الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي
كليـــة العلـــــــوم و التكنـولوجيا
قسم علوم المادة

رقم الترتيب:
رقم التسلسل:

مذكرة تخرج لنيل شهادة

ماستر أكاديمي

شعبة: الفيزياء

تخصص: فيزياء تطبيقية إشعاع و طاقة

من إعداد: صابر فاطمة الزهراء

الموضوع

دراسة معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون للأيونات الشبيهة بالهليوم الخفيفة:
تطبيق على أيونات Li^{+}- Be^{+2}- C^{+4}

نوقشت يوم: .../.../.....

أمام لجنة المناقشة المكونة من:

محبوب محمد الصادق	أستاذ محاضر صنف ب	جامعة الوادي	رئيس.
مفتاح محمد الطيب	أستاذ تعليم عالي	جامعة ورقلة	مناقش.
دلمي سامية	أستاذ محاضر صنف ب	جامعة الوادي	مناقش.
قدة الحبيب	أستاذ تعليم عالي	جامعة الوادي	مقرّرا.

الموسم الجامعي: 2015/2014

الإهداء

أهدي ثمرة جهدي إلى :

الوالدين العزيزين أطال الله في عمرهما وأشكرهما على الدعم والتشجيع.

إخوتي وأخواتي.

كل عائلتي.

الأحبة والأصدقاء.

إلى كل طالب علم يكد ويجتهد على طريق العلم المضني.

شكر وعرفان

أتقدم أولا وآخرا بالشكر لله عز وجل الذي وفقني لإنجاز هذا العمل, ولا يفوتني أن أتقدم بأسمى عبارات الشكر والتقدير والإمتنان إلى أستاذي الدكتور الفاضل قدة الحبيب على مساعدته العلمية وتوجيهاته القيمة التي لم يبخل بها طوال فترة إنجاز هذه المذكرة.

كما أشكر أعضاء اللجنة على قبولها مناقشة هذا العمل بداية برئيس اللجنة الدكتور محبوب محمد الصادق وكذلك كل من المناقشين الأستاذ الدكتور مفتاح محمد الطيب والدكتورة دلمي سامية على قبولهما المشاركة في تقييم هذا العمل.

وأتوجه بالشكر الخالص إلى كل من ساهم في إنجاز هذه المذكرة من بعيد أوقريب.

فــهرس المحتــويات

قائمة الأشكال..... I
قائمة الجداول..... II
قائمة الترميزات..... III
مقدمة عامة..... 12

الفصل الأول: عموميات حول البلازما

1.I لمحـة تاريخيـة 15
1.2.I تعريـف1..... 15
2.2.I تعريـف2..... 15
3.2.I تعريـف3..... 15
4.2.I تعريـف4..... 16
3.I أشكـال البـلازما 16
1.3.I بلازما طبيعية 16
2.3.I بلازما صناعية 16
4.I أنواع البلازما..... 17
1.4.I البلازما الحرارية..... 17
2.4.I البلازما الكهربائية..... 18
5.I خواص البلازما 18
6.I مقادير البلازما 18
1.6.I طول ديباي 18
2.6.I طول لاندو..... 19
3.6.I زمن التصادم..... 19
4.6.I المسير الحر 19
5.6.I تردد البلازما..... 19
6.6.I نصف قطر الكرة الإلكترونية 20
7.6.I نصف قطر الكرة الأيونية 20
8.6.I درجة التأين..... 20
9.6.I معامل التزاوج..... 21
10.6.I درجة الحرارة الإلكترونية والأيونية 21
11.6.I كثافة الجسيمات ودوال التوزيع 22
7.I تطبيقات البلازما..... 22
1.7.I الاندماج النـووي..... 22
8.I حصر البلازما 24
9.I مطيافية البلازما 24

I.1.9 الأعداد الكمية. 24
I.2.9 عمليات الإزدواج 25
I.3.9 الرمز الطيفي 26
I.4.9 الإنتقالات الذرية..... 26
I.5.9 قواعد الاصطفاء..... 27
I.6.9 تعريضات الخطوط الطيفية المنبعثة في البلازما..... 27
I.1.6.9 التعريض الطبيعي..... 28
I.2.6.9 تعريض دوبلر..... 28
I.3.6.9 تعريض بواسطة التصادم 29
خلاصة..... 29

الفصل الثاني: الآليات الذرية الأساسية في البلازما

II.1معامل الاحتمال..... 31
II.2 العمليات الاشعاعية 32
II.1.2 الانبعاث التلقائي 32
II.2.2 الامتصاص الاشعاعي..... 32
II.3.2 الانبعاث المحرض..... 33
II.4.2 التأين الضوئي 34
II.4.2 إعادة التشكيل الإشعاعي 34
II.3 العمليات التصادمية 35
II.1.3 التأين بالتصادم الالكتروني 35
II.2.3 الإثارة بالتصادم الالكتروني 36
II.3.3 إعادة التشكيل لثلاثة أجسام 36
II.4.3 إعادة التشكيل ثنائي الالكترون..... 36
II.4 نماذج الإتزان في البلازما 37
II.1.4 نموذج التوازن الحراري الإجمالي(ETC)..... 37
II.2.4 قوانين الإتزان 38
II.3.4 نموذج التوازن الحراري المحلي(ETL)..... 39
II.4.4 النموذج التاجي (CM)..... 39
II.5.4 نموذج التصادم الإشعاعي (CR)..... 40
II.5 برامج حساب المعطيات الذرية..... 40
II.1.5 تعريف برنامج FAC..... 41
خلاصة..... 41

الفصل الثالث: إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون

III.1 لمحـة تاريخيـة..... 43
III.2 وصف مفصل لإعادة التشكيل ثنائي الإلكترون 43
III.3 معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون..... 45
III.4 حساب معاملات الشدة 45
III.5 قانون السلم للذرات الشبيهة بالهليوم..... 46
III.6 حساب معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون..... 46
III.6.1 حساب FAC..... 46
III.6.2 حساب Burgess..... 46
III.7 النتائج والتحليل..... 49
III.7.1 أيون الليثيوم الشبيه بالهليوم(Li^{+}) 49
III.7.2 أيون البريليوم الشبيه بالهليوم(Be^{+2})..... 50
III.7.3 أيون الكربون الشبيه بالهليوم(C^{+4})..... 52
خلاصة..... 55
خلاصة عامة..... 57
قائمة المراجع..... 59
الملاحق..... 64
الملحق أ برنامج FAC 64
الملحق ب حساب معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون بدلالة درجة الحرارة..... 68

قائمة الأشكـــال

الشكل (I-1): نموذج مرئي مبسط للمقارنة بين الحالات الأربع للمادة..... 16
الشكل (I-2): مختلف أشكال البلازما..... 17
الشكل (I-3): إندماج نووي بين نواتي الدوتيريوم والتريتيوم..... 23
الشكل (I-4): رسم تخطيطي لعمليتي الإمتصاص والإنبعاث..... 27
الشكل(II.1): مخطط يوضح الانتقالات الإشعاعية في نظام ذو مستويين..... 33
الشكل(II.2): عمليتـي إعادة التشكيل الإشعاعي والتأين الضوئي..... 35
الشكل(II.3): عملية التأين بالتصادم الإلكتروني 35
الشكل(II.4): عملية الإثارة بالتصادم الإلكتروني والعملية العكسية لها..... 36
الشكل(II.5): عملية إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون..... 37
الشكل(III.1): مخطط لمستويات ذرة الهليوم والذرات الشبيهة بها..... 44
الشكل(III-2): مخطط يوضح خطوات حساب معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون بطريقتين..... 48
الشكل(III-3): معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون لأيون الليثيوم الشبيه بالهليوم بدلالة درجة الحرارة (سلم لوغاريتمي)..... 49
الشكل(III-4): معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون لأيون الليثيوم الشبيه بالهليوم بدلالة درجة الحرارة (سلم خطي)..... 50
الشكل(III-5): معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون لأيون البريليوم الشبيه بالهليوم بدلالة درجة الحرارة (سلم لوغاريتمي)..... 51
الشكل(III-6): معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون لأيون البريليوم الشبيه بالهليوم بدلالة درجة الحرارة (سلم خطي)..... 51
الشكل(III-7): معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون لأيون الكربون الشبيه بالهليوم بدلالة درجة الحرارة (سلم لوغاريتمي)..... 52
الشكل(III-8): معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون لأيون الكربون الشبيه بالهليوم بدلالة درجة الحرارة (سلم خطي)..... 53
الشكل (III-9): معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون بدلالة درجة الحرارة لـ (Li^{+} /Be^{+2} /C^{+4}). 53

قائمـــة الجـداول

الجدولI-1: كيفية تحديد الرمز الطيفي حسب قيم L..... 26
الجدولII-1: كمون التأين لبعض الذرات..... 34
الجدولIII-1: يوضح قيم z, $E_{\alpha\alpha_0}$,$f_{\alpha\alpha_0}$ لأيونات الليثيوم والبريليوم والكربون الشبيهة بالهليوم..... 47
الجدولIII-2: قيم f_{corr} لأيونات الليثيوم والبريليوم والكربون الشبيهة بالهليوم 47
الجدولIII-3: قيم العظمى لمعامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون والخطأ النسبي بين الحسابين..... 54

قائــمة الترميــزات

- ✓ **الرموز اللاتينية**

n_e	كثافة الإلكترونات
n_i	كثافة الأيونات
n_n	كثافة الجسيمات المتعادلة
n_a	كثافة الذرات
m_e	كتلة الإلكترون
m_i	كتلة الأيون
T	درجة الحرارة المطلقة
T_e	درجة حرارة الإلكترونات
T_i	درجة حرارة الأيونات
T_n	درجة حرارة الجسيمات المتعادلة
r_e	البعد بين إلكترونين
r_i	البعد بين أيونين
r_{ei}	البعد بين إلكترون وأيون
K	ثابت بولتزمان
r_0	طول لاندو
e	شحنة الإلكترون
W_{pe}	تردد الإلكترونات
W_{pi}	تردد الأيونات
Γ_{ee}	تزاوج الإلكترون
Γ_{ii}	تزاوج الأيون
Γ_{ei}	تزاوج أيون وإلكترون
n	نترون
p	بروتون
R_y	ثابت ريدبرغ
E	طاقة الذرة
h	ثابت بلانك
A_{ij}	معامل انشتاين للإنبعاث التلقائي
c	سرعة الضوء
Z	العدد الذري
N	عدد الإلكترونات
$I(v_{ij})$	الكثافة الطيفية للإشعاع
B_{ij}	معامل انشتاين للإمتصاص
B_{ji}	معامل انشتاين للإنبعاث المحرض
N_j	كثافة الإسكان في الحالة j
N_i	كثافة الإسكان في الحالة i
C	معامل الإثارة

I معامل التأين بالتصادم
Γ معامل التأين التلقائي
R معامل إعادة التشكيل الإشعاعي
T معامل إعادة التشكيل لثلاثة أجسام
D معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون
Q معامل الشدة

✓ **الرموز اليونانية**

λ_d طول ديباي
τ زمن التصادم
υ' تواتر التصادم
ℓ المسير الحر
ν سرعة القذيفة
ε_0 السماحية
υ تردد الإشعاع
v السرعة
σ_v المقطع الفعال
χ_i طاقة التأين

✓ **المختصرات**

ETC نموذج التوازن الحراري الإجمالي
ETL نموذج التوازن الحراري المحلي
CM النموذج التاجي
AI التأين الذاتي
TR الانتقال الإشعاعي
RD إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون
FAC Flexible Atomic Code
EBIT Electron Beam Ion Trap

مقدمة عـــامة

مقدمــة عامـــة

إن معرفة التركيب الذري والمعطيات الذرية التي تصف مختلف العمليات الأساسية في البلازما مهمة جدا في نمذجة الخصائص الإشعاعية للأيونات والذرات من أجل تحليل وتفسير الأطياف التي تعتبر أداة مفيدة لتشخيص حالة البلازما, وتعد ذرة الهليوم والذرات الشبيهة بالهليوم العناصر الأكثر إستخداما في بلازما الفيزياء الفلكية وبلازما المخبرية والأكثر عرضة للدراسة لأن تحليل الإنبعاثات الصادرة عنها تعطينا معلومات أكثر عن خصائص البلازما [1]. كما أن طرق إعادة التشكيل (إلكترون- أيون) مهمة جدا في تحديد توازن التأين لإسكان مختلف حالات الإثارة, ويمكن حدوثها بثلاث طرق وهي: إعادة التشكيل الإشعاعي, إعادة تشكيل ثلاثة أجسام وإعادة التشكيل ثنائي الإلكترون وهذه الأخيرة هي محل دراستنا.

تعتبر إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون عملية تصادم إلكترون- أيون ناتجة من تفاعل الإلكترونات, وهي آلية لإنتاج خطوط ساتلايت "*satellites*" [3,2] التي لوحظت في مطيافية البلازما لأول مرة سنة 1939 من قبل " *Sayers* "[4]. ثم تلاه " *Massy et Bates* " في 1942, وأيضا من الأعمال الرائدة في سنة 1964 أعمال " *Burgess et Seaton* " والذي ساهم في صياغة معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون الكلي والذي صححه في ما بعد بمعامل يعتمد على z[5]. كذلك إستمر العمل النظري لإعادة التشكيل ثنائي الإلكترون من طرف " *Bell et al.* "[6] ووضع " *Wang et al.* " طريقة نسبية مبسطة لحساب المقاطع الفعالة لذرة الهليوم ومعاملات إعادة التشكيل ثنائي الإلكتروني [7].

لقد أجرى الباحثون حساب معامل الشدة ومعامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون بشكل مباشر بالنسبة للمستويات الدنيا وتم طرح قانون سلم تقريبي ($1/n^3$) يأخذ بعين الاعتبار المستويات البعيدة (ذات n كبيرة) [8], والجدير بالذكر أن معرفة معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون بدقة أمر بالغ الأهمية لفهم مختلف مجالات البلازما كالفيزياء الفلكية والاندماج النووي الحراري[9].

في هذه الدراسة سنسلط الضوء على مدى صلاحية قانون السلم المذكور آنفا لاستنتاج معاملات الشدة ومنه معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون على الأيونات الشبيهة بالهليوم الخفيفة أي ذات عدد ذري صغير واخترنا ما يلي: C^{+4}, Be^{+2} , Li^{+}. وكان ذلك متضمن في ثلاثة فصول:

الفصل الأول: أدرجنا فيه بعض المفاهيم العامة المتعلقة بفيزياء البلازما, انطلاقا من تعريفا دقيقا لها وكذلك بعض المقادير المهمة, الخصائص التي تميزها عن بقية حالات المادة وتناولنا كذلك مطيافيتها وأسباب التعريضات فيها.

الفصل الثاني: تضمن مختلف العمليات الذرية الأساسية التي تجرى في البلازما بنوعيها العمليات الإشعاعية والتصادمية وتظهر جليا في نموذج التصادم الإشعاعي حيث أننا سنتطرق إلى دراسة نماذج وقوانين الإتزان التي تسمح بتشخيص ونمذجة البلازما, كما عرفنا ببرامج معالجة البيانات الذرية وخاصة برنامج FAC[10].

الفصل الثالث: يمثل لب هذه الدراسة حيث تناولنا فيه وصفا شاملا لعملية إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون, وقمنا بطرح خطوات حساب معامله من خلال معطيات FAC التي طبقناها على الأيونات الشبيهة بالهليوم الخفيفة ومقارنة النتائج بحساب "*Burgess et al*."[11،3].

الفصل الأول

عموميات حول البلازما

I- عموميـات حـول البـلازما

تعرف البلازما بالحالة الرابعة للمادة كونها تختلف عن الحالة الصلبة، السائلة، والغازية، وهي تشكل أكثر من 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 ويشمل العديد من الأنواع ذات خصائص مختلفة جدا. هذه الخصائص تسمح لنا بتفسير الظواهر الفيزيائية على مستوى البلازما كدرجة التأين ودرجة الحرارة الإلكترونية وغيرها من المقادير المهمة للبلازما.

سنتطرق في هذا الفصل إلى تقديم مدخل حول البلازما وذلك بالنظر إليها تاريخيا ومعرفة ماهيتها وكذا مختلف أشكالها وأهم وسائطها وكيفية معالجتها أي أننا سنعرج إلى مطيافية البلازما.

1.I لمحـة تاريخيـة

في عام 1879 اعتبر الفيزيائي الانجليزي" William Grookes " البلازما حالة مادية رابعة أطلق عليها آنذاك اسم المادة المشعة [12]. في عام 1897 اكتشف الفيزيائي البريطاني" Joseph Thomson " خصائص البلازما وطبيعتها[13] وقد أدخل مصطلح البلازما في عام 1928 من قبل الفيزيائي الأمريكي " Irwing Langmuir " في مقال له لاعتقاده أنها تشبه بلازما الدم على الأرجح [14]، كي يعبر عن المناطق المتساوية الكمون داخل أنابيب التفريغ الحاوية غازا مؤينا متعادلا كهربائيا. بعد ذلك استخدم هذا المصطلح بصفة خاصة في الفيزياء الفلكية للتعبير عن حالة مخففة للمادة، تشبه الغازإلا أنها مؤلفة من إلكترونات وأيونات موجبة، بتناسب معين يجعل الوسط إجمالا متعادل كهربائيا [15].

2.I تعاريـف البـلازما

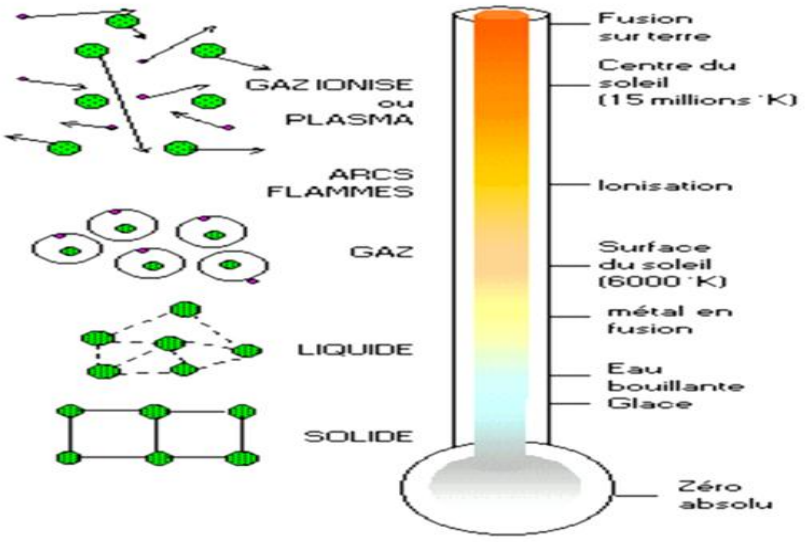
ما هي البلازما ؟

1.2.I تعريـف1: البلازما غاز متأين يحتوي عددا كافيا من الجسيمات المشحونة، تحجب نفسها إلكتروستاتيكيا عند مسافات صغيرة، مما يجعل هذا الغاز ناقل كهربائي، أي يختلف عن الغاز العادي (عازل)[15].

2.2.I تعريـف2: عند إرتفاع درجة حرارة غاز إلى حدود معينة، فإنه لا يظل غازا, بل سيتحول إلى نظام تكون فيه الطاقة الحرارية للجسيمات التي تكونه كبيرة جدا مقارنة بالقوى الكهروستاتيكية التي تربط عادة الإلكترونات بأنوية الذرات، فبدلا من غاز ساخن مكون من ذرات متعادلة كهربائيا، سيكون لدينا مزيج مؤلف من صنفين من جسيمات متعاكسة الشحنة، إلكترونات وذرات متأينة، هذه هي البلازما[16].

3.2.I تعريـف3: عند تسخين المادة من صلبة إلى سائلة إلى غازية، ثم زيادة التسخين، تبدأ بالتأين، ذلك أن إلكترونا أو أكثر سيتحرر من كل ذرة من الغاز. يمكن وصف البلازما بأنها تجمع لجسيمات متأينة، تتفاعل جماعيا بالقوى الكهرومغناطيسية البعيدة المدى، والمرتبطة بشحناتها وحركاتها[17] .

4.2.I تعريف4: عموما يمكن وصف البلازما بأنها جملة إحصائية تحمل شحنات متحركة[16].



الشكل (I-1): نموذج مرئي مبسط للمقارنة بين الحالات الأربعة للمادة[18].

3.I أشكـال البـلازما

غالبا معظم المواد الموجودة في هذا الكون الفسيح توجد على شكل بلازما [15]، إذ تمثل نسبة 99% من المادة الكونية بين النجوم والمجرات من حيث الكتلة والحجم [19] و للبلازما شكلين :

1.3.I بلازما طبيعية

إن أوائل فلاسفة الطبيعة إعتقدوا أن الكون المادي مبني من أربعة أسس وهي الأرض، الماء، الهواء والنار والتي توافق المصطلحات الحديثة لدينا من حالات المادة الصلبة والسائلة والغازية والبلازما [20].

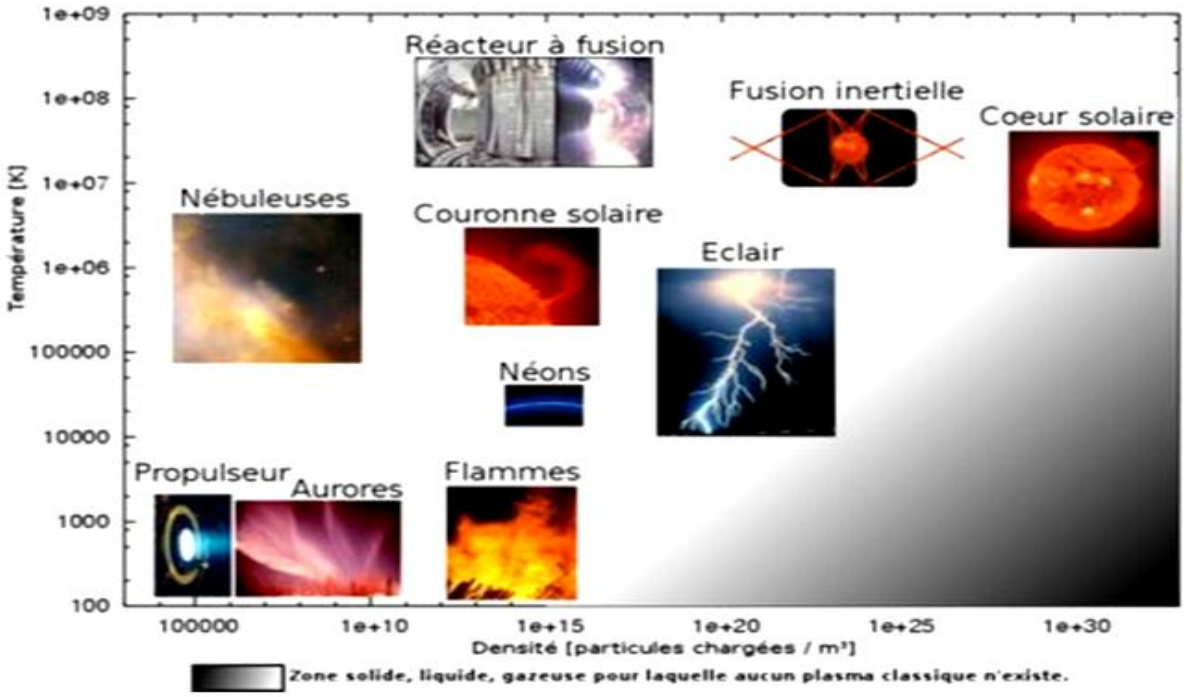
وهي نوعان في حد ذاتها[13] :

- **بلازما طبيعية كونية:** تمثل النسبة الكبيرة في هذا الكون، وهي مثل: الشمس، النجوم، الرياح الشمسية، سنديم المجرات، البقع الشمسية وهالتها، المذنبات، الفراغ المحيط بين الكواكب والنجوم والمجرات ....
- **بلازما طبيعية أرضية:** تمثل نسبة أقل من سابقتها، لأنها تحدث على مستوى كوكب الأرض، وهي مثل : البرق، الصواعق، الشفق القطبي، طبقة الأيونوسفير، الغازات النبيلة (في وقت الفجر) ..... فنجد غلاف جو الأرض يتكون من بلازما معروفة بإسم الكرة المتأينة (Ionosphere).

2.3.I بلازما صناعية

البلازما نادرة في محيطنا القريب، لذا لجأ الإنسان لتوليدها صناعيا فالغاز الموجود في مصابيح التألق (لمبات الفلوريسنت) بلازما، القوس الكهربائي المستخدم في عمليات اللحام، الاندماج النووي(Tokamak)

حيث أن Tokamak هي نوع من أنواع المفاعل النووي والاندماجي وهي اختصار للجملة الروسية: "тороидальная камера в магнитных катушках" والتي تعني الغرفة الدائرية داخل مستحثات مغناطيسية، تعتمد هذه الطريقة على رفع درجة حرارة البلازما إلى درجة الاندماج النووي وبما أن البلازما ذات درجة حرارة عالية جدا فإنه يجب فصلها وإبعادها وجعلها لا تلامس مكونات المفاعل وإلا أتلفته ويتسبب ذلك في برودته وانقطاع التفاعل الاندماجي [21].الشكل (I-2) يبين بعض الأمثلة عن البلازما.



الشكل (I-2): مختلف أشكال البلازما[16].

4.I أنواع البلازما

تم تصنيف البلازما إلى نوعين هما : البلازما الحرارية، البلازما الكهربائية.

1.4.I البلازما الحرارية

يتم تسخين الغاز حتى درجة حرارة عالية بما فيه الكفاية للتأين الجزئي أو الكامل، بحيث تكون الإلكترونات والجسيمات الثقيلة في حالة توازن حراري مع بعضها البعض بحيث :

$$T_e \sim T_i \sim T_n$$

حيث: T_e: درجة حرارة الإلكترونات، T_i: درجة حرارة الأيونات، T_n : درجة حرارة الجسيمات المتعادلة.
البلازما المستخدمة في مفاعلات الاندماج هي بلازما حرارية، ومن مساوئ البلازما الحرارية بأنها ذات طبيعة تدميرية عالية من خلال زيادة درجة حرارة المواد الملامسة[18].

2.4.I البلازما الكهربائية

يطلق على البلازما المستحثة كهربائيا " التفريغ الغازي الأيوني"، وبحكم درجة حرارتها المنخفضة يعاملونها على أنها البلازما الباردة، وبالتعريف هي غاز متأين وليست في حالة توازن حراري بحيث أن الإلكترونات الوحيدة هي الساخنة [18] ونكتب :

$$T_{\mathrm{e}} \gg T_{\mathrm{n}} \text{ و } T_{\mathrm{e}} > T_{\mathrm{i}} > T_{\mathrm{n}}$$

5.I خواص البلازما

إحدى الصفات المهمة في البلازما هي نزعتها لتبقى متعادلة كهربائيا، أي ميلها إلى توازن الشحنة الفراغية السالبة مع الشحنة الفراغية الموجبة في كل جزء من الحجم العيني، وإن أي إختلاف بسيط في كثافة الشحنة الفراغية يسبب نشوء قوى كهروستاتيكية قوية تؤثر في إتجاه إعادة التعادل، من جهة أخرى إذا تعرضت البلازما إلى حقل كهربائي خارجي فإن كثافة الشحنات الفراغية ستنظم نفسها بحيث يحجب الجزء الأعظم من البلازما من تأثيرات هذا الحقل، وبما أن البلازما غاز عالي التأين يضم عددا هائلا من الجسيمات المشحونة المتحركة بحرية داخلها، فأنها تعد موصلا جيدا للكهرباء، تتبادل هذه الجسيمات المشحونة التأثير مع الحقل الكهرومغناطيسي الموضعي، كما أن الحركة المنظمة لها تحدث تيارات كهربائية وتغيرات لكثافة الشحنة، تؤدي إلى نشوء حقول كهرومغناطيسية.

بالإضافة إلى ذلك قابليتها لحمل الذبذبات و بث الموجات، ويمكن أن تحدث أنواع مختلفة من السلوك التذبذبي، إلا أن هذه الذبذبات قد تكون معقدة جدا بسبب الميزة غير الخطية للمعادلات الهايدروديناميكية لها[15]. و سنذكر حالتين بسيطتين منها:

- **الذبذبات الكهروستاتيكية:** يوجد نوعان محتملان لهذه الذبذبات، إحداها عالية التردد تكون سريعة جدا يصعب على الأيونات الثقيلة تتبعها، وأخرى منخفضة التردد للأيونات البطيئة جدا، ولقد نوقشت لأول مرة من قبل " Tonks and Langmuir ".
- **الذبذبات الهايدرومغناطيسية** : هي عبارة عن موجات حقيقية تنتشر في وسط موصل خاضع لتأثير حقل مغناطيسي ثابت هذا السلوك تنبأ به لأول مرة "Alfven" عام 1942. وهو منسجم مع الصياغة الهايدرومغناطيسية للبلازما[21].

6.I مقادير البلازما

1.6.I طول ديباي

هو الطول الحرج للتفاعل المتبادل الكلي ويحدد بالعلاقة:

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{\mathrm{K_B} T_e}{4\pi n_e}} \ (SI) \quad = \quad 6{,}9 \sqrt{\frac{T_e}{n_e}} \ (cgs) \qquad (1\text{- I})$$

حيث: n_e: كثافة الإلكترونات، $\mathrm{K_B}$: ثابت بولتزمان.

عند معالجة أيونات البلازما بإعتبارها ساكنة، فإن إلكترونات البلازما تشكل سحابات شحنية حول الأيونات، تحجب الشحنة الأيونية عن بعد يساوي تقريبا طول ديباي.

وعموما فإن التفاعلات الجماعية هي السائدة في البلازما وأكثرأهمية من التفاعلات الثنائية، وهذه التفاعلات لا تظهر خاصتها الجماعية إلا بعد مسافة حرجة تسمى نصف قطر ديباي *Debye length*[15،16].

2.6.I طول لاندو

يعرف طول لاندو بالطول الحرج للتفاعل الثنائي ويعرف أيضا بالبعد التقليدي للاقتراب الأدنى. وهو يستخدم في تحليل ظواهر التصادم وارتباطات الموضع في البلازما ويعطي بالعبارة[16]:

$$r_0 = \frac{e^2}{K_B T} \qquad (2\text{-I})$$

3.6.I زمن التصادم

يسمى أيضا بالمدة الحرة وهو المدة التي يقضيها جسم (قذيفة) قبل أن يصدم جسما من الهدف ورمزه τ تعطى عبارته كالتالي [21]:

$$\tau = 1/\upsilon' \qquad (3\text{-I})$$

حيث: υ' هو تواتر التصادم

4.6.I المسير الحر

هو المسافة التي يقطعها جسم (قذيفة) قبل أن يتصادم بجسم من الهدف ورمزه ℓ وتعطى عبارته كالتالي [21]:

$$\ell = \tau \cdot \nu \qquad (4\text{-I})$$

حيث: ν هو سرعة القذيفة

5.6.I تردد البلازما

عندما يحدث انزياح للجسيمات المشحونة سلبا (الإلكترونات مثلا) من وضع توازنها, تصبح الشحنة الموجبة هي الغالبة مما يؤدي إلى نشوء حقل كهربائي داخلي يحاول إعادة هذه الجسيمات المشحونة إلى وضع توازنها ولكن هذه الجسيمات تتجاوز هذا الوضع, فيؤدي ذلك إلى حدوث اهتزازات في البلازما. وللتفاعلات الجماعية دورا مهما في وجود اهتزازات في البلازما [21].

أ - التردد الإلكتروني للبلازما:

$$W_{pe} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\varepsilon_0 m_e}} \qquad (5\text{-I})$$

حيث : m_e : كتلة الإلكترون.

ε_0 : السماحية.

n_e : كثافة الإلكترونات.

ب- التردد الأيوني للبلازما: $$W_{pi} = \sqrt{\frac{n_i Z^2 e^2}{\varepsilon_0 m_i}} \quad (6\text{-I})$$

حيث : m_i : كتلة الأيون.

n_i : كثافة الأيونات.

6.6.I نصف قطر الكرة الإلكترونية

وهو البعد المتوسط بين إلكترونين ويستخرج من [22]:

$$\frac{4}{3}\pi r_e^3 n_e = 1 \rightarrow r_e = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi n_e}} \quad (7\text{-I})$$

7.6.I نصف قطر الكرة الأيونية

وهو البعد المتوسط بين أيونين, ويستخرج من [22]:

$$\frac{4}{3}\pi r_i^3 n_i = 1 \rightarrow r_i = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi n_i}} \quad (8\text{-I})$$

8.6.I درجة التأين

تشير درجة التأين في الغاز أو البلازما إلى كمية الذرات التي فقدت أو إكتسبت إلكترونات، وتكون الحرارة العامل المتحكم بذلك، حيث إتضح أن درجة جد منخفضة من تأين الغاز تؤدي لإظهار نفس الخصائص الكهرومغناطيسية ويتصرف الغاز كبلازما. تصاغ رياضيا بالعلاقة التالية:

$$\alpha = \frac{n_e}{(n_e + n_n)} \quad (9\text{-I})$$

حيث : n_e : كثافة الإلكترونات.

n_n : كثافة الجسيمات المتعادلة.

يمكن أن نقسم الغاز المتأين إلى قسمين حسب درجة التأين[21،23]:

- غاز ضعيف التأين $\alpha > 10^{-4}$.
- غاز شديد التأين $\alpha < 10^{-4}$.

9.6.I معامل التزاوج

لمعرفة التزاوج بين جسيمات البلازما في الجملة, ننظر إلى معامل التزاوج وهو يمثل النسبة بين الطاقة الكامنة المتوسطة والطاقة الحركية المتوسطة للجسيمات [21]:

فهو للإلكترونات: $\Gamma_{ee} = \frac{e^2}{K_B T r_e}$ (10-I)

وللأيونات يكون: $\Gamma_{ii} = \frac{Z^2 e^2}{K_B T r_i}$ (11-I)

أما للإلكترونات والأيونات: $\Gamma_{ei} = \frac{Z^2 e^2}{K_B T r_{ei}}$ (12-I)

حيث: $r_{ei} = \frac{r_e + r_i}{2}$ (13-I)

إن معامل التزاوج مهم جدا لمعرفة مدى التزاوج بين جسيمات البلازما، فإذا كان $\Gamma << 1$ فإن البلازما تكون ضعيفة التزاوج، أما إذا كان $\Gamma > 1$ تكون البلازما شديدة التزاوج.

10.6.I درجة الحرارة الإلكترونية والأيونية

درجة الحرارة الإلكترونية T_e تشير لدرجة حرارة الإلكترونات, وتعتبرالأكثرأهمية مقارنة بدرجة حرارة الجسيمات الأخرى (أيونات, جسيمات محايدة) في تحديد الظواهر التي تحدث في البلازما، إذ أن الإلكترونات هي العامل الأكثر فعالية في تأين البلازما.
في نظام متوازن ترموديناميكيا، تحقق درجة حرارة الإلكترونات المعادلة الآتية [24].

$$E_c = \frac{1}{2} m_e \langle V \rangle^2 = \frac{3}{2} K_B T_e \quad \text{(14-I)}$$

حيث :

E_c : الطاقة الحركية.

m_e : كتلة الإلكترون.

$\langle V \rangle$: متوسط سرعة الإلكترون.

T_e : درجة حرارة الإلكترونات بالكلفن.

تعبر هذه المعادلة عن تساوي الطاقة الحركية المتوسطة للجسيمات مع طاقة التحريض الحراري. وبما أن كتلة الجسيمات المحايدة والأيونات متقاربة فتكون لهم درجة حرارة متساوية وتقارب درجة حرارة الغرفة, بخلاف الإلكترونات التي تكون لها درجة حرارة مرتفعة.

11.6.I كثافة الجسيمات ودوال التوزيع

كثافة البلازما تمثل عدد الجسيمات في وحدة الحجم لكل صنف (أيونات, إلكترونات, جسيمات حيادية), ويخضع توزيعها لعبارات إحصائية تدعى دوال التوزيع التي تصف عدد الجسيمات في اللحظة t والموضع بين r و r+dr حيث:

f دالة في الزمن والموضع والسرعة $f = f(,r,v)$

في الفيزياء الإحصائية نميز ثلاث دوال لتوزيع الجسيمات.

- توزيع ماكسويل بولتزمان.
- توزيع بوز إنشتاين.
- توزيع فيرمي ديراك.

إذا كان الغاز في حالة توازن ترموديناميكي وطاقة التفاعل بين الجسيمات مهملة أمام الطاقة الحركية فإن الجسيمات تخضع لتوزيع ماكسويل بولتزمان، التي تعبر عن التصادمات أثناء الحركة العشوائية وتكتب دالة توزيع السرعات في هذه الحالة كما يلي [25]:

$$\mathrm{f_m} = \left(\frac{m}{2\pi \mathrm{K_B} T}\right)^{3/2} exp\left(\frac{-mv^2}{2\mathrm{K_B} T}\right) \qquad (15\text{-I})$$

m تمثل كتلة الجسيم.

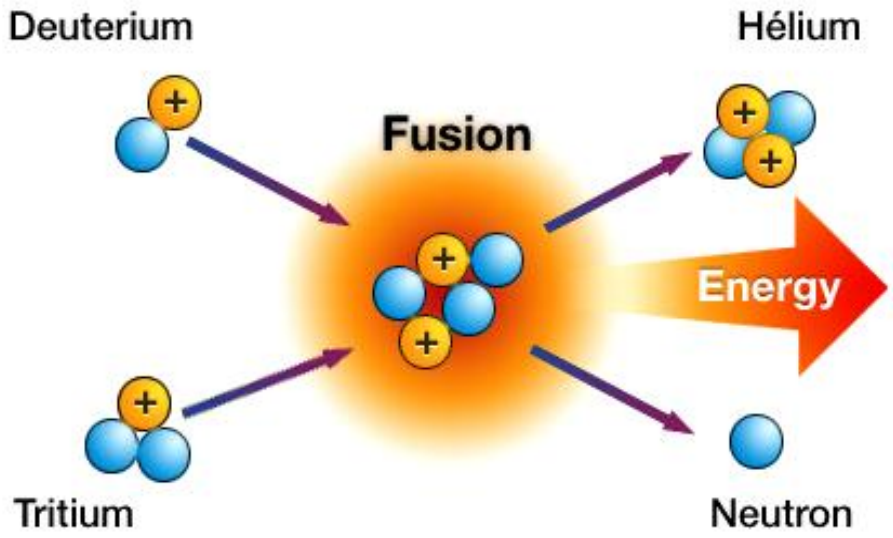
7.I تطبيقات البلازما

من بين المجالات العلمية التطبيقية للبلازما نذكر:

الفيزياء الفلكية، التحكم بالاندماج النووي الحراري، الإضاءة (مصابيح النيون)، كيمياء البلازما، الكيمياء التحليلية، اللحام(قوس اللحام)، المعالجة السطحية وتصنيع المواد الإلكترونية الدقيقة.

1.7.I الاندماج النـووي

إن عملية الإندماج النووي هي الوحيدة التي يمكن أن تؤمن الطاقة للنجوم. فعندما تندمج النوى الخفيفة مشكلة نوى أثقل، وتطلق أثناء ذلك طاقة هائلة وخارقة فإن هذه العملية تسمى اندماج نووي. والشكل التالي يوضح آلية الاندماج النووي لنواتي الدوتيريوم والتريتيوم.



الشكل (I-3): إندماج نووي بين نواتي الدوتيريوم والتريتيوم[26].

وفيما يلي أهم تفاعلات الاندماج النووي [26]:

$$D + T \rightarrow He_2^4 + n + (17.6\ Mev) \quad (16\text{-I})$$

$$D + D \rightarrow T + p + (4.03\ Mev) \quad (17\text{-I})$$

$$D + He_2^3 \rightarrow He_2^4 + p + (18.3\ Mev) \quad (18\text{-I})$$

حيث :

D : الدوتيريوم.

T : التريتيوم.

p : بروتون.

n : نيوترون.

He_2^4 : الهليوم.

He_2^3 : نظير الهليوم.

إن تحقيق عملية الإندماج النووي أمر صعب للغاية. والسبب في ذلك هو أن النوى تحمل شحنات كهربائية موجبة فتتنافر عن بعضها البعض بقوة إذا أجبرت على التجميع مع بعضها البعض. ينبغي هنا استخدام قوة شديدة تكفي للتغلب على القوة التنافرية وإرغام الذرات على الإندماج، وتعادل هذه الطاقة الحركية المطلوبة درجة حرارة عالية جدا. كما أنه لا يمكن لأي مادة صلبة أن تستخدم لاحتواء الجسيمات التي ستشترك في تفاعل اندماجي [27].

8.I حصر البلازما

هي إحدى أهم خصائص البلازما، ولقد اهتم العلماء كثيرا بتطوير تقنية حصر البلازما هذا بسبب الحاجة الكبيرة للبلازما، إذ تعتبر هذه الأخيرة مفتاح التفاعلات النووية داخل مفاعلات الاندماج، يوجد عدة تقنيات لهذه الخاصية كالحصر العطالي و الحصر بمجال مغناطيسي.
فمثلا مبدأ تقنية الحصر بمجال مغناطيسي هو حصر البلازما داخل مجال مغناطيسي بحيث لا تلمس جسيمات البلازما (الكترونات وأيونات) أي جدار مادي، لأن درجة حرارتها تسبب انصهار مادة المفاعل النووي، ولقد طورت عدة أجهزة تعتمد على هذا المبدأ مثل : توكاماك [15].

9.I مطيافية البلازما

إن الكشف عن البلازما و دراستها يتم بملاحظة إشعاعها الكهرومغناطيسي المنبعث عنها, ضوء، أشعة سينية, موجات راديوية, إن هذا الإشعاع ليس مرتبطا فقط بخصائص مشع معزول، بل أيضا بخصائص البلازما المحيطة به [16].
إن الطيف المنبعث من الذرة له أهمية كبيرة في التعرف على العناصر المختلفة، حيث أن لكل عنصر من العناصر الموجودة في الطبيعة طيف كهرومغناطيسي خاص به ولا يوجد عنصرين لهما نفس الطيف، حيث تدرس هذه الأطياف باستخدام المطيافية، فالتحليل الطيفي يسمح لنا بتحديد عدة وسائط هامة مثل درجة الحرارة وكثافة الأيونات والإلكترونات وكذلك تدفق الجسميات وأطوالها وتوزيع سرعتها، دوران البلازما (المتعلق بحقول داخلية)[8].

1.9.I الأعداد الكمية

إن كل حالة للذرة تكون عادة مميزة بأعداد كمية، وتوجد أربعة أعداد كمية مهمة هي:

أ. العدد الكمي الرئيسي(n):
يميز العدد الكمي الرئيسي مستوى الطاقة الذي يتواجد فيه الإلكترون[28]، ويأخذ العدد الكمي الرئيسي القيم.....n=1،2،3 وهو يحدد قيم طاقة الذرات الشبيهة بالهيدروجين وفقا للعلاقة التالية [8]:

$$E = -R_y \frac{Z^2}{n^2} \qquad (19\text{-}I)$$

حيث:
R_y : ثابت ريدبرغ.
E : طاقة الذرة.

ب. العزم الزاوي المداري (l):

تعطى العبارة العامة للعزم الزاوي المداري بالشكل [8]:

$$L = \hbar\,[l(l+1)]^{1/2} \qquad (20\text{-I})$$

وتأخذ l القيم: l=0,1,2,……n-1

ج. العدد الكمي المغناطيسي(m):

وسمي بالعدد الكمي المغناطيسي لأنه يحدد تصرف المستويات الطاقوية في وجود حقل مغناطيسي، والعدد الكمي المغناطيسي يمكن أن يتخذ القيم [28] $m=0\ ,\pm1,\pm2,\ldots.\pm l$.

د. العدد الكمي للف (S):

إن الإلكترون جسيم مشحون يدور حول نفسه في حركة مغزلية حيث يأخذ اللف(السبين) دائما قيمة 1/2 ويوجد شرط كمي للإلكترون نفسه، فهو يمتلك عزما مغناطيسيا صغيرا، مع العلم أن العزم المغناطيسي للف (m_s) لا يتخذ سوى إتجاهين فقط بالنسبة لمجال مغناطيسي خارجي إما موازي أو معاكس حيث $m_s = \pm$ 1/2 [29].

2.9.I عمليات الإزدواج

أ. الازدواج LS:

يعرف بازدواج " Russell-Saunders "، ويحدث عندما يكون العدد الذري صغير، بإهمال التفاعل سبين مدار في تقريب الحقل المركزي مقارنة مع التنافر الكهروستاتيكي [29] حيث:

العزم الزاوي المداري الكلي L $\qquad L = \sum_i l_i \qquad (21\text{-I})$

العزم الزاوي اللفي (المغزلي) الكلي S $\qquad S = \sum_i s_i \qquad (22\text{-I})$

ومنه : $\qquad J = L+S \qquad (23\text{-I})$

ب. الازدواج J J:

يحدث هذا الازدواج في حالة الذرات الثقيلة ويعطي العزم الزاوي j_i للإلكترون i من خلال

$$j_i = l_i + s_i \qquad (24\text{-I})$$

ويصبح العزم الزاوي الكلي [28] كالتالي :

$$J = \sum_i j_i \qquad (25\text{-I})$$

3.9.I الرمز الطيفي

من المعلوم أن الحالات الذرية توصف باستعمال الترميز الطيفي, وذلك بتحديد مضروب اللف 2s+1 والعزم الزاوي المداري الكلي L بالإضافة إلى العزم الزاوي الكلي للإلكترون J ونكتب :

$$^{2s+1}L_j \qquad \text{(26-I)}$$

كما هو الحال بالنسبة للدوال التي تصف إلكترون واحد يمكن تحديد قيم L بالحروف بدلا من استخدام الأعداد كالآتي [30]:

الجدول-1I: كيفية تحديد الرمز الطيفي حسب قيم L.

قيم L	0	1	2	3	4
الرمز	S	P	D	F	G

من أجل $L \geq 3$ نتبع الترتيب الأبجدي.

4.9.I الإنتقالات الذرية

جميع الذرات لديها سلسة من مستويات الطاقة المنفصلة. يتألف خط الطيف من مجموعة من الخطوط المنفصلة وتعرف الخطوط الطيفية على أنها انتقالات بين السويات الطاقوية، ويمكن أن تحدث انتقالات بين مستويات الطاقة مصحوبة بانبعاث أو امتصاص طاقة على شكل أشعة بأطوال موجية معينة تتوافق مع الفرق الطاقوي (ΔE) وذلك من خلال علاقة بلانك التالية[32,30] :

$$\Delta E = E_j - E_i = h\upsilon \qquad \text{(27-I)}$$

حيث :

ΔE: الفرق الطاقوي الموافق لانتقال.

E_i : طاقة المستوي الذري i، E_j : طاقة المستوي الذري j.

h : ثابت بلانك.

υ : تردد الإشعاع.

كما تعطى الشدة الطيفية لطيف الإنبعاث من السوي j إلى المستوي i بالعلاقة:

$$I = N_j h v_{ji} A_{ji} \qquad \text{(28-I)}$$

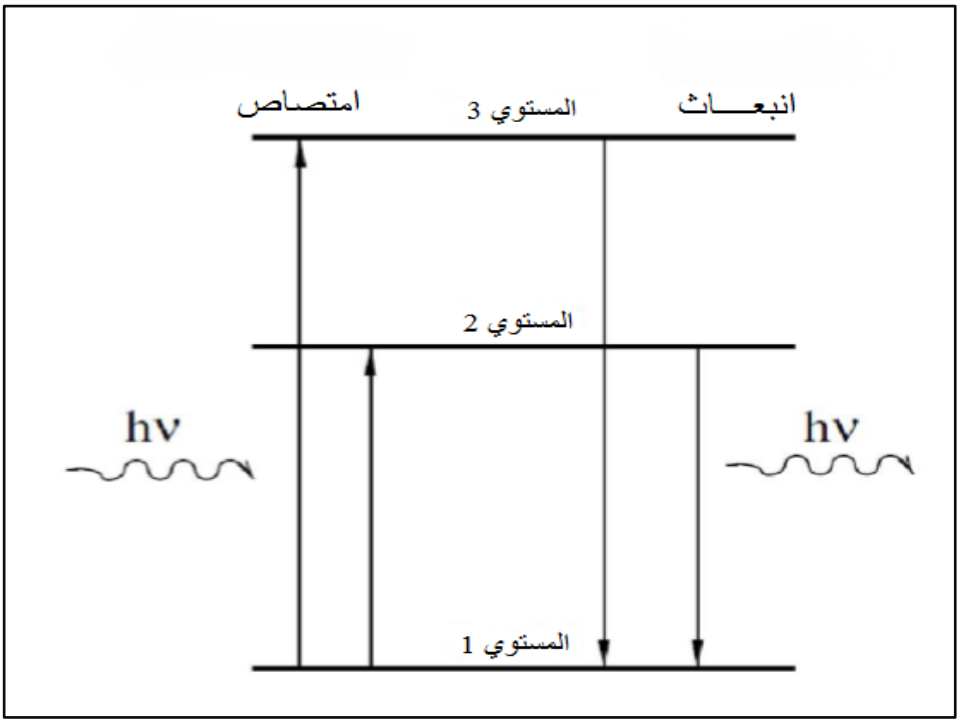
حيث:

N_j :عدد الذرات في الحالة j.

A_{ji} : معامل انشتاين للإنبعاث التلقائي.

v_{ji} : التردد.

حيث يعطى الانتقال من السويات السفلى إلى السويات العليا طيف الإمتصاص، أما الانتقال من السويات العليا باتجاه السويات السفلى فيعطي طيف الانبعاث ويوضح الشكل (I-4) عمليتي الامتصاص والانبعاث.



الشكل (I-4): رسم تخطيطي لعمليتي الإمتصاص والإنبعاث [24]

5.9.I قواعد الاصطفاء

لحدوث انتقال من مستوي ذري إلى آخر، وذلك في تقريب ثنائي الكهربائي وجب توفر الشروط التالية [30]:

$$\Delta M = 0,\pm 1 \ , \ \Delta J = 0,\pm 1 \ , \ \Delta S = 0 \ , \ \Delta L = \pm 1 \quad (0 \leftrightarrow 0 \text{ بإستثناء الانتقال})$$

حيث : S : اللف الكلي.
L : العزم الزاوي المداري الكلي.
J : العزم الزاوي الكلي للإلكترون.
M : العدد الكمي المغناطيسي.

6.9.I تعريضات الخطوط الطيفية المنبعثة في البلازما

مدى تعريض الخطوط الطيفية المنبعثة من البلازما يمكن أن توفر الوصول إلى بعض المعلومات عن البلازما, على سبيل المثال: تعريض ستارك يعطينا الكثافة الإلكترونية في حين تعريض دوبلر يحدد درجة الحرارة الحركية . وهناك العديد من الأسباب لتعريض الخطوط ولذلك يمكن تصنيفها إلى ثلاث فئات [31] :

- التعريض بواسطة الإشعاع : التعريض الطبيعي
- التعريض بواسطة فعل دوبلر
- التعريض بواسطة التصادم

يشتمل التعريض الكلي على كل هذه التعريضات مع وجود نوع مهيمن بينما تعتبر بقية الآثار كتصحيحات صغيرة[29].

1.6.9.I التعريض الطبيعي

مدة حياة الذرات τ في المستوي خلال حالة مثارة محدودة وذلك حسب مبدأ الشك لهايزنبرغ $(\Delta E.\tau \geq \hbar)$، وينتج عن ذلك ما يسمى بالتعريض الطبيعي للخطوط الطيفية ويعتمد ذلك على الاستقرارية النسبية للحالات المثارة، حيث أنه تزيد أو تنقص نسبة إسكان السويات الطاقوية بسبب الإمتصاص أو الإنبعاث التلقائي [32,31].

لدينا :

$$\Delta\upsilon = \frac{\Delta E}{\mathrm{h}} = \frac{\hbar}{\tau.\mathrm{h}} = \frac{\mathrm{h}}{2.\pi.\tau.\mathrm{h}} \rightarrow \Delta\upsilon = \frac{A_{ij}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\tau} \qquad (29\text{-I})$$

مع العلم أن : $A_{ij} = \frac{1}{\tau}$

A_{ij} هو معامل انشتاين للإنبعاث التلقائي.

2.6.9.I تعريض دوبلر

أصل فعل دوبلر هو حركة الذرات والايونات المرسلة (تحرك ذرات المصدر)، وعند إنبعاث الاشعاع فإن المطياف (مراقب) يقيس ترددات مختلفة حيث أن هذه الترددات المقاسة تعتمد على السرعة النسبية للذرات بالنسبة للمراقب كما في معادلة دوبلر:

$$\upsilon = \upsilon_0\left(1 + \frac{V_x}{\mathrm{c}}\right) \rightarrow \Delta\upsilon = \frac{\upsilon_0.V_x}{c} \qquad (30\text{-I})$$

حيث : $\Delta\upsilon$: تعريض الخط.

V_x : سرعة الذرة في إتجاه المراقب.

في حالة التوازن الحراري تخضع سرعات الذرات إلى توزيع ماكسويل بولتزمان وتعطى المعادلة بالشكل:

$$\Delta\upsilon = \upsilon_0\sqrt{(2KT/m)}/c \qquad (31\text{-I})$$

من الملاحظ أن تعريض دوبلر يتناسب مع حرارة الوسط، ويتخذ الشكل الغاوسي.

وعموما يسود هذا التعريض في حالة درجات الحرارة المرتفعة والكثافات المنخفضة [32,28].

3.6.9.I تعريض بواسطة التصادم

إن السبب الأساسي لتعريض خطوط الطيف في البلازما هو الاضطراب الناجم عن الذرات وذلك بمختلف جزيئاتها المشحونة وغير المشحونة، ويعطى التعريض في الخط الطيفي بالعبارة التالية:

$$\Delta\upsilon = \upsilon_{coll}/2 \qquad (32\text{-I})$$

υ_{coll} : معدل التصادم.
وقد قسم إلى ثلاث فئات:

أ. التعريض بالرنين: وذلك بواسطة اضطراب الجزيئات غير المشحونة(المعتدلة) أي ذات النوع لذرات المصدرمثل (تفاعل ثنائي الأقطاب – ثنائي الأقطاب).

ب. تعريض فاندرفالز: بواسطة اضطراب الجزيئات الغير مشحونة(المعتدلة) مع مختلف أنواع ذرات المصدر(تفاعل ذرة من نوع A- ذرة من نوع B).

ج. تعريض ستارك: سببه تفاعل الجسيمات المشحونة(ايونات والكترونات) مع ذرات المصدر. ويتم التعبير عن هذا التفاعل بواسطة تأثير حقل أيوني والكتروني ضعيف مع ذرات المصدر. الحقل E يعمل على اضطراب مستويات الطاقة الذرية لتصل إلى أدنى المستويات. هذا الطرح يعمل على تحلل مستويات الطاقة الذرية إلى عدة مستويات، وينتج هذا التعريض عندما يكون زمن التفاعل بين المضطرب والمشع أكبر من الزمن بين تصادمين حيث المضطرب هو عبارة عن أيون سرعته أقل بكثير من سرعة الإلكترونات ويصبح لهذا التعريض أهمية في حالة البلازما شديدة التأين [33,28].

خلاصة

تناولنا في هذا الفصل البلازما من جوانب مختلفة وقدمنا بعض التفاصيل المهمة فيها. حيث تعرضنا في البداية إلى أشكال البلازما وخصائصها وكيفية حصرها ولخصنا أهم المقادير المميزة في فيزياء البلازما. وفي الجزء الثاني من الفصل ركزنا على مطيافية البلازما وأسباب تعريضات الخطوط الطيفية المنبعثة.

الفصل الثاني

الآليات الذرية الأساسية في البلازما

II- الآليـات الذريـة الأساسيـة في البـلازما

تعد البلازما غاز مؤين يتشكل من عدد كبير من الجسيمات(إلكترونات, أيونات), فعندما تنحصر هذه الأخيرة في حجم محدود من الفضاء, ستحدث عمليات الاصطدام المختلفة عن طريق التفاعلات بين الالكترونات, أيون مع أيون, إلكترون مع أيون. هذه التفاعلات تنتج العديد من الآليات الذرية الأساسية التي يمكن تصنيفها إلى نوعين : آليات إشعاعية, آليات تصادمية.

سنتعرف في هذا الفصل على مختلف العمليات الذرية الأساسية التي تحدث في البلازما ودراسة مختلف قوانين ونماذج التوازن التي تسمح بتشخيص ونمذجة البلازما, كما أننا سنتطرق إلى برامج الحساب التي تهتم بمعالجة المعطيات الذرية لمختلف الآليات.

1.II معامل الاحتمال

تعد الخطوط الطيفية الصادرة عن البلازما مشخص مهم لمعرفة حالة البلازما, ويتطلب تفسير هذه الإنبعاثات الطيفية حساب مسبق للكثافة الكلية للإسكان لحالات الأيونات ومختلف الجسيمات الأخرى. وكذلك إسكان مختلف المستويات. كذلك هذا الحساب يستخدم معامل المقطع الفعال للآليات الذرية الأساسية في البلازما.

في الواقع إن هذه المعطيات ضرورية لنموذج التصادم الإشعاعي مع استخدام حركية الإسكان.
إن معامل الاحتمال $\langle\sigma_v\rangle$ لأي آلية ذرية بدلالة المقطع الفعال σ_v بالشكل التالي [57,9]:

$$\langle\sigma_v\rangle = \int v\sigma_v f(v)d^3v \quad (cm^3s^{-1}) \qquad \text{(1-II)}$$

v: سرعة الجسيمات عند التصادم.

σ_v: المقطع الفعال.

$f(v)$: دالة توزيع السرعات.

في حالة توزيع ماكسويل موحد الخواص:

$$\langle\sigma_v\rangle = \int_{v_{min}}^{\infty} v\,\sigma_v f(v)d^3v$$

$$= \int_{\Delta E}^{\infty} v\sigma_\varepsilon F(\varepsilon)d\varepsilon \qquad \text{(2-II)}$$

$$= K\int_{\Delta E}^{\infty} \frac{\sigma}{\pi a_0^2} e^{-\varepsilon/T}\frac{\varepsilon d\varepsilon}{Ry^{1/2}T^{1/2}}$$

حيث:

$$v_{min} = (2\Delta E/\mu)^{1/2} \ ,\varepsilon = \mu v^2/2 \ ,K = 2\sqrt{\pi}a_0^2 c/137 = 2.17\ 10^{-8}\ \ cm^3 s^{-1}$$

μ :الكتلة المختزلة, ΔE : طاقة العتبة لكل عملية معينة, a_0 : نصف قطر بور.

2.II العمليات الاشعاعية

العمليات الاشعاعية تجمع كل آليات إمتصاص أوإنبعاث الفوتونات.

1.2.II الانبعاث التلقائي (Emission spontanée)

ويدعى بإعادة الإثارة الإشعاعية "*Désexcitation radiative* ", ويحدث ذلك عندما تكون فيها الذرة في حالة مثارة (غير مستقرة) j تعود إلى المستوي الأساسي i ويبعث فوتون hv .

انبعاث الفوتونات في اتجاه عشوائي مرتبط بزمن الحياة في المستوي[34,32], ويمثل الانتقال بـــ[28]:

$$(Z,N)^* \ \rightarrow \ (Z,N) + hv \qquad \text{(3-II)}$$

- إحتمال الانبعاث التلقائي في وحدة الزمن هو[32]:

$$\frac{dP_{ji}}{dt} = A_{ji} \qquad \text{(4-II)}$$

حيث:

A_{ji} هو معامل اينشتاين للانبعاث التلقائي.

2.2.II الامتصاص الاشعاعي (absorption induite)

ويطلق عليه بالامتصاص المحرض ذلك بأنه يحدث عندما تمتص ذرة كمية من الطاقة hv فتثار وتنتقل بذلك من المستوي i طاقته E_i إلى مستوي j طاقته أعلى E_j وتعطى من خلال التفاعل [28]:

$$(Z,N) + hv \ \rightarrow \ (Z,N)^* \qquad \text{(6-II)}$$

حيث أن:

(Z,N) : ذرة في حالة أساسية عددها الذري Z , N عدد الكتروناتها.

$(Z,N)^*$: ذرة في حالة مثارة.

- إحتمال الامتصاص على الثانية يعطى [32]:

$$\frac{dP_{ij}}{dt} = B_{ij} I(v_{ij}) \qquad \text{(5-II)}$$

حيث:

B_{ij} : معامل اينشتاين للإمتصاص.

$I(v_{ij})$: الكثافة الطيفية للإشعاع بلالة التردد v_{ij}. وتعطى بعلاقة بلانك:

$$I(v_{ij}) = \frac{8\pi h {v_{ij}}^3}{c^3} \frac{1}{\frac{h v_{ij}}{(e^{kT}-1)}} \quad [j/cm^3.Hz] \qquad (6\text{-II})$$

3.2.II الانبعاث المحرض (Emission stimulée)

تتم هذه العملية في حالة تجاوب الفوتون الوارد مع الذرة, فعندما تكون ذرة في حالة مثارة j يمكن أن تمتص كمّة من الطاقة hv وترجع إلى المستوي الأساسي i وتبعث كمّتين من الطاقة [34,32] وتمثل بـــ [28]:

$$(Z,N)^* + hv \rightarrow (Z,N) + hv + hv \qquad (7\text{-II})$$

- إحتمال الإنبعاث المحرض بوحدة الزمن هو:

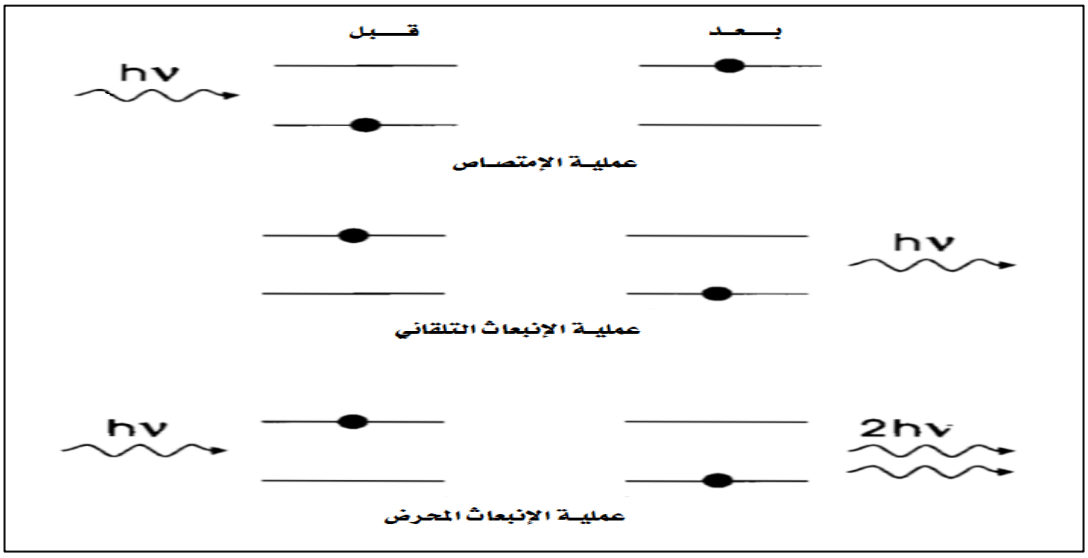
$$\frac{dP_{ji}}{dt} = B_{ji} I(v_{ij}) \qquad (8\text{-II})$$

حيث :

B_{ji} : معامل اينشتاين للإنبعاث المحرض.

العلاقة التي تربط B_{ij} و B_{ji} هي: $g_i B_{ij} = g_j B_{ji}$

ويوضح الشكل (1.II) مختلف الانتقالات الإشعاعية التي تحدث على المستوي الذري.



الشكل(1.II): مخطط يوضح الانتقالات الإشعاعية في نظام ذو مستويين[35].

4.2.II التأين الضوئي

تحدث هذه العملية عند امتصاص الذرة للفوتون الوارد وتحرير الكترون حيث طاقة الفوتون يجب أن تكون أعلى من كمون التأين للذرة[36,34]: ويعبر عنها بالعلاقة التالية [28]:

$$(Z,N) + hv \rightarrow (Z,N-1) + e \qquad \text{(12-II)}$$

الجدولII-1: كمون التأين الأول لبعض الذرات [37].

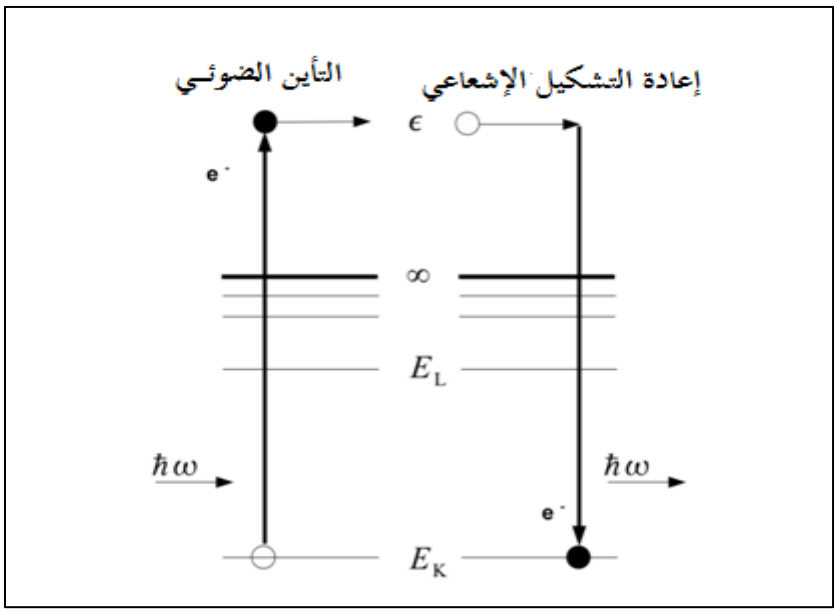
العنصر	الرمز	العدد الذري	كمون التأين (eV)
الهليوم	He	2	24.587
النيون	Ne	10	21.564
الأرغون	Ar	18	15.759
الأكسجين	O	8	13.618
الكربون	C	6	11.26
البريليوم	Be	4	9.322
الحديد	Fe	26	7.87
الألمنيوم	Al	13	5.986

4.2.II إعادة التشكيل الإشعاعي

تمت دراسة إعادة التشكيل الإشعاعي نظريا في سنة 1920 م من طرف*Karmes et Bates et al.* [38]. إن عملية إعادة تشكيل (إلكترون-أيون) تحدث في معظم الأحيان في الحالات المثارة وذلك من خلال إلغاء إثارة الأيون وإعادته إلى حالة أكثر إستقرارا, وإعادة التشكيل الإشعاعي recombinaison radiative (RR) هي العملية الأساسية التي تميز تفاعل الاشعاع الكهرومغناطيسي مع الذرات أو الايونات, وتتمثل في التقاط الكترون حر بواسطة أيون$(Z,N-1)$ ويتم إرسال فوتون طاقته hv [39,38] ويعبر عن هذه العملية كالتالي [28]:

$$(Z,N-1) + e \rightarrow (Z,N) + hv \qquad \text{(13-II)}$$

وهي العملية العكسية للتأين الضوئي.



الشكل(2.II): عمليتـي إعادة التشكيل الإشعاعي والتأين الضوئي[38].

3.II العمليات التصادمية

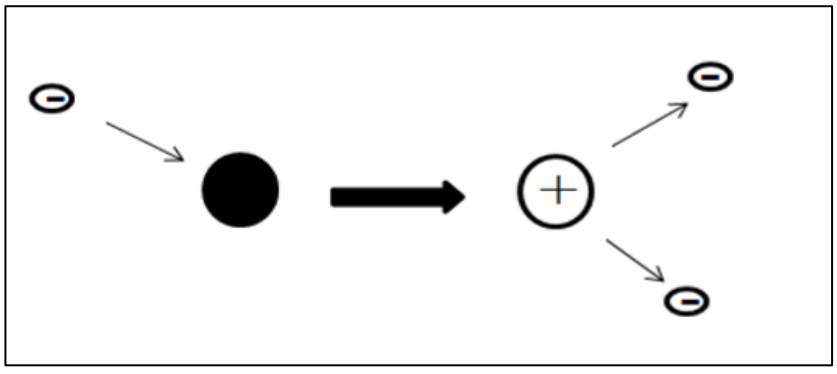
تلعب ظواهر التصادم دورا هاما في الفيزياء الفلكية وفيزياء البلازما وغيرها. في الأساس العمليات التصادمية تنطوي على اصطدام بين الجسيمات الأولية (الفوتونات, الإلكترونات,...) والنظام الذري (ذرة, أيون, جزئ) أو بين نظامين ذريين[40].

1.3.II التأين بالتصادم الالكتروني

يعتبر التأين للذرة أو الجزيء عن طريق التأثير الإلكتروني من أهم عمليات التصادم الالكتروني, ويحدث التأين عندما يقتلع إلكترون التصادم إلكترونا من الذرة المستهدفة وفقا للتفاعل [28]:

$$(Z,N)+e\rightarrow(Z,N-1)+e+e \qquad \text{(14-II)}$$

احتمال حدوث هذه الظاهرة يعتمد على الطاقة الحركية للإلكترون الوارد حيث يجب أن تفوق طاقة التأين للذرة, وهي العملية العكسية لإعادة التشكيل لثلاثة أجسام [40,32].

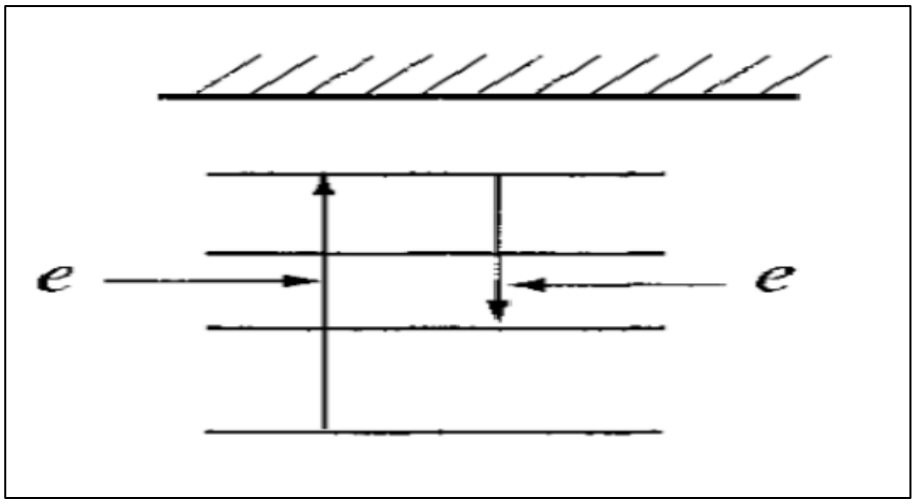


الشكل(3.II): عملية التأين بالتصادم الإلكتروني [32].

2.3.II الإثارة بالتصادم الالكتروني

في حالة الإثارة يعطي الإلكترون الساقط جزءا من طاقته إلى الذرة, لتنتقل بذلك إلى حالة أعلى طاقة, والعملية العكسية لها هي العودة من الإثارة, وتعطى من خلال التفاعل التالي[28]:

$$(Z,N) + e \leftrightarrow (Z,N)^* + e \qquad \text{(15-II)}$$



الشكل(4.II): عملية الإثارة بالتصادم الإلكتروني والعملية العكسية لها [28].

3.3.II إعادة التشكيل لثلاثة أجسام

تحدث هذه العملية عندما يتفاعل إثنين من الإلكترونات الحرة في نفس الوقت مع الأيون, حيث يلتقط أحدهما من قبل الأيون أما الآخر فيحمل الطاقة الإضافية. وهي العملية العكسية للتأين بالتصادم الالكتروني [28] ويعبر عنها وفق التفاعل التالي[28] :

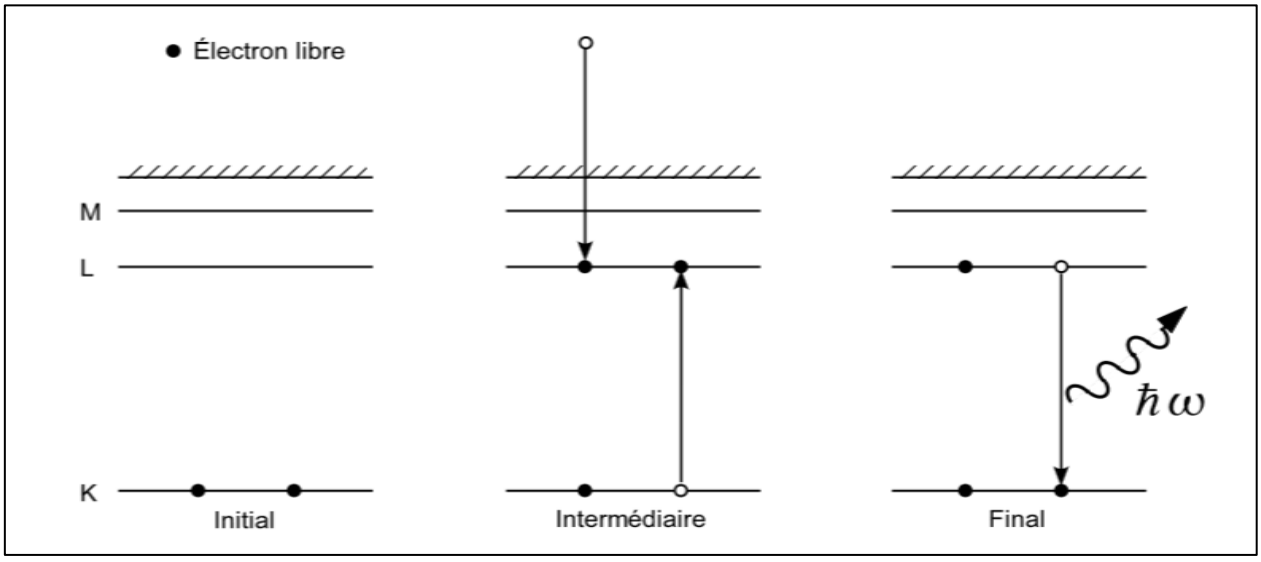
$$(Z,N-1) + e + e \rightarrow (Z,N) + e \qquad \text{(16-II)}$$

4.3.II إعادة التشكيل ثنائي الالكترون

تحصل هذه العملية بالتقاط إلكترون حر طاقته الحركية أقل من طاقة الإثارة من قبل أيون فتتشكل الحالة المثارة على نحو مضاعف, وفي مرحلة موالية ينتقل فيها الأيون غير المستقر إلى حالة أكثر استقرارا إما بالتأين التلقائي أو بانبعاث فوتون [28]. ويعبر عن إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون بالمعادلة التالية[24]:

$$(Z,N-1) + e \leftrightarrow (Z,N)^{**} \rightarrow (Z,N)^* + hv \qquad \text{(17-II)}$$

حيث :$(Z,N)^{**}$ هي حالة ذات إثارة مضاعفة.



الشكل(5.II): عملية إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون [38].

4.II نماذج الإتزان في البلازما

في البلازما هناك العديد من العمليات الذرية التي تلعب دورا هاما ومن بينها التأين, التصادم, إعادة التشكيل الإشعاعي, إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون, الإثارة, الإثارة التصادمية والعودة من الإثارة والتأين الضوئي.

من أجل تفسير صحيح للإشعاع المنبعث من البلازما واستنتاج خصائصه الفيزيائية, فمن المناسب أن تقترح نماذج اعتمادا على عدة معايير ومن أهمها الكثافة n_e ودرجة حرارة الإلكترونات T_e.

تتمثل هذه النماذج التقريبية في نموذج التوازن الحراري الإجمالي(ETC), نموذج التوازن الحراري المحلي(ETL), النموذج التاجي (CM), نموذج التصادم الإشعاعي(CR)[37] .

1.4.II نموذج التوازن الحراري الإجمالي(ETC)

في بلازما تحتوي عدد كبير من الجسيمات وفي حالة عدم وجود تدرج في درجة الحرارة (درجة حرارة واحدة تميز النظام), حيث مختلف الجسيمات يكون لها نفس متوسط الطاقة الحركية وهناك توازن بين حدوث الظواهر ونقيضها مثل: التأين وإعادة التركيب، الإثارة وإزالة الإثارة أوالانبعاث والامتصاص.

ويوصف هذا النموذج من خلال القوانين الإحصائية الرئيسية الأربعة للتوازن وهي [42] :

- ✓ قانون ماكسويل : إعطاء توزيع سرعات الجسيمات.
- ✓ قانون بولتزمان : إعطاء توزيع السكان للحالات المثارة.
- ✓ قانـــون ساهـا : إعطاء درجة التأين.
- ✓ قانـــون بلانـك : إعطاء التوزيع الطيفي للإشعاع.

2.4.II قوانين الإتزان

هذه القوانين تسمح بإعطاء تفاصيل عن كثافة الإسكان وتعتمد فقط على طاقة كل عنصر معتبر. بالإضافة إلى ذلك فإن هذه القوانين تفترض أن الجسيمات التي تشكل البلازما لا يمكن تمييزها ومستقلة[38 ,37,8].

- **قانون ماكسويل**

يحدد قانون ماكسويل توزيع السرعات f(v) لمختلف الجسيمات.

$$f(v) = 4\pi v^2 \left(\frac{m}{2\pi K_B T}\right)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{mv^2}{2K_B T}} \qquad (18\text{-II})$$

ويكتب بدلالة الطاقة E $\left(E = \frac{1}{2}mv^2\right)$:

$$f(E)dE = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{E^{1/2}}{(K_B T)^{3/2}} e^{-E/K_B T} dE \qquad (19\text{-II})$$

- **توزيع بولتزمان**

توزيع بولتزمان يحدد العلاقة بين مستويات الإسكان المختلفة لنفس الأيون.

$$\frac{n_i}{n_j} = \frac{g_i}{g_j} e^{-\frac{\Delta E_{ij}}{K_B T}} \qquad (20\text{-II})$$

حيث:

ΔE_{ij} : الفرق في الطاقة بين المستويين i وj.

g_j, g_i : الوزن الإحصائي للمستوي i وj على التوالي.

ومع ذلك هذا القانون يطبق عند الكثافة :$n_e \geq 7.10^{18}\left(Z^7/n^{17/2}\right)(K_B T/Z^2 \chi_H)^{1/2}\ cm^{-3}$

حيث:

χ_H : طاقة التأين للهيدروجين.

- **معادلة ساها**

في البلازما وفي حالة توازن حراري, قانون ساها يربط بين كثافة الجسيمات(إلكترونات, ذرات, أيونات) ويحدد درجة التأين, توصف المعادلة كالتالي:

$$\frac{n_i n_e}{n_a} = \frac{g_i g_e}{g_a} \frac{(2\pi m_e K_B T)^{3/2}}{h^3} e^{-\chi_i/K_B T} \qquad (21\text{-II})$$

حيث :

n_i, n_a , n_e تمثل على التوالي كثافة الإلكترونات, الذرات والأيونات.

χ_i : طاقة التأين.

- **قانون بلانك**

قانون بلانك يحكم توزيع كثافة الإشعاع بدلالة التردد (صالح في حالة الجسم الأسود).

الكثافة الطيفية لوحدة الحجم يعطى بالعبارة:

$$u(\omega, T) = \frac{\hbar}{\pi^2 c^3} \frac{\omega^3}{e^{\hbar\omega/K_B T} - 1} \quad \text{(22-II)}$$

حيث:

ω : التردد.

c : سرعة الضوء.

3.4.II نموذج التوازن الحراري المحلي(ETL)

يطبق هذا النموذج على أنواع معينة من البلازما الثابتة والتي تمتاز بكثافة إلكترونية عالية ودرجة حرارة منخفضة نسبيا, وفي هذا النموذج يتم تحديد كثافة الإسكان في جميع المستويات الذرية في عملية الإثارة التصادمية الواقعة. عندما تصبح كثافة الالكترونات عالية ($ne>10^{23}$ *électrons/cm3*) فان معدل الإثارة التصادمية في المستويات الذرية يخضع لمبدأ التوازن وذلك في غياب الانبعاث العفوي, في ظل هذه الظروف نقول أن البلازما في حالة توازن حراري محلي, كما يتم استخدام قوانين التوازن الإحصائي لبولتزمان من أجل حساب إسكان المستويات الذرية للأيون, ومن أجل تحديد توزيع درجة التأين للمستويات نطبق معادلة ساها "*saha*"[39,38] .

4.4.II النموذج التاجي (CM)

في الأصل تم تطوير هذا النموذج لدراسة الهالة الشمسية ($ne\leq10^{8}$ *électrons/cm3*), حيث يطبق على البلازما ذات درجات حرارة عالية $T_e = 10^6 K$ وكثافة منخفضة نسبيا مثل:بلازما التوكماك المنتجة في المخابر لأغراض الإنصهار, ومصادر الأيونات(EBIT).

في ظل هذه الظروف من درجة الحرارة والكثافة فإن التوازن الحراري غير محقق ولا يمكن وصف ظواهر التأين والإثارة بقوانين بسيطة مثل قانون ساها وبولتزمان.

إن النموذج التاجي يصف الحالات المستقرة (جميع الأيونات تقريبا في الحالة الأساسية) لهذه البلازما والتي تلخص في العمليات التالية: الإثارة بالتصادم, الإثارة الضوئية, التأين, إعادة التركيب ثنائي الإلكترون الإشعاعي.[39,37].

5.4.II نموذج التصادم الإشعاعي (CR)

نموذج التصادم الإشعاعي (CM) هو نموذج وسيط بين النموذجين(ETL) و(CM), يستخدم لدراسة البلازما المعتدلة والكثيفة حيث كثافة الإلكترونات في حدود $10^{12}cm^{-3} \leq n_e \leq 10^{22}cm^{-3}$.
وفي هذه الحالة لا يمكن إهمال العمليات الإشعاعية والتصادمية , كما يتم تحديد كثافة الإسكان من المستويات الذرية من خلال حل المعادلة التالية [39,37,8] :

$$\frac{dN_j}{dt} = \sum_{i=1}^{n_s} N_i w_{ij} - n_j \sum_{k}^{n_s} w_{jk} \qquad (23\text{-II})$$

حيث:

N_j : كثافة الإسكان في الحالة j.
n_s : العدد الكلي للحالات.

وتعطى عناصر مصفوفة الانتقال التصادمي الإشعاعي بالعلاقة :

$$w_{ij} = C_{ij} + R_{ij} + I_{ij} + T_{ij} + \Gamma_{ij} + D_{ij} \qquad (23\text{-II})$$

حيث أن [57]:

C_{ij}: معامل الإثارة.

I_{ij} :معامل التأين بالتصادم.

Γ_{ij}: معامل التأين التلقائي.

R_{ij}: معامل إعادة التشكيل الإشعاعي.

T_{ij}: معامل إعادة التشكيل لثلاثة أجسام.

D_{ij}: معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون.

5.II برامج حساب المعطيات الذرية

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

لكن الحساب المباشر لهذه المعطيات يقع عائقا بالنسبة للذرات متعددة الإلكترونات والأعداد الكمية الكبيرة أيضا. وفي هذه الحالة نلجأ إلى برامج للحساب لمعالجة المعطيات الذرية نذكر منها:
ATOM -MZ[43]- FAC [10] حيث يكمن الإختلاف بينها في الطرق والتقريبات المعتمدة لإجراء الحساب وكذلك نوع الذرات والأيونات المراد دراستها وتسعى جميعها إلى إعطاء نتائج قريبة من التجريبية.

وفي دراستنا إخترنا العمل وفق برنامج FAC "Flexible Atomic Code" نظرا لفعاليته وسهولة استخدامه من اجل الحصول على نتائج مرضية.

1.5.II تعريف برنامج FAC

طور برنامج FAC من طرف " Ming-FengGu "[44] حيث يشمل مجموعة متكاملة لحساب البنية الذرية و مختلف العمليات الذرية الإشعاعية والتصادمية بما فيها مستويات الطاقة, معاملات الإنتقال الإشعاعي, الإثارة بالتصادم والتأين بالتصادم الإلكتروني, التأين الضوئي, التأين الذاتي, إعادة التشكيل الإشعاعي وإعادة التشكيل ثنائي الإلكترون, من أجل عدد كمي كبير n من المستويات الطاقوية, كما يتضمن هذا البرنامج نموذج تصادمي إشعاعي من أجل تركيب أطياف البلازما تحت شروط فيزيائية مختلفة. كما أن حساب البنية الذرية يستند على التفاعل بين التشكيلات النسبية والدوال الموجية للجسيمات المستقلة. ويتم الحصول على هذه الأسس من الدوال الموجية انطلاقا من كمون مركزي محلي والذي يتم تحديده بطريقة منتظمة ذاتيا [44,10].

خلاصة

خصصنا هذا الفصل لوصف مختلف العمليات الذرية وهي الإنتقال الإشعاعي التلقائي و المحرض, الإثارة, التأين, إعادة التشكيل بأنواعه ومنها إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون الذي سنولي له إهتماما في الفصل الموالي, كما قدمنا وصفا عاما للنماذج المختلفة المعتمدة على نطاق واسع وخاصة النموذج التصادمي الإشعاعي الذي يدرس إسكان المستويات بالإعتماد على معاملات الآليات الذرية, ولحساب هذه الأخيرة وباقي المعطيات الذرية تناولنا إحدى طرق الحساب ألا وهو برنامج FAC.

الفصل الثالث

إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون

III- إعـادة التشكيـل ثنـائـي الإلكتـرون

إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون (RD) هي عملية تصادمية للإلكترون مع الأيون يحكمها تفاعل إلكترون – إلكترون [45]. وهي آلية لإنتاج خطوط ساتلايت " *satellite* " التي تم رصدها في التحليل الطيفي من البلازما [3], كما أن هذه العملية تؤثر على توازن التأين في البلازما ذات درجات حرارة عالية. حاليا, يعد التشخيص الطيفي للبلازما موضع مثير للاهتمام خاصة مع تقدم بلازما الانصهار بواسطة الحبس المغناطيسي ولوحظ أن الهليوم والذرات الشبيهة بالهليوم من أهم عناصرها [47,46]. وفي الواقع عمليات إعادة التشكيل الثنائي الإلكترون هي المسؤولة عن هذه البلازما ودراستها هي قضية ذات أهمية بالغة.

سنهتم في هذا الفصل بدراسة شاملة لعملية إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون وسنقوم بحساب معامله بإستخدام قانون السلم ومقارنته مع النتائج التي قدمها "*Burgess et al.*".

1.III لمحـة تاريخيـة

تم إقتراح عملية إعادة التشكيل لثنائي الإلكترون لأول مرة كأحد عمليات إعادة التشكيل إلكترون- أيون من قبل " *Sayers* " في 1939[48], ولاحقا نوقشت فيما يتعلق بالغلاف الجوي الأرضي في 1942 من طرف " *Massy et Bates* ", وكان الأثر الرئيسي في علم الفلك وما يتعلق بالهالة الشمسية ومن الأعمال الرائدة في ذلك أعمال " *Burgess et Seaton* " في 1961 والتي أدت إلى العبارة التحليلية شبه التجريبية لمعاملات إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون[5]. حيث أن ملخص مختلف التقريبات المقترحة لحساب إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون تعطى من قبل" *Ansari et al.* ". وقدم " *Burgess* " معادلة معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون الكلي والذي تم تصحيحه لاحقا بمعامل متعلق بـ (z) وكذلك إقترح " *Aldrovandi et al.* " تعديلا لمعادلة " *Burgess* " لإعطاء معايير ملائمة, ولقد وردت تقييمات حديثة لمعدل إعادة التشكيل والتأين بواسطة التصادم للعديد من العناصر في الفيزياء الفلكية وضعها " *Arnaud et al.* "[49]. فضلا عن ذلك كشفت تقارير NIFS مقارنة معاملات إعادة التشكيل على أساس مختلف المعادلات شبه التجريبية للعديد من الأيونات [50].

وفي ما يتعلق بالجانب النظري هناك عدة طرق لحساب معامل إعادة التشكيل الثنائي الإلكتروني. وضع " *Bell et al.* " النظرية العامة لمعامل إعادة التشكيل الثنائي الإلكتروني [6], كذلك وضع "*Wang et al.*" طريقة نسبية مبسطة لحساب معاملات إعادة التشكيل ثنائي الإلكتروني و المقاطع الفعالة لذرة الهليوم[7].

2.III وصف مفصل لإعادة التشكيل ثنائي الإلكترون

تتدخل هذه الآلية لتفسير وجود مستويات مضاعفة الإثارة (والتي تميز خطوط ساتلايت *satellite*) لذلك تعد الأكثر صعوبة من بين العمليات الذرية الأخرى, حيث أن الأسر الثنائي الإلكتروني " *capture diélectronique* " (CD) هو الخطوة الأولى في إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون. وهي العملية العكسية للتأين الذاتي" *autoionisation* " (AI) [52,51]. ونعبر عنها بـ [8]:

$$(Z, N-1) + e \rightarrow (Z, N)^{**} \quad \text{(1-III)}$$

ويؤدي ذلك إلى تشكيل حالة مثارة بشكل مضاعف من خلال التقاط إلكترون حر من طرف الأيون حيث تكون هذه الحالة غير مستقرة وتفوق حد التأين للذرة. مما يجعلها في خطوة ثانية تسعى لإلغاء الإثارة إما عن طريق التأين الذاتي للحالات المثارة للأيون الإبتدائي, أحد الإلكترونين المثارة يقوم بالانتقال إلى حالة أقل طاقة [52,51] وتوضح بالعلاقة التالية[8]:

$$(Z, N)^{**} \rightarrow (Z, N-1) + e \quad \text{(2-III)}$$

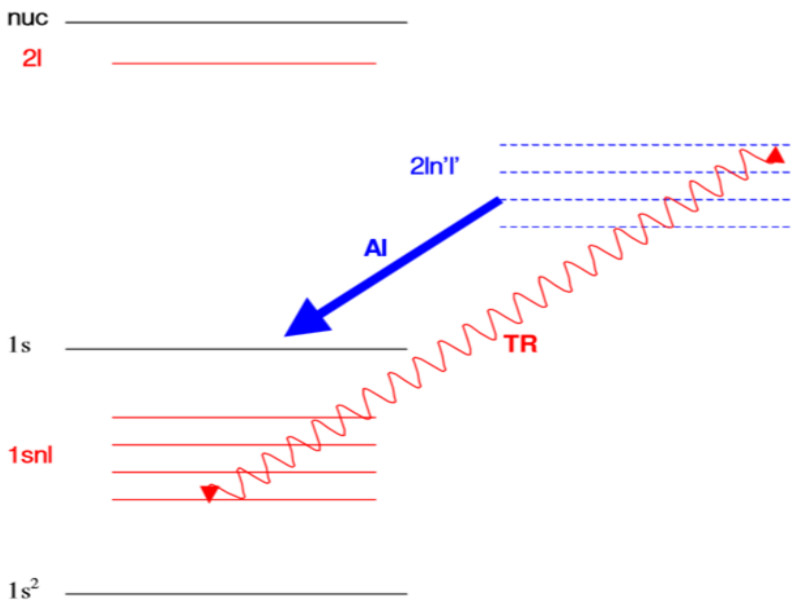
وإما بانبعاث فوتون كما تبين العلاقة التالية[8]:

$$(Z, N)^{**} \rightarrow (Z, N)^{*} + h\nu \quad \text{(3-III)}$$

وعلى سبيل المثال ذرة الهليوم توصف العملية بالشكل (1.III) ومعادلتها كالتالي [8]:

$$He^{+}(1s) + e^{-} \rightarrow He(nln'l')^{**} \rightarrow He(1sn'l')^{*} + h\nu, n, n' \geq 2 \quad \text{(4-III)}$$

علامتي * و** تشيران على التوالي حالة إثارة عادية وحالة إثارة مضاعفة.



الشكل(1.III):مخطط لمستويات الذرات الشبيهة بالهليوم [8]

AI: التأين الذاتي, TR: الانتقال الإشعاعي.

1snl: مستويات أحادية الإثارة, 2ln'l': مستويات مضاعفة الإثارة.

3.III معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون

في النموذج التاجي ذو الكثافة المنخفضة, تعتبر جميع المستويات المتأينة مستقلة عن بعضها البعض ويساهم معامل إعادة التشكيل الثنائي الإلكتروني بـ [53]:

$$\alpha_{d,ji} = 1.656\ 10^{-22}\ \frac{1}{g_s}\ Q_{d,ji}\ \frac{e^{-E_{s,j}/kT}}{(kT)^{3/2}} \qquad (5\text{-III})$$

حيث:

$E_{s,j} = E_{2lnl} - E_{1s}$ هي طاقة الأسر (*l'énergie de capture*) (eV).

kT هي درجة الحرارة الإلكترونية (eV).

g_s : الوزن الإحصائي للحالة 1s.

$Q_{d,ji}$: معامل الشدة حيث أنه من أجل انتقالات " *satellites* " يعرف كالتالي [53]:

$$Q_{d,ji} = \frac{g_j \Gamma_j A_{ji}}{\Gamma_j + \sum_i A_{ji}} \qquad (6\text{-III})$$

حيث:

Γ_j : معدل التأين الذاتي للحالة j.

g_j : الوزن الإحصائي.

A_{ji} : معدل الإنتقال الإشعاعي من i←j.

ونكتب عبارة معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون الكلي كالآتي:

$$\alpha_d = \sum_{ji} \alpha_{d,ji} \qquad (7\text{-III})$$

4.III حساب معاملات الشدة

أجرينا حساب معاملات الشدة Q حسب المعادلة (6-III). حيث قمنا بحساب معدلات التأين الذاتي ومعدلات الإنتقال الإشعاعي بواسطة برنامج FAC(الملحق أ), ثم تم وضع برنامج يقوم بحساب معاملات الشدة Q (FactSumQ) والذي يعطي جميع قيم مختلف معاملات الشدة Q حتى وصلنا إلى n=10 وهذا بالنسبة للأيونات المختارة للدراسة (Li^{+} /Be^{+2} /C^{+4}). أما بالنسبة لبقية القيم (لما n>10) يتم الحصول عليها من خلال تطبيق قانون السلم (loi d'échelle) أنظر إلى الشكل (2-III) [8].

5.III قانون السلم للذرات الشبيهة بالهليوم

كما ذكرنا سابقا نلجأ إلى قانون السلم لحساب بقية قيم معاملات الشدة Q لجميع قيم n.

لقد تم إستعمال قانون للسلم بسيط وهو بدلالة $1/n^3$ لبعض الذرات الشبيهة بالهليوم. في حين أنه تم إستعمال قانون مغاير من طرف " Guedda et al. " [54] يتيح لنا الحصول على قيم معامل الشدة, والذي طبق على ذرة الهليوم وأعطى نتائج جيدة. في حين أردنا دراسة إمكانية تعميم قانون السلم المبسط على باقي الذرات الشبيهة بالهليوم وإخترنا بعضا منها وهي الذرات الخفيفة. ويستعمل القانون بالشكل[8]:

$$\frac{Q(n+1)}{Q(n)} = \left(\frac{n}{n+1}\right)^3 \qquad (8\text{-III})$$

6.III حساب معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون

لحساب معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون استخدمنا المعادلات (5-III) (7-III) وهذا في مجال درجة الحرارة ($10 - 10^4$ eV). وللتحقق من صحة حساباتنا استعملنا طريقتين لذلك, وفي ما سيأتي توضيح لكيفية تعاملنا من أجل الحصول على نتائج معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون.

1.6.III حساب FAC

من خلال تطبيق برنامج FAC تحصلنا على العديد من المعطيات الذرية المحفوظة في ملفات الإخراج التابعة للبرنامج (الملحق أ) منها: الطاقات, التشكيلات, الوزن الإحصائي (g), معاملات التأين الذاتي ومعاملات الانتقال الإشعاعي والتي يتم استعمالها في العلاقة (6-III) من أجل حساب معاملات الشدة Q. ولإيجاد بقية قيم Q لجميع قيم n اللازمة لحساب معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون نستخدم قانون السلم كما في (8-III). تستخدم برامج الحساب لهذا المعامل كلا من القيم الأولى من Q وقيم Q المحسوبة بقانون السلم حتى n=1000.

أيضا نستخدم لحساب جميع طاقات الأسر في المعادلة (5-III) القيم التي تحصلنا عليها بواسطة برنامج FAC للقيم الأولى لـ n حتى نصل إلى n=10, في حين يتم الحصول على القيم الباقية بمعادلة تقريبية للذرات الشبيهة بالهيدروجين[8]:

$$E_s = \left(\frac{3}{4} - \frac{1}{n^2}\right) Z^2 R_y \qquad (9\text{-III})$$

2.6.III حساب Burgess

وضع " *Burgess* " صيغة عامة لحساب معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون [11,45,3].

$$\alpha_{Burgess} = 10^{-13} B_d \beta^{3/2} \exp(-\beta \chi_d) \qquad (10\text{-III})$$

$$B_d = 480\, f_{\alpha\alpha_0} \left(\frac{z\chi}{z^2+13.4}\right)^{1/2} [1 + 0.105(z+1)\chi + 0.015(z+1)^2\chi^2]^{-1} \qquad (11\text{-III})$$

$$\beta = \frac{(z+1)^2 R_y}{T_e} \quad (12\text{-III})$$

$$\chi_d = \chi \left[1 + 0.015 \frac{z^3}{(z+1)^2}\right]^{-1} \quad (13\text{-III})$$

$$\chi = \frac{E_{\alpha\alpha_0}}{(z+1)^2 R_y} \quad (14\text{-III})$$

حيث:

$E_{\alpha\alpha_0}$ و $f_{\alpha\alpha_0}$ تمثل على التوالي, الفرق في الطاقة وقوة المذبذب بين المستويات 2p و1s. وتم حساب هذه المعطيات بواسطة برنامج FAC, حيث يتم إستنتاج هذه القيم من ملف الإخراج للانتقال الإشعاعي (الملحق أ).

والتي أدرجناها في الجدول (1-III) بالنسبة للأيونات الشبيهة بالهليوم الخفيفة.

الجدول(1-III): يوضح قيم z, $E_{\alpha\alpha_0}$, $f_{\alpha\alpha_0}$ لأيونات الليثيوم والبريليوم والكربون الشبيهة بالهليوم

$f_{\alpha\alpha_0}$	$E_{\alpha\alpha_0}$ (eV)	z (z=Z-1)	العنصر
0.41	91.84	2	Li^{+}
0.41	163.29	3	Be^{+2}
0.41	367.52	5	C^{+4}

لقد صحح " *Burgess et al* " الصيغة السابقة بمعامل يعتمد على z والذي يأخذ الشكل العام التالي[55]:

$$f_{corr} = 0.84 + 0.5(z+1)^{-2} + 0.03(z-11)[1 + 4.5\ 10^{-5}(z-11)^3]^{-1} \quad (15\text{-III})$$

قيم العامل f_{corr} معطاة في الجدول (2-III).

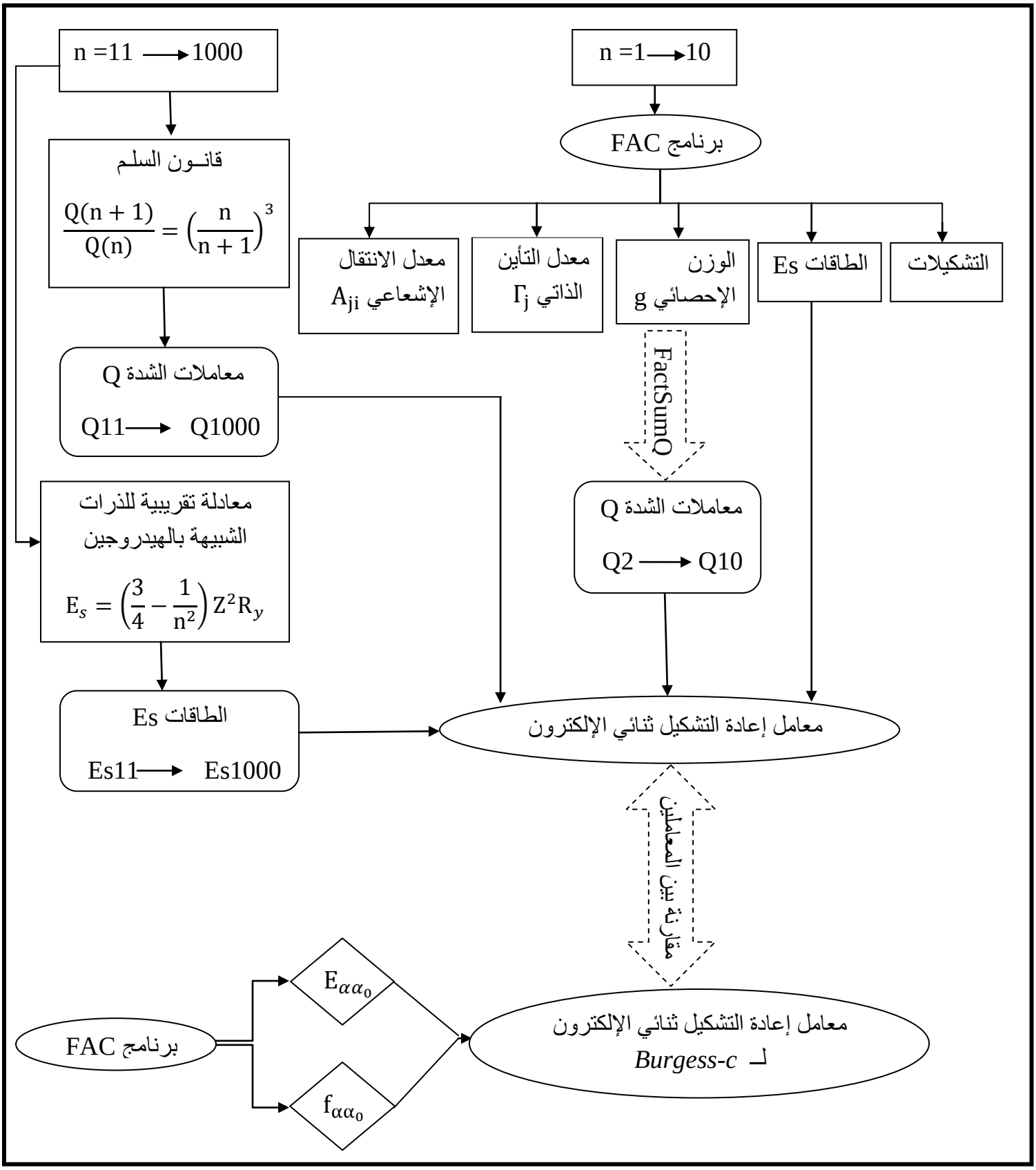
الجدول(2-III): قيم f_{corr} لأيونات الليثيوم والبريليوم والكربون الشبيهة بالهليوم

f_{corr}	العنصر
0.616	Li^{+}
0.625	Be^{+2}
0.672	C^{+4}

يجب أن يضرب هذا العامل في معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون فنحصل على:

$$\alpha_{Burgess-C} = f_{corr}\alpha_{Burgess} \quad (16\text{-III})$$

يمكن أن نوضح سير خطوات العمل في المخطط الآتي (الشكل III-2):



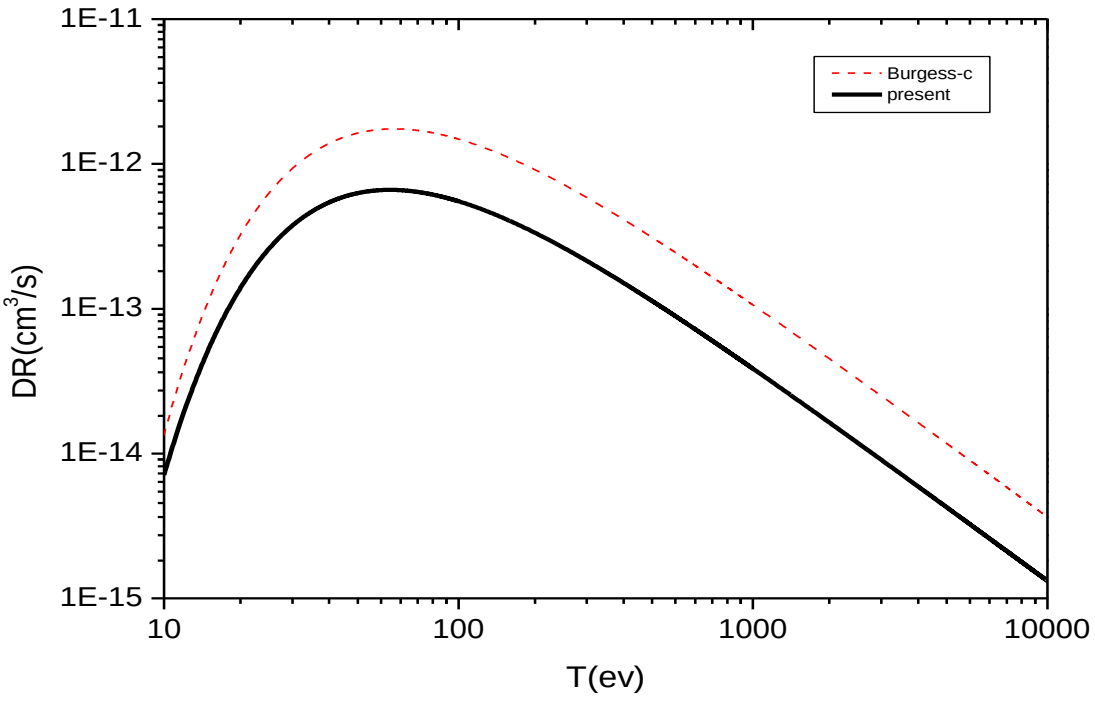
الشكل(III-2): مخطط يوضح خطوات حساب معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون بطريقتيFAC وBurgess-c

7.III النتائج والتحليل

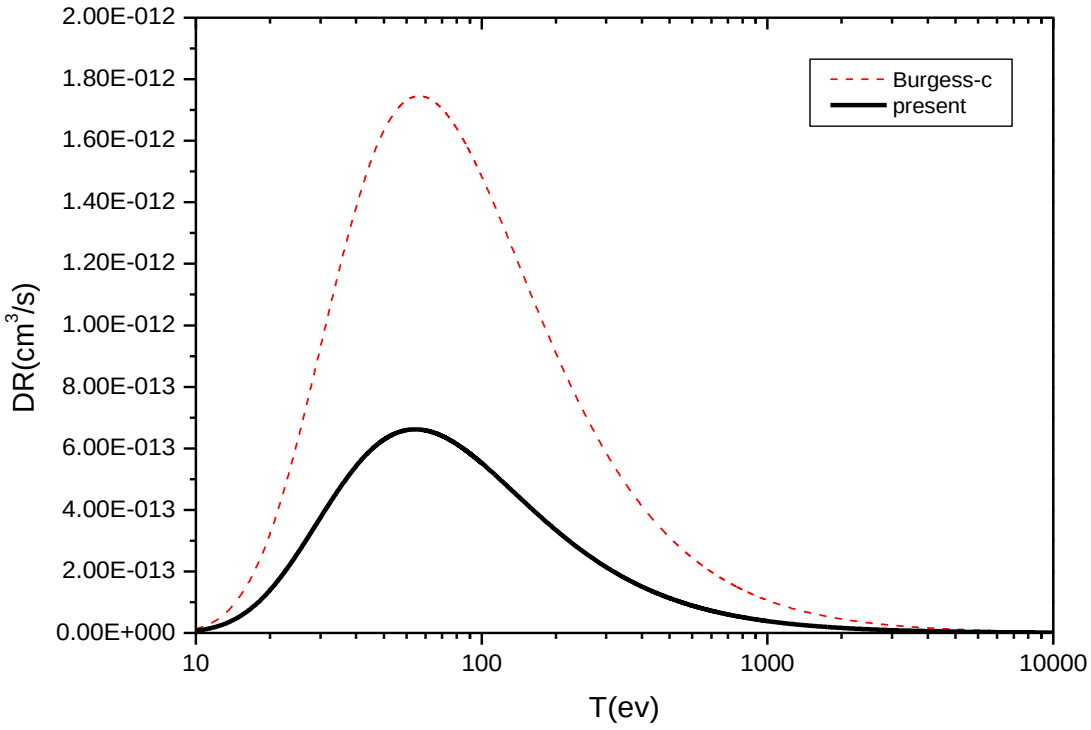
لقد انتهجنا لحساب معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون طريقين وهما: (حساب FAC وحساب *Burgess -corrigée*) حيث عالجنا العلاقتين (5-III) (15-III) عدديا بإستخدام برنامج بلغة " Fortran " وتطبيقه على الأيونات المختارة للدراسة وهي الأيونات ذات عدد ذري صغير (Li^{+} /Be^{+2} /C^{+4}). في هذا الجزء ستتم مقارنة النتائج المتحصل عليها من الطريقتين السابق ذكرهما (الملحق ب).

1.7.III أيون الليثيوم الشبيه بالهليوم(Li^{+})

قمنا بتطبيق برنامج " Fortran " من أجل الحصول على قيم معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون لأيون الليثيوم الشبيه بالهليوم (Li^{+}) بدلالة درجة الحرارة (10 eV-10^4 eV) حسب العلاقة (5-III) ومقارنتها بالنتائج التي تحصلنا عليها من خلال علاقة *Burgess*. نتحصل على المنحنيين الموضحين في الشكلين (3-III) و(4-III) على سلم لوغاريتمي وسلم خطي على الترتيب.



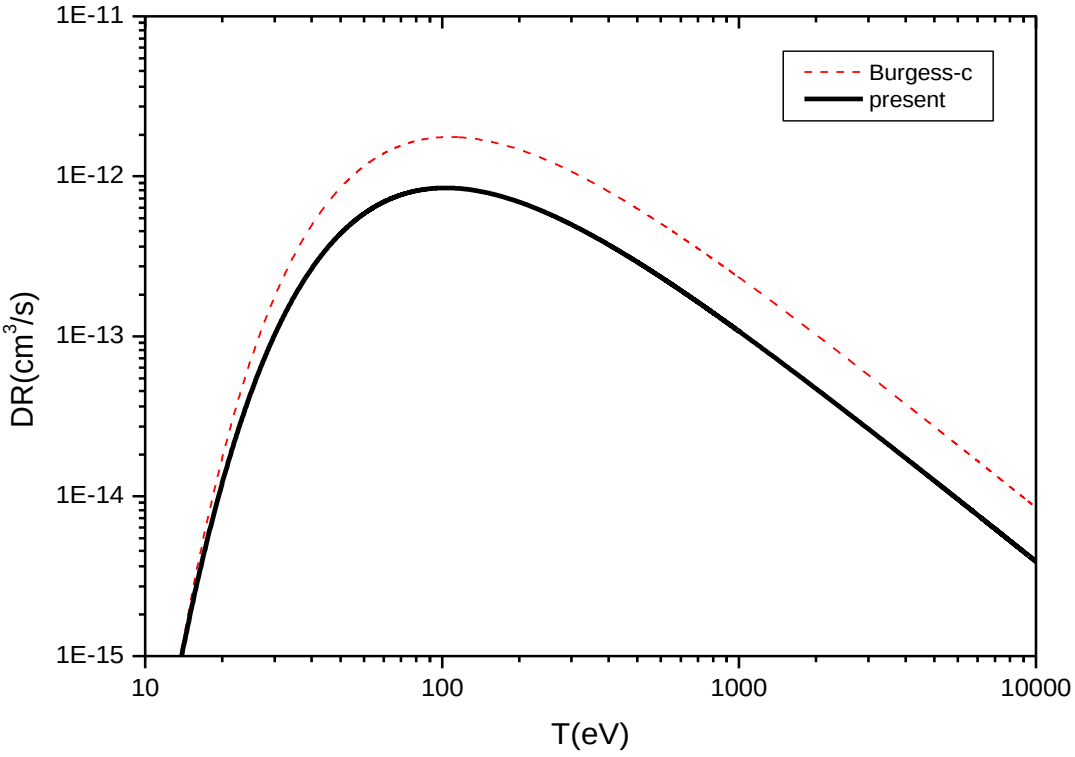
الشكل(3-III): معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون لأيون الليثيوم الشبيه بالهليوم بدلالة درجة الحرارة (سلم لوغاريتمي)



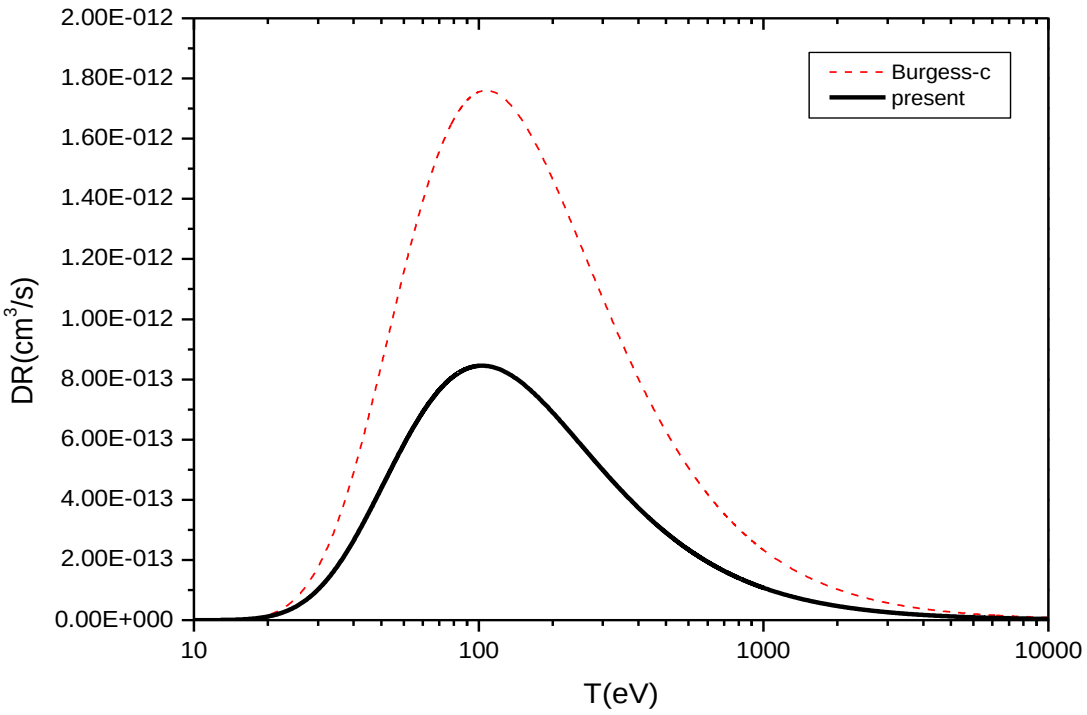
الشكل(III-4): معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون لأيون الليثيوم الشبيه بالهليوم بدلالة درجة الحرارة (سلم خطي)

2.7.III أيون البريليوم الشبيه بالهليوم(Be^{+2})

في هذه الحالة وبعد حساب قيم معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون لأيون البريليوم الشبيه بالهليوم (Be^{+2}) وذلك في درجة حرارة تتراوح بين ($10\ eV$-$10^4\ eV$), نقارن النتائج المتحصل عليها مع القيم التي وجدناها من علاقة *Burgess*. نتائج الحساب ممثلة في المنحنيين الموضحين في الشكلين (III-5) و(III-6) على سلم لوغاريتمي وسلم خطي على الترتيب.



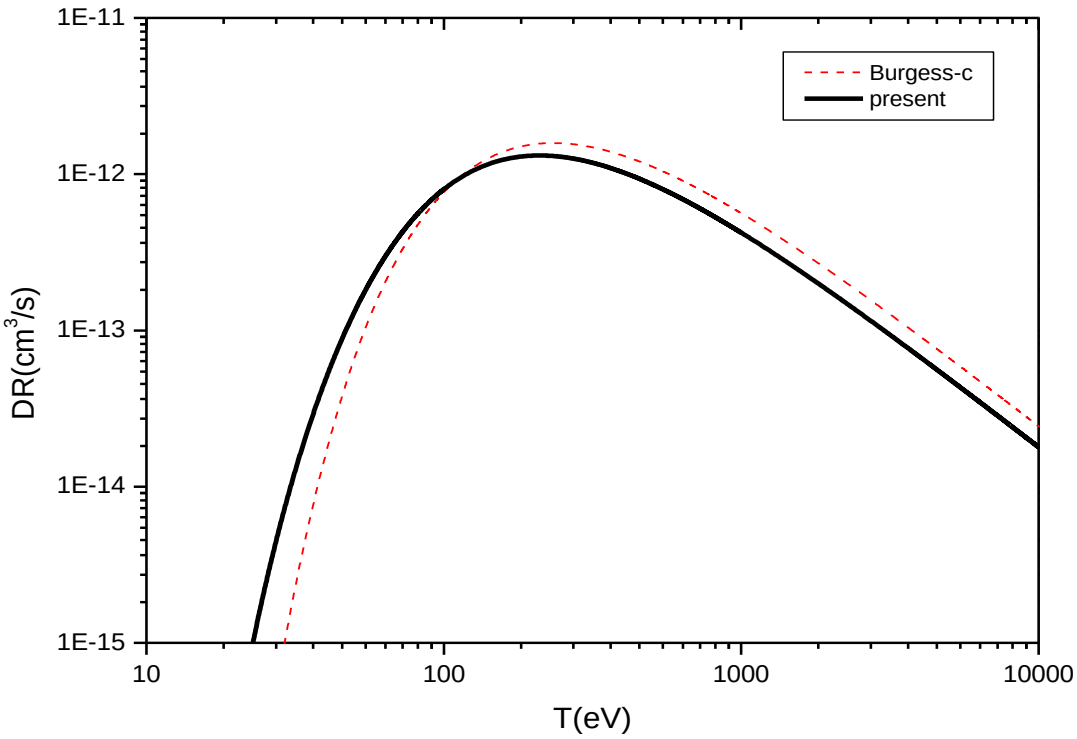
الشكل(III-5): معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون لأيون البريليوم الشبيه بالهليوم بدلالة درجة الحرارة (سلم لوغاريتمي)



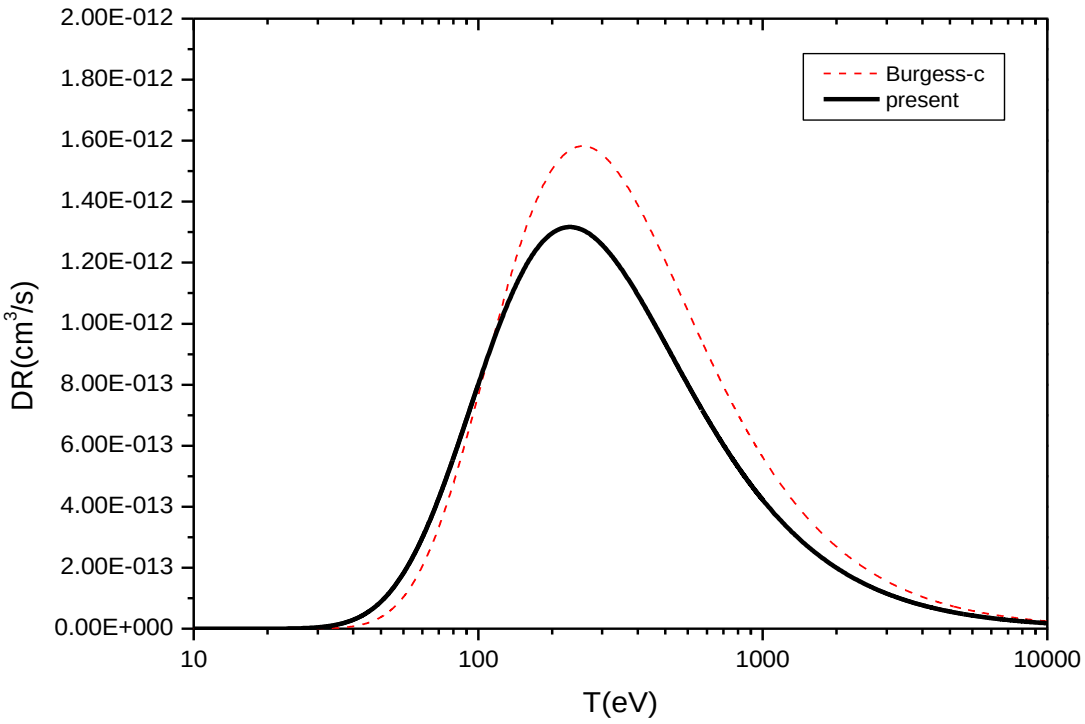
الشكل(III-6): معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون لأيون البريليوم الشبيه بالهليوم بدلالة درجة الحرارة (سلم خطي)

3.7.III أيون الكربون الشبيه بالهليوم(C^{+4})

يمثل الشكلين (III-7) و(III-8) منحنيين بيانيين بسلم لوغاريتمي وسلم خطي على التوالي حيث يوضحان قيم معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون بدلالة درجة الحرارة حيث تتراوح بين (10eV-10^4eV) ومقارنة النتائج مع معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون المتحصل عليها من خلال صياغة *Burgess*.



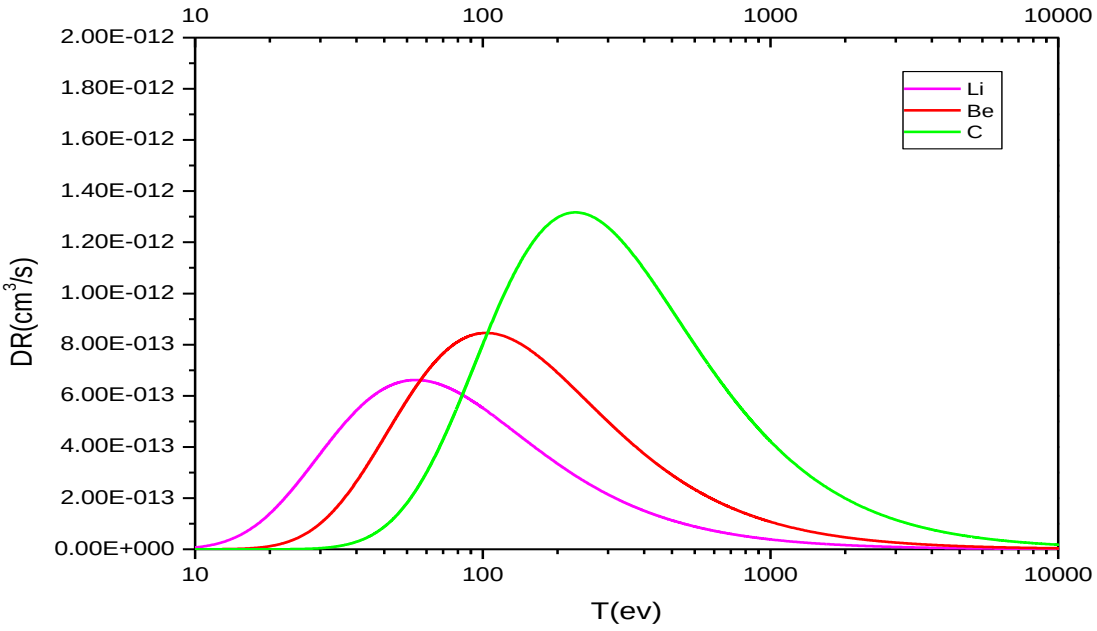
الشكل(III-7): معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون لأيون الكربون الشبيه بالهليوم بدلالة درجة الحرارة (سلم لوغاريتمي)



الشكل(III-8): معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون لأيون الكربون الشبيه بالهليوم بدلالة درجة الحرارة

(سلم خطي)

المنحنى الموضح في الشكل (III-9) يظهر طيف معاملات إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون لكل الذرات المدروسة بدلالة درجة الحرارة حيث أنه يمكننا رؤية قوة المعاملات لذرة ما في مجال حرارة معين ومن الملاحظ أنه كلما زاد العدد الذري Z تزداد قوة المعاملات.



الشكل (III-9): معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون بدلالة درجة الحرارة لـ (Li^{+} /Be^{+2} /C^{+4}).

- بغية قراءة أسهل وأوضح لإستخراج بعض المعلومات من المنحنيات سيكون السلم الخطي أنسب من المنحنيات ذات سلم لوغاريتمي ومن خلال إستقرائنا للمنحنيات يتم ملاحظة التالي:

المنحنيات الموضحة في الأشكال (III-4) (III-6) (III-8) تبين فوارق بين الحسابين حيث نجد أن هناك إختلاف بين قمة معاملي إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون بالنسبة للحسابين, حيث أن قمة معامل حسابنا ذات قيمة أدنى من قمة معامل حساب *Burgess-c*.

في حين يظهر التوافق بين المعاملين فنجد أن:

- ✓ لهما نفس النسق العام.
- ✓ إضمحلال المعاملين عند الطرفين.

من خلال النتائج التي تحصلنا عليها بتطبيق حسابنا الذي إعتمدنا فيه على معطيات FAC وحساب *Burgess-c* تم حساب الخطأ النسبي بينهما, حيث وجدنا أنه كان كبيرا بالنسبة للذرات التي تعرضنا لها وهي الأيونات ذات Z صغير(Li^{+} /Be^{+2} /C^{+4}). والجدول (III-3) التالي يقدم أهم النتائج المتحصل عليها:

الجدول(III-3): قيم العظمى لمعامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون والخطأ النسبي بين الحسابين.

العنصر	القيمة العظمى لمعامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون		الخطأ النسبي
	حساباتنا	حساب *Burgess- corrigée*	
Li^{+}	2.8870344E-12	6.6184124E-13	%77
Be^{+2}	8.4563752E-13	2.8700421E-12	%70.53
C^{+4}	1.3069138E-12	2.4013534E-12	%45.57

نستخلص أن تطبيق قانون السلم لحساب معامل الشدة لم يبدي نتائج جيدة في قيمة معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون. تجدر الإشارة هنا إلى أن إستعمال قانون سلم مغاير لذرة الهليوم من طرف "Guedda et al. " [54] أعطى نتائج جيدة. مما يستوجب كذلك إعادة النظر في قانون سلم يتحكم في الذرات الشبيهة بالهليوم ذات Z صغيرة. ومن خلال نتائج الجدول نلاحظ أن الخطأ النسبي كان كبيرا بالنسبة لأيون الليثيوم الشبيه بالهليوم ويليها أيون البريليوم الشبيه بالهليوم بنسبة أقل يليهما أيون الكربون الشبيه بالهليوم بنسبة أقل منهما, فنتصور أن نتابع في الذرات ذات $Z > 6$ إلى أن نعين مجال صحة تطبيق قانون السلم الذي عملنا به, وقد أبدى نتائج جيدة في أيون الأرغون الشبيه بالهليوم (Ar^{+16}) حسب أعمال " Guedda "[8].

خلاصة

نظريا تناولنا دراسة شاملة لإعادة التشكيل ثنائي الإلكترون ووصفناها بعلاقات رياضية أما تطبيقيا فقد تمكنا في هذا الفصل من حساب معامل الشدة بتطبيق قانون السلم وبالتالي حساب معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون بدلالة درجة الحرارة ($10eV- 10^4eV$) بواسطة برنامج حساب عددي بلغة " Fortran " بالنسبة لأيون الليثيوم الشبيه بالهليوم (Li^+), أيون البرليوم الشبيه بالهليوم (Be^{+2}), أيون الكربون الشبيه بالهليوم (C^{+4}) وبمقارنة النتائج مع نتائج حساب Burgess كانت الأخطاء النسبية كبيرة جدا, مما يؤكد عدم صلاحية إستعمال قانون السلم المبسط للذرات الخفيفة. وجب إذا التفكير في قانون آخر مغاير لتحقيق هذا الغرض.

خلاصة عـــامة

خلاصــة عامــة

كخلاصة يمكننا القول أننا تمكنا من دراسة شاملة لعملية تصادمية مهمة في بلازما الفيزياء الفلكية وبلازما الاندماج النووي الحراري وهي عملية إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون, فلقد قمنا أولا بتقديم عرض موجز للإشكالية التي بنينا على أساسها هذه المذكرة, إذ تناولنا كيفية اختبار قانون السلم ($1/n^3$) لحساب معامل الشدة وبالتالي حساب معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون بالنسبة للذرات الشبيهة بالهليوم.

مهدنا لموضوعنا بتقديم معارف عامة عن البلازما, بعض مقاديرها وأهم خصائصها وأنواعها,وأيضا عموميات حول مطيافيتها حيث يعد التحليل الطيفي للبلازما مشخص جيد لتحديد العديد من الخصائص كدرجة الحرارة والكثافة.

تلونا ذلك بالحديث عن مختلف الآليات الذرية الأساسية التي تحدث في البلازما, كما أسهبنا في وصف نماذج وقوانين الإتزان وكذلك برامج حساب المعطيات الذرية وركزنا على برنامج FAC الذي عملنا به نظرا لتميزه بالدقة والطواعية.

تناولنا أيضا حساب معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون, حيث عالجنا العلاقة الرياضية من خلال برنامج " Fortran " بعدما توصلنا إلى المعطيات الذرية اللازمة مثل (الطاقات, الإنتقالات الإشعاعية, معاملات التأين الذاتي, الوزن الإحصائي, التشكيلات,....) من خلال برنامج FAC, وبإستخدامنا لقانون سلم للأعداد الكمومية الكبرى n وتطبيقه على الأيونات الشبيهة بالهليوم الخفيفة.

بينت النتائج أن قانون السلم لمعامل الشدة المستخدم لحساب إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون يتعلق بالعدد الذري للأيون. فبالنسبة للتساؤل الذي ذكر آنفا عن مدى صحة قانون السلم توصلنا إلى أنه لم يبدي نتائج جيدة للأيونات الشبيهة بالهليوم ذات Z صغيرة. لأننا لاحظنا أن القيم القصوى لمعامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون لحسابنا ذات قيمة أدنى مقارنة إلى القيم المحسوبة من طرف " *Burgess et al.* " حوالي 77% لعنصر Li^{+}, 70.53% لعنصر Be^{+2}, 45.57 % لعنصر C^{+4}.

في نهاية مذكرتنا وإستنادا إلى النتائج التي إستخلصناها تفتح لنا أبوابا وآفاقا مستقبلية في مواصلة البحث وإعادة النظر في قانون سلم مغاير يتحكم في الذرات الشبيهة بالهليوم ذات Z صغيرة.

قائمة المراجع

قائمة المراجع

[1] 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.
[2] A. Burgess, Astrophys. J. 139.776, 1964.
[3] A. Burgess, Astrophys. J. 141.1588, 1965.
[4] M.J. Seaton and P.J. Storey, Dielectronic recombination, in Atomic Processes and Applications, P.J. Burke and B.L. Moiseiwitsch, Eds., North Holland, Amsterdam, The Netherlands, 1976.
[5] H. Nussbaumer et P.J. Storey, Dielectronic recombination at low temperatures, Astron Astrophys,126, pp 75-79, 1983.
[6] R.H. Bell and M.J. Seaton, J. Phys. B.18, 1589-1629, 1985.
[7] J.G. Wang, Y.Z. Qu and Li.J. M, Phys. Rev. A 52,4276, 1995.
[8] 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.
[9] B.E. O'Rouke et al., Dielectronic recombination in H-like titanium ions, J. phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 37, 2343-2353, 2004.
[10] M.F.Gu, FAC 1.0.8 Manual, http ://kipac-tree.stanford.edu/fac/.
[11] I.I. Sobelman, L.A. Vanshtein and E.A. Yukov, Excitation of Atoms and Broadening of Spectral lines, Springer and Verlag, NY,1981.
[12] W.Crookes, On a ourth State of Matter, Proceedings of the Royal Society of London, Vol.30, pp 469-472, 1879-1880.
[13] J.J. Thomson, Philosophicall Magazine, 44,p.293,1897.
[14] I.Langmuir, Oscillations in ionized gases, Proc. Nat. Acad. Sci. U.S, vol.14, p.628,1928.
[15] H.R. Griem, plasma spectroscopy Mc Graw Hill,1964.
[16] إسماعيل شيحي, حساب دوال توزيع الحقل الكهربائي الموضعي ومشتقاتها داخل البلازما باستخدام المحاكاة العددية مونتي كارلو تطبيق على طيف الهليوم, أطروحة دكتوراه دولة, جامعة منتوري,قسنطينة 2005.
[17] Dwight R. Nicholson, introdution to plasma theory, University of lowa, John Wiley, Sons, Inc. U.S,1983.
[18] Hanene Bahouh, Contribution à la modélisation d'une décharge continue d'un gaz moléculaire, mémoire de magister, Universite Mentouri Constantine, 2010.

[19] D.A.Gurnerr and A. Bhattacharjee, Introduction to Plasma Physics: with Space and Laboratory Applications, Cambridge University, UK,2005.
[20] T. E. Cravens, Physics of Solar System Plasmas, Cambridge University Press, 1997.
[21] J.L. Delcroix et A . Bers, physique des plasmas I+II Inter Edition / CNRS Editions,1994.
[22] Khelfaoui Fethi, Thése de doctorat, Université de Provence, France,1991.
[23] Pierre Fauhais, Gaz ionisés et plasmas, SPCTS (Science des procédés céramiques et des traitements de surface), CNRS UMR 6638, Université de Limoges-Faculté des sciences,2000.
[24] J. M. Rax , physique des plasmas cour et applications, Dunod , Paris,2005.
[25] L. R. Jean, Introduction a la Physique des Plasmas, cours de Master Physique Appliquée et Mécanique, Université Paris-Sud, 2011.
[26] J.P. Freidberg, Plasma physics and fusion energy, Cambridge University Press, New York, 2007.
[27] T.J.M. Boyd, J.J. Sanderson, The Physics of Plasmas, Cambridge University Press, New York, 2003.
[28] D. Salzmann, Atomic Physics in Hot Plasmas, Oxford University Press, New York, 1998.
[29] G.W. F. Drake, Handbooks of atomic ,molecular, and optical physics, Springer Science+Business Media, USA, 2006.
[30] J. Tennyson, Astronomical Spectroscopy An Introduction to the Atomic and Molecular Physics of Astronomical Spectra, University College London ,2005.
[31] Karl GIROUX, Étude critique de la densité électronique et des températures (excitation et ionisation) d'un plasma d'aluminium induit par laser université de Montréal, 2009.
[32] W. Demtröder , Atoms, Molecules and Photons An Introduction to Atomic, Molecular and Quantum-Physics, Springer Verlag Berlin Heidelberg Germany, 2006.
[33] Olivier VALLÉE, Rayonnement des plasmas et profil des raies spectrales, LASEP(Laboratoire d'Analyse Spectroscopique et d'Énergétique des Plasmas), UPRESEA3269, Faculté des Sciences – Université d'Orléans.
[34]Bruno Robillart , Modélisation de la physique atomique et du transfert radiatif pour le laser X-UV, Thèse de doctorat , Université de PARIS-SUD XI , France , 2010.
[35] P.F. Bernath, Spectra of Atoms and Molecules, Oxford University Press, 1995.

[36] H.J. Kunze, Introduction to Plasma Spectroscopy, Springer, Berlin, 2009.
[37] 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.
[38] Latifa Bettadj, Recombinaison Radiative des Ions Fortement charge dans des Etats Excite : Polarisation des Raies de Fluorence X , Thèse de doctorat, Université Abou-Bekr Belkaïd , Tlemcen, 2010.
[39] 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.
[40] B.H. Bransden and C.J. Joachain , Physics of atoms and molecules, New York 1983.
[41] H.J. Kunze, Introduction to Plasma Spectroscopy, Springer, Berlin 2009.
[42] J.B.Rouffet, Modelisation des lampes a decharge aux halogenures mettaliques avec enveloppe en ceramique a l'aide d'un code fluide, thèse de doctorat, université Paul Sabatier Toulouse, 2005.
[43] V.P. Schevelko and L.A. Vainshtein , Atomic Physics for Hot Plasmas, Institute of Physics , Bristol, USA, 1993.
[44] M.F.Gu, Review Synthèse, The flexible atomic code, Can. J. Phys. vol.86 2008.
[45] Haar, J.A. Tamis, V.L. Plano et E.Zaharakis, W.G. Graham, J.R. Mowat, T.Ellison, W.W. Jakobs et T.Rinchel, le journal, Measurment of dielectronic recombination in He+ ions, 1993.
[46] J.G. Wang, T.Kato et I.Murakami, Dielectronic recombination rate coefficients to excited states of He from He+, NIFS- Data- 53, 1999.
[47] F.B.Rosmej, R. Stann, S. Fritzsche, H, capes, M. Koubiti, Y. Marand et V.S. Lisitsa, N. Ohno, S. Takamura, Neutral helium line emission for edge plasma conditions, Journal of Nuclear Materials, 2005.
[48] M.J. Seaton and P.J. Storey, Dielectronic recombination, in Atomic Processes and Applications, P.J. Burke and B.L. Moiseiwitsch, Eds, North Holland, Amsterdam, The Netherlands, 1976.
[49] S.M.V. Aldrovandi, D. péquignot, Radiative and Dielectronic recombination coefficients for complex ions, 1973.
[50] J.G.Wang, T.Kato, et I.Murakami, le journal, Validity of n^{-3} scaling law in dielectronic recombination process, 1999.

[51] Guillaume Mondet, Propriétés radiatives des plasmas de fusion. Emissivité et opacité dans des structures atomiques complexes, Thèse de doctorat, Université Paris-sud, 2013.
[52] E. Arimondo, P.R. Berman, C.C. Lin, Advances in Atomic Molecular and Optical Physics,Volume55, Elsevier, USA.
[53] E. H. Guedda, F. B. Rosmej, M. Koubiti, R. Stamm et V. S. Lisitsa, investigation of collisional and electric field effects on the Hel dielectronic recombination rates for magnetic fusion plasmas, Conference on plasma phys, 2006.
[54] E.H.Guedda, F. B. Rosmej, P.Genesio, R.Stamm, L.A.Vainshtein, M.F.Gu, E.Lindroth and F.Khelfaoui, Double Excited High-n Spin Dependent Atomic Structure Scaling Laws for He I: Application to Radiative Properties for Edge Plasma Conditions, Plasma phys, 46, No 7-9, 655-660, 2006.
[55] A. Bugess and A.S. Tworkowki, Astrophys. J. 205, L105-L107, 1976.
[56] A. Escarguel, F. B. Rosmej, C. Brault, Th. Pierre, R. Stamm and K. Quotb, Influence of hot electrons on radiative properties of a helium plasma, Plasma Phys. Control. Fusion 49, 2007.
[57]V.P.Shevelko and L.A.Vainshtein, Atomic Physics for hot plasmas, London, 1993.

الملاحـــق

الملحـــق أ: برنامج FAC

أ.1 تثبيت برنامج FAC

يتم الحصول على برنامج FAC بسهولة http://kipac-tree.stanford.edu/fac ولتشغيله مع نظام Windows يستدعي تثبيت Unix أو Cygwin من الموقع www.cygwin.com ويكتب البرنامج بلغة Fortran 77 أو ANSI C يتم تنفيذ البرنامج من نافذة Cygwin. يتم إصدار الوظائف الفرعية المنفذة في FAC عبر نماذج python والتي تعد أفضل مستخدم لبرنامج FAC وهي متوفرة على الموقع www.python.org ويتم الحصول على نتائج الحساب من ملفات الإخراج[56].

أ.2 ملف الإخراج لطاقات أيون الليثيوم الشبيه بالهليوم Li+

```
FAC 1.0.8
Endian   = 0
TSess    = 1429607956
Type     = 1
Verbose = 1
Li Z     =  3.0
NBlocks = 22
E0       = 0, -1.96901774E+02
NELE   = 2
NLEV   = 1
 ILEV  IBASE   ENERGY      P   VNL   2J
   0    -1  0.00000000E+00 0   100    0 1*2            1s2            1s+2(0)0
NELE   = 2
NLEV   = 6
 ILEV  IBASE   ENERGY      P   VNL   2J
   1    -1  5.78187161E+01 0   200    2 1*1 2*1        1s1 2s1        1s+1(1)1 2s+1(1)2
   2    -1  6.03828125E+01 1   201    4 1*1 2*1        1s1 2p1        1s+1(1)1 2p+1(3)4
   3    -1  6.03833914E+01 1   201    2 1*1 2*1        1s1 2p1        1s+1(1)1 2p-1(1)2
   4    -1  6.03850648E+01 1   201    0 1*1 2*1        1s1 2p1        1s+1(1)1 2p-1(1)0
   5    -1  6.06899694E+01 0   200    0 1*1 2*1        1s1 2s1        1s+1(1)1 2s+1(1)0
   6    -1  6.25999290E+01 1   201    2 1*1 2*1        1s1 2p1        1s+1(1)1 2p+1(3)2
```

```
NELE    = 1
NLEV    = 1
 ILEV  IBASE   ENERGY      P   VNL   2J
  241    -1  7.44473541E+01 0   100    1 1*1              1s1              1s+1(1)1
NELE    = 2
NLEV    = 10
 ILEV  IBASE   ENERGY      P   VNL   2J
  242    -1  1.45255197E+02 0   200    0 2*2              2s2              2s+2(0)0
  243    -1  1.46017402E+02 1   201    0 2*2              2s1 2p1            2s+1(1)1 2p-1(1)0
  244    -1  1.46018187E+02 1   201    2 2*2              2s1 2p1            2s+1(1)1 2p-1(1)2
  245    -1  1.46020084E+02 1   201    4 2*2              2s1 2p1            2s+1(1)1 2p+1(3)4
  246    -1  1.48277154E+02 0   201    0 2*2              2p2              2p-2(0)0
  247    -1  1.48278072E+02 0   201    2 2*2              2p2              2p-1(1)1 2p+1(3)2
  248    -1  1.48279444E+02 0   201    4 2*2              2p2              2p+2(4)4
  249    -1  1.49762442E+02 0   201    4 2*2              2p2              2p-1(1)1 2p+1(3)4
  250    -1  1.50422017E+02 1   201    2 2*2              2s1 2p1            2s+1(1)1 2p+1(3)2
  251    -1  1.54147688E+02 0   201    0 2*2              2p2              2p+2(0)0
```

مستوى التأيــن

أ.3 ملف الإخراج لمعامل التأين الذاتي لأيون الليثيوم الشبيه بالهليوم +Li

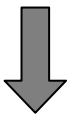
```
FAC 1.0.8
Endian          = 0
TSess           = 1429607956
Type            = 5
Verbose         = 1
Li Z            =   3.0
NBlocks         = 10
NELE            = 2
NTRANS          = 10
CHANNE          = 0
```

```
NEGRID        = 2
                7.08078428E+01
                7.97003337E+01
  242  0   241  1  7.0808E+01  2.2797E+14  3.9843E+02
  243  0   241  1  7.1570E+01  9.0445E+12  1.5639E+01
  244  2   241  1  7.1571E+01  9.0360E+12  4.6873E+01
  245  4   241  1  7.1573E+01  9.0189E+12  7.7972E+01
  246  0   241  1  7.3830E+01  3.1971E+06  5.3591E-06
  247  2   241  1  7.3831E+01  2.4094E+06  1.2116E-05
  248  4   241  1  7.3832E+01  2.5012E+08  2.0962E-03
  249  4   241  1  7.5315E+01  2.3491E+14  1.9299E+03
  250  2   241  1  7.5975E+01  1.3253E+14  6.4762E+02
  251  0   241  1  7.9700E+01  6.1305E+12  9.5190E+00
```

أ.4 ملف الإخراج لمعامل الإنتقال الإشعاعي لأيون الليثيوم الشبيه بالهليوم +Li

```
FAC 1.0.8
Endian        = 0
TSess         = 1429607956
Type          = 2
Verbose       = 1
Li Z          =  3.0
NBlocks       = 53
NELE          = 2
NTRANS        = 60
MULTIP        = -1
GAUGE         = 2
MODE          = 1
  242  0    1  2  8.743648E+01  0.000000E+00  0.000000E+00  0.000000E+00
  242  0    2  4  8.487238E+01  0.000000E+00  0.000000E+00  0.000000E+00
  242  0    3  2  8.487181E+01  5.861383E-08  1.832046E+04  2.374403E-04
  242  0    4  0  8.487013E+01  0.000000E+00  0.000000E+00  0.000000E+00
```

242	0	5	0	8.456523E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
242	0	6	2	8.265527E+01	5.311626E-02	1.574628E+10	-2.290417E-01
243	0	1	2	8.819869E+01	1.167361E-01	3.940387E+10	-3.287060E-01
243	0	2	4	8.563459E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
243	0	3	2	8.563401E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
243	0	4	0	8.563234E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
243	0	5	0	8.532743E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
243	0	6	2	8.341747E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
244	2	1	2	8.819947E+01	3.502003E-01	3.940366E+10	-5.693264E-01
244	2	2	4	8.563537E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
244	2	3	2	8.563480E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
244	2	4	0	8.563312E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
244	2	5	0	8.532822E+01	4.214007E-08	4.437810E+03	2.007878E-04
244	2	6	2	8.341826E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
245	4	1	2	8.820137E+01	5.836426E-01	3.940370E+10	7.349738E-01
245	4	2	4	8.563727E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
245	4	3	2	8.563669E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
245	4	4	0	8.563502E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
245	4	5	0	8.533011E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
245	4	6	2	8.342016E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
246	0	1	2	9.045844E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
246	0	2	4	8.789434E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
246	0	3	2	8.789376E+01	2.326577E-01	7.799069E+10	4.648530E-01
246	0	4	0	8.789209E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
246	0	5	0	8.758718E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
246	0	6	2	8.567722E+01	2.066157E-09	6.581174E+02	4.436955E-05
247	2	1	2	9.045936E+01	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
247	2	2	4	8.789526E+01	2.908364E-01	3.249883E+10	-5.197299E-01



الملحــق ب:حساب معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون بدلالة درجة الحرارة

ب.1 برنامج حساب معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكتروني بواسطة معطياتFAC لأيون البريليوم الشبيه بالهليوم Be^{+2}

```
Program DR_FAC_Be
c This program calculates the dielectronic recombination cofficient
c it uses the scale laws for SumQ and a hydrogenic law for energy calculation
parameter (z=4.) !Be
real,dimension(1000)::Q,Es,DE
real::Qtot,alpha,kt,j
integer::n
open(1,file='DR_FAC_Be.out',status='unknown')
Q(2)=0.315e+13
Q(3)=0.916e+13  !from FAC+our program
Q(4)=0.927e+13
Q(5)=0.861e+13
do n=6,1000
!scale laws for Q
Q(n)=Q(n-1.)*(((n-1.)/n)**3)
end do
Es(2)=125.91
Es(3)=148.89
Es(4)=155.47
Es(5)=158.36
```

```
Es(6)=159.88  !energies from FAC
Es(7)=160.79
Es(8)=161.39
Es(9)=161.79
Es(10)=162.13
do i=11,1000
Es(i)=13.6*(0.75-1./(i**2))*(z**2) !hydrogenic law for energy
end do
do i=0,4
do j=1,10,0.01
kt=j*(10.**i)
alpha=0.
do k=2,1000
DE(k)=1.656*(10.**(-22))*Q(k)*exp(-Es(k)/(kt))/(2.*(kt**1.5))
alpha=alpha+DE(k)
end do
write(1,'(e14.8,2x,e14.8)')kt,alpha
end do
end do
end
```

ب.2 برنامج حساب معامل إعادة التشكيل ثنائي الإلكتروني بواسطة حساب '' Burgess '' لأيون البريليوم الشبيه بالهليوم Be^{+2}

```
program Burg_Be_c
parameter (f_os=0.41  ,deltaE=163.29,z=3.,Ry=13.6)
real::T,Bd,x,xd,j
real::DR
open(1,file='Dr_Burg_Be_C.out',status='unknown')
do i=0,4
do j=1,10,0.01
t=j*(10.**i)
!do t=1,10000
beta=((z+1.)**2)*Ry/T
x=deltaE/(Ry*((z+1.)**2))
Bd=480.*f_os*((z*x/((z**2)+13.4))**0.5)/
 (1.+0.105*(z+1.)*x+0.015*((z+1.)**2)*(x**2))
xd=x/(1.+0.015*(z**3)/((z+1.)**2))
DR=0.625*(10.**(-13))*Bd*(beta**(1.5))*exp(-(beta*xd))
write(1,'(e14.8,2x,e14.8)')T,DR
end do
end do
end
```

ملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة آلية ذرية تصادمية مهمة جدا في بلازما الفيزياء الفلكية وبلازما الإندماج النووي الحراري وهي إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون. قمنا بحساب معامل الشدة بتطبيق قانون السلم. وبالتالي تم حساب معاملات إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون بدلالة درجة الحرارة بواسطة برنامج يستعمل المعطيات الذرية المتحصل عليها من FAC. تم مقارنة النتائج مع نتائج Burgess et al حيث أن الخطأ النسبي بين القيم القصوى لمعامل إعادة التشكيل للأيونات المختارة أظهر بأن قانون السلم لم يبدي نتائج مرضية. هذا يؤدي إلى البحث على قوانين مغايرة لحساب معاملات إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون بالنسبة للأيونات الشبيهة بالهليوم ذات Z صغيرة.

الكلمات المفتاحية: إعادة التشكيل ثنائي الإلكترون- معامل الشدة- قانون السلم- الأيونات الشبيهة بالهليوم- برنامج FAC

Résumé

Ce travail vise à étudier le mécanisme atomique collisionnel très important dans les plasmas d'astrophysique et de fusion thermonucléaire, il s'agit de la recombinaison diélectronique RD. Nous calculons les facteurs d'intensité par la loi d'échelle. Nous avons aussi calculé les coefficients de la RD en fonction de la température par un programme qui utilise les données atomiques obtenues par FAC. Ces résultats ont été comparés à ceux obtenus par Burgess et al. L'erreur relative entre les max des RD pour les ions choisis ont montré que la loi d'échelle utilisée ne donne pas des résultats satisfaisants. Ceci conduit à chercher d'autre lois pour le calcul des coefficients de la RD pour les ions heliumoïdes de faible Z.

Mots clés: Recombinaison Diélectronique, facteur d'intensité, loi d'échelle, les ions heliumoïdes, code FAC

Abstract

This work aims to study the very important atomic collision mechanism in astrophysical plasmas and thermonuclear fusion which is the dielectronic recombination DR. We compute the intensity factors by the scaling law. We also calculated the DR coefficients rates as a function of temperature by a program using the FAC atomic data. These results were compared with those obtained by Burgess et al. The relative error between the max of DR for a selected ions showed that the scaling law used does not give satisfactory results. This leads to seek other laws for calculating DR coefficients rates for helium like ions with low Z.

Keywords: Dielectronic Recombination, intensity factor, scaling law, ions helium like, FAC code