

جامعة قاصدي مرباح ورقلة

الترتيب:
الرقم التسلسلي:

كلية الرياضيات وعلوم المادة

قسم الفيزياء
رسالة

لنيل شهادة الدكتوراه في العلوم

شعبة: فيزياء

إختصاص: إشعاع وإلكتروضوي

من إعداد الطالب: بكوش عبد الله

الموضوع



حساب دوال توزيع دوران الحقل الكهربائي ومشتقاته الفضائية
لبلازما متعددة الأصناف باستخدام تقنية التحريك الجزيئي

2024 / 03/03

من طرف لجنة المناقشة:

| | | | |
|--------|---------------------------------|------------------|-----------------|
| رئيسا | جامعة قاصدي مرباح ورقلة | أستاذ تعليم عالٍ | دويس السعيد |
| مقررا | جامعة قاصدي مرباح ورقلة | أستاذ تعليم عالٍ | خلفاوي فتحي |
| ممتحنا | جامعة غرداية | أستاذ تعليم عالٍ | شنيني كلثوم |
| ممتحنا | جامعة غرداية | أستاذ تعليم عالٍ | داودي باحمد |
| ممتحنا | وحدة بحث لطاقات المتجددة غرداية | مدير بحث | قدور عبد المجيد |
| ممتحنا | جامعة قاصدي مرباح ورقلة | أستاذ محاضراً | قريشة سليمة |

2024 / 2023

إهداء
إلى أبوي الكريمين

إلى إخوتي وأقاربي

إلى كل من علمني حرفاً معلماً وأستاذاً

إلى زملائي وأصدقائي في الدراسة والعمل

إلى كل من كان له فضل علي

أهدي هذا العمل

تشكرات

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات

أتقدم بالشكر الجزيل إلى أستاذي الفاضل فتحي خلفاوي على صبره الطويل لإنهاء هذه الرسالة الذي لم يتردد ولم يتوان بدعمه الجبار العلمي والمعنوي لي رغم كثافة أعماله. كما أتقدم بالشكر الجزيل لأساتذة اللجنة وقبولهم مناقشة هذه الأطروحة. الأستاذ دويس السعيد وأنوه بفضلته في مسار دراستي ودعمه العلمي في أعمال سابقة. الأستاذة شنيي كلثوم وأنوه بسابق فضلها في مسار دراستي وملاحظاتها العلمية. الأستاذ داودي باحمد أشكره وأنوه بسابق فضلته في مسار دراستي. الأستاذ قدور عبد المجيد أشكره على موافقته ممتحنا لي في هذه الأطروحة. الأستاذة قريشة سليمة أشكرها على دعمها العلمي في هذا العمل وملاحظاتها العلمية في هذه الأطروحة وفي أعمال سابقة. الأستاذ محمد الطيب مفتاح أتقدم له بالشكر الجزيل على سابق فضلته في الدراسة ودعمه ومساندته في كل مراحل هذا العمل. أشكر كل القائمين على مخبر فيزياء الإشعاع والبلازما وفيزياء السطوح خاصة مدير المخبر أستاذي الفاضل فتحي خلفاوي كما أتقدم بخالص شكري لأساتذة جامعة قاصدي مرباح وبالخصوص قسم الفيزياء. بن مبروك لزهـر شـيحي اسماعيل-الزبن عبد الله-تخة محمد-سوداني محمد البار....

الفهرس

| | |
|---------|---|
| I..... | إهداء |
| II..... | تشكرات |
| 2..... | مقدمة عامة |
| 4..... | مراجع المقدمة العامة |
| 6..... | الفصل الأول: أساسيات عن فيزياء البلازما |
| 6..... | 1. مفهوم البلازما |
| 6..... | 2. أنواع البلازما |
| 6..... | 3. أشكال البلازما |
| 7..... | 4. خصائص البلازما |
| 7..... | 5. معاملات البلازما |
| 8..... | 6. التوازن الحراري في البلازما |
| 9..... | 7. نماذج معالجة البلازما |
| 10..... | 8. التصادمات في البلازما |
| 10..... | 9. أهم كمونات التفاعل المستخدمة في دراسة البلازما |
| 12..... | 10. تطبيقات البلازما |
| 12..... | 11. مجالات البحث في البلازما |
| 16..... | 12. مراجع الفصل الأول |
| 18..... | الفصل الثاني نماذج حساب توزيعات الحقول الكهربائية الموضعية وسرعاتها الزاوية |
| 19..... | 1. أسس الحساب النظري لدوال توزيع الحقل ومشتقاته الفضائية |
| 20..... | 2. أهم نماذج وتقنيات حساب دوال توزيع الحقل ومشتقاته الفضائية |
| 22..... | 3. إستخدامات محاكاة التحريك الجزيئي (MDS) |

| | | |
|----|--|----|
| 4 | أبحاث ونتائج سابقة متعلقة بالحقول الكهربائية في البلازما | 23 |
| 5 | أساسيات محاكاة التحريك الجزيئي في بلازما التوازن الحراري | 24 |
| | الفصل الثالث: نتائج ومقارنات | 36 |
| 1 | دوال توزيع الزوايا | 36 |
| 2 | دوال توزيع المشتقات الزمنية للزوايا | 45 |
| 3 | دوال توزيع السرعة الزاوية للحقل الأيوني | 48 |
| 4 | مقارنة مع نتائج Meftah و Adaika | 49 |
| 5 | دوال توزيع نصف قطر إنحناء حركة الأيونات | 51 |
| 6 | دوال توزيع السرعات الزاوية لحركة الأيونات | 52 |
| 7 | دوال توزيع الحقل ومشتقاته الفضائية من أجل بلازما ذات صنفين | 53 |
| 8 | دوال توزيع الحقل ومشتقاته الفضائية من أجل بلازما ذات ثلاث أصناف | 55 |
| 9 | دوال توزيع الحقل ومشتقاته الفضائية من أجل بلازما ذات آثار أيونات | 57 |
| 10 | مراجع الفصل الثالث | 59 |
| | خلاصة عامة | 61 |

قائمة الأشكال

| عنوان الشكل | |
|--------------|---|
| الفصل الاول | |
| 6 | الجدول (I.1) : بعض المعاملات للبلازما الطبيعية والبلازما المخبرية |
| 7 | الشكل (I.2) : مخطط تصنيف البلازما حسب الكثافة ودرجة الحرارة |
| 13 | الشكل (I.3) : خطوط الطيف |
| الفصل الثاني | |
| 21 | الشكل (II.1) : التفاعل المركزي مع أيون مشع واللامركزي للأيونات |
| 25 | الشكل (II. 2) : قيم 1000 سرعة عشوائية مولدة باستخدام برنامج Ran |
| 26 | الشكل (II. 3) : توزيع مركبات السرعات العشوائية |
| 26 | الشكل (II. 4) : توزيع طويلة السرعات العشوائية |
| 28 | الشكل (II. 5) : الشروط الحدية للنظام لحركة الأيونات وحساب القوى |
| 29 | الشكل (II.6) : الزاوية α بين متجه الحقل ومتجه السرعة |
| 29 | الشكل (II. 7) : الزوايا θ و φ للحقل في المستوى الديكارتي |
| الفصل الثالث | |
| 36 | الشكل (III. 1) : توزيع $P(\alpha)$ لقيم مختلفة من الكثافة |
| 36 | الشكل (III. 2) : توزيع $P(\alpha)$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة |
| 37 | الشكل (III. 3) : توزيع $P(\cos(\alpha))$ لقيم مختلفة من الكثافة |
| 37 | الشكل (III. 4) : توزيع $P(\cos(\alpha))$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة |
| 38 | الشكل (III. 5) : توزيع $P(\sin(\alpha))$ لقيم مختلفة من الكثافة |
| 38 | الشكل (III. 6) : توزيع $P(\sin(\alpha))$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة |
| 39 | الشكل (III. 7) : توزيع $P(\theta)$ لقيم مختلفة من الكثافة |
| 39 | الشكل (III. 8) : توزيع $P(\theta)$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة |
| 40 | الشكل (III. 9) : توزيع $P(\cos(\theta))$ لقيم مختلفة من الكثافة |
| 40 | الشكل (III. 10) : توزيع $P(\cos(\theta))$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة |
| 41 | الشكل (III. 11) : توزيع $P(\sin(\theta))$ لقيم مختلفة من الكثافة |
| 41 | الشكل (III. 12) : توزيع $P(\sin(\theta))$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة |
| 42 | الشكل (III. 13) : توزيع $P(\varphi)$ لقيم مختلفة من الكثافة |
| 42 | الشكل (III. 14) : توزيع $P(\varphi)$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة |
| 43 | الشكل (III. 15) : توزيع $P(\cos(\varphi))$ لقيم مختلفة من الكثافة |
| 43 | الشكل (III. 16) : توزيع $P(\cos(\varphi))$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة |
| 44 | الشكل (III. 17) : توزيع $P(\sin(\varphi))$ لقيم مختلفة من الكثافة |
| 44 | الشكل (III. 18) : توزيع $P(\sin(\varphi))$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة |
| 45 | الشكل (III. 19) : توزيع $P(\omega_\alpha)$ لقيم مختلفة من الكثافة |
| 45 | الشكل (III. 20) : توزيع $P(\omega_\alpha)$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة |
| 46 | الشكل (III. 21) : توزيع $P(\omega_\theta)$ لقيم مختلفة من الكثافة |

| | |
|----|--|
| 46 | الشكل (III. 22) : توزيع $P(\omega_\theta)$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة |
| 47 | الشكل (III. 23) : توزيع $P(\omega_\phi)$ لقيم مختلفة من الكثافة |
| 47 | الشكل (III. 24) : توزيع $P(\omega_\phi)$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة |
| 48 | الشكل (III. 25) : توزيع السرعة الزاوية $P(\omega)$ لقيم مختلفة من الكثافة |
| 48 | الشكل (III. 26) : توزيع السرعة الزاوية $P(\omega)$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة |
| 49 | الشكل (III. 27) : مقارنة توزيع السرعة الزاوية $P(\omega)$ مع نموذج Hol- $Z = 2$ |
| 49 | الشكل (III. 28) : مقارنة توزيع السرعة الزاوية $P(\omega)$ مع نموذج Hol- $Z = 5$ |
| 50 | الشكل (III. 29) : مقارنة توزيع السرعة الزاوية $P(\omega)$ مع نموذج IPM و $\Gamma = 0.17$ Hol |
| 51 | الشكل (III. 30) : توزيع $P(R)$ لقيم مختلفة من الكثافة |
| 51 | الشكل (III. 31) : توزيع $P(R)$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة |
| 52 | الشكل (III. 32) : توزيع $P(W)$ لقيم مختلفة من الكثافة |
| 52 | الشكل (III. 33) : توزيع $P(W)$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة |
| 53 | الشكل (III. 34) : دوال توزيع الحقل من أجل بلازما ذات صنفين |
| 53 | الشكل (III. 35) : دوال توزيع مركبة الحقل من أجل بلازما ذات صنفين |
| 54 | الشكل (III. 36) : دوال توزيع المشتقة القطرية لمركبة الحقل من أجل بلازما ذات صنفين |
| 54 | الشكل (III. 37) : دوال توزيع المشتقة اللاقطرية لمركبة الحقل من أجل بلازما ذات صنفين |
| 55 | الشكل (III. 38) : دوال توزيع الحقل من أجل بلازما ذات ثلاث اصناف |
| 55 | الشكل (III. 39) : دوال توزيع مركبة الحقل من أجل بلازما ذات ثلاث اصناف |
| 56 | الشكل (III. 40) : دوال توزيع المشتقة القطرية لمركبة الحقل من أجل بلازما ذات ثلاث اصناف |
| 56 | الشكل (III. 41) : دوال توزيع المشتقة اللاقطرية لمركبة الحقل من أجل بلازما ذات ثلاث اصناف |
| 57 | الشكل (III. 42) : دوال توزيع الحقل من أجل بلازما ذات آثار أيونات |
| 57 | الشكل (III.43) : دوال توزيع مركبة الحقل من أجل بلازما ذات آثار أيونات |
| 58 | الشكل (III. 44) : دوال توزيع المشتقة القطرية لمركبة الحقل من أجل بلازما ذات آثار أيونات |
| 58 | الشكل (III. 45) : دوال توزيع المشتقة اللاقطرية لمركبة الحقل من أجل بلازما ذات آثار أيونات |

قائمة المقادير الفيزيائية

| الرمز | المقدار الفيزيائي |
|--|---------------------------|
| T | درجة الحرارة |
| n_e | الكثافة الالكترونية |
| t | الزمن |
| α | درجة التأين |
| Γ_{ii} | معامل التزاوج الأيوني |
| r_i | البعد المتوسط الأيوني |
| ω_p | تواتر البلازما |
| λ_D | طول ديبياي |
| r_0 | طول لاندو |
| λ_{ei} | طول موجة ديبروغلي |
| m_i | كتلة الأيون |
| e | الشحنة العنصرية للإلكترون |
| z_i | شحنة الأيون |
| k_B | ثابت بولتزمان |
| h | ثابت بلانك |
| c | سرعة الضوء |
| λ | الطول الموجي للفوتون |
| $u(\lambda;T)$ | الكثافة الطيفية للإشعاع |
| r_i | موضع الأيون |
| v_i | سرعات الأيون |
| $v(r)$ | الكمون |
| $\bar{E}(r)$ | الحقل |
| $z \ x \ y$ | إحداثيات الديكارتية |
| $\varphi \ \alpha \ \theta$ | الزوايا المميزة للحقل |
| $\omega_\alpha \ \omega_\theta \ \omega_\varphi$ | المشتقات الزمنية للزوايا |
| ω | دوران الحقل |

قائمة المصطلحات

| الرمز | المصطلح |
|-------|--|
| Hol | نموذج Holtmark |
| APX | التقريب الاسي ذو المعامل القابل للتكيف |
| MCS | نموذج محاكاة مونتسي كارلو |
| IPM | نموذج الجسيمات المستقل |
| MDS | نموذج محاكاة التحريك الجزيئي |

مقدمة عامة

مقدمة عامة

تعتبر أشكال خطوط الطيف مهمة في الدراسات النظرية والتجريبية لأوساط البلازما. تركز الدراسات والأبحاث على تعريض خطوط الطيف وأسبابها التي من أهمها التصادمات مع الجسيمات المشحونة أو التعريض بفعل ستارك. إن التعريض بفعل ستارك يمتاز بأكبر مساهمة في تعريض خط الطيف وهو ناتج عن تفاعل الجسم المشع مع الحقول الكهربائية الناشئة عن كل الجسيمات المشحونة، تبين تجارب عديدة ونماذج نظرية وعددية مختلفة أنه يوجد تعريضاً إلكترونياً ناتجاً عن الإلكترونات وتعريضاً أيونياً ناتجاً عن الأيونات. لوحظ أن الأيونات تساهم في لانتناظر خطوط الطيف بسبب توزيعات الحقول وكذا مشتقاتها، إن هذا التعريض يكون بنسب معتبرة في خطوط طيف الإشعاع.

لحساب الطيف الإشعاعي في البلازما يتم إستغلال دوال توزيع الحقول الكهربائية ومشتقاتها ودالة ترابط الحقل، وتوزيع السرعة الزاوية للحقل، حيث يتم تجميع الحقل الكهربائي لعدد كبير جداً من الشحنات عند نقطة ثابتة مشحونة أو محايدة. بسبب صعوبة الحساب التحليلي لهذه الدوال يمكن إستخدام طرق المحاكاة العددية، من أهم الباحثين في حساب ودراسة هذه التوزيعات:

Kilcrease قام بدراسة توزيعات الحقول الكهربائية عند إختلاف درجة حرارة الإلكترونات والأيونات في البلازما [1].

Demura مع آخرين قام بدراسة عدم تجانس توزيعات الحقول الكهربائية في البلازما [2] وتأثيرات عدم تجانس الحقول الكهربائية في البلازما الكثيفة [3]، وفي عمل آخر كذلك قام به Murillo مع آخرين [4].

Demura في عمل آخر قام بحساب التوزيعات اللحظية للحقول الكهربائية الأيونية ومشتقاتها الزمنية وتأثيرات الإحتكاك الديناميكي في البلازما [5]. Kilcrease مع آخرين قام بحساب توزيع احتمالية تدرج الحقول الكهربائية الأيونية للبلازما الكثيفة [6].

Demura قام بعرض النماذج الفيزيائية للحقول الكهربائية في البلازما [7]. Benbelgacem مع آخرين قام بدراسة تأثير إقتران الإلكترون والأيون على توزيع الحقل الكهربائي في البلازما [8].

Kobbi مع آخرين قامت بحساب توزيعات الحقول الكهربائية ذات التردد المنخفض في البلازما بتطبيق كمون W. Ebeling [9].

Adaika مع آخرين قامت بحساب توزيع السرعة الزاوية للحقل الكهربائي من أجل شدة ثابتة للحقل [10].

سنقوم في عملنا هذا بحساب بعض التوزيعات المتعلقة بالحقول الكهربائية في البلازما وقد تضمنت الأطروحة مقدمة وثلاث فصول وخلاصة عامة.

الفصل الأول أساسيات عن فيزياء البلازما: نستعرض فيه مفهوم البلازما، أنواعها أشكالها، أهم الخصائص، المعاملات الأساسية، وطرق معالجة الظواهر في البلازما، ثم نذكر بأهم القوانين والتوزيعات الإحصائية لمنظومة البلازما مع التوازنات الحرارية المبنية على هذه التوزيعات، ثم نستعرض بعض تطبيقات ومجالات البحث في فيزياء البلازما.

الفصل الثاني نماذج حساب توزيعات الحقول الكهربائية الموضوعية: نتناول بإسهاب أهم نماذج وتقنيات حساب التوزيعات، ثم نصف تقنية محاكاة التحريك الجزيئي المستخدمة في عملنا مع ذكر بعض إستعمالاتها، ثم نذكر ببعض الأعمال السابقة المتعلقة بالحقول الموضوعية في البلازما، ثم نبين مبدأ محاكاة التحريك الجزيئي.

الفصل الثالث نتائج ومقارنة: نقوم فيه بعرض نتائج التوزيعات من أجل بلازما أرغون، إختارنا كثافات أيونية في المجال $[10^{24}. 10^{18}] \text{ cm}^3$ ودرجات حرارة في المجال $[10^7. 10^4]$ وحدة K، ممثلةً في دوال توزيع الزوايا، دوال توزيع المشتقات الزمنية للزوايا، دوال توزيع السرعة الزاوية للحقل الأيوني، مقارنة مع نتائج Adaika و Meftah [10]، كما نعرض دوال توزيع نصف قطر إنحناء حركة الأيونات، توزيع السرعات الزاوية، ثم نعرض نتائج دوال توزيع الحقل ومشتقاته الفضائية من أجل بلازما ذات صنفين، ثم ثلاث أصناف وسلوكياتها مع تغير بعض المعاملات درجة الحرارة و الكثافة الأيونية.

نختم الأطروحة بخلاصة عامة نبرز فيها أهم مميزات وخصائص التوزيعات التي تحصلنا عليها، وبعض الملاحظات حول المقارنات التي أجريناها، والآفاق المرتقبة لهذه الدراسة.

- [1] Kilcrease, D. P. (1994). Plasma electric microfields for differing electron and ion temperatures. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, *51*(1-2), 161-167.
[https://doi.org/10.1016/0022-4073\(94\)90076-0](https://doi.org/10.1016/0022-4073(94)90076-0)
- [2] Demura, A. V., Gilles, D., & Stehlé, C. (1995). Comparative study of microfield nonuniformity in plasmas. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, *54*(1-2), 123-136.
[https://doi.org/10.1016/0022-4073\(95\)00048-P](https://doi.org/10.1016/0022-4073(95)00048-P)
- [3] Demura, A. V., & Stehlé, C. (1995, February). Effects of microfield nonuniformity in dense plasmas. *AIP Conference Proceedings* (Vol. 328, No. 1, pp. 177-208). American Institute of Physics.
<http://dx.doi.org/10.1063/1.47490>
- [4] Murillo, M. S., Kilcrease, D. P., & Collins, L. A. (1997). Dense plasma microfield nonuniformity. *Physical Review E*, *55*(5), 6289.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.55.6289>
- [5] Demura, A. V. (1996). Instantaneous joint distributions of ion microfield and its time derivatives and effects of dynamical friction in plasmas. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, *83*(1), 60-72.
- [6] Kilcrease, D. P., & Murillo, M. S. (2000). The ion electric microfield gradient joint probability distribution function for dense plasmas. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, *65*(1-3), 343-352
[https://doi.org/10.1016/S0022-4073\(99\)00079-5](https://doi.org/10.1016/S0022-4073(99)00079-5)
- [7] Demura, A. V. (2010). Physical models of plasma microfield. *International Journal of Spectroscopy*, 2010.
<https://doi.org/10.1155/2010/671073>
- [8] Benbelgacem, K., Douis, S., Meftah, M. T., & Touahri, N. (2017). Effect of electron-ion coupling on the electric microfield distribution in plasmas. *Contributions to Plasma Physics*, *57*(4), 176-181.
<https://doi.org/10.1002/ctpp.201700005>
- [9] Kobbi, S., Guerricha, S., Chihi, S., Bekkouche, A., & Meftah, M. T. (2022). Low-frequency component electric microfield distributions in plasmas governed by W. Ebeling potential. *Indian Journal of Physics*, *96*(10), 3007-3014.
<https://doi.org/10.1007/s12648-021-02211-0>
- [10] Adaika, H., & Meftah, M. T. (2014). Angular velocity distribution of the electric microfield in plasma. *Contributions to Plasma Physics*, *54*(7), 669-679.
<https://doi.org/10.1002/ctpp.201300041>

الفصل الأول:
أساسيات عن فيزياء
البلازما

الفصل الأول: أساسيات عن فيزياء البلازما

نتطرق في هذا الفصل لمفهوم البلازما، أنواعها، أشكالها، وخصائصها الأساسية المستعملة في دراسة بعض الظواهر والتطبيقات، أهم مجالات البحث في البلازما.

1. مفهوم البلازما:

البلازما هي غاز مؤين متعادل كهربائياً مكون من إلكترونات وأيونات، كل جسيم يتأثر بكل ما حوله من الجسيمات، تتعلق تفاعلات الجسيمات في البلازما بدرجة الحرارة الكثافة، تردد الإلكترونات والأيونات.

2. أنواع البلازما:

2.أ. البلازما الحارة: تمتاز بالتأين الكبير جداً درجة حرارتها أكبر من 10^5 K مثل بلازما الشمس والنجوم.

2.ب. البلازما الباردة: تمتاز بتأين ضعيف درجة حرارتها تقل عن 10^5 K وتسمى ببلازما التفريغ الغازي مثل معظم الغازات المحايدة.

3. أشكال البلازما:

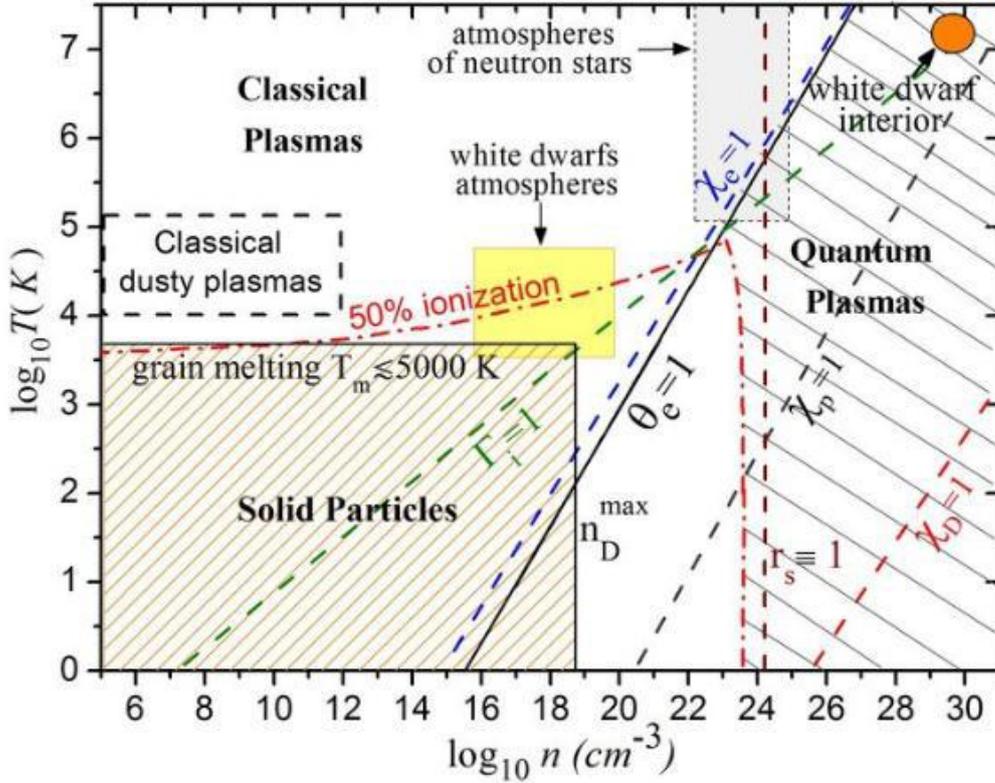
3.أ. بلازما طبيعية: تمثل معظم مادة الكون مثل الشمس، النجوم، الرياح الشمسية، المجرات، آثار البرق، الصواعق في الطبقات الجوية.

3.ب. بلازما المختبر: مثل بلازما الاندماج النووي، مصابيح التفريغ باستخدام بعض الغازات الخاملة، شاشات البلازما عالية الدقة، بلازما الإحتباس بالليزر، بلازما الإحتباس بتأثير الحقل المغناطيسي في جهاز التوكاماك.

الجدول (I.1) والشكل (I.1) يوضحان تصنيفات البلازما الطبيعية وبلازما مخبرية وفقا لبعض المعاملات.

| الحقل المغناطيسي (T) | درجة الحرارة (eV) | كثافة الجسيمات $(m)^{-3}$ | سلم الطول (m) | |
|----------------------|-------------------|---------------------------|---------------|------------------|
| 10^{-10} | 1 | 10^{+6} | 10^{+16} | الغاز بين النجوم |
| 10^{-8} | 10 | 10^{+7} | 10^{+10} | الرياح الشمسية |
| $3 \cdot 10^{-5}$ | 10^{-1} | 10^{+11} | 10^{+5} | الايونسفر الارض |
| 10^{-9} | 10^2 | 10^{+13} | 10^{+8} | الهالة الشمسية |
| 10^{-1} | 10^2 | 10^{+18} | 10^{-2} | غاز التفريغ |
| 5 | $10^{+4}-10^{+3}$ | $10^{+20}-10^{+19}$ | 1 | تجارب الاندماج |
| 5 | 10^{+4} | 10^{+20} | 2 | مفاعل الاندماج |

الجدول (I.1): بعض معاملات البلازما الطبيعية والبلازما المخبرية [1]



الشكل (I.2) مخطط تصنيف البلازما حسب الكثافة ودرجة الحرارة [2]

4. خصائص البلازما:

- 4.أ. الناقلية الكهربائية: بسبب الأيونات الموجبة والإلكترونات السالبة، تعتبر البلازما ناقلاً جيداً للكهرباء في حالة الحركة المنظمة المتعاكسة للشحنات الموجبة والسالبة.
- 4.ب. التعادل الكهربائي: تكون الشحنة الإجمالية في البلازما معدومة بسبب تساوي مجموع شحنة الإلكترونات والأيونات.
- 4.ت. نقل الأمواج الكهرومغناطيسية: تنتشر الأمواج الكهرومغناطيسية في البلازما حيث تتعلق طبيعة الانتشار بتواتر الموجة ω وتواتر البلازما ω_p .

5. معاملات البلازما :

- 5.أ. الكثافة الأيونية n_i : هي عدد الأيونات في وحدة الحجم، وبالمثل تعرف الكثافة الإلكترونية n_e .
- 5.ب. درجة التأين α : هي نسبة عدد الذرات المؤينة إلى العدد الكلي للذرات وفق العلاقة التالية:

$$\alpha = \frac{N_i}{N_0} \quad (I.1)$$

N_i عدد الأيونات في وحدة الحجم
 N_0 عدد الذرات في وحدة الحجم

5. ت. معامل التزاوج: يمثل نسبة الطاقة الكامنة المتوسطة إلى الطاقة الحركية المتوسطة للجسيم مع جسم مجاور له، بالنسبة للإلكترونات هو بالعلاقة:

$$\Gamma_{ee} = \frac{e^2}{KT r_e} \quad (I.2)$$

$\Gamma \ll 1$ التزاوج ضعيف والطاقة الحركية للجسيمات كبيرة وتوصف بالبلازما المثالية.
 $\Gamma \gg 1$ التزاوج قوي.

5. ث. نصف القطر الأيوني r_i : هو نصف قطر كرة تحتوي على أيون واحد في المتوسط.

$$\frac{4}{3}\pi r_i^3 n_i = 1 \Rightarrow r_i = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi n_i}} \quad (I.3)$$

5. ج. تواتر البلازما Ω_{pi} : إن إحداث اضطراب خارجي للبلازما يؤدي إلى إزاحة مكوناتها عن وضع إتزانها، حيث تنفصل الشحنات عن بعضها البعض وتنتج حقول داخلية تعمل على زيادة الحركة الجماعية للشحنات، أما حقل الاضطراب الخارجي فيعمل على تسريع الأيونات والإلكترونات جماعيا، حيث فارق الكتلة بين الأيون والإلكترون يؤدي إلى إبتعاد الإلكترونات عن وضع إستقرارها، وينشأ عنه حقل عكس جهة حركتها ويسبب إهتزاز الإلكترونات بتردد يدعى تواتر البلازما وفق المعادلة التالية:

$$\Omega_{pi} = \left(\frac{n_i z^2 e^2}{\epsilon_0 m_i} \right)^{1/2} \quad (I.4)$$

5. ح. طول ديبياي λ_D : يمثل مقياس لمسافة الحجب الناتج عن فصل الشحنات الموجبة والسالبة عن بعضها، ويعطى بالعلاقة التالية:

$$\lambda_D = \left(\frac{kT_e}{4\pi n_i e^2} \right)^{1/2} \quad (I.5)$$

في نظام الوحدات Cgs تبسط العلاقة الى الشكل:

$$\lambda_D = 6.9 (T/n_e)^{1/2} \quad (I.6)$$

5. خ. طول لاندو r_0 : يمثل المسافة التي تتساوى عندها الطاقة الكامنة للتفاعل الثنائي مع الطاقة الحركية للأيونات، يعطى بين إلكترونين بالعلاقة التالية:

$$r_0 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon kT} \quad (I.7)$$

6. التوازن الحراري في البلازما :

تكون البلازما في حالة توازن حراري إذا حققت القوانين الأربعة التالية:

6. أ. قانون ماكسويل بولتزمان للسرعات: هو توزيع احتمالي يعتمد على درجة حرارة النظام والسرعات المختلفة لحركة الجسيمات وفق الصيغة التالية:

$$z(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2k_B T}\right) \quad (I.8)$$

6.ب. قانون بولتزمان: تختلف الذرات والأيونات المكونة للبلازما في إثارة مستوياتها الطاقوية وفق قانون بولتزمان، تحدد النسبة بين الذرات أو الأيونات المثارة في مستوى طاقي معين إلى مستوى طاقي آخر وفق الصيغة التالية:

$$\frac{n_i}{n_j} = \frac{g_i}{g_j} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{K_B T}\right) \quad (I.9)$$

n_i كثافة الذرات في المستوى i

n_j كثافة الذرات في المستوى j

g_i الوزن الاحصائي للمستوي i

g_j الوزن الاحصائي للمستوي j

ΔE الفرق الطاقي بين المستويين i و j

6.ج. قانون صاها: نسبة التأين تعتمد على الطاقة الحركية لجزيئات الغاز ودرجة الحرارة. إعتبر صاها عملية التأين عملية عكسية حيث تظهر أيونات وإلكترونات وتختفي أيونات أخرى باتحادها مع الإلكترونات لتكوين ذرات متعادلة كما يلي:



في حالة التوازن الحراري من أجل درجة حرارة تحدد درجة تأين البلازما وفق العلاقة:

$$\frac{n_i n_j}{n_0} = \frac{\pi_i \pi_j}{\pi_0} \frac{(2\pi K_B T m_e)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right) \quad (I.11)$$

n_i كثافة الأيونات

n_e كثافات الإلكترونات

n_0 كثافات الذرات المحايدة

$\pi_e \pi_i \pi_0$ الوزن الإحصائي للإلكترون والأيون والذرة المحايدة

E_i هي طاقة التأين من المستوى الأساسي

6.ح. قانون بلانك: يعبر عن الكثافة الطيفية لإشعاع الجسم الأسود بدلالة تواتر الفوتونات، أثبت بلانك أن الكثافة الطيفية لإشعاع الجسم الأسود بالصيغة التالية:

$$u(\lambda, T) = \frac{8\pi h c}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1} \quad (I.12)$$

λ الطول الموجي لفوتونات

h : ثابت بلانك

7. نماذج معالجة البلازما:

7.أ. نموذج الموائع: تستخدم فيه معادلات ماكسويل مع المعادلات الكلاسيكية لحركة الموائع المغناطيسية من أجل وصف عياني للبلازما، يعتبر هذا النموذج البلازما سائل متصل الأجزاء له نفس الخصائص.

7.ب. النموذج الحركي: يعتمد هذا النموذج على دالة توزيع سرعة الجسيمات في كل نقطة من البلازما.

8. التصادمات في البلازما :

جميع جسيمات البلازما تتفاعل مع بعضها البعض بقوى تعتمد على مواضعها وكمون التفاعل، فإذا إقتربت جسيمتين أو أكثر بمسافات صغيرة نسبياً تتغير طاقة التفاعل والطاقة الحركية مما يؤدي إلى تغير مساراتها، أنواع هذه التصادمات هي:

8.أ. تصادم مرن: يحدث دون تغير الطاقة الداخلية للجسيمات لكن يرافق بتغير في مسارها والطاقة الحركية.

8.ب. تصادم غير مرن: يحدث تغير في الطاقة الداخلية للجسيمات بفقدان جزء من الطاقة الحركية للجسيمات.

9. أهم كمونات التفاعل المستخدمة في دراسات البلازما :

إختيار كمون التفاعل يتم إنطلاقاً من الظاهرة المدروسة من أمثلة كمونات التفاعل بين الجسيمات في البلازما:

9.أ. كمون كولوم: هو أبسط كمون تفاعل حيث تعتبر الشحنات نقطية، مع إهمال تأثير الوسط التفاعل يعطى بين جسيمتين بالصيغة التالية [3]:

$$V_{ij}(r_{ij}) = \left(\frac{z_j e}{r_{ij}} \right) \quad (I.13)$$

z_j العدد الشحني للأيون
 r_{ij} البعد بين الشحنتين

9.ب. كمون ديبياي: هو تصحيح لكمون كولوم بإدراج تأثير حجب الإلكترونات في البلازما وفقاً لطول ديبياي يعطى بالصيغة التالية [4]:

$$V_{ij}(r_{ij}) = \left(\frac{z_j e}{r_{ij}} \right) \exp\left(-\frac{r_{ij}}{\lambda_D}\right) \quad (I.14)$$

λ_D طول ديبياي

9.ت. كمون دوتش: هو تصحيح لكمون ديبياي في وسط ذو كثافة ودرجة حرارة عاليتين، حيث تدرج مساهمة التأثيرات الكمومية في وصف كمون تفاعل يميز غالباً التفاعل إلكترون أيون، صيغته العامة هي [5]:

$$V_{ij}(r_{ij}) = \left(\frac{z_j e}{r_{ij}} \right) (1 - \exp(-\frac{r_{ij}}{\lambda_T})) \exp(-\frac{r_{ij}}{\lambda_D}) \quad (I.15)$$

λ_T طول موجة ديبروغلي

9.ث. كمون دوتش ديبياي: يستخدم من أجل مساهمة التأثيرات الكمومية عند المسافات الصغيرة صيغته العامة هي:

$$V_{ij}(r_{ij}) = \left(\frac{z_j e}{r_{ij}} \right) (\exp(-\frac{r_{ij}}{\lambda_D}) - \exp(-\frac{r_{ij}}{\lambda_T})) \quad (I.16)$$

9.ج. كمون التفاعل الفعال: يستخدم من أجل البلازما الكثيفة، حيث يكون للتأثيرات الكمومية دور محوري، يمكن كتابة الكمون الفعال للتفاعلات إلكترون-أيون بالصيغة التالية [6]:

$$V_{ei} = -Ze^2 (rC_{ei})^{-1} (\exp(-B_{ei}r) - \exp(-A_{ei}r)) \quad (I.17)$$

حيث الثوابت

$$A_{ei}^2 = \frac{(1+C_{ei})}{2\lambda_{ei}^2} \quad B_{ei}^2 = \frac{(1-C_{ei})}{2\lambda_{ei}^2} \quad C_{ei}^2 = \frac{(1-4\lambda_{ei}^2)}{\lambda_D^2}$$

$$\lambda_{ei} = \frac{h}{\sqrt{2\pi\mu_{ei}k_B T}} \quad \mu_{ei} = \frac{m_e m_i}{m_e + m_i} \quad \lambda_D = \left(\frac{k_B T}{4\pi e^2 n_e}\right)^{\frac{1}{2}}$$

μ_{ei} الكتلة المختزلة للإلكترون والأيون

$\lambda_{ei} \approx \lambda_e$ الطول الموجي الحراري لذي برولي

9.ج. كمون Morse and Lennard-Jones: يستخدم في حالة الجسيمات عالية الطاقة من أجل تفاعلات قصيرة المدى صيغته العامة هي [7]:

$$V_{ij}(r_{ij}) = \sum_{j \neq i}^{N-1} A \exp(-\alpha r_{ji}) - \frac{C}{r_{ji}^6} \quad (I.18)$$

A ، C ، α هي ثوابت موجبة تعتمد على أنواع الذرات المتفاعلة

9.ج. كمون Kelbg: هو كمون يدرج التأثيرات الكمومية عند المسافات الصغيرة جدا توصل اليه Kelbg من خلال إستغلال نظرية الإضطرابات هو بالصيغة التالية [8]:

$$V_{ij}(r) = Z_i Z_j e^2 \left(\frac{\left(1 - \exp\left(-\frac{r^2}{\lambda_T^2}\right)\right)}{r} + \frac{\sqrt{\pi}}{\gamma_{ij} \lambda_T} \left(1 - \operatorname{erf}\left(-\frac{\gamma_{ij} r}{\lambda_T}\right)\right) \right) \quad (I.19)$$

$$\gamma_{ij} = \frac{V_{ij}^{kelbg}(0)}{V_{ij}^{exat}(0)} \quad (I.20)$$

إقترح *W. Ebeling* صيغة أبسط لكمون *Kelbg* الكمومي في جوار الصفر

بالصيغة التالية [8]:

$$V_{ij}(r) = \frac{e_i e_j}{\lambda_{Tij}} \left(\frac{\sqrt{\pi}}{\gamma_{ij}} - \frac{r}{\lambda_{Tij}} \right) \quad r < r_1 \quad (I.18)$$

r_1 : يمثل الحد الفاصل بين الفعل الكلاسيكي والفعل الكمومي، باستغلال شرط استمرار الكمون

يكون: $r_1 = \lambda_T$

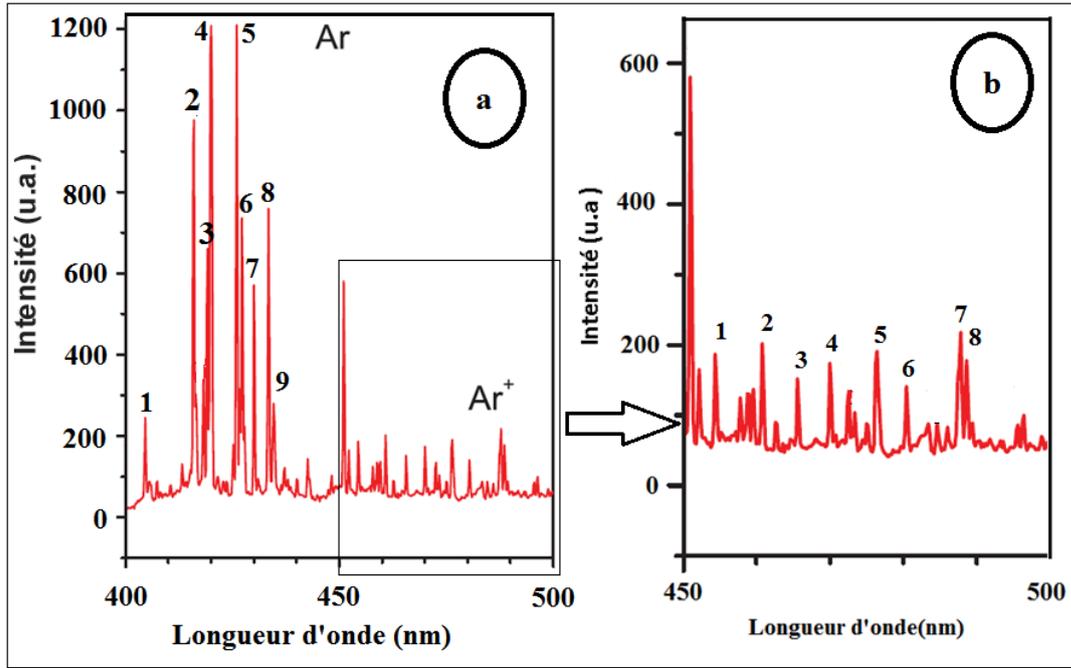
10. تطبيقات البلازما:

- 10.أ. المولدات الكهربائية المغناطون هيدروديناميكي MHD: هي أجهزة تحول الطاقة الحركية لبلازما كثيفة تناسب خلال حقل مغناطيسي لطاقة كهربائية.
- 10.ب. أجهزة ثنائي البلازما: يستخدم لتوليد التيار الكهربائي باستخدام قطبين أحدهما ساخن والأخر بارد لتحويل جزء من الطاقة الحرارية إلى تيار كهربائي.
- 10.ج. قطع المعادن بالبلازما: تستخدم البلازما لقص المعادن عن طريق تمرير غاز بضغط عالي في أنبوب ضيق يوجد في وسطه قطعة معدنية تحمل شحنة كهربائية سالبة، حيث يقوم الجهاز بلمس المعدن فتنتج شرارة داخل الأنبوب المليء بالغاز المضغوط، يتحول الغاز إلى حالة البلازما منتجا طاقة وحرارة عالية كافية لإنصهار المعدن.
- 10.ح. شاشات البلازما: تستخدم البلازما في صناعة الشاشات العالية الدقة عبر وضع خلايا متناهية في الصغر، تحتوي على غاز الزينون Xe داخل شرائح من الزجاج لإنتاج إضاءة بكميات وألوان مختلفة حسب الصورة، حيث تتوزع ذرات النيون Ne وذرات الزينون Xe على الخلايا المحصورة بين لوحين من الزجاج.

11. مجالات البحث في البلازما:

- بعد إكتشاف البلازما وهي رابع حالة للمادة تزايدت الأعمال والأبحاث حول دراستها وتطبيقها، ثم برزت تخصصا مهما في الفيزياء، من أهم مجالات البحث في فيزياء البلازما نجد:
- 11.أ. الخصائص الإحصائية للبلازما: يهتم الباحثون في هذا المجال بمعالجة عديد الخصائص المجهرية للبلازما منها حساب ودراسة كلا من توزيعات الحقول الكهربائية المحلية ومشتقاتها، دالة الترابط للحقول الكهربائية، دالة الترابط سرعات الجسيمات دالة التزاوج، مؤثر التصادم، من بين الأعمال التي اطلعنا عليها في هذا المجال نجد: Meftah مع آخرين حيث قاموا بدراسة ديناميكية الحقل الكهربائي عند نقطة مشحونة في البلازما بمركبتين [9]. كما نجد أعمال Guerricha مع آخرين قاموا بحساب دوال توزيع المشتقات الفضائية للحقل الكهربائي الأيوني باستخدام نموذج الجسيمات المستقلة في البلازما [10]. كما نرصد أعمال Ben Belgacem مع آخرين حيث قاموا بدراسة تأثير إقتران الإلكترون والأيون على توزيع الحقل الكهربائي في البلازما [11].
- 11.ب. الأمواج في البلازما: يهتم بدراسة إنتشار الأمواج في البلازما حسب تردداتها وتردد البلازما. توصف البلازما كوسط له ناقلية وثابت عزل. من بين الأعمال في هذا المجال نجد: Kryukovskii مع آخرين استخدموا طريقة النظام ثنائي الخصائص في محاكاة إنتشار الموجات في البلازما الأيونوسفيرية [12]. Bernstein مع آخرين قاموا بدراسة إنتشار الموجات في البلازما في وجود حقل مغناطيسي [13].
- 11.ج. مطيافية البلازما: طيف الإنبعث هو مجموعة فوتونات على شكل حزمة إشعاع تصدرها المواد، تتمايز الفوتونات عن بعضها البعض بالطول الموجي، التواتر، الشدة. إن طيف الإنبعث على نوعين خط طيف مستمر يحتوي على جميع الأطوال الموجية

لمجال معين، سببه كبح الأيونات أثناء الحركة. خط طيف يحتوي على عدد محدد من الأطوال الموجية، سببه إنتقال إلكترونات في حالة مثارة إلى مستوى طاقة أقل، الشكل (I.3) يبين خطوط الطيف.



الشكل: (I.3) خطوط الطيف [14]

مطيافية البلازما تهتم بدراسة خطوط طيف إشعاع البلازما وأسباب تعريضها بهدف تشخيصها من خلال الإشعاع الكهرومغناطيسي الصادر عنها، وهذا بتحليل الطيف المرصود تجريبيا والمحسوب نظريا، لمعرفة العناصر المكونة لها وتراكيزها ودرجات حرارتها.

من أسباب تعريض خطوط طيف إشعاع البلازما:

التعريض الطبيعي: سببه مبدأ عدم اليقين لهايزنبرج، إن تواجد الإلكترون في مستويات الطاقة في النظام الكمي يسبب تعريض لمستويات الطاقة γ يؤدي إلى إرتياب في تواتر أو طول موجة الخطوط الطيفية.

أجهزة القياس: تسبب تعريض لخطوط الطيف المرصود. بسبب ظاهرة حيود و إنعراج الضوء والأبعاد المحدودة للأجهزة.

تعريض دوبلر: سببه إشعاع ذرة أو أيون أثناء الحركة، مما يسبب إختلاف تردد الإشعاع الصادر في حالة السكون. يرتبط تأثير دوبلر الإحصائي بتوزيع السرعات للجسيم المشع، درجة الحرارة، كتلته.

تعريض زيمان: سببه إنقسام الخطوط الصادرة من الجسم المشع إلى خطوط متساوية البعد، بسبب حقل مغناطيسي خارجي.

التعريض بالتصادم مع الجسيمات الحيدية: سببه التصادم مع الجسيمات المحايدة حيث كل تصادم يسبب قطع إنبعاث الإشعاع.

تعريض ستارك سببه التصادم بالجسيمات المشحونة وتتم دراسة هذا التعريض بتقريبين أساسيين، تقريبا الصدم من أجل الجسيمات السريعة (الإلكترونات) التي حقلها الكهروستاتيكي متغير بشكل سريع، تقريبا الصدم من أجل الجسيمات البطيئة شبه ساكن (الأيونات) التي حقلها تقريبا ثابت أثناء التصادم.

يعبر عن شدة خط الطيف بفعل رباعي الأقطاب الكهربائي من أجل إنتقال طاقي للإلكترونات في أيونات البلازما بالصيغة التالية [15-16]:

$$I(\omega) = \int d\varepsilon \int d(\partial_{\mu}, \varepsilon_V) q(\varepsilon) p((\partial_{\mu}, \varepsilon_V), \varepsilon) J(\omega, \varepsilon, \partial_{\mu}, \varepsilon_V) \quad (I.20)$$

$q(\varepsilon)$: دالة احتمال الحقل الكهربائي

$p((\partial_{\mu}, \varepsilon_V), \varepsilon)$: احتمال المشتقة عند حقل مشروط ε

$J(\omega, \varepsilon, \partial_{\mu}, \varepsilon_V)$: دالة شدة خط الطيف في وجود الحقل وتدرجه، حيث الهامالتوني في وجود إضطراب هو بالصيغة [15-16]:

$$H(\bar{\varepsilon}, \partial_{\mu}\varepsilon_V) = H_r^0 - \bar{d}\bar{\varepsilon} - \frac{1}{6} \sum_{ij} \frac{Q_{ij} \partial \varepsilon_i}{\partial x_j} - \frac{1}{6} e_0 r^2 \bar{\nabla} \bar{\varepsilon} \quad (I.21)$$

H_r^0 : الهاملتون في غياب الإضطراب الإشعاعي

\bar{d} : عزم ثنائي الأقطاب المشع

Q_{ij} : تنسور عزم رباعي الأقطاب الكهربائي

r : نصف القطر الإلكتروني

مشتقات الحقل الكهربائي: $\frac{\partial \varepsilon_i}{\partial x_j}$

من بين الأعمال في هذا المجال نجد Khelfaoui مع آخرين قاموا بنمذجة طيف أيونات بشحنات متعددة في البلازما الحارة [17]. BenNana مع آخرين قاموا بدراسة للتعريض الإلكتروني للخط الطيفي تطبيقا على المغنيسيوم المحايد في البلازما [18]. Calisti مع آخرين قاموا بدراسة أشكال خطوط الأطياف المركبة للهيدروجين [19].

11.ح. بلازما الرش وترسيب الطبقات الرقيقة: تستعمل البلازما لترسيب الطبقات الرقيقة وطلاء الأسطح عن طريق استخدام تقنية الرش المهبطي، حيث توضع مادة الهدف على المهبط ذي الكمون السالب أما المصعد يكون موازيا له وتصلهما مسافة. تتسارع الأيونات بتأثير الحقل الكهربائي بين اللبوسين متجهة نحو المهبط، فتصادم مادة الهدف مع تبادل كمية الحركة، هذا يؤدي إلى إقتلاع ذرات محايدة كهربائيا، ثم توضع على الصفيحة الموجودة بالمصعد، فتشكل شريحة مجهرية هي الطبقة الرقيقة. من بين الأعمال في هذا المجال نجد:

Babahani مع آخرين قامت بحساب تراكيز الجزيئات والجزور أثناء ترسيب الطبقات الرقيقة بواسطة عمليات PECVD [20]. Azzaoui مع آخرين قاموا بدراسة أطياف إنبعثات أيون الأرجون أثناء الترسيب على طبقات رقيقة في جهاز رش [21]. في عمل اخر Babahani مع آخرين قاموا بمحاكاة مونتج كارلو للتفاعلات الكيميائية في حجم مفاعل PECVD أثناء ترسيب الطبقات الرقيقة [22].

12. مراجع الفصل الأول

[1] قبي سارة (2023). تأثير الفعل الكمومي على دوال توزيع مشتقات الحقل الكهربائي الموضوعي في البلازما باستخدام تفاعل *W. Ebeling* أطروحة دكتوراه جامعة قاصدي مرياح ورقلة.

[2] Bonitz, M., Moldabekov, Z. A., & Ramazanov, T. S. (2019). Quantum hydrodynamics for plasmas—Quo vadis? *Physics of Plasmas*, 26(9).

[DOI: 10.1063/1.5097885](https://doi.org/10.1063/1.5097885)

[3] Ramazanov, T. S., Dzhumagulova, K. N., & Gabdullin, M. T. (2010). Effective potentials for ion-ion and charge-atom interactions of dense semiclassical plasma. *Physics of Plasmas*, 17(4).

[DOI: 10.1063/1.3381078](https://doi.org/10.1063/1.3381078)

[4] Baumjohann, W., & Treumann, R. A. (2012). *Basic space plasma physics*.

[DOI: 10.1142/P850](https://doi.org/10.1142/P850)

[5] Douis, S., & Meftah, M. T. (2013). Relativistic dynamics of electrons around impurities in high-density plasmas. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, 7, 1-10.

[DOI: 10.1186/2251-7235-7-33](https://doi.org/10.1186/2251-7235-7-33)

[6] Shalenov, E. O., Seisembayeva, M. M., Dzhumagulova, K. N., & Ramazanov, T. S. (2019, November). Kinetic ionization and recombination coefficients in the dense semiclassical plasmas on the basis of the effective interaction potential. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1400, No. 7, p. 077035). IOP Publishing.

[DOI: 10.1088/1742-6596/1400/7/077035](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/7/077035)

[7] Graves, D. B., & Brault, P. (2009). Molecular dynamics for low temperature plasma-surface interaction studies. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42(19), 194011.

[8] Ebeling, W., Filinov, A., Bonitz, M., Filinov, V., & Pohl, T. (2006). The method of effective potentials in the quantum-statistical theory of plasmas. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 39(17), 4309.

[DOI: 10.1088/0022-3727/42/19/194011](https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/19/194011)

[9] Meftah, M. T., Chohra, T., Bouguettaia, H., Khelfaoui, F., Talin, B., Calisti, A., & Dufty, J. W. (2004). Electric field dynamics at charged point in two-component plasma. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 37, 39–46.

[DOI: 10.1140/epjb/e2004-00028-x](https://doi.org/10.1140/epjb/e2004-00028-x)

[10] Guerricha, S., Chihi, S., & Meftah, M. T. (2012). Distribution Function of Spatial Derivative of the Ion Electric Microfield Using the Independent Particles Model in Plasmas. *Contributions to Plasma Physics*, 52(9), 776–783.

<https://doi.org/10.1002/ctpp.201200026>

[11] Benbelgacem, K., Douis, S., Meftah, M. T., & Touahri, N. (2017). Effect of electron-ion coupling on the electric microfield distribution in plasmas. *Contributions to Plasma Physics*, 57(4), 176-181.

[DOI: 10.1002/ctpp.201700005](https://doi.org/10.1002/ctpp.201700005)

[12] Kryukovskii, A. S., Lukin, D. S., & Kir'yanova, K. S. (2012). Method of extended bicharacteristic system in simulating wave propagation in ionospheric plasma. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 57, 1039-1045.

[DOI:10.1134/S1064226912080177](https://doi.org/10.1134/S1064226912080177)

[13] Bernstein, I. B. (1958). Waves in a plasma in a magnetic field. *Physical Review*, 109(1), 10.

<https://doi.org/10.1103/PhysRev.109.10>

[14] Azzaoui, M., & Khelfaoui, F. (2013). Etude des spectres d'émission d'ions d'argon lors de déposition sur couches minces dans un pulvérisateur cathodique magnétron. *Annales des Sciences et Technologie*, 5(2), 204-208.

[15] Kilcrease, D. P., & Murillo, M. S. (2000). The ion electricmicrofield gradient joint probability distribution function for dense plasmas. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 65(1-3), 343-352. DOI: [10.1002/ctpp.201200026](https://doi.org/10.1002/ctpp.201200026)

[16] Chenini, K., Khelfaoui, F., Guerricha, S., Chihi, S., Ouahhab, A., & Meftah, M. T. (2011). Contribution to Calculation of Ion Microfield Nonuniformity Effect on the Asymmetry of Lyman- α Line in Dense Plasma. *Contributions to Plasma Physics*, 51(1), 34-43.

<https://doi.org/10.1002/ctpp.201000025>

[17] Khelfaoui, F. (1991). Modèles de profils Stark d'ions: multicharges dans les plasmas chauds (Doctoral dissertation, Aix-Marseille 1).

[18] Ben Nana, Y., Khelfaoui, F., Meftah, M. T., & Lari, E. S. (2020). A novel investigation in the electronic broadening of spectral line profiles: Application to neutral magnesium in plasmas. *Optik*, 202, 163485.

DOI: [10.1016/j.ijleo.2019.163485](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163485)

[19] Calisti, A., Khelfaoui, F., Stamm, R., & Talin, B. (1990, December). Line shapes in hydrogen and complex spectra. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 216, No. 1, pp. 3-18). American Institute of Physics.

[20] Babahani, O., & Khelfaoui, F. (2012). Calcul des concentrations de molécules et de radicaux lors de déposition de couches minces a-Si : H par procédés PECVD. *Annales des Sciences et Technologie*, 4(2), 115-120.

[21] Azzaoui, M., & Khelfaoui, F. (2013). Etude des spectres d'émission d'ions d'argon lors de déposition sur couches minces dans un pulvérisateur cathodique magnétron. *Annales des Sciences et Technologie*, 5(2), 204-208.

[22] Babahani, O., & Khelfaoui, F. (2014). Simulation Monte Carlo de réactions chimiques dans le volume d'un réacteur PECVD lors de déposition d'une couche mince a C : H. *Annales des Sciences et Technologie*, 6(2), 156-164.

DOI: [10.12816/0039185](https://doi.org/10.12816/0039185)

الفصل الثاني:

نماذج حساب توزيعات الحقول
الكهربائية الموضعية وسرعاتها
الزاوية

الفصل الثاني: نماذج حساب توزيعات الحقول الكهربائية الموضعية وسرعاتها الزاوية

الفصل الثاني: نماذج حساب توزيعات الحقول الكهربائية الموضعية وسرعاتها الزاوية

تبرز أهمية دوال توزيع الحقل الكهربائي الموضعي ودوال توزيع المشتقات الفضائية للحقل الكهربائي الموضعي في كونها جزء مهم في الصيغة الطيفية وصيغة رباعي الأقطاب الكهربائي، بينت أعمال أخرى حديثة تأثير دوال توزيع دوران شعاع الحقل ومشتقاته الزمنية على خط الطيف وهو ما سنتناوله في هذه الأطروحة إضافة إلى دوال توزيع أخرى.

1. أسس الحساب النظري لدوال توزيع الحقل ومشتقاته الفضائية

العبرة العامة لدوال توزيع أي مقدار فيزيائي G متعلق بالمواضع في تعطي كما يلي:

$$P(G) = \left\langle \delta \left(G - \sum_{i=1}^N g_i \right) \right\rangle \quad (II.1)$$

المقدار $P(G)$ يمثل عدد الهياكل الملائمة للنظام الفيزيائي مقسوماً على عدد الهياكل الكلي و الذي تعبر عنه دالة التقسيم حيث:

$$Z_N = \int \dots \int e^{-\frac{1}{k_B} u(r_1, \dots, r_N)} dr_1 \dots dr_N \quad (II.2)$$

طاقة النظام : $u(r_1, \dots, r_N)$

ثابت بولتزمان : k_B

من أجل دالة توزيع الحقل الكهربائي في بلازما ذات توازن حراري، حيث الحقل في كل موضع هو محصلة الحقول الناشئة عن كل الأيونات، فإن صيغة التوزيع للحقل تعطي كما يلي:

$$p(\vec{E}) = \left\langle \delta \left(\vec{E} - \sum_{i=1}^N \vec{E}_i \right) \right\rangle \quad (II.3)$$

بالتعويض في الصيغة التكاملية تصبح العبارة (II.3) بالشكل:

$$p(|\vec{E}|) = \frac{1}{Z_N} \int \dots \int e^{-\beta u(r_1, \dots, r_N)} \delta \left(|\vec{E}| - \sum_{i=1}^N |\vec{E}_i| \right) dr_1 \dots dr_N \quad (II.4)$$

أما من أجل دالة توزيع مشتقات الحقول الموضعية عند حقل مشروط فان عبارة التوزيع تكتب:

$$p \left(\frac{\partial Ex}{\partial x}, |\vec{E}| \right) = \delta \left(\frac{\partial Ex}{\partial x} - \sum_{i=1}^N \frac{\partial E_i x}{\partial x} \right) \delta \left(|\vec{E}| - \sum_{i=1}^N |\vec{E}_i| \right) \quad (II.5)$$

بالتعويض في الصيغة التكاملية (II.1) نحصل على:

$$p \left(\frac{\partial Ex}{\partial x}, \vec{E} \right) = \frac{1}{Z_N} \int \dots \int e^{-\beta u(r_1, \dots, r_N)} \delta \left(\frac{\partial Ex}{\partial x} - \sum_{i=1}^N \frac{\partial E_i x}{\partial x} \right) \delta \left(\vec{E} - \sum_{i=1}^N \vec{E}_i \right) dr_1 \dots dr_N \quad (II.6)$$

يعطي تحويل فوري لدوال ديراك:

$$\delta \left(|\vec{E}| - \sum_{i=1}^N |\vec{E}_i| \right) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-iu \left(|\vec{E}| - \sum_{i=1}^N |\vec{E}_i| \right)} du = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-iu|\vec{E}|} e^{iu \sum_{i=1}^N |\vec{E}_i|} du$$

الفصل الثاني: نماذج حساب توزيعات الحقول الكهربائية الموضعية وسرعاتها الزاوية

$$\delta\left(\frac{\partial Ex}{\partial x} - \sum_{i=1}^N \frac{\partial E_i x}{\partial x}\right) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\Omega\left(\frac{\partial Ex}{\partial x} - \sum_{i=1}^N \frac{\partial E_i x}{\partial x}\right)} d\Omega = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\Omega\frac{\partial Ex}{\partial x}} e^{i\Omega\sum_{i=1}^N \frac{\partial E_i x}{\partial x}} d\Omega \quad (II.7)$$

بتعويض هذه العبارات في دوال التوزيع (II.6) نجد:

$$p\left(\left|\vec{E}\right|\right) = \frac{1}{Z_N} \int \dots \int e^{-\beta u(r_1, \dots, r_N)} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-iu|\vec{E}|} e^{iu\sum_{i=1}^N |E_i|} du dr_1 \dots dr_N$$

$$p\left(\frac{\partial Ex}{\partial x}, \left|\vec{E}\right|\right) = \frac{1}{Z_N} \int \dots \int e^{-\beta u(r_1, \dots, r_N)} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\Omega\frac{\partial Ex}{\partial x}} e^{i\Omega\sum_{i=1}^N \frac{\partial E_i x}{\partial x}} d\Omega \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-iu|\vec{E}|} e^{iu\sum_{i=1}^N |E_i|} dudr_1 \dots dr_N \quad (II.8)$$

تتم المعالجة التحليلية العددية حسب طبيعة كمون التفاعل بين الجسيمات وعبارات الحقل ومشتقاته الفضائية.

2. أهم نماذج وتقنيات حساب دول توزيع الحقل ومشتقاته الفضائية

حسب إعتبرات كمون التفاعل بين أيونات البلازما، ضغط، درجة الحرارة الكثافة، يختار النموذج وتقنية الحساب المناسبة لحساب دوال التوزيع الحقل ومشتقاته الفضائية والتي نذكر منها:

أ. نموذج Holtsmark: إقترحه الفيزيائي Holtsmark لحساب دوال توزيع الحقول الكهربائية في البلازما حيث الجسيمات المشحونة غير تفاعلية. هذا النموذج صالح في حالة البلازما منخفضة الكثافة، درجة حرارة عالية جداً، حيث الطاقة الحركية أكبر من الطاقة الكامنة [1]. دالة Holtsmark كانت الحل الأول والأكثر أهمية لدالة توزيع الحقل في البلازما.

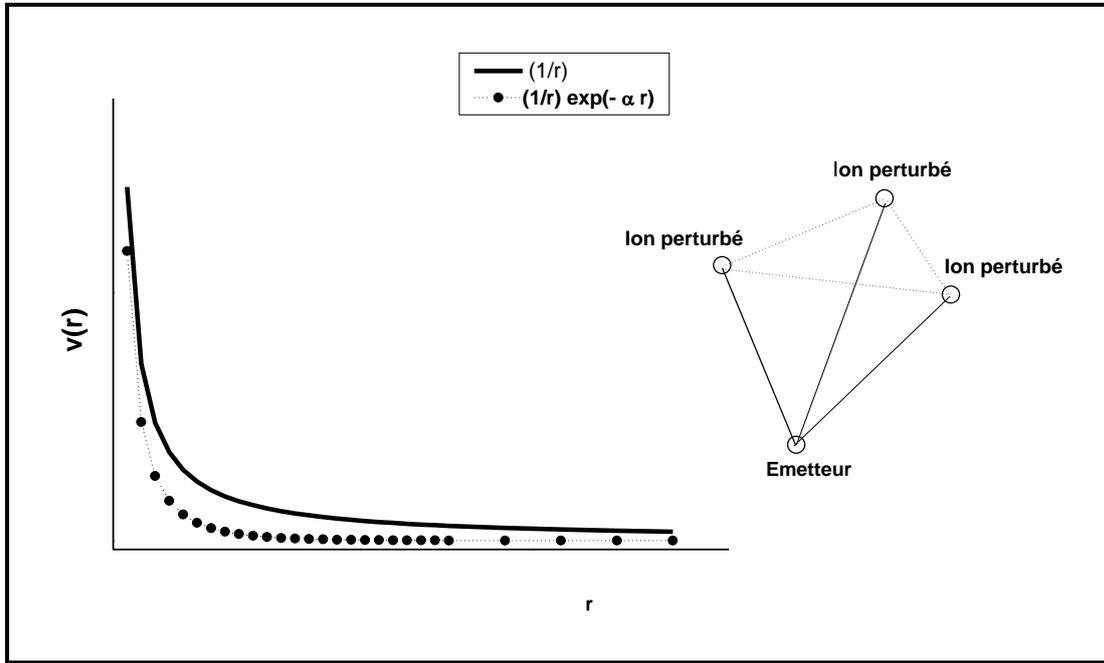
ب. نموذج Mayer: إستخدم طريقة النشر العنقودي للتفاعلات الثنائية القصيرة المدى ثم إستخدامها Salpeter من أجل التفاعلات الثنائية البعيدة المدى [1].

ج. نموذج Ecker-Muller: إفترض التفاعل بين الأيونات مهمل وكمون الأيونات محجوب بالإلكترونات وفقاً لكمون ديبياي [1].

د. نموذج الجسيم المستقل: إفترض التفاعل بين أيون مركزي مشع وبقية الأيونات فقط وفق كمون كولوم [1].

هـ. نموذج Baranger-Mozer: إستخدموا طريقة النشر العنقودي وافترضوا الحقل مكون من مركبة عالية التردد، وأخرى منخفضة التردد والتفاعلات وفق كمون Debye-Huckel [1].

و. تقريب الإحداثيات الجماعية: هذا التقريب يعتبر كمون التفاعل مجموع حدين، طويل المدى يمثل التفاعل بين الأيون المشع وبقية الأيونات فيما بينها، قصير المدى يمثل التفاعل بين بقية الأيونات والذي يضاف كإضطراب [1] كما يبين الشكل (II.1).



الشكل (II.1) منحنى كمون التفاعل المركزي مع أيون مشع واللامركزي للأيونات

2.ح. التقريب الآسي ذو المعامل القابل للتكييف (APEX): إستخدم هذا التقريب Iglesias عام 1983، حيث إفترض أن الإلكترونات ذات تردد عال والأيونات ذات تردد منخفض. 2.خ. تقنية محاكاة مونتني كارلو (MCS): تعتمد طريقة مونتني كارلو على حساب الأمل الرياضي لدوال المتغيرات العشوائية، و إستخدام الأعداد العشوائية و الإحتمالات الإحصائية في حل المسائل، كما تسمح بدراسة الجمل المعقدة المولدة عشوائياً من عدد كبير جدا من الهيئات، التي يمكن أن يشغلها النظام، يتم حساب وتقريب المتوسط الحراري ثم يُبدأ حساب المتوسط عندما تبلغ الجملة التوازن، في محاكاة مونتني كارلو توجد مرحلتان الأولى بناءً على هيئة ابتدائية بإحداثيات تحريك لها حتى تقترب الجملة من حالة التوازن، أما الثانية فيحدث تطور الجملة قريباً من التوازن بينما يبدأ بحساب المقادير المختلفة [2-3].

2.د. تقنية محاكاة التحريك الجزيئي (MDS): هي طريقة عددية لدراسة أنظمة متعددة الجسيمات مثل الغازات والسوائل والمواد الصلبة، يتم إستخدامها على نطاق واسع في علوم المواد والفيزياء والكيمياء. تتبع محاكاة التحريك الجزيئي حركة مجموع الجسيمات المتفاعلة من خلال تكامل معادلات الحركة، بإستخدام كمونات التفاعل بين الجسيمات. وتهدف لفهم خصائص مجموعة الجزيئات من حيث هياكلها والتفاعلات المجهرية بينها. كما يمكن أن تعالج أنظمة كبيرة لفترة طويلة نسبياً، أيضاً تساعد في تفسير التجارب كما تعطي معلومات على المستوى الجزيئي.

في عملنا هذا نفترض بأن أيونات البلازما ذات سرعات وفقاً لتوزيع ماكسويل بولتزمان درجة الحرارة ثابتة. ونعتبر الإلكترونات عمقاً مستمراً مع تفاعلات الأيونات وفقاً لكمون ديبياي [4].

3. إستخدامات محاكاة التحريك الجزيئي (MDS):

تم تطوير تقنية محاكاة التحريك الجزيئي (MDS) في الخمسينيات لأنظمة جسيمات مطبقة على الميكانيكا الفلكية والنظام الشمسي، من بين الأعمال التي اعتمدت محاكاة التحريك الجزيئي ما يلي:

B. J. Alder and T. E. Wainwright (1959) قاموا بتقديم عموميات عن تقنية محاكاة التحريك الجزيئي والدراسات التي يمكن إستخدامها و تسلسل للحسابات [5].
Dawson (1962): قدم نموذج لمحاكاة البلازما لعدة جزيئات في بعد واحد [6].
Aarseth (1969,1966,1963) درس تطور ركام مجرة درب التبانة بتقنيات محاكاة التحريك الجزيئي [7-9].

Aneesur Rahman Frank h. Stillinger (1971): قاموا بمحاكاة عينة من الماء بإستخدام محاكاة التحريك الجزيئي، حيث يتطور النظام وفق قوانين الميكانيك الكلاسيكي مع إجراء مقارنة تجريبية [10].

Lewis et al (1976) درسوا تفاعل سير البلازما بحركة الجزيئات المشحونة في حقل كهربائي ومغناطيسي. بإستعمال محاكاة التحريك الجزيئي لدراسة الآثار الحركية على أشكال خطوط الطيف في البلازما [11].

M.Parrinello and A. Rahman (1980) قاموا بدراسة البنية البلورية وكمونات التزاوج بإستخدام تقنية محاكاة التحريك الجزيئي [12].

W. D. Luedtke and Uzilandman (1989) قدموا وصف لتحضير السيليكون غير المتبلور بواسطة محاكاة التحريك الجزيئي، بإستخدام كمون-Stillinger Weber، عبر التبريد البطيء المباشر [13].

R. Smith and M. S. P. Sansom (1997) قاموا بدراسة الحركية الجزيئية للماء وأيونات الصوديوم في نماذج منطقة المسام لمستقبلات النيكوتين أستيل كولين [14].

Gonzalo et al (2002) قاموا بدراسة الخواص التركيبية لأكسيد الألومنيوم غير المتبلور (Al_2O_3) بإستخدام تقنية محاكاة التحريك الجزيئي [15].

Thomas D. et al (2003) بإستخدام تقنية محاكاة التحريك الجزيئي، قاموا بدراسة الخصائص المرنة لـ HMX [17].

Demetrios Xenides, et al (2005) إستخدموا ميكانيكا الكم ومحاكاة التحريك الجزيئي للماء السائل لفحص الخصائص الهيكلية والديناميكية للماء [17].

David B. Graves and Pascal Brault (2008) قاموا بتقديم تطبيقات محاكاة التحريك الجزيئي على تفاعلات سطح البلازما ذات درجة حرارة منخفضة [18].

Y. Y. Zhang, Q. X. Pei, and C. M. Wang قاموا بدراسة الخواص الميكانيكية للجرافين بإستخدام محاكاة التحريك الجزيئي [19].

Jiang, J. W et al (2018) قاموا بفحص معامل يونج للجرافين من خلال الإهتزاز الحراري الداخلي بإستخدام محاكاة التحريك الجزيئي [20].

الفصل الثاني: نماذج حساب توزيعات الحقول الكهربائية الموضوعية وسرعاتها الزاوية

Halverson, J. DEt al. (2018) قاموا بإستخدام محاكاة التحريك الجزيئي للتحقق من الخصائص الهيكلية لذوبان البوليمرات غير الحلقية ومقارنتها بإنصهار البوليمرات الخطية [21].

Ouahab. (2006) قام بدراسة السطح البيئي الفاصل بين معدن الفضة و الأكسيدين، كما حسب بعض الخصائص البنيوية على المستوي الذري باستعمال تقنية محاكاة التحريك الجزيئي [22].

4. أبحاث ونتائج سابقة متعلقة بالحقول الكهربائية في البلازما

Smith et al قام بتحسين شكل خط الانتقال الإشعاعي بين المركز وأجنحة الخط باستخدام دالة الحقل [23].

Gasparian et al درس الأيونات متعددة الشحنة في البلازما تحت تأثير الحقل الكهربائي على شكل الخط الطيفي وحركية النظام الذري [24].

Kilcrease et al قدم صيغة لحساب الحقل الكهربائي المنخفض التردد عند نقطة مشحونة في البلازما. كما تحققوا من صحة نموذج البلازما ذات درجتي الحرارة و تأثير الحقل على الأجزاء الثلاثة من سلسلة خط ليمان للألمنيوم شبيه الهيدروجين [25].

Murillo et al فحصوا مناهج متعددة لحساب الكميات المتوسطة ذات الحقول الكهربائية بالبلازما، جعل هذه الكميات في سياق التدرجات الفضائية المتعلقة بالحقول، وتستخدم لوصف التأثير الأيوني الرباعي [26].

Ramazanov et al إستخدم طريقة Iglesias لتحديد دالة توزيع الحقل الأيوني حيث تحدد دالة التوزيع من دالة الجسمين [27].

Iglesias et al حسبوا دوال توزيع الحقول الكهربائية السريعة، وإستخدموا تقريب (APEX) لتمثيل الحقول الكبيرة من أقرب جوار [28].

Benbelgacem et al إستخدم تقريب Baranger – Mozer لحساب توزيع الحقل الكهربائي في البلازما المكونة من عنصرين، وإستخدموا طريقة النقطة الثابتة وطريقة Runge-Kutta لحل معادلة التكامل للطاقة الكامنة [29].

Meftah and Chohra في بلازما مكونة من أيونيين (TICP) حسبوا دالة ترابط الذاتي للسرعة والحقل الكهربائي لأيون الشوائب [30].

Douis. et al قاموا بحساب دالة الترابط الذاتي للحقل الكهربائي الكلاسيكي و النسبوي وفقاً لمعادلة طاقة فعالة و اعتبروا التفاعل في الخطوة الأولى تفاعل Deutsh وفي الخطوة الثانية تفاعل Kelbg [31].

Kilcrease et al وصفوا احتمالية تدرجات حقل محدد لقيمة معينة للحقل بالبلازما، بإستخدام التقريبات التحليلية و تقريب (APEX) و محاكاة التحريك الجزيئي [32].

Guerricha et al قاموا بحساب المشتق الفضائي لمركبات الحقل الكهربائي الأيوني في البلازما بإستخدام نموذج الجزيئات المستقلة (IPM) [33].

الفصل الثاني: نماذج حساب توزيعات الحقول الكهربائية الموضوعية وسرعاتها الزاوية

Chenini et al قاموا بحساب دوال توزيع الحقول الكهربائية و مشتقاتها الفضائية باستخدام محاكاة مونتني كارلو (MCS)، تم إستغلال هذه التوزيعات لإثبات عدم تناسق خط لييمان في بلازما الهليوم [34].

Calisti et al درسوا تأثير حركية الحقل الكهربائي على أشكال خطوط الطيف باستغلال دراسة تأثيرات نموذجين للحقل الكهربائي، النموذج الأول عبارة عن حقل دوار ذو قيمة ثابتة، النموذج الثاني لحقل يعتمد على الزمن في إتجاه معين. أيضا ناقشوا تأثيرات الحقل الأيوني وأشكال خطوط لييمان لكثافات ودرجات حرارة مختلفة [35].

Demura et al عرض بعض أهم الدراسات التجريبية والنظرية للحقول الكهربائية في بلازما الغازات وتركيبات النمذجة النووية الحرارية، كما وصف مفاهيم نماذج الحقول التي تم إستخدامها، كما قدم تقييم لكل من النماذج التحليلية والعديدية لتوزيعات الحقل ، دالة الترابط الزمني للحقل [36].

Demura et Stambulchik تحققوا من تأثير تقلبات الحقل الكهربائي في النموذج المضطرب لحركة الأيونات بنظرية التصحيحات الحرارية (TTC)، كما إستخدموا تأثيرات حركة الأيونات على تقلبات الحقول الناتجة عن الدوران، بإستخدام محاكاة غير المضطربة [37-38].

Adaika et al طبقوا نموذج Holtsmark لحساب توزيع السرعة الزاوية للحقل الكهربائي بشدة ثابتة، حيث إستخدموا تقريب (Holtsmark) و (IPM) لحساب دوال التوزيع للسرعة الزاوية للحقل، ثم إستغلال التوزيعات التي تم الحصول عليها لإظهار تأثير ذلك على تعريض خط لييمان لبلازما مكونة من أيونات الهليوم [39].

في أعمال سابقة حسبنا دوال توزيع المشتقات الفضائية للحقل الكهربائي في البلازما بالنسبة لمعلم ثابت ومعلم متحرك باستخدام محاكاة التحريك الجزئي [40-41].

5. أساسيات محاكاة التحريك الجزئي في بلازما التوازن الحراري:

إن التعقيد في حالة البلازما بشتى أشكالها بسبب تعدد الظواهر المؤثرة يجعل دقة النتائج متعلق بالنماذج المقترحة، والفرضيات الفيزيائية وتقنيات المحاكاة المستخدمة. أهم المراحل الأساسية لحساب دوال توزيع الحقل ومشتقاته في البلازما بطريقة محاكاة التحريك الجزئي ما يلي:

5.أ. الظاهرة الفيزيائية: نعتبر بلازما في حالة توازن حراري مكونة من أيونات تتفاعل بينها ونعتبر الإلكترونات عمق مستمر.

5.ب. النموذج الرياضي: نختار كمون التفاعل بين الأيونات بتأثير حجب الإلكترونات وفقا ما يلي:

$$V_{ij}(\mathbf{r}_{ij}) = \left(\frac{Z_j e}{r_{ji}} \right) \exp \left(-\frac{r_{ji}}{\lambda_D} \right) \quad (II.11)$$

الفصل الثاني: نماذج حساب توزيعات الحقول الكهربائية الموضعية وسرعاتها الزاوية

نستنتج القوى المتبادلة بين الأيونات وفقا لتدرج كمون التفاعل، من أجل أيونين يكون كما يلي:

$$\vec{F}_i = \sum_{j \neq i}^{N-1} \left(\frac{Z_j Z_i e^2}{r_{ji}^3} \right) \left(\frac{1}{\lambda_D} + \frac{r_{ji}}{\lambda_D^2} \right) \exp\left(-\frac{r_{ji}}{\lambda_D}\right) \vec{r}_{ji} \quad (II.12)$$

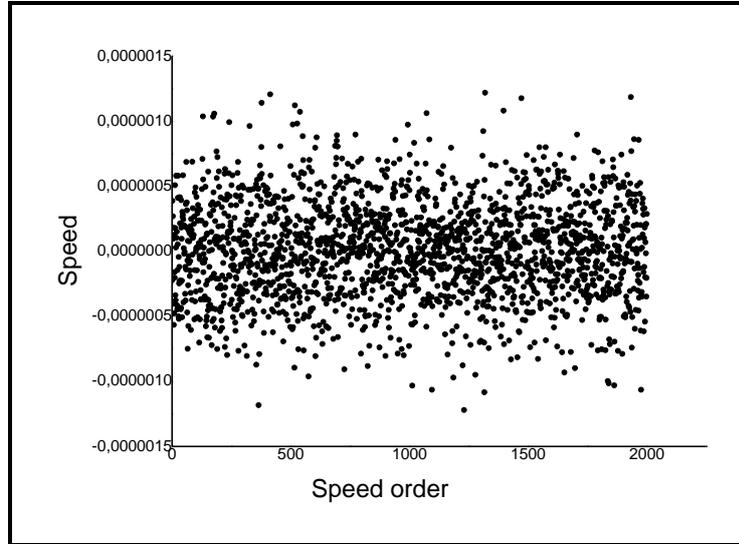
5.ب. النموذج العددي: نختار وحدات الحساب للطول والزمن والكتل والشحن...
5.ب. خلية المحاكاة: إختيار شكل خلية المحاكاة تابع للظاهرة والحركة الجماعية للأيونات في عملنا نختار خلية مكعبة، بعد الخلية تابع لكثافة البلازما وعدد أيونات المحاكاة.

5.ج. السرعات والمواضع الابتدائية: نوزع عشوائيا مواضع الأيونات داخل الخلية بواسطة برنامج مولد أعداد عشوائية والسرعات وفقا لسرعات ماكسويل بولتزمان ودرجة حرارة البلازما.

5.ح. برنامج مولد الأعداد العشوائية: يولد أعداد عشوائية بإحتمالات متساوية في المجال [0,1]. يمكن تحويل هذه الأعداد إلى مجال آخر [a,-a] بنفس الإحتمالات وفق العلاقة التالية:

$$X = -a/2 + a \text{RAN}(ii) \quad (II.13)$$

الشكل (II. 2) يبين قيم 1000 عدد عشوائي مولدة بواسطة برنامج Ran على التوالي في المجال [0, 1].



الشكل (II. 2) قيم 1000 سرعة عشوائية مولدة باستخدام برنامج Ran

يتضح من الشكل أغلب القيم بجوار القيمة صفر التي تمثل أعلى إحتمال. بغرض الحصول على سرعات عشوائية في حالة توازن حراري من أعداد عشوائية حيث صيغة السرعة هي:

$$v = \sigma \sqrt{-2 \ln(s_1)} \cos(2\pi s_2)$$

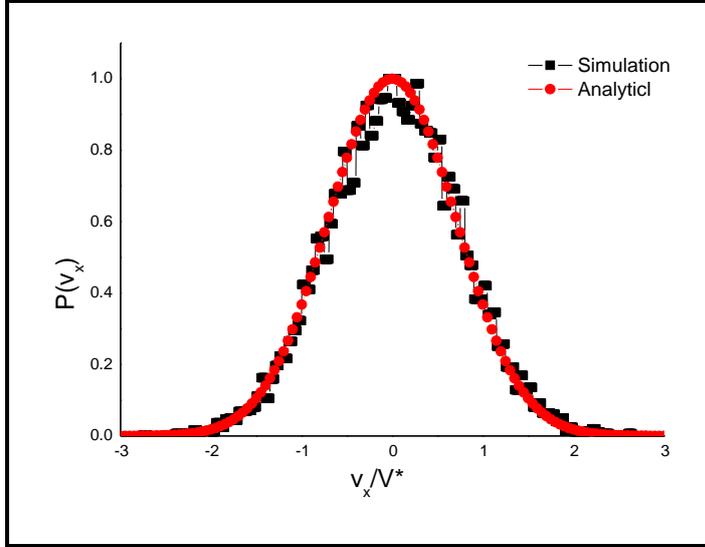
$$\sigma = \sqrt{\frac{K_B T}{m_i}} \quad (II.14)$$

s_1, s_2 أعداد مولدة عشوائيا

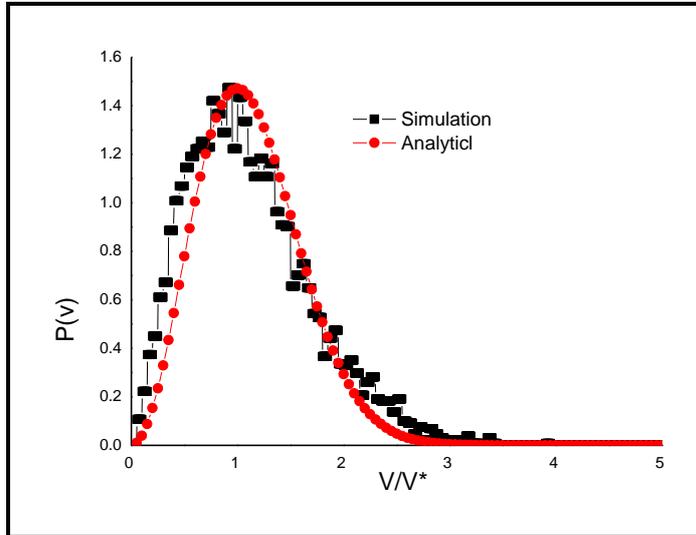
σ الانحراف المعياري لتوزيع السرعات

حسبنا توزيع 1000 قيمة لسرعات عشوائية خاصة بذرة الهيدروجين عند درجة

حرارة $T=10^3 K$ بواسطة البرنامج وكذا ومركباتها كما في الشكلين (II. 3) (II. 4):



الشكل (II. 3) : توزيع مركبات السرعات العشوائية



الشكل (II. 4) : توزيع طولية السرعات العشوائية

وجدنا توافق هذه المنحنيات مع توزيع السرعات لقانون ماكسويل بولتزمان في حالة توازن حراري.

5.ج. السرعات الابتدائية: من أجل نظام في حالة توازن حراري نأخذ مركبات السرعات الابتدائية وفقا لبرنامج مولد الأعداد العشوائية.

الفصل الثاني: نماذج حساب توزيعات الحقول الكهربائية الموضعية وسرعاتها الزاوية

5.ح. معادلات الحركة لديناميكا الجزيئية والتكامل العددي: يمكن الحصول على مسار كل جسيم بتكامل معادلات الحركة لعدد كبير من الجزيئات، حيث يتم إعتقاد عديد الطرق والخوارزميات المختلفة، مثل خوارزم فيرلي.

5.خ. خوارزم فيرلي Verlet: يعتمد على نشر تايلور للدوال، حيث الدالة هي مواضع الأيونات، مشتقتها الأولى هي السرعات والمشتقة الثانية هي التسارعات، عبارة المواضع الأولى بالعلاقة التالية:

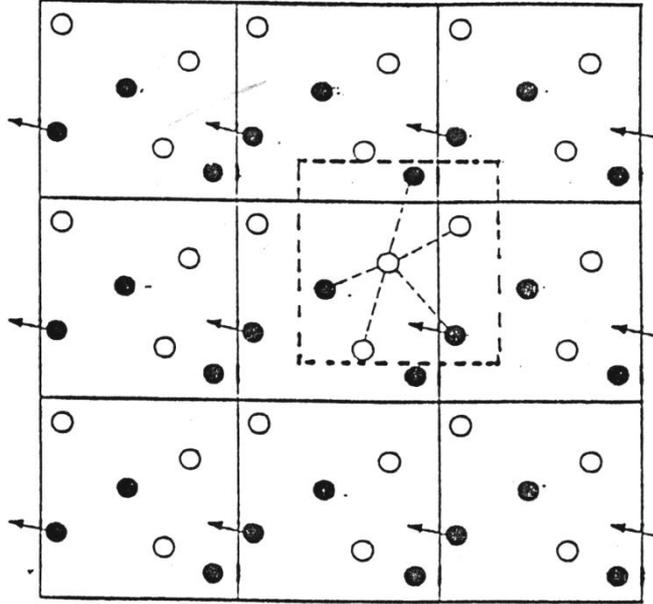
$$\vec{r}_i(\Delta t) = \vec{r}_i(0) + \Delta t \vec{v}_i(0) + (\Delta t)^2 \sum_{j \neq i} \vec{F}_{ij}(0) / 2m_i \quad (II.15)$$

بالنسبة للخطوات الزمنية التالية نحسب تطور مواضع الأيونات $\vec{r}_i(t)$ والسرعات $\vec{v}_i(t)$ بواسطة خوارزمية فيرلي كما يلي:

$$\vec{r}_i(t + \Delta t) = 2\vec{r}_i(t) - \vec{r}_i(t - \Delta t) + (\Delta t)^2 \sum_{j \neq i} \vec{F}_{ij}(t) / m_i \quad (II.16)$$

$$\vec{v}_i(t) = (\vec{r}_i(t + \Delta t) - \vec{r}_i(t - \Delta t)) / (2\Delta t) \quad (II.17)$$

5.د. فرضيات المحاكاة: نعتبر نظام البلازما يحتوي على عدد أيونات ثابت، في حالة توازن حراري و تأين تام، نعتبر الإلكترونات عمق مستمر، كمون تفاعل الأيونات هو كمون ديباي، عدد أيونات المحاكاة داخل الخلية المكعبة $N_p = 50$ ، موزعة عشوائيا عند لحظة إبتدائية وفقا لبرنامج مولد الأعداد العشوائية، نعتبر وحدة الزمن مقلوب تواتر البلازما $\frac{1}{\omega_p}$. من أجل التوازن الحراري في الحساب العددي نعتبر النسبة بين درجة حرارة النظام ودرجة حرارة متوسط السرعات أقل من نسبة محددة. إن التفاعل بين الجسيمات يكون ثنائي وجماعي، لحساب القوة والطاقة الأكثر فعالية نقوم بمركزة الخلية على كل أيون لحساب القوة المطبقة كما يبين الشكل (II. 5).



الشكل (II. 5) الشروط الحدية لحركة الأيونات وحساب القوى

5.ر. يقوم البرنامج بقراءة المقادير العددية والفيزيائية اللازمة للدراسة. T درجة الحرارة، n_i كثافة الأيونات، z_i شحنة كل الأيونات، m_i كتلة كل الأيونات، N عدد الأيونات داخل الخلية، $Nstpm$ عدد الخطوات الزمنية، Δt الخطوة الزمنية.

5.ز. يقوم البرنامج بحساب معاملات البلازما، λ_D طول ديبياي، ω_p تواتر البلازما، r_i البعد المتوسط بين الأيونات، Γ_{ii} معامل التزاوج بين الأيونات، a طول ضلع الخلية، الطاقة الكامنة للنظام، متوسط الطاقة الحركية.

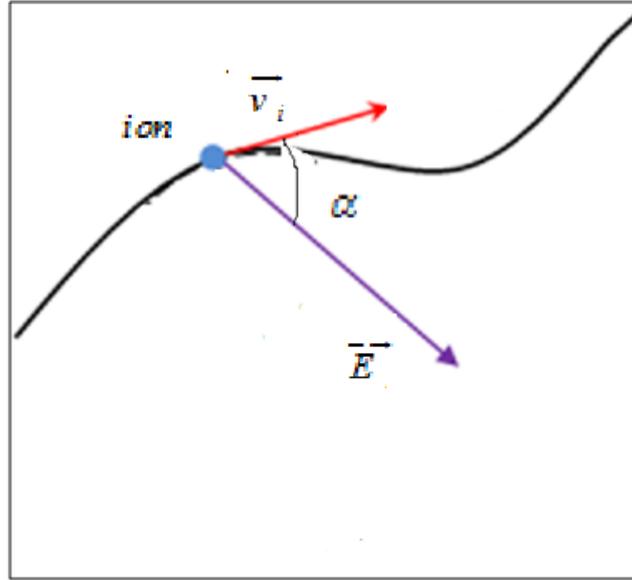
5.س. يقوم البرنامج بحساب زوايا الحقل ومشتقاتها الزمنية بمتابعة تطور مواضع وسرعات الأيونات داخل خلية المحاكاة مع إحترام شرط التوازن الحراري؛ في كل خطوة يحسب القوة والحقل المطبقة على كل أيون من طرف كل الأيونات الأخرى وفقا لمبدأ التجميع، ثم إسقاطها على المحاور المطلوبة.

5.ش. تعتمد طريقة الإحصاء على المدرج التكراري، بإستخدام فئات صغيرة متساوية الطول بمقدار بضع أجزاء من وحدة القياس، ثم يتم تجميع متتالي لعدد القيم الموافق لكل فئة.

الشكل (II. 6) يبين الزاوية α بين الحقل وشعاع السرعة أما عبارة الزاوية

فهي بالصيغة التالية :

$$\alpha = \arccos \left(\frac{v_{ix} E_x + v_{iy} E_y + v_{iz} E_z}{|v_i| |\vec{E}|} \right) \quad (II.18)$$



الشكل (II.6) الزاوية α بين متجه الحقل ومتجه السرعة

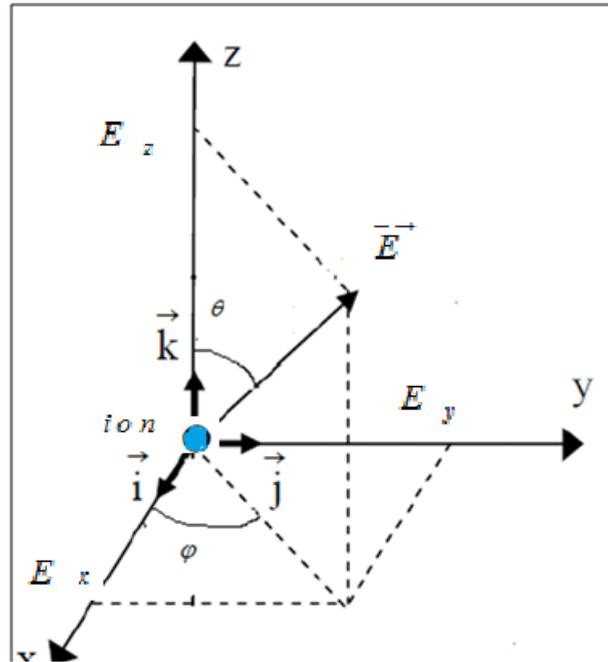
الشكل (II. 7) يبين الزوايا θ و φ للحقل في المستوى الديكارتي. أما عبارة الزوايا فهي بالصيغ التالية:

$$\theta_x = \arccos(E_x / |\vec{E}|) \quad (II.19)$$

$$\theta_y = \arccos(E_y / |\vec{E}|) \quad (II.20)$$

$$\theta_z = \arccos(E_z / |\vec{E}|) \quad (II.21)$$

$$\varphi = \arctan(E_y / E_x) \quad (II.22)$$



الشكل (II. 7) : الزوايا θ و φ للحقل في المستوى الديكارتي

الفصل الثاني: نماذج حساب توزيعات الحقول الكهربائية الموضعية وسرعاتها الزاوية

المشتقات الزمنية للزوايا الحقل الكهربائي تكتب على النحو التالي:

$$\omega_x = \left(\frac{\Delta \theta_x}{\Delta t} \right) \quad (II.23)$$

$$\omega_y = \left(\frac{\Delta \theta_y}{\Delta t} \right) \quad (II.24)$$

$$\omega_z = \left(\frac{\Delta \theta_z}{\Delta t} \right) \quad (II.25)$$

$$\omega_\alpha = \left(\frac{\Delta \alpha}{\Delta t} \right) \quad (II.26)$$

$$\omega_\phi = \left(\frac{\Delta \phi}{\Delta t} \right) \quad (II.27)$$

وعليه فإن السرعة الزاوية للحقل الكهربائي ستكون:

$$\omega = (\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2)^{1/2} \quad (II.28)$$

أثناء تطور حركة الأيونات وفق خوارزم فيرلي نحسب شدة متجه التسارع وفق العلاقة:

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (II.29)$$

نحسب التسارع الناظمي لكل أيون في كل لحظة زمنية بالعلاقة التالية:

$$a_N = a \sin \alpha \quad (II.30)$$

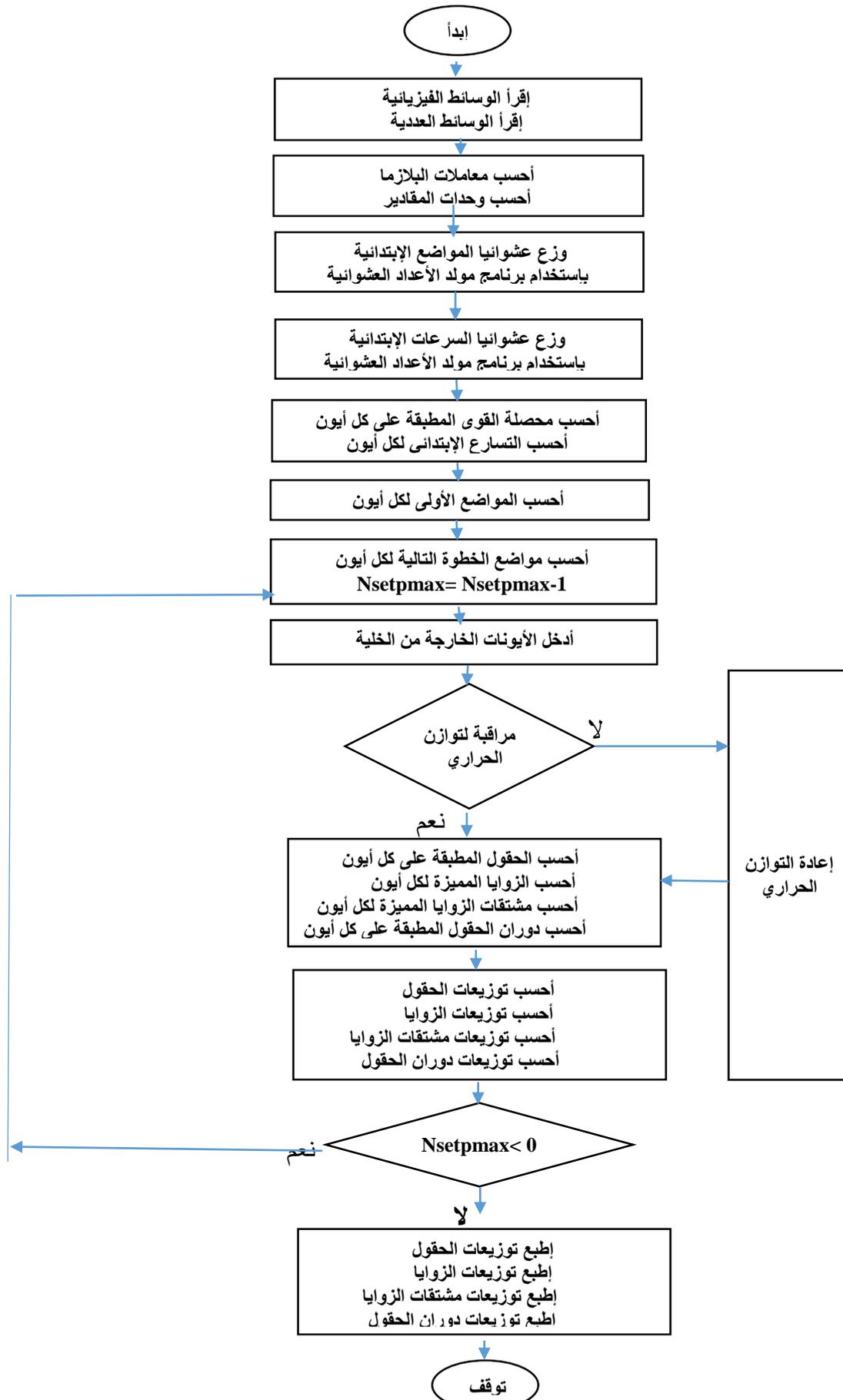
نكتب نصف قطر إنحناء كل أيون في كل لحظة زمنية وفق العبارة:

$$R = \frac{V^2}{a_N} \quad (II.31)$$

السرعة الزاوية لكل أيون في كل لحظة زمنية تعطى كما يلي:

$$w = \frac{v}{R} \quad (II.32)$$

الفصل الثاني: نماذج حساب توزيعات الحقول الكهربائية الموضعية وسرعاتها الزاوية



مخطط انسياب خوارزمية حساب التوزيعات باستخدام محاكاة التحريك الجزيئي

6. مراجع الفصل الثاني

- [1] قريشة سليمة. (2013). استخدام نموذج الجسيمات المستقلة لحساب دوال توزيع المشتقات الفضائية للحقل الكهربائي الأيوني الموضعي في البلازما (أطروحة دكتوراه جامعة قاصدي مرباح ورقلة).
- [2] شيحي إسماعيل. (2005). حساب دوال توزيع الحقل الكهربائي الموضعي ومشتقاته داخل البلازما، باستخدام المحاكاة العددية مونتي كارلو (أطروحة دكتوراه جامعة قسنطينة).
- [3] قريشة سليمة. (2008). مساهمة في دراسة توزيعات المشتقات الفضائية للحقول الكهربائية الموضعية الأيونية في البلازما (مذكرة ماجستير جامعة قاصدي مرباح ورقلة).
- [4] Gao, Z. (2016, June). Research on numerical integration algorithm in molecular dynamics simulation. Second International Conference on Machinery, Electronics and Control Simulation (MECS 2017). Atlantis Press.
- [5] Alder, B. J., & Wainwright, T. E. (1959). Studies in molecular dynamics. I. General method. The Journal of Chemical Physics, 31(2), 459-466.
<https://doi.org/10.1063/1.1730376>
- [6] Dawson, J. (1962). One-dimensional plasma model. The Physics of Fluids, 5(4), 445-459.
<https://doi.org/10.1063/1.1706638>
- [7] Aarseth, S. J., & Hoyle, F. (1963). Dynamical evolution of clusters of galaxies, I. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 126(3), 223-255.
<https://doi.org/10.1093/mnras/126.3.223>
- [8] Aarseth, S. J. (1966). Dynamical evolution of clusters of galaxies, II. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 132(1), 35-65.
<https://doi.org/10.1093/mnras/132.1.35>
- [9] Aarseth, S. J. (1969). Dynamical Evolution of Clusters of Galaxies III. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 144(4), 537-548.
<https://doi.org/10.1093/mnras/144.4.537>
- [10] Rahman, A., & Stillinger, F. H. (1971). Molecular dynamics study of liquid water. The Journal of Chemical Physics, 55(7), 3336-3359.
<https://doi.org/10.1063/1.1676585>
- [11] Langdon, A. B., & La sinski, B. F. (1976). Electromagnetic and relativistic plasma simulation models. Methods in Computational Physics, 16, 327-366.
- [12] Parrinello, M., & Rahman, A. (1980). Crystal structure and pair potentials: A molecular-dynamics study. Physical review letters, 45(14), 1196.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.45.1196>
- [13] Luedtke, W. D., & Landman, U. (1989). Preparation, structure, dynamics, and energetics of amorphous silicon: A molecular-dynamics study. Physical Review B, 40(2), 1164.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.40.1164>
- [14] Smith, G. R., & Sansom, M. S. (1997). Molecular dynamics study of water and Na⁺ ions in models of the pore region of the nicotinic acetylcholine receptor. Biophysical journal, 73(3), 1364-1381.
[DOI: 10.1016/S0006-3495\(97\)78169-4](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(97)78169-4)
- [15] Gutierrez, G., & Johansson, B. (2002). Molecular dynamics study of structural properties of amorphous Al₂O₃. Physical Review B, 65(10), 104202.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.104202>

[16] Sewell, T. D., Menikoff, R., Bedrov, D., & Smith, G. D. (2003). A molecular dynamics simulation study of elastic properties of HMX. *The Journal of chemical physics*, 119(14), 7417-7426.

[DOI: 10.1063/1.1599273](https://doi.org/10.1063/1.1599273)

[17] Xenides, D., Randolph, B. R., & Rode, B. M. (2005). Structure and ultrafast dynamics of liquid water: A quantum mechanics/molecular mechanics molecular dynamics simulations study. *The Journal of chemical physics*, 122(17), 174506.

[DOI: 10.1063/1.1888465](https://doi.org/10.1063/1.1888465)

[18] Graves, D. B., & Brault, P. (2009). Molecular dynamics for low temperature plasma-surface interaction studies. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42(19), 194011.

[DOI: 10.1088/0022-3727/42/19/194011](https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/19/194011)

[19] Zhang, Y. Y., Pei, Q. X., & Wang, C. M. (2012). Mechanical properties of graphynes under tension: a molecular dynamics study. *Applied Physics Letters*, 101(8), 081909.

[DOI: 10.1063/1.4747719](https://doi.org/10.1063/1.4747719)

[20] Jiang, J. W., Wang, J. S., & Li, B. (2009). Young's modulus of graphene: a molecular dynamics study. *Physical Review B*, 80(11), 113405.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.80.113405>

[21] Halverson, J. D., Lee, W. B., Grest, G. S., Grosberg, A. Y., & Kremer, K. (2011). Molecular dynamics simulation study of nonconcatenated ring polymers in a melt. I. Statics. *The Journal of chemical physics*, 134(20), 204904.

<https://doi.org/10.1063/1.3587138>

[22] Abdelouahab, Ouahab. (2006). Etude théorique et simulation d'une interface métal-oxyde (Doctoral dissertation, Batna, Université El Hadj Lakhder. Faculté des sciences).

[23] Smith, E. W., & Hooper, C. F. (1968). Comments on ion microfield distributions as used in plasma line broadening theories. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 8, 1617-1619.

[https://doi.org/10.1016/0022-4073\(68\)90056-3](https://doi.org/10.1016/0022-4073(68)90056-3)

[24] Gasparyan, P. D., Gerasimov, V. M., Starostin, A. N., & Suvorov, A. E. (1994). Effect of Plasma Microfields on the Gain of Hydrogen-Like Ions With Photoresonant Pumping. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 78(6), 858-864.

https://doi.org/10.1142/9789812815941_0030

[25] Kilcrease, D. P. (1994). Plasma electric microfields for differing electron and ion temperatures. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 51, 161-167.

[https://doi.org/10.1016/0022-4073\(94\)90076-0](https://doi.org/10.1016/0022-4073(94)90076-0)

[26] Murillo, M. S., Kilcrease, D. P., & Collins, L. A. (1997). Dense plasma microfield nonuniformity. *Physical Review E*, 55, 6289-6292.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.55.6289>

[27] Ramazanov, T. S., Jelbuldina, M. C., & Physics, T. (2012). Microfield distribution in semi classical plasma. *International Journal of Mathematics and Physics*, 3(2), 140-143.

<https://ijmph.kaznu.kz/index.php/kaznu/article/view/57>

[28] Iglesias, C. A., Rogers, F. J., Shepherd, R., Bar-Shalom, A., Murillo, M. S., Kilcrease, D. P., & Lee, R. W. (2000). Fast electric microfield distribution calculations in extreme matter conditions. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 65(1-3), 303-315.

[https://doi.org/10.1016/S0022-4073\(99\)00076-X](https://doi.org/10.1016/S0022-4073(99)00076-X)

[29] Benbelgacem, K., Douis, S., Meftah, M. T., & Touahri, N. (2017). Effect of electron – ion coupling on the electricmicrofield distribution in plasmas. *Contributions to Plasma Physics*, 57(4), 176–181.

<https://doi.org/10.1002/ctpp.201700005>

[30] Chohra, T., Chenini, K., Meftah, M., & Boukraa, A. (2009). Model of Dynamical Correlation in Two-Ionic Strong Coupling Plasmas. *Acta PhysicaPolonica A*, 116(2), 193-196.

[DOI: 10.12693/APhysPolA.116.193](https://doi.org/10.12693/APhysPolA.116.193)

[31] Douis, S., & Meftah, M. T. (2013). Correlation function and electronic spectral line broadening in relativistic plasmas. *SerbianAstronomical Journal*, 186, 15–23.

<https://doi.org/10.2298/SAJ130218002D>

[32] Kilcrease, D. P., & Murillo, M. S. (2000). The ion electricmicrofield gradient joint probability distribution function for dense plasmas. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 65(1–3), 343–352.

[https://doi.org/10.1016/S0022-4073\(99\)00079-5](https://doi.org/10.1016/S0022-4073(99)00079-5)

[33] Guerricha, S., Chihi, S., & Meftah, M. T. (2012). Distribution Function of Spatial Derivative of the Ion Electric Microfield Using the Independent Particles Model in Plasmas. *Contributions to Plasma Physics*, 52(9), 776–783.

<https://doi.org/10.1002/ctpp.201200026>

[34] Chenini, K., Khelfaoui, F., Guerricha, S., Chihi, S., Ouahhab, A., & Meftah, M. T. (2011). Contribution to Calculation of Ion MicrofieldNonuniformityEffect on the Asymmetry of Lyman- α Line in Dense Plasma. *Contributions to Plasma Physics*, 51(1), 34–43. <https://doi.org/10.1002/ctpp.201000025>

[35] Calisti, A., Demura, A. V., Gigosos, M. A., González-Herrero, D., Iglesias, C. A., Lisitsa, V. S., & Stambulchik, E. (2014). Influence of microfielddirectionality on line shapes. *Atoms*, 2(2), 259–276.

<https://doi.org/10.3390/atoms2020259>

[36] Demura, A. V. (2010). Physical Models of Plasma Microfield. *International Journal of Spectroscopy*, 2010, 1–42.

<https://doi.org/10.1155/2010/671073>

[37] Demura, A. V., & Stambulchik, E. (2014). Spectral-KineticCoupling and Effect of Microfield Rotation on Stark Broadening in Plasmas. *Atoms*, 2(3), 334–356

<https://doi.org/10.3390/atoms2030334>

[38] Stambulchik, E., & Demura, A. V. (2015). Ion dynamics and effects of microfield rotation. X Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics. Book of Abstracts, Belgrade, June 15-19, 2015, 68–68.

[39] Adaika, H., & Meftah, M. T. (2014). Angular velocity distribution of the electric microfield in plasma. *Contributions to Plasma Physics*, 54(7), 669–679.

<https://doi.org/10.1002/ctpp.201300041>

[40] Bekkouche, A., & Khelfaoui, F. (2010). Calcul par la dynamique moléculaire des fonctions de distributions des dérivées spatiales du champ électrique local dans un plasma.

[41] بكوش عبد الله. (2011). حساب توزيع المشتقات الفضائية للحقول الكهربائية المحلية في البلازما باستخدام محاكاة التحريك الجزيئي (مذكرة ماجستير جامعة حمزة لخضر بالوادي).

الفصل الثالث:
نتائج ومقارنات

الفصل الثالث: نتائج ومقارنات

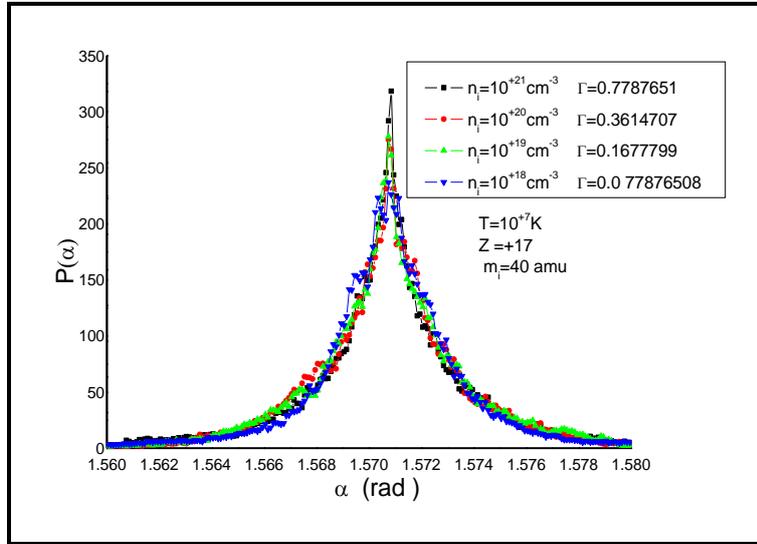
في هذا الفصل نعرض أهم النتائج التي تحصلنا عليها المتمثلة في دوال توزيع زوايا الحقل ومشتقاتها الزمنية في الإحداثيات المنحنية والكارتزبية، دوال توزيع السرعة الزاوية للحقل، دوال توزيع نصف قطر الإنحناء والسرعات الزاوية لحركة الأيونات، دوال توزيع الحقل ومشتقاته الفضائية من أجل بلازما ذات عدة أصناف.

1. دوال توزيع الزوايا:

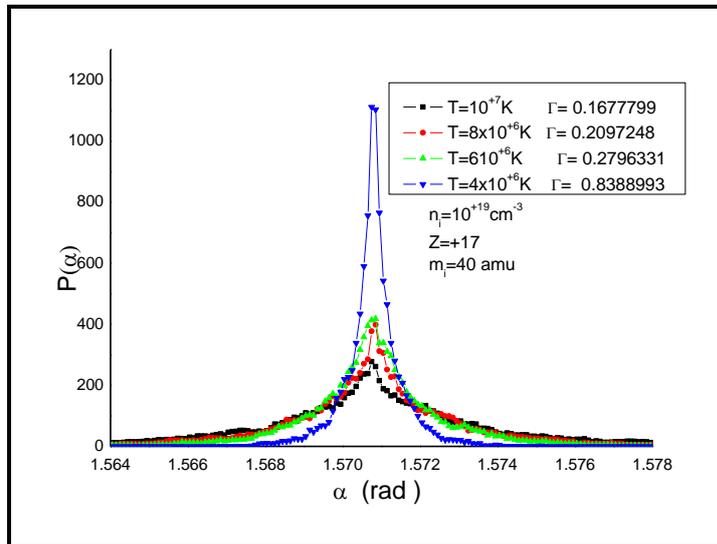
1.1. توزيع الزاوية بين شعاع الحقل وشعاع السرعة:

الشكلان (III. 1) (III. 2) يوضحان دراسة توزيع زاوية الحقل الكهربائي

$P(\alpha)$ من أجل قيم مختلفة من الكثافات ودرجات الحرارة.



الشكل (III. 1): توزيع $P(\alpha)$ لقيم مختلفة من الكثافة



الشكل (III. 2): توزيع $P(\alpha)$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة

الفصل الثالث: نتائج ومقارنات

مجال هذه المنحنيات هو $[1.56, 1.58]$ rad و يمثل فرقاً قدره 0.02 rad حول القيمة $\frac{\pi}{2}$ ، عند هذه الشروط يمكن إعتبار الحقل الكهربائي ناظمي للمسار من حيث

الإحتمالية. منحنيات هذه التوزيعات كانت متناظرة بالنسبة للقيمة الأكثر $\alpha^* = \frac{\pi}{2}$.

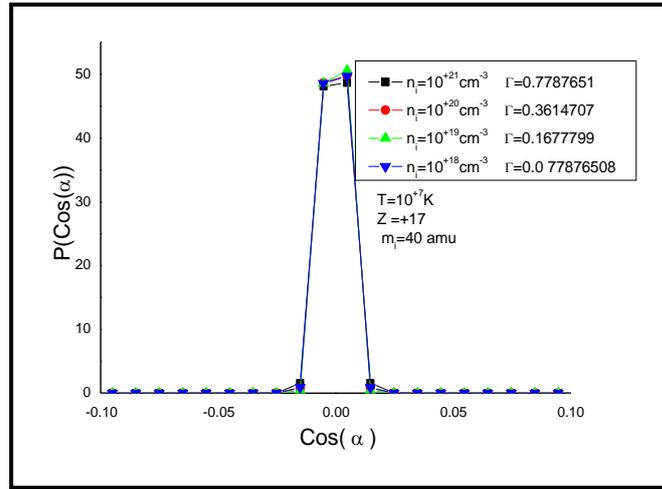
في الشكل (III. 1) من أجل درجة حرارة $T = 10^7$ K تتخفيض قيم إحتمال الزاوية $\alpha^* = \frac{\pi}{2}$. عند نقصان الكثافة، وتصبح المنحنيات أكثر عرضاً، أما في الشكل

(III. 2) ومن أجل الكثافة $n_i = 10^{19} \text{cm}^{-3}$ فإن قيم إحتمال الزاوية $\alpha^* = \frac{\pi}{2}$ تنخفض

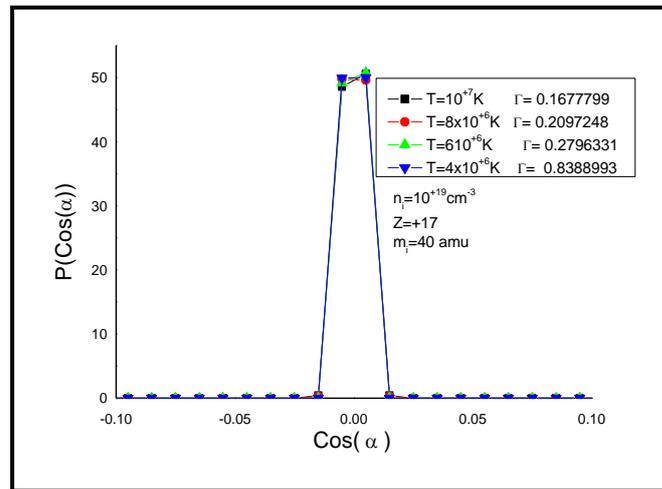
أيضاً عند زيادة درجة الحرارة وتصبح المنحنيات أكثر عرضاً.

الشكلان (III. 3) (III. 4) يوضحان دراسة توزيع $P(\text{Cos}(\alpha))$ من أجل قيم

مختلفة من الكثافات ودرجات الحرارة.

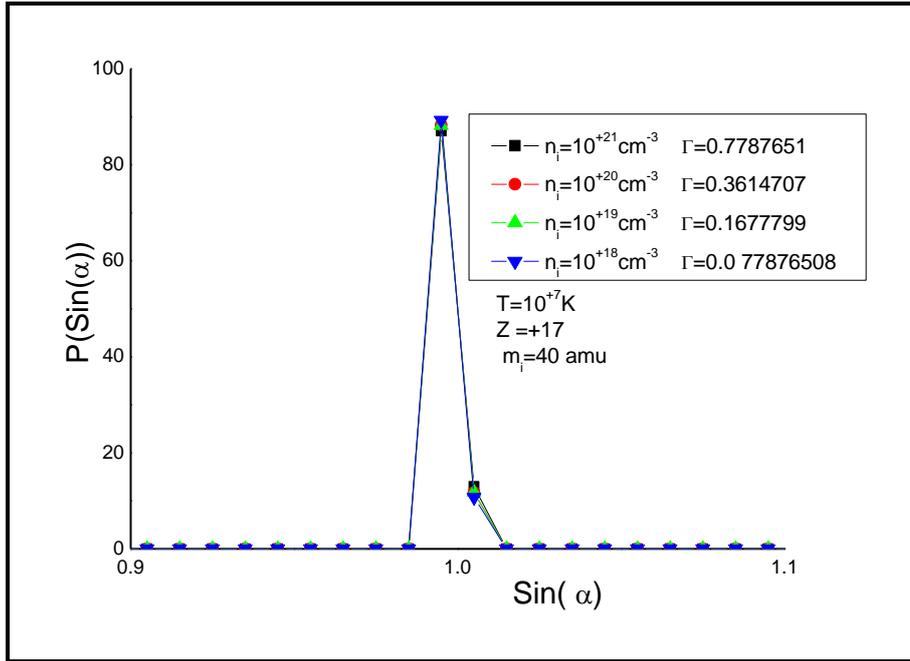


الشكل (III. 3) : توزيع $P(\text{Cos}(\alpha))$ لقيم مختلفة من الكثافة

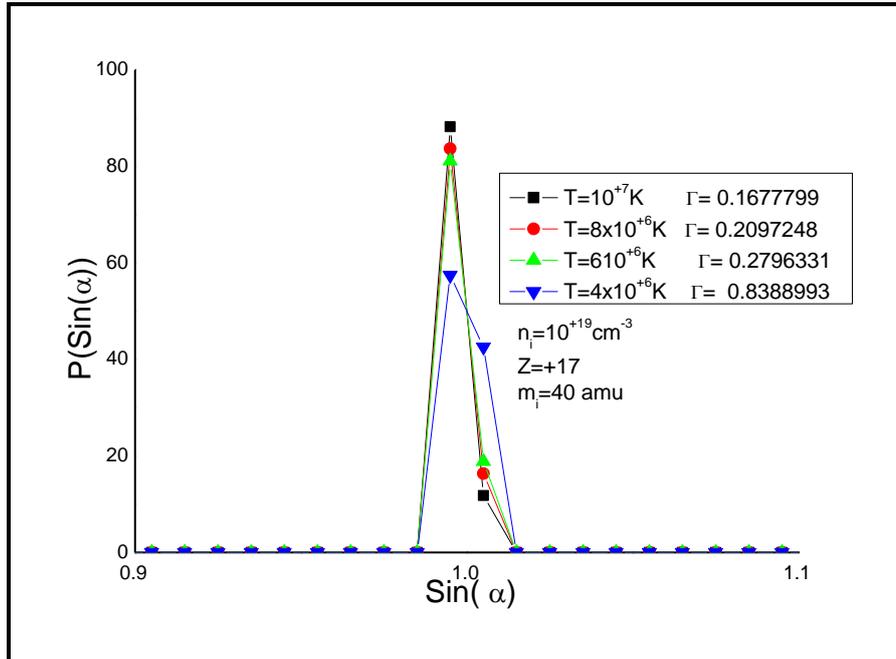


الشكل (III. 4) : توزيع $P(\text{Cos}(\alpha))$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة

الشكلان (III. 5) (III. 6) يوضحان دراسة توزيع $P(\text{Sin}(\alpha))$.



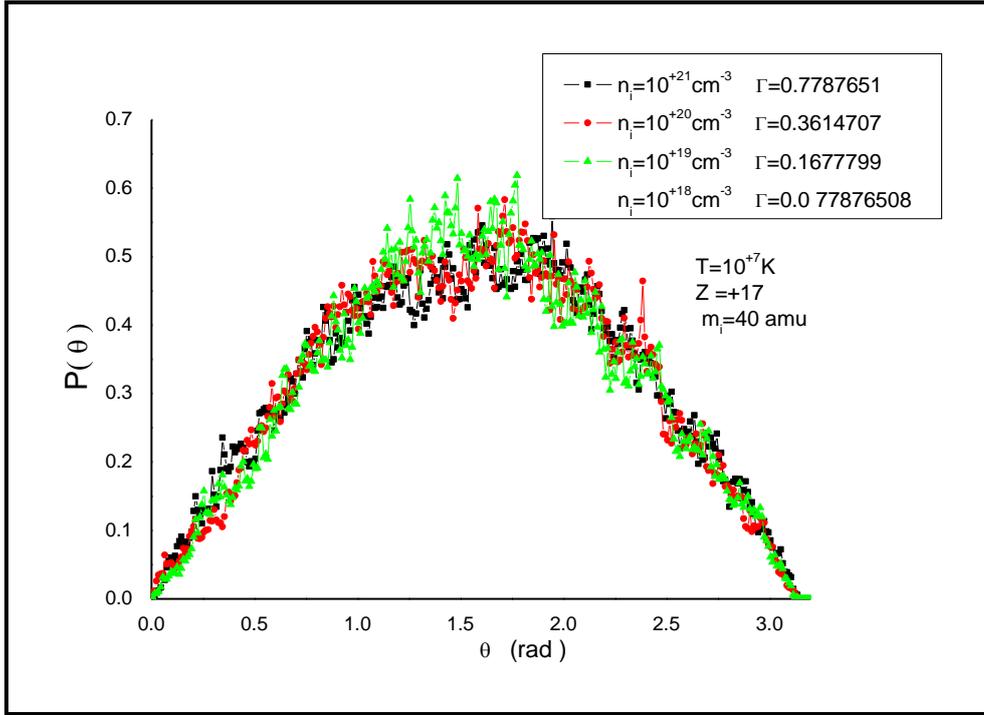
الشكل (III. 5) : توزيع $P(\text{Sin}(\alpha))$ لقيم مختلفة من الكثافة



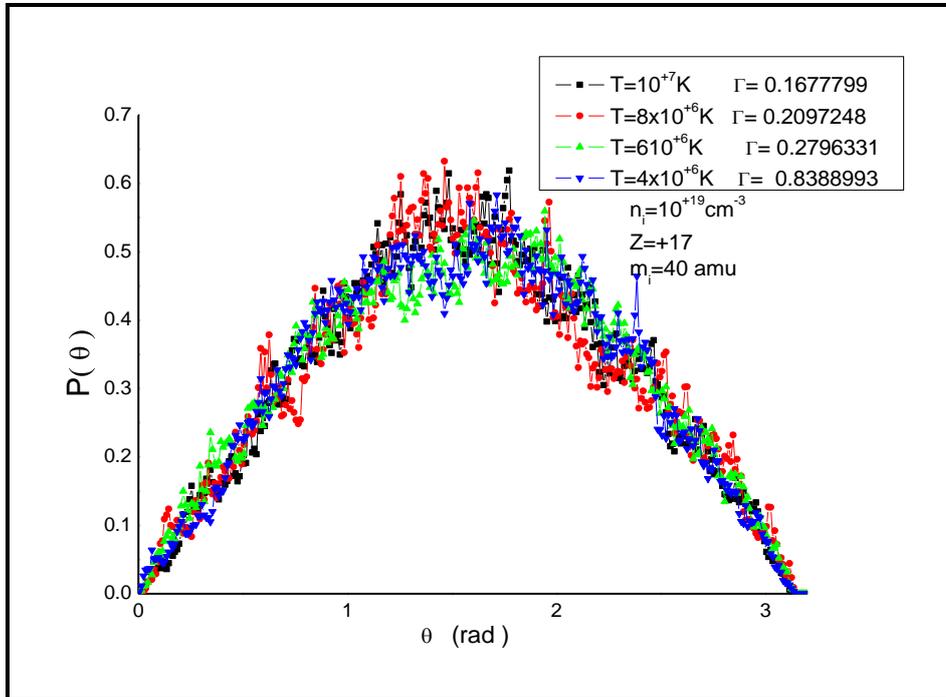
الشكل (III. 6) : توزيع $P(\text{Sin}(\alpha))$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة

هذه المنحنيات متوافقة مع التوزيعات المتحصل عليها للزوايا، حيث توزيع $\text{Cos}(\alpha)$ في جوار الصفر أما توزيع $\text{Sin}(\alpha)$ في جوار الواحد وهو ما يتوافق مع الزاوية الأعلى إحتمال.

1.ب. توزيع الزاوية بين مركبة الحقل وشعاع الحقل:
 الشكلان (III. 7) (III. 8) يوضحان توزيع زاوية الحقل $P(\theta)$. وجدنا التوزيع متناظر بالنسبة للقيمة $\frac{\pi}{2}$ في المجال وغير حساس لقيم الكثافة ودرجات الحرارة.

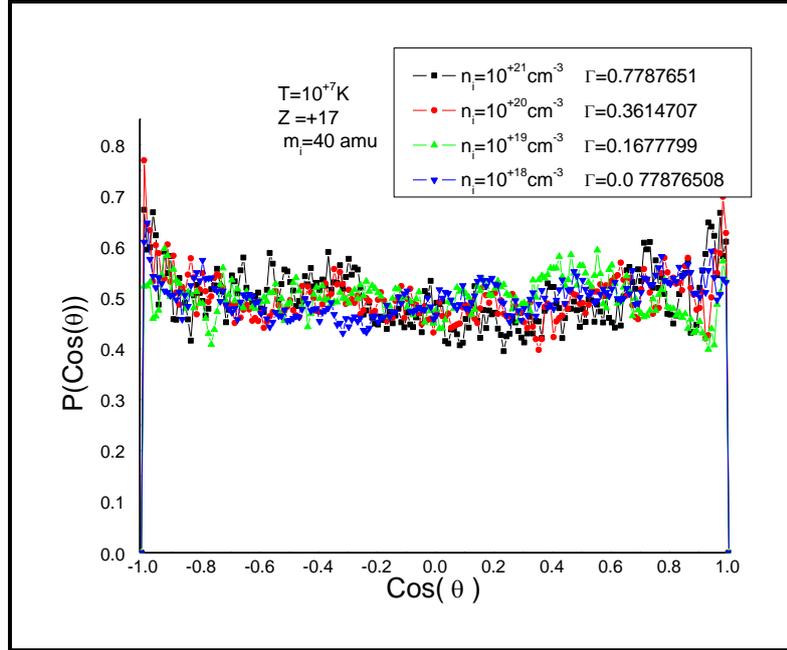


الشكل (III. 7) : توزيع $P(\theta)$ لقيم مختلفة من الكثافة

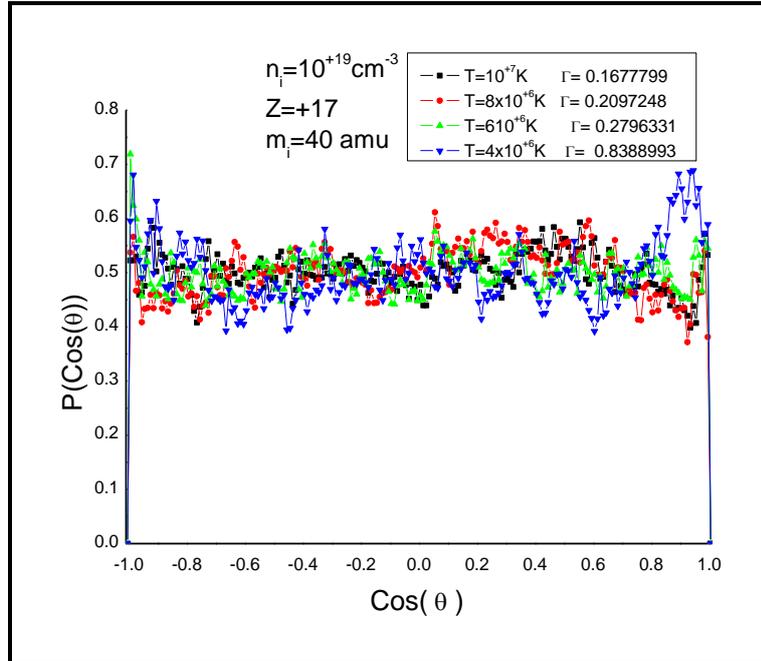


الشكل (III. 8) : توزيع $P(\theta)$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة

الشكلان (III. 9) (III. 10) يوضحان دراسة توزيع جيب تمام زاوية الحقل الكهربائي $P(\text{Cos}(\theta))$ ، من أجل قيم مختلفة من الكثافات ودرجات الحرارة.



الشكل (III. 9) : توزيع $P(\text{Cos}(\theta))$ لقيم مختلفة من الكثافة

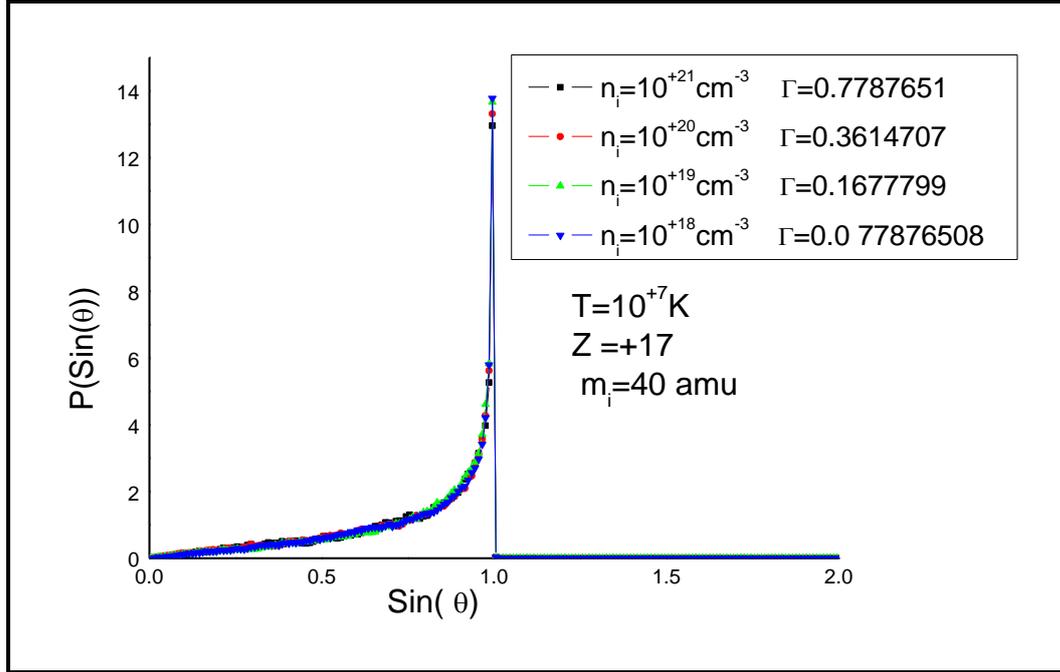


الشكل (III. 10) : توزيع $P(\text{Cos}(\theta))$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة

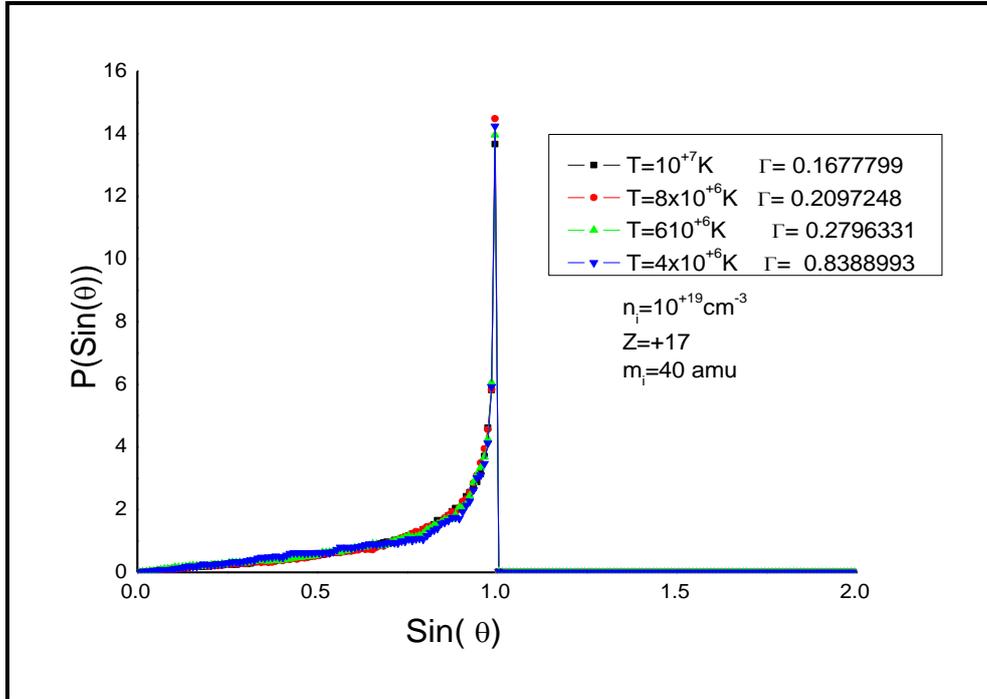
هذه المنحنيات كانت متوافقة مع التوزيعات المتحصل عليها للزوايا، حيث أن توزيع $P(\text{Cos}(\theta))$ كان ذو قيمة ثابتة.

يوضح الشكلان (III. 11) (III. 12) توزيع جيب زاوية الحقل الكهربائي

$$.P(\text{Sin}(\theta))$$



الشكل (III. 11) : توزيع $P(\text{Sin}(\theta))$ لقيم مختلفة من الكثافة



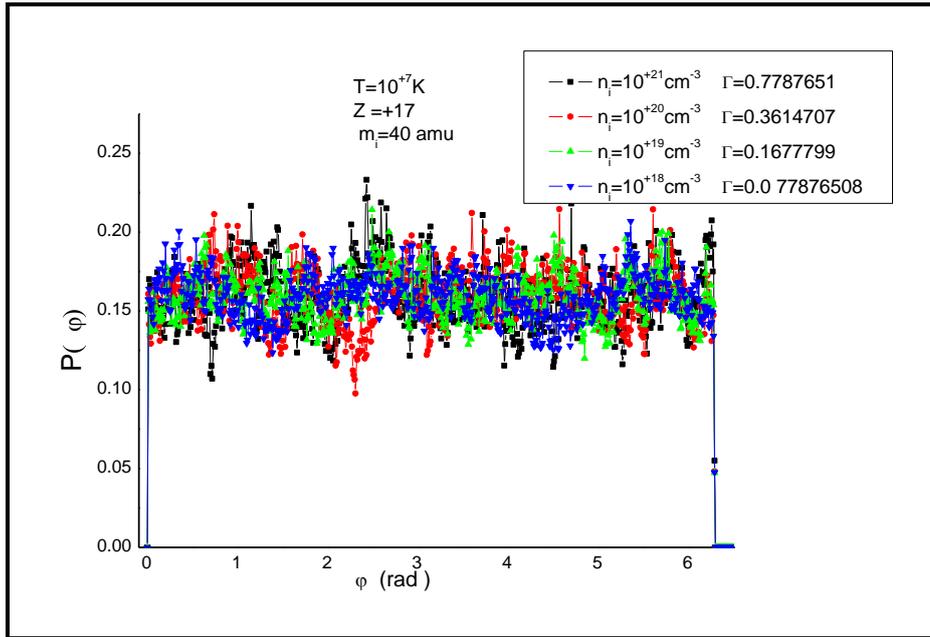
الشكل (III. 12) : توزيع $P(\text{Sin}(\theta))$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة

توزيع جيب زاوية الحقل الكهربائي $P(\text{Sin}(\theta))$ أيضا يتوافق مع قيمة أعلى احتمال الزاوية.

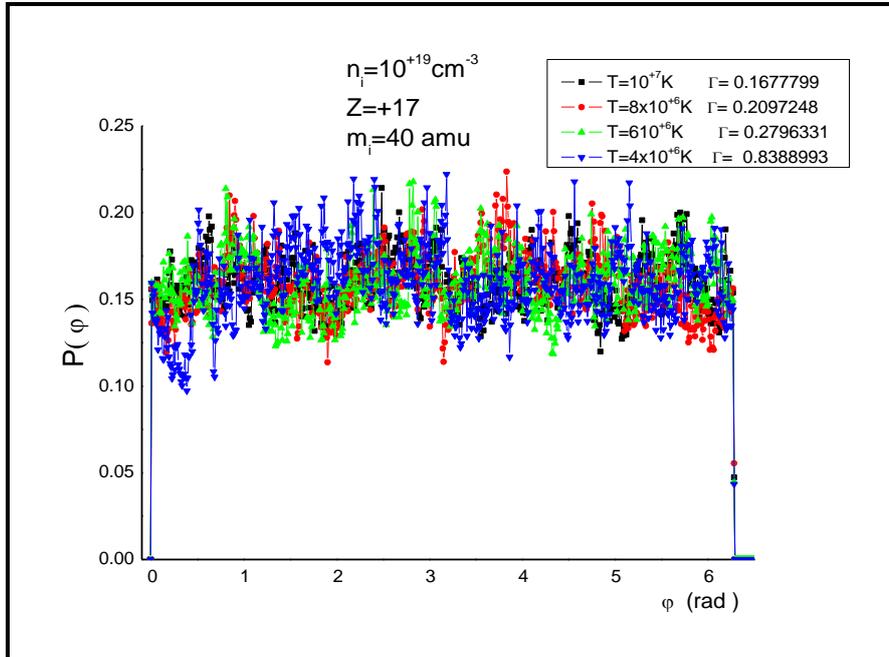
1.ت. توزيع الزاوية بين مركبات الحقل:

الشكلان (III. 13) (III. 14) يوضحان دراسة توزيع زاوية الحقل الكهربائي

$P(\varphi)$ من أجل قيم مختلفة من الكثافات ودرجات الحرارة.



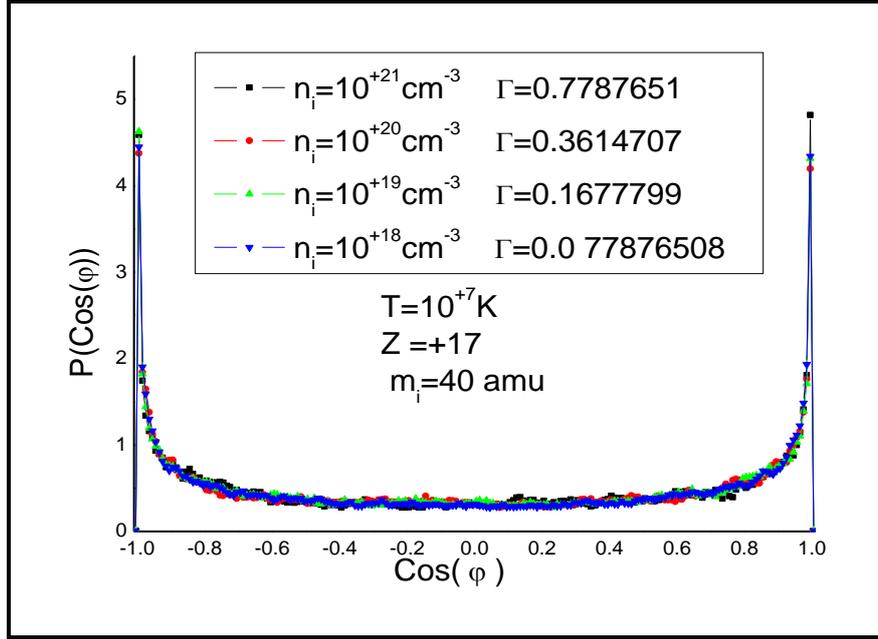
الشكل (III. 13) : توزيع $P(\varphi)$ لقيم مختلفة من الكثافة



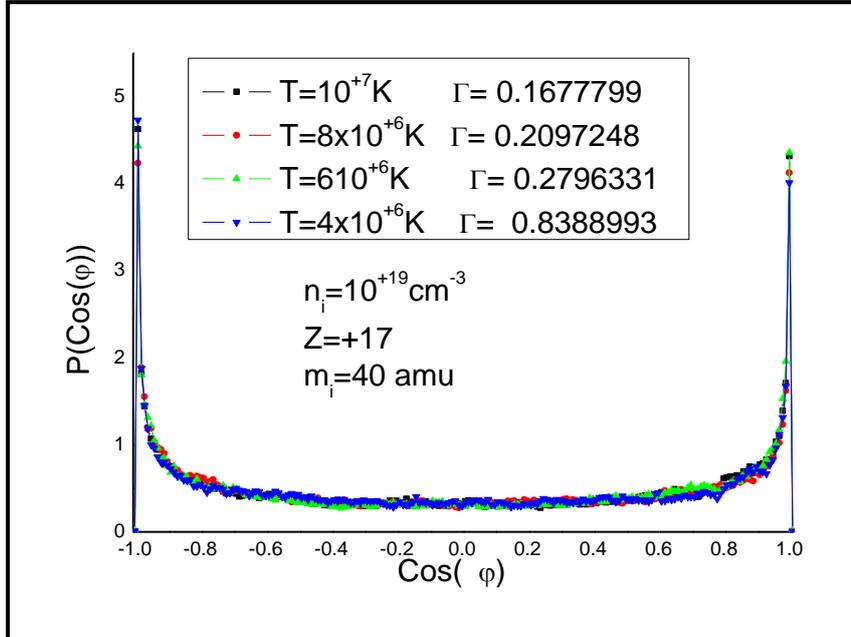
الشكل (III. 14) : توزيع $P(\varphi)$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة

وجدنا أن توزيع $P(\varphi)$ له قيمة ثابتة في المجال $[0, 2\pi]$ تؤكد توزيعات $P(\theta)$ و $P(\varphi)$ وعلى تماثل مناحي اتجاهات الحقل الكهربائي في البلازما، وتعتبر خاصية هامة في التحليل الطيفي.

الشكلان (III. 15) (III. 16) يوضحان دراسة توزيع جيب تمام زاوية الحقل الكهربائي $P(\text{Cos}(\varphi))$ من أجل قيم مختلفة من الكثافات ودرجات الحرارة.



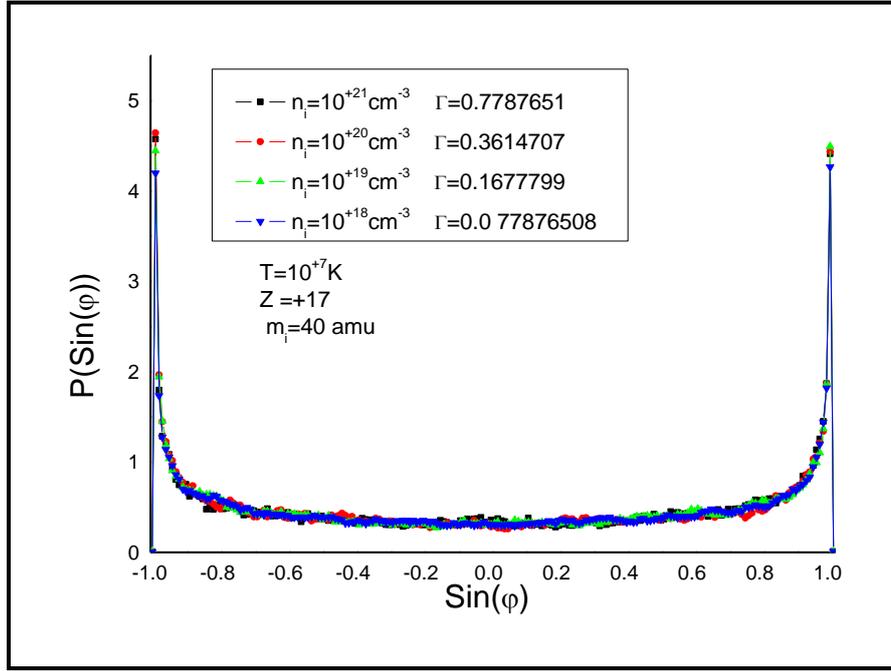
الشكل (III. 15) : توزيع $P(\text{Cos}(\varphi))$ لقيم مختلفة من الكثافة



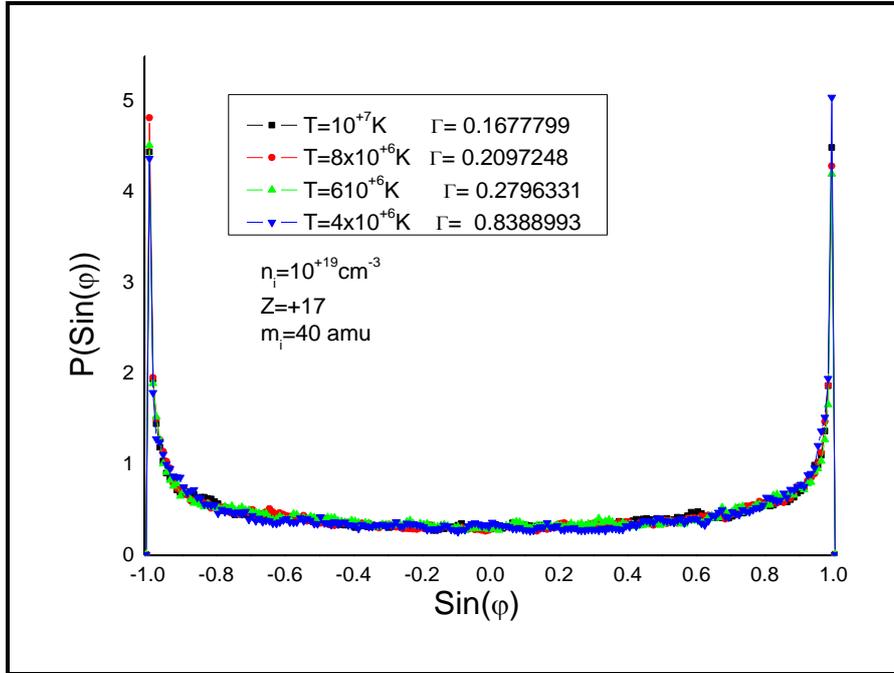
الشكل (III. 16) : توزيع $P(\text{Cos}(\varphi))$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة

هذه المنحنيات كانت متوافقة مع التوزيعات المتحصل عليها للزوايا حيث لها قيمة ثابتة في المجال $[-1, 1]$.

الشكلان (III.17) (III. 18) يوضحان دراسة توزيع جيب زاوية الحقل $P(\text{Sin}(\varphi))$ من أجل قيم مختلفة من الكثافات ودرجات الحرارة.



الشكل (III. 17): توزيع $P(\text{Sin}(\varphi))$ لقيم مختلفة من الكثافة



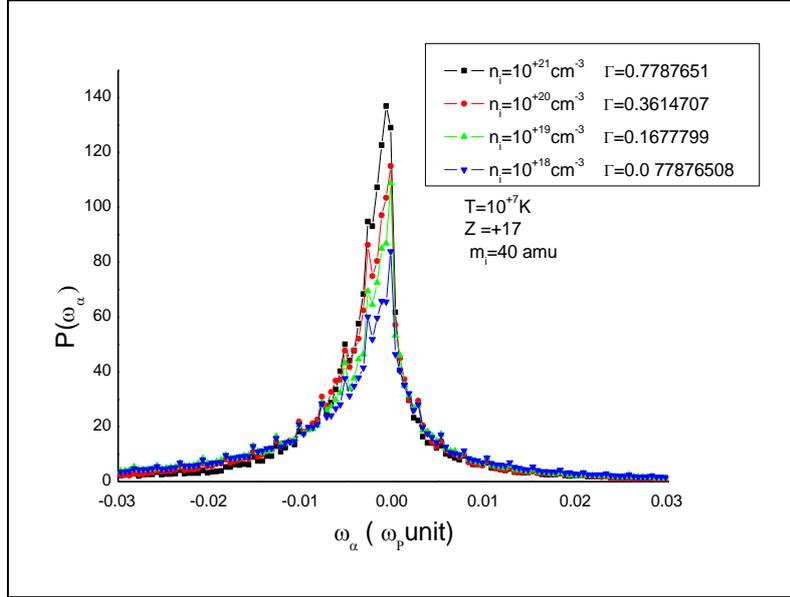
الشكل (III. 18): توزيع $P(\text{Sin}(\varphi))$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة

كذلك هذه التوزيعات كانت متوافقة مع التوزيعات المتحصل عليها للزوايا حيث لها قيمة ثابتة في المجال $[-1, 1]$.

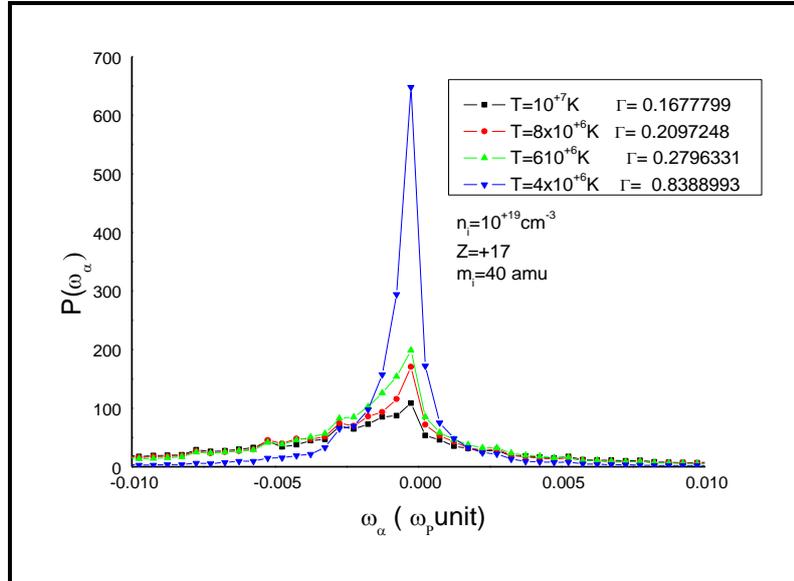
2. دوال توزيع المشتقات الزمنية للزوايا:

2.أ. توزيع المشتقة الزمنية للزاوية بين شعاع الحقل وشعاع السرعة:

الشكلان (III. 19) (III. 20) يوضحان توزيع $P(\omega_\alpha)$ للمشتق الزمني لزاوية الحقل الكهربائي α لقيم مختلفة للكثافة ودرجات الحرارة.



الشكل (III. 19): توزيع $P(\omega_\alpha)$ لقيم مختلفة من الكثافة



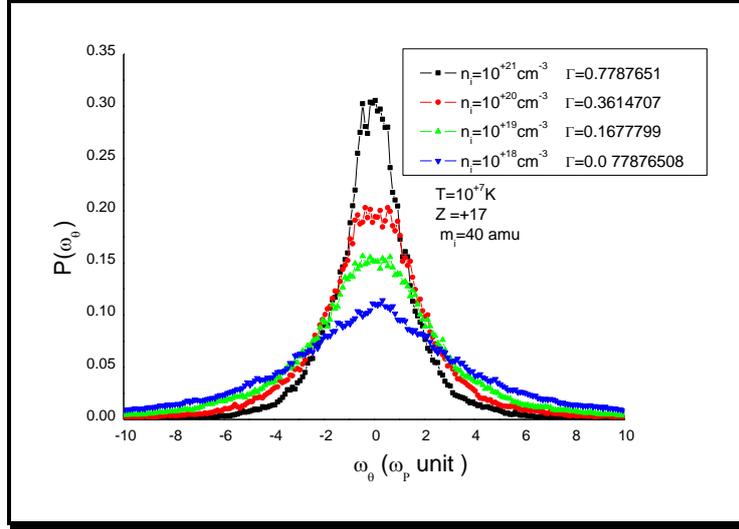
الشكل (III. 20): توزيع $P(\omega_\alpha)$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة

منحنيات هذه التوزيعات ليست متناظرة من أجل القيمة الأكثر احتمالاً ($\omega_\alpha^* = 0$) في الشكل (III. 19) من أجل درجة الحرارة $T = 10^7 K$ تنخفض قيم احتمال السرعة الزاوية الأكثر احتمالاً ($\omega_\alpha^* = 0$)، أما عند نقصان الكثافة تصبح المنحنيات أكثر عرضاً في جوار القيم السالبة. كما في الشكل (III. 20) ومن أجل الكثافة $n_i = 10^{24} \text{ cm}^{-3}$ فإن قيم احتمال السرعة الزاوية الأكثر احتمالاً ($\omega_\alpha^* = 0$) تنخفض عندما تزداد درجة الحرارة كما أن المنحنيات تصبح أكثر عرضاً في جوار القيم السالبة.

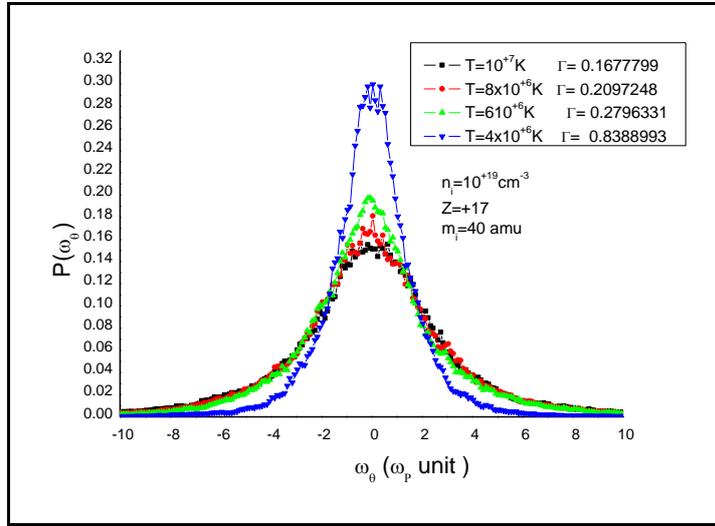
الفصل الثالث: نتائج ومقارنات

بالنسبة إلى $T = 10^7 K$ و $ni = 10^{19} cm^{-3}$ وإحتمال يساوي نصف القيمة الأكثر احتمالاً يكون المنحنى أعرض بنسبة 97% على الجانب الأيسر مقارنة على الجانب الأيمن. كما تُظهر درجات الحرارة المرتفعة تغلب القيم السلبية لـ (ω_α) .

2.ب. توزيع المشتقة الزمنية للزاوية بين مركبة الحقل وشعاع الحقل:
الشكلان (III. 21) (III. 22) يوضحان دراسة توزيع لقيم مختلفة للكثافة ودرجة الحرارة.



الشكل (III. 21): توزيع $P(\omega_0)$ لقيم مختلفة من الكثافة

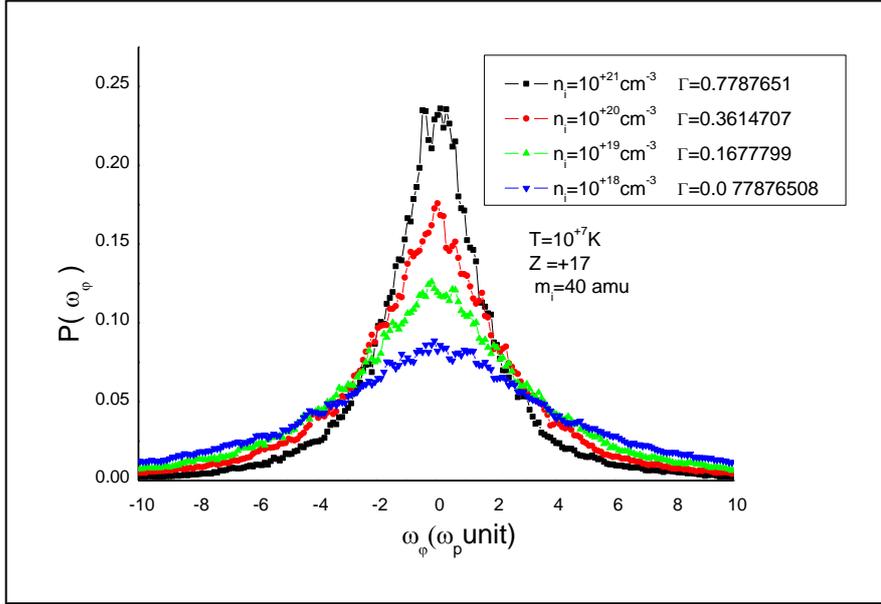


الشكل (III. 22): توزيع $P(\omega_0)$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة

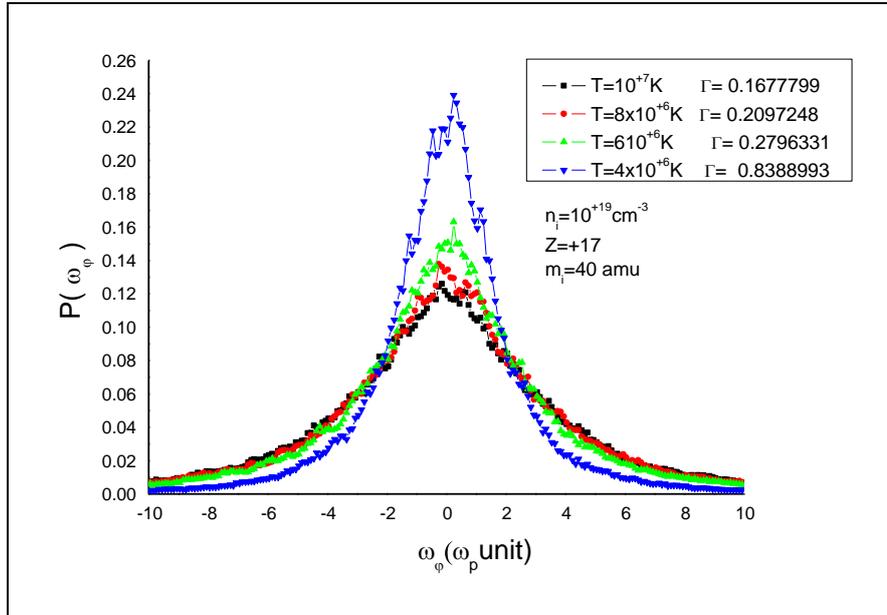
لقيمة الأكثر احتمالاً هي $(\omega_\theta^* = 0)$ تتناقص عند ارتفاع درجة الحرارة وتزداد من أجل كثافة أعلى المنحنيات المختلفة متناظرة فيما يتعلق بالمحور $(\omega_\theta^* = 0)$.

2.ج. توزيع المشتقة الزمنية للزاوية بين مركبات الحقل:

الشكلان (III. 23) (III.24) يوضحان دراسة توزيع $P(\omega_\varphi)$ للمشتق الزمني لزاوية الحقل لقيم مختلفة للكثافة ودرجة الحرارة.



الشكل (III. 23): توزيع $P(\varphi)$ لقيم مختلفة من الكثافة

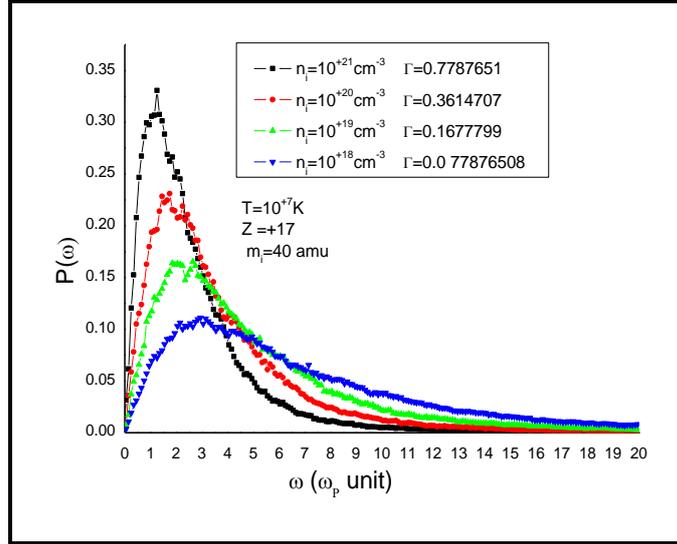


الشكل (III. 24): توزيع $P(\omega_\varphi)$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة

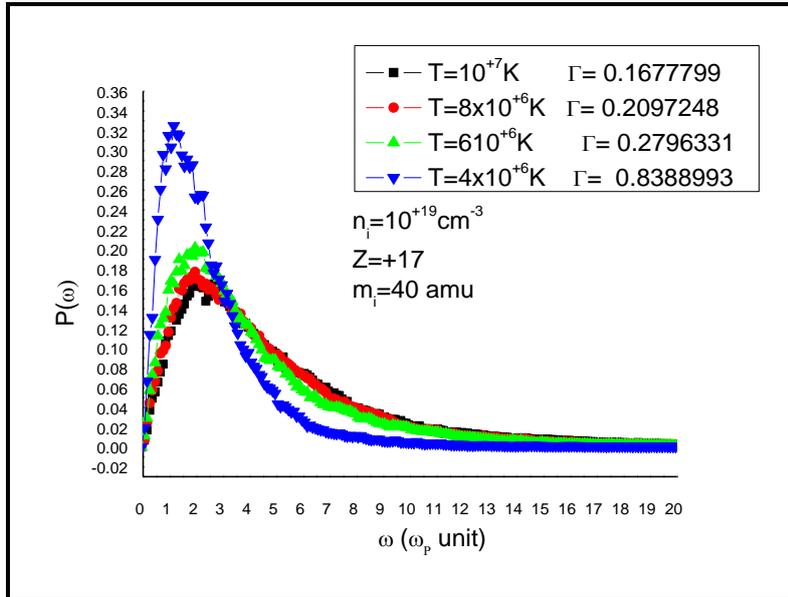
القيمة الأكثر احتمالية هي $(\omega_\varphi^*=0)$ وتتناقص عند درجات حرارة أعلى وتزداد عند كثافة أعلى. المنحنيات المختلفة متناظرة من أجل $(\omega_\varphi^*=0)$ و عكس $P(\omega_\alpha)$ فإن توزيعات $P(\omega_\varphi)$ و $P(\omega_\theta)$ لها عرض أكبر.

3. دوال توزيع السرعة الزاوية للحقل الأيوني:

يوضح الشكل (III. 25) تأثير الكثافة على توزيع السرعة الزاوية $P(\omega)$ لأيونات Ar^{+17} وعند درجة الحرارة $T = 10^7 K$. يمثل الشكل (III. 26) تأثير درجة الحرارة على توزيع السرعة الزاوية $P(\omega)$ لنفس الأيونات وبالكثافة $n_i = 10^{19} cm^{-3}$.



الشكل (III. 25): توزيع السرعة الزاوية $P(\omega)$ لقيم مختلفة من الكثافة



الشكل (III. 26): توزيع السرعة الزاوية $P(\omega)$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة

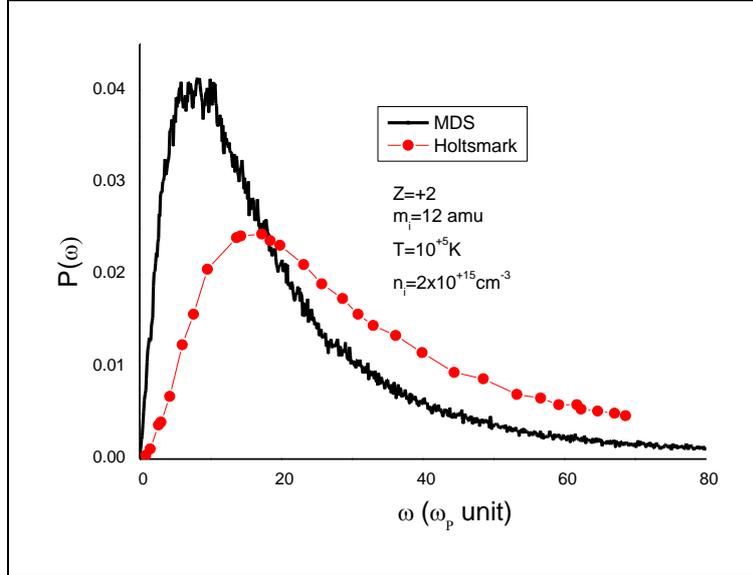
لاحظنا إنخفاضاً للسرعة الزاوية الأكثر احتمالية عند نقصان الكثافة، كما نلاحظ زيادة في السرعة الزاوية الأكثر احتمالية عندما نقصان درجة الحرارة.

4. مقارنة مع نتائج Meftah و Adaika :

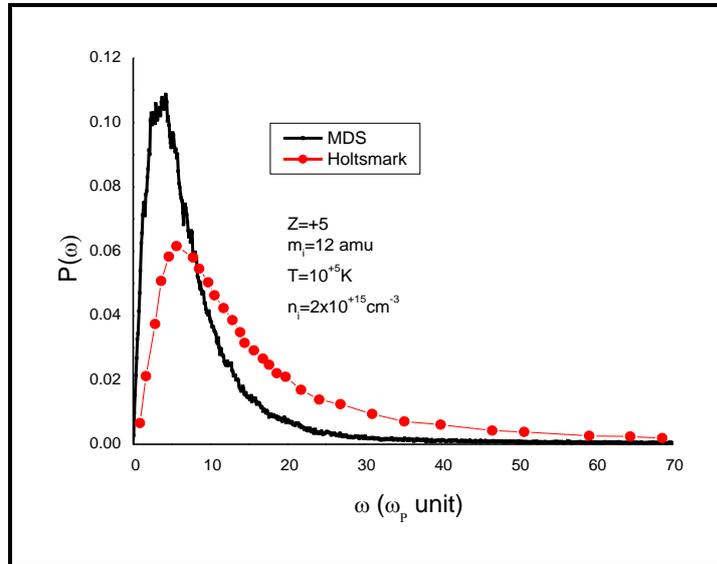
الشكلان (III. 27) (III. 28) يوضحان مقارنة لتوزيع السرعة الزاوية للحقول

الكهربائية $P(\omega)$ مع نموذج Holtsmark المستخدم في عمل Meftah و Adaika من

أجل $T = 10^5 K$ و $n_i = 2 \cdot 10^{15} cm^{-3}$ بالنسبة لـ $Z = + 2$ و $Z = + 5$ $m_i = 12 amu$



الشكل (III. 27) : مقارنة توزيع السرعة الزاوية $P(\omega)$ مع نموذج Hol- $Z = + 2$.



الشكل (III. 28) : مقارنة توزيع السرعة الزاوية $P(\omega)$ مع نموذج Holt- $Z = + 5$

يعطي حسابنا القيم $(\omega^*)_{MDS}$ للسرعة الزاوية الأكثر احتمالية أقل من تلك الخاصة

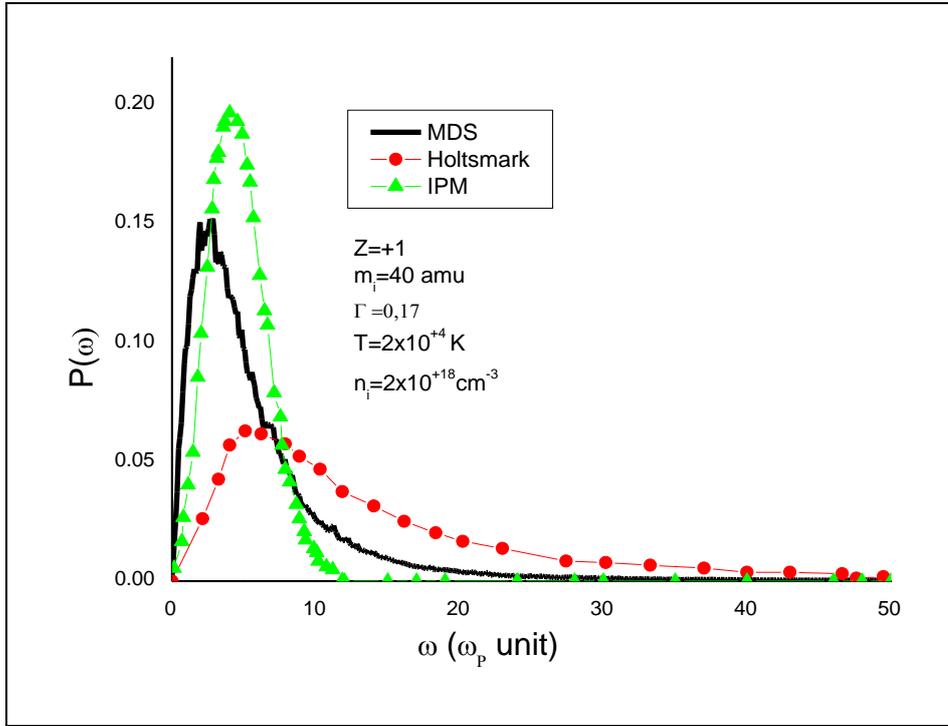
بالحساب التحليلي $(\omega^*)_{Hol}$. النسب $(\omega^*)_{MDS} / (\omega^*)_{Hol}$ بين الحسابين حوالي % 0.46 من

أجل $Z = + 2$ و % 0.68 من أجل $Z = + 5$ ، من أسباب هذا الاختلاف أن حساباتنا [2]

تأخذ في الاعتبار التفاعل وفق كمون Debye لجميع الأيونات مع الأيون الهدف

والتفاعلات بين كل الأيونات بالإضافة إلى ذلك محاكاة (MDS) هي أكثر دقة لتضمينها معادلات الحركة.

الشكل (III. 29) يوضح توزيعات $P(\omega)$ لنموذج *Hol* و *IPM* و *MDS* من أجل درجة حرارة $T = 2.10^4 K$ وكثافة $n_i = 2.10^{18} cm^{-3}$ وكتلة ايون $m_i = 40 amu$ شحنة أيونات $Z = +1$ معامل تزواج البلازما $\Gamma_{ii} = 0.17$



الشكل (III. 29) : مقارنة توزيع السرعة الزاوية $P(\omega)$ مع نموذج *IPM*

و *Hol* - $\Gamma=0.17$

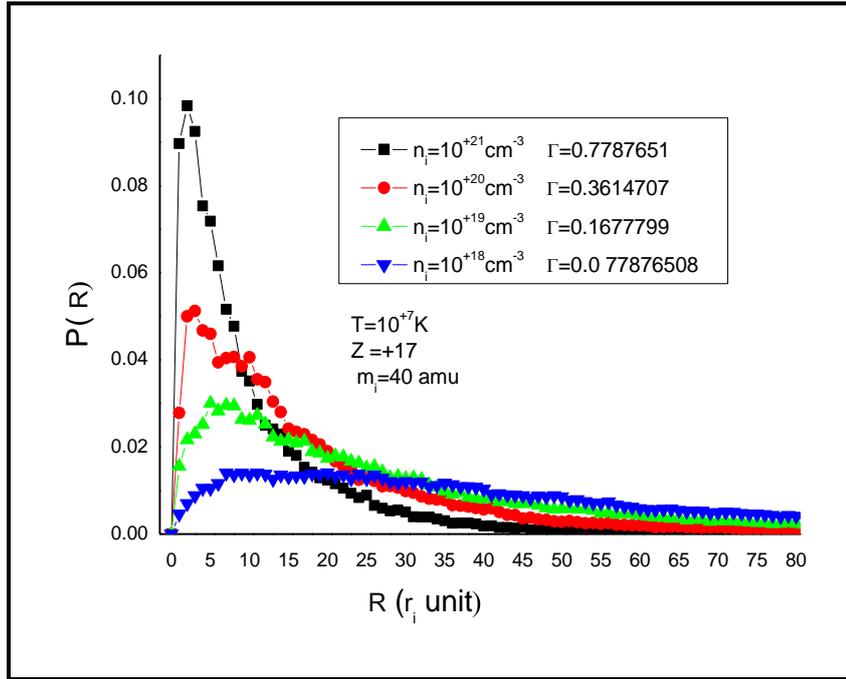
كانت القيمة الأكثر إحصائية هي $(\omega^*)_{IPM} = 4.00$ أما لنموذج *Hol* هي

$$(\omega^*)_{Hol} = 5.09$$

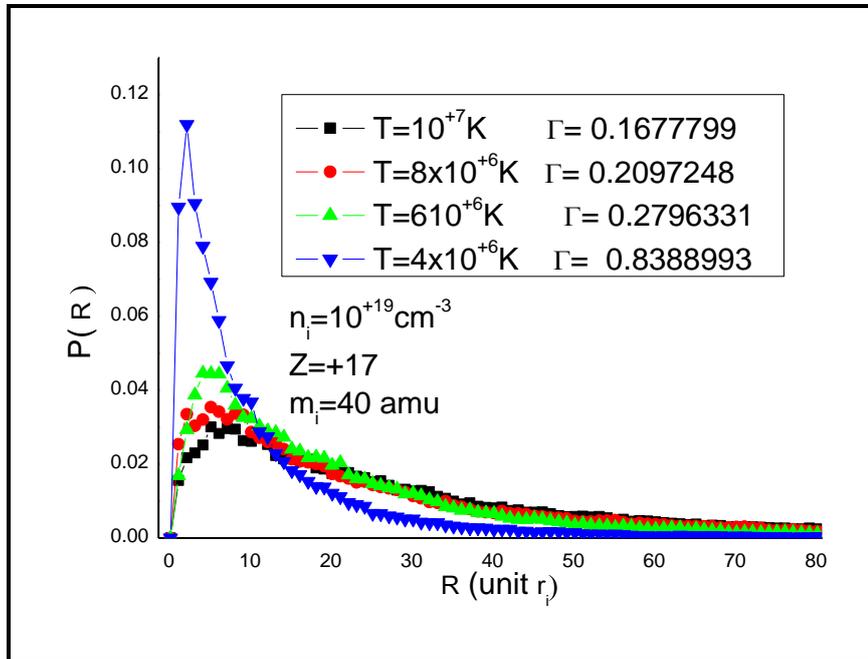
النسبة $(\omega^*)_{IPM} / (\omega^*)_{Hol}$ هي حوالي 0.78%. أما حسابنا باستخدام (MDS) يعطي القيمة $(\omega^*)_{MDS} = 2.85$ كما وجدنا النسبة $(\omega^*)_{MDS} / (\omega^*)_{IPM}$ تبلغ حوالي 0.71%. كانت نتائج *IPM* هي الأقرب لتلك الخاصة بمحاكاة *MDS* بالنسبة لنموذج *Hol*.

5. دوال توزيع نصف قطر إنحناء حركة الأيونات:

يوضح الشكلان (III.30) (III.31) توزيع نصف قطر إنحناء حركة الأيونات لقيم مختلفة للكثافة ودرجة الحرارة.



الشكل (III. 30): توزيع P(R) لقيم مختلفة من الكثافة

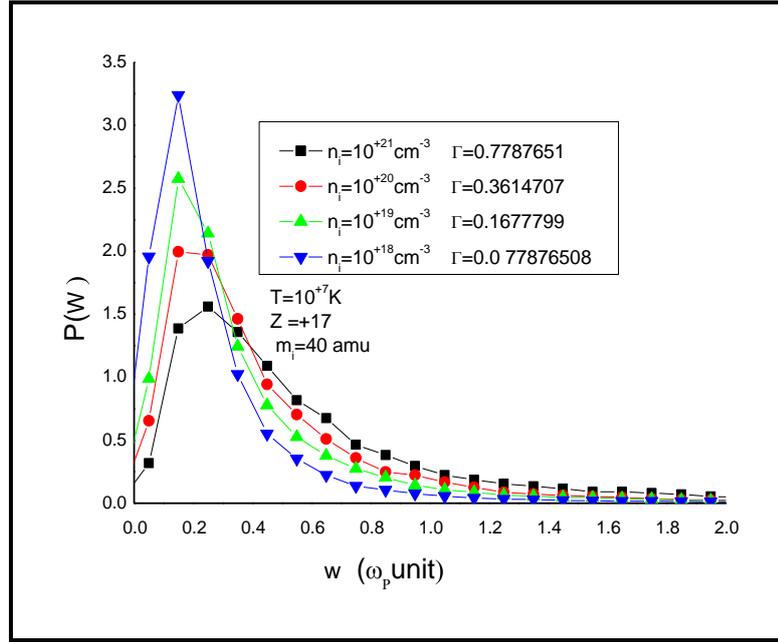


الشكل (III. 31): توزيع P(R) لقيم مختلفة من درجة الحرارة

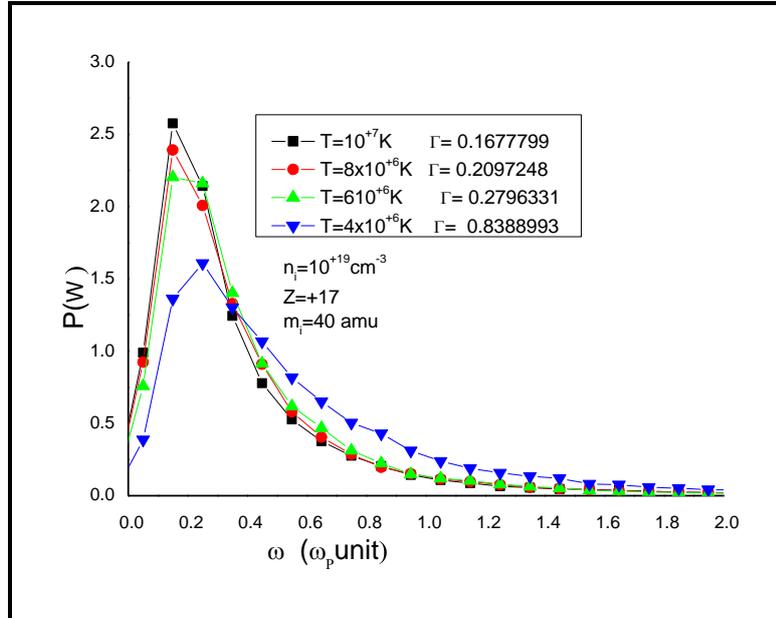
أعلى إحصائيات دالة توزيع نصف القطر بجوار البعد المتوسط بين الأنوية، كما أن هذه القيمة تتناسب طردياً مع الكثافة الأيونية وعكساً مع درجة الحرارة.

6. دوال توزيع السرعات الزاوية لحركة الأيونات:

يوضح الشكلان (III. 32) (III. 33) دوال توزيع السرعات الزاوية لحركة الأيونات لقيم مختلفة للكثافة ودرجة الحرارة.



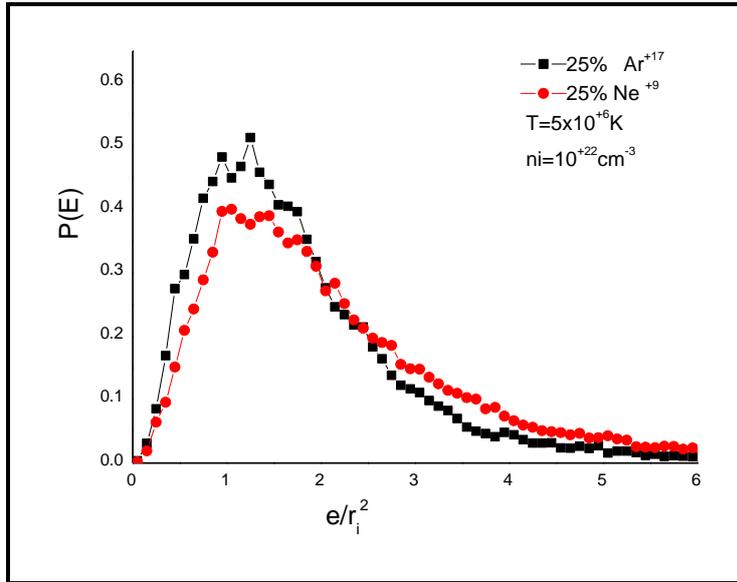
الشكل (III. 32): توزيع $P(W)$ لقيم مختلفة من الكثافة



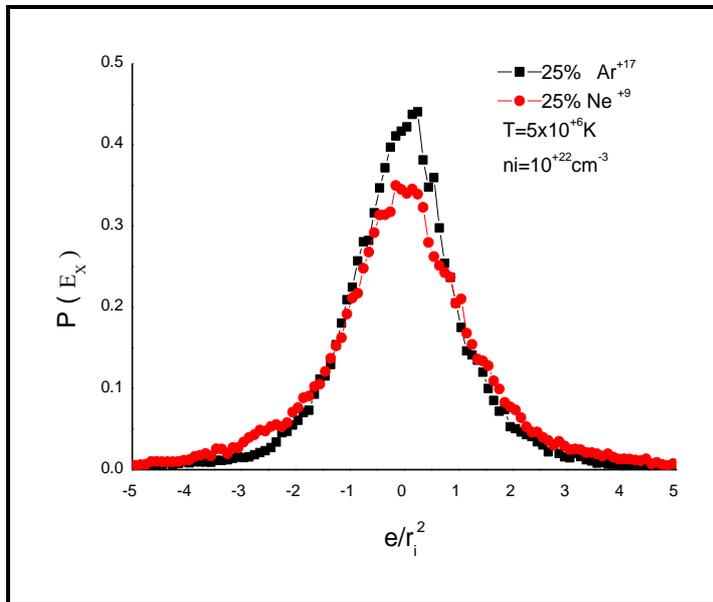
الشكل (III. 33): توزيع $P(W)$ لقيم مختلفة من درجة الحرارة

وجدنا دالة توزيع السرعة الزاوية الأيونات قيم أعلى احتمالها بجوار التواتر الأيوني. تتناسب قيمة أعلى احتمال عكسا مع الكثافة الأيونية وطرذا مع درجة الحرارة.

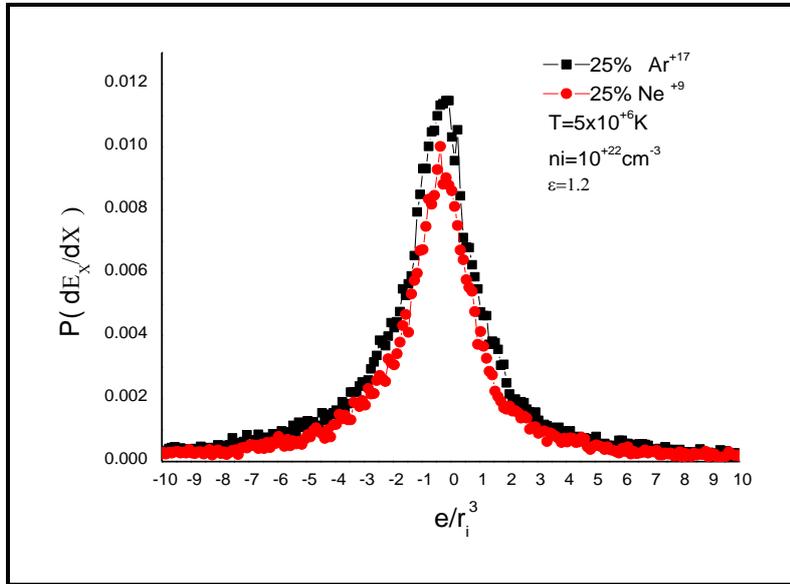
7. دوال توزيع الحقل ومشتقاته الفضائية من أجل بلازما ذات صنفين: توضح كل الأشكال (III. 34) (III. 35) (III. 36) (III. 37) دوال توزيع الحقل، مركبة الحقل مشتقة الحقل القطرية، مشتقة الحقل اللاقطرية على الترتيب، من أجل بلازما ذات صنفين حيث نسب الأصناف متساوية من أيونات الأروغون Ar^{+17} والنيون Ne^{+9} .



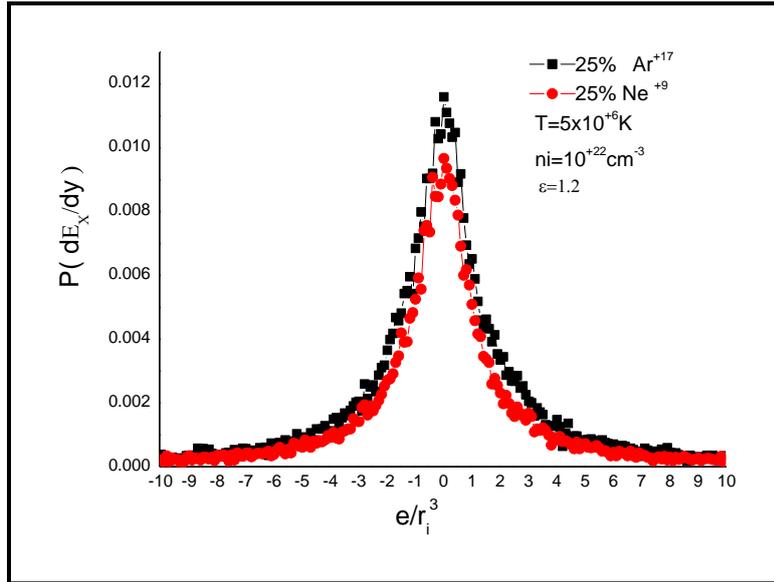
الشكل (III. 34): دوال توزيع الحقل من أجل بلازما ذات صنفين



الشكل (III. 35): دوال توزيع مركبة الحقل من أجل بلازما ذات صنفين



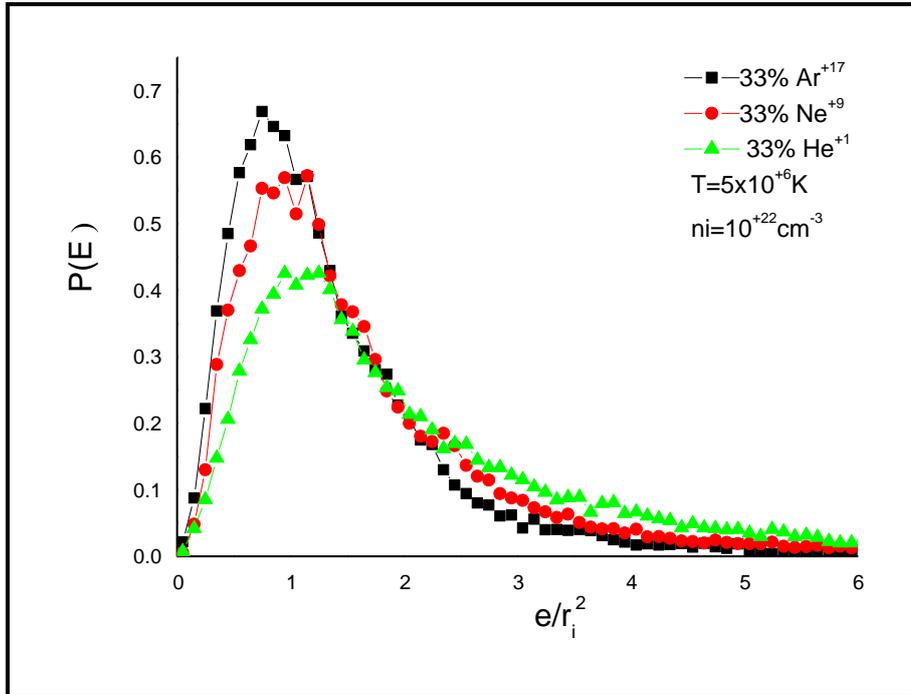
الشكل (III. 36): دوال توزيع المشتقة القطرية لمركبة الحقل من أجل بلازما ذات صنفين



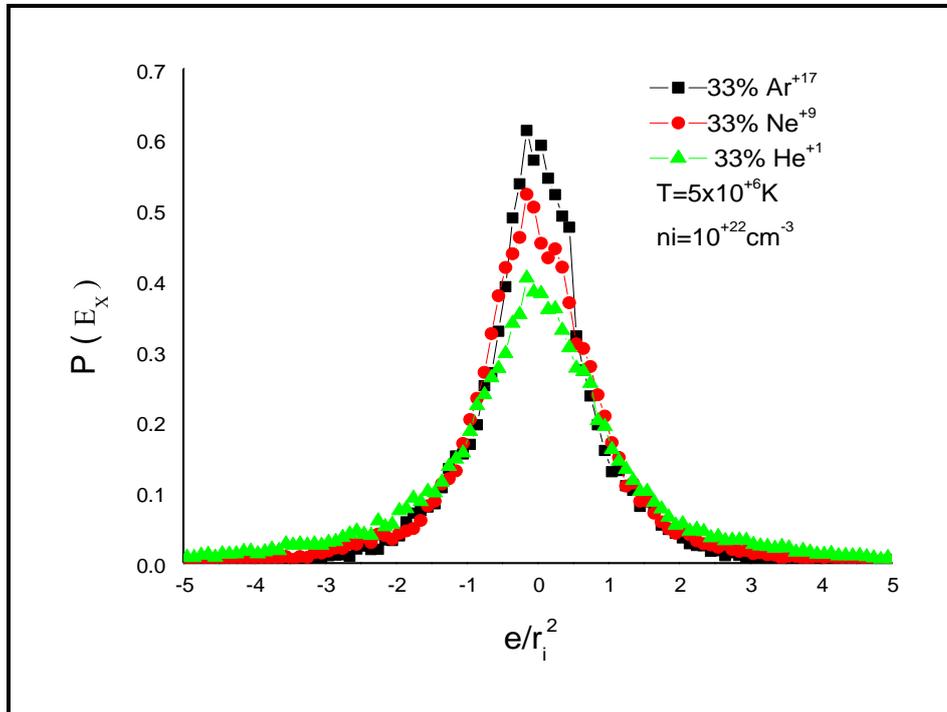
الشكل (III. 37): دوال توزيع المشتقة اللاقطرية لمركبة الحقل من أجل بلازما ذات صنفين

لاحظنا إرتفاع القيمة الأعلى إحتمالاً لأيونات الأروغون Ar^{+17} ذات الكتلة والشحنة الأكبر في كل من توزيعات الحقل، مركبة الحقل، ومشتقات القطرية واللاقطرية للحقل.

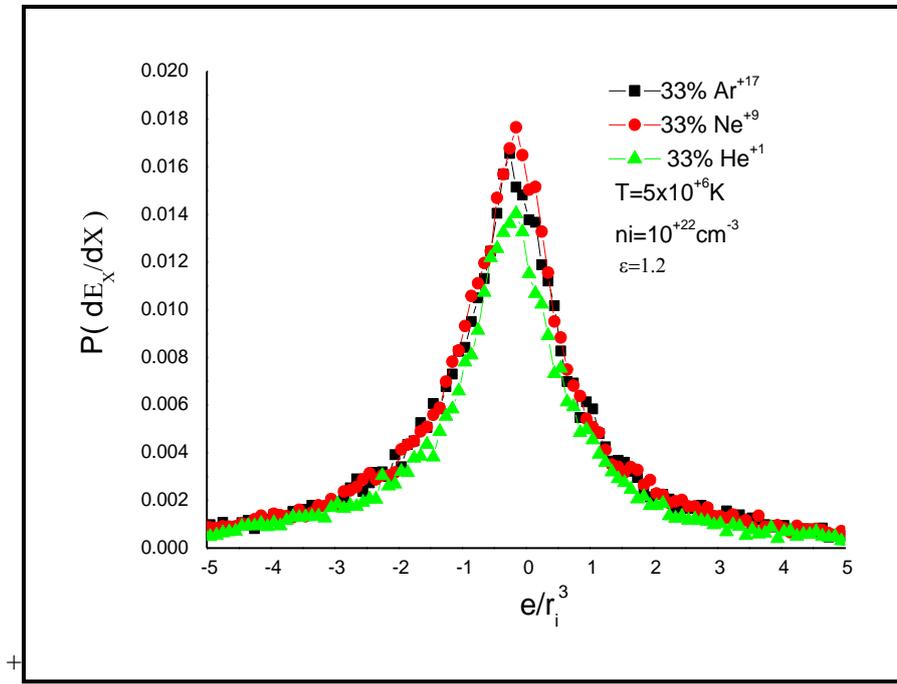
8. دوال توزيع الحقل ومشتقاته الفضائية من أجل بلازما ذات ثلاث أصناف:
 توضح كل الأشكال (III. 38) (III. 39) (III. 40) (III. 41) (III. 42) (III. 43) دوال توزيع الحقل، مركبة الحقل، مشتقة الحقل القطرية، مشتقة الحقل اللاقطرية على الترتيب، من أجل بلازما ذات ثلاث أصناف إختارنا نسب الأصناف متساوية 33% من أيونات الأرجون Ar^{+17} والنيون Ne^{+9} والهليوم.



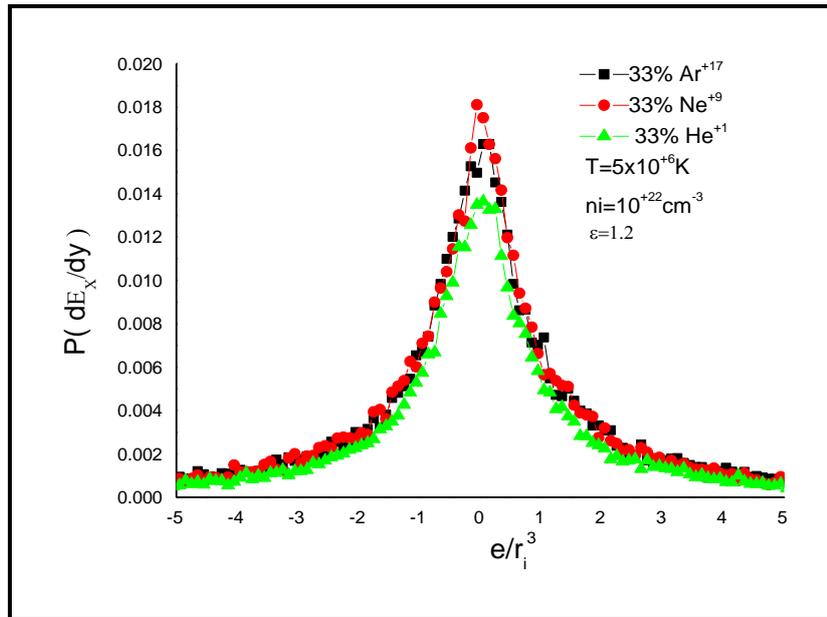
الشكل (III. 38): دوال توزيع الحقل من أجل بلازما ذات ثلاث أصناف



الشكل (III. 39): دوال توزيع مركبة الحقل من أجل بلازما ذات ثلاث أصناف



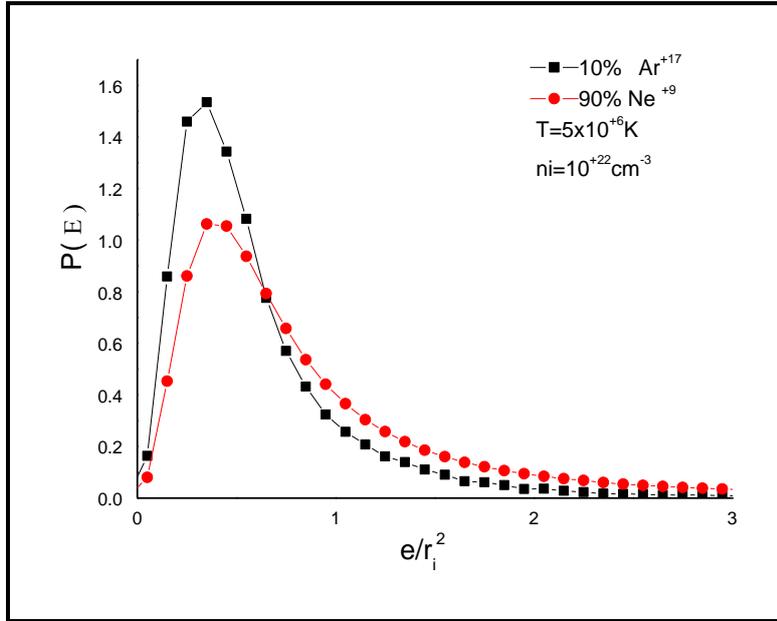
الشكل (III. 40): دوال توزيع المشتقة القطرية لمركبة الحقل من أجل بلازما ذات ثلاث أصناف



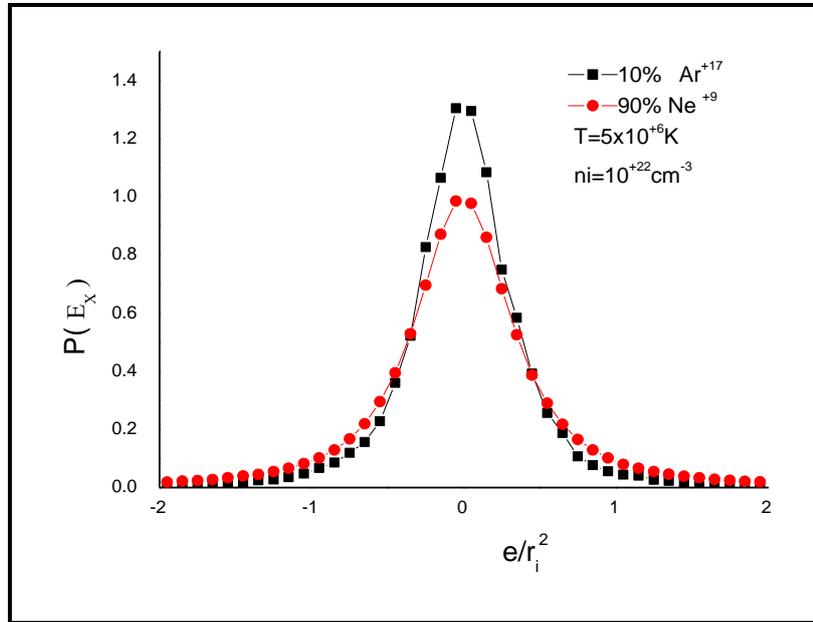
الشكل (III. 41): دوال توزيع المشتقة اللاقطرية لمركبة الحقل من أجل بلازما ذات ثلاث أصناف

لاحظنا ارتفاع القيمة الأعلى إحتمال أيونات الأرجون Ar^{+17} ذات الكتلة والشحنة الأكبر ثم النيون Ne^{+9} . ثم الهليوم He^{+1} في كل من توزيعات الحقل، مركبة الحقل، ومشتقات القطرية واللاقطرية للحقل.

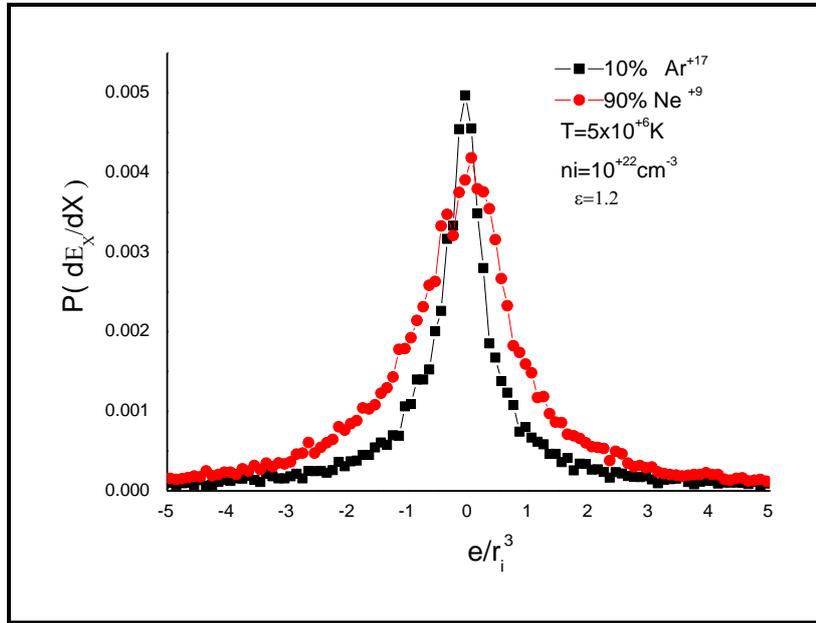
9. دوال توزيع الحقل ومشتقاته الفضائية من أجل بلازما ذات آثار أيونات:
 (III. 46) (III. 45) (III. 44) (III.43) (III. 42) توضح كل الأشكال
 (III. 47) دوال توزيع الحقل، مركبة الحقل، مشتقة الحقل القطرية، مشتقة الحقل
 اللاقطرية على الترتيب، من أجل بلازما النيون Ne^{+9} مع وجود آثار الأرغون Ar^{+17}
 بنسبة 5 % .



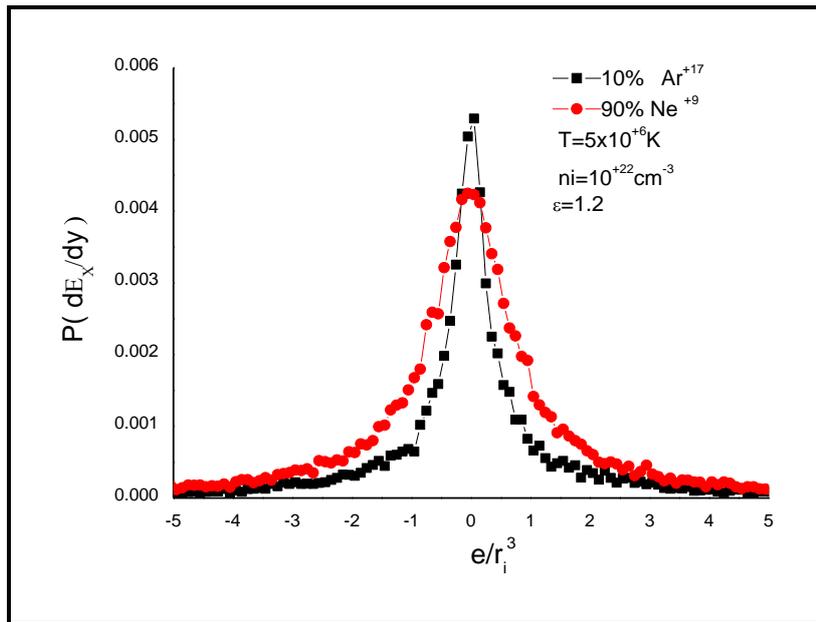
الشكل (III. 42): دوال توزيع الحقل من أجل بلازما ذات آثار أيونات



الشكل (III. 43): دوال توزيع مركبة الحقل من أجل بلازما ذات آثار أيونات



الشكل (III. 44): دوال توزيع المشتقة القطرية لمركبة الحقل من أجل بلازما ذات آثار أيونات



الشكل (III. 45): دوال توزيع المشتقة اللاقطرية لمركبة الحقل من أجل بلازما ذات آثار أيونات

لاحظنا أيضا ارتفاع القيمة الأعلى لإحتمال للأيونات ذات الشحنة والكتلة الأكبر من أجل كل التوزيعات.

10. مراجع الفصل الثالث

[1] Adaika, H., & Meftah, M. T. (2014). Angular velocity distribution of the electric microfield in plasma. *Contributions to Plasma Physics*, 54(7), 669–679.

<https://doi.org/10.1002/ctpp.201300041>

[2] Bekkouche, A., & Khelfaoui, F. (2022). Calculating Microfield Angular Velocity Distribution in Plasma through Using Molecular Dynamics Simulation. *Journal of Physical Science*, 33(3), 81-100.

<https://doi.org/10.21315/jps2022.33.3.6>

خلاصة عامة

خلاصة عامة

هدفنا من هذه الرسالة هو المساهمة في حساب بعض دوال التوزيع المتعلقة بالحقول الكهربائية في البلازما باستخدام تقنية محاكاة التحريك الجزيئي (MDS)، هذه الدراسات مهمة بسبب تأثيرها على أشكال خطوط الطيف، الذي يستغل في تشخيص البلازما، حيث توظف التوزيعات المتعلقة بالحقول الكهربائية في الصيغ الرياضية لشدة إشعاع خطوط الطيف. توصلت أبحاث ودراسات حديثة لوجود تأثير حركة الأيونات على شكل خطوط الطيف، ومنها تأثير دوران الحقل الأيوني. في هذه الأطروحة إستعرضنا أساسيات وخصائص فيزياء البلازما مفهومها، أنواعها، معاملاتها، تطبيقاتها، مجالات البحث في البلازما، ثم أهمية دوال التوزيع المتعلقة بالحقول الكهربائية وطرق ونماذج حسابها، ثم حسبنا بعض هذه التوزيعات باستخدام تقنية محاكاة التحريك الجزيئي (MDS)، أهم الملاحظات المسجلة من خلال النتائج التي أسهمنا بها في عملنا هذا:

- ✓ مجال توزيع الزاوية بين الحقل والسرعة 0.02 rad والقيمة الأكثر احتمالية هي $\frac{\pi}{2}$.
- ✓ دالة توزيع الزاوية بين الحقل ومركباته الكارتيزية متناظر بالنسبة $\frac{\pi}{2}$ ، غير حساس لدرجات الحرارة والكثافة، بينما توزيع جيب تمام الزاوية ثابت.
- ✓ دالة توزيع الزاوية بين مركبات الحقل الكارتيزية ثابت في المجال $[0, 2\pi]$ غير حساس لدرجة الحرارة والكثافة وهذا يتوافق مع خاصية تماثل المناحي في الفراغ فلا يوجد إتجاه مفضل عن الآخر.
- ✓ توزيعات المشتقات الزمنية للزوايا حساسة لدرجة الحرارة والكثافة، أعلى احتمالاتها موافقة للقيمة صفر.
- ✓ دوال توزيع دوران الحقل الكهربائي حساس لدرجة الحرارة والكثافة، حيث تنخفض القيمة الأكثر احتمال بنقصان الكثافة بينما تزداد بزيادة درجة الحرارة، قارنا نتائجنا مع نتائج Adaika و Meftah وفق نموذج (Holt) و (IPM)، لاحظنا إختلاف من أسبابه أن حساباتنا تأخذ في الإعتبار التفاعل وفق كمون Debye لجميع الأيونات مع الأيون الهدف والتفاعلات بين كل الأيونات.
- ✓ دالة توزيع نصف قطر إنحناء السرعات الزاوية لحركة الأيونات متوافقة مع قيم نصف القطر الأيوني المتوسط وتواتر البلازما كما أن سلوكياتها متوافقة مع تغير وسائط البلازما.
- ✓ توزيعات الحقل ومشتقاته لبلازما بعدة أصناف، الأيونات ذات الصنف الأعلى كتلة وشحنة هي الأعلى احتمال.
- ✓ إن هذ العمل يفتح مجالات واسعة لمواصلة البحث من عدة جوانب من أبرزها:
- ✓ إستغلال نتائج دوال توزيع السرعة الزاوية للحقل الأيوني على أشكال خطوط الطيف.
- ✓ حساب دوال توزيع المركبة الإهتزازية للحقل الأيوني.
- ✓ إستغلال نتائج دوال توزيع نصف قطر إنحناء والسرعات الزاوية لحركة الأيونات.

خلاصة عامة

- ✓ حساب دوال التوزيع الحقل ومشتقاته من أجل بلازما ذات عدة أصناف وفق قانون صاحبا.
- ✓ حساب دوال التوزيع الحقل ومشتقاته بواسطة كمونات أخرى مثل كمون W. Ebeling وكمون كلبج Kelbg بإدراج التأثيرات الكمومية.
- ✓ حسابات مؤثر التصادم باستخدام تقنية محاكاة التحريك الجزيئي.

الملخص

الملخص

من أجل حساب طيف إشعاع البلازما يجب إستغلال دوال التوزيع المتعلقة بالحقول الكهربائية لهذا إهتم الكثير من الباحثين بحساب هذه التوزيعات وفق عدة نماذج مختلفة. توصلت أبحاث حديثة لتأثير اتجاهية ودوران الحقل الأيوني وإهتزازه على شكل خطوط الطيف في هذا العمل باستخدام محاكاة التحريك الجزيئي من أجل بلازما أرجون قمنا بحساب دوال توزيع زوايا الحقل الأيوني ومشتقاتها الزمنية في الإحداثيات المنحنية والكارتزنية، دوال توزيع السرعة الزاوية للحقل الأيوني مع مقارنة بنتائج نموذج هولتسمارك، دوال توزيع نصف قطر الإنحناء والسرعات الزاوية لحركة الأيونات، دوال توزيع الحقل ومشتقاته الفضائية من أجل بلازما ذات عدة أصناف. وفقا للتوازن الحراري وتماتل المناحي للبلازما ونموذج حسابنا والمقارنة التي قمنا بها كانت نتائجنا جيدة.

ABSTRACT

In order to calculate the spectrum of plasma radiation, one needs to know that the distribution functions related to electric fields must be exploited. Therefore, many researchers have been interested in calculating these distributions according to several different models. Thus, recent research has unveiled the effect of the directionality and rotation of the ionic field and that of its vibration on the shape of the spectral lines. In this work, using molecular dynamics simulations for an argon plasma had us calculate the distribution functions of the ionic field angles, and their time derivatives in curvilinear and Cartesian coordinates, and the angular velocity distribution functions of the ionic field with comparison to the results of the Holtsmark model. Distribution functions of the radius of curvature and angular velocities of ion movement, field distribution functions and their space derivatives for plasmas of several types. According to the thermal balance and isotropy of the plasma and our calculation model and comparison that we made. Our results then, turned out to be good.

RÉSUMÉ

Afin de calculer le spectre du rayonnement plasma, il faut savoir qu'il faut exploiter les fonctions de distribution liées aux champs électriques. C'est pourquoi de nombreux chercheurs se sont intéressés au calcul de ces distributions selon plusieurs modèles différents. Ainsi, des recherches récentes ont dévoilé l'effet de la directivité et de la rotation du champ ionique ainsi que celui de sa vibration sur la forme des raies spectrales. Dans ce travail, l'utilisation de simulations de dynamique moléculaire pour un plasma d'argon nous a permis de calculer les fonctions de distribution des angles du champ ionique, et leurs dérivées temporelles en coordonnées curvilignes et cartésien, ainsi que les fonctions de distribution de vitesse angulaire du champ ionique par comparaison aux résultats de le modèle Holtsmark. Fonctions de distribution du rayon de courbure et des vitesses angulaires du mouvement des ions, fonctions de distribution de champ et leurs dérivées spatiales pour des plasmas de plusieurs types. D'après le bilan thermique et l'isotropie du plasma et notre modèle de calcul et comparaison que nous avons fait. Nos résultats se sont alors révélés bons.