رقم الترتيب:

رقم التسلسل:

جامعة قاصدي مرباح بورقلة

كلية الرياضيات وعلوم المادة

قسم الفيزياء

مذكرة ماستر أكاديمي

مجال: علوم المادة

فرع: فيزياء

التخصص: فيزياء نظرية

من إعداد الطالبة: غطاس إلهام نور الإيمان

بعنوان

حساب مشتقات الحقل الكهربائي الموضعي في البلازما باستخدام كمون كلبج Kelbg المصحح

نوقشت يوم: 2024\06\12

أمام لجنة المناقشة المكونة من :

شيحي اسماعيل	أستاذ تعليم عالٍ	جامعة ورقلة	رئيساً
خلفاوي فتحي	أستاذ تعليم عالٍ	جامعة ورقلة	ممتحناً
قريشة سليمة	أستاذ محاضر أ	جامعة ورقلة	مقرراً

2024\2023

الإهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

قال تعالى: {و قل اعملوا فسيرى الله عملكم و رسوله و المؤمنون}

الحمد لله الذي وفقنا لإتمام هذا العمل، و إنه لفضل من الله علينا. فله الحمد حتى يرضى و له الحمد إذا رضي و له الحمد بعد الرضا.

أهدي هذا العمل:

إلى من أحمل إسمه بكل فخر، روح أبي الطاهرة رحمة الله تغشاه (إبراهيم)، الذي مهد لي طريق العلم.

إلى نبع الحنان والعطاء، إلى من جعل الله الجنة تحت قدميها، إلى من غمرتني بحبها حفظها الله، غاليتي أمي (فاطمة بكوش).

إلى سندي في الحياة إخوتي: كمال و زوجته مريم, عبد المؤمن، رشيدة, زينب و حسيبة

إلى الكتاكيت: قصي, آلاء, لجين

إلى أمي الثانية: خديجة بوخلط

إلى رفيق الحياة: ناجم بعضي

إلى كل الأهل، الأحباب، الأصدقاء، أصدقاء الغرفة الجامعية، إلى كل من مد لي يد العون خلال مسيرتي الدراسية، إلى كل من نسيهم قلمي و لم ينسهم قلبي.

خطاس إلهام نور الإيمان

شكر وعرفان

الحمد لله حمداً كثيراً طيباً مباركاً فيه. أولا أحمد الله عز وجل وأشكره حمد الشاكرين فقد كان لي خير معين فيسر لي السبيل لإنجاز هذا العمل على هذا الوجه.

بأسمى عبارات الشكر والعرفان أتقدم بخالص الشكر الجزيل إلى:

الأستاذة المشرفة **قريشة سليمة** أستاذة بجامعة قاصدي مرباح ورقلة لقبولها بأن تكون مؤطرة لي و على مجهوذاتها المبذولة في إنجاز هذا العمل.

أتقدم بفائق الشكر و التقدير إلى أعضاء لجنة المناقشة:

الأستاذ: **شيحي اسماعيل** على قبوله ترؤس لجنة المناقشة. و الأستاذ: **خلفاوي فتحي** على قبوله عضواً ممتحنا للمشاركة في تقييم هذه المذكرة .

الشكر موصول لجميع أساتذة قسم الفيزياء بجامعة قاصدي مرباح و جميع أعضاء محبر الاشعاع و البلازما و فيزياء السطوح الذين ساهموا و حرصو على تكويننا

إلهام نور الإيمان

الفهرس

الإهداء	i
شكر وعرفان	ii
الفهرس	iii
مقدمة عامة	1
الفصل الأول : عموميات حول البلازما	
1.1 مقدمة	3
2.1 لمحة تاريخية	3
3.1 تعاريف البلازما	3
4.1 أمثلة عن البلازما	4
1.4.1 بلازما طبيعية	4
2.4.1 بلازما صناعية	4
5.1 أنواع البلازما	5
1.5.1 بلازما باردة	5
2.5.1 بلازما ساخنة	5
6.1 معايير البلازما	5
1.6.1 تقارب البلازما	6
2.6.1 حجم التفاعلات في البلازما	6
3.6.1 تردد البلازما	6
7.1 خصائص البلازما	6
1.7.1 التوصيل الكهربائي	6
2.7.1 التعادل الكهربائي في البلازما	6
3.7.1 حمل الذبذبات وبث الموجات	6
8.1 بعض المعاملات و المقادير المهمة في منظومة البلازما	7
1.8.1 طول ديباي λ_d	7
2.8.1 تردد البلازما ω_p	7
3.8.1 نصف قطر الكرة الإلكترونية r_i	8
4.8.1 نصف قطر الكرة الأيونية r_e	8
5.8.1 طول لاندو r_0	8
6.8.1 طول موجة دي بروغلي λ_T	9

7.8.1 معامل التزاوج Γ	9
8.8.1 درجة التكميم η	10
الفصل الثاني: كمون كلبج المصحح و حساب دالة توزيع الحقل الكهربائي	
1.2 مقدمة	11
2.2 تفاعل كلبج المصحح	11
3.2 الحساب العددي لدالة توزيع الحقل الكهربائي الموضعي	13
1.3.2 وصف الجملة الفيزيائية	13
2.3.2 وصف برنامج حساب دوال توزيع الحقل الكهربائي الموضعي:	14
3.3.2 محاكاة مونتي كارلو MC	14
4.2 مركبات الحقل الكهربائي الموضعي بإستخدام كمون كلبج المصحح من أجل الحساب العددي MC	15
5.2 نتائج و مقارنات	15
6.2 خلاصة	17
الفصل الثالث:الحساب العددي لدوال توزيع المشتقات الفضائية لمركبات الحقل الكهربائي الموضعي	
1.3 مقدمة	18
2.3 مركبات و مشتقات الحقل الكهربائي الموضعي لكمون كلبج المصحح	18
1.2.3 من أجل: $r \prec r_{min}$	19
2.2.3 من أجل: $r \succ r_{\min}$	20
3.3 وصف برنامج حساب دوال توزيع المشتقات	21
4.3 نتائج و مقارنات	21
1.4.3 سلوك دوال توزيع المشتقات القطرية و اللاقطرية بتغيير معامل التزاوج	22
المراجع	25
خاتمة عامة	26

مقدمة عـامة

تعتبر البلازما أحد أهم المواضيع الحديثة التي أدرجت في الفيزياء في مطلع القرن العشرين (1920). البلازما هي الحالة الرابعة للمادة، و تشكل 99% من المادة الكونية. و حيث أن البلازما تتناول عدداً ضخما من الجسيمات، و لأن الظواهر داخلها تحدث على سلم صغير جداً من الأطوال، فإنه لا يمكننا معالجتها معالجة عينية بل تتم معالجتها إحصائيا[1].

تتم دراسة البلازما من خلال الإشعاع الكهرومغناطيسي الصادر عنها؛ إذ يحلل الطيف الوارد منها لمعرفة العناصر المشكلة للبلازما, معرفة تراكيزها و درجات حرارتها، إذاً يمكننا القول أن دراسة الطيف يعتبر تشخيصاً لفهم البلازما [1-2].

من المعلوم أن أشكال الطيف الصادرة عن البلازما هي نتيجة لتفاعل الجسيمات فيما بينها، مما يؤدّي إلى تعريضها. تتعدد الأسباب التي تؤدي إلى تعريض الخطوط الطيفية نذكر منها: تأثير الحقل الكهربائي الموضعي و هو المعروف بفعل ستارك [1،3]. يتم تضمين تأثير الحقل الكهربائي الموضعي في الصيغة الطيفية برتب مختلفة التقريب؛ فمن الرتبة الأولى يتم بما يعرف بدوال توزيع الحقل الموضعي, أما من الرتبة الثانية فيتم بدوال توزيع مشتقات الحقل الكهربائي الموضعي [1،2].

نسعى في هذا العمل إلى حساب مشتقات دوال الحقل الكهربائي الموضعي في البلازما مستخدمين محاكاة مونتي كارلو، انطلاقا من توظيف صيغة مبسطة لطاقة كمون كلبج بإستخدام نشر تايلور مع بعض التقريبات، ثم حساب دالة توزيع الحقل الكهربائي من أجل الحصول على قيمة الحقل الأكثر احتمالا، لأجل استعمالها في الحصول على دوال توزيع مشتقات الحقل الكهربائي الموضعي.

تتضمن هذه المذكرة مقدمة عامة و ثلاثة فصول و خاتمة.

في الفصل الأول "معارف عن البلازما" قدمنا عموميات عن البلازما, تاريخها, تعاريفها, أشكالها و بعض خصائصها, و أهم المقادير المهمة المستخدمة في البلازما كطول ديباي, طول لاندو, نصف قطر الكرة الأيونية, نصف قطر الكرة الإلكترونية....

أما في الفصل الثاني"كمون كلبج المصحح و حساب دالة توزيع الحقل الكهربائي الموضعي" فسنتناول بإيجاز الخطوات المتخذة من أجل الحصول على صيغة مبسطة لكمون كلبج, إذ ننطلق من نشر تايلور لعبارة الكمون بجوار

الصفر, ثم نذكر بالتفصيل الخطوات المتبعة للحصول على المسافة التي تعتبر الحد الفاصل بين تطبيق كمون كلبج المصحح عند المسافات الصفرية و كمون كولوم عند المالانهاية. سنقدم الحساب العددي لدوال توزيع الحقل الكهربائي الموضعي مستخدمين في ذلك محاكاة مونتي كارلو. سوف نصف الجملة الفيزيائية التي عالجناها ثم نعرض البرنامج الحسابي الذي سنستعمله للحساب.

في الفصل الثالث "حساب دوال توزيع مشتقات الحقول الكهربائية" سنقدم مركبات الحقل و مشتقاتها الفضائية من أجل الحساب العددي بطريقة مونتي كارلو. نشرح الخطوات المتتالية التي يتطلبها إنجاز برنامج بلغة الفورترن يقوم بحساب دوال توزيع المشتقات الفضائية للحقل الكهربائي الموضعي باستخدام محاكاة مونتي كارلو.

في الأخير حوصلة عامة نبرز فيها أهم النتائج التي توصلنا إليها، و الآفاق المحتملة التي قد تكون منطلقات لأعمال أخرى.

الفصل الأول: عموميات حول البلازما

الفصل الأول: عموميات حول البلازما

1.1 مقدمة

البلازما كلمة ذات أصل إغريقي و تعني لغوياً المادة الجلاتينية، و باللغة اليونانية ( ) تعني شيئاً مكوناً وفق نظام معين[3].تعرف البلازما بأنها الحالة الرابعة للمادة لكونها تختلف عن الحالة الصلبة و السائلة و الغازية، فهي حالة مخففة للمادة تشبه الغاز إلا أنها مؤلفة من جسيمات حيادية و أخرى مشحونة؛ إلكترونات و أيونات بتناسب معين يجعل الوسط متعادلاً كهربائيا. [4]. تشكل البلازما 99% من المادة الكونية بين النجوم و المجرات من حيث الكتلة و الحجم, كما أن بعض الكواكب أغلب مادتها تتشكل من البلازما[2]. تشترك كل أنواع البلازما بأنها تخضع و تفسر بنفس الآليات، و تديرها نفس القوانين الفيزيائية.

2.1 لمحة تاريخية

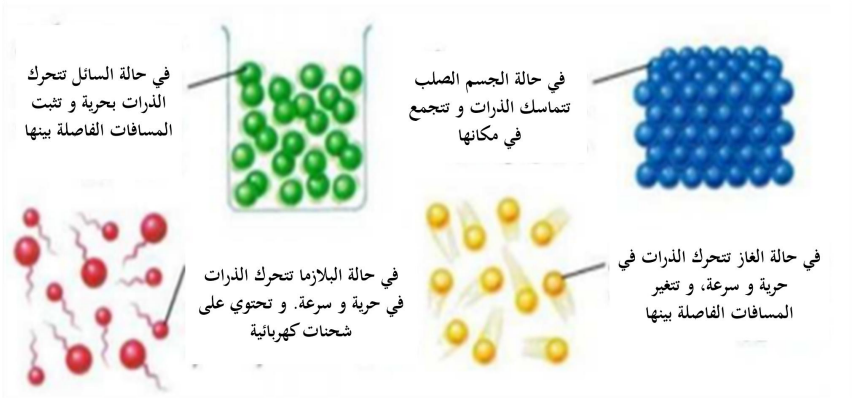
إن أول من اعتبر حالةً رابعةً للمادة هو الفيزيائي الإنجليزي Sir William Crookes عام 1879، و أطلق عليها آنذاك اسم "المادة المشعة"[2]. أُدخِلَ مصطلحُ "البلازما" الفيزياءَ عامَ 1928 من قِبَل الفيزيائي الأمريكي Dr. Irwing Langmuir في مقال له، كَيْ يُعَبِّرَ عن المناطق المتساوية الكمون داخل أنابيب التفريغ الحاوية غازًا مؤيَّنًا متعادلا كهربائيا[5].

3.1 تعاريف البلازما

- ✓ عندما نقوم بتسخين المادة ستتحول من حالة صلبة إلى سائلة ثم إلى غازية, و بزيادة التسخين تبدأ المادة بالتأين، و بذلك سوف يتحرر إلكترون أو أكثر من كل ذرة من الغاز, و هذا ما يدعى بالبلازما[2].
- ✓ البلازما غاز حار جداً مؤين , بحيث تتحلل كل ذراته بواسطة التصادمات العنيفة إلى أيونات موجبة و إلكترونات سالبة[5].

✓ البلازما خليط من الذرات المتعادلة كهربائيا، الإلكترونات السالبة و الأيونات الموجبة. تزداد درجة التأين مع تزايد درجة الحرارة. إن الغاز الإعتيادي يحتوي على بعض الأيونات و الإلكترونات لكنها غير كافية لتجعله بلازما، فإذا قمنا بتسخين مثل هذا الغاز فإنه سيتحول تدريجياً إلى بلازما[5].

يوضح الشكل (1.1): نموذج مبسط للمقارنة بين الحالات الأربع للمادة [6]



الشكل1.1: نموذج مبسط للمقارنة بين الحالات الأربع للمادة

4.1.أمثلة عن البلازما

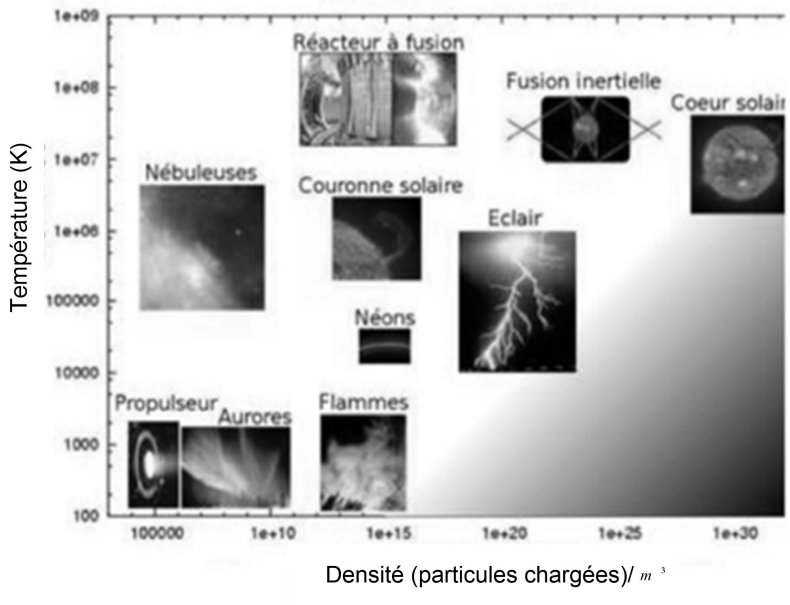
1.4.1. بلازما طبيعية: تكون البلازما الطبيعية في أغلب الأحيان بحالة مثالية, حيث أن متوسط الطاقة الحركية الحرارية لمكوناتها يفوق متوسط الطاقة الكامنة الكهربائية المتبادلة بين جسيماتها، تنقسم إلى كونية و أرضية [4]:

طبيعية كونية: تمثل البلازما الطبيعية الكونية النسبة الكبيرة في هذا الكون؛ كالبلازما الموجودة على سطح الشمس, بلازما سطوح النجوم, بلازما الرياح الشمسية....

طبيعية أرضية: تتواجد على مستوى كوكب الأرض، نسبتها أقل من السابقة، أمثلة عنها: البلازما الموجودة في غلاف جو الأرض (الأينوسفير), البرق, الصواعق, غاز المصابيح الفوسفورية.....

2.4.1.بلازما صناعية: البلازما نادرة جداً في محيطنا القريب, لذلك يُلجأ إلى توليدها صناعياً أمثلة عن ذلك :الغاز في مصابيح التألق, القوس الكهربائي المستخدم في اللحام, الإندماج النووي.....

يوضح الشكل(2.1) مختلف أنواع البلازما بدلالة كثافة الجسيمات المشحونة و درجة الحرارة[7]



الشكل2.1: مختلف أنواع البلازما

5.1. أنواع البلازما

تصنف البلازما حسب درجات الحرارة إلى [8]:

1.5.1. بلازما باردة

هي بلازما ضعيفة التأين؛ أي مؤينة جزئياً؛ تتراوح درجات حرارتها من مئات إلى عدة آلاف من الدرجات المئوية، و بطاقة حركية في حدود (1eV)، يطلق عليها إسم التفريغ في الغازات، و هي النوع المستخدم في أغلب البحوث العلمية.

2.5.1. بلازما ساخنة

تُصنّف البلازما بأنها ساخنة عندما يكون تأينها كبيراً، و تعد الوسط الأساسي الذي يمكن أن تحدث فيه تفاعلات الاندماج النووي. تتراوح درجات حرارتها بين مئات إلى عدة ملايين من الدرجات المئوية، و بطاقة حركية في حدود (10 eV).

6.1. معايير البلازما

إن وصف البلازما بأنها خليط من الجسيمات المتعادلة، الإلكترونات السالبة الشحنة و الأيونات الموجبة، هو وصف ضعيف تعوزه الدقة؛ ذلك أن وسط البلازما يجب أن يخضع إلى ثلاثة معايير و هي[8]:

1.6.1. تقارب البلازما: ينبغي أن تكون الجسيمات المشحونة متقاربة جداً لدرجة أن يؤثر كل جسيم على الجسيمات القريبة منه, فالتأثير الجماعي هي إحدى سمات البلازما.

2.6.1. حجم التفاعلات في البلازما: يجب أن يكون نصف قطر ديباي صغيراً بالمقارنة مع الحجم الطبيعي للبلازما. إن هذا يعني أن مقدار التفاعلات الموجودة في قلب كتلة البلازما لها أهمية كبيرة تفوق تلك الواقعة على الحواف, آخذين بعين الإعتبار ما يحيط بالبلازما من الوسط المحيط بها.

3.6.1. تردد البلازما: يجب أن يكون تردد الإلكترونات في البلازما أكبر بكثير من تردد الإلكترونات بالحالة الطبيعية.

7.1. خصائص البلازما

1.7.1. التوصيل الكهربائي

البلازما غاز شديد التأين، فهي تضم عدداً هائلاً من الجسيمات المشحونة المتحركة بحرية داخلها، لذا تُعد موصلا جيداً للكهرباء. تتبادل الجسيمات المشحونة التأثير مع الحقل الكهرومغناطيسي الموضعي, كما أن الحركة المنظمة لها تحدث تيارات كهربائية و تغيرات لكثافة الشحنة تؤدي إلى نشوء حقول كهرومغناطيسية[5].

2.7.1. التعادل الكهربائي في البلازما

رغم أن البلازما تحتوي على عدد هائل من الشحنات الحرة إلا أنها تبقى متعادلة كهربائياً على المستوى الماكروسكوبي؛ أي أن المجموع الجبري للشحنات الموجبة و السالبة يكون معدوماً. إن مسألة التعادل الكهربائي تتعلق بمدى المسافات المدروسة فعلى السلم الميكروسكوبي لا يكون التعادل الكهربائي قائماً[5].

3.7.1. حمل الذبذبات و حركة الموجات

من الصفات المهمة للبلازما أنها قابلة لحمل الذبذبات و بث الموجات, و يمكن أن تحدث أنواع مختلفة من السلوك التذبذبي. سنذكر حالتين بسيطتين منها[2]:

الموجات الهايدرومغناطيسية: تمثل الموجات الهايدرومغناطيسية موجات حقيقية تنتشر في وسط موصل خاضع لتأثير حقل كهرومغناطيسي ثابت, و هو منسجم مع الصياغة الهايدرومغناطيسية .

الذبذبات الكهروستاتيكية: في الحقيقة يوجد نوعان محتملان من الذبذبات الكهروستاتيكية؛ ذبذبات ذات تردد عال، تكون سريعة جداً و يصعب على الأيونات الثقيلة أن تتبعها. و ذبذبات التردد المنخفض للأيونات البطيئة جداً.

8.1. بعض المعاملات و المقادير المهمة في منظومة البلازما

1.8.1 طول ديباي λ_d

يُعرّف طول ديباي بأنه المسافة التي عندها تقريباً يحدث حجب لتأثير الشحنة. كما يدعى بالبعد الحرج للتفاعلات الجماعية, و هو مقياس الطول الذي يميز فرضية شبه الحياد في البلازما. تتبع الأيونات و الإلكترونات مسارات عشوائية و تتحرك بسرعات كبيرة، الشحنات الموجبة تجذب الإلكترونات و تطرد الأيونات مما يؤدّي إلى ظهور غيمة إلكترونية حولها تقوم بدور حاجز كهروستاتيكي. بسبب التهيج الحراري فإن الشحنات لا يمكنها أن تكون ساكنة تماماً على الأقطاب, بل ستكوّن غيمة غير ثابتة بالقرب من القطب. يتسبب هذا في إخماد حقل كولوم بشكل أسي عند مسافة تقارب طول ديباي[8]. يعطى طول ديباي بالعلاقة التالية:

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{KT}{4\pi e^2 n_e}} \qquad (SI) = 6.9\sqrt{\frac{T}{n_e}} \qquad (Cgs) \qquad (1.1)$$

2.8.1 تردد البلازما ω_p

يوافق تردد البلازما تردد الإهتزاز الطبيعي الكهروستاتيكي النموذجي, فهو المعيار الأساسي للأزمنة في البلازما. عندما يحدث إضطراب داخلي أو خارجي في البلازما, فإنه يؤدي إلى إزاحة الشحنات (الإلكترونات و الأيونات) عن وضع توازنها, و هذا يتسبب في ظهور حقول داخلية معاكسة تعمل على زيادة الحركة الجماعية للشحنات من أجل إعادتها إلى وضع توازنها, تتميز هذه الحركة بتردد طبيعي يدعى بتردد البلازما.

لكل صنف من مكونات البلازما تردد خاص. يعتبر التردد الإلكتروني أكثر أهمية، و هو سريع و عادةً ما يعبر عن تردد البلازما بتردد الإلكترون [8]. يعطى التردد الالكتروني بالعلاقة التالية:

$$\omega_{\mathrm{pe}} = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}} \qquad (SI) = 5.64\times10^4\sqrt{n_e\left(cm^{-3}\right)} \qquad (Cgs) \qquad (2.1)$$

وحدة قياس التردد (التواتر): $\left[\omega_{pe}\right] = Hz$

أما التردد الأيوني في البلازما فيعطى بالعلاقة التالية:

$$\omega_{pi} = \sqrt{\frac{4\pi n_i Z^2 e^2}{m_i}} \qquad (SI) \qquad (3.1)$$

3.8.1 نصف قطر الكرة الأيونية r_i

يميز البعد المتوسط بين أيونين, و يستخرج من المساواة التالية[2]:

$\frac{4}{3}\pi r_i^3 n_i = 1$ ، حيث: n_i الكثافة الأيونية

$$r_i = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi n_i}} \qquad (4.1)$$

4.8.1 نصف قطر الكرة الإلكترونية r_e

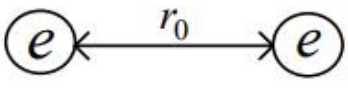
يميز البعد المتوسط بين إلكترونين, يمكن الحصول عليه من خلال [2]:

$\frac{4}{3}\pi r_e^3 n_e = 1$، حيث: n_e الكثافة الإلكترونية

$$r_e = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi n_e}} \qquad (5.1)$$

5.8.1 طول لاندو r_0

يُعرف بالبعد التقريبي للإقتراب الأدنى؛ أي المسافة الممكنة لإقتراب جسيمين من بعضهما البعض، حينها تتساوى الطاقة الكامنة الكولومية المتوسطة للتفاعل الثنائي مع الطاقة الحركية الحرارية المتوسطة، و يستخدم هذا الطول في تحليل ظواهر التصادمات, و ارتباطات الموضع في البلازما. بين إلكترونين يُعطى ب [8]:



الشكل3.1: رسم توضيحي لطول لاندو بين إلكترونين

$$kT = \frac{e^2}{r_0} \Rightarrow r_0 = \frac{e^2}{kT} \qquad (cgs) \qquad (6.1)$$

6.8.1 طول موجة دي بروغلي λ_T

يُعطي هذا الطول تقديراً للطبيعة الموجية الكمية لجسيمات البلازما، و يحسب بالعلاقة التالية [2]:

$$\lambda_T = \frac{h}{\sqrt{2\pi m\, k\, T}} \qquad (7.1)$$

m : كتلة الجسيم، k ثابت بولتزمان

7.8.1 معامل التزاوج Γ

يمثل النسبة بين الطاقة الكامنة المتوسطة لجسيم مع جسيم مجاور له و الطاقة الحركية المتوسطة لهما، فهو مقياس لمدى ترابط الجسيمات في البلازما[5].

معامل التزاوج للإلكترونات:

$$\Gamma_{ee} = \frac{\langle E_P \rangle}{\langle E_C \rangle} = \frac{e^2}{kTr_e} \qquad (cgs) \qquad (8.1)$$

أما بالنسبة للأيونات:

$$\Gamma_{ii} = \frac{e^2}{kTr_i} \qquad (cgs) \qquad (9.1)$$

أما بين الإلكترونات والأيونات:

$$\Gamma_{ei} = \frac{Ze^2}{kTr_{ei}} \qquad (cgs) \qquad (10.1)$$

حيث: $r_{ei} = \frac{r_e + r_i}{2}$

عندما يكون $\Gamma \prec\prec 1$: فإن للطاقة الحركية الدور الأكبر في وصف سلوك الجسيمات؛ أي أن التزاوج بين هذه الجسيمات ضعيف. تتحرك الجسيمات بحرية كبيرة و بتصادمات قليلة مما يعني أن التأثير بينها ضعيفٌ, و تُوصف البلازما بأنها مثالية [4].

عندما يكون $\Gamma \geq 1$: فهذا دليل على أن التزاوج بين جسيمات البلازما شديد, و تُوصف البلازما بأنها مرتبطة [8].

8.8.1 درجة التكميم η

لتمييز أهمية التأثير الكمومي في البلازما تُحسبُ درجة التكميم, و تمثل المقارنة بين طول موجة دي بروغلي الحرارية λ_T و المسافة المتوسطة بين جسيمات البلازما r_e [8].

$$\eta = \frac{\lambda_T}{r_e} = \frac{h}{r_e\sqrt{2\pi m K_B T}} \qquad (11.1)$$

إذا كان $\eta \ll 1$: يمكننا معالجة البلازما كلاسيكيا، إذا كان $\eta \geq 1$: فالتأثيرات الكمومية على المسافات الصغيرة مهمة و لا يكمن إهمالها وتدرس البلازما كموميا.

الفصل الثاني: تفاعل كلبج المصحح و حساب دالة توزيع الحقل الكهربائي

الفصل الثاني: كمون كلبج المصحح و حساب دالة توزيع الحقل الكهربائي

1.2 مقدمة

من المعروف أن تفاعل كولوم غير صالح عند المسافات البينية الصغيرة جداً، لمعالجة ذلك قام Kelbg و زملاؤه عام 1962 بتطوير طريقة الكمون الفعال. فكرة Kelbg تستند على استبدال كمون كولوم بالكمون الفعَال الذي يتم تعريفه أيضاً عند المسافات الصفرية. نجح Kelbg في الحصول على التعبير الصحيح من أجل الدرجة الأولى لـ : e^2 . قامت مجموعة من جامعة روستوك بتطوير نظريته، كما تم اقتراح العديد من التقريبات التي قد تكون أسهل للاستخدام. أُسست أول تقنيات المحاكاة العددية مونتي كارلو (MC) لبلازما كثيفة بناء على الكمون الفعال المقترح من طرف Zelener, و كذا التحريك الجزيئي (MD) المرتكزة على تقريبات Deutsch[9].

في هذا الفصل سنوضح التقريبات التي أُجريت على كمون كلبج للحصول على طاقة التفاعل بين جسيمات البلازما و من ثَمَّ استنتاج عبارة الحقل الكهربائي، يليه الحساب العددي لدالة توزيع الحقل الكهربائي الموضعي باستخدام محاكاة مونتي كارلو و تفاعل Kelbg المصحح الذي توصلنا إليه في عمل سابق[3]، ثم استنباط قيمة الحقل الأكثر احتمالا من أجل استخدامها في حساب دوال توزيع مشتقات الحقل الكهربائي الموضعي في الفصل القادم.

2.2. تفاعل كلبج Kelbg المصحح

ديناميكا البلازما لا تتعلق بفيزياء الأيون المشع فقط بل تتعداه للبلازما المحيطة بهذا الأيون. الكمون الكهربائي الناتج عن شحنة نقطية Ze عند موضع r في البلازما يختلف عن كمونها في الفراغ الذي يعطي بقانون كولوم:

$$U(r) = Ze/r \qquad (1.2)$$

تُعرّف طاقة تفاعل كلبج بين جسيمين i و j تفصلهما مسافة r بالعلاقة التالية[9].

$$U_{\text{ij Kelbg}}(r) = Z_i Z_j e^2 \left(\frac{1-exp\left(-r/\lambda_T^2\right)}{r} + \frac{\sqrt{\pi}}{\gamma_{ij}\lambda_T}\left(1-erf\left(\gamma_{ij} r/\lambda_T\right)\right)\right) \qquad (2.2)$$

حيث: λ_T طول موجة ديبروغلي الحرارية, $erf\left(\gamma_{ij} r/\lambda_T\right)$ تدعى دالة الخطأ, بينما γ_{ij} له القيمة $\gamma_{ij} = \frac{U_{ij}^{Kelbg}(0)}{U_{ij}^{\text{Exact}}(0)}$ حسب العبارة الأصلية لكلبج.

نشر تايلور لعبارة طاقة كلبج (2.2) بجوار الصفر بحيث، $\gamma_{ij} \prec 1$ و $r \prec \lambda_T$ يكتب كما يلي:

$$\widetilde{U}_{Kelbg}(r) \simeq e^2\left(\frac{r}{\lambda_T^2} - \frac{r^3}{2\lambda_T^4} + \frac{\sqrt{\pi}}{\gamma_{ij}\lambda_T}\left(1 - \frac{2\gamma_{ij} r}{\lambda_T\sqrt{\pi}} + \frac{2\gamma_{ij}^3 r^3}{3\lambda_T^3\sqrt{\pi}}\right)\right)$$

$$= \frac{e^2}{\lambda_T}\left(\frac{\sqrt{\pi}}{\gamma_{ij}} - \frac{r}{\lambda_T} + \left(\frac{2}{3}\gamma_{ij}^2 - \frac{1}{2}\right)\frac{r^3}{\lambda_T^3}\right) \qquad (3.2)$$

مقاربتنا تقودنا للبحث عن $r_{\min}$ و هو الحد الفاصل بين تطبيق كمون كلبج المصحح عند المسافات الصفرية و كمون كولوم عند المالانهاية. يُحسب $r_{\min}$ من شرط استمرارية دالة الكمون.

من شرط استمرارية الكمون عند $r_{\min}$, يمكننا كتابة المساواة الآتية:

$$\frac{e^2}{\lambda_T}\left(\frac{\sqrt{\pi}}{\gamma_{ij}} - \frac{r}{\lambda_T} + \left(\frac{2}{3}\gamma_{ij}^2 - \frac{1}{2}\right)\frac{r^3}{\lambda_T^3}\right) = \frac{e^2}{r} \qquad (4.2)$$

بعد إعادة ترتيب حدود المساواة نحصل على المعادلة التالية:

$$\left(\frac{2}{3}\gamma_{ij}^2 - \frac{1}{2}\right)\frac{r^4}{\lambda_T^4} - \frac{r^2}{\lambda_T^2} + \frac{\sqrt{\pi}}{\gamma_{ij}}\frac{r}{\lambda_T} - 1 = 0 \qquad (5.2)$$

لتبسيط العبارة نضع: $x = \frac{r}{\lambda_T}$, وبهذا تكون المعادلة (5.2) كما يلي:

$$\left(\frac{2}{3}\gamma_{ij}^2 - \frac{1}{2}\right)x^4 - x^2 + \frac{\sqrt{\pi}}{\gamma_{ij}}x - 1 = 0 \qquad (6.2)$$

لقد تحصلنا على معادلة من الدرجة الرابعة, سنقوم بحلها و نختار الحلول التي تحقق: $r \prec \lambda_T$ مع $\gamma_{ij} \prec 1$

من أجل $\gamma_{ij} = 0.6$, يوجد حل للمعادلة (6.2) و هو أقل من λ_T و يساوي:

$$x = 0.392854922 \Rightarrow r_{\min} = 0.3928545922\ \lambda_T$$

من أجل $\gamma_{ij} = 0.8$, يوجد حل للمعادلة (6.2) و هو أقل من λ_T و يساوي:

$$x = 0.6446180623 \Rightarrow r_{\min} = 0.6446180623\lambda_T$$

من أجل $\gamma_{ij} = 0.9$, يوجد حل للمعادلة (6.2) و هو أقل من λ_T و يساوي:

$$x = 0.9452273652 \Rightarrow r_{\min} = 0.9452273652\lambda_T$$

من أجل $\gamma_{ij} = 0.91$, يوجد حل للمعادلة (6.2) لكنه أكبر من λ_T و يساوي:

$$x = 1.00117108 \Rightarrow r_{\min} = 1.0017108\lambda_T$$

ملاحظة:

من أجل $\gamma_{ij} = 1$, لا يوجد حلول للمعادلة (6.2) لأنه في هذه الحالة القيمة ستكون : $x = 1.134795881 \succ 1$ و بذلك نشر تايلور لطاقة كمون كلبج لن يكون صالحاً.

خلاصة:

بناءاً على ما تم تقديمه يمكننا اعتماد صيغة طاقة تفاعل كلبج المصحح بين جسيمين i و j كما يلي:

$$U_{Kelbg}\left(\vec{r_i},\vec{r_j}\right) = \begin{cases} \dfrac{Z_i e_i Z_j e_j}{\lambda_{T_{ij}}}\left(\dfrac{\sqrt{\pi}}{\gamma_{ij}} - \dfrac{\left|\vec{r_i}-\vec{r_j}\right|}{\lambda_{T_{ij}}} + \dfrac{\left|\vec{r_i}-\vec{r_j}\right|}{\lambda_{T_{ij}}^2}\left(\dfrac{2}{3}\gamma_{ij}^2 - \dfrac{1}{2}\right)\right) & if\ r \prec r_{\min} \\ \dfrac{Z_i e_i Z_j e_j}{\left|\vec{r_i}-\vec{r_j}\right|} & if\ r \succ r_{\min} \end{cases} \qquad (7.2)$$

حيث: $r_{\min}(\gamma) \prec \lambda_T$ مع $\gamma_{ij} \prec 1$ (نذكر بأنه لا يمكننا أخذ قيمة $\gamma_{ij} \succ 1$ لأن نشر تايلور عندئذ لكمون كلبج لن يكون صحيحاً). من أجل المحاكاة العددية سنختار: $\gamma_{ij} = 4/5$

3.2 الحساب العددي لدالة توزيع الحقل الكهربائي الموضعي[3]:

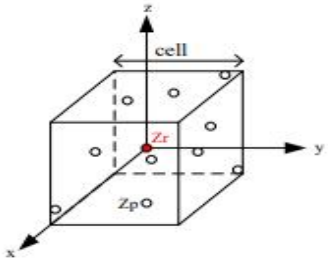
1.3.2 وصف الجملة الفيزيائية:

من أجل معالجة مركبة الحقل الكهربائي الموضعي ذات التردد المنخفض نعتبر البلازما مجموعةً من أيونات نقطية مغمورة في خلفية متجانسة و متعادلة كهربائيًا, تشغل حجماً محدوداً, و لها درجة حرارة مطلقة محددة. تتفاعل هذه الأيونات فيما بينها من خلال جهد كلبج المصحح. يُفترض أن البلازما متوازنة حرارياً و مُتعادلة ماكروسكوبياً. تتعلق

دالة توزيع الحقل الكهربائي الموضعي الأيوني لبلازما ذات مركب واحد بالتفاعل بين الأيون المشع و الأيونات الأخرى المكونة للبلازما.

2.3.2 وصف برنامج حساب دوال توزيع الحقل الكهربائي الموضعي:

أنشأنا برنامجاً بلغة الفورترن يحسب دالة توزيع الحقل الكهربائي الموضعي لبلازما ذات شروط فيزيائية محددة، نستخدم في ذلك المحاكاة العددية مونتي كارلو (MC). تتوزع الأيونات عشوائياً داخل خلية مكعبة كما في الشكل (1.2) حيث كل المواضع داخلها ذات احتمال متساو. يحدد ضلع الخلية بالمعطيات الفيزيائية، و هي: العدد الذري، الكثافة الإلكترونية، درجة الحرارة، ... , و كذلك بالمعطيات العددية التي يُزود بها البرنامج، أما مركز الخلية فبه أيون. يُختار عدد الأيونات في الخلية بشكل مناسب يجعل التفاعل لا يمتد إلى الخلايا المجاورة.



الشكل (1.2): خلية المحاكاة المكعبة

3.3.2 محاكاة مونتي كارلو (MC):

تأسست طريقة مونتي كارلو على حساب الأمل الرياضي لدوال المتغيرات العشوائية, و هي طريقة شائعة الإستعمال في جميع مجالات العلوم، تعتمد على استخدام الأعداد العشوائية و الإحتمالات الإحصائية في حل المسائل المختلفة. إستخدام طريقة مونتي كارلو لنمذجة المسائل الفيزيائية يسمح لنا بدراسة الجمل المعقدة المولدة عشوائيا من عدد لا متناه من الهيئات التي يمكن أن تشغلها الجملة. من المهم استخدام فكرة الاختيار الأفضل للعينات في حساب المتوسطات بطريقة مونتي كارلو.

يجب مراعاة أن حساب المتوسط لا يُبدأ به حتى تبلغ الجملة التوازن. عموما في محاكاة مونتي كارلو توجد مرحلتان: الأولى بناء على هيئة ابتدائية يتم إحداث تحريك لها حتى تُستدرج الجملة إلى مقربة من التوازن، أما الثانية فحيث تتطور الجملة قريباً من التوازن, تحسب المتوسطات.

4.2 مركبات الحقل الكهربائي الموضعي باستخدام كمون كلبج المصحح من أجل الحساب العددي MC

تُعطى الطاقة الكامنة للتفاعل بين الأيونين i و j وفقاً لصيغة كلبج المصححة ب:

$$U_{Kelbg}\left(\vec{r_i},\vec{r_j}\right)=\begin{cases}\dfrac{Z_i e_i Z_j e_j}{\lambda_{T_{ij}}}\left(\dfrac{\sqrt{\pi}}{\gamma_{ij}}-\dfrac{\left|\vec{r_i}-\vec{r_j}\right|}{\lambda_{T_{ij}}}+\dfrac{\left|\vec{r_i}-\vec{r_j}\right|}{\lambda_{T_{ij}}^2}\left(\dfrac{2}{3}\gamma_{ij}^2-\dfrac{1}{2}\right)\right) & if\ \ r\prec r_{\min}\\ \dfrac{Z_i e_i Z_j e_j}{\left|\vec{r_i}-\vec{r_j}\right|} & if\ \ r\succ r_{\min}\end{cases} \qquad (8.2)$$

الحقل الكهربائي الناشئ عن أحد الأيونات عند موضع المشع، و هو معتبر عند مبدأ الإحداثيات هو:

$$\vec{E}_{Kelbg}\left(\vec{r}\right)=-\overrightarrow{grad}\,U\left(r\right)=\begin{cases}-\dfrac{Ze}{\lambda_T^2}\left(-1+3\dfrac{r^2}{\lambda_T^2}\left(\dfrac{2}{3}\gamma^2-\dfrac{1}{2}\right)\right)\dfrac{\vec{r}}{r} & if\quad r\prec r_{\min}\\ -Ze\,\dfrac{\vec{r}}{r^3} & if\ r\succ r_{\min}\end{cases} \qquad (9.2)$$

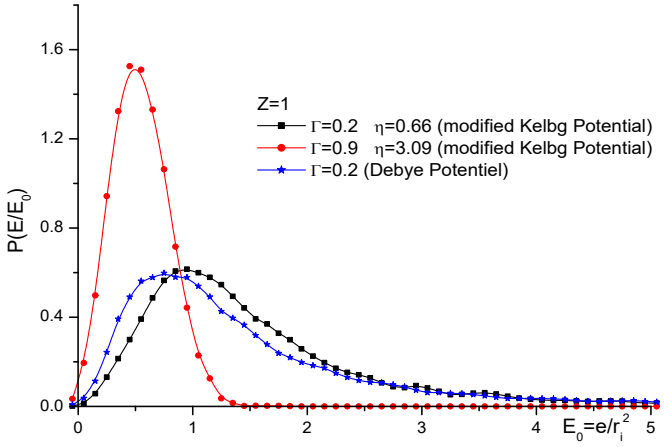
حيث: $\vec{r}$ شعاع الموضع الممتد من الأيون المحدث للاضطراب إلى الأيون المشع

تعطي دوال توزيع الحقل الكهربائي الموضعي احتمال إيجاد قيمة معينة للحقل الكهربائي الموضعي E عند موضع ما في البلازما. يتم تحديد توزيع الحقل الموضعي من خلال محصلة الحقول: $\vec{E}=\sum_{i=1}^{N}\vec{E_i}$ الناتجة عن الأيونات عند المبدأ، حيث يتواجد أيون من نفس صنف أيونات البلازما. تتعلق دالة توزيع الحقل الكهربائي الموضعي الأيوني بالتفاعل بين الأيون المشع و الأيونات الأخرى المحدثة للاضطراب من جهة (تفاعلات مركزية)، و بتفاعل الأيونات المحدثة للاضطراب فيما بينها (تفاعلات لا مركزية) من جهة أخرى.

5.2 نتائج و مقارنات:

يوضح الشكل (2.2) دالة توزيع الحقل الكهربائي الموضعي باستخدام كمون كلبج المصحح عند معامل تزاوج ضعيف $\Gamma_{ee}=0.2$، و مقارنتها مع كمون ديباي عند نفس معامل التزاوج. كما يبين الشكل منحنى توزيع دالة الحقل

الكهربائي الموضعي لبلازما الهيدروجين عند معامل تزاوج كبير $\Gamma_{ee} = 0.9$ و درجة تكميم عالية باستخدام كمون كلبج المصحح.



الشكل (2.2): دالة توزيع الحقل الكهربائي الموضعي لتفاعل كلبج المصحح و مقارنتها مع تفاعل ديباي

يوضح الجدول (1.2) أسفله قيمة الحقل الأكثر احتمالاً عند تغيير قيمة الكثافة الإلكترونية لوسط البلازما. و تغيير نوع التفاعل بين الجسيمات

نوع التفاعل (الكمون)	درجة التكميم η	معامل التزاوج Γ_{ee}	درجة الحرارة $T(K)$	الكثافة الالكترونية $n_e(cm^{-3})$	الحقل الأكثر احتمالا (E_0)
كلبج المصحح	0.66	0.2	557066	$7.09433e22$	0.93
كلبج المصحح	3.09	0.9	557066	$7.09433e24$	0.5
ديباي	/	0.2	557066	$7.09433e22$	0.73

الجدول (1.2): قيمة الحقل الأكثر احتمالاً لبلازما الهيدروجين بتغيير معامل التزاوج و نوع التفاعل بين الجسيمات

من خلال المنحنى البياني و النتائج المدونة بالجدول يمكننا رصد الملاحظات التالية:

1. رغم تغيير نوع التفاعل لكن مع وجود *شروط فيزيائية* موحدة (معامل تزاوج ثابت و منخفض) فإن منحنيات توزيع دالة الحقل الكهربائي الموضعي غير منزاحة كثيراً عن بعضها البعض. *يمكن تبرير التوافق السابق كما يلي: لظروف البلازما المدروسة حيث معامل تزاوج البلازما ضعيف* $(\Gamma_{ee} = 0.2)$ *يوافق ذلك طاقة حركية عالية، يمكن دراسة البلازما كلاسيكيا، و إهمال الأفعال الكمية.*

2. كلما زادت الكثافة الالكترونية زاد ترابط البلازما، و ارتفعت درجة التكميم. زيادة عدد جسيمات الوسط يؤدي إلى ارتفاع ظاهرة الحجب في البلازما مما يُضعف الحقول الكهربائية عند المشع و هو ما يبينه المنحنى (2.2)؛ فعند ارتفاع معامل التزاوج انزاح الحقل الأكثر احتمالا نحو الحقول الضعيفة.

3. *من جهة أخرى فإنه بالرغم من أخذ الاعتبارات الكمية في الحسبان إلا أن تأثيراتها لم تظهر في نتائج الحساب إلا عندما ازدادت درجة تكميم البلازما؛ فلقد انزاح توزيع الحقل عندما* ارتفعت *درجة التكميم.*

6.2 خلاصة:

لقد تناولنا في هذا الفصل عدم صلاحية قانون كولوم عند المسافات الصغيرة بين الجسيمات المشحونة و ظهور أشباه كمونات في الفيزياء الإحصائية و في فيزياء البلازما. قدمنا التقريبات و التصحيحات التي أجريت على تفاعل Kelbg المصحح و قمنا بالحساب العددي لدالة توزيع الحقل الكهربائي باستخدام محاكاة (MC) و تفاعل Kelbg المصحح، حصلنا على نتائج و بررناها.

الفصل الثالث: الحساب العددي لدوال توزيع المشتقات الفضائية للحقل الكهربائي الموضعي

الفصل الثالث: الحساب العددي لدوال توزيع المشتقات الفضائية لمركبات الحقل الكهربائي الموضعي

1.3 مقدمة:

في البلازما ذات الكثافات المنخفضة، عادة ما يُفترض أن الحقل الناشئ عن جميع أيوناتها موحد (متجانس) عند نواة المشع، و يُتعامل مع التفاعلات بين المشع و البلازما في تقريب ثنائي القطب. مع زيادة كثافة البلازما تنخفض المسافات البينية بين الجسيمات، نتيجة لذلك تبدأ تدرجات الحقل بالظهور قرب المشع.

من المعروف أن للحقول الموضعية مساهمة في تعريض الخط الطيفي الناتج، فإن لتدرجاتها أيضا مساهمة في عدم تناظره، و هذا بسبب التفاعل بينها و بين رباعي القطب الذري، لذا من الضروري تضمين فعل تدرج الحقل الموضعي في الصيغة النهائية للخط الطيفي، و يتم ذلك بدوال توزيع مشتقات الحقل الموضعي[8].

دالة التوزيع المشروط لمشتقات الحقل هي المقدار الذي نحن بصدد دراسته في هذا العمل. نسعى بعملنا هذا إلى حساب دوال توزيع المشتقات الفضائية لمركبات الحقل الموضعي بتضمين كمون كلبج المصحح.

خلال الفصل السابق تطرقنا إلى حساب دالة توزيع الحقل الكهربائي الموضعي, أما في هذا الفصل سنقوم بإنشاء برنامج بلغة الفورترن يقوم بحساب دوال توزيع المشتقات الفضائية للحقل الكهربائي الموضعي لبلازما ذات شروط فيزيائية محددة مستخدمين في ذلك محاكاة مونتي كارلو.

2.3 مركبات و مشتقات الحقل الكهربائي الموضعي لكمون كلبج المصحح:

تُعطى طاقة تفاعل كلبج المصحح بين جسيمين i و j كما يلي:

$$U_{Kelbg}\left(\vec{r_i},\vec{r_j}\right)=\begin{cases}\dfrac{Z_i e_i Z_j e_j}{\lambda_{T_{ij}}}\left(\dfrac{\sqrt{\pi}}{\gamma_{ij}}-\dfrac{\left|\vec{r_i}-\vec{r_j}\right|}{\lambda_{T_{ij}}}+\dfrac{\left|\vec{r_i}-\vec{r_j}\right|}{\lambda_{T_{ij}}^2}\left(\dfrac{2}{3}\gamma_{ij}^2-\dfrac{1}{2}\right)\right) & if\ \ r\prec r_{\min}\\ \dfrac{Z_i e_i Z_j e_j}{\left|\vec{r_i}-\vec{r_j}\right|} & if\ \ r\succ r_{\min}\end{cases} \qquad (1.3)$$

1.2.3 من أجل: $r \prec r_{min}$

يرتبط الكمون الكهربائي $V\left(r\right)$ بالطاقة الكهربائية بالعلاقة التالية:

$$V\left(r\right)=\frac{U}{q}=\frac{Z_p e}{\lambda_T}\left(\frac{\sqrt{\pi}}{\gamma}-\frac{r}{\lambda_T}+\frac{r^3}{\lambda_T^3}\left(\frac{2}{3}\gamma_{ij}^2-\frac{1}{2}\right)\right) \qquad (2.3)$$

يمكن استنتاج عبارة الحقل الكهربائي $E\left(r\right)$ انطلاقاً من عبارة الكمون كما يلي:

$$\underset{Kelbg}{\overrightarrow{E}}=-\overrightarrow{grad}\,V\left(r\right) \qquad (3.3)$$

و عليه تكون عبارة الحقل:

$$\underset{\prec Kelbg}{E}=-\frac{\partial V\left(r\right)}{\partial r}=-\frac{z_p e}{\lambda_T^2}\left\{-1+\frac{3r^2}{\lambda_T^2}\left(\frac{2}{3}\gamma^2-\frac{1}{2}\right)\right\} \qquad (4.3)$$

و هي قيمة جبرية للحقل قد تكون موجبة, وقد تكون سالبة.

مركبات الحقل الكهربائي الموضعي ستكتب بالشكل التالي:

$$\begin{cases} E_x=\dfrac{Z_p e}{\lambda_T^2}\left\{-1+\dfrac{3r^2}{\lambda_T^2}\left(\dfrac{2}{3}\gamma^2-\dfrac{1}{2}\right)\right\}\dfrac{x}{r} \\ E_y=\dfrac{Z_p e}{\lambda_T^2}\left\{-1+\dfrac{3r^2}{\lambda_T^2}\left(\dfrac{2}{3}\gamma^2-\dfrac{1}{2}\right)\right\}\dfrac{y}{r} \\ E_z=\dfrac{Z_p e}{\lambda_T^2}\left\{-1+\dfrac{3r^2}{\lambda_T^2}\left(\dfrac{2}{3}\gamma^2-\dfrac{1}{2}\right)\right\}\dfrac{z}{r} \end{cases} \qquad (5.3)$$

نجري *اشتقاقاً* للعلاقات *الموجودة* في (5.3) فنتحصل على المشتقات القطرية كما يلي:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial E_x}{\partial x}=\left(\dfrac{Z_p e}{\lambda_T^2}\right)\left\{-\dfrac{1}{r}+\dfrac{x^2}{r^3}+\dfrac{3}{\lambda_T^2}\left(\dfrac{2}{3}\gamma^2-\dfrac{1}{2}\right)\left(r-\dfrac{x^2}{r}\right)\right\} \\ \dfrac{\partial Ey}{\partial y}=\left(\dfrac{Z_p e}{\lambda_T^2}\right)\left\{-\dfrac{1}{r}+\dfrac{y^2}{r^3}+\dfrac{3}{\lambda_T^2}\left(\dfrac{2}{3}\gamma^2-\dfrac{1}{2}\right)\left(r-\dfrac{y^2}{r}\right)\right\} \\ \dfrac{\partial E_z}{\partial z}=\left(\dfrac{Z_p e}{\lambda_T^2}\right)\left\{-\dfrac{1}{r}+\dfrac{z^2}{r^3}+\dfrac{3}{\lambda_T^2}\left(\dfrac{2}{3}\gamma^2-\dfrac{1}{2}\right)\left(r-\dfrac{z^2}{r}\right)\right\} \end{cases} \qquad (6.3)$$

أما صيغ المشتقات اللاقطرية فهي:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial E_z}{\partial x} = \dfrac{Z_p e}{\lambda_T^2}\left\{\dfrac{1}{r} + \dfrac{3}{\lambda_T^2}\left(\dfrac{2}{3}\gamma^2 - \dfrac{1}{2}\right)\right\}\dfrac{xz}{r} \\ \dfrac{\partial E_z}{\partial y} = \dfrac{Z_p e}{\lambda_T^2}\left\{\dfrac{1}{r} + \dfrac{3}{\lambda_T^2}\left(\dfrac{2}{3}\gamma^2 - \dfrac{1}{2}\right)\right\}\dfrac{zy}{r} \\ \dfrac{\partial E_x}{\partial y} = \dfrac{Z_p e}{\lambda_T^2}\left\{\dfrac{1}{r} + \dfrac{3}{\lambda_T^2}\left(\dfrac{2}{3}\gamma^2 - \dfrac{1}{2}\right)\right\}\dfrac{xy}{r} \end{cases} \qquad (7.3)$$

2.2.3 من أجل: $r \succ r_{\min}$

الكمون الكهربائي يُكتب كما يلي:

$$V\left(r\right) = \frac{U_{Kelbg}(r)}{Z_r e} = \frac{Z_p e}{r} \qquad (8.3)$$

$$\underset{\succ kelbg}{E} = \frac{Z_p e}{r^2} \qquad (9.3)$$

و عليه فمركبات الحقل في حالة $r \succ r_{\min}$ ستكون لها الصيغ التالية:

$$\begin{cases} E_x = \dfrac{-Z_p e}{r^3} x \\ E_y = \dfrac{-Z_p e}{r^3} y \\ E_z = \dfrac{-Z_p e}{r^3} z \end{cases} \qquad (10.3)$$

نشتق العلاقات (10.3) فنجد المشتقات القطرية و اللاقطرية كما يلي:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial E_x}{\partial x} = Z_p e\left(-1 + \dfrac{3x^2}{r^2}\right)\dfrac{1}{r^3} \\ \dfrac{\partial E_y}{\partial y} = Z_p e\left(-1 + \dfrac{3y^2}{r^2}\right)\dfrac{1}{r^3} \\ \dfrac{\partial E_z}{\partial z} = Z_p e\left(-1 + \dfrac{3z^2}{r^2}\right)\dfrac{1}{r^3} \end{cases} \qquad (11.3)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial E_z}{\partial x} = 3Z_p e \frac{xz}{r^5} \\ \frac{\partial E_z}{\partial y} = 3Z_p e \frac{yz}{r^5} \\ \frac{\partial E_x}{\partial y} = 3Z_p e \frac{xy}{r^5} \end{cases} \qquad (12.3)$$

3.3 وصف برنامج حساب دوال توزيع المشتقات

يعتمد برنامج حساب المشتقات الفضائية الموضعية في البلازما على الخطوات التالية:

1. يُنشأ ملف إدخال بيانات, توضع فيه كل المعطيات الفيزيائية و العددية التي يتطلبها تنفيذ البرنامج. إلا أننا نضيف للمعطيات الحقل المشروط Ecom و هو الحقل المشترك للهيئات. كما نعرف للبرنامج $\Delta Ecom$ مقدار الإنزياح عن الحقل المشروط؛ بحيث تقبل فقط الهيئات التي تنشىء حقولا بين: $Ecom - \Delta Ecom$ و $Ecom + \Delta Ecom$.

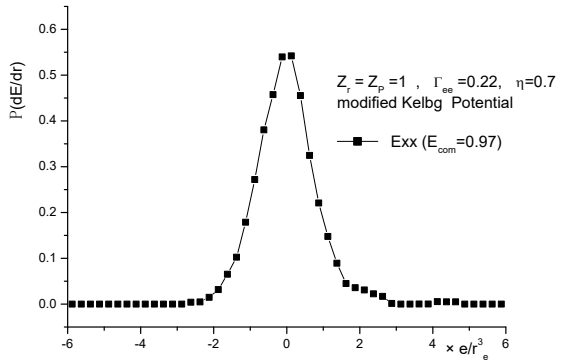
2. يُوزع البرنامج الأيونات توزيعاً عشوائيا داخل خلية المحاكاة.

3. يحسب البرنامج الحقل الكهربائي الناشئ عن كل الأيونات الموجودة داخل الخلية عند مركزها, و يستخدم لذلك صيغة كمون كلبج المصحح.

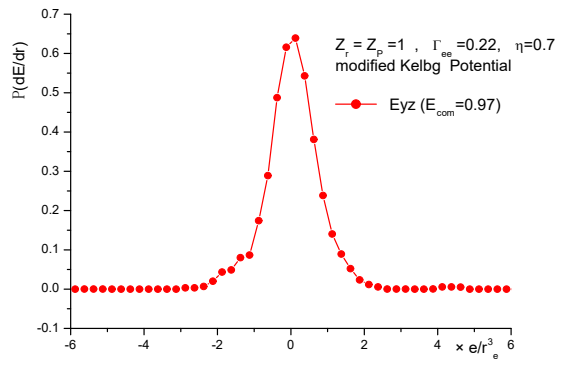
4. يحسب المشتقات لكل الهيئات المقبولة باستخدام الصيغ المذكورة أعلاه.

5. إجراء متوسط لقيم المشتقات المحسوبة و توزيعها على سلم المقادير الممكنة لها. نشير إلى أن البرنامج لا يبدأ بحساب المشتقات إلا بعد وصول الجملة إلى حالة التوازن الترموديناميكي, أي بعد مرورها بعدة آلاف من الهيئات.

4.3 نتائج و مقارنات: يبين الشكلان (1.3) و (2.3) دالة توزيع المشتقة القطرية و اللاقطرية باستخدام كمون كلبج المصحح عند درجة تكميم متوسطة القيمة و معامل تزاوج منخفض نسبياً.



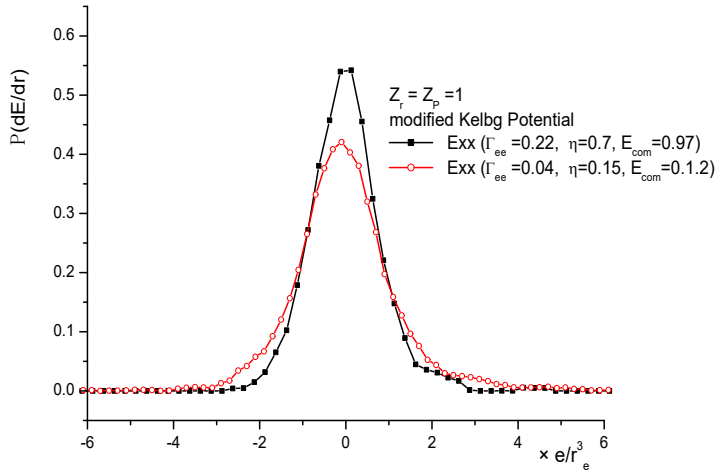
الشكل (1.3): دالة توزيع المشتقة القطرية للحقل الكهربائي الموضعي باستخدام تفاعل كلبج المصحح



الشكل (2.3): دالة توزيع المشتقة اللاقطرية للحقل الكهربائي الموضعي باستخدام تفاعل كلبج المصحح

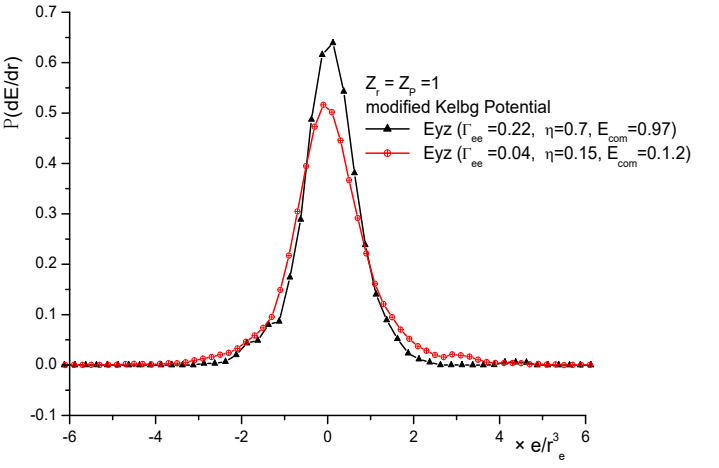
1.4.3 سلوك دوال توزيع المشتقات القطرية و اللاقطرية بتغيير معامل التزاوج

قمنا بتفحص دوال توزيع المشتقات القطرية و اللاقطرية عندما يتغيّر معامل تزاوج البلازما و درجة تكميمها، فاهتممنا ببلازما من الهيدروجين عند معامل تزاوج و درجة تكميم منخفضين و مقارنتها مع بلازما هيدروجين لكن ذات معامل تزاوج و درجة تكميم متوسطتين. فكانت الدوال الممثلة بالشكلين (3.3) و (4.3).



الش

كل (3.3): مقارنة بين دوال توزيع المشتقة القطرية للحقل الكهربائي باستخدام تفاعل كلبج المصحح بتغيير معامل التزاوج و درجة التكميم



الشكل (4.3): مقارنة بين دوال توزيع المشتقة اللاقطرية للحقل الكهربائي باستخدام تفاعل كلبج المصحح بتغيير معامل التزاوج و درجة التكميم

من خلال الشكلين (3.3) و (4.3) يمكننا ملاحظة الانزياح الواضح للمنحنيات سواء لدوال توزيع المشتقات القطرية أو اللاقطرية بسبب تغيير معامل التزاوج، كما يمكن رصد المقادير التالية:

المشتقة القطرية E_{xx} / معامل التزاوج و درجة التكميم	قمة التوزيع عند	العرض عند منتصف الارتفاع	الارتفاع
$\Gamma_{ee}=0.04,\quad \eta=0.15$	-0.1	1.8	0.42065
$\Gamma_{ee}=0.22,\quad \eta=0.7$	0.125	1.75	0.54199

المشتقة اللاقطرية E_{yz} / معامل التزاوج و درجة التكميم	قمة التوزيع عند	العرض عند منتصف الارتفاع	الارتفاع
$\Gamma_{ee}=0.04,\quad \eta=0.15$	-0.1	1.6	0.51631
$\Gamma_{ee}=0.22,\quad \eta=0.7$	0.125	1.25	0.63916

1. نلاحظ أن القيمة الأكثر احتمالا للمشتقات المحسوبة عند درجة تكميم ضعيفة η=0.15 يوافق ذلك معامل تزاوج ضعيف $\Gamma_{ee}=0.04$ تقع في جوار الصفر؛ مما يعني أن تدرجات الحقل تكاد تكون منعدمة (الحقل متجانس)، بينما القيمة تنزاح قليلا عن الصفر باتجاه اليسار في حالة ارتفاع درجة التكميم η=0.7 مع معامل تزاوج $\Gamma_{ee}=0.22$؛ من هنا يمكننا القول أن تدرجات الحقل تكون أكثر وضوحا إذا أُخذت التأثيرات الكمومية بعين الاعتبار.
2. عند التزاوج الضعيف $\Gamma_{ee}=0.04$ أبدت المركبة القطرية و اللاّقطرية تناظرا جيداً، أما مع ارتفاع معامل التزاوج $\Gamma_{ee}=0.22$ فإن كلتا المشتقتين غير متناظرة الجناحين.
3. كلما كبُرَت درجة التكميم، ضاق توزيع المركبات القطرية و اللاقطرية و ارتفعت قمتها.
4. إزدياد عرض دوال توزيع المشتقات و نقصان ارتفاعها، بازدياد الحقل المشترك للهيئات، سواءً للقطرية أو اللاّقطرية.

قائمة المراجع

[1] شيحي إسماعيل, "حساب دوال توزيع الحقل الكهربائي الموضعي داخل البلازما بإستخدام المحاكاة العددية محاكاة مونتي : تطبيق على طيف الهيليوم", أطروحة دكتوراه دولة, جامعة منتوري, قسنطينة, (2005)

[2] قريشة سليمة, "إستخدام نموذج الجسيمات المستقلة لحساب دوال توزيع المشتقات الفضائية للحقل الكهربائي الموضعي في البلازما", أطروحة دكتوراه علوم, جامعة ورقلة, (2013)

[3] لقريد جمعة وإسماعيلي جيهان, "حساب دالة توزيع الحقل الكهربائي الموضعي باستخدام كمون كلبج المصحح", مذكرة ماستر أكاديمي, جامعة ورقلة, (2022)

[4] مفتاح طه, "بعض الطرق التقنية لقياس قرينة الإنكسار في البلازما", مذكرة ماستر أكاديمي, جامعة ورقلة, (2014)

[5] قريشة سليمة, "مساهمة في دراسة توزيع المشتقات الفضائية للحقول الكهربائية الموضعية في البلازما", رسالة ماجستير, جامعة ورقلة, (2008)

[6] J.J-Thomson, philosophical Magazine, P.293(1897)

[7] P., A., "Étude d'une décharge à barrière diélectrique surfacique. Application au contrôle d'écoulement autour d'un profild'aile de type NACA0012", Thèse de Doctorat, Université D'orléans, 2012

[8] قبي سارة,"تأثير الفعل الكمومي على دوال توزيع الحقل الكهربائي الموضعي في البلازما بإستخدام تفاعل W.Ebling, أطروحة دكتوراه (ل م د), جامعة ورقلة, (2022)

[9] W Ebeling, A Filinov, M Bonitz, V Filinov and T Pohl J. Phys. A: Math. Gen. 39 4309 (2006)

خاتمة عامة

في هذا العمل قمنا أولا بتمهيد لموضوعنا بتقديم وصف لحالة البلازما. تناولنا عنها بعض التعاريف، خصائصها الكهربائية، الموجية و كيفية معالجتها، تذكير بأهم المعاملات و الوسائط الفيزيائية الخاصة بها. تحدثنا عن أهمية الخطوط الطيفية الصادرة عن المشعات فيها، مع توضيح بعض الأسباب التي تؤدي إلى تعريضها. بعد ذلك تحدثنا عن دوال توزيع الحقل الكهربائي الموضعي، و دوره في أطياف البلازما؛ ذلك أنه من المعتقد لدى الباحثين أنَّها أحد الأسباب المؤدية إلى لاتناظر الخطوط الطيفية الصادرة عن البلازما. ذكرنا كيف يتم تضمين تأثير الحقل الكهربائي الموضعي في الصيغة الطيفية. تلوْنا ذلك بحديث موجز عن المحاكاة العددية بطريقة مونتي كارلو. قدّمنا عرضا موجزا لإشكالية الحقول الموضعية عند المسافات الصغيرة، حيث تحدثنا عن تعويض جهد كولوم بالجهد الفعال المقترح من طرف كلبج، عرضنا كمون كلبج و بعض التعديلات التي أجريت عليه, حيث شرحنا بالتفصيل الخطوات المتبعة من أجل الحصول على صيغة مبسطة له.

باشرنا بعد ذلك تطبيق كمون كلبج المصحح لحساب دالة توزيع الحقول الكهربائية الموضعية في البلازما، أجرينا مقارنة بين وسطين لبلازما يختلفان فقط في الكثافة الإلكترونية مما أدى إلى اختلاف في معامل التزاوج و درجة تكميم البلازما. لاحظنا تبايناً واضحاً بين المنحنيين، خاصة عند المسافات الصغيرة و المتوسطة؛ فعندما كبُرَ معامل التزاوج ضاق التوزيع و ارتفعت قمته و انزاحت نحو الحقول الضعيفة، و أسرع بالاضمحلال جهة الحقول الكبيرة. يمكن تفسير ذلك أنه مع زيادة معامل التزاوج في البلازما، يميل النظام إلى الحالة الصلبة؛ إذن لا توجد تصادمات مفاجئة بين الأيونات؛ و بالتالي لا توجد حقول موضعية قوية هناك. لذلك من المرجح أن يكون لدينا حقول موضعية ضعيفة. كما يمكن تفسير ذلك إلى *أن زيادة عدد جسيمات الوسط يؤدي إلى ارتفاع ظاهرة الحجب في البلازما* ما يسبب تناقص قوى التنافر الكهربائية، فيؤدي إلى ارتفاع عامل الارتباط لديها. *من جهة أخرى ارتفاع ظاهرة الحجب يُضعف الحقول الكهربائية عند المشع؛ فينزاح الحقل الأكثر احتمالا نحو الحقول الضعيفة.*

لقد اختبرنا سلوك دوال توزيع الحقل بتغيّر *نوع التفاعل لكن مع وجود شروط فيزيائية موحدة (معامل تزاوج ثابت و منخفض) فوجدنا أن منحنى التوزيع لدالة الحقل الكهربائي الموضعي بتطبيق كمون كلبج المصحح غير منزاحة كثيراً عن منحنى دالة توزيع الحقل بتطبيق كمون ديباي. يمكن تبرير التقارب السابق*

كما يلي: لظروف البلازما المدروسة حيث معامل تزاوج البلازما متوسط $(\Gamma = 0.2)$ *يوافق ذلك طاقة حركية عالية، يمكن دراسة البلازما كلاسيكيا، و إهمال الأفعال الكمية.*

لمعرفة مدى تأثير الأفعال الكمية في دوال توزيع الحقل الكهربائي الموضعي، يمكن مقارنة دوال توزيع الحقل عند: $(\eta = 3.09 \;,\; \eta = 0.66)$ *فإنه بالرغم من* استخدام نفس التفاعل و *أخذ الاعتبارات الكمية في الحسبان إلا أن تأثيراتها لم تظهر في نتائج الحساب إلا عندما ازدادت درجة تكميم البلازما؛ فلقد انزاح توزيع الحقل عندما ارتفعت درجة التكميم.*

قمنا بعد ذلك بحساب دوال توزيع المشتقات الفضائية للحقل الكهربائي الموضعي في البلازما، عدديا باستخدام محاكاة مونتي كارلو، عند قيمة الحقل الموضعي الأكثر احتمالاً بغض النظر عن اتجاهه.

يمكن إجمال ما خلصنا إليه من هذا العمل ما يلي:

- نلاحظ أن القيمة الأكثر احتمالا للمشتقات المحسوبة عند درجة تكميم ضعيفة تقع في جوار الصفر؛ مما يعني أن تدرجات الحقل تكاد تكون منعدمة (الحقل متجانس)، بينما تنزاح القيمة قليلا عن الصفر في حالة ارتفاع درجة التكميم؛ من هنا يمكننا القول أن تدرجات الحقل تكون أكثر وضوحا إذا أُخذت التأثيرات الكمومية بعين الاعتبار.
- عند التزاوج الضعيف $\Gamma_{ee} = 0.04$ أبدت المركبة القطرية و اللاّقطرية تناظرا جيداً، أما مع ارتفاع معامل التزاوج $\Gamma_{ee} = 0.22$ فإن كلتا المشتقتين غير متناظرة الجناحين.
- كلما كبُرَت درجة التكميم، ضاق توزيع المركبات القطرية و اللاقطرية و ارتفعت قمتها.
- إزدياد عرض دوال توزيع المشتقات و نقصان ارتفاعها، بازدياد الحقل المشترك للهيئات، سواءً للقطرية أو اللاّقطرية.

هذا و إن النتائج التي توصَّلْنا إليها من خلال برامج الحساب العددي لدوال توزيع الحقل أو دوال توزيع مشتقات الحقل الكهربائي الموضعي في البلازما، فتحت الباب لمواصلة تطبيق كمون كلبج المصحح لحساب عديد المقادير الفيزيائية كالناقلية الكهربائية، السماحية، قرينة انكسار البلازما، .....

مختصر:

عديدة هي الأسباب التي تؤدي إلى تعريض و لاتناظر الخطوط الطيفية الصادرة عن المشعات الأيونية في البلازما، حيث يساهم فعل ستارك بدور كبير في ذلك. يتم تضمين فعل ستارك في الصيغة النهائية للخط الطيفي بدوال توزيع الحقل الكهربائي و مشتقاته الفراغية. في هذا العمل تم عرض الخطوات المتبعة من أجل الحصول على صيغة مبسطة لتفاعل كلبج, أُستخدمت محاكاة مونتي كارلو لحساب دوال توزيع الحقل الكهربائي الموضعي في البلازما باعتبار تفاعل كلبج المصحح. ثم أُستخدمت لحساب دوال توزيع المشتقات الفضائية الموضعية الأيونية في البلازما. اعتبرنا في حساب دوال التوزيع بالمحاكاة العددية كل التفاعلات البينية. تم استنتاج بعض سلوكيات دوال توزيع الحقل الكهربائي الموضعي و مشتقات الحقل.

كلمات دليلية: البلازما، كمون Kelbg المصحح، محاكاة مونتي كارلو، دالة توزيع الحقل، دالة توزيع مشتقات الحقل الكهربائي.

Abstract:

There are many reasons that lead to the broadening and the asymmetry of the spectral lines shapes in plasma, which Stark effect plays a major role in this lines. The Stark effect is included in the final formulation of the spectral line with the electric field distribution functions and their spatial derivatives. In this work, the followed steps in order to obtain a simplified formula of Kelbg potential were presented. Monte Carlo simulation was used to calculate the microfield and spatial derivatives distribution functions in the plasma considering a corrected Kelbg potential. all interactions between plasma constituations have been considered in calculation. Some behaviors of microfield and spatial derivatives distribution functions have been deduced.