

رقم الترتيب:.....
الرقم التسلسلي:.....

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي



كلية العلوم الدقيقة
قسم الفيزياء
مذكرة تخرج لنيل شهادة
ماستر أكاديمي في الفيزياء
تخصص: فيزياء تطبيقية إشعاع و طاقة
من إعداد الطلبة: عباسي زينب
غيممة امنة

تحت عنوان:

التصادمات المرنة وغير المرنة و حساب سعة مؤثر التصادم الإلكتروني والتطبيق على أيون الليثيوم Li^{+2} في البلازما

نوقشت يوم: 2022/06/15

أمام اللجنة المكونة من :

رئيسا	جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي	أستاذ محاضر ب	بكار الضاوية
مؤطرا	جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي	أستاذ محاضر ب	عسكري سهيلة
ممتحنا	جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي	أستاذ محاضر أ	ديلمي سامية

السنة الجامعية 2022/2021

إهداء

إلى من علمني العطاء دون إنتظار
إلى من أحمل اسمه بكل إفتخار
إلى من تحمل وكد من أجل مستقبلي
إليك مصدر همتي -أبي الغالي-

إلى من أوصى بها الرحمن
إلى من منحتني العون والدفء والحنان
إلى من كان دعاؤها لي سرا وجهرا دعما وسندا لي
إليكي شمعتي المضيئة -أمي الغالية-

إلى من حبه يجري في عروقي ويتهج عند ذكره فؤادي
إلى مشاطري أفراحي وأحزاني
إليك رياحين حياتي -أخي محمد الأمين-

إلى سندي ورفيق دربي عيني الثالثة
قدم لي التشجيع للمواصلة -إبراهيم-

إلى من لم يشعروني يوما أنني أمشي على عجلات أربع إليك إنهن -أخواتي الغاليات - والأروع

إلى من ضاقت السطور عن ذكرهم فوسعهم قلبي ... إلكن يا من لاتفارقن الوجدان
-صديقتاتي-

إهداء

إلى من كساني رداء الخلق وحلّة الأدب
إلى من تعب وسهر الليالي ليقدّم لي السعادة
إلى من شجّعني ودفعني إلى درب الحياة
إلى رمز التضحية (أبي الغالي)

إلى الريحانة والوردة التي تعانق نفسي بأريجها الدائم
إلى من تراهن على صحتها في سبيل سعادتني ونجاحي
إلى الشمعة التي تحترق لتتبرق لتتبرق دربي
إلى رمز الحنان (أمي الغالية)

إلى بسمتي ومنار بهجتي إلى من هم سندي وعزوتي (إخوتي)

إلى من هم وطني وملجئي إلى من تعرّعت وكبرت بينهم (عائلي الكريمة)

إلى من جمعني بهم القدر وفرقتني عنهم الظروف ... إلى من أمضيت معهم أجمل الأوقات ...
إلى جواهر قلبي ورفيقات دربي (صديقاتي)

شكر و عرفان

الحمد لله حمدا يليق بجلال وجهه وعظيم سلطانه على توفيقه لنا على إتمام هذا العمل المتواضع،
والصلاة والسلام على صفوة الخلق أجمعين نبينا محمد،
وعلى آله وصحبه، ومن سار على نهجه... ومن اقتدى بسنته إلى يوم الدين.

نتقدم ببالح الشكر الجزيل والعرفان الجميل إلى التي أنارتنا بإشرافها على هذه المذكرة
الأستاذة الفاضلة حبيبتنا و مرشدتنا "**عسكري سهيلة**"، وعلى ماقدمته لنا من نصح وإرشاد
وتوجيه
ومتابعة مكثفة طوال فترة إعدادها دون كلل أو ملل، فجزاها الله كل الخير وجعلها في خدمة
العلم والوطن.

كما أن الشكر موصول للأستاذة الكرام أعضاء لجنة المناقشة الأستاذ "**بكار الضاوية**" رئيسا،
والأستاذة "**ديلي سامية**" مناقشا لتفضلهما بقبول مناقشة هذه المذكرة
ونأمل أن تكون ملاحظتهما القيمة نبراسا لنا لكي نرقى بها إلى أرفع الدرجات العلمية.

كما نتقدم بأسمى عبارات التقدير والامتنان إلى الأستاذ الفاضل "**بسر الزوير**" والأستاذ الكريم
"**مفتاح محمد الطيب**" لما قدمه لنا من مساعدة
ونصائح قيمة، كما نشكره على سعة صبره معنا في كل ما احتجناه لإنجاز هذه المذكرة.

وفي هذا المقام لا يمكن أن ننسى شكر أساتذة قسم الفيزياء كل باسمه، ولكل من قدم لنا يد
العون من أساتذة وأهل وأصدقاء ولو بكلمة طيبة.

وإلى كل من سقط من قلبنا سهوا.

الفهرس

i	إهداء
ii	إهداء
iii	شكر و عرفان
vii	قائمة الأشكال
vii	قائمة الجداول
ix	قائمة الرموز
1	المقدمة العامة
4	1 عموميات عن البلازما
4	1.1 مقدمة
5	2.1 التعريف الفيزيائي للبلازما
5	3.1 ماهية البلازما
6	4.1 تواجد البلازما
6	5.1 وسائط البلازما
6	1.5.1 وسيط الترابط
7	2.5.1 وسيط الانحلال
7	3.5.1 تقارب البلازما
7	4.5.1 حجم التفاعلات في البلازما
7	5.5.1 تردد البلازما
8	6.1 المقاربات المستخدمة لوصف البلازما
8	7.1 التصادم في البلازما
9	8.1 أنواع التصادم
9	1.8.1 النوع الأول
9	2.8.1 النوع الثاني
9	1.2.8.1 تصادم جسمين
10	2.2.8.1 التصادم مع الجسيمات المتعادلة

10	3.2.8.1 التصادم مع الجسيمات المشحونة
11	9.1 ظاهرة التشتت
12	10.1 مقطع الفعال للتصادم
12	11.1 دراسة نموذج التصادم
13	1.11.1 مقطع التصادم عن قرب
14	2.11.1 مقطع التصادم عن بعد
14	12.1 الخلاصة

15

المراجع

17	2 التصادمات المرنة وغير المرنة
17	1.2 مقدمة
18	2.2 التفاعل المتبادل بين الجسيمات المشحونة والمادة
18	1.2.2 إنتقال الطاقة بين الجسيمات المشحونة
19	3.2 التفاعل المتبادل بين الإلكترونات والمادة
19	1.3.2 إنتقال الطاقة بين الإلكترون والمادة
20	2.3.2 فقد الطاقة بالتصادمات غير المرنة
20	4.2 التصادم
21	1.4.2 قوانين الحفظ
22	5.2 تصادم المرن
22	1.5.2 الحفاظ على الطاقة الحركية
23	6.2 الدراسة في مرجع مركز المسافات المتساوية للجلمة
24	7.2 دراسة المرجع R
26	8.2 التصادم المباشر
28	9.2 تصادم غير المرن
28	1.9.2 تبديد الطاقة الحركية
29	10.2 تصادم لين تام
29	11.2 التشتت
30	12.2 كيفية المعالجة للتصادم في البلازما
30	1.12.2 تقريب التصادم
30	2.12.2 تقريب شبه ساكن
31	13.2 طاقات كمون التفاعل
32	14.2 حساب سعة مؤثر التصادم الإلكتروني
32	1.14.2 مؤثر التصادم الإلكتروني
34	2.14.2 طاقة كمون التفاعل داتش
36	3.14.2 طاقة كمون التفاعل داتش المحجب
37	4.14.2 طاقة كمون التفاعل داتش الفعال
37	15.2 حساب خط الطيف ليمان $Ly - \alpha$

38 16.2 الخلاصة

39 المراجع

40 3 تحليل النتائج والتطبيق على طيف ليمان α لـ Li^{+2}

40 1.3 مقدمة

40 2.3 تأثير المقادير الفيزيائية على سعة مؤثر التصادم الإلكتروني

40 1.2.3 الكثافة الإلكترونية

41 2.2.3 درجة الحرارة

42 3.2.3 العدد الشحني Z

43 3.3 خط ليمان α لـ Li^{+2}

44 4.3 مقارنة النتائج

1.4.3 مقارنة تغيرات سعة مؤثر التصادم الإلكتروني بدلالة الكثافة الإلكترونية

44 لعملنا وعمل غزال أمال

2.4.3 مقارنة تغيرات سعة مؤثر التصادم الإلكتروني بدلالة درجة الحرارة

45 لعملنا وعمل غزال أمال

3.4.3 مقارنة تغيرات سعة مؤثر التصادم الإلكتروني بدلالة العدد الشحني

46 لعملنا وعمل غزال أمال

47 5.3 مقارنة خط ليمان α لـ Li^{+2} لعملنا وعمل غزال أمال

48 6.3 الخلاصة

49 الخلاصة العامة

50 الملخص

قائمة الأشكال

5	الأطوار الانتقالية للمادة بترتيب المتزايد لدرجة الحرارة [6].	1.1
6	يوضح مختلف أشكال البلازما [7].	2.1
11	حجب ديبياي للشحنة الاختبار q_t في البلازما [7].	3.1
11	رسم تخطيطي لآلية التشتت [16].	4.1
12	رسم تخطيطي مبسط لتوضيح مفهوم المقطع الفعال [17].	5.1
13	انحراف بمقدار 90° [18].	6.1
	عملية التصادم عن بعد وهي مؤلفة من عدد من تصادمات صغيرة وانحرافات	7.1
14	مجموعها يساري أو يفوق 90° [18].	
27	تصادم المرن وحيد بعد [10].	1.2
27	تصادم المرن على محورين Ox و Oy [10].	2.2
29	تصادم غير المرن وحيد بعد [10].	3.2
29	تصادم غير المرن على محورين Ox و Oy [10].	4.2
31	أيون ذو شحنة Z_e مغمور في البلازما [11].	5.2
41	تغيرات سعة مؤثر التصادم الإلكتروني بدلالة الكثافة الإلكترونية.	1.3
42	تغيرات سعة مؤثر التصادم الإلكتروني بدلالة درجة الحرارة.	2.3
43	تغيرات سعة مؤثر التصادم الإلكتروني بدلالة العدد الشحني.	3.3
44	يوضح خط الطيف ليمان α لأيون الليثيوم Li^{+2} .	4.3
	تغيرات سعة مؤثر التصادم الإلكتروني بدلالة الكثافة الإلكترونية لعملنا وعمل	5.3
45	غزال آمال.	
	تغيرات سعة مؤثر التصادم الإلكتروني بدلالة درجة الحرارة لعملنا وعمل	6.3
45	غزال آمال.	
	تغيرات سعة مؤثر التصادم الإلكتروني بدلالة العدد الشحني لعملنا وعمل	7.3
47	غزال آمال.	
48	خط الطيف ليمان α لأيون الليثيوم Li^{+2} لعملنا ولعمل آخر.	8.3

قائمة الجداول

44	1.3	المقارنة بين عملنا وعمل غزال أمال عند الكثافة الإلكترونية $N_e = 7.10^{19}$ لكل من طاقات الكمون الثلاث.
46	2.3	يوضح المقارنة بين عملنا وعمل غزال أمال عند درجة الحرارة $T = 5.5.10^5$ لكل من طاقات الكمون الثلاث.
46	3.3	المقارنة بين عملنا وعمل غزال أمال عند العدد الشحني $Z = 10$ لكل من طاقات الكمون الثلاث.
47	4.3	يوضح المقارنة بين عملنا وعمل غزال أمال عند القيمة العظمى للشدة.

قائمة الرموز

درجة الحرارة المطلقة ب (K).	T
شحنة الإلكترون.	e
السماحية.	ϵ_0
معامل التآين.	β
العدد الشحني.	Z
بعد التسديد للقذيفة.	b
وسيط الإنحلال.	Θ
جسيمات الهدف.	N_c
عدد الجسيمات في وحدة الحجم.	N
الكثافة العددية لذرات.	N_a
الكثافة العددية للإلكترونات.	N_e
الكثافة العددية للأيونات.	N_i
ثابت بلانك.	\hbar
ثابت بولتزمان.	K_B
وسيط الترابط للأيونات.	Γ_{ii}
وسيط الترابط بين الإلكترون الأيون.	Γ_{ei}
كتلة الإلكترون.	m_e
تردد الإلكترون في البلازما.	W_{pe}
سرعة الإلكترون.	v_e
وسيط الترابط للإلكترونات.	Γ_{ee}
زمن التصادم.	t_c
مدة التصادم.	Δt
نصف قطر الكرة الإلكترونية.	r_e
نصف قطر الكرة الأيونية.	r_i
المسافة بين الإلكترون والأيون.	r_{ei}
تواتر التصادم بين الإلكترونات والذرات.	ν_{ea}
تواتر التصادم بين الإلكترونات والأيونات.	ν_{ei}
إحتمال الانتقال.	P_{fi}
المقطع الفعال لتصادم.	σ
مقطع تصادم كولوم.	σ_c
مقطع التصادم بين الذرات.	σ_a
تدفق الجسيمات الواردة.	F_i
الطاقة الابتدائية.	E_i
الطاقة النهائية.	E_f
العدد الكمي للحالات المتاحة لكل الإلكترون.	A_q
عنصر مصفوفة الانتقال.	$ T_{fi} $

كُلّ الجسيمات قبل التصادم.	$m_{1,2}$
كُلّة الجسيمات بعد التصادم.	$m'_{1,2}$
سرعة الجسيمات قبل التصادم.	$v_{1,2}$
سرعة الجسيمات بعد التصادم.	$v'_{1,2}$

المقدمة العامة

يتميز العصر الحالي بهيمنة العلوم الحديثة على كل مظاهر الحياة وعلى مصير تقدم الأمم والشعوب ويعتبر علم فيزياء البلازما مفتاح تكنولوجيا هذا العصر سواء بلازما المواد أو بلازما الإلكترونيات وغيره....

أما مصطلح البلازما هو يوناني في الأصل ($\pi\lambda\alpha\sigma\mu\alpha$) فيعني شيء مكون وفق نظام معين فأستخدم للمرة الأولى من قبل لانغمنيور عام 1923 للدلالة على غاز مضيء يحوي إلكترونات و عدة أنواع من الأيونات وبعض الذرات المتعادلة، وفي وقت لاحق عام 1929 وضع العالمان لانغمنيور وتونكس وصفا للبلازما بأنها مائع شبه متعادل كهربائيا و مكون من جزيئات مشحونة وأخرى متعادلة [1].

ولدت فيزياء بلازما من دراسة الإنفراغات الغازية و تطورت بشكل كبير نظرا لإهتمام الباحثين بالتطبيقات الصناعية، في الحالة الطبيعية تشكل البلازما الحالة الرابعة للمادة و تتبع بالترتيب التصاعدي لدرجة الحرارة مع التوازن الديناميكي الحراري، إلى أن يحدث تأين كلي للغاز عن طريق الإصطدامات [2]، و لا يتم الوصول إلى هذا الوضع إلا عند درجة حرارة عالية جدا بحيث تكون طاقة التحريض الحراري من نفس عتبة درجة تأين الذرات متعادلة، بالمعنى الدقيق يصطلح على البلازما بأنها الغازات المتأينة تماما والمتعادلة كهربائيا، يتفاعل كل من الجسم المشحون في البلازما مع الجسيمات الأخرى بفضل المدى الطويل من تأثير القوة الكهربائية بين الجسيمات المشحونة المقصود بها قوة كولوم، تخلق هذه التفاعلات سلوكا جماعيا غير موجود في البلازما المتعادلة و تعطي خصائص فريدة.

نظرا لعدم وجود التجانس في توزيع الجسيمات المشحونة في البلازما التي تمثل جملة في نظام كهروستاتيكي فهذا يؤدي إلى حدوث ظاهرة التصادم بين جسيمين أو أكثر، حيث يتم تبادل كمات فيزيائية بين جسيماتها تكمن في الطاقة الكامنة والحركية لها، إن الحركة العشوائية للجسيمات في البلازما أو بالأحرى حركة الذرات والإلكترونات والأيونات نتيجة للتصادمات اللحظية لذلك في الحساب نعتمد على الإحصاء الكمي الكلاسيكي [3].

إن التصادمات الناتجة عن حركة الجسيمات في البلازما تقودنا إلى دراسة أنواع هذه التصادمات إن كانت مرنة أو غير مرنة و ما هي المقادير الفيزيائية المؤثرة والمتحكمة في هذه التصادمات؟ و عليه تتضمن هذه المذكرة ثلاث فصول:

ففي الفصل الأول سنقدم مدخلا حول عموميات البلازما، وذلك بإعطاء ومضة تاريخية عن البلازما، و تعاريفها الفيزيائية بحث، بالإضافة إلى ذكر تواجدها، و بعض المقادير المميزة لها، و مقاربات المستخدمة لوصفها، و في الأخير نتحدث بإيجاز عن أهم تفاعلات التي تحدث فيها و هي التصادم بين جسيماتها و دراسة نموذج التصادم الموافق لها.

في الفصل الثاني سنتطرق إلى دراسة التصادم على المستوى العياني الذي يحدث بين الأجسام مع الإهتمام بكليتها، و التصادم على المستوى الماكروسيوبي الذي يحدث بين الجسيمات الصغيرة حيث يمكن إهمال أوزانها بالمقارنة مع قوى الدفع الخطي التي تتعرض لها خلال التصادم و هذا مقبول علميا لأن أغلب التصادمات التي تهمننا تحدث بالإلكترونات و الأيونات بمعنى تغير المسار للجسيم عند تصادمه بجسيم آخر ثابت يمكن إعتبره هدفا. و قد تم الإهتمام بدراسة طرق إنتقال و فقد الطاقة عن طريق تفاعلاتها أو تصادمها، و ينقسم التصادم إلى نوعين رئيسيين النوع الأول يعرف التصادم المرن، أما النوع الثاني يعرف بالتصادم غير المرن يحدث بشكل تأين أو إثارة على مستوى الذرات أو على شكل تشوه أو تسخين على مستوى الأجسام المادية.

كما سندرس التصادم المرن و غير المرن في أبعاد التصادم و يتمثل في التصادم وحيد البعد أو بعدين حيث يكون التصادم في بعد واحد إذا بقيت الأجسام بعد التصادم على نفس المحور الذي كانت تتحرك عليه قبل التصادم، يكون التصادم في بعدين عندما لا تبقى الأجسام المتصادمة بعد التصادم على المحور الذي كانت تتحرك عليه قبل التصادم.

و في نهاية هذا الفصل سنقدم دراسة تحليلية لمختلف طاقات كمون التفاعل كولومب، طاقة كمون التفاعل لداتش، طاقة كمون التفاعل لداتش المحجب، طاقة كمون داتش الفعال، كما أننا سنتطرق إلى حساب سعة مؤثر التصادم الإلكتروني بالإستناد إلى الأعمال المنجزة سابقا.

أما الفصل الثالث سنعرض النتائج المتحصل عليها من البرمجة العددية لسعة مؤثر التصادم الإلكتروني و علاقته بالمقادير الفيزيائية، الكثافة الإلكترونية، درجة الحرارة و العدد الشحني، من أجل كل طاقة كمون تفاعل طاقة كولومب، طاقة كمون داتش و طاقة كمون داتش المحجب، حيث سيتم تقديم النتائج المتحصلة على شكل منحنيات، و كذا حساب خط لليمان $Li^{+2} - \alpha$ و مقارنة النتائج المتحصل عليها مع نتائج أخرى.

و في الأخير سيم تقديم خلاصة حول العمل المدروس لما قننا به و توصلنا إليه على شكل خلاصة عامة، مع بعض الآفاق و التي تبقى في إطار بحث من قبلنا و من قبل باحثين آخرين.

المراجع

- [1] أ.د. وليد مصطفى صهيوني، مقدمة في فيزياء البلازما، دار الفكر المعاصر سلطنة عمان -2006.
- [2] شبحي إسماعيل، حساب دوال توزيع الحقل توزيع الحقل الكهربائي ومشتقاته داخل البلازما، بإستخدام المحاكاة العددية مونت كارلو تطبيق طيف الهيليوم، رسالة دكتوراه، جامعة مونتوري- قسنطينة-2005.
- [3] مدخل خديجة، أهم النماذج لحساب دوال التوزيع الحقل الكهربائي الموضوعي في البلازما، ماستر أكاديمي، جامعة الوادي -2016.

الفصل 1

عموميات عن البلازما

1.1 مقدمة:

اكتشف العالم سير وليام كروكس *willamCrookes* في عام 1879 البلازما وأطلق عليها آنذاك المادة الإشعاعية وذلك لوصف القسم المتأين من الانفراغات الغازية، واكتشف العالم البريطاني جوزيف طومسون *JosephThomson* خصائص وطبيعة البلازما عام 1897 [1].

أما مصطلح البلازما في الأصل فيعني الشيء المكون وفق نظام معين، وقد استخدم للمرة الأولى من قبل لانغميور *Langmuir* عام 1923 للدلالة على غاز مضيء يحتوي على إلكترونات وعدة أنواع من الأيونات وبعض الذرات المعتدلة [2].

وفي وقت لاحق عام 1929 وضع العالمان لانغميور *Langmuir* وتونكس *Tonks* مصطلح البلازما للإشارة إلى الغاز المتأين الموجود في التفريغ، المكون من جزيئات مشحونة وأخرى معتدلة وهي تسلك سلوكا جماعيا [3].

يمكن وصف البلازما بأنها جملة إحصائية تحمل شحنات متحركة تسبب في نشوء تجمعات موضعية لشحنات موجبة أو سالبة والتي تؤدي بدورها إلى توليد مجالات كهربائية بين الجسيمات المشحونة ويمكننا إستنتاج مما سبق أن جزيئات البلازما تتبادل التأثير فيما بينها بفضل المدى الطويل وقوى التأثير هذه تسمى بقوى كولوم المؤثرة عن بعد، وهذه القوة هي السبب في الحركة الجماعية للبلازما والتي يمكن أن تحدد السلوك الجماعي بأنها الحركة التي لا تتعلق بالشروط الموضعية إنما تتعلق بحالة البلازما في المناطق البعيدة [4].

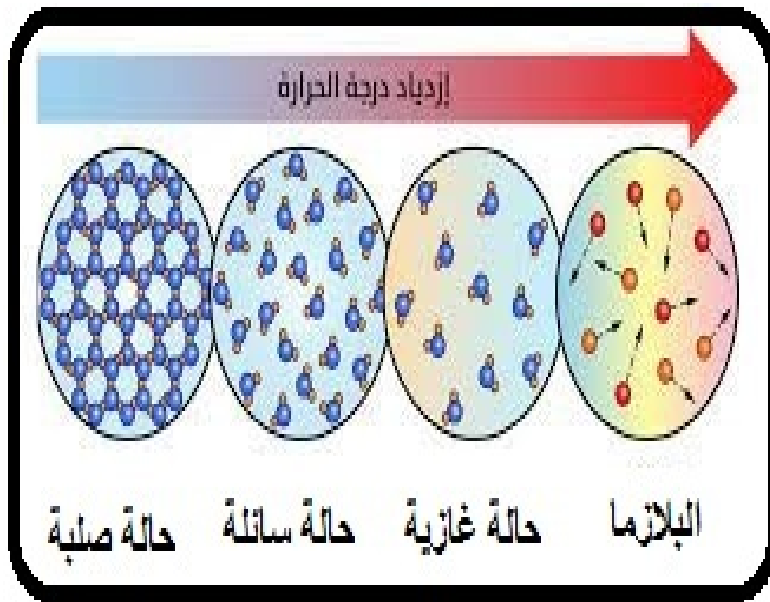
صنفت البلازما بأنها الحالة الرابعة للمادة تختلف عن حالاتها الثلاث الصلبة، السائلة وغازية تزداد طاقتها الحركية الى الحد الذي يؤدي إلى تصادمها مع بعضها البعض وإنفلاتها إلى إلكترونات وأيونات موجبة الشحنة [2].

2.1 التعريف الفيزيائي للبلازما:

- ليس كل غاز مشحون يشكل بلازما بل يصبح بلازما لو حقق المقتضيات التالية [5]:
- متعادل كهربائياً.
 - مستقر.
 - كثافة العددية هائلة.
 - تتحرك أجسامه في حقول بعضها البعض بلا قيد.
 - يبدي فعل جماعي.
- فاذا إجتمعت هذه الصفات في جملة من الشحنات قيل "حالتها بلازما".

3.1 ماهية البلازما:

هي حالة يمكن تمييزها عن باقي حالات المادة توصف بأنها غاز متأين تكون فيه إلكترونات حرة وغير مرتبطة بالذرة أو بالجزيء، فإذا كانت المادة متواجدة في الطبيعة في ثلاث حالات: صلبة، سائلة وغازية فإنه بالإمكان تصنيف البلازما على أنها الحالة الرابعة التي يمكن أن توجد عليها المادة [3].

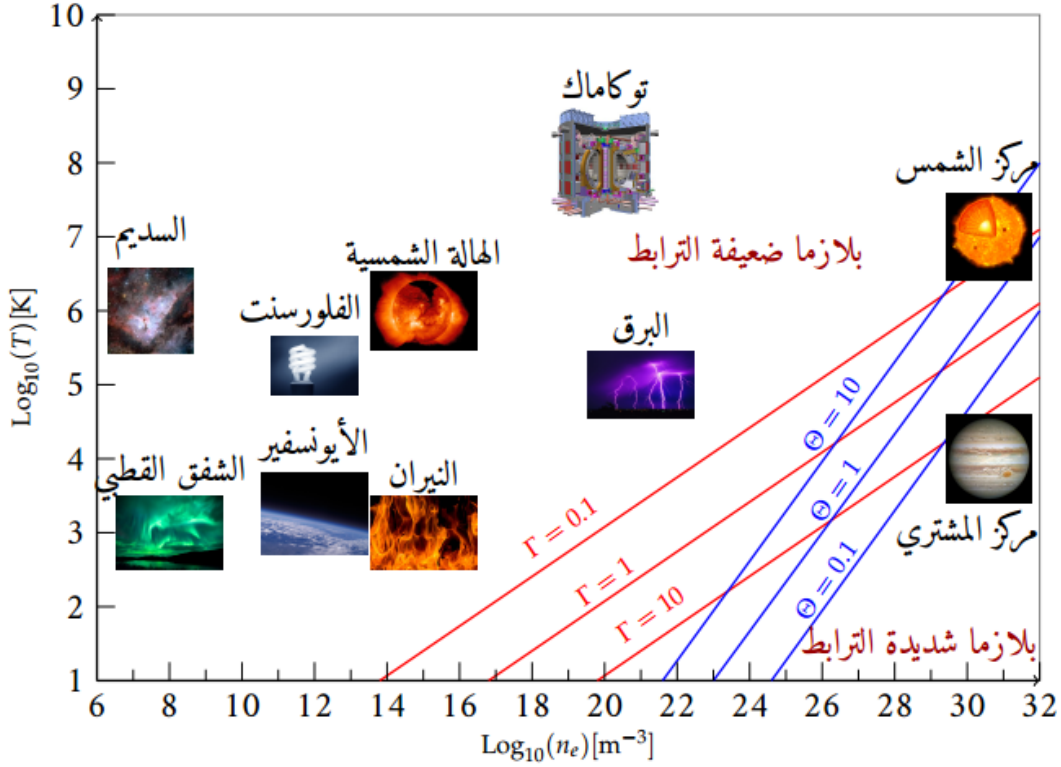


شكل 1.1: الأطوار الانتقالية للمادة بترتيب المتزايد لدرجة الحرارة [6].

يوضح الشكل (1.1) الأطوار الإنتقالية المختلفة للمادة عند رفع درجة الحرارة. عند درجات منخفضة تكون المادة في حالة الصلبة وبارتفاع الحرارة تتحول إلى السائلة وبارتفاع حرارة تتحول إلى الغازية، يم تحول الغاز إلى البلازما عند درجة حرارة عالية جداً أعلى من $50000K$ ما يعرف بالغاز المتأين [4].

4.1 تواجد البلازما:

يتشكل الكون من أنواع من البلازما طبيعية نذكر منها البلازما الشمسية المختلفة، وما بين الكواكب وباطن الكواكب وبلازما أرضية مختلفة، وبلازما النواقل، والبرق والفجر...، وهناك بلازما صناعية و بلازما المخابر [5].



شكل 2.1: يوضح مختلف أشكال البلازما [7].

5.1 وسائط البلازما:

1.5.1 وسيط الترابط:

يعرف هذا الوسيط على أنه النسبة بين متوسط الطاقة الكامنة للجسيم لتفاعله مع جسيم آخر والطاقة الحركية المتوسطة له، لذلك يعتبر مقياس لمدى ترابط جسيمات البلازما، عندما يكون أي أن تزواج (الترابط) شديد وهنا الطاقة الكامنة المتوسطة أكبر من الطاقة الحركية أما عندما يكون فإن للطاقة الحركية الدور الأكبر في وصف سلوك الجسيمات أي أن التزاوج بين هذه الجسيمات ضعيف حيث تتحرك الجسيمات بحرية كبيرة وبتصادمات قليلة ما يعني أن التأثير البيني بينها ضعيف، يقال عن البلازما أنها مثالية [8].

بالنسبة للإلكترونات:

$$\Gamma_{ee} = \frac{e^2}{K_B T r_e}$$

بالنسبة للأيونات:

$$\Gamma_{ii} = \frac{(ze)^2}{K_B T r_i}$$

أما بين الإلكترونات والأيونات:

$$\Gamma_{ei} = \frac{ze^2}{K_B T r_{ei}}$$

2.5.1 وسيط الإنحلال:

يعرف وسيط الإنحلال على أنه النسبة بين متوسط الطاقة الحركية على طاقة فيرمي [7].

$$\Theta = \frac{K_B T}{E_{fe}} \quad (1.1)$$

$$E_{fe} = \frac{\hbar^2 k_f^2}{2m_e} = \frac{(3\pi^2 N_e)^{2/3} \hbar^2}{2m_e} \quad (2.1)$$

3.5.1 تقارب البلازما:

ينبغي أن تكون الجسيمات المشحونة متقاربة لدرجة أن يؤثر كل جسيم على الكثير من الجسيمات القريبة بدلا من التفاعل مع أقرب الجسيمات فقط ندعو هذه الصفة "التأثير الجماعي" هي الصفة المميزة للبلازما، ويكون لتقارب البلازما تأثير اقوى كلما كانت أعداد الإلكترونات داخل المجال المؤثر والذي نقصد به كرة ديبياي الأفعال التي تأتي بداخلها نصف قطرها يسمى "طول ديبياي" [5].

4.5.1 حجم التفاعلات في البلازما:

إن نصف قطر ديبياي صغير بالمقارنة مع الحجم الطبيعي للبلازما الموجود في الكون وهذا يعني إن مقدار التفاعلات الواقعة في قلب كتلة البلازما لها أهمية كبيرة بالمقارنة مع تلك الواقعة على الحواف بالأخذ بعين الاعتبار تأثير الوسط المحيط بالبلازما عليها [5].

5.5.1 تردد البلازما:

إن للتفاعلات الجماعية دورا مهما في وجود الاهتزازات في البلازما، فعند انزياح جسيماتها المشحونة سلبا (الإلكترونات مثلا) من وضع توازنها، تصبح الشحنة الموجبة هي الغالبة مما يؤدي

إلى نشوء حقل داخلي يحاول إعادة إعادة هذه الجسيمات المشحونة و توازنها، ولكن هذه الجسيمات تتجاوز هذا الوضع، فيؤدي ذلك إلى حدوث اهتزازات في البلازما بتردد W_{pe} ، [8] يدعى التردد الإلكتروني يعطى بالعلاقة:

$$W_{pe} = \sqrt{\frac{N_e e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (3.1)$$

6.1 المقاربات المستخدمة لوصف البلازما:

لمعرفة أحوال البلازما نحتاج أن نكون على دراية بمتغيراتها العينية بطيئة التغير زمنيا و متيسرة القياس والتي تمثل في درجة الحرارة و عدد أجسامها في وحدة الحجم (N/V) و حجمها في كل لحظة (بوحد السنتيمتر مكعب) و ضغطها و ذلك بأخذ متوسطات هذه المتغيرات [5].
تمت دراسة المقاربات التي تمكن من معرفة سلوك الجسيمات البلازما وبالتالي معرفة أحوالها ودراستها حسب درجة تأينها و تعرف هذه الأخيرة على أنها النسبة بين كثافة جسيمات المشحونة (إلكترونات أيونات) والكثافة الكلية للبلازما، تم الإتفاق على تقسيمها حسب درجة التأين إلى ثلاث:

بلازما ضعيفة التأين : تتميز بمعامل تأين β يساوي جزءا من الواحد بالمائة، تتواجد البلازما ضعيفة التأين في الأيونوسفير.

بلازما متوسطة التأين : تتميز بمعامل تأين يساوي عددا من الوحدات بالمائة .

بلازما كاملة التأين: وتعرف أيضا بالبلازما الساخنة وتتميز بمعامل تأين β يقترب من 100 وتوجد عدة نماذج خاصة بالبلازما كاملة التأين كالشمس والنجوم الساخنة، هذه الحالة تكون عند درجات الحرارة العالية جدا [10].

7.1 التصادم في البلازما :

يعتبر التصادم بين الذرات أمرا شائعا في البلازما و التي تحتوي على نوعين إما التصادمات القريبة بين أزواج من الجسيمات المتعادلة أو بين أزواج من الجسيمات المشحونة يمكن أن تصف الاصطدامات اللحظية بين الجسيمات في البلازما ضعيفة التأين [11]. يمكن أن تصف تصادمات كولوم تشتت الجسيمات المشحونة على مسافة طول ديبياي [12]. يمكن تصنيف كلا النوعين إلى التصادمات المرنة وغير المرنة. على وجه التحديد نطلب التصادمات المرنة جسمين للإحتفاظ بهويتهما وحالات طاقتها بعد التصادمات يمكن ان تؤدي التصادمات غير المرنة إلى التأين أو الإثارة [13]. تعتبر الاصطدامات القريبة للبلازما ضعيفة التأين بدرجة التأين أقل بكثير من 1% لكن تصادمات الكولوم تعتبر للبلازما شديدة التأين بدرجة تأين أكبر من 1% [11]. الغازات

ضعيفة الترابط لها تطبيقات عملية موجودة في أقواس الضغط العالي والبلازما الغلاف الأيوني وبلازما المعالجة ومعظم تصريفات الغاز ذات التيار المنخفض [13]. تعد البلازما شديدة التأين شائعة في الكون مثل البلازما في الأجزاء الداخلية النجمية [14]، والبلازما الغلاف الجوي للشمس [15].

تنقسم البلازما إلى قسمين بلازما تصادمية وأخرى غير تصادمية حيث في البلازما غير تصادمية يكون حدوث التصادمات فيها نادرة جدا أو يمكن القول أنها تحدث بشكل غير مستمر وبالتالي يمكن إهمال أثارها على ديناميكية البلازما بينما البلازما التصادمية فإن التصادمات تحدث بشكل مستمر مما ينتج عنه تبادل كبير لكمية الحركة بين الجسيمات وبالتالي فهي تهيمن على سلوك البلازما [7].

8.1 أنواع التصادم :

1.8.1 النوع الأول:

هناك أجسام في الطبيعة تتصادم ولا يوجد تأثير متبادل بينها ما يعرف بـ "تصادم الكور الجاسية": مثل تصادم كرة بجدار أو تصادم سيارة بشيء أو تصادم كرة بكرة... ويظهر هذا النوع في الطبيعة بين جزيئات غاز وبين الأجسام الغير مشحونة وبين الذرات ... يتميز هذا التصادم بعدم وجود قوة بين الجسمين المتصادمين.

2.8.1 النوع الثاني:

هناك أجسام في الطبيعة تتصادم نتيجة التأثير المتبادل بينها مثل تصادم الأجسام المشحونة نختص بالذكر تصادم أيون بأيون وتصادم إلكترون بإلكترون وتصادم إلكترون بأيون وتصادم الأجسام بتأثيرات نووية وتصادم إشعاع كهرومغناطيسي بالشحنات الكهربائية ... هذا هو النوع الغالب في الطبيعة تصادم شحنتين بينهما قوة كولوم وهي المسيطرة على التفاعل.

1.2.8.1 تصادم جسمين:

تم عملية التصادم على النحو التالي يقترب الجسمان من بعضهما البعض فتزيد طاقة الكون وتقل الطاقة الحركية فيتبادلا كميات فيزيائية نوع الأول وبعد التصادم يحدث العكس يتباعد جسمان عن بعضهما البعض فتقل طاقة الكون وتزيد الطاقة الحركية فيقال إن الجسمين أجريا تصادم فتبادلا طاقة حركة ودفع خطي ودفع زاوي [5].

2.2.8.1 التصادم مع الجسيمات المتعادلة :

تعمل الذرات أو الجزيئات في البلازما المؤينة جزئياً على إعاقة حركة الجسيمات المشحونة (إلكترونات والأيونات) وذلك من خلال تواجدها كتكتل ثقيلة معيقة لها فعندما يصطدم إلكترون أو أيون بذرة فإنه يمكن أن يفقد جزئياً أو كلياً من كمية الحركة المفقودة بدلالة المقطع الفعال لتصادم σ للذرة الذي يعبر عن احتمالية التفاعل بين جسيمين. يتناسب تواتر التصادم بين الإلكترونات والذرات مع الكثافة العددية للذرات ومتوسط سرعة الإلكترونات وكذا المقطع الفعال لتصادم حيث يكتب التواتر كما يلي :

$$\nu_{ea} = N_a \sigma_a \langle \sigma \rangle \quad (4.1)$$

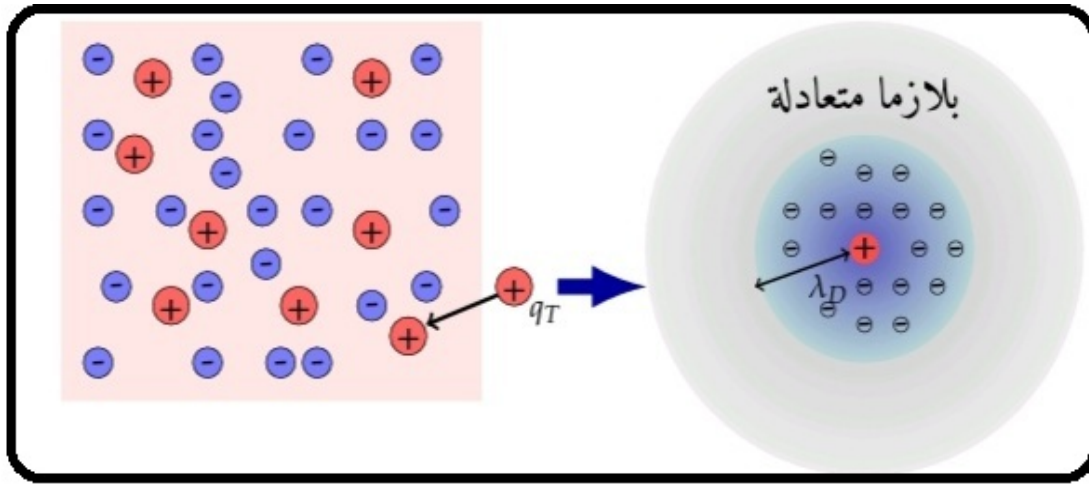
حيث ν_{ea} : تواتر التصادم بين الإلكترونات والذرات.
 N_a : الكثافة العددية للذرات.
 σ : المقطع الفعال لتصادم.
 σ_a : مقطع التصادم بين الذرات.

3.2.8.1 التصادم مع الجسيمات المشحونة :

إن التصادمات التي تحدث في البلازما المؤينة كلياً تكون بين الجسيمات المشحونة والتي تتفاعل عن طريق حقول كولوم الكهربائية وذلك بسبب تأثير قوى كولوم بعيدة المدى، وعادة ما تكون تصادمات كولوم ضعيفة ونادراً ما ينتج عنها انحرافات كبيرة ويرجع ذلك إلى أن جسيم مشحون يتفاعل مع العديد من الجسيمات البعيدة في آن واحد في حين التصادمات القريبة التي يكون فيها المسار يتغير فيها بشكل كبير أقل حدوثاً، وتتم الانحرافات عندما تقترب الجسيمات من بعضها البعض عند مسافات أكبر بكثير من نصف القطر الذري. يمكن كتابة تواتر تصادم كولوم في البلازما المؤينة بالكامل كما يلي:

$$\nu_{ei} = N_e \sigma_c \langle \nu_e \rangle \quad (5.1)$$

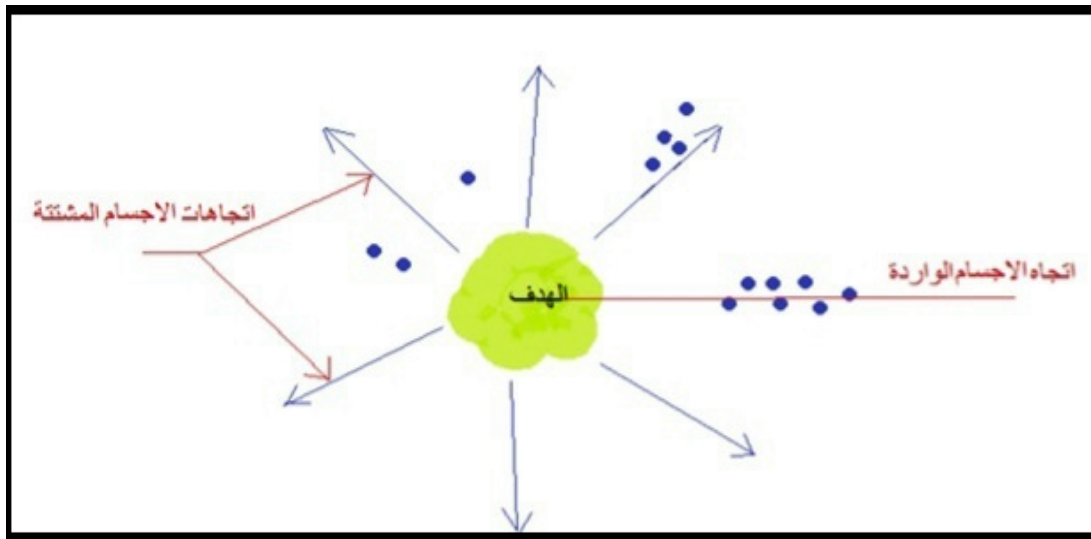
حيث ν_{ei} : تواتر التصادم بين الإلكترونات والأيونات.
 σ_c : مقطع تصادم كولوم.
 ν_e : سرعة الإلكترون.
البلازما المؤينة كلياً تكون $N_e = N_i$ بسبب التعادل الشحني [7].



شكل 3.1: حجب ديبي للشحنة الاختبار q_t في البلازما [7].

9.1 ظاهرة التشتت:

تعتبر ظاهرة التشتت من أهم الظواهر الفيزيائية التي تحدث في الطبيعة فزرة السماء وانتظام درجة الحرارة في الجو كلها أحداث لا تفسرها إلا مسألة التشتت. عندما ترد الأجسام الواردة مركزة في اتجاه واحد على الهدف ثم تخرج متفرقة ومغيرة بعض كمياتها الفيزيائية نقول أن الأجسام الواردة قد تشتت [16].



شكل 4.1: رسم تخطيطي لآلية التشتت [16].

10.1 مقطع الفعال للتصادم :

يعد المقطع الفعال من أهم الكميات التي تدرس عمليات التصادم. نعتبر في اتجاه الموازي للمحور oz تدفق الجسيمات الواردة F_i التي تصدم بجسيمات الهدف N_c كما هو موضح في الشكل (5.1) إذا كان N هو عدد الجسيمات المبعثرة خلال وحدة الزمن فإنه على ذلك الأساس يتم تعريف المقطع الفعال على أنه النسبة الجسيمات التي خضعت لتشتت بواسطة الهدف (الذرة، الجزيء، أيون) على عدد الجسيمات الساقطة ويتم تعبير عن المقطع الفعال بالمعادلة التالية:

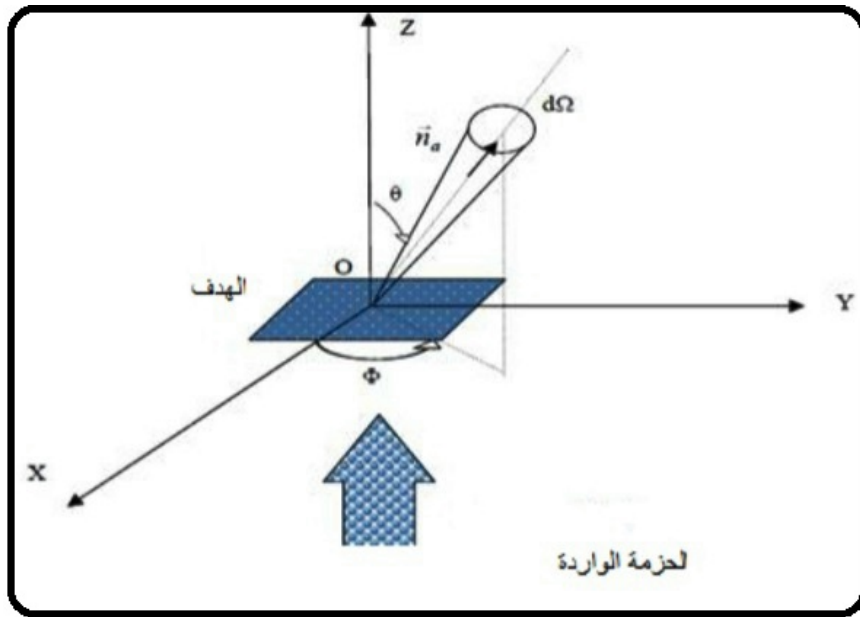
$$\sigma = \frac{N}{N_c F_i} \quad (6.1)$$

تعتبر المقاطع الفعالة عبارة عن مساحة وحدتها m^2 ، وهي ترتبط باحتمال الانتقال من الحالة الابتدائية إلى الحالة النهائية خلال وحدة الزمن بالعلاقة التالية :

$$\sigma_{i \rightarrow f} = \frac{P_{if}}{F} \quad (7.1)$$

يرتبط احتمال الانتقال P_{if} بالطاقة الابتدائية E_i والطاقة النهائية E_f تعطى العلاقة التالية [17]:

$$p_{if} = \frac{(2\pi)^4}{K_i} \delta(E_i - E_f) \delta \quad (8.1)$$



شكل 5.1: رسم تخطيطي مبسط لتوضيح مفهوم المقطع الفعال [17].

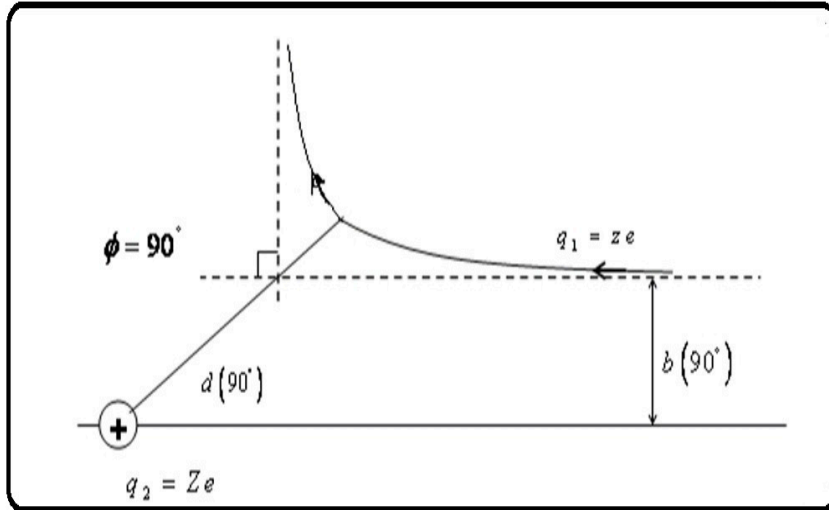
11.1 دراسة نموذج التصادم:

إن معالجة التصادم في المسائل الفيزيائية يقودنا إلى حسابات لا نهائية و نتائج غير واضحة لذلك ينبغي اللجوء إلى نموذج يمكننا من الوصول إلى النتائج المهمة في عملية التصادم إلى أسلوب تقريبي

معبر عن التصادم في البلازما. يعتمد على التصادم الذي يقضي بزوايا انحراف تساوي أو تفوق 90° درجة نوعان من التصادم يقضيان إلى ذلك.

1.11.1 مقطع التصادم عن قرب:

في إطار دراسة ظاهرة التصادم في البلازما نعين مقطع تصادم أجسامها المعروف بمقطع التصادم عن قرب، وهو المقطع الذي يصف تشتت الأجسام لما تقترب من بعضها البعض فتشتت بزوايا كبيرة تساوي أو تفوق 90° درجة. فسمي بمقطع التصادم عن قرب أو مقطع التصادم قصير المدى وذلك لأنه نتج عن قوة شديدة قصيرة المدى إذا اقترب جسمان من بعضهما اقتربا شديدا فترتب عليه انحراف كبير. وهو المقطع التقريبي لأنه يشمل كل التصادمات التي تحدث بين أجسام البلازما.



شكل 6.1: انحراف بمقدار 90° [18]

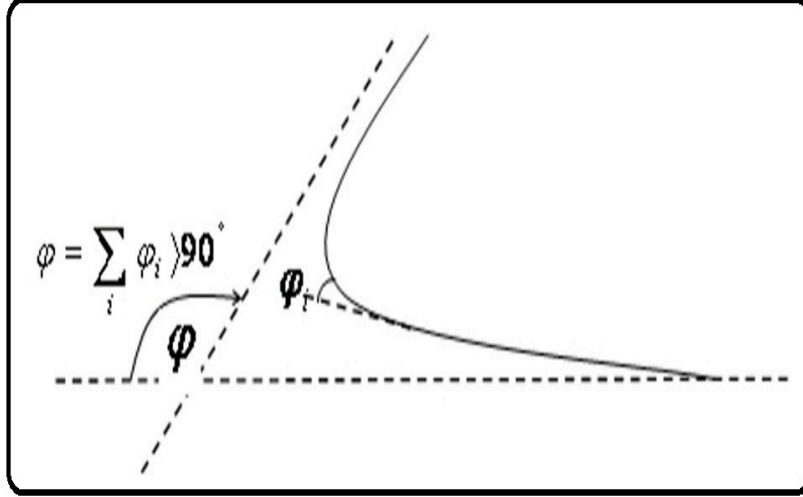
الجدير بالذكر أن كافة القذائف الواردة على بعد تسديد أي المسافة التي تفصل بين الهدف و القذيفة تكون أقل (b التي توافق 90°) تنحرف بزوايا أقل من 90° تبادل كميات فيزيائية هامة خلال التصادم واحد فتوافق هذه الانحرافات وتتميز بأبعاد تسديد صغيرة. يمكننا تمييز تصادم عن قرب بمقطع التصادم عن قرب بالعلاقة:

$$\sigma_{cc} = \pi b_{\pi/2}^2 \quad (9.1)$$

حيث b بعد التسديد الموافق لانحراف قدره 90°

2.11.1 مقطع التصادم عن بعد:

هناك أجسام كثيرة شحنتها $-q$ وكتلتها m أبعاد تسديدها أكبر من b التي توافق 90° وتتصادم مع Q وهي الأغلب لكن زوايا انحرافها أقل من 90° يتميز التصادم عن بعد انحرافات صغيرة كثيرة، لكن كثرتها تصبح مهمة بل أكثر أهمية من التصادم عن قرب فتلقي القديفة انحرافات [5].



شكل 7.1: عملية التصادم عن بعد وهي مؤلفة من عدد من تصادمات صغيرة وانحرافات مجموعها يساري أو يفوق 90° [18].

12.1 الخلاصة :

تم التطرق في هذا الفصل إلى عموميات حول البلازما وقدمنا ومضة تاريخية مع بعض التعاريف لها ومقادير الفيزيائية المميزة ومختلف أشكالها، وتم تسليط الضوء على أهم الظواهر التي تحدث فيها وهي التصادمات التي تحدث في البلازما بين جسيماتها المشحونة والمتعادلة وتبادل فيما بينهم كمات فيزيائية فيما تمثل الدفع الزاوي والطاقة الحركية، ودراسة نموذج تصادمهما.

المراجع

- [1] B.Held physique des plasms froid Mossonparis 1994.
- [2] Philippe savoini, Introduction à la physique des plasms, 2009.
- [3] أ.د. وليد مصطفى صهيوني، مقدمة في فيزياء البلازما، دار الفكر المعاصر سلطنة عمان 2006.
- [4] Assaf iman, Effet des condition aux limites sur la programmation du streamer positif dans l'azote, Université des sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2015/2016.
- [5] محاضرات أ.د. إبراهيم سعد الله، في فيزياء البلازما الأولى ماستر، جامعة الوادي 2019.
- [6] <https://matter1234.blogspot.com> موقع تصفح.
- [7] عمار سومية، دراسة خصائص النقل في البلازما: الناقلية الكهربائية ضمن تقريب زمن الإسترخاء *RTA*، ماستر أكاديمي، جامعة الوادي 2019.
- [8] سهيلة عسكري، حساب دوال التوزيع ومشتقات الحقول الموضعية وتطبيق على طيف الهيليوم، رسالة ماجستير، المركز الجامعي بالوادي 2011.
- [9] عباسة حكيمة، دوال الترابط في البلازما، رسالة دكتوراه، جامعة قاصدي مرباح ورقلة 2018.
- [10] غزال آمال، حساب مؤثر التصادم الإلكتروني في البلازما: تطبيق على أشباه الهيدروجين، رسالة دكتوراه، جامعة قاصدي مرباح ورقلة 2018.
- [11] H. Alven, The physique des plasms, Oxford University Press, 1963.
- [12] Jeffrey and P.Freiberg, plasma Physics and Fusion Energy, Cambridge Press, 2007.
- [13] R.J. Goldston, P. H. Rutherford, Introduction to plasms Physics, CRC Press, 1995.
- [14] K. Takahashi, K. Yokoi, Nucl. Physics 404(1983) 51.
- [15] R. W Walsh, Science 307 (2005) 51.

[16] بكار الضاوية، تشتت الأضواء بالذرات والجزيئات، رسالة ماجستير، المركز الجامعي بالوادي -2012

[17] ASKRI Souhaila, Effets d'Ionisation de la Molécule de Méthane par Impact de proton dans les plasms, Docteur en sciences physique, 2021.

[18] محمودي منال، دراسة التعريض الإلكتروني في حالة القيم الصغيرة لوسيط الصدم في البلازما، ماستر أكاديمي، جامعة قاصدي مرباح ورقلة -2013.

الفصل 2

التصادمات المرنة وغير المرنة

1.2 مقدمة:

التفاعل المتبادل بين الإشعاعات والمادة، والمقصود بكلمة الإشعاعات هنا هو جميع أنواع الاشعاعات (جسيمات ألفا والديتريونات والبروتونات) والجسيمات المشحونة الخفيفة كالألكترونات، البوزيترونات، إشعاعات جاما، الأشعة السينية والنيوترونات. ولا يتم التطرق في هذا الفصل للتفاعلات النووية التي تحدثها الإشعاعات في المادة ولكنه يقتصر على دراسة التأثير المجهرى (الماكروسكوبى) المتبادل بين الإشعاعات و المادة مثل التصادمات. ويعود اختلاف آليات التصادم (المرن وغير المرن) واختلاف طاقتها إلى دراسة كل نوع على حدة [1].

إن أهمية معرفة دراسة التصادمات التي تحدث بين الأجسام تكمن في معرفة سلوك التفاعل بين الجسيمات و بتخصيص الذكر المشحونة منها، إن الجسم أثناء دخوله الوسط المادي إما يتفاعل مع الإلكترونات الذرية أو مع نواة الذرة من خلال تأثير الجسم بقوة كولوم ومع أن كل إلكترون يعترض الجسم يؤدي إلى خسارة في طاقة الجسم الحركية بمقدار لا يتجاوز بضعة eV ، فإن تأين وتهيج الذرات يسبب أكبر مقدار للخسارة في طاقة الجسم في الطاقة لكل وحدة طول من مسار الجسم، إن خسارة في الطاقة الحركية جراء اعتراض النوى الذرات للجسيم تكون اكبر بكثير من اعتراض الذرات نفسها، لكن احتمال تصادم الجسم بنوى الذرات هو قليل جدا بالمقارنة مع احتمال تصادمه بالذرات، الأخرى لأن الذرة أكبر 10^8 مرة من نواة الذرة إن احتمالية التصادم (التفاعل) يتناسب طرذا مع المساحة [2]، أي إن التفاعل مع النواة يحدث مرة واحدة لكل 100 مليون تفاعل مع الذرة لذلك يعتبر هذا التفاعل مهملا ويعتبر كوسيلة من وسائل فقد الطاقة، لذلك ستركز دراستنا على تفاعلات الجسم المشحون التي تقودنا إلى معرفة التصادمات مع الإلكترونات الذرية، لكن عند زيادة الطاقة الحركية للجسيمية تزداد احتمالية تصادمها مع النواة [3].

2.2 التفاعل المتبادل بين الجسيمات المشحونة والمادة:

1.2.2 إنتقال الطاقة بين الجسيمات المشحونة:

عند سقوط الجسيمات المشحونة الثقيلة كجسيمات ألفا وديتريونات والبروتونات وغيرها على المادة تنتقل طاقة هذه الجسيمات إلى المادة بالتدرج إلى أن تتوقف الجسيمات الساقطة، ويتم هذا الإنتقال أساسا عن طريق التصادمات غير المرنة مع إلكترونات ذرات المادة التي تمر خلالها الجسيمات، وينتج عن هذه التصادمات المشحونة الساقطة والإلكترونات إثارة لهذه الذرات (أي إنتقال أحد إلكترونات الذرة من مداره إلى مدار آخر ذي طاقة أعلى) أو تأينها (أي انفصال الإلكترون عن الذرة تماما)، وهكذا يحدث تأين ابتدائي لذرات المادة وهو ذلك التأين الناتج عن الجسيمات الثقيلة ذاتها ويمثل هذا التأين الابتدائي حوالي 30% من إجمالي التأين الناتج عن توقف الجسم المشحون في المادة، أما النسبة الباقية هي حوالي 70% من إجمالي التأين فتعرف بالتأين الثانوي وهو الناتج عن الإلكترونات التأين الابتدائي التي تنطلق بسرعات عالية نسبيا، فتؤدي بدورها إلى تأين المادة وتسمى الإلكترونات الثانوية باسم إلكترونات دلتا ($\delta - electrons$)، وهكذا تفقد الجسيمات المشحونة الثقيلة طاقتها بالتدرج مع تغلغلها داخل المادة وبالتالي تقل سرعاتها إلى أن تصبح قريبة من سرعة إلكترونات المدار K لذرة الجسم الساقط، يحدث عندئذ تبادل بين الإلكترونات المدارية لذرات المادة وإلكترونات التأين الناتجة عن الجسم الساقط، قد يصل عدد هذه التبادلات إلى 10^3 مرة قبل أن يتحول الجسم الساقط الى ذرة متعادلة، وهكذا يتكون نتيجة لتأين ذرة الواحدة زوج إلكتروني-أيوني [4].

ويمكن قياس العدد الكلي n للأزواج الإلكترونية-أيونية الناتجة عن كل من التأين الابتدائي والثانوي، وذلك باستخدام الطرق التجريبية المختلفة وبمعرفة كل من طاقة الجسيمات المشحونة الساقطة E و عدد الأزواج n فإنه يمكن حساب القيمة المتوسطة \bar{W} للطاقة اللازمة لتكوين زوج إلكتروني-أيوني واحد من العلاقة التالية:

$$\bar{W} = \frac{E}{n} \quad (1.2)$$

لقد وجد ان قيمة \bar{W} اللازمة لتكوين زوج تعتمد اعتمادا واضحا على نوع المادة، ولكنها لا تعتمد على طاقة الجسيمات الساقطة أو على طبيعة هذه الجسيمات، كما وجد ان قيمة W تكون صغيرة جدا تساوي $35eV$ بالنسبة للهواء في الظروف المعيارية من الضغط ودرجة الحرارة [5]، وهذا يعني ان الجسيمات الساقطة تتعرض لعدد كبير للغاية من التصادمات قبل ان تتوقف، وعند فقد هذه الكمية الصغيرة من طاقة في كل تصادم فإن الجسيمات الساقطة لا تغير اتجاه مسارها، هذا هو السبب في أن مسار الجسيمات المشحونة الثقيلة في المادة يكون عبارة عن خط مستقيم،

كذلك يلاحظ ان طول المسار للجسيمات المشحونة الثقيلة يعتمد على طاقة هذه الجسيمات ونوعها ونوع المادة، تجدر الإشارة إلى أن الجسيمات المشحونة الساقطة تتفاعل مع نوى المادة التي تمر خلالها إلى أن هذا التفاعل يعتبر مهما كوسيلة من وسائل فقد الطاقة حيث أن احتمال التصادم مع النوى أقل بكثير من احتمال التصادم مع الإلكترونات [3].

3.2 التفاعل المتبادل بين الإلكترونات والمادة :

1.3.2 إنتقال الطاقة بين الإلكترون والمادة:

عندما تكون طاقة الإلكترونات الساقطة اقل من $0.5Mev$ تفقد هذه الإلكترونات طاقتها عن طريق إثارة الإلكترونات المدارية لذرات المادة أو تأيين هذه الذرات بنفس أسلوب انتقال الطاقة من الجسم الثقيل إلى المادة، و تبلغ نسبة التأيين الابتدائي حوالي 20% و الباقي ناتج عن تأين الثانوي، ونظرا إلى أن كتلة الإلكترون صغيرة للغاية بالنسبة لكتلة الجسم الثقيل تكون سرعة الإلكترونات كبيرة للغاية بالمقارنة بسرعة الجسم الثقيل الذي يكون له نفس الطاقة، وهذا يعني أن زمن بقاء الإلكترون بالقرب من ذرة معينة من ذرات المادة يكون صغيرا للغاية مما يؤدي إلى انخفاض التأيين النوعي S . التأيين النوعي يعرف على أنه عدد الأزواج - الأيونية المتكونة خلال مليمتر واحد من المسار في الهواء الجوي عند درجة حرارة 15° مئوية وضغط مساو 760 مم زئبق، وتصل قيمة S بالنسبة لجسيمات ألفا عدة آلاف زوج لكل مليمتر من المسار، وذلك عندما تكون طاقة جسيمات ألفا في حدود عدة ميغا إلكترون فولت.

إذا كان التأيين النوعي للجسيمات ألفا يبلغ عدة آلاف في بداية المسار ويتضاعف عند نهايته، فيلاحظ أن التأيين النوعي للإلكترونات لا يتعدى 10 أزواج في بداية المسار ويصل إلى حوالي 100 زوج عند نهايته، و طبقا لقوانين حفظ الطاقة والزخم فإنه عند تصادم جسم ثقيل مع إلكترون المادة تنتقل نسبة ضئيلة جدا من طاقة الجسم إلى الإلكترون لا تتجاوز $\frac{4m_0}{M}$ ، حيث M كتلة الجسم الثقيل، أما عند تصادم الإلكترون الساقط مع إلكترونات المادة فيمكن أن تصل القيمة المنتقلة من إلكترون الساقط إلى الإلكترون المادة نصف طاقة الإلكترون الساقط في تصادم الواحد، أي أنه في الإلكترونات هناك احتمال لإنتقال كمية كبيرة من طاقة الإلكترون الساقط في التصادم الواحد إلى أحد الإلكترونات المدارية، ويؤدي هذا إلى زيادة التشتت في حالة الجسيمات الثقيلة و بالإضافة إلى ذلك فإنه نظرا لصغر كتلة الإلكترون فإن التصادمات بين الإلكترون الساقط والإلكترونات ونوى المادة قد تؤدي إلى تقطع مسار الإلكترون الساقط، لذا يكون مسار الإلكترون الساقط في المادة عادة عبارة عن خط متقطع، لكن يوجد فرق جوهري بين البوزيترونات والإلكترونات عند نهاية المسار، فبعد أن يفقد البوزيترون طاقته عند نهاية المسار،

لأن البوزيترونات تفقد طاقتها بعد المسار فيفنى الإلكترون والبوزيترون معاً. مكونين بذلك فوتين من فوتونات جاما، وهي الظاهرة المعروفة بتلاشي المادة والمادة المضادة عند تلاقيهما [4].

2.3.2 فقد الطاقة بالتصادمات غير المرنة :

لا تختلف نظريات انتقال الطاقة في حالة الإلكترونات عن طريق التصادمات غير المرنة (التأين والإثارة) عن مثيلاتها بالنسبة للجسيمات المشحونة الثقيلة، ويمكن الحصول على القيمة النظرية لقدرة الإيقاف للإلكترونات عندما تكون طاقتها صغيرة بالمقارنة بطاقة السكون لها ($E < m_e c^2$)، ذلك من خلال العلاقة التالية :

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right) = \left(\frac{4\pi e^4}{m_e v^2}\right) NZ \left[\ln\left(\frac{m_e v^2}{2I}\right) + 0.15\right]$$

أما إذا كانت طاقة الإلكترونات كبيرة ($E > m_e c^2$) تكون قيمة القدرة النظرية لقدرة الإيقاف

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right) = \left(\frac{2\pi e^4}{m_e v^2}\right) NZ \left[\ln\left(\frac{m_e c^2}{2I}\right) + 0.15\right]$$

تجدر الإشارة إلى قدرة الإيقاف تعرف بأنها عبارة عن معدل فقد جسيم معين ذي طاقة معينة لطاقته داخل المادة، والإشارة السالبة تعني فقد الطاقة كلما زادت مسافة التغلغل في المادة [4].

4.2 التصادم:

الطريق الذي يقودنا إلى الميكانيك الصلبة هو دراسة حركة نقاط مادية، يمكننا النظر في أبسط نظام N به نقاط مادية ويعتبر هذا الأخير معقد في الفيزياء، لقد عرفنا سابقاً أن القوى التي تطبق بين جسيمين هي قوة الجاذبية والقوة الكهرومغناطيسية... غالباً ما نلتقي في الطبيعة بأنظمة فيزيائية مكونة من جسيمين كالأرض والقمر، الإلكترون والبروتون في ذرة الهيدروجين، جزيء ثنائي من الغاز... بعد الكشف عن المشكلة بشكل عام سنتقصر الدراسة على الأنظمة بصفة عامة ذات جسيمين معزولين ندرس قوى التصادم بينهما [6].

سيتم دراسة حركة نقطتين ماديتين والتأثير المتبادل بينهما في حالة جسيمين M_1 و M_2 كيفيين (جسيمين صلبين أو جسيمين طاقتهم الداخلية يمكنها أن تتغير)، ما يحدث أثناء تبادل التصادم هو عادة معقد. سنكتفي بدراسة حركتهما قبل وبعد التصادم. أثناء مراحل قبل وبعد التبادل بين M_2 و M_1 يهمل. لنرمز v_1 و v_2 على الترتيب v'_1 و v'_2 سرعات مراكز العطالة خلال مرحلة قبل التصادم وبعد التصادم على الترتيب .

بصفة عامة الكميات النسبية لمرحلة بعد التصادم يرمز لها بفتحة، سنعتبر نوعين من الظواهر:
 • التصادم: M_1 و M_2 يكونان في الحالة الابتدائية متباعداً، بعد فترة زمنية قصيرة من التصادم يتعدان من جديد ($\vec{v}_1 \neq \vec{v}_2$) أو تبقيان ملتصقتان ($\vec{v}_1 = \vec{v}_2$)، عندئذ نتكلم عن التصادم.

• التشتت: M_1 و M_2 يكونان في البداية ملتصقان ($\vec{v}_1 = \vec{v}_2$) بعد التشتت يبتعدان عن بعضهما.

1.4.2 قوانين الحفظ:

ليكن لدينا نظام معزول (لا يوجد قوى خارجية) ونرفق الجملة في إطار مرجعي غاليلي R إذا كان النظام معزولاً فإنه يخضع لقوانين الحفظ التالية:

- حفظ كمية الحركة.
- حفظ العزم الحركي.
- حفظ على الطاقة الداخلية للنظام.

لنرمز m_1, m_2 هما كتلتا الجسمين M_1 و M_2 مع وضع فرضية عدم تغيرهما أثناء التصادم، نضع الفرضية أن أجسام نقطية أو أن التصادم لا يغير الحركة الدورانية للأجسام على نفسها، لذلك لا نهتم إلا بحركة مراكز العطالة لـ M_1 و M_2 وسوف لا نستعمل حفظ عزم دوران الحركة، (هذا القانون مفيد من جهة أخرى لدراسة حركة دوران الأجسام: طاقة الحركة الدورانية يجب أن تأخذ بعين الاعتبار في طاقة الداخلية لكل جسم).

إعتماداً على قانون حفظ كمية الحركة $\vec{p}' = \vec{p}$ فتكون العلاقة:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}'_1 + m_2\vec{v}'_2 \quad (2.2)$$

لنرمز لـ G لمركز عطالة النظام $\{M_1, M_2\}$ لدينا: $\vec{p} = \vec{v}_G(m_1 + m_2)$ إذا $\vec{v}_G = \vec{v}'_G$ إعتماداً على قانون حفظ الطاقة الداخلية $U = U'$ ، الطاقة الداخلية لهذا النظام:

$$U = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 + U_1 + U_2 + E_{p,1 \rightarrow 2} - \frac{1}{2}(m_1 + m_2)v_G'^2 \quad (3.2)$$

أين U_1 و U_2 هما الطاقات الداخلية للأجسام M_1 و M_2 و $E_{p,1 \rightarrow 2}$ هما الطاقة الكامنة للتفاعل بين M_1 و M_2 من $\vec{v}_G = \vec{v}'_G$ و $U = U'$ نستنتج:

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 + U_1 + U_2 + E_{p,1 \rightarrow 2} = \frac{1}{2}m_1v_1'^2 + \frac{1}{2}m_2v_2'^2 + U_1' + U_2' + E_{p,1 \rightarrow 2}' \quad (4.2)$$

الطاقة الكامنة للتفاعل $E_{p,1 \rightarrow 2}$ بين M_1 و M_2 لا تتعلق إلا بالمسافة r بين الجسمين فهي تميل بسرعة ثابتة (يكون عادة معدوم حسب الإتفاق) عندما تتحول r إلى ∞ لذلك:

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 + U_1 + U_2 = \frac{1}{2}m_1v_1'^2 + \frac{1}{2}m_2v_2'^2 + U_1' + U_2' \quad (5.2)$$

إذا كان الجسمين متباعدين قبل وبعد التفاعل ($\vec{v}_1 \neq \vec{v}_2$) و ($\vec{v}_1 \neq \vec{v}_2$) إذا يبقى الجسمان مرتبطان بعد التفاعل أي ($\vec{v}_1 = \vec{v}_2 = \vec{v}_{1,2}$) يكون لدينا:

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 + U_1 + U_2 = \frac{1}{2}(m_1 + m_2)v_{1,2}'^2 + U_1' + U_2' + E_{p,1 \rightarrow 2}' \quad (6.2)$$

إذا كان في مكان التصادم لدينا تشتت أي $(\vec{v}_1 = \vec{v}_1 = \vec{v}_{1,2})$ إذا:

$$\frac{1}{2}(m_1 + m_2)v_{1,2}'^2 + U_1 + U_2 + E_{p,1 \rightarrow 2}' = \frac{1}{2}m_1v_1'^2 + \frac{1}{2}m_2v_2'^2 + U_1' + U_2' \quad (7.2)$$

الكمية $E_{p,1 \rightarrow 2}'$ أو $E_{p,1 \rightarrow 2}$ تسمى الطاقة الربط في هاتين الحالتين الأخيرتين.

5.2 التصادم المرن:

يحدث هذا التصادم بين جسيمتين حيث الحالة الداخلية للجسيمات لا تتغير وكذا طاقتها الداخلية ولكن يكون التغير يخص مسارها، يتم تحويل الطاقة الحركية وتغير كمية الحركة، ولا يتغير عددها أو نوعها ونكتب في حالة جسمين متصادمين فقط حيث ان الطاقة الحركية ثابتة أثناء التصادم [7].

1.5.2 الحفاظ على الطاقة الحركية :

إذا كانت حالة الأجسام M_1, M_2 لم تتغير (ككل محفوظة، لا يوجد تشوه ولا تسخين)، نقول عن التصادم في هذه الحالة مرن الطاقة الحركية هي إذا محفوظة. حفظ الطاقة الحركية بضبط على سبيل المثال في حالة وجود جسمين لا يخضعان إلى إنتقال الطاقوي تقريبا جيد في حالة جسمين مرنين، يعطى قانون حفظ كمية الحركة كالتالي [8]:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}_1' + m_2\vec{v}_2' \quad (8.2)$$

تعطى ثلاث معادلات سلمية (معادلة لكل محور: $m_1v_{1x} + m_2v_{2x} = m_1v_{1x}' + m_2v_{2x}'$) وقانون حفظ الطاقة هنا حركيا:

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 = \frac{1}{2}m_1v_1'^2 + \frac{1}{2}m_2v_2'^2 \quad (9.2)$$

المعادلة هي عبارة عن مجموع أربع معادلات لتعيين \vec{v}_1' و \vec{v}_2' (لكل منها ثلاث مركبات) يجب أن تتوفر على ستة معادلات فقط، دراسة الجملة أثناء التفاعل يستطيع إعطاء المعادلتين الناقصتين. يجب إعطاء وسيطين إضافيين لحل المسألة، سنبين فيما يلي: بأنه إذا إتجاه \vec{v}_1 (وجود زاويتان) نستطيع أن نجد طويلته ثم \vec{v}_2' .

بالنسبة إلى هذه الدراسة فإنه من سهل أن نرفق النظام في مرجع مركز المسافات المتساوية للجملة.

6.2 الدراسة في مرجع مركز المسافات المتساوية للجمله:

سرعة G في معلم غاليلي R هي العلاقة:

$$\vec{v}_G = \frac{m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2}{(m_1 + m_2)} \quad (10.2)$$

\vec{v}_1, \vec{v}_2 و \vec{v}_G هي إذن في المستوي p ، بالمثل:

$$\vec{v}'_G = \frac{m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2}{(m_1 + m_2)} \quad (11.2)$$

\vec{v}'_1, \vec{v}'_2 و \vec{v}'_G هي أيضا في المستوي p' عادة يختلف عن المستوي p لكن $\vec{v}'_G = \vec{v}_G$: المتسويان p, p' يشتركان في المستقيم D يمر بنقطة تلاقي M_1 و M_2 و موجه حسب \vec{v}_G .

مرجع مركز المسافات المتساوية للجمله، R^* هو مرجع ذو إنسحاب مستقيم ذو سرعة \vec{v}_G بالنسبة إلى R . إذن فهو هنا غاليلي نمرز * كميات في المرجع R^* لدينا $\vec{v}_1^* = \vec{v}_1 - \vec{v}_G$ نفس الشيء بالنسبة $\vec{v}_2^*, \vec{v}'_1, \vec{v}'_2$.

في مرجع مركز المسافات المتساوية حفظ كمية الحركة تعطى بالعلاقة:

$$m_1 \vec{v}_1^* + m_2 \vec{v}_2^* = \vec{0} = m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2 \quad (12.2)$$

وحفظ الطاقة الحركية تعطى بالعلاقة:

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^{*2} + \frac{1}{2} m_2 v_2^{*2} = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \quad (13.2)$$

\vec{v}_1^*, \vec{v}_2^* على الترتيب بدلالة $\vec{v}_1'^*, \vec{v}_2'^*$ إنطلاقا من المعادلة (12.2) و بالتعويض في المعادلة (13.2) نتحصل على: $v_1^* = v_1'$ و $v_2^* = v_2'$ ونمرز: $\vec{\omega} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$ سرعة M_2 بالنسبة ل M_1 . لدينا: $\vec{\omega}^* = \vec{v}_2^* - \vec{v}_1^* = \vec{\omega}$ وحسب المعادلة (12.2):

$$\vec{\omega} = \vec{v}_2^* - \vec{v}_1^* = - \left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right) \vec{v}_1^* = \left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right) \vec{v}'_1 = - \frac{m_1}{\mu} \vec{v}_1^* = \frac{m_2}{\mu} \vec{v}_2^* \quad (14.2)$$

أين $\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$
حيث μ هي الكتلة المختزلة.
نتحصل بالمثل على:

$$\omega' = \frac{m_1}{\mu} v_1^* = \frac{m_2}{\mu} v_2^* \quad (15.2)$$

بما أن لدينا: $v_1^* = v_1'$ يكون لدينا: $\omega' = \omega$ لنفترض معرفة شعاع الوحدة u_1 موجه حسب \vec{v}_1^* أي إتجاه \vec{v}_1^* ، هذا يؤدي إلى إعطاء زاويتين:

الزاوية Φ (طويلة) بين المستويين p و p' الزاوية θ^* بين \vec{v}_G و $\vec{v}_1'^*$ يكون لدينا العلاقة:

$$\vec{v}_2^{*'} = -\frac{\mu\omega'}{m_2}\vec{u}_1^{*'} \quad (16.2)$$

و

$$\vec{v}_1^{*'} = \frac{\mu\omega'}{m_1}\vec{u}_1^{*'} \quad (17.2)$$

7.2 دراسة المرجع R :

المرجع R لدينا العلاقة:

$$\vec{v}_2' = \vec{v}_2^{*'} + \vec{v}_G \quad (18.2)$$

و

$$\vec{v}_1' = \vec{v}_1^{*'} + \vec{v}_G \quad (19.2)$$

نستطيع أن نستنتج الزوايا

$$\theta_2 = (\vec{v}_G, \hat{\vec{v}}_2') \quad (20.2)$$

و

$$\theta_1 = (\vec{v}_G, \hat{\vec{v}}_1') \quad (21.2)$$

نرمز لـ \vec{u}_x شعاع الوحدة الموجه حسب \vec{v}_G و \vec{u}_y شعاع الوحدة للمستوي p' العمودي على \vec{u}_x يكون لدينا:

$$\vec{v}_1' = v_1'(\cos\theta_1\vec{u}_x + \sin\theta_1\vec{u}_y) \quad (22.2)$$

و

$$\vec{u}_1^{*'} = \cos\theta^*\vec{u}_x + \sin\theta^*\vec{u}_y \quad (23.2)$$

تتصل إذا:

$$v_1' \sin\theta_1 = -\frac{\mu\omega'}{m_1} \sin\theta^* \quad (24.2)$$

و

$$v_1' \cos\theta_1 = \frac{\mu\omega'}{m_1} \cos\theta^* + v_G \quad (25.2)$$

نستنتج من ذلك:

$$\tan\theta_1 = \frac{\sin\theta^*}{\cos\theta^* + m_1 v_G / \mu\omega'} \quad (26.2)$$

بالمثل نتحصل على:

$$v_2' \sin \theta_2 = -\frac{\mu \omega'}{m_2} \sin \theta^* + v_G \quad (27.2)$$

و

$$v_2' \cos \theta_2 = -\frac{\mu \omega'}{m_2} \cos \theta^* + v_G \quad (28.2)$$

نستنتج العلاقة:

$$\tan \theta_2 = \frac{\sin \theta^*}{\cos \theta^* - m_2 v_G \mu \omega'} \quad (29.2)$$

• حالات خاصة: الهدف M_2 ساكن قبل التصادم

لدينا: $v_2 = 0$, $\omega' = \omega = \|\vec{v}_2 - \vec{v}_1\|$ و $v_G = m_1 v_2 / (m_1 + m_2)$ نتحصل إذا على العلاقة:

$$\tan \theta_1 = \frac{\sin \theta^*}{\cos \theta^* - m_2 v_G \mu \omega'} \quad (30.2)$$

$$\tan \theta_1 = \frac{\sin \theta^*}{\cos \theta^* - m_1 / m_2} \quad (31.2)$$

$$\tan \theta_2 = \frac{\sin \theta^*}{\cos \theta^* - 1} = \frac{2 \sin(\theta^*/2) \cos(\theta^*/2)}{-\sin^2(\theta^*/2)} = \tan(\theta^*/2)' \quad (32.2)$$

حيث: $\theta_2 = \theta^*/2 - \pi/2$

الجسم من نفس الكتلة يكون لدينا العلاقة:

$$\tan \theta_1 = \frac{\sin \theta^*}{\cos \theta^* + 1} = \frac{2 \sin(\theta^*/2) \cos(\theta^*/2)}{\cos^2(\theta^*/2)} = \tan(\theta^*/2) \quad (33.2)$$

حيث: $\theta_1 = \theta^*/2$

لذلك \vec{v}_1' و \vec{v}_2' تكون متعامدان إذا كان $v_2 = 0$ و $m_1 = m_2$ نجد هذه الحالة بسيطة إنطلاقاً من قوانين الحفظ:

$$v_1^2 = v_1'^2 + v_2'^2 \quad (34.2)$$

و

$$\vec{v}_1 = \vec{v}_1' + \vec{v}_2' \quad (35.2)$$

بترتيب المعادلة (1) وبطرح المعادلة (2) نتحصل على: $\vec{v}_1' \cdot \vec{v}_2' = 0$

8.2 التصادم المباشر:

نتكلم أيضا عند التصادم المباشر في هذه الحالة السرعات كلها مرتبطة خطيا. نستطيع إيجاد \vec{v}_1' و \vec{v}_2' دون المرور بمراجع مركز المسافات المتساوية نرسم $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_1', \vec{v}_2'$ بالسرعات الجبرية حسب المحور المشترك. حفظ كمية الحركة يعطى كالآتي:

$$m_1 (\vec{v}_1 - \vec{v}_1') = m_2 (\vec{v}_2' - \vec{v}_1') \vec{v}_1 = \vec{v}_1' + \vec{v}_2' \quad (36.2)$$

فيكون وحفظ الطاقة الحركية العلاقة:

$$m_1(v_1^2 - v_1'^2) = m_2(v_2'^2 - v_1'^2) \vec{v}_1 = \vec{v}_1' + \vec{v}_2' \quad (37.2)$$

$$m_1(\vec{v}_1 - \vec{v}_1')(\vec{v}_1 + \vec{v}_1') = m_2(\vec{v}_2' - \vec{v}_1')(\vec{v}_2' + \vec{v}_1') \vec{v}_1 = \vec{v}_1' + \vec{v}_2' \quad (38.2)$$

إذا كان هناك تصادم فإنه $(\vec{v}_1', \vec{v}_2') \neq (\vec{v}_1, \vec{v}_2)$ بقسمة العلاقة الأخيرة نتحصل على:

$$(\vec{v}_1 + \vec{v}_1') = (\vec{v}_2 + \vec{v}_2') \quad (39.2)$$

ثم العلاقة:

$$\vec{v}_1' = \frac{(m_1 - m_2)\vec{v}_2 + 2m_2\vec{v}_1}{m_1 + m_2} \quad (40.2)$$

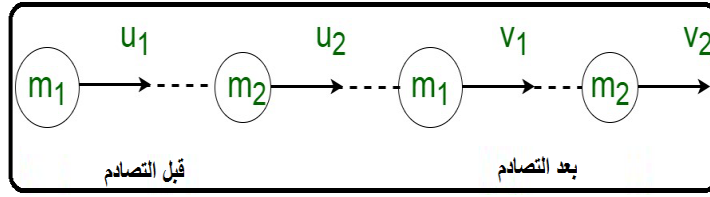
بالتناظر وبتغيير المعاملات 1 و 2 نتحصل على العلاقة:

$$\vec{v}_2' = \frac{2m_1\vec{v}_1 + (m_2 - m_1)\vec{v}_2}{m_1 + m_2} \quad (41.2)$$

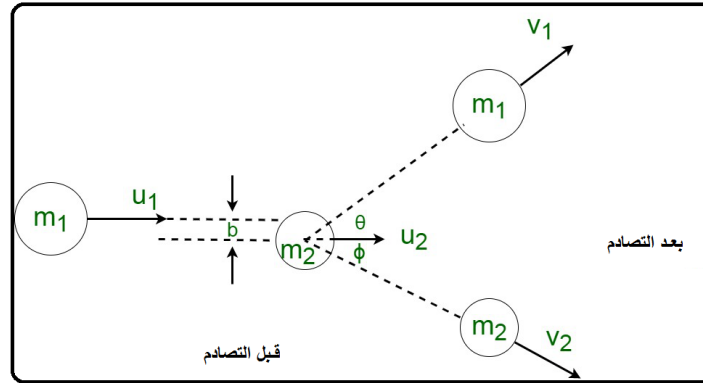
نلاحظ أنه إذا كان $m_1 = m_2$ فإن $\vec{v}_1' = \vec{v}_1$ و $\vec{v}_2' = \vec{v}_1$ السرعات M_1 و M_2 وقع لهم التفاعل. بصفة خاصة إذا كان M_2 في حالة راحة قبل التصادم فإن M_1 هي أيضا في حالة راحة بعد التصادم و M_2 لديه نفس سرعة M_1 قبل التصادم.

إذا كان $\vec{v}_2 = 0, m_1 \ll m_2, \vec{v}_2' \approx 0, \vec{v}_1' \approx -\vec{v}_1$ و M_1 يرتد بإتجاه المعاكس ل M_2 بنفس السرعة لكن بالإتجاه معاكس و M_2 يبقى ساكنا إذا $m_1 \ll m_2; \vec{v}_1' \approx -\vec{v}_1$ و $\vec{v}_2' \approx -2\vec{v}_1$ عرف التصادم المرن بأنه التصادم الذي لا يحدث فيه خسارات في الطاقة الحركية بسبب الاصطدام، وتعتبر كلاً من الزخم والطاقة الحركية كميات محفوظة في التصادمات المرنة فالتصادم المرن يحدث فقط عندما لا يتحول أي جزء من طاقة الحركة خلال التصادم إلى طاقة من نوع آخر ويكون معامل ارتداده $e=1$ وهذا يعني ارتطاما مرنا لجسم بآخر ثابت بسرعة معينة يجعل الأول يرتد للخلف بنفس السرعة.

المقصود هنا بمعامل الارتداد هو مقياس مرونة الأجسام المتصادمة وهو يعبر عن نسبة الطاقة الحركية التي تحتفظ بها الأجسام المتصادمة بعد التصادم [9].
 وخلال التصادم تتحول الطاقة الحركية إلى طاقة كمن مصحوبة بقوة رد فعل طاردة للأجسام، وبعدها تتحول ثانيا إلى طاقة حركية منقسمة على الأجسام على حسب كتلة كل منهما، يعتبر تصادم جزيئات الهواء من جزيئات الأكسجين النيتروجين نوعا لتصادم المرن [8].
 التصادم المرن يحدث على مسار مستقيم كما يبينه الشكل (1.2) وعلى مستوي ثنائي البعد أي يغير مساره كما يبينه الشكل (2.2).



شكل 1.2: تصادم المرن وحيد بعد [10].



شكل 2.2: تصادم المرن على محورين Ox و Oy [10].

في حالة اصطدام جزيئات أو الذرات في الحالة الغازية أو السائلة قليلا ما يحدث التصادم المرن المثالي، فبعض من الطاقة الحركية تأخذها بعض الجزيئات كطاقة دورانية أو اهتزازية بحسب ما لها من إمكانيات، ومن خواصه أيضا الجسمان ينفصلان بعد التصادم مباشرة ولا يحدث تغير في شكل وحرارة الجسمين [9].
 يمكن تلخيص خصائص الاصطدامات المرنة كما يلي: يتم حفظ الطاقة الحركية، والحفاظ على الدفع الخطي، والحفاظ على الطاقة الإجمالية. القوى أثناء الاصطدام المرن محفوظ، ولا تتحول الطاقة الميكانيكية إلى شكل آخر من الطاقة [13].

9.2 تصادم غير المرن:

لا يمكن أن يكون التصادم بين جسمين مجهرين مرنا تماما لأن جزء من الطاقة الحركية للنظام يتحول إلى طاقة داخلية (تسخين أو تشوه)، أي حدوث تغير في الشكل وتكون الطاقة الحركية المفقودة في التصادم عديم المرونة كبيرة جدا يحدث هذا التصادم بين جسيمتين تتغير فيه كل من الحالة الداخلية للجسيمات وطاقتها الداخلية بعد التصادم مما يرفقه تأين أو إثارة...، حيث Q هي كمية الطاقة الناتجة أو اللازم إعطاؤها للأجسام المتصادمة حتى يمكن للتصادم أن يتم، فإذا كانت $Q < 0$ فإن بعض الطاقة الأصلية للجسمين المتصادمين تتحرر ونقول أن تصادم مصدر للطاقة أما إذا كانت $Q > 0$ فيجب عندئذ تزويد أحد الجسمين المتصادمين أو كلاهما بهذه الطاقة حتى يصبح التصادم ممكنا ونقول أن التصادم ماص للطاقة [7].

$$Q = \frac{1}{2} (m_1 v_1'^2) + \frac{1}{2} (m_2 v_2'^2) - \frac{1}{2} (m_1 v_1^2) + \frac{1}{2} (m_2 v_2^2) \quad (42.2)$$

1.9.2 تبديد الطاقة الحركية :

أثناء التأثير غير المرن يتبدد جزء من الطاقة الحركية، نظرا لأنه يجب الحفاظ على الطاقة الداخلية لنظام لا بد من زيادة مجموع الطاقات الداخلية للأجسام وطاقاتها الكامنة للتفاعل، تأخذ هذه الزيادة في الطاقة غير الحركية عدة أشكال لحرارة زيادة درجة حرارة الجسم، التبخر، التشوه و طاقة الربط ...، من ناحية أخرى كمية الحركة تبقى محفوظة دائما [8].
لدينا المعادلات التالية:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}_1' + m_2 \vec{v}_2' \quad (43.2)$$

تعطي ثلاث معادلات سلمية (معادلة لكل محور: $m_1 v_{1x} + m_2 v_{2x} = m_1 v_{1x}' + m_2 v_{2x}'$) و قانون حفظ الطاقة هنا حركيا:

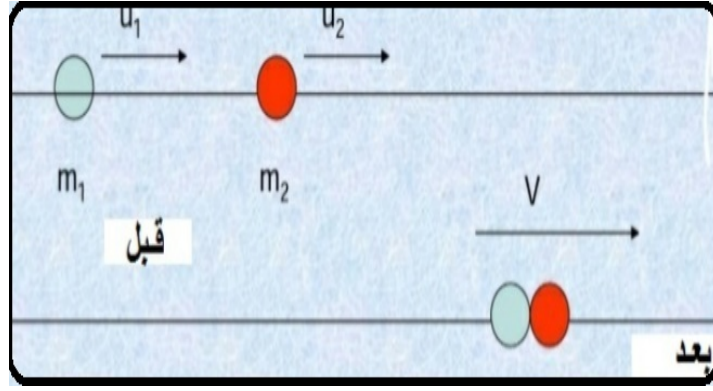
$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 + U_1' + U_2' + E_{p,1 \rightarrow 2} - U_1 - U_2 \geq 0 \quad (44.2)$$

$$\frac{1}{2} \mu \omega^2 = \frac{1}{2} \mu \omega'^2 + U_1' + U_2' + E_{p,1 \rightarrow 2} - U_1 - U_2 \quad (45.2)$$

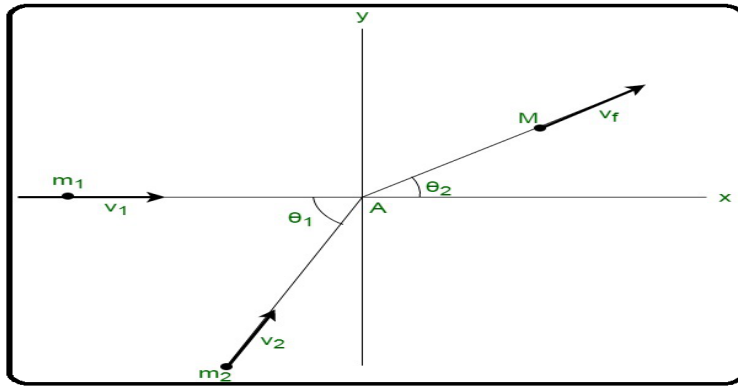
$$\eta = \frac{\omega'}{\omega} \leq 1 \quad (46.2)$$

يكون له شأن عندئذ يمكننا معالجة المسألة في مرجع مركز المسافات المتساوية ثم في R كل المعادلات المعطاة في الفقرات السابقة مقبولة أيضا بإستثناء حفظ الطاقة الحركية والعلاقات المستخرجة منها:

$$\vec{v}_2^* = \vec{v}_2'^* \text{ و } \vec{v}_1^* = \vec{v}_1'^*, \omega = \omega'$$



شكل 3.2: تصادم غير المرن وحيد بعد [10].



شكل 4.2: تصادم غير المرن على محورين Ox و Oy [10].

10.2 تصادم لين تام:

في حالة $\eta = 0$ هي حالة تصادم اللين التام يكون لدينا عندئذ $\omega' = 0$ أي الجسمين M_1, M_2 يبقيان مرتبطين بعد التصادم. حسب حفظ كمية الحركة العلاقة:

$$\vec{v}_1' = \vec{v}_2' = \frac{m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2}{m_1 + m_2} \quad (47.2)$$

$$E_c' - E_c = (m_1 \vec{v}_1' + m_2 \vec{v}_2' - m_1 \vec{v}_1 - m_2 \vec{v}_2) \quad (48.2)$$

11.2 التشتت:

حالات التشتت ترتبط بحالات التصادمات اللينة الفرق هو جزء من الطاقة الحركية تحول الى طاقة حركية فيكون لدينا:

$$\vec{v}_1' = \vec{v}_2' = \frac{m_1 \vec{v}_1' + m_2 \vec{v}_2'}{m_1 + m_2} \quad (49.2)$$

ومنه العلاقة:

$$E'_c - E_c = (m_1 \vec{v}'_1 + m_2 \vec{v}'_2 - m_1 \vec{v}_1 - m_2 \vec{v}_2) \quad (50.2)$$

وتكون موجبة.

12.2 كيفية معالجة التصادم في البلازما :

بما أن البلازما تحتوي على صنفين من الجسيمات جسيمات خفيفة وأخرى ثقيلة فإنه يوجد تقريبن حديين .

1.12.2 تقريب التصادم:

هذا التفاعل صالح من أجل زمن التصادم t_c أو ما يسمى بالمدة المتوسطة للتفاعل تكون أقل بكثير من الزمن الفاصل بين التصادمين Δt الإلكترون له كتلة صغيرة جدا لذا فان زمن التصادم أقل بكثير من زمن الفاصل بين التصادمين. نفترض ان سرعة الإلكترون v_e ، وسيط الصدم ρ و العدد الشحني، طاقة التفاعل تكون من رتبة $\frac{e^2 n^2 a_0}{Z \rho^2}$

$$\frac{4}{3} \pi r_e^3 = N_e^{-1} \quad (51.2)$$

$$\frac{Z^3 A_q}{n^6} \gg 1 \quad (52.2)$$

$$A_q = \frac{2(2\pi m_e K_B T_e)^{3/2}}{N_e h^3} \quad (53.2)$$

تقريب التصادم صالح إذا كانت طاقة التفاعل المنتجة من زمن التصادم صغيرة بالمقارنة مع \hbar ، يستخدم تقديره باستعمال المعادلة أين نستبدل ρ بالبعد المتوسط r_e ، N_e : كثافة الالكترونات . A_q : العدد الكمي للحالات المتاحة لكل الإلكترون .

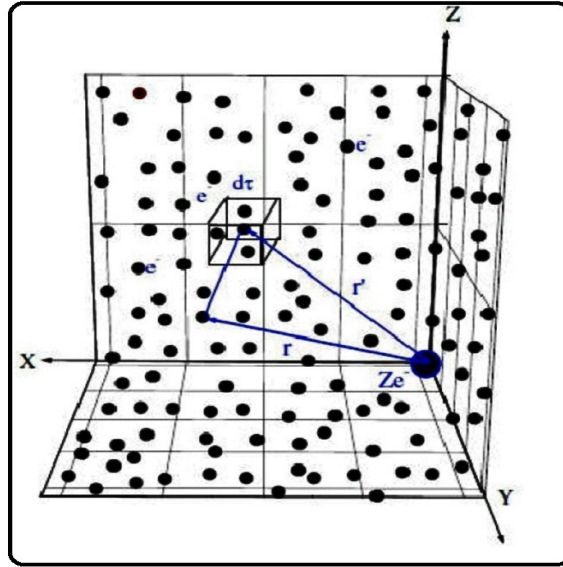
تفاعل إلكترون مضطرب مع أيون مشع يعطي مؤثر تصادم الكتروني [11].

2.12.2 تقريب شبه ساكن:

صالح هذا التقريب من أجل التصادم أكبر بكثير من الزمن الفاصل بين تصادمين Δt . الأيون المسبب للاضطراب الذي يعالج في إطار هذا التقريب يتميز بأن له درجة حرارة منخفضة وكثافة عالية. أيونات هي جسيمات ثقيلة لذا فإن حركتها تكون بطيئة، ويمكن اعتبار الحقل شبه ساكن. كما يمكن استخدام هذا التقريب لحساب تعريض ستارك المنتج من قبل الأيونات في البلازما [11].

13.2 طاقات كيون التفاعل :

يتحرك الإلكترون حول أيون موجب الشحنة تحت تأثير طاقة كيون تفاعل.



شكل 5.2: أيون ذو شحنة Z_e مغمور في البلازما [11]

طاقة كيون تفاعل إلكترون يبعد عن أيون متواجد في المبدأ، تنتج ثلاث مساهمات:

$$\Phi(r) = U_{Deut}(r) + \Phi_{e-e}(r) + \Phi_{e-f}(r) \quad (54.2)$$

$U_{Deut}(r)$: طاقة كيون التفاعل بين إلكترون-أيون.

$\Phi_{e-e}(r)$: طاقة كيون تفاعل بين إلكترون-إلكترون.

$\Phi_{e-f}(r)$: طاقة كيون التفاعل بين الإلكترون وأيونات موزعة بانتظام واستمرار في البلازما.

تفاعل كولوم هو التفاعل الذي يكون بين إلكترونين، وتفاعل داتش هو التفاعل أيون مشع

مع إلكترون، أين نأخذ بعين الاعتبار الفعل الكومي للحيود على مسافات صغيرة.

إذا كانت $r > \lambda_T$ فيصبح لا وجود للفعل الكومي ونوع طاقة التفاعل هو طاقة كولومب،

وفي حالة $r < \lambda_T$ ندخل الفعل الكومي في الحساب [11].

λ_T : الطول الموجي دي بروغلي، r : المسافة بين الإلكترون والأيون.

يدعى تفاعل إلكترون مع أيون مركزي بطاقة كيون التفاعل لداتش وتعطى بالعبارة التالية:

$$U_{Deut}(r) = -\frac{Ze^2}{r} (1 - \exp(-r/\lambda_T)) \quad (55.2)$$

طاقة كيون التفاعل المحجب هو تفاعل أيون مشع مع الكيون في البلازما الكثيفة ودرجة حرارة

مرتفعة، يأخذ بعين الاعتبار كل من الفعل الكومي على مسافات الصغيرة ومجال تأثير الحجب على

مسافات الكبيرة، صيغتها من الشكل:

$$U_{ie}^{SD} = -\frac{Ze^2}{r} (1 - \exp(-r\lambda_T)) (\exp(-r/\lambda_D)) \quad (56.2)$$

حيث $\lambda_D = \sqrt{\frac{K_B T}{4\pi n_e e^2}}$ عبارة طول ديبي

طاقة كيون لدانش تتعلق بالتأثير الجماعي لمختلف طاقات كيون التفاعل، حيث ناخذ تفاعل الإلكترولون في البلازما مع المكونات الأخرى من ايون وإلكترولون، تتميز بدرجة الحرارة العالية و التزاوج الضعيف، أي أن مجموع هذه الطاقات، طاقة كيون التفاعل بين إلكترولون- ايون طاقة كيون تفاعل بين إلكترولون- إلكترولون، طاقة كيون تفاعل بين إلكترولون- إلكترولون، طاقة كيون التفاعل بين الإلكترولون و أيونات موزعة بانتظام و استمرار وطاقة كيون التفاعل مع ايون ينتج عنه طاقة كيون تفاعل لدانش الفعال و صيغتها كالآتي:

$$\Phi(r) = U_{Deut} + \frac{f(\vec{r}, \vec{v}) e^2}{d} p^3 dp^3 - \int \frac{N_e e^2}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d\vec{r}' \quad (57.2)$$

$$f(\vec{r}, \vec{v}) = N_e \left(\frac{m}{2\pi K_B T} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{m v^2}{2K_B T} - \frac{\Phi(r)}{K_B T} \right) \quad (58.2)$$

$f(\vec{r}, \vec{v})$ توزيع ماكسويل بولتزمان

14.2 حساب سعة مؤثر التصادم الإلكترولوني:

1.14.2 مؤثر التصادم الإلكترولوني:

عبارة مؤثر التصادم الإلكترولوني التي سندرسها مستمدة من أعمال Greim: إن حساب مؤثر التصادم الإلكترولوني W_e يقودنا إلى معرفة حساب سعة المؤثر التصادم الإلكترولوني Φ ، كما موضح في المرجع [11] حيث نعطي العلاقة كالآتي:

$$\begin{aligned} W_e = & -N_e \left(\frac{\hbar}{e^2} \right)^2 \int \int 2\pi \rho v f(v) d\vec{v} dp \\ & \times \frac{1}{2} \left[\vec{R}_a \left(\frac{d\vec{r}}{dt} (+\infty) - \frac{d\vec{r}}{dt} (-\infty) \right) \right]^2 \\ & + \frac{1}{2} \left[\vec{R}_b \left(\frac{d\vec{r}}{dt} (+\infty) - \frac{d\vec{r}}{dt} (-\infty) \right) \right]^2 \\ & - \vec{R}_b \left(\frac{d\vec{r}}{dt} (+\infty) - \frac{d\vec{r}}{dt} (-\infty) \right) \\ & \times \vec{R}_a \left(\frac{d\vec{r}}{dt} (+\infty) - \frac{d\vec{r}}{dt} (-\infty) \right) \end{aligned} \quad (59.2)$$

حيث:

\vec{R}_a : مؤثر الموضع للإلكترون في الحالة العليا a .

\vec{R}_b : مؤثر الموضع للإلكترون في الحالة الدنيا b .

E_t : الحقل الكهربائي.

و من الطبيعي أن هذا الحقل الكهربائي يتعلق بمسار الإلكترون المشتت، والذي يعتمد في حد ذاته على الكمون الذي يتحرك فيه الإلكترون.

بإستخدام معادلة نيوتن التي تصف حركة الإلكترون حول أيون مشع:

$$m\ddot{r}(t) = -eE(t) \quad (60.2)$$

إذا تم إستبدال $eE(t)$ بالعبارة $m\ddot{r}(t)$.

وبتعويض $r(t)$ في عبارة مؤثر التصادم الإلكتروني السابقة وبعد المكاملة نحصل على:

$$\begin{aligned} W_e = & -N_e \left(\frac{\hbar}{e^2} \right)^2 \int \int 2\pi\rho v f(v) d\vec{v} d\rho \\ & \times \left[\frac{1}{2} \left[\vec{R}_a \left(\frac{d\vec{r}}{dt} (+\infty) - \frac{d\vec{r}}{dt} (-\infty) \right) \right]^2 \right. \\ & + \frac{1}{2} \left[\vec{R}_b \left(\frac{d\vec{r}}{dt} (+\infty) - \frac{d\vec{r}}{dt} (-\infty) \right) \right]^2 \\ & - \vec{R}_b \left(\frac{d\vec{r}}{dt} (+\infty) - \frac{d\vec{r}}{dt} (-\infty) \right) \\ & \left. \times \vec{R}_a \left(\frac{d\vec{r}}{dt} (+\infty) - \frac{d\vec{r}}{dt} (-\infty) \right) \right] \end{aligned} \quad (61.2)$$

من العلاقة بين زاوية التشتت θ و السرعة قبل و بعد التصادم:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} (+\infty) = \vec{v} (+\infty) = \vec{v} (-\infty) + \left(\frac{v}{\rho} \right) \vec{\rho} \sin\theta \quad (62.2)$$

و بإعتبار أن:

$$v(-\infty) = v(+\infty) = v \quad (63.2)$$

في الحقيقة اننا نتعامل مع كمونات محافظة، إذا مؤثر التصادم يصبح على نحو التالي:

$$W_e = \left((\vec{R}_a)^2 + (\vec{R}_b)^2 - 2\vec{R}_a\vec{R}_b \right) \Phi \quad (64.2)$$

حيث Φ سعة مؤثر التصادم الإلكتروني:

$$\Phi = -\frac{4}{3}\pi N_e \left(\frac{\hbar}{e^2} \right)^2 \int \int v^3 f(v_e) dv_e d\rho \sin^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (65.2)$$

$f(v_e)$ دالة توزيع السرعات لماكسويل

$$f(v_e) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi K_B T} \right)^{3/2} v_e^2 \exp \left(\frac{-mv_e^2}{2\pi K_B T} \right) \quad (66.2)$$

بتعويض المعادلة (66.2) في المعادلة (65.2) نجد:

$$\Phi = -\frac{16}{3}\pi^2 N_e \left(\frac{\hbar}{e^2} \right)^2 \left(\frac{m}{2\pi K_B T} \right)^{3/2} \times \int dv_e v_e^5 \exp \left(\frac{-mv_e^2}{2\pi K_B T} \right) \int \sin^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \theta \rho d\rho \quad (67.2)$$

بدلاً من حساب مسار الإلكترون المتشتت (θ, ρ) ، نستعمل سعة التشتت والمقطع العرضي المتعلق بكل طاقة الكون، للقيام بذلك نستبدل θ التي تظهر في آخر التكامل في المعادلة (67.2) التي لها علاقة بوسيط الصدم ρ ، يمكن العثور على الصيغة بسهولة باستخدام سعة التشتت وصيغة المقطع العرضي للتشتت، في البداية نستخدم العبارة التفاضلية للمقطع الفعال حيث σ المقطع الفعال:

$$d\sigma = 2\pi \frac{d\rho}{d\theta} d\theta \quad (68.2)$$

من جهة أخرى ترتبط سعة التشتت $|F(\theta)|$ بالتقريب Born: حيث ω الزاوية الصلبة .

$$d\sigma = |F(\theta)|^2 d\omega \quad (69.2)$$

العلاقة بين المقطع الفعال و زاوية التشتت يتم تحديدها من مربع طولية معامل فورييه والكمون:

$$d\omega = 2\pi \sin \theta d\theta \quad (70.2)$$

المعادلة (70.2) تم الحصول عليها من قبل *M. Born* عام 1962 في نظرية التصادم والذي يعتبر التقريب الغالب ويسمى بتقريب Born أين $q = \vec{k}' - \vec{k}$ ، حيث \vec{k} المتجه للجسيمات الواردة و \vec{k}' المتجه الموجه للجسيمات بعد التشتت. يعطى $q = 2k \sin \frac{\theta}{2}$ ، الزاوية θ بين \vec{k} و \vec{k}' ، نحصل على التقريب $F(q)$:

$$F(q) = -\frac{m}{2\pi \hbar^2} U_{Deut}(r) \exp(-i\vec{q} \cdot \vec{r}) d\vec{r} \quad (71.2)$$

ينبغي هنا تحديد نوع التفاعل والكمون المستخدم.

2.14.2 طاقة كيون التفاعل داتش:

(Dutch reaction potential energy)

هو تفاعل يتم بين إلكترون وأيون و نخص بالذكر أيون الليثيوم Li^{+2} مؤين مرتين، حيث طاقة كيون التفاعل لداتش $U_{Deut}(r)$ ، نستعمل تفاعل كولومب التفاعل الأكثر شمولاً، أين تكون حركة الإلكترون مبعثرة في محيط أيون مشع. هذا التفاعل نوقش على نطاق واسع من قبل داتش وآخرون في مختلف الأبحاث الأخيرة على الأفعال الكمومية في البلازما، في الواقع تم استخدام

تفاعل داتش حيث يتم الحفاظ على الفعل الكومي، ومن جهة أخرى $r > \lambda_T$ يؤخذ بعين الاعتبار الحساب على مسافات صغيرة بين الأيون المشع والإلكترون حيث وإذا كان $r < \lambda_T$ يهمل الفعل الكومي ويحافظ على معايير كولومب تعطى علاقة داتش:

$$U_{Deut}(r) = -\frac{Ze^2}{r} (1 - \exp(-r/\lambda_T)) \quad (72.2)$$

r : البعد بين الإلكترون والأيون.

e : شحنة إلكترون.

λ_T : طول موجة دي بروغلي.

حيث: $\lambda_T = \frac{h}{\sqrt{m_e K_B T}}$

بإجراء تكاملات و تغيير متغير لسعة مؤثر التصادم الإلكتروني لكولومب هي كالتالي:

$$\begin{aligned} \Phi_{coulomb}(r) = & -\frac{16\pi^2}{3} N_e Z^2 \left(\frac{e^2}{\hbar}\right)^2 \left(\frac{1}{\pi}\right)^{3/2} \left(\frac{1}{v}\right) \int y dy \exp(-y^2) \\ & \times \log\left(\frac{q_{max}}{q_{min}}\right) + \frac{3}{2} \log\left(\frac{\lambda'^2 + q_{max}^2}{\lambda'^2 + q_{min}^2}\right) \\ & + \frac{\lambda'^2}{2} \left(\frac{1}{\lambda'^2 + q_{max}^2} - \frac{1}{\lambda'^2 + q_{min}^2}\right) \end{aligned} \quad (73.2)$$

حيث: $\lambda' = \frac{1}{\lambda_T}$

تؤول المعادلة (73.2) من أجل $\frac{\lambda'}{2K} \rightarrow +\infty$ إلى العبارة النهائية لسعة مؤثر التصادم الإلكتروني لتفاعل داتش وتكتب على النحو التالي:

$$\begin{aligned} \Phi = & -\frac{16\pi^2}{3} N_e Z^2 \left(\frac{e^2}{\hbar}\right)^2 \left(\frac{1}{\pi}\right)^{3/2} \left(\frac{1}{v}\right) \\ & \int y dy \exp(-y^2) \log\left(\frac{q_{max}}{q_{min}}\right) \end{aligned} \quad (74.2)$$

ويمكن صياغة (74.2) على النحو التالي:

$$\begin{aligned} \Phi = & -\frac{16\pi^2}{3} N_e Z^2 \left(\frac{e^2}{\hbar}\right)^2 \left(\frac{1}{\pi}\right) \left(\frac{1}{v}\right) \\ & \int y dy \exp(-y^2) \log\left(\frac{g^2 + \rho_{max}^2}{g^2 + \rho_{min}^2}\right) \end{aligned} \quad (75.2)$$

حيث: $g = \left(\frac{2mZEe^2}{2K^2\hbar^2}\right)$

تغيير متغير $y dy = v dv$ حيث $y = v_e/v$ و $v = \sqrt{\frac{2K_B T}{m_e}}$

وعموما بكل بساطة نأخذ $\rho_{max} = \lambda_D$ حيث λ_D طول ديباي أي القيمة الأعظمية لوسيط الصدم

من فييل $\lambda_D = \frac{\sqrt{2/3h(n_a^2 - n_b^2)}}{(z_{em}+1)m}$ حيث n_a و n_b الأعداد الكمية الرئيسية للمستوي الأعلى و الأقل منه حيث $n_b = 1$ و $n_a = 2$

3.14.2 طاقة كيون التفاعل دائش المحجب:

(screened Dutch reaction potential energy)

طاقة كيون لتفاعل دائش المحجب هي عبارة عن طاقة كيون تفاعل كولومب $\Phi_{Corr}(r)$ ، أضيف لها تصحيح كومي بغرض إدخال الفعل الكومي على المسافات الصغيرة القريبة من الأيون أي أن المسافات البعيدة عن الأيون تسلك نفس سلوك تفاعل كيون كولومب، اما في المسافات القريبة فيدخل التصحيح الكومي بعين الاعتبار $\Phi_{Corr}(r)$ ، أما المعامل $(-r/\lambda_D)$ فدوره إدخال فعل المحجب لديباي، وعليه فإن طاقة تفاعل كيون دائش المحجب تكتب كما يلي [5]:

$$U_{ie}^{SD} = (\Phi(r)_{coulomb} + \Phi(r)_{corr}) (exp(-r/\lambda_D)) \quad (76.2)$$

$$\Phi_{Coulomb}(r) = \frac{Ze^2}{r} \quad (77.2)$$

$$\Phi_{Corr}(r) = \frac{Ze^2}{r} (-r/\lambda_T) \quad (78.2)$$

وبتعويض المعادلتين (78.2) و (77.2) في المعادلة (76.2) تصبح كالاتي:

$$U_{ie}^{SD} = -\frac{Ze^2}{r} (1 - exp(-r/\lambda_T)) (-r/\lambda_D) \quad (79.2)$$

بعد إجراء عدة حسابات و بالإستناد إلى العمل المنجز في المرجع [5] نجد علاقة سعة مؤثر التصادم الإلكتروني لدائش المحجب كالاتي:

$$\begin{aligned} \Phi = & -\frac{16\pi^{\frac{1}{2}}}{3} NZ^2 \left(\frac{e^2}{\hbar}\right)^2 \left(\frac{1}{\pi}\right) \left(\frac{1}{v_e}\right) \int y dy \exp(-y^2) \\ & \left[\frac{(\lambda_D + \lambda_T)^2}{2} \left[\frac{q_{min}^2 - q_{max}^2}{((\lambda_D + \lambda_T)^2 + q_{max}^2)((\lambda_D + \lambda_T)^2 + q_{min}^2)} \right] \right. \\ & + \log \left(\frac{\lambda_D^2 + q_{max}^2}{\lambda_D^2 + q_{min}^2} \right) \left[\frac{1}{2} + \frac{\lambda_D^2}{\lambda_D^2 - (\lambda_D + \lambda_T)^2} \right] \\ & + \frac{\lambda_D^2 (q_{min}^2 - q_{max}^2)}{2(\lambda_D^2 + q_{max}^2)(\lambda_D^2 + q_{min}^2)} \\ & \left. + \log \left(\frac{(\lambda_D + \lambda_T)^2 + q_{max}^2}{(\lambda_D + \lambda_T)^2 + q_{min}^2} \right) \left[\frac{1}{2} - \frac{(\lambda_D + \lambda_T)^2}{\lambda_D^2 - (\lambda_D + \lambda_T)^2} \right] \right] \quad (80.2) \end{aligned}$$

تعطى:

$$q_{max}^2 = \left(\left(1 + \frac{\rho_{max}^2}{g^2}\right) / 4k^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (81.2)$$

$$q_{min}^2 = \left(\left(1 + \frac{\rho_{min}^2}{g^2}\right) / 4k^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (82.2)$$

4.14.2 طاقة كيون التفاعل دائش الفعال:

(Effective Dutch reaction potential energy)

هو تفاعل يتعلق بالتأثير الجماعي حيث نأخذ في الاعتبار تفاعل الإلكترون الحر في البلازما مع المكونات الأخرى أين تكون الدرجة الحرارة عالية. نعتبر تفاعل إلكترون-إلكترون وتفاعل إلكترون وأيونات الموزعة بانتظام واستمرار، وتفاعل إلكترون مع الأيون ، مجموع هذه التفاعلات نعتبر عنه بطاقة كيون لدائش الفعال ونعطي الصيغة النهائية لمؤثر التصادم كما يلي:

$$\Phi = -\frac{16\pi^2}{3}NZ^2 \left(\frac{e^2}{\hbar}\right)^2 \left(\frac{1}{\pi}\right) \left(\frac{1}{v}\right) \int y dy \exp(-y^2) (G(q_{max}) - G(q_{min})) \quad (83.2)$$

حيث أن:

$$v = \sqrt{\frac{2K_B T}{m_e}}$$

$$G(x) = x^2 + \frac{1}{4}x^4 - \frac{a^6 - 2a^8 - 3a^4b^2 - 2a^4b^4 + 4a^4b^2}{2b^6 - 2a^6 - 6a^2b^4 + 6a^4b^2} \ln(a^2 + x^2) - \frac{2b^8 - b^6 + 3a^2b^4 - 4a^2b^6 + a^4b^4}{2b^6 - 2a^6 - 6a^2b^4 + 6a^4b^2} \ln(b^2 + x^2) + \frac{a^2b^6 + a^6b^2 + a^6x^2 + b^6x^2}{D}$$

$$D = 2a^2b^6 - 4a^4b^4 + 2a^6b^2 + 2a^4x^4 + 2a^6x^2 + 2b^4x^4 + 2b^6x^2 - 4a^2b^2x^4 - 2a^2b^4x^2 - 2a^4b^2x^2$$

15.2 حساب خط الطيف ليمان α : $Ly - \alpha$

لحساب خط الطيف ليمان نأخذ قيمة لدرجة الحرارة والكثافة الإلكترونية حيث تم الإستناد على التعريض الإلكتروني فقط لإنشاء خط الطيف ويحسب خط ليمان α من الشكل [11]:

$$I(\omega) = \frac{\Phi}{(\omega^2 + \Phi^2)} \quad (84.2)$$

$$I_{max} = \frac{1}{\Phi} \rightarrow \omega = 0 \quad (85.2)$$

ولدينا سعة مؤثر التصادم تمثل نصف العرض حيث:

$$\frac{I_{max}}{2} = \frac{1}{2\Phi} = \frac{1}{\Phi} \rightarrow \omega = 0 \quad (86.2)$$

من العلاقة (86.2) نستنتج:

$$\begin{aligned} \Phi^2 + \omega^2 &= 2\Phi^2 \\ \Phi^2 &= \omega^2 \\ \omega &= +\Phi \\ \omega &= -\Phi \end{aligned} \quad (87.2)$$

$$(88.2)$$

16.2 الخلاصة:

لقد تعرضنا في هذا الفصل للتفاعل المتبادل بين الجسيمات في البلازما وتكمن أهمية معرفتها إلى دراسة التصادمات المرنة وغير المرنة عيائت و مجهريا وكيفية معالجة الجسيمات في البلازما والحساب النظري بالإستناد إلى دراسة سابقة يتم فيه حساب النظري والدراسة التحليلية لسعة مؤثر التصادم الإلكتروني لطاقات كمن التفاعل كولومب، طاقة كمن التفاعل داتش ، طاقة كمن التفاعل داتش المحجب، طاقة كمن تفاعل داتش الفعال، وحساب خط الطيف $Ly - \alpha$.

المراجع

- [1] Y.P.Nikitin ,N.V.Mokhov, A.N. kalinovskii, Passage of Haigh Energy Particles. trough Matter, springer and science Business Media, 1989.
- [2] محاضرات.أ.د. إبراهيم سعد الله، في فيزياء البلازما الأولى ماستر، جامعة الوادي -2019.
- [3] Nikolai Mokhov, Femilab, Interaction of Particles With Matter, The CERN Accelerator School, 2006.
- [4] محاضرات محمد شهاب أحمد الخزرجي، تفاعل مادة إشعاع، <http://db.tajribaty.com>
- [5] عباسة حكيم، دوال الترابط في البلازما، رسالة دكتوراه، جامعة قاصدي مرباح ورقلة -2018.
- [6] cours de mécanique système isolé de deux corps <https://www.physagreg.fr>
- [7] Assaf iman, Effet des condition aux limites sur la programmation du streamer positif dans l'azote, Université des sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2015/2016.
- [8] Janes Rutherford, Gerald Holton, David Cossidy, COMPRENDRE LA PHYSIQUE, PUR Press Polytechniques, 2015.
- [9] Alexander Fridman, Plasma Chemistry, First published, 2008.
- [10] <https://engineersfield.com> موقع تصفح.
- [11] غزال آمال، حساب مؤثر التصادم الإلكتروني في البلازما: تطبيق على أشباه الهيدروجين، رسالة دكتوراه، جامعة قاصدي مرباح ورقلة-2018.
- [12] Claude As langul, Mécanique quantique, De Boeck, 2016.
- [13] Douglas C. Giancoli, Mécanique Et Thermodynamique, De Boeck, 1993.

الفصل 3

تحليل النتائج والتطبيق على طيف ليمان α لـ Li^{+2}

1.3 مقدمة:

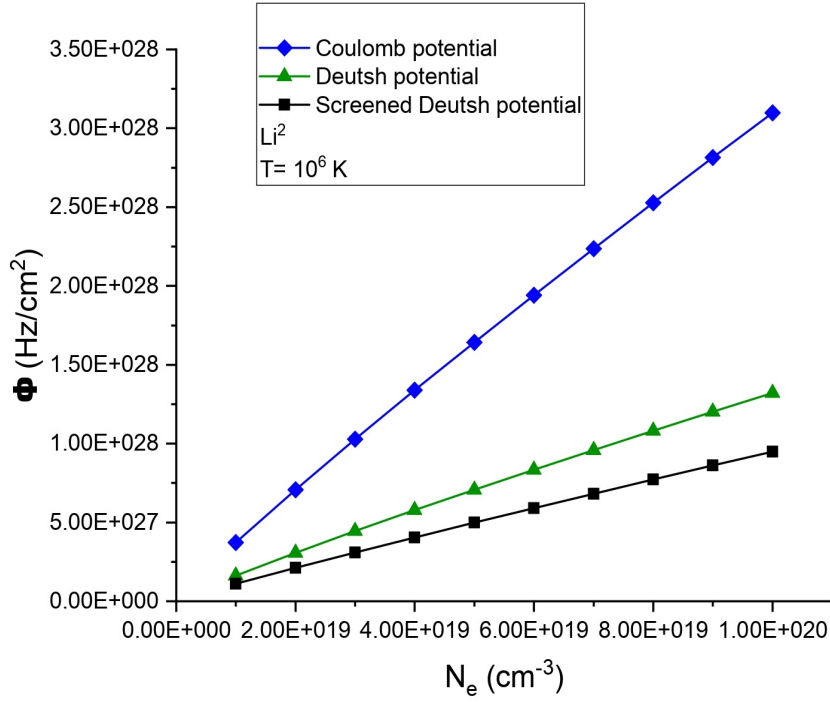
تم في الفصل السابق حساب سعة مؤثر التصادم الإلكتروني على تفاعل إلكترون Li^{+2} بالإستناد إلى العمل المنجز في المذكرة [?]، وبعدها وصلنا إلى عدة علاقات يتم برمجتها عدديا بلغة *matlab*، وذلك لحساب سعة مؤثر التصادم الإلكتروني وعلاقته بالوسائط الفيزيائية لكل طاقة من طاقات كمون تفاعل وصولا إلى إنشاء خط الطيف، والنتائج المتحصل عليها سنقوم بتحليلها ومقارنتها في هذا الفصل حيث سنهتم بتأثير المقادير الفيزيائية على سعة مؤثر التصادم الإلكتروني، درجة الحرارة، الكثافة الإلكترونية والعدد الشحني وذلك للطاقات الثلاثة: طاقة كولومب، طاقة داتش وطاقة داتش المحجب وإجراء المقارنة فيما بينهم.

2.3 تأثير المقادير الفيزيائية على سعة مؤثر التصادم الإلكتروني:

1.2.3 الكثافة الإلكترونية:

الشكل (1.3) يوضح تغيرات الكثافة الإلكترونية لكل من طاقة كمون كولومب، طاقة تفاعل داتش و طاقة كمون داتش المحجب عند تثبيت قيمة درجة الحرارة $T = 10^6 K$ و العدد الكمي الرئيسي بين المستوي الأعلى والأدنى منه $n = n_a^2 - n_b^2$ حيث: $n = 3, n_b = 1, n_a = 2$ ، نلاحظ أن سعة التصادم الإلكتروني تناسب طردا مع كثافة الإلكترونات لحالات طاقات الكمون الثلاث، يرجع هذا التناسب إلى أن عدد التصادمات في وحدة الزمن تتناسب مع الكثافة الإلكترونية، كما نلاحظ أن سعة مؤثر التصادم الإلكتروني في طاقة كمون كولومب أكبر بكثير من طاقتي كمون داتش و داتش المحجب حيث هاتين الأخيرتين متقاربتين، ويرجع هذا الاختلاف إلى نوع طاقة

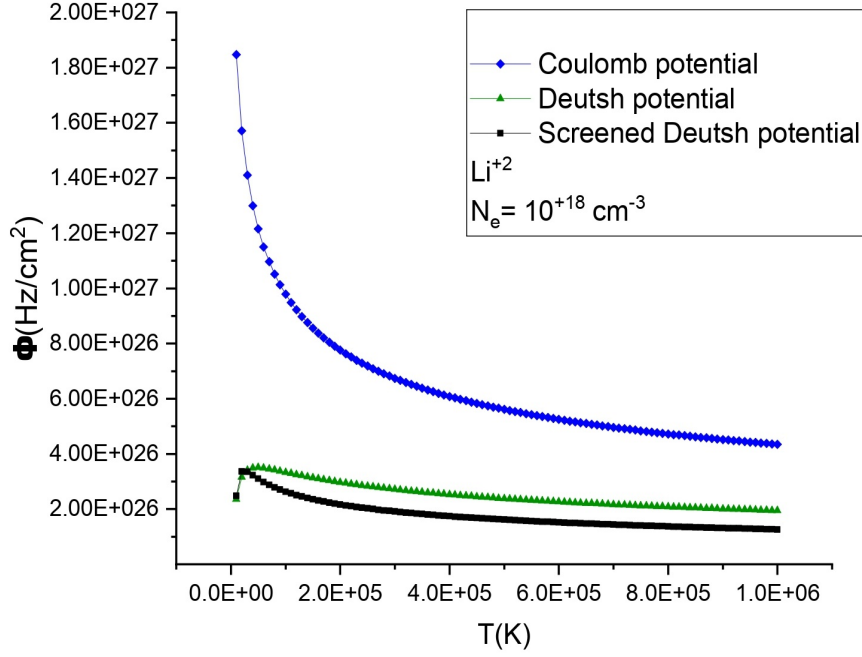
التفاعل الذي يؤدي إلى إختلاف التصادم وإختلاف التفاعل، يعني أن صيغة التفاعل تؤثر بشكل مباشر على مسار الإلكترونات.



شكل 1.3: تغيرات سعة مؤثر التصادم الإلكتروني بدلالة الكثافة الإلكترونية.

2.2.3 درجة الحرارة:

الشكل (2.3) يوضح تغيرات درجة الحرارة الإلكترونية لكل من طاقة كمولمب وطاقة كمولمب تفاعل داتش، طاقة كمولمب تفاعل داتش المحجب لأيون الليثيوم Li^{+2} عند تثبيت الكثافة الإلكترونية $N_e = 10^{18} cm^{-3}$ وقيم مختلفة لعامل الحرارة، نلاحظ أن سعة مؤثر التصادم الإلكتروني تتناقص تدريجياً بزيادة درجة الحرارة و يؤدي ذلك إلى زيادة في الطاقة الحركية للإلكترونات و هذا التناقص يؤثر بشكل كبير على طاقة كمولمب تفاعل كمولمب بالمقارنة بطاقتي داتش و داتش المحجب نلاحظ عندهما تناقص طفيف لسعة مؤثر التصادم الإلكتروني.

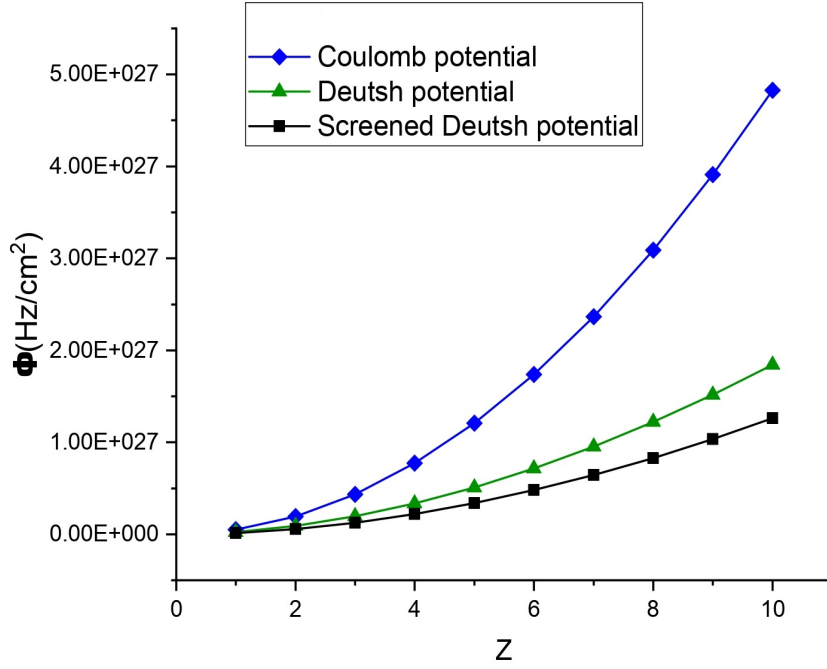


شكل 2.3: تغيرات سعة مؤثر التصادم الإلكتروني بدلالة درجة الحرارة .

3.2.3 العدد الشحني Z :

يمثل الشكل (3.3) تغيرات سعة مؤثر التصادم الإلكتروني بدلالة العدد الشحني، لكل من طاقة تفاعل كولومب، طاقة تفاعل داتش وطاقة كيون داتش المحجب من أجل قيم مختلفة للعدد الشحني $Z = 1, Z = 2, Z = 3, \dots, Z = 10$.

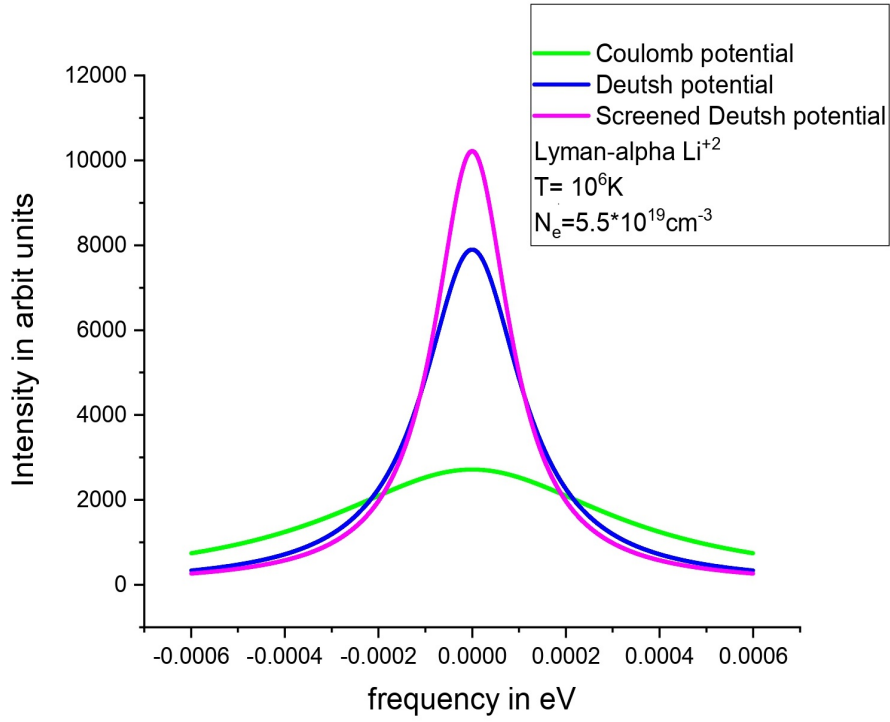
في ثوب درجة الحرارة و الكثافة الإلكترونية، نلاحظ سعة مؤثر التصادم الإلكتروني تتزايد بتزايد العدد الشحني Z لطاقات الكيون الثلاث، ويظهر التزايد بشكل كبير على طاقة كيون تفاعل كولومب بالمقارنة مع بقية الطاقات ويعود هذا الاختلاف إلى طبيعة المحجب أي ذلك بزيادة العدد الشحني Z يزيد عدد الإلكترونات وتسرّب هذه الأخيرة وتشكل سخابة تنقص التفاعلات الحادثة تعرف بالحالة المثالية أي تفاعل كولومب .



شكل 3.3: تغيرات سعة مؤثر التصادم الإلكتروني بدلالة العدد الشحني.

3.3 خط ليمان α ل Li^{+2} :

يوضح الشكل (4.3) خط الطيف ليمان α لأيون الليثيوم في حالة $N_e = 5.5^{19} cm^{-3}$ و $T = 10^6$ تم القيام بإنشاء ثلاث خطوط الطيف يتوافق كل منها مع طاقات كمون التفاعل: طاقة كمون كولومب، طاقة كمون داتش وطاقة كمون داتش المحجب، نلاحظ أن كل ما ضاق مجال التردد ω زادت نسبة الشدة $I(\omega)$ ونرى هذه الزيادة بشكل واضح في تفاعل داتش المحجب أقل منها بنسبة قليلة طاقة كمون تفاعل داتش وتظهر زيادة طفيفة في نسبة الشدة في طاقة كمون كولومب لقد تم في هذه الدراسة الإهتمام بالتعريض الإلكتروني فقط وذلك لإنشاء خط الطيف من الملاحظ أن صيغة التفاعل تؤثر بصفة مباشرة على مسار الإلكترونات الحرة.



شكل 4.3: يوضح خط الطيف ليمان α لأيون الليثيوم Li^{+2}

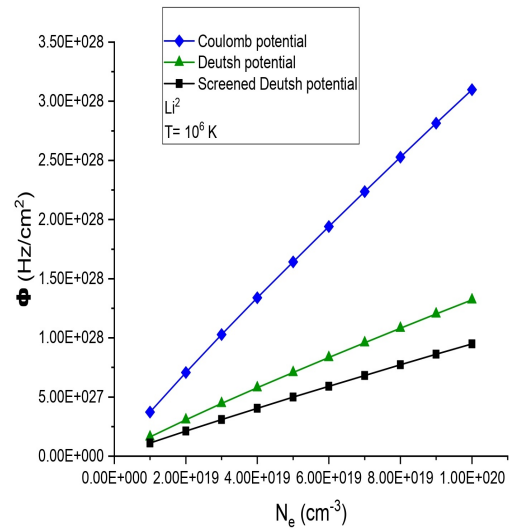
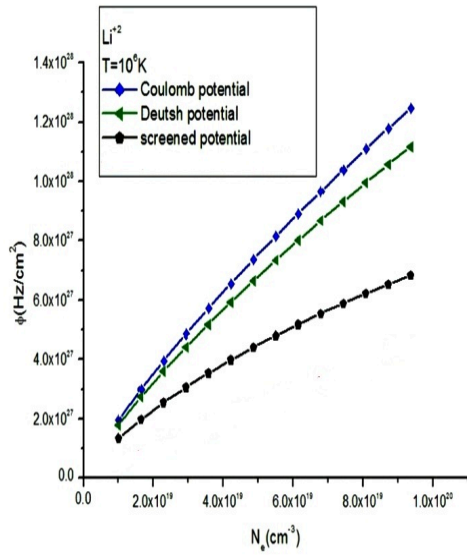
4.3 مقارنة النتائج :

1.4.3 مقارنة تغيرات سعة مؤثر التصادم الإلكتروني بدلالة الكثافة الإلكترونية لعملنا وعمل غزال أمال:

يتبين لنا من خلال الشكل (5.3) أن هناك تطابقاً من حيث السلوك (نسق في الشكل) حيث هناك تزايد لطاقت الكمون الثلاث وهذا راجع إلى التناسب الطردي بين عدد التصادمات في وحدة الزمن مع الكثافة الإلكترونية كما نلاحظ أن طاقة كولومب في كلتا الدراستين الأعلى مقارنة بالطاقت الأخرى حيث يظهر الإختلاف في القيم بين عملنا وعمل غزال أمال في الجدول (1.3).

جدول 1.3: المقارنة بين عملنا وعمل غزال أمال عند الكثافة الإلكترونية $N_e = 7.10^{19}$ لكل من طاقت الكمون الثلاث.

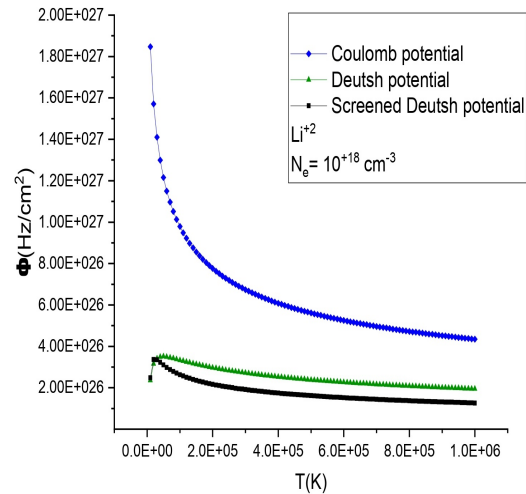
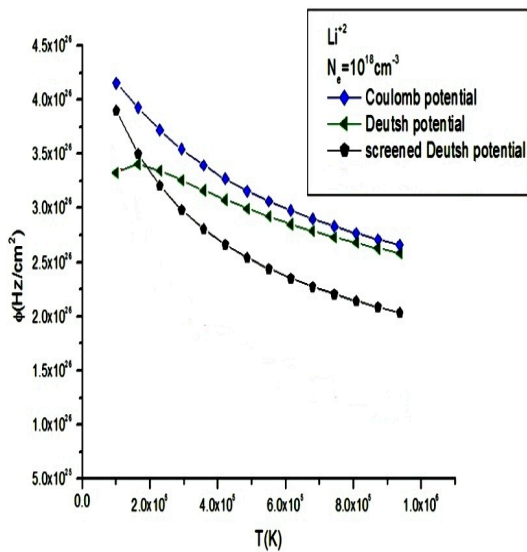
المقدار الفيزيائي	طاقة كمون التفاعل	عملنا	عمل غزال أمال
$N_e = 7.10^{19}$	كولومب	$2.236.10^{28}$	$9.651.10^{27}$
	داتش	$9.590.10^{27}$	$8.680.10^{27}$
	داتش المحجب	$6.814.10^{27}$	$5.540.10^{27}$



شكل 5.3: تغيرات سعة مؤثر التصادم الإلكتروني بدلالة الكثافة الإلكترونية لعملنا وعمل غزال أمال.

2.4.3 مقارنة تغيرات سعة مؤثر التصادم الإلكتروني بدلالة درجة الحرارة لعملنا وعمل غزال أمال:

يتبين لنا من خلال الشكل (6.3) أن هناك تطابقاً من حيث السلوك كما تتزايد طاقات الكمون الثلاث وهذا يعود إلى زيادة الطاقة الحركية للإلكترونات، كما نلاحظ أن طاقة كولومب في كلتا الدراستين الأعلى مقارنة بالطاقات الأخرى حيث يظهر الاختلاف في القيم بين عملنا وعمل غزال أما في الجدول (2.3) والسبب الرئيسي هو في اختلاف البرمجة العددية.



شكل 6.3: تغيرات سعة مؤثر التصادم الإلكتروني بدلالة درجة الحرارة لعملنا وعمل غزال أمال.

جدول 2.3: يوضح المقارنة بين عملنا وعمل غزال أمال عند درجة الحرارة $T = 5.5.10^5$ لكل من طاقات الكمون الثلاث.

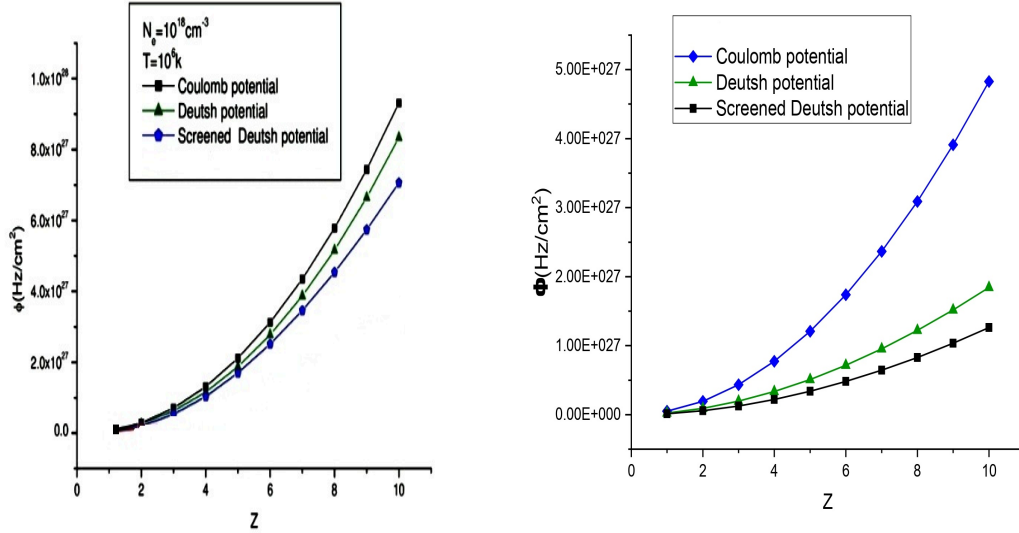
المقدار الفيزيائي	طاقة كمون التفاعل	عملنا	عمل غزال أمال
$T = 5.5.10^5$	كولومب	$5.421.10^{26}$	$3.063.10^{26}$
	داتش	$2.319.10^{26}$	$2.922.10^{26}$
	داتش المحجب	$1.562.10^{26}$	$2.441.10^{26}$

3.4.3 مقارنة تغيرات سعة مؤثر التصادم الإلكتروني بدلالة العدد الشحني لعملنا وعمل غزال أمال:

يتبين لنا من خلال الشكل (7.3) أن هناك تطابقاً من حيث السلوك تزايد طاقات الكمون الثلاث والسبب المذكور مسبقاً كما نلاحظ أن طاقة كولومب في كلتا الدراستين الأعلى مقارنة بالطاقات الأخرى حيث يظهر الاختلاف في القيم بين عملنا وعمل غزال أمال في الجدول (3.3).

جدول 3.3: المقارنة بين عملنا وعمل غزال أمال عند العدد الشحني $Z = 10$ لكل من طاقات الكمون الثلاث.

المقدار الفيزيائي	طاقة كمون التفاعل	عملنا	عمل غزال أمال
$Z = 10$	كولومب	$4.847.10^{27}$	$9.657.10^{27}$
	داتش	$1.879.10^{27}$	$7.223.10^{27}$
	داتش المحجب	$1.332.10^{27}$	$6.750.10^{27}$



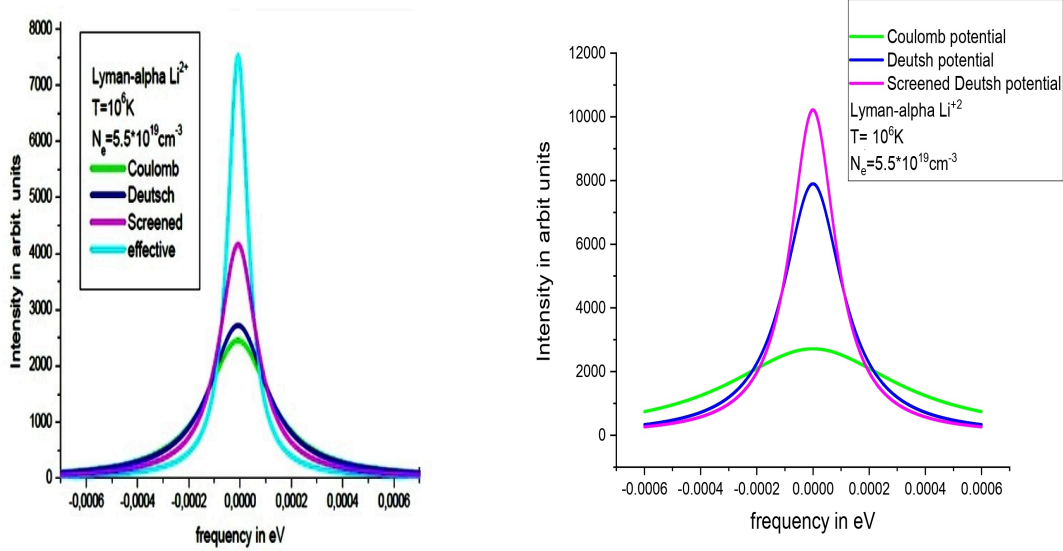
شكل 7.3: تغيرات سعة مؤثر التصادم الإلكتروني بدلالة العدد الشحني لعملنا وعمل غزال أمال.

5.3 مقارنة خط ليمان α لـ Li^{+2} لعملنا وعمل غزال أمال:

يتبين لنا من خلال الشكل (8.3) أن هناك تطابقاً من حيث السلوك تزايد طاقات الكمون الثلاث حيث أن طاقة كمون دانتش المحجب تمثل أعلى قيمة في كلتا الدراستين وهذا راجع إلى صيغة التفاعل تؤثر بشكل مباشر على مسار الإلكترونات وكذلك الإهتمام فقط بالتعريض الإلكتروني وحيث يظهر إختلاف في قيم موضحة في الجدول (4.3).

جدول 4.3: يوضح المقارنة بين عملنا وعمل غزال أمال عند القيمة العظمى للشدة.

المقدار الفيزيائي	طاقة كمون التفاعل	عملنا	عمل غزال أمال
$I(\omega)$	كولومب	$2.716 \cdot 10^3$	$2.456 \cdot 10^3$
	دانتش	$7.897 \cdot 10^3$	$2.723 \cdot 10^3$
	دانتش المحجب	$1.021 \cdot 10^4$	$4.163 \cdot 10^3$



شكل 8.3: خط الطيف ليمان α لأيون الليثيوم Li^{+2} لعملنا ولعمل آخر.

6.3 الخلاصة :

لقد قمنا في هذا الفصل بتحليل و مناقشة النتائج المتحصل عليها في دراسة تغيرات سعة مؤثر التصادم لطاقت الكمون الثلاث مع إجراء المقارنة بينهم وبين عمل غزال آمال.

الخلاصة العامة

نخلاصة يمكننا القول أننا تمكنا من دراسة عامة حول التصادمات المرنة وغير المرنة فلقد قمنا أولاً بتقديم عرض موجز للإشكالية التي بنينا على أساسها هذه المذكرة المتمثل في التصادمات المرنة وغير المرنة الناتجة عن تصادم الجسيمات أو الأجسام و كذلك الدراسة التحليلية لأهم مقدار فيزيائي و المتمثل في سعة مؤثر التصادم الإلكتروني لطاقات كمون التفاعل.

مهدنا لموضوعنا بعرض موجز حول عموميات البلازما فتحدثنا عن ماهيتها وخصائصها وأهم مقاديرها و وسائطها والمقاربات المستخدمة لوصفها، كما تطرقنا في هذه المذكرة بشرح التفاعلات المتبادلة بين الجسيمات في البلازما وطرق إنتقال الطاقة وهذا السبيل يقودنا إلى الدخول في التصادمات ودراستها ماكروسكوبيا و ميكروسكوبيا ودراستها نظريا وكيفية معالجة ظاهرة التصادم في البلازما، وبالإستعانة إلى العمل المنجز سابقا بحساب سعة مؤثر التصادم الإلكتروني لتصادم إلكترون مع أيون Li^{+2} شبيهه بالهيدروجين بإستخدام دراسة تحليلية، كما تمكنا بإعداد برنامج عددي بلغة *matlab* والنتائج المتحصل عليها كانت عبارة عن منحنيات وجداول لمختلف طاقات كمون التفاعل الثلاث طاقة كمون التفاعل كولومب، طاقة كمون التفاعل داتش وطاقة كمون التفاعل لداتش المحجب في درجة الحرارة والكثافة الإلكترونية، كما أخذنا بعين الإعتبار الفعل الكهومي على المسافات الصغيرة كما أن سعة المؤثر تدرس في إطار تقريب الصدم.

من هذه الدراسة تبين لنا أنه يمكن تحسين الدراسة التحليلية لسعة مؤثر التصادم الإلكتروني وبالتالي تحسين البرمجة العددية كآفاق لهذه الدراسة يمكن أخذ طاقة تفاعل أخرى غير طاقة داتش و كذلك الأخذ بعين الإعتبار لجميع التفاعلات الناتجة عن تصادم القذيفة بالهدف.

الملخص

لقد تم في هذا العمل دراسة التصادمات المرنة وغير المرنة بين الأجسام والجسيمات وقد تركزت دراستنا على دراسة التصادمات غير المرنة بين الجسيمات في البلازما ، وذلك بإعتبار الفعل الكمومي على المسافات الصغيرة، وتم حساب سعة مؤثر التصادم الإلكتروني لتصادم إلكترون بأيون الليثيوم Li^{+2} لطاقت كمون التفاعل الثلاث طاقة كمون التفاعل لكولومب، داتش و داتش المحجب وصولا لخط الطيفي ليمان α الذي يعطي فكرة عن التفاعلات التي تحدث بين الجسيمات المشحونة في البلازما، والنتائج المتحصل عليها مقبولة بالمقارنة مع عمل غزال أمال. الكلمات المفتاحية: التصادم، التصادم المرن، التصادم غير المرن، سعة مؤثر التصادم الإلكتروني.

Abstract

In this work, elastic and inelastic collisions between objects and particles have been studied. Our study focused on studying inelastic collisions between particles in plasma, considering the quantum action over small distances, and the amplitude of the electronic collision effect was calculated for the collision of an electron with a lithium ion Li^{+2} for the three interaction potential energies, the interaction potential energy of Coulomb, Dutch and Dutch masked to the Lyman spectroscopic line α , which gives an idea of the interactions that occur between charged particles in the plasma, and the results obtained are acceptable in comparison with the work of Ghazel Amal.

key words: the collision, collision elastic, collision inelastic, the electron collision operator amplitude.