



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



رقم الترتيب: 11
رقم التسلسل:

مذكرة تخرج مقدمة لنيل شهادة

ماستر أكاديمي

مجال: علوم المادة

تخصص: فيزياء الاشعاعات

من اعداد الطالبين :

عريف البشير

غرارة مسعود

الموضوع:

حساب معدلات الإثارة بالتصادم الإلكتروني لبعض الذرات

نوقشت يوم: 2024/06/23

أمام لجنة المناقشة المكونة من

رئيس

جامعة الوادي

أستاذة تعليم عالي

مفتاح نسيمة

مناقشا

جامعة الوادي

أستاذة محاضرة ب

عسكري سهيلة

مؤطرا

جامعة الوادي

أستاذة تعليم عالي

ديلمي سامية

الموسم الجامعي : 2024/2023

تشكرات

الحمد لله الذي وفقنا وأعاننا على إتمام هذه المذكرة. إن هذا العمل لم يكن ليرى النور لولا جهود ودعم العديد من الأشخاص الذين قدموا لنا المساعدة والتوجيه طوال مراحل البحث.

نود أن نعبر عن أعمق مشاعر الشكر والامتنان للمشرفة، الأستاذة الدكتورة **** ديلمي سامية ****، التي لم تدخر جهداً في تقديم الدعم الأكاديمي والإرشاد العلمي. حيث كانت توجيهاتها المستمرة ونصائحها القيمة نبراساً لأعضاء فريق البحث وساهمت في تطوير هذا العمل.

كما نشكر أعضاء لجنة مناقشة هذا العمل بداية برئيس اللجنة الأستاذة الدكتورة **** نسمة مفتاح **** وكذلك عضو لجنة المناقشة الأستاذة الدكتورة **** سهيلة عسكري **** على قبولهما المشاركة في تقييم هذا العمل وأتمنى أن يفيدونا بأرائهم القيمة.

لا يفوتنا أن نشكر جميع أساتذة قسم **** [الفيزياء] **** على ما قدموه من علم ومعرفة خلال سنوات دراستنا. كان دعمهم وتشجيعهم دافعاً لنا للاستمرار والاجتهاد.

كما نتوجه بجزيل الشكر للدكتور **** سامي المطنش **** على ما قدمه لنا من مساعدة.

كما نشكر جميع من ساعدنا بطرق مختلفة، سواء كانوا من داخل الجامعة أو خارجها، ممن قدموا لنا المعلومات أو الدعم المعنوي.

فهرس المحتويات

I	..... قائمة الأشكال
II	..... قائمة الرموز
III	..... مقدمة عامة
الفصل الأول: مفاهيم أساسية حول البلازما	
6	..... 1-1 المقدمة
6	..... 2-1 تعريف البلازما
6	..... 3-1 البلازما الساخنة المنتجة داخل المخبر
7	..... 4-1 خصائص البلازما
7	..... 1-4-1 التوصيل الكهربائي
7	..... 2-4-1 التعادل الكهربائي
8	..... 5-1 معاملات البلازما
8	..... 1-5-1 الكثافة
8	..... 2-5-1 درجة الحرارة
9	..... 3-5-1 الأطوال المميزة
9	..... 1-3-5-1 طول ديبياي
9	..... 2-3-5-1 طول موجة دي بروغلي الحرارية
9	..... 3-3-5-1 نصف قطر الكرة الإلكترونية والأيونية
10	..... 4-5-1 الترددات المميزة
10	..... 5-5-1 المعامل β
10	..... 6-5-1 طول لاندو
11	..... 7-5-1 معامل البلازما η
11	..... 8-5-1 معامل التزاوج
12	..... 6-1 إنتاج البلازما

13	7-1 أنواع البلازما
13	1-7-1 البلازما الباردة.....
13	2-7-1 البلازما الحرارية
13	3-7-1 البلازما الساخنة.....
14	8-1 نماذج التوازن.....
14	1-8-1 نموذج التوازن الترموديناميكي المحلي (ETL)
15	2-8-1 النموذج التاجي (CM)
15	3-8-1 نموذج التوازن التصادمي الإشعاعي الثابت (CR)
16	9-1 الخلاصة
17	المراجع
الفصل الثاني : الأليات الذرية الأساسية في البلازما و الحساب النظري للمقاطع الفعالة للإثارة	
في البلازما الساخنة	
20	1-2 المقدمة.....
20	2-2 الأليات الذرية الأساسية في البلازما
21	1-2-2 الانتقالات الإشعاعية
21	2-2-2 التصادم
21	3-2-2 الاثارة.....
22	1-3-2-2 الإثارة بالتصادم الإلكتروني.....
22	4-2-2 إعادة التركيب
22	1-4-2-2 إعادة التركيب الإشعاعي
22	2-4-2-2 إعادة تركيب ثنائي الإلكترون.....
23	3.4.2.2 إعادة تركيب ثلاثة أجسام.....
23	5-2-2 التأين.....
24	6-2-2 التأين الضوئي.....
24	7-2-2 التأين بواسطة الإلكترون الصادم.....

25	..... 2-3 التقريبات المستعملة في حساب المقاطع الفعالة للإثارة
25	..... 1-3-2 تقريب كولوم- بورن <i>Coulom Born</i>
25	..... 2-3-2 تقريب الأمواج المشوهة DW
26	..... 3-3-2 تقريب باث <i>Bethe</i>
28	..... 4-2 الذرات المعتمدة في حساب المقاطع الفعالة للإثارة و معدلات الإثارة.
28	..... ذرة الكربون
28	..... ذرة البريليوم.
28	..... 1-5-2 الحساب العددي للمقاطع الفعالة للإثارة بالتصادم الإلكتروني.
29	..... 2-5-2 حساب المقاطع الفعالة لذرة البريليوم <i>Be</i>
31	..... 2-6-1 المحاكاة العددية وبرامج الحساب
31	..... 2-6-2 برنامج "FAC"
32	..... 7-2 الخلاصة
33	..... المراجع
الفصل الثالث: حساب معدلات الاثارة بالتصادم الإلكتروني	
37	..... 1-3 مقدمة
37	..... 2-3 دوال التوزيع
37	..... 1-2-3 دالة التوزيع الماكسويلي
38	..... 2-2-3 دالة التوزيع غير الماكسويلي.
38	..... 3-2-3 دالة التوزيع الغاوسي.
38	..... 4-2-3 دالة توزيع قانون القوة.
39	..... 3-3 حساب معدلات الإثارة بالتصادم الإلكتروني.
40	..... 1-3-3 حساب معدلات الإثارة بالتصادم الإلكتروني لذرتي الكربون و البيريليوم.
40	..... 2-3-3 النتائج والمناقشة
40	..... ذرة الكربون.
41	..... ذرة البيريليوم.

43	..... 4-3 الخلاصة
44	..... المراجع
46	..... الخلاصة العامة

قائمة الأشكال

- 6 تكوين توكاماك لبلازما الاندماج المغناطيسي الشكل(1-1)
- 13 أنواع البلازما حسب درجة حرارتها ونسبة كثافتها الشكل(2-1)
- 21 وصف مختلف الانتقالات الإشعاعية الشكل(1-2)
- 22 عملية الإثارة بالتصادم الإلكتروني والعملية العكسية لها الشكل(2-2)
- 24 عملية التأين بالتصادم الإلكتروني الشكل(3-2)
- 37 معدلات الإثارة بالتصادم الإلكتروني لذرة الكربون باستخدام دالة توزيع الطاقة الماكسويلي الشكل(1-3)
- 38 معدلات الإثارة بالتصادم الإلكتروني لذرة البريليوم للانتقالات المسموحة في ثنائي القطب ($2^3P \rightarrow 3^3S$). الشكل(2-3)
- 39 معدلات الإثارة بالتصادم الإلكتروني لذرة البريليوم للانتقالات المسموحة في ثنائي القطب $2^1S \rightarrow 3^1P$ الشكل(3-3)
- 39 معدلات الإثارة بالتصادم الإلكتروني لذرة البريليوم للانتقالات الممنوعة في ثنائي القطب $3^3P \rightarrow 4^3P$ الشكل(4-3)
- 39 معدلات الإثارة بالتصادم الإلكتروني لذرة البريليوم للانتقالات الممنوعة في ثنائي القطب $2^1P \rightarrow 3^1P$ الشكل(5-3)
- 40 معدلات الإثارة بالتصادم الإلكتروني لذرة البريليوم للانتقالات الممنوعة في اللف $2^3P \rightarrow 2^1P$ الشكل(6-3)
- 40 معدلات الإثارة بالتصادم الإلكتروني لذرة البريليوم للانتقالات الممنوعة في اللف $2^1P \rightarrow 3^3S$ الشكل(7-3)

قائمة الرموز

الرموز اللاتينية :

a_0	نصف قطر بوهر .
B	المعامل بيتا
Be	ذرة البريليوم
C_{ij}	معامل الإثارة .
C	ذرة الكربون .
D_{ij}	معدل إعادة تركيب ثنائي الإلكترون .
ΔE	الفرق الطاقي 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.
h	ثابت بلانك .
\hbar	ثابت بلانك المختزل
η	معامل البلازما
g_i	الوزن الإحصائي للذرة في المستوى الطاقي i .
k_β	ثابت بولتزمان.
m_e	كتلة الإلكترون.
m_i	كتلة الأيون
n_e	كثافة الإلكترونات.
n_i	كثافة الأيونات
N_j	كثافة الإسكان في الحالة j .
N_i	كثافة الإسكان في الحالة i .
N	عدد إلكترونات .
T	درجة الحرارة
R_g	ثابت رايدبارغ

R_{ij}	معامل التآين التصادمي .
α	درجة التآين
ω_{P_i}	التردد الأيوني
ω_{P_e}	التردد الإلكتروني في البلازما.
T_e	درجة حرارة الإلكترونات.
n_a	كثافة الذرات غير متأينة
E_c	الطاقة الحركية
W	مصفوفة الانتقال التصادمي الإشعاعي.
λ_D	طول ديبياي
Z	العدد الذري.

المؤشرات :

j	مستوى مثار.
i	مستوى أساسي.
ion	التآين.
F_G	دالة توزيع غاوسي.
T_{hot}	درجة حرارة الإلكترونات الساخنة
F_M	دالة توزيع ماكسويلي.
F_{NM}	دالة توزيع غير ماكسويلي.
F_P	دالة توزيع قانون الاستطاعة

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 أيضاً 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 تقريباً (الديناميكا المغناطيسية، نظرية الاصطدام، الفيزياء الذرية والجزيئية، الفيزياء النووية، النظرية الحركية، الديناميكا الحرارية، انتشار الموجات، الإشعاع، التحليل الطيفي ...)، وتؤدي جميعها عموماً 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 الممكن 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 والذي هو عملية ذرية أساسية في محاكاة انبعاث الإشعاع من الخطوط وأيضاً 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 و الإثارة بالتصادم الإلكتروني للذرات من طرف "Burgess" و "Seaton" سنة 1964م، "Lotz" سنة 1966م، "Moore" سنة 1972م، "Burgess" و آخرون سنة 1977م، وغيرهم [5]. إن الحساب المباشر لهذه المعطيات الذرية غير ممكن للعديد من الذرات متعددة الإلكترونات والتي تمتلك أعداد ذرية كبيرة لذلك تستخدم العديد من البرامج الذرية لمعالجة وتحديد مختلف المعطيات الذرية.

تعتبر دراسة ظاهرة الإثارة في البلازما مهمة جداً 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.

و على هذا الأساس كان الهدف من وراء هذا العمل هو حساب معدلات الإثارة وذلك من خلال دراسة معدلات الإثارة بواسطة إلكترون التصادم للبلازما الساخنة وتطبيقه على بعض الذرات. و عليه تم تنظيم هذا العمل وفقاً لمايلي:

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

-الفصل 2: خصص الأليات الذرية الأساسية في البلازما و الحساب النظري للمقاطع الفعالة للإثارة في البلازما الساخنة، حيث سيتم التعرف على بعض العمليات الذرية الشائعة في البلازما الساخنة، بدءاً بالانتقالات الإشعاعية، ثم الإثارة التصادمية، وأيضاً التأين بواسطة الإلكترون الصادم، وكذلك عملية التأين التصادمي وإعادة التركيب الثلاثي الأجسام، وأخيراً التأين الضوئي و إعادة التركيب الإشعاعي. كما تم التطرق إلى الأساس النظري لمختلف طرق حساب المقاطع الفعالة للإثارة بواسطة التصادم الإلكتروني.

-الفصل 3: حساب معدلات الإثارة بالتصادم الإلكتروني، أين سيتم التطرق إلى حساب معدلات الإثارة بواسطة التصادم الإلكتروني لذرتي الكربون و البريليوم و من ثم مناقشة النتائج.

أخيراً، سنختم المذكرة بخلاصة عامة أين يتم من خلالها تسجيل أهم النقاط التي تم التعرض لها في هذا العمل.

- [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 de Vlasov. 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 fabricationII, 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).

الفصل الأول

مفاهيم أساسية حول البلازما

1-1 المقدمة

تم اكتشاف البلازما في القرن العشرين، تحديداً في عام 1923، وبعد حوالي خمسين سنة تم تحديد خصائصها. كلمة "بلازما" هي كلمة يونانية تُستخدم لوصف الغاز في حالة التأين، وتُعتبر البلازما الحالة الرابعة للمادة حيث تختلف عن الحالات الصلبة والسائلة والغازية. تشكل البلازما حوالي 99% من المادة المعروفة، وبعض الكواكب تتكون أساساً من البلازما. في المصطلحات الحديثة، يُشير مصطلح البلازما إلى الغاز الذي يكون محايداً كهربياً ومتأيناً جزئياً أو كلياً، ويتمتع بخصائص فريدة [1]. في هذا السياق سيتم التطرق في هذا الفصل لأنواع البلازما ومعاملاتها ونماذج التوازن.

2-1 تعريف البلازما

البلازما هي حالة من المادة تتكون من غاز مسخن بدرجة حرارة عالية أو تحت تأثير حقل كهربائي، مما يجعلها تتحول إلى غاز مؤين يحتوي على جسيمات مشحونة (أيونات وإلكترونات) وجسيمات متعادلة (ذرات أو جزيئات).

عموماً في حجم مجهري من البلازما يكون المجموع الشحني الكلي معدوماً [1] بما أن البلازما تعتبر تجمعاً لجسيمات متأينة، تتفاعل هذه الجسيمات بشكل جماعي بفعل القوى الكهرومغناطيسية البعيدة المدى وبسبب شحنتها وحركتها [2]، تعتبر البلازما الحالة الرابعة للمادة. تم تسمية البلازما بهذا الاسم من قبل العالم إرفينغ لانغمير في عام 1928 [3]

3-1 البلازما الساخنة المنتجة داخل المخبر

البلازما الساخنة، المعروفة أيضاً بالبلازما الحرارية، هي حالة من الغاز تكون تماماً مؤينة وتعتبر بيئة مثالية لحدوث الاندماج النووي. كان الاتحاد السوفيتي السابق رائداً في تطوير معجلات التوكاماك التي تحافظ على درجات حرارة تتراوح بين المئات والملايين من الدرجات الكالفينية. وقد تبعته دول أخرى في هذا المجال، مثل بريطانيا التي تمتلك جهاز JET، والولايات المتحدة التي تمتلك جهاز TFTR، واليابان التي تمتلك جهاز JT-60، بالإضافة إلى العديد من الأجهزة الأخرى التي تستخدم أنظمة مختلفة مثل نظام الاحتواء المغناطيسي ونظام الاحتواء القصورى الذاتي. تعمل هذه الدول على تطوير تلك التقنيات بهدف الحصول على طاقة كهربائية بشكل اقتصادي من خلال التفاعلات الاندماجية [4]



الشكل (1.1): تكوين توكاماك لبلازما الاندماج المغناطيسي [5].

حيث أن الخطوط الزرقاء تمثل خطوط المجال المغناطيسي و الخط الأصفر يمثل البلازما و الخطوط الحمراء سلسلة من الملفات المغناطيسية .

4-1 خصائص البلازما**1-4-1 التوصيل الكهربائي**

البلازما هي غاز عالي التأين يحتوي على عدد كبير من الجسيمات المشحونة التي تتحرك بحرية داخلها. نتيجة لهذه الخصائص، تكون البلازما موصلًا جيدًا للكهرباء. تتفاعل هذه الجسيمات المشحونة مع الحقل الكهرومغناطيسي الموضعي، مما يؤدي إلى حدوث حركة منظمة تسبب تيارات كهربائية وتغيرات في كثافة الشحنة. هذه التفاعلات تؤدي في النهاية إلى نشوء حقول كهرومغناطيسية في البلازما [5]

- التردد الأيوني للبلازما

$$\omega_{p_i} = \sqrt{\frac{4\pi(Ze)^2 n_i}{m_i}} \quad (1.1)$$

حيث:

n_i : كثافة الأيونية .

m_i : كتلة الأيون.

- التردد الإلكتروني للبلازما:

$$\omega_{p_e} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}} \quad (2.1)$$

حيث:

n_e : كثافة الإلكترونية .

m_e : كتلة الإلكترون.

2-4-1 التعادل الكهربائي

إحدى الصفات المهمة في البلازما هي نزعتها لتبقى متعادلة كهربائياً، أي ميلها إلى توازن الشحنة الفراغية السالبة مع الشحنة الفراغية الموجبة في كل جزء من الحجم العيني، وأن أي اختلاف بسيط في كثافة الشحنة الفراغية يسبب نشوء قوى كهروستاتيكية قوية تؤثر في اتجاه إعادة التعادل، من جهة أخرى إذا تعرضت البلازما إلى حقل كهربائي خارجي فإن كثافة الشحنات الفراغية ستتنظم نفسها بحيث يجب الجزء الأعظم من البلازما من تأثيرات هذا الحقل [5].

5-1 معاملات البلازما

1-5-1 الكثافة

التأين ضروري لتكوين البلازما، والمقصود «بكثافة البلازما» الكثافة الإلكترونية. بمعنى كمية الإلكترونات المتحررة لكل وحدة مساحة. درجة التأين هي كمية الذرات التي فقدت أو كسبت إلكترونات، وتكون الحرارة هي العامل القوي المتحكم بذلك. ولو أن جزءاً من الغاز بما يساوي 1% من الجزيء، قد تأين فسوف يأخذ صفة شبه البلازما (بمعنى أنه متأثر بمجال مغناطيسي وهو موصل كهربائي قوي)

تعرف درجة التأين α :

$$\alpha = \frac{n_i}{n_i + n_a} \quad (3.1)$$

حيث أن:

n_i تعبر عن كثافة الأيونات
 n_a تعبر عن كثافة الذرات غير المتأينة (المحايدة)

ترتبط كثافة الإلكترون بدرجة التأين عن طريق حالة متوسط الشحنة (Z) للأيون خلال المعادلة التالية:

$$n_e = \langle Z \rangle n_i \quad (4.1)$$

حيث أن:

n_e ترمز إلى كثافة الإلكترونات.

يطلق على البلازما ذات التأين الخفيف تسمية «البلازما الباردة». ومن الممكن الحصول على بلازما بدرجة قليلة من التأين (أكثر الغازات المحايدة)، بمعنى أن الأيونات ذات الدرجة المرتفعة من التأين تكون الإلكترونات فيها قليلة وبارزة في كل أيون.

2-5-1 درجة الحرارة

في البلازما غالباً ما نتحدث عن درجة حرارة الإلكترونات T_e حيث ان [6]:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} K_B T_e \quad (5.1)$$

ولكون E و T_e مرتبطين مباشرة لذا يمكن التعبير عن درجة الحرارة T في فيزياء البلازما كمقدار طاقة ووحدتها تعتبر وحدة طاقة. وعادة ما تفهم تحت مفهوم الحرارة $K_B T$ فمثلاً عندما يكون $K_B T = 1eV$

فيكون لدينا: $J = 1.6 \times 10^{-19} K_B T$

$$T = \frac{1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23}} = 11600 K^\circ$$

$$1eV = 11600 K^\circ \quad \text{عليه}$$

من المفيد الإشارة إلى أن بلازما معينة يمكن أن تمتلك عدة درجات حرارة في نفس الوقت، وغالبا ما تمتلك الإلكترونات والأيونات توزيعين مختلفين لدرجتي حرارة مختلفتين T_e و T_i وهذا ممكن لأن تكرار تصادمات الأيونات فيما بينها أو بين الإلكترونات فيما بينها، ممكن أن تكون أكبر من تكرار تصادمات الإلكترونات والأيونات وعندئذ كل نوع من الجزيئات يمكن أن يوجد في حالة توازن حراري مستقلة عن حالة النوع الأخر. وفي حالة وجود مجال مغناطيسي فإنه حتى في النوع الواحد من الجزيئات وليكن الأيونات يمكن أن توجد في درجتي حرارة مختلفتين وذلك لاختلاف اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة عليها.

1-3-5-1 الأطوال المميزة

1-3-5-1 طول ديبي

يمكن تعريف طول ديبي λ_D على أنه المسافة التي يتم عندها الحجب الكولوني لأي شحنة كهربائية، و المقصود به حجب شحنة من البلازما بواسطة سحابة من الشحنات المعاكسة، و يمكن فهم هذه المسافة بتصور شحنة موجبة تحيط بها الإلكترونات تخضع لقوتين متعاكستين، قوة التجاذب الكولوني التي تؤثر بها الشحنة الموجبة، وقوة أخرى سببها التهيج الحراري. طول ديبي أو مسافة الحجب يعطي بالعلاقة [7]:

$$\lambda_D = \left[\frac{KT_e}{4\pi n_e e^2} \right]^{\frac{1}{2}} \approx 6.9 \sqrt{\frac{T_e}{n_e}} \quad (6.1)$$

حيث K : ثابت بولتزمان

T_e : درجة حرارة الإلكترونات.

1-3-5-1 طول موجة دي بروغلي الحرارية

يعطي تقديرا للطبيعة الكمية لجسيمات البلازما، و يعرف بالعلاقة التالية [8]:

$$\lambda = \left(\frac{2\pi\hbar^2}{mKT} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7.1)$$

حيث \hbar : ثابت بلانك المختزل،

m : كتلة الجسيم،

T : درجة الحرارة.

1-3-5-1 نصف قطر الكرة الإلكترونية والأيونية

نصف قطر الكرة الإلكترونية (r_e): يميز البعد المتوسط بين إلكترونين و يعطى من الشكل [9].

$$r_e = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi n_e}} \quad (8.1)$$

نصف قطر الكرة الأيونية (r_i): يميز البعد المتوسط بين أيونين و يعطى من الشكل

$$r_i = \sqrt[3]{\left(\frac{3}{4\pi n_i}\right)} \quad (9.1)$$

n_i : الكثافة الإلكترونية

4-5-1 الترددات المميزة

أن وجود الإلكترونات ضمن المجالات الكهروستاتيكية لأيونات الموجبة في البلازما سوف يفترض بعض التحديدات على حركة سيل من الإلكترونات والأيونات. فلا بد من حدوث إهتزازات في البلازما نتيجة لوجود القوى الكهروستاتيكية العاملة بين الشحنات الموجبة والسالبة والتي تحاول إعادة البلازما إلى وضع الإستقرار عند التأثير بأي مؤثر يحاول الإخلال بهذا الإستقرار . فعند تصادم الجسيمات المشحونة مع الذرات المتعادلة عندها تتسبب الأخيرة بتذبذب الجسيمات المشحونة بتردد معين يعتمد على القوى الهيدروديناميكية والكهرومغناطيسية الموجودة. وهذا التردد يعطى بالعلاقة:

$$W_p = \left(\frac{n_i e^2}{\epsilon_0 m}\right)^{1/2} \quad (10.1)$$

وهذا التردد يعطى في أغلب الأحيان للإلكترونات لأن تردد الأيونات الموجبة يكون قليل مقارنة بتردد الالكترونات كون كتلتها تكون كبيرة مقارنة بكتلة الإلكترونات.

5-5-1 المعامل β

هي النسبة بين الضغط الذي تولده البلازما على الضغط المغناطيسي

$$\beta = \frac{n(Ke^2 + KT_i)}{B^2/2\mu_0} \quad (11.1)$$

في هذا القانون يوجد حالتين:

(1) $\beta > 1$ ويعني أن قوة الضغط الحركي أكبر من قوة ضغط المجال المغناطيسي الخارجي وتعتبر البلازما في هذه الحالة غير محصورة (غير مسيطر عليها).

(2) $\beta < 1$ هذا يعني ان البلازما سيطر عليها بالمجال المغناطيسي كما هو الحال في منظومة الحصر المغناطيسي التي يجب أن يكون فيها المجال المغناطيسي قوى للسيطرة على البلازما [10] .

6-5-1 طول لانداو

و يدعى البعد التقليدي للإقتراب للأدنى و هو يمثل المقدار الذي تتساوى فيه الطاقة الكامنة الكولومية المتوسطة للتفاعل الثنائي مع الطاقة الحركية المتوسطة و يستخدم هذا الطول في تحليل ظواهر التصادمات و إرتباطات الموضوع في البلازما [6] و يعطى بالشكل التالي:

$$r_0 = \frac{e^2}{KT} \quad (12.1)$$

K ثابت بولتزمان، e الشحنة الإلكترونية، T درجة الحرارة المطلقة

7-5-1 معامل البلازما η

عندما تكون الطاقة الكامنة المتوسطة للجسيمات المشحونة أقل من طاقتها الجزيئية الأدنى، تتبع هذه الجسيمات سلوك الجسيمات الحرة وتتحرك في مسارات مستقيمة. يتم تحديد هذا السلوك بواسطة معامل البلازما (η)، ويمكن التعبير عنه بالصيغة التالية [1]:

$$\eta = \frac{r_{av}^2}{3\lambda_D^2} = 1 \quad (13.1)$$

حيث:

r_{av} : المسافة المتوسطة بين الأيونات.

λ_D : نصف قطر ديبي

8-5-1 معامل التزاوج

في السياق العام، يُعتبر معامل التزاوج بين جسيمات البلازما عاملاً هاماً. يُمثل هذا المعامل النسبة بين الطاقة الكامنة المتوسطة والطاقة الحركية المتوسطة للجسيمات [4]:

-بالنسبة للإلكترونات:

$$\Gamma_{ee} = \frac{e^2}{kTr_e} \quad (14.1)$$

حيث:

$$r_e = 2,8179 \times 10^{-15} m$$

T : درجة الحرارة.

-بالنسبة للأيونات:

$$\Gamma_{ii} = \frac{(Ze)^2}{kTr_i} \quad (15.1)$$

حيث:

r_i : نصف قطر الأيون

T : درجة الحرارة.

-بالنسبة للإلكترونات والأيونات:

$$\Gamma_{ei} = \frac{Ze^2}{kTr_{ei}} \quad (16.1)$$

$$r_{ei} = \frac{r_e + r_i}{2} \text{ حيث:}$$

عندما تكون قيمة معامل التزاوج (Γ) تساوي 1، فإن الطاقة الحركية تلعب دورًا أكبر في تحديد سلوك الجسيمات، مما يعني أن التفاعل بين هذه الجسيمات ضعيف. وفي هذه الحالة، يُعتبر البلازما مثالية.

أما عندما تكون قيمة Γ أكبر من أو تساوي 1، فهذا يشير إلى وجود تفاعل قوي بين الجسيمات..

1-6-1 إنتاج البلازما

يمكن إنتاج البلازما عن طريق رفع درجة حرارة المادة، مما يؤدي إلى زيادة تأينها بشكل كبير. في ظل ظروف التوازن الديناميكي الحراري، ترتبط درجة التأين ودرجة حرارة الإلكترون بشكل وثيق، ويمكن تمثيل هذه العلاقة بواسطة معادلة Saha .

بالإضافة إلى ذلك، يمكن إنتاج البلازما من خلال عمليات تأين ترفع درجة التأين إلى مستويات أعلى بكثير من قيمة التوازن الحراري. هناك طرق متعددة لتكوين البلازما في المختبر، وتعتمد كثافة البلازما ودرجتها الحرارية على الطريقة المستخدمة، وقد تكون مستقرة أو غير مستقرة، ثابتة أو عابرة، ومنخفضة أو عالية. يتم تقديم وصف موجز لأشهر عمليات التأين الضوئي والتفريغ الكهربائي في الغازات.

*في عملية التأين الضوئي

يحدث التأين عندما تمتص الذرة الفوتونات الساقطة التي تحمل طاقة تساوي أو تزيد عن طاقة التأين الممكنة للذرة. يتم تحويل الفوتونات الزائدة إلى طاقة حركية للزوج الإلكتروني-أيون الناتج. على سبيل المثال، يبلغ الحد الأدنى لطاقة التأين للإلكترون الخارجي للأكسجين الذري 13.6 eV ،

ويمكن توفير هذه الطاقة من خلال امتصاص إشعاع بطول موجة أقصر من حوالي 91nm ، وهو في نطاق الأشعة فوق البنفسجية البعيدة. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يكون التأين ناتجًا عن الأشعة السينية أو الأشعة جاما، التي تمتلك أطوال موجية أقصر بكثير.

*تفريغ الغاز (في التفريغ الكهربائي للغاز)

عند تطبيق مجال كهربائي عبر الغاز المتأين، يتم تسريع الإلكترونات الحرة داخل الغاز، مما ينتج طاقة عالية تكفي لتأيين ذرات أخرى عبر الاصطدامات. هذه العملية تتميز بقدرة المجال الكهربائي على نقل الطاقة بكفاءة أكبر إلى الإلكترونات من الأيونات الثقيلة نسبيًا.

عند إيقاف تشغيل مصدر التأين، ينخفض التأين تدريجيًا بسبب إعادة الترتيب حتى يصل إلى قيمة التوازن المتوافقة مع درجة حرارة البيئة. في المختبر، يحدث إعادة الدمج عادة بسرعة كبيرة، مما يؤدي إلى اختفاء البلازما تمامًا في فترة زمنية قصيرة جدًا، تقدر بجزء صغير من الثانية.

7-1 أنواع البلازما

تصنف البلازما وفقا للدرجات الحرارية إلى :

1-7-1 البلازما الباردة (Cold plasma) :

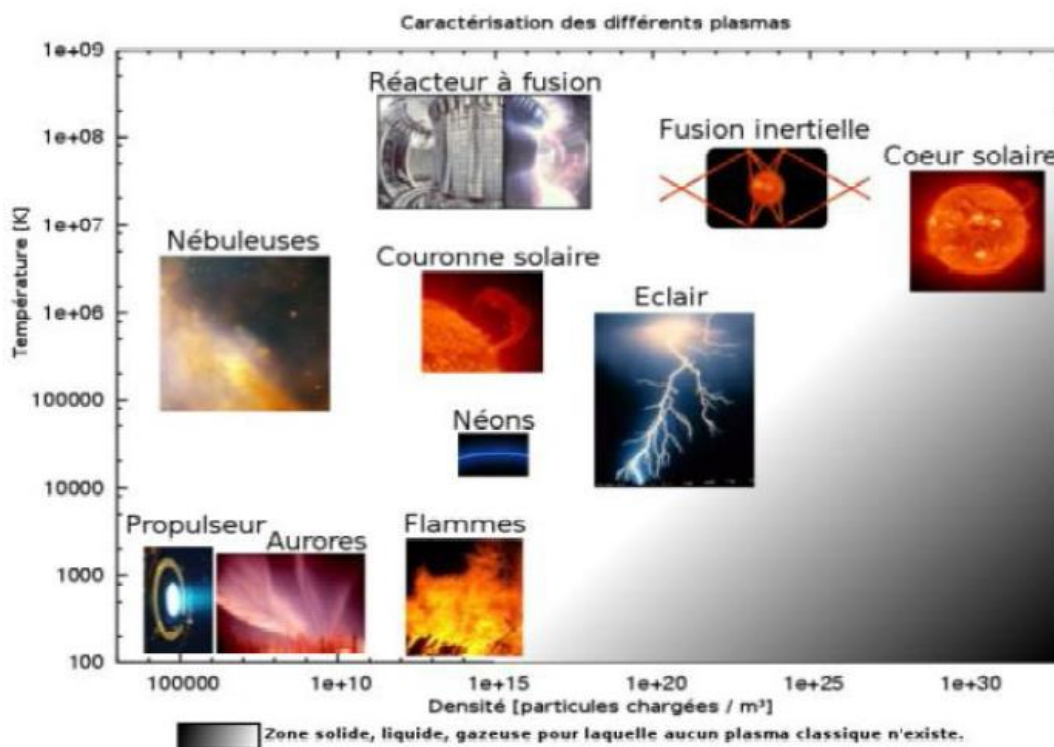
غالبا ما تكون متأينة جزئيا (ضعيفة التأين) تتراوح درجة حرارتها بين مئات إلى عدة آلاف من الدرجات المئوية و بطاقة حركية مقدارها (1eV) ويطلق عليها اسم التفريغ في الغازات وهي النوع المستخدم في أغلب البحوث العلمية .

2-7-1 البلازما الحرارية (Thermal Plasma) :

البلازما الحرارية هي مصطلح يُستخدم لوصف البلازما التي تتحرر فيها الطاقة عن طريق درجة حرارة مرتفعة، وهي بشكل عام متماثلة للبلازما الساخنة. يشير مصطلح البلازما الحرارية عادةً إلى البلازما التي تكون درجة حرارتها عالية بما يكفي لإعطائها طاقة حرارية كبيرة تجعلها تتصرف بشكل مماثل للغازات الساخنة يتم إنتاج البلازما الحرارية في التفاعلات النووية، وفي الصناعات مثلا اللحام بالبلازما وصناعة النفط والغاز.

3-7-1 البلازما الساخنة (Hot plasma) :

بلازما تامة التأين وتعد الوسط الأساسي الذي يمكن أن يحدث فيه تفاعلات الاندماج النووي ومثال على ذلك : بلازما ساخنة توصل إليها الإتحاد السوفياتي سابقا في معجلات التوكاماك وتتراوح درجة حرارتها بين مئات و عدة ملايين من الدرجات الحرارية، وبطاقة حركية بحدود (10 ev).



الشكل (2.1) : أنواع البلازما حسب درجة حرارتها ونسبة كثافتها [5]

8-1 نماذج التوازن

منذ بداية القرن العشرين، سعى العلماء لفهم معاني البلازما ودراستها بشكل دقيق. لتحقيق ذلك، اقترحوا نماذج تعتمد على عدة معايير، من أهمها كثافة ودرجة حرارة الإلكترونات. تتمثل هذه النماذج التقريبية في نموذج التوازن الترموديناميكي المحلي، النموذج التاجي، ونموذج التوازن التصادمي الإشعاعي الثابت. تلك النماذج تساعد في فهم خصائص البلازما وسلوكها في مختلف الظروف والبيئات، مما يساهم في تطوير العلوم والتكنولوجيا ذات الصلة [11, 12].

1-8-1 نموذج التوازن الترموديناميكي المحلي (ETL)

يتم تطبيق هذا النموذج على أنواع معينة من البلازما الثابتة التي تتميز بكثافة إلكترونية عالية ودرجة حرارة منخفضة نسبياً. من خلال هذا النموذج، يتم تحديد كثافة الإسكان في جميع المستويات الذرية خلال عملية الإثارة التصادمية.

عندما تكون البلازما في حالة توازن ترموديناميكي محلي، يتم تطبيق مبدأ التوازن على معدل الإثارة التصادمية في المستويات الذرية في غياب الانبعاث التلقائي، وذلك عندما تكون كثافة الإلكترونات عالية. في هذه الحالة، يتم استخدام قوانين التوازن الإحصائي لبولتزمان لحساب نسبة إسكان المستويات الذرية للأيون. ولتحديد توزيع درجة التأين للمستويات، يتم استخدام معادلة Saha [11-13]:

$$\frac{N_i^{(Z,N-1)} N_e}{N_i^{(Z,N)}} = \frac{2g_i^{(Z,N-1)}}{g_i^{(Z,N)}} \frac{(2\delta m_e k_B T)^{3/2}}{h^3} e^{-\frac{(E_{ion}-\delta E)}{k_B T}} \quad (17.1)$$

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_B : ثابت بولتزمان.

T : درجة الحرارة.

h : ثابت بلانك.

E_{ion} : طاقة التأين للأيون.

δE : الفرق الطاقوي.

2-8-1 النموذج التاجي (CM)

يُطبَّق هذا النموذج على البلازما التي تتميز بدرجة حرارة عالية وكثافة منخفضة نسبياً، ويُستخدم عادة في مجالات مثل الفيزياء الفلكية مثل دراسة الهالة الشمسية، وفي الأجهزة المخبرية مثل التوكاماك. نظراً لغياب التوازن الحراري بسبب درجة حرارة عالية وكثافة منخفضة نسبياً، يكون من الأنسب استخدام قوانين أخرى بدلاً من قوانين بولتزمان وسأها لوصف ظاهرة الإثارة والتأين يصف هذا النموذج الحالات المستقرة للبلازما، حيث تكون أغلب الأيونات في الحالة الأساسية، ويتضمن عمليات مثل الإثارة التصادمية، والإثارة الضوئية (الإشعاعية)، والتأين، وإعادة التركيب الإشعاعي ثنائي الإلكترون [12-14].

3-8-1 نموذج التوازن التصادمي الإشعاعي الثابت (CR)

يعتبر هذا النموذج وسيط بين النموذجين السابقين (نموذج التوازن الترموديناميكي المحلي (ETL) والنموذج التاجي (CM) إذ يطبق على بلازما كثيفة ($10^{-22} \text{ cm}^{-3} \leq N_e \leq 10^{-12} \text{ cm}^{-3}$) 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 [11-13, 15]:

$$\frac{dN}{dt} = \sum_{i=1}^{n_s} N_i W_{ij} - N_j \sum_{k=1}^{n_s} W_{jk} \quad (18.1)$$

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 [16]:

$$W_{ij} = C_{ij} + R_{ij} + I_{ij} + T_{ij} + \Gamma_{ij} + D_{ij} \quad (19.1)$$

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.

9-1 الخلاصة

تضمن هذا الفصل التعريف بالبلازما و البلازما الساخنة المنتجة داخل المخبر و هي بلازما تامة التأين وتعد الوسط الملائم الذي يمكن أن يحدث فيه الاندماج النووي, ثم تطرقنا إلى خصائصها ومعاملاتها، ذكرنا وتفصيلا مرورا بإنتاج البلازما و إرتباطها بمعادلة Saha . وأخيرا تم التطرق لبعض نماذج التوازن المعمول بها في البلازما.

المراجع

- [1] C.K. Birdsall and A.B. Langdon. Plasma Physics via Computer Simulation. Institute of Physics (IOP), Series in Plasma Physics, (1991)
- [2] F. Filbet, Contribution à l'analyse et la simulation numérique de l'équation de Vlasov. PhD thesis, Université Henri Poincaré - Nancy I, (2001).
- [3] A.H. Gabriel and C. Jordan, Interpretation of solare Helium-like ion line
- [4] وليد مصطفى صهبوني، مقدمة في فيزياء البلازما، سلطنة عمان، 190-193، يونيو (2006).
- [5] اسماعيل شيحي، حساب دوال توزيع الحقل الكهربائي الموضوعي ومشتقاتها داخلاً لبلازما باستخدام المحاكاة العددية مونت كارلو تطبيق على طيف الهليوم، رسالة دكتوراه دولة، جامعة منتوري، 2005 قسنطينة.
- [6] J. M. Rax ; "physique des plasmas cour et applications" ; Dunod ;Paris (2005).
- [7] R.O. DENDY, "Plasma Dynamics", Oxford Academic ; Pres (1990).
- [8] عبید سعیدة، دراسة في ثلاثة ابعاد للمقادير الكهربائية في جهاز الرش المهبطي المغنطروني باستعمال طريقة الحجوم المنتهية، رسالة ماجستير، جامعة قاصدي مرباح، 2012 ورقة.
- [9] يحي عبد الحميد الحاج علي و الدكتور رحمن رستم عبد الله، "أساسيات النظرية الكهرومغناطيسية"، وزارة التعليم العالي والبحث العلمي، جامعة الموصل، العراق (1988).
- [10] رعد العزاوي الربيعي، محاضرات في فيزياء البلازما، الجامعة التكنولوجية، العراق (ب-ت)
- [11] F.G. Dortan, Thèse de doctorat, Université Paris XI, (2003).
- [12] D. Salzmann, Atomic Physics in Hot Plasmas, Oxford University Press, New york, (1998).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] F.B. Rosmej, A.Escarguel, C.Brault, Th.Pierre, R.Stamm and K.Quoth, Neutral helium line emission for edge plasma conditions, Journal of Nuclear Materials 337-339 (2005).

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

الفصل الثاني

الأليات الذرية الأساسية في البلازما و الحساب
النظري للمقاطع الفعالة للإثارة في البلازما الساخنة

1-2 المقدمة

تعتبر الإثارة التصادمية والتأين من العمليات الإسكانية الرئيسية في فيزياء البلازما. تم في السنوات الأخيرة 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 [2،1] التي تتطلب ثروة من البيانات الموثقة حول العمليات الإشعاعية و التصادمية التي تتحكم في تأين البلازما وإثارة الأيونات لتشخيصها.

في هذا الفصل سنهتم بحساب المقاطع الفعالة للإثارة بالتصادم الإلكتروني لذرتي الكربون C والبريليوم Be حيث سيتم التطرق أولاً إلى الآليات الذرية الأساسية في البلازما ثم التقريبات المستعملة في حساب المقاطع الفعالة وأخيراً حساب المقاطع الفعالة عن طريق التصادم الإلكتروني لذرتي الكربون والبريليوم لمجموعة من الانتقالات .

2-2 الآليات الذرية الأساسية في البلازما

تشكل البلازما 99% من الكون، وتعتبر مقراً للعديد من الآليات الذرية الأساسية وتحدث هذه العمليات نتيجة التفاعل بين مكونات البلازما (الكترن، أيونات، الفوتونات، مع الحقول الكهرومغناطيسية الخاصة بها). ان انبعاث الإشعاع من البلازما هو عملية أساسية ناتجة من حدوث إحدى الآليات الذرية الأساسية مثل العمليات الإشعاعية أو العمليات التصادمية. وتتميز كل الية بمعطيات ذرية خاصة كالمقاطع الفعالة ومعاملات معدل حدوث هذه العمليات [3،4].

1-2-2 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 [5، 6]:

$$\Delta E = E_j - E_i = h\nu_{ij} \quad (1-2)$$

ΔE : الفرق الطاقوي الموافق للانتقال.

E_j : طاقة المستوى الذري j.

E_i : طاقة المستوى الذري i.

h: ثابت بلانك.

ν_{ij} : تردد الإشعاع.

- الامتصاص الإشعاعي : يحدث عندما تمتص ذرة كمية من الطاقة ($h\nu_{ij}$) فتنتقل من مستوى i طاقته (E_i) إلى مستوى j طاقته (E_j). ويمثل بالمعادلة التالية [7]



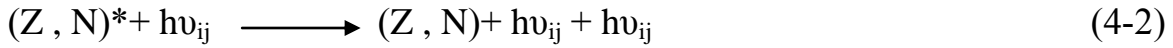
حيث : (Z , N) : ذرة في حالة أساسية عددها الذري Z و N عدد الكتروناتها.

(Z , N) * : ذرة في حالة مثارة

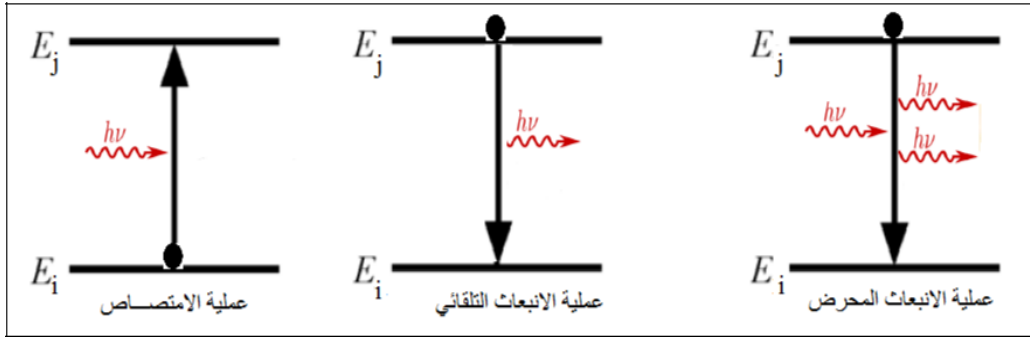
* **الانبعاث التلقائي:** عندما تكون ذرة في حالة مثارة (j) تعود إلى المستوي الأساسي (i) وتبعث كمية من الطاقة (hv_{ij}) ويمثل الانتقال ب:



• **الانبعاث المحرض:** عندما تكون ذرة في حالة مثارة (j) يمكن إن تمتص كمية من الطاقة (hv_{ij}) وترجع إلى المستوي الأساسي (i) وتبعث كميتين من الطاقة وتمثل ب:



ويوضح الشكل (1-2) مختلف الانتقالات الإشعاعية التي تحدث على المستوي الذري .



الشكل(1-2): وصف مختلف الانتقالات الإشعاعية [7]

2-2-2 التصادم

تلعب ظواهر التصادم الذري دورا هاما في الفيزياء الفلكية وفيزياء البلازما وغيرهما. في الأساس ظواهر التصادم الذري تنطوي على اصطدام بين الجسيمات الأولية (الفوتونات، الإلكترونات،...) والنظام الذري(ذرة، أيون، جزيء) أو بين نظامين ذريين. ويوجد نوعين للتصادمات: تصادمات مرنة وهي التصادمات التي تبقى فيها الطاقة الحركية الكلية للأجسام المتصادمة ثابتة دوما ولا يتغير عددها أو نوعها، والتصادمات غير المرنة التي فيها الطاقة الحركية الكلية للأجسام المتصادمة، كما يمكن أن يتغير عدد ونوع الأجسام المتصادمة [8].

3-2-2 الاثارة

عندما تكتسب الذرة كمية محددة من الطاقة التي يمتصها أحد الإلكترونات الداخلية في الذرة تكفيه للقفز إلى مدار خارجي ذي سوية طاقة أعلى، وبذلك تنتقل من حالتها المستقرة إلى حالة جديدة مثارة عندها نقول أن الذرة قد تعرضت لآلية إثارة، أما الإلكترونون ازداد طاقته الكامنة بعد هذا الانتقال [3]. يمكن أن تحدث إثارة للذرات بالطرق الأتية:

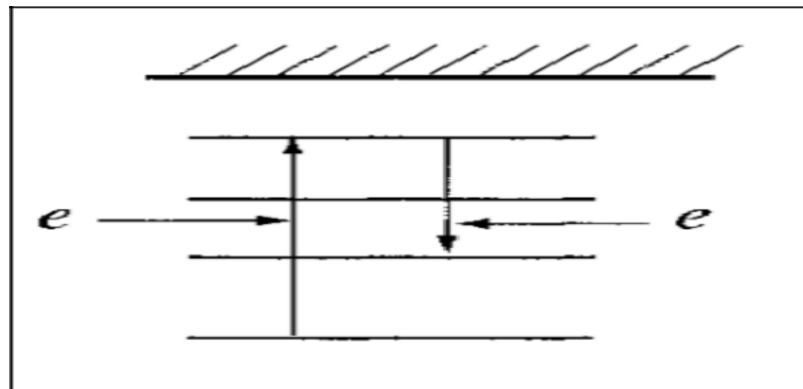
ا/ - الإثارة بواسطة الفوتونات

ب/ - الإثارة بواسطة الذرات أو الأيونات

ج/ - الإثارة بالتصادم الإلكتروني

2-2-3-1 الإثارة بالتصادم الإلكتروني

تحدث عملية الإثارة عندما يعطي الإلكترون الساقط جزءا من طاقته إلى الذرة، لتنتقل بذلك إلى حالة طاقة أعلى، والعملية العكسية لها هي العودة من الإثارة وتعطي من خلال التفاعل التالي [3, 7]:



الشكل (2-2): عملية الإثارة بالتصادم الإلكتروني والعملية العكسية لها [3]

2-2-4 إعادة التركيب

إعادة تركيب (إلكترون- أيون) تحدث في معظم الأحيان في الحالات المثارة وذلك من خلال إلغاء إثارة الأيون وإعادته إلى حالة أساسية أو قريبة من الأساسية وذلك في سلسلة من التحولات الإشعاعية وهناك عدة آليات لإعادة تركيب نذكر منها:

.عملية إعادة التركيب الإشعاعي

.عملية إعادة تركيب ثنائي الإلكترون وهي تلعب دورا هاما في البلازما الساخنة .

. إعادة تركيب ثلاثة أجسام وهي عملية هامة في البلازما الكثيفة ($N_e \geq 10^{19} \text{cm}^{-3}$) [4, 9]

2-2-4-1 إعادة التركيب الإشعاعي

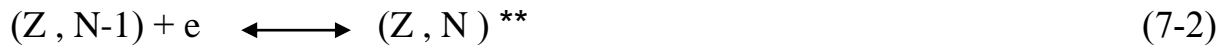
وهي إحدى العمليات الأساسية التي تميز تفاعل الإشعاع الكهرومغناطيسي مع الذرات أو الأيونات. وهذه العملية هي عكس عملية التأين الضوئي، وتتمثل في التقاط الكترون حر بواسطة أيون و يتم بعث فوتون يحمل الطاقة الزائدة و يمكن التعبير عن هذه الظاهرة بالمعادلة التالية [4, 3]



2-4-2-2 إعادة تركيب ثنائي الإلكترون

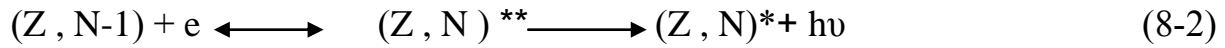
إن آلية إعادة تركيب ثنائي الإلكترون مهمة جدا في البلازما عالية درجة الحرارة، و له دور كبير في زيادة فعالية الإلكترونات و الأيونات من إعادة تشكيل البلازما و تحدث عملية إعادة التركيب ثنائي الإلكترون في مرحلتين هما [7،4،3]

. التقاط (اسر) الإلكترون وتسمى أيضا التقاط (غير إشعاعي) و يتصادم فيها الإلكترون الحر مع أيون طاقته الحركية أقل من طاقة الإثارة وتتشكل الحالة المثارة على نحو مضاعف وهو عملية عكسية لتأين الذاتي التي يعود فيها النظام إلى حالته الأصلية أي تحدث إعادة التركيب كما يلي:

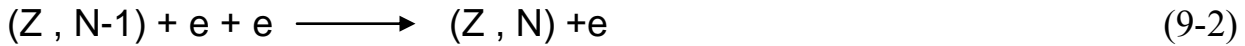


حيث $(Z, N)^{**}$: هي حالة مضاعفة الإثارة.

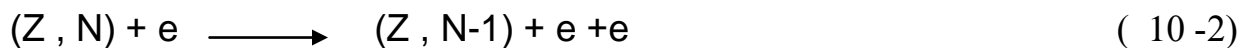
• الاستقرار الإشعاعي التي ينتقل فيها الأيون غير المستقر إلى حالة أكثر استقرارا إما بالتأين التلقائي أو بانبعث فوتون ويعبر عن إعادة التركيب ثنائي الإلكترون بالمعادلة التالية:

**3.4.2.2 إعادة تركيب ثلاثة أجسام**

تحدث هذه العملية عند وقوع تفاعل بين اثنين من الإلكترونات الحرة مع أيون، حيث يتم التقاط إحدى الإلكترونين والثاني ينتشر و يحمل الطاقة الإضافية. وهي العملية العكسية للتأين بالصدمة الإلكتروني و يعبر عنه بالشكل التالي : [7،3]

**5-2-2 التأين**

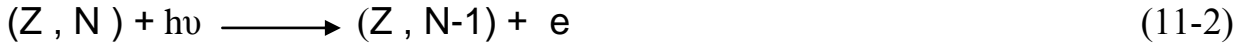
التأين هو عبارة عن عملية تتحول فيها الذرة أو الجزيء إلى أيونات وذلك بإضافة أو إزالة جسيمات مشحونة مثل الإلكترونات أو أيونات أخرى يوجد نوعين للتأين المباشر و غير المباشر)، و هناك عدة آليات لحدوث التأين و نذكر منها التأين بالصدمة الإلكتروني و الذي هو عبارة عن عملية تفاعل بين الذرة و الإلكترون الحر أو بين الأيون و الإلكترون الحر الذي يتبعه نشر للإلكترون الحر و إزالة إلكترون اخر من الأيون أو الذرة و يعبر عنه بالعلاقة التالية [10،7]:



إن احتمال حدوث عملية التأين يعتمد على طاقة الإلكترون، الذرة وطاقة التأين. وعملية التأين هي معاكسة لعملية إعادة تركيب ثلاثة أجسام [8،4،3].

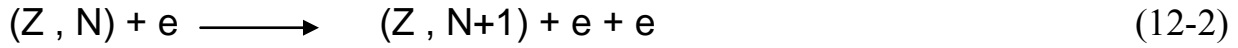
6-2-2 التأيين الضوئي

التأيين الضوئي أو التأيين الإشعاعي هو عبارة عن امتصاص فوتون طاقته ($h\nu$) من طرف أيون، و يتم قذف (تحرير) إلكترون بحيث ان طاقة الفوتون اكبر من طاقة التأيين لأيون (Eion) [13،3] ويعبر عن ذلك بالعلاقة التالية:



7-2-2 التأيين بواسطة الإلكترون الصادم

إن التأيين بواسطة الإلكترون الصادم يعتبر من أهم عمليات التصادم الإلكتروني لتأيين ذرة أو أيون أو جزيء، ولضمان نقل الطاقة وكمية الحركة يجب أن تكون طاقة الإلكترون الوارد أعلى من طاقة التأيين للذرة، حيث ينتج عنها زوج أيون-إلكترون حر، ويمكن التعبير عنها [7، 9] بالتفاعل التالي:



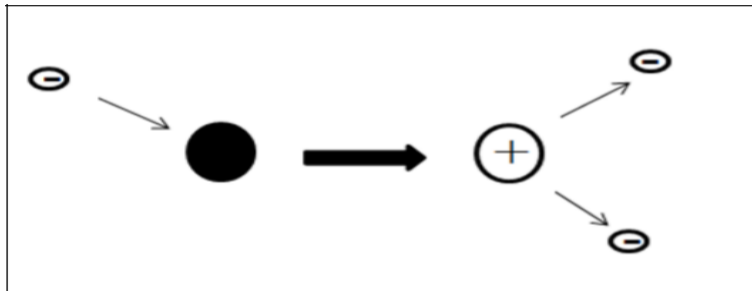
وفي حالة الأيون:



أما التأيين بواسطة الإلكترون الصادم فهو ينقسم إلى نوعين:

. **التأيين المباشر:** تحدث عملية التأيين بالتأثير الإلكتروني المباشر بين ذرة أو أيون وإلكترون حر، حيث يتشتت الإلكترون الوارد مقتلعا معه إلكترونات من الذرة أو الأيون المستهدف، وهذا يستلزم أن تكون طاقة الإلكترون الوارد أكبر من طاقة (جهد) التأيين للذرة. إن الإلكترون المقتلع أثناء عملية التأيين يمكن أن يكون من إلكترونات الطبقة الخارجية أو من إلكترونات الطبقة الداخلية، ويعتبر التأيين 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 [9، 11].

. **التأيين 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 التأيين الأولى للذرة أو الأيون. كما تلعب هذه العملية دورا حاسما في تحديد حالة تأين البلازما الساخنة [11، 12].



الشكل (3-2): عملية التأيين بالتصادم الإلكتروني [5].

2-3 التقريبات المستعملة في حساب المقاطع الفعالة للإثارة

تستخدم التقريبات في حساب المقاطع الفعالة للإثارة في البلازما ، في تبسيط النماذج الرياضية المعقدة وتقدير القيم المقطعية بطرق أكثر سهولة. تهدف هذه التقريبات إلى تحقيق التوازن بين الدقة والكفاءة في عملية الحساب. ومن بين هذه التقريبات ما يلي :

1-3-2 تقريب كولوم - بورن Coulom Born

يعد النموذج الذي طوره بورن أحد أكثر التقريبات استخدامًا لحساب المقاطع الفعالة ، ويلعب دورًا مهمًا في دراسة التصادمات الذرية. في هذا النموذج، يفترض أن إمكانات التشتت التي تصف تفاعل كولوم للقذيفة مع الهدف صغيرة مقارنة بالطاقة الإجمالية للهدف بالإضافة إلى طاقة الإلكترون الوارد، وبالتالي يمكن اعتبارها اضطرابًا. في هذا النموذج، يتم تمثيل الجسيمات الواردة والمبعثرة بواسطة الموجات المستوية. في تقريب كولوم-بورن ، يفترض أن الإلكترون الصادم لا يخترق السحابة الإلكترونية للهدف ، مما يؤدي رياضياً إلى تبسيط مركبة الهاملتوني التي تصف التفاعل الكهروستاتيكي إلكترون-قذيفة- إلكترون الخاصة بالهدف. عندما يتم ضم التفاعلات المسؤولة عن انتشار البلازما في نظرية الاضطرابات، يتم تكييف تقريب بورن - كولوم مع الحالة التي تكون فيها الإلكترونات الحرة سريعة مقارنة بالإلكترونات المرتبطة في الذرة .

يتم وضع تقريب بورن وتعديلاته ضمن مجال كولوم، وجعل كل عبارات المقاطع الفعالة منظمة، في هذه الحالة التي يمكن فيها اعتبار التفاعل المسؤول عن التشتت بمثابة اضطراب ويمكن إهمال التبادل بين إلكترونات النظام، فإن تقريب كولوم بورن يثبت أنه من الممكن الحصول على صيغ عامة بسيطة للمقاطع الفعالة دون استخدام تغيير في عبارة دالة الموجة [14] :

$$dW = \pi \left| \int \ddot{o}_{k_i}^*(r) \left\langle \psi_{a_i} M_i \left| \sum_{N=1}^i \frac{2}{|r_i - r|} - \frac{2Z}{r} \right| \psi_{a_f} M_f \right\rangle \varphi_{k_f}(r) \right|^2 \delta(E_i - E_f) dk_f \quad (14 - 2)$$

$$d\sigma^B = \frac{8\pi}{k_i^3 g_i} \sum_{t=0}^{\infty} (2t+1) \left\langle a_i J_i \left\| \sum_i j_t(qr_i) C_i^{(t)} \right\| a_f J_f \right\rangle^2 \frac{dq}{q} \quad (15 - 2)$$

$$d\sigma^B = \frac{8\pi}{k_i^3 g_i} \sum_{t=0}^{\infty} (2t+1) \left\langle a_i J_i \left\| C^{(t)} \right\| a_f J_f \right\rangle^2 \left(\int_0 P_{l_i}(r) j_k(qr) P_{l_f}(r) dr \right)^2 \frac{dq}{q} \quad (16 - 2)$$

$$\sigma_{a_0 a_f}^B = \frac{8\pi}{k_i^2 g_i} \sum_{t=0}^{\infty} (2t+1) \left\langle a_i J_i \left\| c^{(t)} \right\| a_f J_f \right\rangle \int_{K_i+K_f}^{K_i-K_f} [R_t(q)]^2 \frac{dq}{q} \quad (17 - 2)$$

2-3-2 تقريب الأمواج المشوهة DW

من الممكن الوصول إلى معادلات الموجات المشوهة DW من خلال نظرية الاضطراب عن طريق استبدال احتمالية الانتقال للأمواج المستوية ، والتي تقبلها معادلة شرودينجر دون تغيير الكمون $(-\Delta^2 - k^2)\phi k(r) = 0$ ، بموجات مشوهة بجهد الأيون الساقط [14]

$$(-\nabla^2 + 2V(r) - k^2)\phi k(r) = 0 \quad (18 - 2)$$

يتم الحصول على المقطع الفعال التفاضلي للإثارة الناتجة عن التصادم من احتمال الانتقال، وذلك عندما يكون تدفق الإلكترونات الساقطة على الهدف ثابتاً. من خلال ملاحظة أن الأمواج المستوية الواردة والموجة الصادرة تختلفان، وهذا ما يعرف بالأمواج المشوهة. مع العلم أنه يمكن كتابة أي دالة يمكن جمعها على أساس التوافقيات الكروية، وبالتالي يمكننا كتابة دالة الموجة الصادرة [14]:

$$F_{I_i}^{k_i}(r) = \frac{4\pi}{k_i^{3/2}} \sum_{l_i m_i} i^{l_i} \frac{F_{I_i}^{k_i}(r)}{r} Y_{l_i m_i}(r) Y_{l_i m_i}^*(k_i) \quad (19-2)$$

بحيث تكون الدوال $F_{I_i}^{k_i}(r)$ منظمة إلى الـ 1 عندما يؤول r إلى ما لانهاية .

إن القيمة المتوسطة لزاوية الإلكترون الحر الوارد في الحالة الابتدائية والإلكترون الصادر، يبسط التوافقيات الكروية التي تعتمد على k_f و التي تظهر في عبارة المقطع الفعال:

$$\sigma_{a_i M_i m_i^* a_f M_f m_f^*} = \frac{4\pi}{k_i^3 k_f} \sum_{l_f m_f, l_i m_i} \int \frac{F_{I_i}^{k_i}(r)}{r} Y_{l_i m_i}^* \left\langle \psi_{a_i M_i} \left| \sum_{i=1}^N \frac{2}{|r-r_i|} - \frac{2Z}{r} \right| \psi_{a_f M_f} \right\rangle \frac{F_{I_i}^{k_i}(r)}{r} Y_{l_f m_f} dr \quad (20-2)$$

حيث m_i^* و m_f^* تمثل العدد الكمي المغزلي للإلكترونات الحرة .

سنقدم شكلاً آخر لهذا المقطع العرضي حتى نستطيع من خلالها حساب قوة الاصطدام. يتم تنظيم الدالتين $F_{I_i}^{k_i}$ و $F_{I_f}^{k_f}$ إلى 1 عند اللانهاية، ونعيد تنظيم الدالتين $F_{I_i}^{-\frac{1}{2}}$ و $F_{I_f}^{-\frac{1}{2}}$ بضرب الصيغة السابقة في $k_i k_f$ ، فنجد:

$$\sigma_{a_i M_i a_f M_f} = \frac{2\pi}{k_i^2} \sum_{l_f m_f, l_i m_i} \left| \left\langle \psi_{a_i M_i, k_i m_i^* l_i m_i} | V_{interaction} | \psi_{a_f M_f, k_f l_f m_f m_f^*} \right\rangle \right|^2 \quad (21-2)$$

باختصار، فإن طريقة الاقتران المغلق "Close-Coupling" تضع نظاماً تفاضلي-تكاملي سهل بطريقة تكرارية لحساب حالات نظام الإلكترون-أيون. عدد الحالات المحتملة متغير ولكن قد يشمل تلك الناتجة عن التفاعلات الذرية، مثل التأين والتشتت أو تأثير أوجيه. إن أوقات الحساب متوفرة وممتدة، إلا أن التعقيد الموجود في البرمجة هو الثمن الذي سندفعه من أجل الدقة العالية في النتائج لهذه الطريقة. يقوم تقريب DW بتقليل عدد قنوات التفاعل بشكل كبير من خلال افتراض أن الاقتران بين جميع الحالات الممكنة المختلفة ضعيف جداً، مما يجعل من الممكن تقليل عدد قنوات التفاعل إلى 2. وبالتالي ستظل الدقة جيدة، خاصة بالنسبة للأيونات متعددة الشحونات [14].

3-3-2 تقريب باث Bethe

تنبثق فكرة هذا التقريب عن التقريب السابق Born حيث يمكن من خلاله إثبات أنه بالنسبة لإثارة إلكترون على المستوى الذري المسموح به (حسب قواعد الإصطفاء)، فإن

المقطع الفعال للإثارة يتصرف بشكل مقارب مع طاقات الإلكترون العالية، والبدائية تكون مع دوال *Bessel* من الدرجة الأولى من النشر [14]:

$$j(qr) \xrightarrow{qr \rightarrow 0} \frac{2^t t! q^t}{(2t+1)!} r^t \quad (22 - 2)$$

وهذا في حالة الانتقالات ثنائية القطب (المسموح بها): $\Delta l = \pm 1$ ، وبالتالي فالقريبان السابقان يحولان عنصر المصفوفة الانتقال من:

$$d\sigma^{B \text{ orn}} = \frac{8\pi}{k_i^2 g_i} \sum_{t=0} (2t+1) \langle a_i J_i \| \sum_i j_t(qr_i) C_i(t) \| a_f J_f \rangle^2 \frac{qd}{q^3} \quad (23 - 2)$$

إلى:

$$\sum_{t=0}^{\infty} [t] \langle a_i J_i \| \sum_i j_t(qr_i) C_i(t) \| a_f J_f \rangle^2 = \frac{q^2}{3} \left| \langle a_i J_i \| \sum_i r C_i^{(1)} \| a_f J_f \rangle \right|^2 = \frac{q^2 g}{\Delta E} f_{a_i a_f} \quad (24 - 2)$$

حيث $f_{a_i a_j}$ هي قوة الهزاز ثنائي القطب الكهربائي، وعبارتها كالتالي

$$f_{a_i a_f} = \frac{\Delta E}{3g_i} \left| \langle a_i J_i \| \sum_i r C_i^{(1)} \| a_f J_f \rangle \right|^2 \quad (25 - 2)$$

يطلق على التقريب الناتج تقريب باث *Bethe approximation* ويتم كتابة عبارته على الشكل التالي:

$$\sigma_{a_i a_f}^{\text{Bethe}} = \frac{8\pi}{k_i^2 \Delta E} f_{a_i a_f} \ln \left(\frac{k_i + k_f}{k_i - k_f} \right) \approx \frac{8\pi}{E_i^2 \Delta E} f_{a_i a_j} \ln \left(\frac{4E_i}{\Delta k_i - k_f E} \right) = \frac{8\pi}{\Delta E^2} f_{a_i a_j} \frac{\ln 4X}{X} \quad (26 - 2)$$

حيث :

E : هي الطاقة الحركية للإلكترونات.

X : نسبة الطاقة الواردة إلى طاقة العتبة

$f_{a_i a_j}$: شدة الهزاز في الانتقالات المسموحة

ينتج عن هذه المعادلة مباشرة أن الرسم البياني للدالة $\sigma(E)$ مقابل $\ln X$ يجب ان يكون خطأ مستقيماً مع ميل يتناسب مع $f_{a_i a_j}$ عند الطاقات العالية ليكون تقريب *Bethe* صالحاً. علاوة على ذلك، فإن تقاطع هذا الخط مع محور X ينتج عنه قيمة تجريبية لـ X ، بغض النظر عن التنظيم (*normalisation*) في حالة انتقالات الرنين في الهيليوم He ، فقد تم حساب شدة الهزاز بدقة عالية للغاية، وتم تأكيدها من خلال قياسات حديثة عالية الدقة.

2-4 الذرات المعتمدة في حساب المقاطع الفعالة للإثارة و معدلات الإثارة:

• ذرة الكربون C

الكربون هو عنصر كيميائي له الرمز C و العدد الذري 6، ويقع ضمن عناصر الدورة الثانية وعلى رأس المجموعة الرابعة (المجموعة الرابعة وفق ترقيم المجموعات الرئيسية في الجدول الدوري) وذلك كعنصر مجموعة رئيسي، حيث أنّ مجموعته تسمى باسمه مجموعة الكربون وهو عنصر رباعي التكافؤ، بحيث أنّ لديه أربع إلكترونات متاحة من أجل تشكيل روابط تساهمية، كما أنّ له القدرة على الارتباط مع ذرات كربون أخرى لتشكيل سلاسل كربونية طويلة، كما يرتبط مع عدد من العناصر الأخرى، بحيث يشكّل الملايين من المركبات العضوية [16].

سنتهم بذرة الكربون، الموجودة بوفرة في مختلف هذه البيئات الفلكية، ومفاعلات الاندماج، وأوساط البلازما. لذلك سندرس إثارة الموجودة الذرات بالتصادم للإلكترونات في البلازما، وهذا ما جعلنا نختار بعناية البيانات في مراجع معتمدة.

• ذرة البريليوم Be

البريليوم هو عنصر كيميائي رمزه Be و عدده الذري 4 يقع البريليوم في الجدول الدوري ضمن عناصر الدورة الثانية، وفي المجموعة الثانية على رأس الفلزات القلوية الترابية، وهو عنصر ثنائي التكافؤ وسام. إنّ وفرة هذا العنصر في الكون قليلة، وذلك بسبب قصر عمر تشكّله في النجوم، أمّا على سطح الأرض، فغالباً ما يوجد مرتبطاً مع عناصر أخرى على شكل معادن مختلفة.

تم اقتراح البريليوم باعتباره المادة الرئيسية المواجهة للبلازما للجدار الأول لمفاعل توكاماك الدولي [17] ITER نظراً لخصائصه الفيزيائية الفريدة مثل انخفاض فقدان الطاقة الإشعاعية، وانخفاض تلوّث البلازما، وانخفاض احتباس الوقود. يعد فهم تآكل وتدهور الجدار الأول مسألة حاسمة للتشغيل الإنتاجي والأمن للتوكاماك [18]. سيتم نقل ذرات البريليوم المتناثرة من الجدار إلى حجم البلازما الرئيسي، مما قد يؤثر على التحكم في البلازما وحصرها. تم اكتساب بعض الخبرة في مجال هجرة البريليوم من خلال تجربة جدار البلازما المشابهة لـ ITER الأوروبية المشتركة [19-21] (JET) يمكن تفسير هجرة البريليوم من خلال القياسات الطيفية من البلازما. البيانات الذرية الدقيقة هي الشرط الأساسي لتفسير مثل هذه القياسات [22] من بين العمليات الذرية المختلفة، تعتبر إثارة التأثير الإلكتروني والتأين هي العمليات السائدة التي تحدث في مثل هذه البلازما وتؤثر على الانبعاث. نظراً لأهمية البيانات التصادمية الدقيقة لتأثير الإلكترونات لـ Be، فإن الهدف من العمل الحالي هو تقييم حالة بيانات الإثارة والتأين بتأثير الإلكترونات لـ Be وإنشاء مجموعات البيانات الموصى بها لاستخدامها في تحليل أطياف Be I. يحتوي البريليوم المحايد على أربعة إلكترونات في طبقتين مغلقتين 1s و 2s في حالته الأرضية. نظراً لبنيتها البسيطة مقارنة بالعديد من الذرات المعقدة.

2-5-1 الحساب العددي للمقاطع الفعالة للإثارة بالتصادم الإلكتروني

يتم حساب المقاطع الفعالة عن طريق تطبيق الصيغ شبه التجريبية للإثارة الإلكترونية من حيث قوة الاصطدام $\Omega \left(\frac{E}{\Delta E} \right)$ من خلال العبارة التحليلية التالية [15]:

$$\sigma(E) = \pi a_0^2 \frac{R_Y}{g_i E} \Omega\left(\frac{E}{\Delta E}\right) \quad (27 - 2)$$

حيث: E : طاقة الإلكترون الساقط.

g_i : الوزن الإحصائي للحالة الابتدائية

R_Y : ثابت ريدبارغ

a_0 : نصف قطر بوهر

ومنه نجد أن عبارة المقطع الفعال كالتالي:

$$\sigma_{if} = 1.1969 \times 10^{-15} \times \frac{\Omega_{if}}{W_i E_e} \quad (28 - 2)$$

حيث:

E_e طاقة الإلكترون الساقط ، W_i : الوزن الاحصائي للحالة الابتدائية ، Ω_{if} : قوة التصادم.

2-5-2 حساب المقاطع الفعالة للإثارة لذرة البريليوم Be

يقترح العلماء دراسة البريليوم باعتباره المادة الرئيسية التي تواجه البلازما للجدار الأول لجهاز الـ tokamak ITER نظراً لخصائصه الفيزيائية الفريدة مثل فقد الطاقة الإشعاعية المنخفضة، وتلوث البلازما المنخفض، والاحتفاظ بالوقود المنخفض. يعد فهم تآكل الجدار الأول للجهاز مسألة مهمة للتشغيل الأكثر أمناً وإنتاجيةً للتوكاماك .

سيتم نقل ذرات البريليوم التي تشتتت من الجدار الأول إلى البلازما، مما يؤثر على التحكم في البلازما. يمكن تصنيف إثارة التصادم الإلكتروني للحالات الذرية المختلفة إلى ثلاثة أنواع وهي:

. الانتقالات المسموحة في ثنائي القطب ($|\Delta L| \leq 1, \Delta L = \pm 1, \Delta S = 0$) ،

. الانتقالات الممنوعة في ثنائي القطب ($\Delta L \neq \pm 1, \Delta S = 0$) .

. الانتقالات الممنوعة بالعدد الكمي المغزلي ($\Delta S \neq 0$) حيث ΔL هو التغير في العدد الكمي المداري للإلكترون المثار. توضح هذه الأنواع الثلاثة من الانتقالات قيماً مختلفة للمقاطع الفعالة. لذلك استخدمنا الدوال الثلاث المختلفة التالية لقوة التصادم كدالة لـ x [16]:

شكل قوة التصادم للانتقالات المسموحة في ثنائي القطب :

$$\Omega(x) = \left(\frac{x-1}{x+A_0}\right) \left(A_1 \ln(x) + A_2 + \frac{A_3}{x^2} + \frac{A_4}{x^2} + \frac{A_5}{x^3}\right) \quad (29-2)$$

حيث :

في حالة الإنتقال ($2^3P \rightarrow 3^3S$):

$$A_0 = -8.669[-01]; A_1 = 1.545[+01]; A_2 = -2.227[+01]; A_3 = 3.767[+01];$$

$$A4 = -2.411[+01]; A5 = 1.646[+01]$$

في حالة الانتقال $(2^1 S \rightarrow 3^1 P)$:

$$A0 = -9.986[-01]; A1 = 4.029[-01]; A2 = 2.030[-01]; A3 = 4.799[-01];$$

$$A4 = -1.013[+00]; A5 = 1.148[-01]$$

شكل قوة التصادم للانتقالات الممنوعة في ثنائي القطب:

$$\Omega(x) = \left(\frac{x(x-1)}{(x^2+A_0)} \right) \left(A_1 + \frac{A_2}{x} + \frac{A_3^2}{x} + \frac{A_4}{x^3} + \frac{A_5}{x^4} \right) \quad (2-30)$$

حيث:

في حالة الانتقال $(3^3 P \rightarrow 4^3 P)$:

$$A0 = 4.309[+01]; A1 = 1.342[+02]; A2 = -1.566[+03]; A3 = 1.635[+04];$$

$$A4 = -4.515[+04]; A5 = 4.280[+04]$$

في حالة الانتقال $(2^1 P \rightarrow 3^1 P)$:

$$A0 = -9.594[-01]; A1 = 1.168[+01]; A2 = -2.927[+01]; A3 = 1.211[+02];$$

$$A4 = -2.151[+02]; A5 = 1.191[+02]$$

شكل قوة التصادم للانتقالات اللف الممنوع:

$$\Omega(x) = \left(\frac{(x-1)}{(x^{A_0+A_1})} \right) \left(A_2 + \frac{A_3}{x} + \frac{A_4}{x^2} + \frac{A_5}{x^3} \right) \quad (2-31)$$

حيث:

في حالة الانتقال $(2^3 P \rightarrow 2^1 P)$:

$$A0 = 3.119[+00]; A1 = -9.973[-01]; A2 = 1.017[+02]; A3 = -3.188[+02];$$

$$A4 = 4.651[+02]; A5 = -2.456[+02]$$

في حالة الانتقال $(2^1 P \rightarrow 3^3 S)$:

$$A0 = 3.334[+00]; A1 = -9.743[-01]; A2 = 7.645[+01]; A3 = -2.894[+02];$$

$$A4 = 4.318[+02]; A5 = -2.160[+02]$$

2-6 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 صعباً (مستحيلاً) بالنسبة للذرات متعددة الإلكترونات والأعداد الكمية الكبيرة. وفي هذه الحالة نلجأ إلى برامج للحساب لمعالجة المعطيات الذرية نذكر منها :

ATOM, MZ [17] و FAC [18] 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" نظراً لمرونته وسهولة استخدامه.

3-6-1 برنامج " FAC "

طور برنامج FAC من قبل "Gu. Ming-Feng" [19]. 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 [20, 21].

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 انطلاقاً من كمون مركزي محلي (يحدد بطريقة منتظمة ذاتياً) والتي هي مشتقة منه أساساً. ويتم توظيف نهج النسبية بشكل كامل استناداً إلى معادلة ديراك التي تسمح بالتعامل مع الأيونات ذات القيم الكبيرة في الشحنة, مع تطبيق طرق تقريب الأمواج المشوهة (DW) [18, 21].

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) [20].

7-2 الخلاصة:

تطرقنا في هذا الفصل إلى الآليات الذرية الأساسية في البلازما والطرق التقريبية المستعملة لحساب المقاطع الفعالة ، وعرض شكل معادلات قوى التصادم لحساب المقاطع الفعالة للإثارة بالتصادم الإلكتروني لذرتي الكربون و البريليوم.

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 mod of non-thermal plasmas||, Journal of Computational Physics, v,228 n,7, p.2468-2479, April (2009)
- [3] D. Salzmann, Atomic Physics in Hot Plasmas, (Oxford University Press, Newyork 1998).
- [4] E. Arimondo, P.R. Berman and C.C. Lin, Advances in Atomic, Molecular, and optical physics volume 55,(USA 2008)
- [5] W. Demtröder , Atoms ,Molecules and Photons An Introduction to Atomic, Molecular and Quantum-Physics, Springer Verlag Berlin Heidelberg Germany, (2006).
- [6] J. Tennyson, Astronomical Spectroscopy An Introduction to the Atomic and Molecular Physics of Astronomical Spectra,University College London ,(2005).
- [7] 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)
- [8] B. H. Bransden and C. J . Joachain , Physics of atoms and molecules, New York (1983).
- [9] 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).

- [10] E. U. Condon and G.H .Shortley, The theory of atomic spectra, (Cambridge at the university press, London (1959).
- [11] J.V. Paradijs and A.M. Bleeker, X-Ray Spectroscopy in Astrophysics, Springer, Netherlands, (1997).
- [12]A. Corney, Atomic and Laser Spectroscopy,Oxford University Press, New York, (1977).
- [13] H.J. Kunze, Introduction to Plasma Spectroscopy, (Springer, Berlin 2009).
- [14] 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)
- [15] H.Suno and T.Kato, Cross Section Database for Carbon Atoms and Ions: Electron Impact Ionization, Excitation, and Charge Exchange in Collisions with Hydrogen Atom, NIFS-DATA- 91 (Feb 2004).
- [16] Dipti, T. Das, K. Bartschat, I. Bray, D.V. Fursa, O. Zatsarinny, C. Ballance,H.-K. Chung, Yu. Ralchenko , Recommended electron-impact excitation and ionization cross sections for Be I, (2018).
- [17] <https://www.iter.org/mach/blanket>.
- [18] R.A. Pitts, J.P. Coad, D.P. Coster, G. Federici, W. Fundamenski, J. Horacek, K. Krieger, A. Kukushkin, J. Likonen, G.F. Matthews, M. Rubel, J.D. Strachan, Plasma Phys. Control. Fusion 47 (2005) B303.
- [19] T. Hirai, H. Maier, M. Rubel, P. Mertens, R. Neu, E. Gauthier, J. Likonen, C. Lungu, G. Maddaluno, G. Matthews, R. Mitteau, O. Neubauer, G. Piazza, V. Philipps, B. Riccardi, C. Ruset, I. Uytendhouwen, Fusion Eng. Des. 82 (2007) 1839.

- [20] M. Rubel, J. Coad, A. Widdowson, G. Matthews, H. Esser, T. Hirai, J. Likonen, J. Linke, C. Lungu, M. Mayer, L. Pedrick, C. Ruset, J. Nucl. Mater. 438 (2013) S1204.
- [21] E. Pajuste, G. Kizane, A. Vitins, I. Igaune, L. Avotina, R. Zarins, Nucl. Mater. Energy 12 (2017) 642.
- [22] D. Kondratyev, L. Vainshtein, I. Bray, D. Fursa, Yu. Ralchenko, Phys. Scr. T 161 (2014) 014007.

الفصل الثالث

حساب معدلات الاثارة بالتصادم
الإلكتروني

1-3 المقدمة

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. وكلها 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 الأيونات لتشخيصها.

في هذا الفصل سنقوم بحساب معدلات الإثارة بالتصادم الإلكتروني بالنسبة لذرتي الكربون C والبريليوم Be في البلازما. حيث سيتم التطرق لدوال التوزيع وأشكالها، ثم إلى حساب معدلات الإثارة بالتصادم الإلكتروني لذرتين وأخيرا النتائج والمناقشة.

2-3 دوال التوزيع

من المعروف أن آلية الإثارة بالتأثير الإلكتروني هي عملية مهمة في نموذج التصادم الإشعاعي الذري، حيث يعتمد هذا النموذج على حركة الذرات لتشخيص ونمذجة البلازما، كما يعتمد على إسكان سويات الطاقة والتي بدورها تعتمد على دوال توزيع طاقة الإلكترون. تم تكييف دراسات على الإلكترونات الساخنة لتجارب معينة، واقتصرت استنتاجاتهم على تحديد أشكال دوال توزيع طاقة الإلكترون [3] وتعطى هذه الأشكال كما يلي:

1-2-3 دالة التوزيع الماكسويلي

يمثل توزيع ماكسويل أساس نظرية حركة الغازات العشوائية التي تصف خواص الغازات في حالة التوازن الترموديناميكي (حراري). وهو يعطي السرعة الأكثر احتمالا في نظام كبير من الجسيمات التي لا تتفاعل مع بعضها ولا يحدث بينها سوى الاصطدامات المرنة، مع افتراض عدم وجود طاقة التفاعل بينها [3, 4] وتكتب دالة توزيع السرعات في هذه الحالة كما يلي:

$$f(v)dv = 4\pi v^2 \left(\frac{m}{2\pi T}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mv^2}{2T}\right) dv \quad (1-3)$$

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

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

حيث :

- K_B : ثابت بولتزمان.
- m : كتلة الإلكترون.
- T_e : درجة حرارة الإلكترونات.
- ε : طاقة الإلكترونات.

ولكن هناك حالات كثيرة لا يصح فيها توزيع ماكسويل مثل تصادم البلازما في فضاء خارجي وعلى الأخص تصادم الإلكترونات بالتأين.

3-2-2 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، وللتحقق في تأثير الإلكترونات الساخنة على الخصائص الإشعاعية للبلازما، اقترح "Escarguel. al" [5] التوزيع غير الماكسويلي لحساب معدلات التأين أو الإثارة والذي يعطى بالشكل التالي:

$$F_{NM}(\varepsilon) = (1 - f_{hot})F_M(T_e) + f_{hot}F_M(T_e) \quad (3-3)$$

حيث:

f_{hot} : نسبة الإلكترونات الساخنة.

F_M : دالة توزيع ماكسويل لطاقة الإلكترونات.

T_e : درجة حرارة الإلكترونات.

3-2-3 دالة التوزيع الغاوسي

يعد التوزيع الغاوسي التوزيع الاحتمالي المستمر الأساسي وهو التوزيع الأهم في مجال الإحصاء و هو كثير الانتشار والاستعمال، ويستخدم غالبا لوصف المتغيرات العشوائية التي تميل إلى التمرکز حول قيمة متوسطة، وقد ساهم الكثير من الإحصائيين باستخدامها لحساب توقعات الأماكن الفلكية. ويمكن أن يمثل توزيع غاوس الإلكترونات التي يتم إثارتها بواسطة تفاعلات الليزر والبلازما الرنانة [3]. تكتب دالة التوزيع الغاوسي في طاقة مميزة ε_0 بالصيغة التالية:

$$F_G(\varepsilon, T_e) = \frac{1}{T_e \sqrt{\pi}} \left(\frac{2}{1 + \operatorname{erf}(\varepsilon_0/T_e)} \right) \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{T_e} \right)^2 \right] \quad (4-3)$$

حيث:

ε_0 : طاقة الإلكترون المميزة.

w : عرض خط الطيف.

3-2-4 دالة توزيع قانون القوة:

توزيع قانون قوة هو دالة كثافة احتمال مستمرة، واستخداماته الأكثر شيوعا هي في النماذج الفيزيائية الفلكية، على سبيل مثال في الرياح الشمسية أين تكون الإلكترونات في هذه المناطق غير حرارية [4]. يكون توزيع قانون القوة غير صفري عند طاقة الإلكترون المميزة ε_0 وتتحلل بسرعة أكبر أو أقل مع الطاقة وفقا لقيمة ثابت الانحلال γ [3]. ويكتب توزيع قانون القوة كما يلي:

$$F_p(\varepsilon, T_e) = \left(\frac{\gamma-1}{T_e^{1-\gamma}} \right) \varepsilon^{-\gamma}; \quad \varepsilon \geq T_e \quad (5-3)$$

حيث:

ε_0 : طاقة الإلكترون المميزة.

γ : ثابت انحلال.

التوزيعات في المعادلات (1-3)، (2-3) يتم إعطاؤها في شكلها الطبيعي $[\int F_x(\varepsilon_0) d\varepsilon = 1]$ من حيث طاقة الإلكترون ε وطاقة توزيع مميزة ε_0 . الطاقة المميزة لتوزيع ماكسويل (الحراري) في معادلة (1-3) تعادل درجة حرارة الإلكترون T_e . ويتمركز التوزيع الغاوسي في معادلة (3-3)، الذي يمكن أن يمثل الإلكترونات التي يتم إثارتها بواسطة تفاعلات الليزر والبلازما الرنانة، ذات طاقة مميزة ε_0 وله عرض خط الطيف ونصف عرض أقصى $w\sqrt{\ln 2}$. ويستخدم التوزيع قانون القوة الأكثر شيوعاً في النماذج الفيزيائية الفلكية، وتصبح غير معدومة عند طاقة الإلكترون المميزة ε_0 وتتحلل بسرعة أكبر أو أقل مع الطاقة وفقاً لقيمة ε_0 . ومع ذلك بالنسبة لمعظم البلازما ذات درجتين الحرارة يمكن ε_0 اختيارها بحيث يندمج توزيع قانون طاقة الإلكترون الساخنة بسلاسة مع توزيع ماكسويل لدرجة الحرارة المنخفضة [3].

3-3 حساب معدلات الإثارة بالتصادم 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 دوال الموجة التي تصف الحالات الأولية والنهائية للنظام.

يمكن أن توفر النماذج النظرية المبسطة فهماً لعملية الإثارة، 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 [3]:

$$\tau = \langle \sigma_v \rangle = \int_{\Delta\varepsilon}^{\infty} v\sigma(\varepsilon)f(\varepsilon)d\varepsilon \quad ; \quad [\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6-3)$$

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.

1-3-3 حساب معدلات الإثارة بالتصادم الإلكتروني لذرتي الكربون و البيريليوم

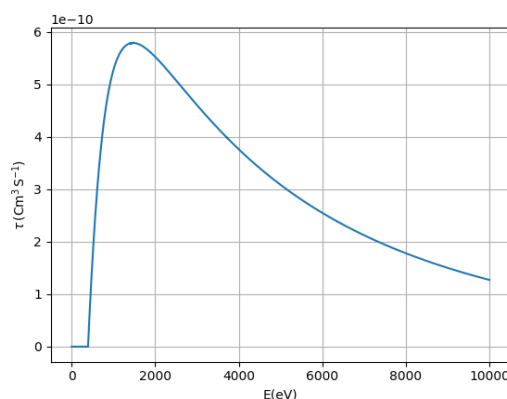
هناك جهود كبيرة من طرف العلماء لفهم انتقال الإلكترونات أثناء الإثارة بواسطة التصادم من منظور التجريب والمحاكاة. إذ يعد توزيع طاقة الإلكترون موضوعاً ذا أهمية كبيرة لفيزياء البلازما لأنها تلعب دوراً مهماً في تطوير دراسة البلازما، وتعد معدلات الإثارة للذرات و الأيونات المختلفة في البلازما ضرورية لفهم التوازن داخل البلازما. 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 الإثارة من خلال دمج مقطع التصادم مع الطاقة ومع دوال توزيع الطاقة.

وفي هذا الجزء تم حساب ورسم منحنيات معدلات الإثارة بواسطة التصادم الإلكتروني لذرتي الكربون و البيريليوم المحسوبة بواسطة المقاطع الفعالة بتوظيف دالة توزيع مكسويلي لطاقة للإلكترونات.

2-3-3 النتائج و المناقشة

• ذرة الكربون

يعرض الشكل (3-1) نتائج قياس معدلات الإثارة بواسطة التصادم الإلكتروني لذرة الكربون .



الشكل (3-1): معدلات الإثارة بالتصادم الإلكتروني لذرة الكربون باستخدام دالة توزيع الطاقة الماكسويلي .

يمثل الشكل (3-1) العلاقة بين طاقة الإلكترون ومعدل الإثارة بالتصادم الإلكتروني لذرة الكربون.

- عند قيم الطاقة المنخفضة (من 0 إلى حوالي 2000 إلكترون فولت)، نلاحظ زيادة سريعة في معدل التفاعل. هذا يشير إلى أن التفاعل يصبح أكثر فعالية مع زيادة الطاقة في هذا النطاق. يمكن أن يُعزى ذلك إلى أن الجسيمات تمتلك طاقة كافية للتغلب على حواجز الطاقة وتبدأ في التفاعل بمعدل أعلى. عند حوالي 2000 إلكترون فولت، يصل معدل التفاعل إلى ذروته. هذا يعني أن هناك طاقة مثلى حيث يكون التفاعل في أقصى فعاليته. يمكن أن يكون ذلك بسبب التوازن بين طاقة التصادم العالية واحتمالية التفاعل. بعد 2000 إلكترون فولت، يبدأ معدل التفاعل في الانخفاض تدريجياً مع زيادة الطاقة. هذا يشير إلى أن هناك عوامل أخرى تؤثر على فعالية التفاعل عند الطاقات العالية.

يمكن أن يكون ذلك بسبب زيادة سرعة الجسيمات بحيث تصبح فترة التفاعل قصيرة جداً، أو أن طاقات التصادم العالية تؤدي إلى تفاعلات غير فعالة أو تفكك الجسيمات.

إذا اردنا مناقشة النتائج المتحصل عليها يمكن القول انه بالنسبة الى :

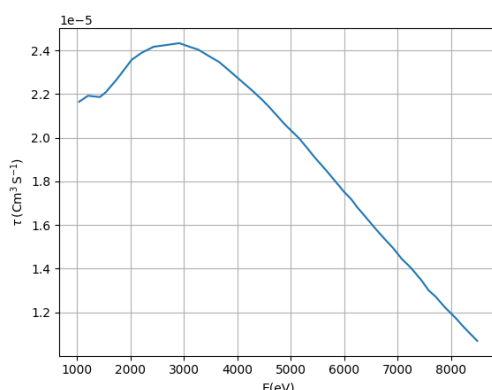
التفاعل في الطاقات المنخفضة: من المهم دراسة الأسباب التي تؤدي إلى زيادة فعالية التفاعل بشكل حاد في الطاقات المنخفضة، فقد يكون ذلك مرتبطاً بنوع معين من التفاعلات أو بحواجز طاقة محددة.

الطاقة المثلى للتفاعل: يجب التركيز على فهم الآليات التي تؤدي إلى الوصول إلى القمة عند حوالي 2000 إلكترون فولت، حيث يمكن تحسين ظروف التفاعل لتحقيق أقصى فعالية.

التفاعل في الطاقات العالية: الانخفاض في معدل التفاعل عند الطاقات العالية يتطلب دراسة معمقة لفهم العوامل التي تقلل من فعالية التفاعل، مثل تأثيرات التشتت العالي أو فقدان الطاقة في أشكال أخرى.

بشكل عام، يمكن أن تساعد هذه النتائج في تحسين تصميم التجارب وتطوير نماذج نظرية أكثر دقة لفهم سلوك التفاعلات عند مختلف مستويات الطاقة.

• ذرة البريليوم



الشكل (3-2): معدلات الإثارة بالتصادم الإلكتروني لذرة البريليوم للانتقالات المسموحة في ثنائي القطب ($2^3P \rightarrow 3^3S$).

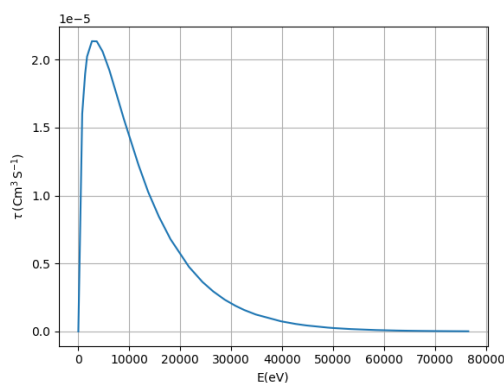
بالنسبة للشكل (3-2) و في النطاق من 1000 إلى حوالي 3000 [eV] ، نلاحظ زيادة في قيمة τ . هذا يشير إلى أن مع زيادة الطاقة يحدث تزايد في قيمة τ عندما ، تصل قيمة τ إلى ذروتها هذا يعني أن هناك نقطة مثالية للطاقة عندها تكون قيمة τ في أعلى مستوياتها. بعد 3000 [eV] ، تبدأ قيمة τ في الانخفاض تدريجياً. هذا يشير إلى أن زيادة الطاقة بعد هذه النقطة تؤدي إلى تقليل قيمة τ بشكل متواصل.

يمكن ان نرجع الأسباب المحتملة للزيادة والانخفاض:

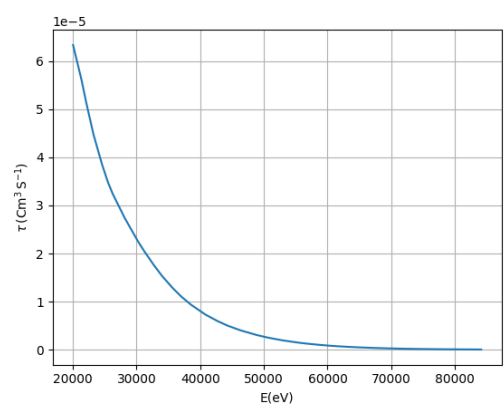
- زيادة قيمة τ في البداية: قد تكون ناتجة عن زيادة كفاءة الآليات الفيزيائية أو الكيميائية التي تحدث عند هذه الطاقات.

- الذروة: يمكن أن تكون بسبب الوصول إلى حالة توازن معينة أو أقصى كفاءة في النظام.

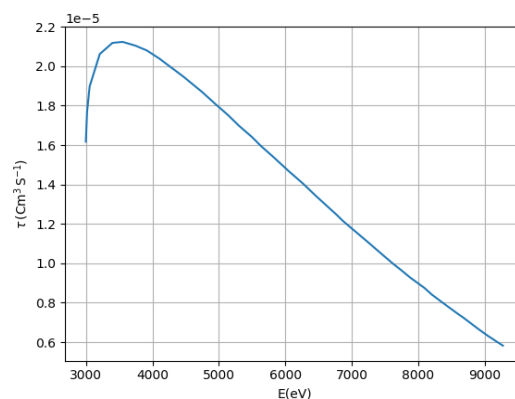
- الانخفاض بعد الذروة: قد يكون ناتجاً عن تشبع النظام أو تأثيرات سلبية للطاقة الزائدة التي تؤدي إلى تقليل كفاءة الآليات



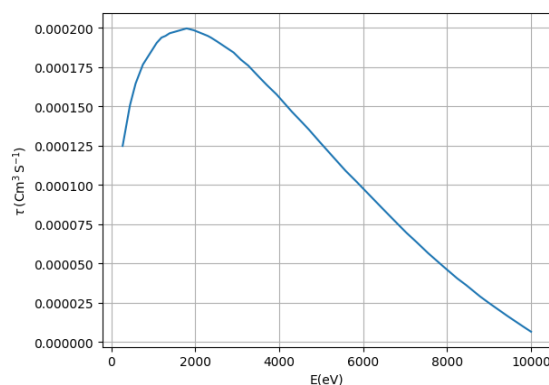
الشكل (3-3): معدلات الإثارة بالتصادم الإلكتروني لذرة البريليوم للانتقالات المسموحة في ثنائي القطب $2^1S \rightarrow 3^1P$.



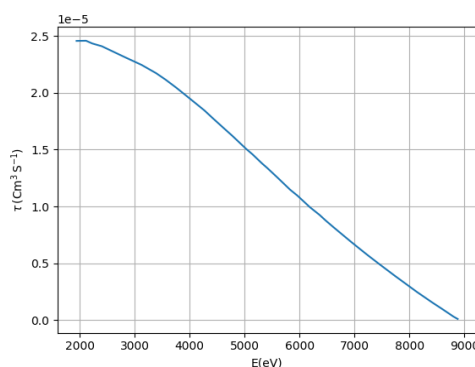
الشكل (3-4): معدلات الإثارة بالتصادم الإلكتروني لذرة البريليوم للانتقالات الممنوعة في ثنائي القطب $3^3P \rightarrow 4^3P$.



الشكل (3-5): معدلات الإثارة بالتصادم الإلكتروني لذرة البريليوم للانتقالات الممنوعة في ثنائي القطب $2^1P \rightarrow 3^1P$.



الشكل (3-6): معدلات الإثارة بالتصادم الإلكتروني لذرة البريليوم للانتقالات الممنوعة في اللف $2^3P \rightarrow 2^1P$



الشكل (3-7): معدلات الإثارة بالتصادم الإلكتروني لذرة البريليوم للانتقالات الممنوعة في اللف $2^1P \rightarrow 3^3S$

تظهر المنحنيات علاقة غير خطية بين الطاقة وقيمة (τ) ، مع وجود نقطة ذروة تختلف قيمتها من منحنى إلى آخر، يتبعها انخفاض تدريجي في قيمة (τ) حتى تصل إلى الصفر تقريباً. هذه الاستنتاجات يمكن أن تكون مفيدة في تحسين أداء الأنظمة التي تتعامل مع هذه الطاقات، مع التركيز على الطاقات المثلى لتجنب الانخفاض في الكفاءة.

يمكن استخدام هذه المنحنيات في مجالات مختلفة مثل: فيزياء الجسيمات، الهندسة النووية، أو أي مجال يتعامل مع تفاعلات الطاقة العالية.

4-3 الخلاصة

في هذا الفصل تم حساب معدلات الإثارة بواسطة التصادم الإلكتروني بالنسبة لذرتي الكربون و البريليوم بالنسبة للانتقالات مختلفة. و تم التطرق إلى أشكال مختلفة لدوال توزيع الطاقة. وأخيراً تم 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] S. B. Hansen and A. S. Shlyaptseva, Effects of the electron energy distribution function on modeled x-ray spectra, The American Physical Society (2004).
- [4] 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)
- [5] A. Escarguel, F. B. Rosmej, C. Brault, Th. Pierre, R. Stamm and K. Quotb, Plasma Phys. Control. Fusion 49, 85–93, (2007).

خلاصة عامة

خلاصة عامة

تعتبر دراسة البلازما، سواء كانت باردة أو ساخنة، من المواضيع الحيوية في الفيزياء الحديثة لما تحمله من تطبيقات واسعة في مجالات متعددة مثل الفيزياء الفلكية، الطب، والصناعة. من خلال هذه المذكرة، استعرضنا المفاهيم الأساسية المتعلقة بالبلازما وخصائصها المختلفة بالإضافة إلى الآليات الذرية الأساسية التي تجري داخلها.

في الفصل الأول، قمنا بتعريف البلازما وعرض أنواعها المختلفة، موضحين الخصائص الفيزيائية والكيميائية التي تميز كل نوع. تناولنا أيضًا نماذج التوازن المستخدمة في دراسة البلازما، مثل نموذج التوازن الترموديناميكي المحلي والنموذج التاجي.

أما في الفصل الثاني، فركزنا على الآليات الذرية الأساسية في البلازما، مثل الانتقالات الإشعاعية، التصادمات، الإثارة، إعادة التركيب، والتأين. قمنا أيضًا بعرض التقريبات المستعملة في حساب المقاطع الفعالة للإثارة بالتصادم الإلكتروني، مع التركيز على تقريبات كولوم-بورن، الأمواج المشوهة، وياث.

وفي الفصل الثالث، قمنا بعرض مختلف دوال التوزيع لطاقة الإلكترون مثل : دالة التوزيع الماكسويلي، دالة التوزيع غير الماكسويلي، دالة التوزيع الغاوسي، ودالة توزيع قانون القوة. تناولنا كيفية حساب معدلات الإثارة بالتصادم الإلكتروني لدالة التوزيع الماكسويلي، كما قمنا بحساب معدلات الإثارة لذرتي الكربون والبيريليوم، مع تقديم النتائج ومناقشتها.

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.

بالنسبة لذرة الكربون تظهر العلاقة بين طاقة الإلكترونات ومعدل الاصطدام في ذرة الكربون ، بزيادة معدل الاصطدام بسرعة مع زيادة الطاقة حتى يصل إلى قيمة قصوى عند حوالي 2000 إلكترون فولت ، ثم ينخفض تدريجياً مع زيادة الطاقة. هذه العلاقة تشير إلى وجود طاقة مثلى للإلكترونات لتحقيق أعلى معدل اصطدام، وهو أمر مهم في تصميم وتطبيقات أجهزة تعتمد على اصطدام الإلكترونات.

وبالنسبة لذرة البريليوم تظهر علاقة غير خطية بين الطاقة وقيمة (τ) ، مع وجود نقطة ذروة تختلف قيمتها من منحنى إلى آخر، يتبعها انخفاض تدريجي في قيمة (τ) حتى تصل إلى الصفر تقريباً. هذه الاستنتاجات يمكن أن تكون مفيدة في تحسين أداء الأنظمة التي تتعامل مع هذه الطاقات، مع التركيز على الطاقات المثلى لتجنب الانخفاض في الكفاءة.

من كل ما سبق نأمل أن نكون قد أضفنا فهمًا أعمق للخصائص والعمليات التي تتحكم في البلازما، و بأن تكون هناك دراسات أوسع وأشمل في هذا الموضوع ، وتطبق هذه الدراسة على أكبر عدد ممكن من الذرات من أجل التحقق من مدى تأثير مختلف المعطيات الذرية وحسن استغلالها.

من خلال هذا العمل، فتحنا آفاقًا جديدة للباحثين في هذا المجال للمزيد من الاستكشاف والتطوير. نشكر كل من ساهم في إنجاز هذه المذكرة، ونتطلع إلى أن تكون مرجعًا مفيدًا للمهتمين بدراسة البلازما وتطبيقاتها.

ملخص:

يهدف هذا العمل إلى حساب معدلات الإثارة بواسطة التصادم الإلكتروني وذلك من خلال دراسة معدل الإثارة بواسطة إلكترون التصادم للبلازما الساخنة وتطبيقه على بعض الذرات انطلاقاً من التعرف على مختلف الآليات الذرية الأساسية التي تحدث في البلازما من بينها عملية الإثارة بالتصادم الإلكتروني التي هي من أهم النماذج التصادمية الإشعاعية الذرية. تم حساب معدل الإثارة بواسطة برنامج حساب عددي بدلالة كل من المقاطع الفعالة المتحصل عليها بواسطة الحساب العددي كدالة لقوة التصادم من حيث المعادلات الملائمة لمختلف أشكال قوى التصادم وتوزيع الطاقة الماكسويلي لذرتي الكربون و البريليوم.

الكلمات المفتاحية: دوال التوزيع ، المقاطع الفعالة ، معدلات الإثارة داخل البلازما، قوة التصادم

Summary:

This work aims to calculate the excitation rates by electron collision by studying the excitation rate by the collision electron of a hot plasma and applying it to certain atoms based on the identification of the different atomic mechanisms basic phenomena that occur in plasma, including the process of excitation by electron collision, which is one of the most important collision models. The excitation rate was calculated using a numerical calculation program based on each of the cross sections obtained by numerical calculation as a function of the collision force according to the appropriate equations for the different forms of collision forces and the Maxwellian energy distribution of carbon and beryllium.

Keywords: Distribution functions, Cross sections, Ionization rate in plasmas, collision force.

Résumé:

Ce travail vise à calculer les taux d'excitation par collision électronique en étudiant le taux d'excitation par l'électron de collision d'un plasma chaud et en l'appliquant à certains atomes en se basant sur l'identification des différents mécanismes atomiques de base qui se produisent dans le plasma, y compris le processus d'excitation par collision électronique, qui est l'un des modèles de collision les plus importants. Le taux d'excitation a été calculé à l'aide d'un programme de calcul numérique en fonction de chacune des sections efficaces obtenues par calcul numérique en fonction de la force de collision en fonction des équations appropriées pour les différentes formes de forces de collision et la distribution d'énergie maxwellienne du carbone et de béryllium.

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