا العمل إلى معرفة تأثير دوال توزيع الطاقة على حساب معدلات التأين وذلك من خلال دراسة معدل التأين بواسطة إلكترون التصادم للبلازما الساخنة وتطبيقه على بعض الذرات انطلاقا من التعرف على مختلف الآليات الذرية الأساسية التي تحدث في البلازما من بينها عملية التأين بالتصادم الإلكتروني التي هي من أهم النماذج التصادمية الإشعاعية الذرية. تم حساب معدل التأين بواسطة ببرنامج الحساب العددي بدلالة كل من المقاطع الفعالة المتحصل عليها بواسطة برنامج FAC وتوزيعات الطاقة الماكسويلي وغير الماكسويلي لأيون الليثيوم (Li^{+}) الشبيه بالهليوم. وبالمقارنة مع النتائج المتحصل عليها وجد أن هناك حساسية لمعدلات التأين بالتأثير الإلكتروني لأنواع دوال توزيع طاقة الإلكترون ومعدل الإلكترونات الساخنة المنخفضة f_{hot} , وأيضا أن بعض الإلكترونات (الساخنة) يحكمها توزيع طاقة غير ماكسويلي, لاسيما دوال التوزيع الغاوسي و قانون الاستطاعة.

الكلمات المفتاحية: دوال التوزيع ، المقاطع الفعالة ، معدلات التأين داخل البلازما, برنامج FAC.

Summary:

This work aims to know the effect of energy distribution functions on calculating ionization rates by studying the ionization rate by the collision electron of hot plasma and its application to some atoms based on the identification of the various basic atomic mechanisms that occur in plasma, including the ionization process by electronic collision, which is one of the most important atomic radiation collision models. The ionization rate was calculated by the numerical calculation program in terms of each of the cross sections obtained by the FAC program and the Maxwell and non-Maxwellian energy distributions for the helium-like lithium ion (Li+). In comparison with the obtained results, it was found that there is sensitivity of the ionization rates to electron energy distribution forms, the low values of hot electrons f_{hot}, and also that some hot electrons are governed by a non-Maxwellian energy distribution, especially the gaussian and power-law distribution functions.

Key words: Distribution functions, cross sections, ionization rates in plasma, FAC program.

Résumé:

Ce travail vise à connaître l'effet des fonctions de distribution d'énergie sur le calcul des taux d'ionisation en étudiant le taux d'ionisation par l'électron d'impact d'un plasma chaud et son application à certains atomes en se basant sur l'identification des différents mécanismes atomiques de base qui se produisent dans le plasma, dont le processus d'ionisation par collision électronique, qui est l'un des modèles de collision de rayonnement atomique les plus importants. Le taux d'ionisation a été calculé par un programme de calcul numérique en fonction de chacune des sections efficaces obtenues par le code FAC et les distributions d'énergie Maxwellienne et non-maxwelliennes pour lithium héliumoide (Li^{+}). On comparons les résultats obtenus, il a été constaté qu'il existe une sensibilité des taux d'ionisation vis-à-vis les différents types des fonctions de distribution d'énergie des électrons, les faibles valeurs d'électrons chauds f_{hot}, et aussi que certains des électrons chauds sont régis par une distribution d'énergie non maxwellienne, en particulier les fonctions de distribution gaussienne et de loi de puissance.

Mots-clés: Fonctions de distribution, Sections efficaces, Taux d'ionisation dans les plasmas, Code FAC.