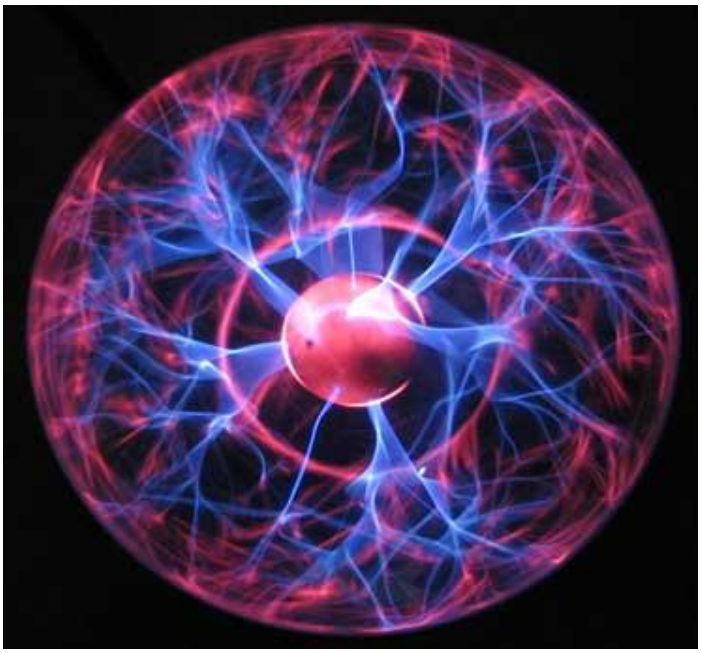
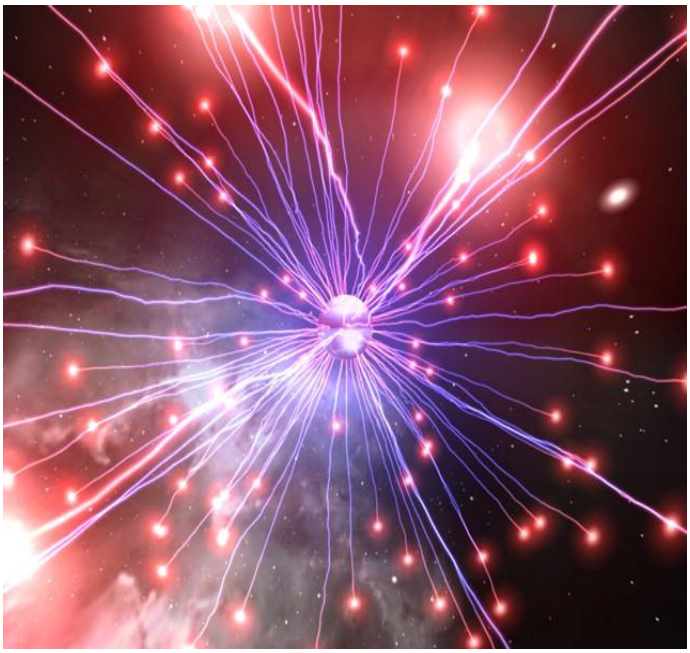
# فيزياء البلازما Plasma physics

**المصادر:**


1. Introduction to plasma physics by Thomson
2. Introduction to plasma physics by Chen
3. Plasma physics by Keen
4. فيزياء البلازما د. عاصم عبد الكريم
5. اساسيات في فيزياء البلازما د. بهاءحسين صالح



## الفصل الاول (مقدمة عن البلازما)

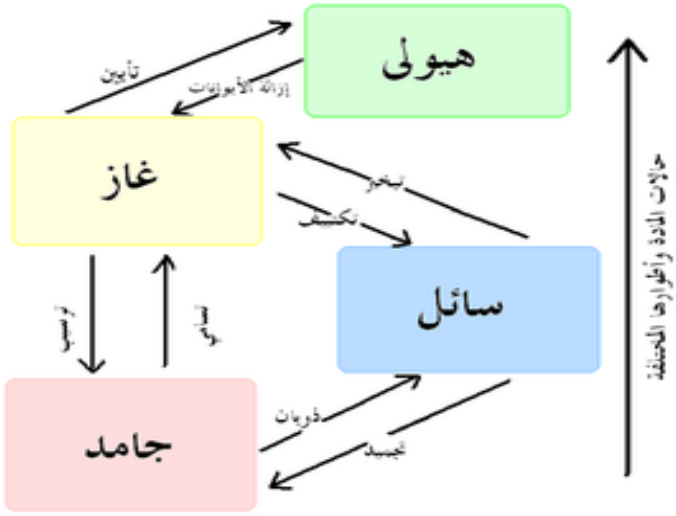
### 1. مقدمة

البلازما هي كلمة ذات اصل اغريقي وتعني لغوياً المادة الجلاتينية.وباللغة اليونانية (αμσαλπ) فيعني اصلا شيئ مكون وفق نظام معين.

توجد المادة عادة بثلاث حالات وهي الحالة الصلبة والسائلة والغازية وعن طريق احداث تغيير في درجة حرارة المادة يمكن احداث تغيير في حالة المادة. عموماً في جميع حالات المادة تكون ذرات وجزيئات المادة متعادلة كهربائياً اي ان صافي الشحنة يساوي صفر، وهذه الصفة تكون متحققة حتى اثناء عملية تحول المادة من حالة الى اخرى. في حالة البلازما فان خاصية التعادل الكهربائي لذرات وجزيئات المادة تختل، ويرتبط مفهوم البلازما عادة بحالة التاين للمادة التي تشكل 99% من المادة الكلية للكون لذا فان حالة البلازما تشكل اكثر حالات المادة شيوعاً في الكون حيث ان الشمس والنجوم تعتبر كتل كبيرة من البلازما الساخنة، وبعض الكواكب تشكل البلازما أغلب مادتها، حيث يعتبر كوكب المشتري كتلة هائلة من البلازما، حيث اننا نعيش بـ 1% من الكون وهو الجزء الذي لايتكون فيه حالة البلازما.

ان حالة البلازما تطلق على المادة اثناء وجودها بدرجة عالية من التأين اي عندما تكون نسبة عالية من ذرات المادة موجودة بشكل ايونات موجبة مع الكترونات سالبة منفصلة عنها.

وان الصفة التي تميز الحالات واحدة عن الاخرى هي قوة ربط الاواصر بين الدقائق المكونة للمادة حيث تكون قوية جداً في الحالة الصلبة وضعيفة في الحالة السائلة وشبه معدومة في الحالة الغازية ومعدومة تقريبا في حالة البلازما، ومن الممكن ان تتحول المادة من حالتها الى حالة اخرى لذلك تعتبر طورية، اما بالنسبة للبلازما تحدث تدريجياً بازدياد درجة الحرارة للمادة الغازية وان تحولها من حالة غازية الى حالة البلازما هو تحول غير طوري كما في الشكل رقم (1):

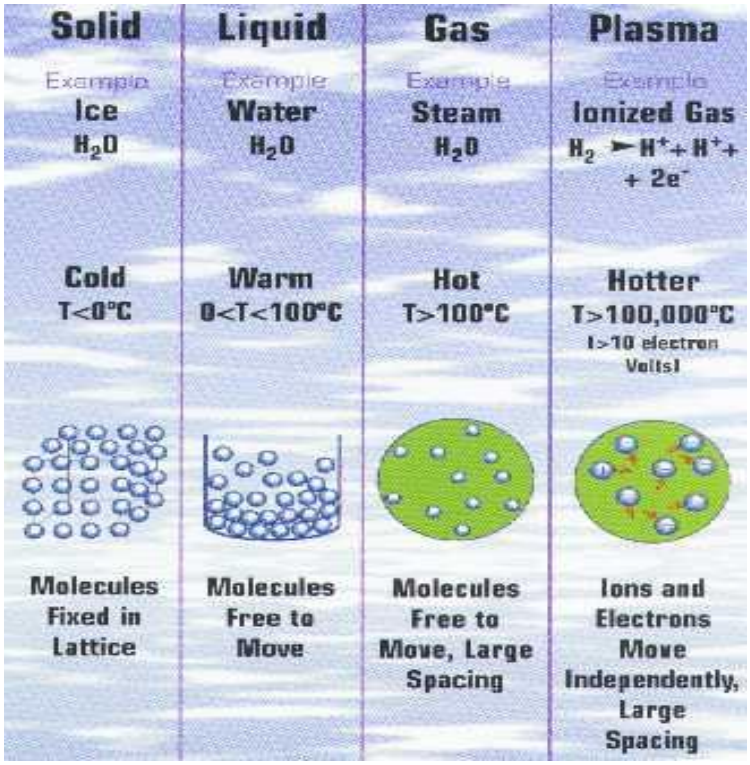



الشكل (1): التحولات الطورية للمادة.

ان عملية التحول تتم عن طريق اكساب الغاز طاقة (عن طريق تسخينة او عن طريق امرار تيار كهربائي مرتفع او ضوء ليزر كثيف من خلاله) حيث ان بعض الذرات تكتسب طاقة كافية لتحرير الكترون سالب الشحنة ليصبح ذو شحنة كهربائية موجبة.

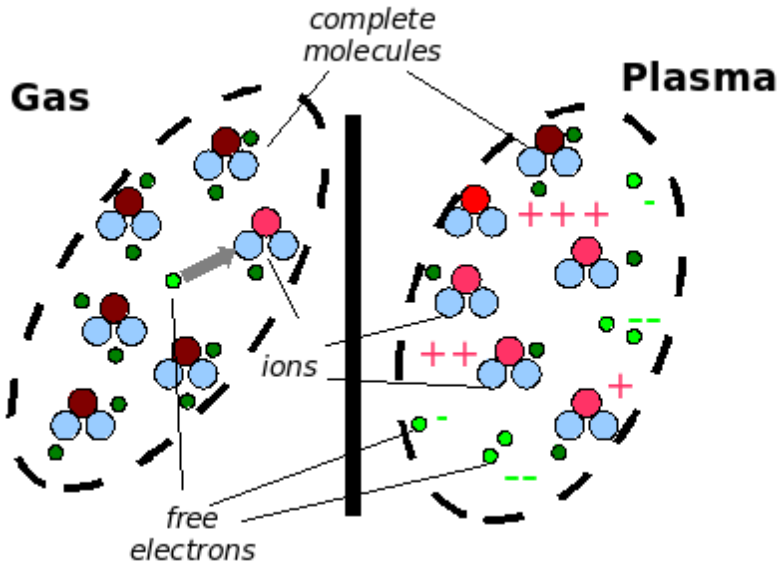
ان الذرة في حالتها المستقرة لاتصدر اي اشعاع ولكن عند اثارتها تبقى في حالتها الاخيرة لمدة 8-10 sec كما ويمكن ان تتحول الذرة الى ايون (ion) باقتلاع الكترون او اكثر من الكتروناتها. وبفقدان الذرة لجميع الكتروناتها فانها تستطيع ان تتحرك بحرية مع نوى الذرات دون اي ارتباط بها فعند هذة الحالة تكون المادة قد تحولت الى بلازما.

وعلى سبيل المثال عند دراسة تحول الماء في الحالات الاربعة اعتمادا على درجة الحرارة وصولاً الى حالة البلازما كما في الشكل رقم (2) :




شكل (2): الحالات الاربعة للمادة حسب درجات الحرارة

عليه يمكن تمييز المادة بحالتها الغازية عنها بحالة البلازما بالشكل التالي:




شكل (3):الفرق بين الغاز والبلازما

**تعريف البلازما**

تعرف البلازما بانها حالة وجود شحنات اوتركيز الشحنات السالبة والموجبة لوحدة الحجوم في حالة متساوية تقريباً ومتعادلة كهربائياً.

Plasma: is a quasineutral gas of charged and neutral partial which exhibits collective behavior

وقد توجد البلازما من حيث المفهوم بشكل:

1. غاز متأين
2. الحالة الصلبة: كما في اشباه الموصلات حيث توجد الشحنات الموجبة المتمثلة بالفجوات والشحنات السالبة المتمثلة بالالكترونات الحرة الحركة.
3. الحالة السائلة: كما في المحلول الالكتروليتي او في ملح منصهر.

ان ابسط الانواع لدراسة البلازما من الناحيتين العلمية والنظرية هي عندما تكون المادة في الحالة الغازية وذلك لاهميتها الكبيرة ولانها تمثل الحالة الاوسع من حالات المادة.

## 2. وجود البلازما في الطبيعة

معظم المادة الكونية الموجودة في النجوم تكون في درجات حرارة عالية جداً الى الحد الذي تصبح فيه الطاقة الحركية لذرات المادة كافية لاحداث تأين لهذه الذرات عند عمليات التصادم المتكررة بالاضافة الى تجهيز طاقة حركية فائضة للايونات تكفي للتغلب على التنافر الكهروستاتيكي بين الايونات الموجبة مما يؤدي الى حدوث تفاعلات اندماج نووي تقوم بدورها بتوليد كميات كبيرة جداً من الطاقة وتعتبر هذه العملية هي الاساس في تولد الطاقة في الكون.

اما على سطح الارض فان عملية تاين جزيئات الهواء المحيط بالكرة الارضية والناتج عن سقوط الاشعة فوق البنفسجية على الطبقة الهوائية المحيطة بالارض.

وفي الحالات الاعتيادية يجب توفير درجات حرارة عالية لاحداث التأين لذا يتم انتاج البلازما بمختبرات خاصة. فطاقة التأين تكون بحدود بضع وحدات الكترون فولت (eV) لذا يجب ان تكون درجة الحرارة كافية لاحداث التاين اي مساوية لجهد التأين لذا فان درجة حرارة العتبة تقع بين $10^3$-$10^5$ $K^o$ وقد تصل الى عدة ملايين كلفن.

المصابيح الكهربائية المتفلورة والزئبقية او الهالوجينية مثال على البلازما كغازمتأين لكنها تتضمن تأين جزئي لان البلازما هنا تتعرض لعملية تبريد مستمرة وسريعة من خلال اصطدام الالكترونات والايونات بجدار المصباح البارد.

ان وجود البلازما في درجات حرارية عالية يضع قيوداً عل مسألة احتواء البلازما فلايوجد وعاء مادي يحتمل درجة حرارة البلازما، لكن تحفظ البلازما ضمن مجالات مغناطيسية بحيث لايسمح للبلازما ان تلامس الجدران المادية للوعاء.

## 3. اشكال البلازما:

ان اشكال البلازما تتضمن :

**1- بلازما تصدر عن اجهزة صناعية:**

- شاشات البلازما.
- مصابيح التألق (الفلوريسن ذات الطاقة الضعيفة).
- عوادم الصواريخ.
- لحام القوس الكهربائي.
- مصابيح البلازما (كرة البلازما).
- لحفر رقائق الحاسوب لانتاج اشباة الموصلات.

2- **بلازما طبيعية ارضية:**

- البرق وكرة البرق.
- طبقة الغلاف المتأين.
- الشفق القطبي.

3- **بلازما طبيعية كونية فلكية وفضاء كوني:**

- النجوم.
- الرياح الشمسية.
- الفراغ المحيط بين النجوم والكواكب.
- حلقة احد اقمار المشتري.
- الاقراص الناشئة من تكوين الاجسام النجمية الضخمة.

## 4. أهمية دراسة البلازما:

لقد تم الاهتمام بحالة المادة الرابعة (البلازما) من قبل العديد من العلماء لأهميتها في الكثير من الدراسات والمجالات وتتضمن اهميتها في عدة اسباب :

1 . ان البلازما موصلاً جيداً للتيارالكهربائي ومصدراً للضوء.

2 . ان البلازما هي الحالة الاكثر سعة في عالم منظومتنا الشمسية عند درجات الحرارة العالية.

3 . تعد البلازما نظاماً ديناميكياً تتحكم به القوى الكهرومغنطيسية.

4 . تستخدم البلازما في التطبيقات الصناعية المتعددة.

5 . تعالج مشاكل تقنية مهمة مثل المشاكل التي تجابه بناء مفاعلات الاندماج النووي.

## 5. أنواع البلازما:

تصنف البلازما وفقاً للدرجات الحرارية الى :

1 . البلازما الباردة (Cold plasma)

هي غالباً ماتكون متأينة جزئياً (ضعيفة التأين) تتراوح درجة حرارتها بين مئات الى عدة الاف من الدرجات المئوية وبطاقة حركية مقدارها (1eV) ويطلق عليها اسم التفريغ في الغازات وهي النوع المستخدم في اغلب البحوث العلمية.

2 . البلازما الساخنة (Hot plasma)

هي بلازما تامة التأين وتعد الوسط الأساسي التي يمكن ان تحدث فيه تفاعلات الاندماج النووي ومثال عليها بلازما ساخنة توصل اليها الاتحاد السوفيتي سابقاً في معجلات التوكماك (Tokomak) وتتراوح درجة حرارتها بين مئات الى عدة ملايين من الدرجات الحرارية، وبطاقة حركية بحدود ( 10eV).

## 6. الخصائص العامة للبلازما

1. البلازما على الاغلب تكون غير متجانسة (درجة الحرارة، التركيز، المجال المغناطيسي).
2. البلازما غالبا ما تكون متباينة الخواص اي ان خواصها تعتمد على الاتجاه.
3. البلازما مبددة اي ان الطاقة الميكانيكية او الكهرومغناطيسية ممكن ان تتحول الى حرارة.
4. البلازما موصلة للكهربائية حيث يظهرحث فارادي عند تحرك البلازما.
5. البلازما لزجة اي ان الطاقة الميكانيكية تتبدد الى الحرارة وتظهر طبقات بين اطراف البلازما.
6. البلازما موصلة للحرارة بحيث يمكن نقل الحرارة من خلال البلازما الى جسم اخر.
7. البلازما شفافة وغير شفافة للموجات الراديوية اعتمادا على الطول الموجي.
8. البلازما ذات نفاذية مغناطيسية ضعيفة لذلك البلازما تعمل على اضعاف المجال المغناطيسي.
9. قد تكون في حالة توازن ميكانيكي عند احتوائها بمرآة مغناطيسية (عندها لاتكون في حالة توازن ثرموديناميكي).

## 7. معادلة ساها Saha Equation

في كل غاز متأين تتراوح نسبة التأين مابين الصفر والواحد وتعتمد هذه النسبة بشكل مباشر على مقدار الطاقة الحركية التي تمتلكها جزيئات الغاز أو يمكن القول تعتمد بشكل مباشر على درجة حرارة الغاز.

أن الغاز في حالة تأين جزء منه سيكون عبارة عن نظام مكون من الذرات المتعادلة والأيونات الموجبة والألكترونات وتحديد نسبة كل من هذه المكونات يحدد درجة تأين الغاز. العالم ساها (1920) أستخدم طريقة لحساب درجة تأين أي غاز.

أعتبر ساها عملية التأين عملية عكسية اي أنه في نفس الوقت الذي يتم فيه خلق أيونات والكترونات جديدة داخل الغاز فأن هناك أيونات اخرى تقوم بالأتحاد مع الألكترونات لتكوين ذرات متعادلة وبشكل مشابه تماماً لما يحدث في حالة تفاعل كيميائي عكسي، أي بالصورة التالية :

$$A + \text{طاقة} \Leftrightarrow A^{+} + e^{-}$$

وهذا الأفتراض يعني أهمال حالات التهيج للذرات حيث تم أعتبار الحالات الموجودة على أنها حالتان فقط وهما حالة الذرة المتعادلة وحالة الأيون.

وصيغة معادلة ساها في حالة التوازن الحراري (Thermal equilibrium) والتي تمثل نسبة التأين المتوقعة في الغازات هي :

$$\frac{n_i}{n_n} \cong 2.4 \times 10^{15} \frac{T^{3/2}}{n_i} e^{-u_i/KT}$$

حيث :

$n_i$ : تركيز الذرات المتأينة (الأيونات) ($cm^{-3}$).

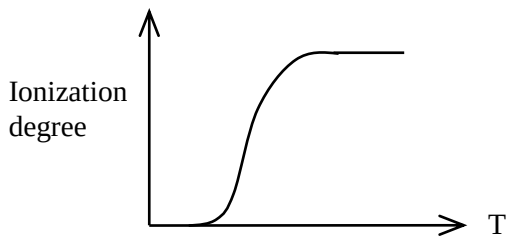
$n_n$ : تركيز الذرات المتعادلة.

T : درجة الحرارة المطلقة ($K^o$).

K : ثابت بولتزمان.

$u_i$ : طاقة تأين الغاز (جهد التأين).

ويمكن تمثيل معادلة ساها بالعلاقة التالية :



معادلة ساها فيزياوياً تعني ان ذرات الغاز($n_n$) تمتلك طاقات حرارية منفصلة وعندما تكون هذه الطاقات واطئة فان التصادمات الطاقية (Energetic collision) سوف تكون نادرة الحدوث لان الذرة يجب ان تكون معجلة لطاقة اعلى من معدل طاقة التأين بوساطة التصادمات، اما عندما تكون الطاقات الحرارية عالية فان الذرة تتأين عندما تعاني من التصادم مع الالكترون بطاقة عالية.

اما بالنسبة للجزء الاسي ($e^{-u_i/KT}$) فانه يبين ان عدد الذرات ذات السرع العالية يهبط أسياً مع المقدار ($u_i/KT$) وان الذرة التي تكون متأينة ستبقى مشحونة حتى تلاقي الالكترونات وتعيد اتحادها معها لتصبح متعادلة مرة اخرى، ان معدل اعادة الاتحاد (Recombination rate) يكون معتمداً على كثافة الالكترونات والتي يمكن جعلها مساوية لـ $n_i$ لذلك فان تعادل كثافة الايون سوف يقل مع $n_i$. وعليه فان معادلة ساها توضح انه بارتفاع درجة حرارة الغاز تزداد كثافة الجسيمات المتأينة وبعد ان تتجاوز درجة الحرارة لطاقة التأين تسمى في هذه الحالة البلازما وقد تكون البلازما ضعيفة او جزئية او كاملة التأين اعتماداً على $n_i$ (كثافة الجسيمات المتأينة).

وتكون البلازما متأينة عندما $n_i > n_n$ حيث تكون نسبة التأين اكبر من $10^{-4}$، لكنها تكون ضعيفة التأين عندما $n_i < n_n$ حيث تكون نسبة التأين اقل من $10^{-4}$.

ففي درجة حرارة الغرفة تكون نسبة التأين منخفضة جداً وهذا مايفسر صعوبة الحصول على بلازما كاملة التأين في المختبر.

ولتوليد البلازما مختبرياً نقوم بتسليط فرق جهد على غاز تحت ضغط معين بحيث تكون الطاقة كافية لاثارة ذرات الغاز عند زيادة الطاقة يزداد تهيج الجسيمات الذرية والجزيئية ويحصل انفصال لجزيئة الغاز فيؤدي الى حدوث تأين ولكي تبقى البلازما في حالة شبة الاستقرار تحدث عمليات اعادة الاتحاد بين الجسيمات المشحونة والمتعادلة بحيث تكون ازواج ايون-الكترون بشكل مستمر والتي تتكون بواسطة عمليات اعادة الاتحاد والانفصال وعمليات التأين وكما موضح في المعادلات الاتية :

$AB + e^- \rightarrow A + B + e^-$ أنفصال

$AB + e^- \rightarrow AB^+ + e^-$ تأين

$AB + e^- \rightarrow AB^* + e^-$ تهيج

$AB + e^- \rightarrow A + B^+ + e^-$ انفصال تأين

$A^+ + B + e^- \rightarrow AB$ اعادة اتحاد

## 8. معاملات البلازما Plasma Parameters

### a. درجة الحرارة

في البلازما غالبا ما نتحدث عن درجة حرارة الالكترونات $T_e$ حيث ان:

$$< E >= \frac{3}{2}KT$$

ولكون $T$ و $<E>$ مرتبطين مباشرة لذا يمكن التعبير عن درجة الحرارة $T$ في فيزياء البلازما كمقدار طاقة ووحدتها تعتبروحدة طاقة. وعادة ما تفهم تحت مفهوم الحرارة $KT$ فمثلاً عندما $KT$=1$eV$ يكون $KT$=1.6x10$^{-19}$ فيكون لدينا:

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

عليه $1eV = 11600K^o$

من المفيد ان نشير ان بلازما معينة يمكن ان تمتلك عدة درجات حرارة في نفس الوقت، وغالبا ماتمتلك الالكترونات والايونات توزعين مختلفين لدرجتي حرارة مختلفتين $T_e$و $T_i$ وهذا ممكن لان تكرارتصادمات الايونات فيما بينها او بين الالكترونات فيما بينها، ممكن ان تكون اكبرمن تكرارتصادمات الالكترونات والايونات وعندئذ كل نوع من الجزيئات يمكن ان يوجد في حالة توازن حراري مستقلة عن حالة النوع الاخر. وفي حالة وجود مجال مغناطيسي فانه حتى في النوع الواحد من الجزيئات وليكن الايونات يمكن ان توجد في درجتي حرارة مختلفتين وذلك لاختلاف اتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة عليها

### b. تردد البلازما Plasma Oscillation

أن وجود الألكترونات ضمن المجالات الكهروستاتيكية للأيونات الموجبة في البلازما سوف يفترض بعض التحديدات على حركة سيل من الألكترونات والأيونات. فلابد من حدوث أهتزازات في البلازما نتيجة لوجود القوى الكهروستاتيكية العاملة بين الشحنات الموجبة والسالبة والتي تحاول أعادة البلازما الى وضع الأستقرار عند التأثير بأي مؤثريحاول الأخلال بهذا الأستقرار .

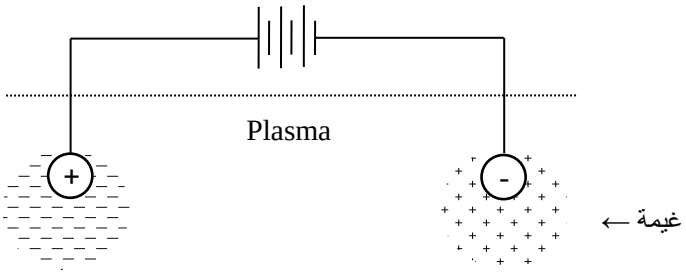
فعند تصادم الجسيمات المشحونة مع الذرات المتعادلة عندها تتسبب الأخيرة بتذبذب الجسيمات المشحونة بتردد معين يعتمد على القوى الهيدروديناميكية والكهرومغناطيسية الموجودة. وهذا التردد يعطي بالعلاقة:

$$W_P = \left(\frac{n_i e^2}{\epsilon_o m}\right)^{1/2}$$

وهذا التردد يعطي في أغلب الأحيان للألكترونات لأن تردد الأيونات الموجبة يكون قليل مقارنة بتردد الالكترونات كون كتلتها تكون كبيرة مقارنة بكتلة الألكترونات.

### c. حجب ديباي Debye Shielding

أن البلازما المتعادلة من خلال تساوي عدد الأيونات الموجبة والسالبة هي ليست بالضرورة خالية من المجالات الكهربائية الموضعية داخل البلازما والناتجة عن تواجد الأيونات والألكترونات. أن لهذه المجالات الموضعية مديات أقل بكثير من مدى جهد كولوم للشحنات المستقرة والذي يكون لانهائي. فلمعرفة المدى المؤثر للجهد الكهربائي للشحنة داخل البلازما نفترض وضع مجال كهربائي داخل البلازما من خلال وضع كرتين مشحونتين مربوطتين ببطارية.




أن كل كرة من الكرات المشحونة سوف تتسبب في تفريق الشحنات المشابهة لها في منطقة المجال المحيط بها في حين تتجاذب مع الشحنات المعاكسة لها. وهذا الفصل في الشحنات سوف يؤدي الى تغيير شكل المجال في البلازما. فان احد المميزات الاساسية في توليد البلازما هي مقدرتها على اختزان او حجب الجهود الكهربائية التي تتولد فيها.

في حالة البلازما الباردة أي لاتوجد حركة حرارية عندها يكون حجب البلازما تام وسوف لاتظهر أي مجالات كهربائية خارج حدود الغيمة المحيطة بالكرة. لكن عند أرتفاع درجة الحرارة فأن الجسيمات عند حدود الغيمة والتي يكون بها المجال الكهربائي ضعيف تمتلك طاقة حرارية كافية للهروب من هذا المجال الكهروستاتيكي.

لذا فأن هذه الغيمة ستكون بنصف قطر حيث أن الطاقة الكامنة مساوية تقريباً للطاقة الحركية للجسيمات، أي سوف يكون الحجب غير تام في هذه الحالة.

أن الجهد الكهربائي الناتج بعد فصل الشحنات يعطي بالعلاقة :

$$\phi = \phi_o e^{-|x|/\lambda_D}$$

لذا فهو عبارة عن حاصل ضرب جهد كولوم الأعتيادي $\phi_o$ في معامل أسي يقل تبعاً لزيادة المسافة $(x)$ والمقدار $(\lambda_D)$ الذي يسمى بطول ديباي أو مسافة الحجب، وطول ديباي يعطي بالعلاقة :

$$\lambda_D = \left(\frac{k\,T_e}{4\pi n e^2}\right)^{1/2}$$

فطول ديباي الذي يمثل مقياس لمسافة حجب البلازما، يمكن تعريفه على أنه المسافة التي يتم خلالها معادلة المجال الكهربائي الناتج عن الجسم المشحون بواسطة التأثير الناتج عن فصل الشحنات الموجبة والسالبة عن بعضها.

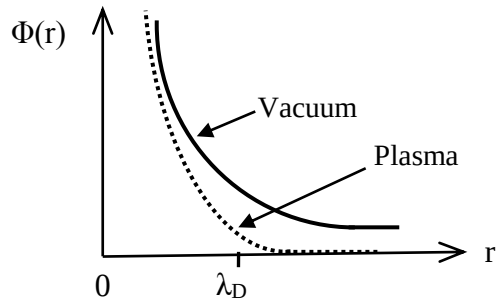
فنلاحظ أن تأثير جسيمات الغيمة سوف لايكون محسوساً بدرجة كبيرة عندما مسافات $(x)$ أقل من $(\lambda_D)$ في حين ينخفض جهد الأيون بحيث يصبح غير محسوس نهائياً كلما أبتعدنا وأصبحت $(x)$ أكبر من $(\lambda_D)$.

أي أن البلازما المحيطة بأي جسم مشحون موجود داخلها سوف تقوم بعملية حجب تأثير ذلك الجسيم في النقاط التي تبعد عن الجسيم بمسافات أكبر من $(\lambda_D)$.

ويمكن أن تعطى $(\lambda_D)$ بالعلاقات التالية أيضاً :

$$\lambda_D = 6.9(T/n)^{1/2} \qquad (cm) \qquad T\ (K^o)$$

$$\lambda_D = 740(kT/n)^{1/2} \qquad (cm) \qquad KT\ (eV)$$




توزيع الجهد للجسم المشحون في الفراغ والبلازما

يمكن أيجاد عدد الجسيمات $(N_D)$ الموجود في غيمة حجب ديباي من خلال أفتراض أن هذه الغيمة لها شكل كروي :

$$N_D = n\frac{4}{3}\pi\lambda_D^3 = 1380T^{\frac{3}{2}}/n^{1/2}$$

ويطلق على $N_D$ في أغلب الأحيان معامل البلازما Plasma Parameter وللمسافات أقل من ($\lambda_D$) تصبح علاقة $N_D$ غير صحيحة لأنها تفقد السلوك الجماعي Collective Behavior.

أما في حالة السلوك الجماعي للبلازما فتصبح $N_D$ :

$$N_D >>> 1$$

مما سبق يجب أن يتوفر بالبلازما الشروط التالية :

1. اي ان البلازما يجب ان تكون كثيفة كفاية بحيث $\lambda_D << L$ حيث L : طول نظام البلازما والتي تمثل البعد الخطي لمجموعة الجسيمات المشحونة.
2. يجب وجود عدد كاف من الجزيئات ضمن غيمة الشحنات، وبالتالي فان السلوك الجماعي يتطلب تحقيق الشرط: عدد الجزيئات في كرة ديباي واحدة اكبر بكثير من واحد $N_D >>> 1$
3. ان يكون تردد اهتزازات البلازما ومعدل الزمن بين تصادم واخر يكون $\omega\tau > 1$

حيث ان غاز ضعيف التأين في محرك صاروخي مثلا ليس بلازما، لان الجزيئات المشحونة تصطدم بالجزيئات المعتدلة غالباً والتي تكون حركتها مرتبطة بقوى هيدروديناميكية عادية اكثر من ارتباطها بقوى كهرومغناطيسية. اذ لكي يكون غاز ما بلازما يجب تحقق:

$$\lambda_D << L, \quad N_D >>> 1, \quad \omega\tau>1$$

## 9. بعض تطبيقات فيزياء البلازما

### 1- مفاعلات الأندماج النووي Thermonuclear Function

في تفاعلات الأندماج النووي تتحد نوى خفيفة(H ،He) لتكون نوى أثقل ينتج عنه تحرير أو أطلاق كميات كبيرة من الطاقة وذلك لأن مجموع كتل النوى الناتجة من التفاعل هو أقل من مجموع كتل النوى الداخلة في التفاعل لذلك فأن الفرق في الكتل سيظهر بشكل طاقة متحررة مقدارها $\Delta E$.

وحسب معادلة انشتاين :

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

أن أهم التفاعلات التي يمكن أستغلالها في أنتاج طاقة الأندماج النووي هي :

$$_1H^2 + _1H^2 \rightarrow {}_2He^3 + {}_on^1 + 3.27\ MeV$$

$$_1H^2 + _1H^2 \rightarrow {}_1H^3 + {}_1H^1 + 4.03\ MeV$$

$$_1H^2 + _1H^3 \rightarrow {}_2He^4 + {}_on^{21} + 17.58\ MeV$$

$$_1H^2 + {}_2He^3 \rightarrow {}_2He^4 + {}_1H^1 + 18.34\ MeV$$

أن مقدار الطاقة المتحررة في هذه التفاعلات هي مقدار كبير جداً بالمقارنة مع الطاقة المتحررة من أنشطار النواة.

ولتحقيق تفاعل أندماج يجب أن تقترب النوى من بعضها مسافة تصل الى $10^{-14}m$ لكي يظهر تأثير فعل القوى النووية قصيرة المدى، فلأجل التغلب على قوى التنافر الكهروستاتيكي يجب أن تكون الطاقة الحركية للنوى المتفاعلة مساوية أو أكبر من طاقة جهد كولوم التي تعطى بالعلاقة :

$$u_c = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_o R}$$

حيث أن $Z_1$ , $Z_2$ الأعداد الذرية للعناصر المستخدمة

بينما معادلة الطاقة الحركية للجسيمات

$$K.E = \frac{1}{2}mve^2 = \frac{3}{2}KT$$

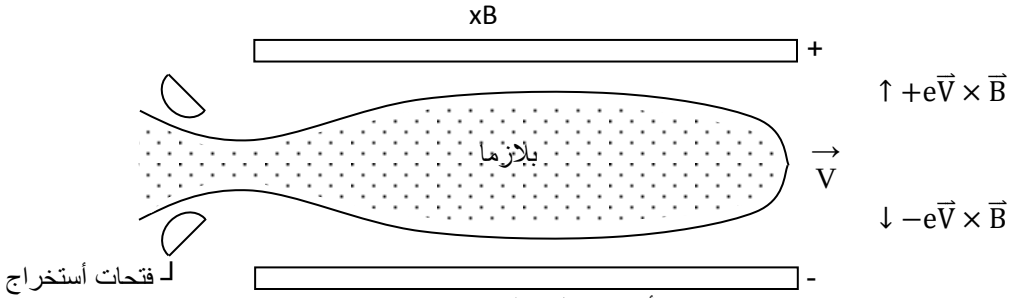
حيث T : درجة الحرارة المطلقة

K : ثابت بولتزمان = $1.38\times10^{-23}$ Joule/k$^o$

فحتى نحصل على تفاعل أندماجي يجب أن تكون الطاقة الحركية للجسيمات مساوية أو أكبر من طاقة جهد كولوم لذا يتم أحداث التفاعلات النووية الأندماجية بواسطة تصادم أيونات البلازما. وبالنظر لصعوبة أحتواء البلازما يتم أنتاج البلازما لفترة زمنية معينة وبكثافة معينة كافية للحصول على سلسلة مستمرة من تفاعلات نووية مسيطر عليها.

2- المولدات المغناطوهيدروديناميكية Magneto Hydrodynamic(MHD)

من التطبيقات المهمة لفيزياء البلازما هي أمكانية تحويل الطاقة الحرارية للبلازما بشكل مباشر الى طاقة كهربائية بواسطة مايسمى بالمولد المغناطوهيدروديناميكي. أن هذا النوع من المولدات يعتمد على أمكانية أستخدام مجالات مغناطيسية عمودية على أتجاه حركة البلازما لغرض أبطائها وتحويل طاقتها الى طاقة كهربائية.

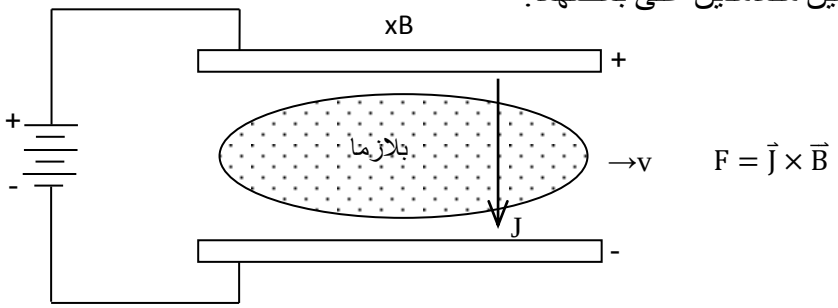


أساس عمل مولدات MHD

ولتوليد الطاقة الكهربائية في هذا النوع من المولدات نحتاج الى سرعة عالية للبلازما الداخلة أضافة الى معامل توصيل كهربائي عالي وكثافة عالية.

3- الدفع النفاث بواسطة البلازما Plasma Jet Propulsion

هنا مبدأ العمل معاكس لما في المولدات المغناطوهيدروديناميكي (MHD) أي تقوم بتحويل الطاقة الكهربائية الى طاقة ميكانيكية وذلك بأستخدام مجالين أحدهما كهربائي والآخر مغناطيسي يعملان بأتجاهين متعامدين على بعضهما.



أساس عمل محركات الدفع النفاث بالبلازما

وهنا البلازما يجب أن تكون واطئة الكثافة جداً لكي تقلل من التصادمات بين جسيمات البلازما وبالتالي نحصل على سرع أنجراف عالية.

أن أستخدام البلازما يوفر سرع تصل الى مئة مرة بقدر سرعة خروج الغازات الأعتيادية الناتجة عن أحتراق الوقود الكيمياوي. ودائماً ماتستخدم من منظومات الدفع بالبلازما بعد خروج الصاروخ عن مدى الجاذبية الأرضية، لذا يتم أستخدام أنظمة الدفع الكيمياوية لهذه الصواريخ كمرحلة أولى.

4- أجهزة ثنائي البلازما Plasma Diod

وتستخدم في توليد التيار الكهربائي بأستخدام قطبين أحدهما ساخن والآخر بارد لتحويل جزء كبير من الحرارية الى تيارات كهربائية.

5- في تطبيقات الليزر

ويتم أستخدام مضخات البلازما والتي تستخدم في تكبير الموجات الكهرومغناطيسية والتي تستخدم في أنتاج الليزر.

# Plasma physics

The term plasma is used to describe a wide variety of macroscopically neutral substances containing free electrons and ionized atoms or molecules, which exhibit collective behavior due to the long- range coulomb forces. Not all media containing charged particles, however, can be classified as plasmas.

For a collection of interacting charged and neutral particles to exhibit plasma behavior it must satisfy certain conditions, or criteria, for plasma existence.

The word plasma comes from the Greek and means ‘something molded’. It was applied for the first time by to criteria Tonks and Langmuir, in 1929,to describe the inner region , remote from the boundaries, of a glowing ionized gas produced by electric discharge in a tube ,the ionized gas as a whole remaining electrically neutral.

From a scientific point of view, matter in the known universe is often classified in terms of four states: solid, liquid, gaseous, and plasma .The basic distinction between solids, liquids, and gases lies in the difference between the strength of the bonds that hold their constituent particles together. These binding forces are relatively strong in a solid, weak in a liquid, and essentially almost absent in the gaseous state.

Whether a given substance is found in one of these states depends on the random kinetic energy (thermal energy) of its atoms or molecules, that is, on its temperature .the equilibrium between this particle thermal energy and the interparticle binding forces determines the state.

By heating a solid or liquid substance the atoms or molecules more thermal kinetic energy until they are able to overcome the binding potential energy .this leads to phase transitions, which occur at a constant temperature for a given pressure. The amount of energy required for the phase transition is called the latent heat.

If the sufficient energy is provided, a molecular gas will gradually dissociate into an atomic gas as a result of collisions between those particles whose thermal kinetic energy exceeds the molecular binding energy.

At sufficiently elevated temperatures an increasing fractions of the atoms will posses enough kinetic energy to over come, by collisions, the binding energy of the outermost orbital electrons, and an ionized gas or plasma results. However, this

transition from gas to plasma is not a phase transition in the thermodynamic sense, since it occurs gradually with increasing temperature.

# Plasma production :

A plasma can be produced by raising the temperature of a substance until a reasonably high fractional ionization is obtained. Under thermodynamic equilibriur conditions the degree of ionization and the electron temperature are closely related. This relation is given by the saha equation.

$$\left[\frac{n_i}{n_n} \cong 2.4x10^{5}\frac{T^{3/2}}{n_i}e^{-U_i/KT}\right]$$

Here $n_i$ and $n_n$ are respectively ,the density (number per $cm^3$) of ionized atoms and of neutral atoms ,T is the gas temperature in $K^\circ$ ,k is Boltzmann`s constant ,and $U_i$ i the ionization energy of the gas

Although plasmas in local thermodynamic are found in many places in nature , as the case for many astrophysical plasmas, they are not very common in the laboratory.

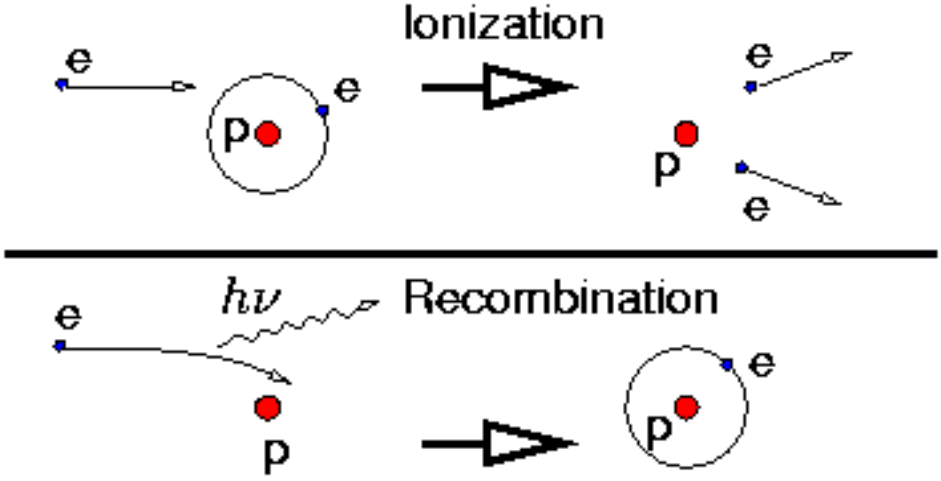
Plasmas can also be generated by ionization processes that raise the degree of ionization much above its thermal equilibrium value .there are many different methods of creating plasmas in the laboratory and , depending on the method , the plasma may have a high or low density ,high or low temperature, it may be steady or transient ,stable or unstable ,and so on .in what follows ,a brief description is presented of the most commonly known processes of photoionization and electric discharge in gases

In the photoionizatio n process, ionization occurs by absorption of incident photons whose energy is equal to or greater than the ionization potential of the absorbing atom.

The excess energy of the photon is transformed into kinetic energy of the electron-ion pair formed. For example, the ionization potential energy for the outermost electron of hydrogen is 13.6 ev , which can be supplied by radiation of wavelength smaller than about 910Å i.e. in the far ultraviolet. Ionization can also be produced by x-ray or gamma rays, which have much smaller wavelengths .the ionosphere, fo example, is natural photoionized plasma.

In a gas discharge, an electric field is applied across the ionized gas, which accelerates the free electrons to energies sufficiently high to ionize other atoms by collisions. One characteristic of this process is that the applied electric field transfers energy much more efficiently to the light electrons than to the relatively heavy ions. The electron temperature in gas discharges is therefore usually higher than the ion temperature, since the transfer of thermal energy from the electrons to the heavier particles is very slow.

When the ionizing source is turned off, ionization decreases gradually because of recombination until it reaches an equilibrium value consistent with the temperature of the medium .In the laboratory the recombination usually occurs so fast that the plasma completely disappears in a small fraction of a second.



# Occurrence of Plasmas:

Gas Discharges: Fluorescent Lights, Spark gaps, arcs, welding,

lightingControlled FusionIonosphere: Ionized belt surrounding

earthInterplanetary Medium: Magnetospheres of planets and starts . Solar Wind.Stellar Astrophysics: Stars. Pulsars. adiationprocesses. Ion Propulsion: Advanced space drives, etc.&

Space Technology Interaction of Spacecraft with environmentGas Lasers:
Plasma discharge pumped lasers: CO2, He, Ne, HCN.

Materials Processing: Surface treatment for hardening. Crystal Growing.

Semiconductor Processing:

Ion beam doping, plasma etching & sputtering.Solid State

Plasmas: Behavior of semiconductors.

# Collective behaviour:

Plasma contains a charged particles, as these charges moves around, they can generate local concentrations of positive or negative charges, which give rise to electric fields. Motion of charges also generates currents and hence magnetic fields .these fields affect the motion of other charged particles far away. By collective behaviour we mean motions that depend not only on local conditions but on the state of the plasma in remote regions as well.

# Concept of temperature:

A gas in thermal equilibrium has particles of all velocities, and the most probable distribution of these velocities is known as the maxwellian distribution.
The one –dimensional maxwellian distribution is given by

$$f_{(u)}=A \exp -1/2mu^2/KT$$

**F= is the number of particles per $cm^3$ with velocity between u and u+du**
**$1/2mu^2$= kinetic energy**
**K = boltzmann~s constant**
**The density n , number of particles per $cm^3$ is given by**

$$n = \int_{-\infty}^{\infty} f(u)du$$

The width of the distribution is characterized by the constant t which is the temperature.
The average kinetic energy of particles is

$$E_{av} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} 1/2mu^2 f(u)du}{\int_{-\infty}^{\infty} f(u)du}$$

**The kinetic energy is thermal so**

**$1/2mv_{th}^2 = KT$**

**$V_{th} = (2KT/m)^{1/2}$**

**and let $y = u/v_{th}$**

**$f(u) = A \exp(-u^2/v_{th})$**

$$E_{av} = \frac{1/2mv_{th}^3 A\int_{-\infty}^{\infty}\exp(-y^2)y^2dy}{Av_{th}\int_{-\infty}^{\infty}\exp(-y^2)dy}$$

$$\int e^{-y^2} y^2 dy$$ **by parts**

$$\int y.e^{-y^2} ydy = [-1/2\{\exp(-y^2)\}y]_{-\infty}^{\infty} - \int_{-\infty}^{\infty} -\tfrac{1}{2}\exp(-y^2)dy$$

$$= \tfrac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-y^2)dy$$

Cancelling the integrals, we have

$$E_{av} = \frac{1/2mAv^3{}_{th}\frac{1}{2}}{Av_{th}} = 1/4mv_{th}{}^2 = \frac{1}{2}KT$$

**Thus the average kinetic energy is ½kT**
**In three dimensions**

$$E_{av}=3/2kT$$

The general result is that $E_{av}$ equals 1/2kT per degree of freedom

1 ev =11600 k°
By a 2-ev plasma we mean that kT=2ev or $E_{av}$=3 ev in three dimensions.
It is interesting that plasma can have several temperatures at the same time .it often happens that the ions and the electrons have separate different temperature $T_i$ and $T_e$

# DEBY SHIELDING :

A fundamental characteristic of the behaviour of a plasma its ability to shield out electric potentials that are applied to it. Suppose we tried to put an electric field inside a plasma by inserting two charged balls connected to a battery. The balls would attract particles of the opposite charge, and almost immediately a cloud of ions would surround the negative ball and a cloud of

electrons would surround the positive ball. if the plasma were cold and there were no thermal motions, there would be just as many charges in the cloud as in the ball; the shielding would be perfect, and no electric field would be present in the body of the plasma out side of clouds.
Let us compute the approximate thickness of such a charge cloud.

Poisons equation in one dimension is

**Poisson`s Equation** $\Delta^2 \Phi = \frac{d^2 \Phi}{dx^2} = -\frac{e}{\varepsilon_o}(n_i - n_e)$ **(z=1)**

**Electron Density ne = $n_\infty$ exp(eφ/$KT_e$.)**

$$\frac{d^2 \Phi}{dx^2} = \frac{en}{\varepsilon_o}[\exp(e \Phi / KT_e) - 1]$$

We can expand the exponential in a Taylor series

$$\frac{d^2 \Phi}{dx^2} = \frac{en_\infty}{\varepsilon_o}[\frac{e\Phi}{KT_e} + \frac{1}{2}(\frac{e\Phi}{KT_E})^2 + \ldots$$

Keeping only the linear terms

$$\frac{d^2 \Phi}{dx^2} = \frac{n_\infty e^2}{\varepsilon_\circ KT} \Phi$$

$$l_D = (\frac{e_\circ KT}{ne^2})^{1/2}$$

The quantity $\lambda_D$ , called the debye length ,is a measure of the shielding distance or thickness of the sheath.we can also write the debye length as

$$\lambda_D = 6.9 (T/n)^{1/2} \quad \text{cm} \quad , T \text{ in } k°$$

$$\lambda_D = 740 (KT/n)^{1/2} \text{ cm}, \quad KT \text{ in ev}$$

as the density is increased , $\lambda_D$ decreases ,
as KT increase $\lambda_D$ is increased
if the dimensions of a system are much larger than $\lambda_D$ ,than whenever local concentrations of charge arise or external potentials are introduced into the system ,these are shielded out in a distance short compared with L, leaving the bulk of the plasma free of large electric potentials or fields. out side of the sheath on the wall o on an obstacle , $\Phi$ is very small, and $n_i$ is equal to $n_e$, typically ,to better than one part in $10^6$ . It takes only a small charge imbalance to give rise to potentials of the order of KT/e . The plasma is (quasineutral ); that is ,neutral enough so that one car take $n_i \approx n_e \approx n$ ,where n is a common density called the plasma density ,but not so neutral that all the interesting electromagnetic forces vanish.
Debye sphere

$$N_D = n \, 4/3\pi \, \lambda_D^3$$

Which is a sphere of radius debye length

# The plasma frequency:

The fact that plasma particles behave collectively means that plasmas can support a wide variety of wave motions and oscillations. One such basic oscillation arises if a group of electrons is slightly displaced from their equilibrium positions. The displaced electrons feel an electrostatic force seeking to return them to their equilibrium positions but upon arrival there they now have a kinetic energy equal to the potential energy of their initial displacement. The electrons overshoot, reconvert their kinetic energy to potential energy and a simple oscillation is set up. The frequency of this fundamental oscillation is known as the *plasma frequency* and is defined by

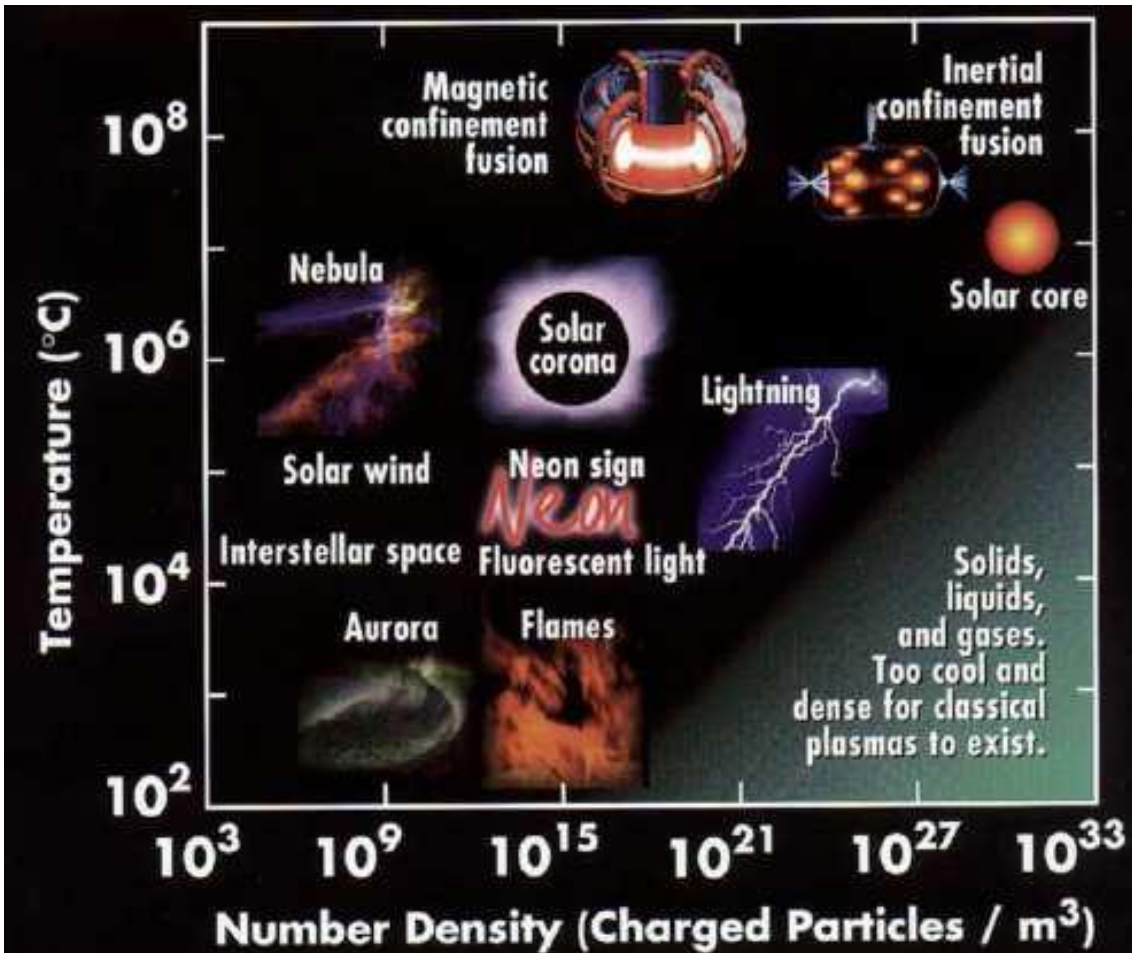
$$\omega_p = \left( \frac{ne^2}{\epsilon_0 m_e} \right)^{1/2},$$

where *n* is the mean plasma density and m is the electron mass.

# Criteria for plasmas:

**1- $\lambda_D \ll L$**
**2- $N_D \gg 1$**
**3- $W\tau \rangle 1$**

Where w is the frequency of plasma oscillations and $\tau$ is the mean time between collisions with neutral atoms,



# الفصل الثاني

## حركة الجسم المشحون في المجالات الكهرومغناطيسية

من الطرق المتبعة في معالجة مسائل البلازما رياضيا تعتمد على دراسة الجسيم المشحون المنفرد. تتواجد البلازما في مجالات كهربائية ومغناطيسية دائما، وهذة المجالات إما إن تكون مسلطة على البلازما من الخارج لأجل احتواء البلازما وتسخينها، أو تتولد داخليا في البلازما بفعل تأثير حركة الجسيمات بعضها على البعض الأخر وتفاعلها مع المجالات المسلطة عليها داخليا نتيجة الجسيمات المشحونة الأخرى، لذلك فأن من الضروري معرفة طبيعة التأثيرات التي تحدث على حركة الجسيم وبالتالي التأثيرات التي تحدث في البلازما ككل نتيجة لوجود هذة المجالات.

١-مجال مغناطيسي منتظم ( B )

الجسيم المشحون عند تواجده داخل مجال مغناطيسي فأنة يتخذ مسار دائري ان القوة المؤثرة هي قوة مغناطيسية وتكون معادلة الحركة كأتي

$$m\frac{dv}{dt} = qv \times B$$

ليكن المجال المغناطيسي في أتجاة Z
عند أخذ مركبات القوة باتجاة X,Y

$$mv_x = qBv_y$$
$$mv_y = -qBv_x$$

$$v_x = \frac{qB}{m}v_x$$
$$v_x = -\left(\frac{qB}{m}\right)^2 v_x$$
$$v_y = -\frac{qB}{m}v_x$$
$$v_y = -\left(\frac{qB}{m}\right)^2 v_y$$

وهذة المعادلات تصف حركة متذبذب توافقي بسيط له تردد هو

$$w_c = -\frac{qB}{m}$$ Cyclotron frequency

أن حل المعادلات السابقة يكون

$$v_{x,y} = v_\perp \exp(\pm i w_c t + i d_{x,y})$$ أن الإشارة± تدل على نوع الشحنة

واعتماد على مقدار فرق الطور(δ) يمكن كتابة المعادلة بصوره أخرى

$$v_x = v_\perp e^{i w_c t} = x$$

حيث تمثل $v_\perp$ مقدار موجب هو الانطلاق ويكون عموديا على اتجاه المجال المغناطيسي وبالتالي يمكن الحصول السرعة الصادية

$$v_y = \frac{m}{qB} v_x = \mathbf{m} \frac{1}{w_c} v_x = \pm i v_\perp e^{i w_c t} = y$$

$$x - x_0 = -i \frac{v_\perp}{w_c} e^{i w_c t}$$

$$y - y_0 = \pm \frac{v_\perp}{w_c} e^{i w_c t}$$

$$r_L = \frac{V_\perp}{w_C} = \frac{m v_\perp}{qB}$$

$$x - x_0 = r_L \sin w_c t$$

$$y - y_0 = r_L \cos w_c t$$

$r_L$ is Larmor radius

وهذة المعادلات تصف مدار دائري . وان هنالك مركز للدوران يقوم الجسيم بالتفاف حوله وهذا المركز يسمى مركز الدلالة (guiding center)
اتجاة الدوران يكون بحيث ان المجال المتولد من دوران الجسيم المشحون يكون باتجاه معاكس للمجال الخارجي المسلط أي ان جسيمات البلازما تعمل على تقليل المجال المغناطيسي المسلط عليها وبهذا تكون البلازما تمتلك خاصية المواد الدايا مغناطيسية

٢- وجود مجال مغناطيسي وكهربائي

عند تسليط مجال كهربائي إضافة الى المجال المغناطيسي فان الحركة ستكون مجموع التأثيرين أي ستكون حركة دائرية إضافة الى الانجراف بسب المجال الكهربائي

ليكن المجال الكهربائي يقع في المستوي (x-z)

$$m\frac{dv}{dt} = q(E + v \times B)v_z$$

$$\frac{dv_z}{dt} = \frac{q}{m}E_Z$$

$$v_z = \frac{qE_Z}{m}t + v_{z0}$$

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{q}{m}E_x \pm w_c v_y$$

$$\frac{dv_y}{dt} = 0 \mp w_c v_x$$

$$v_x = -w_c{}^2 v_x$$

$$v_y = \mp w_c(\frac{q}{m}E_x \pm w_c v_y) = -w_c{}^2(v_x + \frac{E_x}{B})$$

$$v_x = v_\perp e^{iw_c t}$$

$$v_y = \pm i v_\perp e^{iw_c t} - \frac{E_x}{B}$$

$$v_E = \frac{E(V/m)}{B(tesla)}\frac{m}{\sec}$$

هذة السرعة هي سرعة انجراف مركز التدوير وهي لا تعتمد على الشحنة ولا الكتلة والانطلاق. من ملاحظة الشكل نرى اختلاف قطر الدوران وتفسير ذلك أنة في النصف الأول من الدوران الايون يكتسب طاقة من المجال الكهربائي وبهذا يزداد انطلاقة وبالتالي نصف قطر دورانه لكن عند النصف الثاني يفقد طاقته ويقل انطلاقة ونصف قطر دورانه هذا الاختلاف في مقدار نصف القطر في نصف الأول والثاني من الدوران يودي الى الانجراف . في حالة الإلكترون السالب الذي يدور عكس الايون الموجب فأنة يحدث له نفس الشى لكن عكس الحالة فانة يفقد في الوقت الذي يكتسب الايون الموجب الطاقة لكن اتجاه الانجراف يكون نفس الاتجاه.
الجسيمات التي لها نفس الانطلاق لكنها تختلف في الكتلة يكون نصف قطر دورانها مختلف فالجسيم الذي كتلته قليلة يكون نصف قطر دورانه صغير وبالتالي انجرافه قليل
٣- تأثير المجال الأرضي
يمكن اعتبار القوة الخارجية هي قوة الجذب الارضي وهي تساوي حاصل ضرب الكتلة في التعجيل الأرضي والذي يكون دائما باتجاه محدد وهو نحو مركز الارض وبالتالي يمكن كتابة معادلة الحركة بالشكل الاتي

$$F = mg$$
$$F = qv \times B$$
$$v = \frac{F \times B}{qB^2}$$
$$v_g = \frac{mg \times B}{qB^2}$$
$$J = n(M+m)\frac{g \times B}{B^2}$$

ان السرعة الانجرافية بسب الجذب الارضي تشبه السرعة الانجرافية بسب المجال الكهربائي لكنها تختلف في انها تعتمد على نوع الشحنة. حيث ان الانجراف يكون بالنسبة للايون بعكس إلكترون وكلاهما عكس اتجاة التعجيل الارضي

٤- المجال المغناطيسي الغير منتظم GradB Drift B⊥B

في هذة الحالة خطوط الفيض المغناطيسي مستقيمة لكن كثافتها تزداد الانحدار في المجال المغناطيسي يودي الى ان يكون نصف قطر لارمر كبير في أسفل الدوران وصغير في الأعلى وهذا يودي الى الانجراف ويكون الإلكترون والايون متعاكسين وتكون السرعة الانجرافية لمركز التدوير

$$v_{\nabla B} = \pm\frac{1}{2}v_{\perp}r_L\frac{B \times \nabla B}{B^2}$$

ان النصف الذي يظهر في المعادلة ناتج من المعدل والإشارة تعتمد على نوع الشحنة هذة السرعة تدعى الانجرافية بسب التدرج في المجال المغناطيسي ويكون الايون والإلكترون متعاكسين وعموديا على المجال المغناطيسي

## ٥- المجال المغناطيسي المنحني

خطوط المجال المغناطيسي منحنية (ليست مستقيمة) وشدة المجال ثابتة
ان مركز التدوير سوف ينجرف باتجاه عمودي على المماس لخطوط لمجال أي تكون هنالك قوة مركزية وتكون السرعة

$$v_R = \frac{F \times B}{qB^2}$$

$$v_R = \frac{mv^2}{qB^2} \frac{R_C \times B}{R_c^{\ 2}}$$

$$v_R + v_{\nabla B} = \frac{m}{q} \frac{R_C \times B}{R^2_C \ B^2} [v^2 + \frac{1}{2} v^2{}_{\perp}]$$

## ٦-المرايا المغناطيسية

في هذة الحالة المجال المغناطيسي باتجاة محدد وهو متغير بالمقدار على طول امتداده أي ان خطوط المجال المغناطيسي تتوسع وتنفرج

$$m = \frac{1l2mv_{\perp}^{2}}{B}$$

$$F_r = q(v_J B_Z - v_z B_q)$$

$$F_q = q(-v_r B_z + v_z B_r)$$

$$F_Z = q(vB_q - v_q B_R)$$

$$B_q = 0$$

$$F_z = \frac{1}{2} q v_q r(\frac{\partial B_z}{\partial z})$$

$$F_z = \mathbf{m}\frac{1}{2} q v_{\perp} r_L \frac{\partial B_z}{\partial z} = \mathbf{m}\frac{1}{2} q \frac{v_{\perp}^{2}}{w_c}\frac{\partial B_z}{\partial z}$$

$$F_Z = -\frac{1}{2}\frac{mv_{\perp}^{2}}{B}\frac{\partial B_z}{\partial z}$$

$$F_z = -m\frac{\partial B}{\partial S}$$

$$F_z = -m\nabla B$$

العزم المغناطيسي الناتج من مرور تيار قدرة ( l) في حلقة ذات مساحة A فأنة يساوي (Al) وفي حالة شحنة منفردة فان التيار يكون ناتج من شحنة q تدور خلال زمن قدر $\frac{w_c}{2p}$ لذا يكون التيار $l = \frac{qw_c}{2p}$

والمساحة $pr_L^{\ 2} = p\,\frac{v_\perp^{\ 2}}{w_c^{\ 2}}$

علية يكون العزم المغناطيسي

$$m = \frac{pv_\perp^{\ 2}}{w^2_c}\frac{qw_c}{2p} = \frac{1}{2}\frac{qv^2_\perp}{w_c}$$

$$m = \frac{1}{2}\frac{mv_\perp^{\ 2}}{B}$$

عندما تتحرك شحنة نحو منطقة مجال مغناطيسي ذو شدة عالية او قليلة فان نصف قطر لارمر سوف يتغير لكن العزم المغناطيسي لا يتغير لاجل اثبات ذلك سوف نكتب معادلة الحركة باتجاه B

$$m\frac{dv}{dt} = -m\frac{dB}{ds}$$

$$mv\frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt}(\frac{1}{2}mv^2) = -m\frac{\partial B}{\partial s}\frac{ds}{dt}$$

ان طاقة الجسيم تكون محفوظة أي ان $\frac{d}{ds}(\frac{1}{2}mv^2) = -m\frac{dB}{dt}$

$$\frac{d}{dt}(\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}mv^2) = 0$$

$$\frac{d}{dt}(\frac{1}{2}mv^2 + mB) = 0$$

$$-m\frac{dB}{dt} + \frac{d}{dt}mB = 0$$

$$\frac{dm}{dt} = 0$$

عدم التغاير في العزم المغناطيسي يعتبر من الاسسس المهمة في موضوع حصر البلازما ( المرايا المغناطيسية). عند حركة الجسيم المشحون من منطقة مجال مغناطيسي ضعيف الى منطقة مجال مغناطيسي قوي فأنة يودي الى زيادة السرعة العمودية($v_\perp$) لأجل الإبقاء على قيمة ($\mu$) ثابتة والطاقة الكلية يجب ان تبقى محفوظة لذا فان السرعة الموازية يتطلب ان تكون قليلة . اذا كان المجال المغناطيسي عالي الشدة في نهاية الحركة فان السرعة الموازية تصبح مساوية الى الصفر وبالتالي تكون المركبة العمودية للسرعة اعظم ما يمكن ويؤدي ذلك الى انعكاس في حركة الجسيم ويعود الى الاتجاة السابق أي الى منطقة المجال المغناطيسي الضعيف.
يمكن الحصول على مجال مغناطيسي غير منتظم بواسطة زوج من الملفات توضع حول البلازما بحيث شدة المجال المغناطيسي في النهايات اكبر مما في الوسط وبهذه الطريقة يمكن احتواء البلازما. وعملية الحصر تكون في حالة الإلكترون والايون.
فلو فرضنا ان المجال المغناطيسي في الوسط هو($B_\circ$ ) وعند النهايات هو ( $B_m$ ) والسرعة العمودية عند الوسط ( $v_{\perp\circ}$ ) وعند النهايات ( $v_{\perp m}$ ) فان عد م التغاير في العزم المغناطيسي يعني

$$\frac{\frac{1}{2}mv_{\perp 0}^{\ 2}}{B_0} = \frac{\frac{1}{2}mv_{\perp m}^{\ 2}}{B_0}$$

$$\frac{B_0}{B_m} = \frac{v_{\perp 0}^{\ 2}}{v_{\perp m}^{\ 2}}$$

$$\sin^2 q_m = \frac{B_0}{B_m}$$

$$\sin^2 q_m = \frac{1}{R_m}$$

حيث ($\theta$) زاوية الخطوة و($R_m$ ) تدعى نسبة المرايا والمعادلة الأخيرة تمثل مخروط يطلق علية مخروط الفقد. الجسيمات التي تقع ضمن مخروط الفقد لا يمكنها إن تبقى محتواة أي أنها تنفلت . إن مخروط الفقد لايعتمد على الشحنة ولا على الكتلة أي ان عملية الحصر تكون متساوية بغض النظر ان كانت الالكترونات او الايونات في حالة اهمال التصادم ام بوجود التصادم فان زاوية الخطوة تتغير . بصورة عامة الالكترونات تخسر بسهولة وذلك لان كتلتها قليلة ولها تردد تصادمي عالي.

٧-مجال كهربائي غير منتظم
المجال المغناطيسي والكهربائي غير منتظمان وليكن المجال الكهربائي يتغير على شكل دالة جيبية باتجاة المحور السيني
المجال الكهربائي يؤدي الى أنجراف الايون والالكترون بسرعة انجرافية تعطى من خلال العلاقة

$$v_E = \frac{E \times B}{B^2}\left(1 - \frac{1}{4}K^2 r_L{}^2\right)$$

هذة العلاقة توضح ان الايون يتصرف مع حالة الزيادة في المجال الكهربائي او نقصان وبالتالي ينجرف وان هذة السرعة تكون اقل من السرعة النجرافية عند وجود المجالين بصورة منتظمة في حالة تغير المجال الكهربائي بصورة خطية فان الايون يكون نصف دورة في حالة المجال القوي والنصف الخر عند المجال الضعيف .
نصف قطر لارمر لليون اكبر مما هو للالكترون

السرعة الانجرافية لاتعتمد على نوع الشحنة وعندما يحدث تجمع للشحنة فان المجال الكهربائي يعمل على فصل الالكترونات عن الايونات وبالتاي يتولد مجال كهربائي اخر وبهذة تتولد حالة الاستقرار الانجرافية
تأثير المجال الكهربائي الغير منتظم لة دور مهم عندما يكون (K) كبير

٨- المجال الكهربائي المتغير مع الزمن
المجال الكهربائي والمغناطيسي منتظمان لكن التغير مع الزمن
السرعة الانجرافية في هذة الحالة سوف تذبذب قليلا بتردد(W) ولها مركبة باتجاة المجال الكهربائي تدعى بسرعة الانجراف الاستقطابي و تكون هذة السرعة

$$v_p = \pm \frac{1}{w_c B} \frac{dE}{dt}$$

وهذه السرعة تكون معكوسة الاتجاه بالنسبة للإلكترون والايون لذا يكون هنالك تيار استقطابي مقدارة _(في حالة Z=1 )

$$J_P = ne(v_{ip} - v_{ep})$$

$$J_P = \frac{ne}{eB^2}(M - m)\frac{dE}{dt}$$

$$J_P = \frac{r}{B^2}\frac{dE}{dt}$$

$r$ mass density

والسبب لوجود هذا التيار الاستقطابي كما واضح من الشكل أعلاة ،عند وجود الايون في مجال مغنلطيسي اولا وفجأة تم تسليط مجال كهربائي علية فأن اول شى يحدث هو حركة الايون بأتجاة المجال الكهربائي وبالتالي سوف يتأثر بقوة لورنس ويتجة بحركتة نحو الاسفل لاواذا بقى المجال الكهربائى ثابت فأن السرعة فقط انجرافية بسب المجال الكهربائي ولاتوجد سرعة انجرافية استقطابية لكن اذا انعكس اتجاة المجال الكهربائي فسوف يحدث النجراف نحو اليسار وبالتالي تتولد السرعة النجرافية الستقطابية للحفاظ على القصور الذاتي ويحدث هذا عمد النصف الاول لكل دورة من الدوران ،هذا الستقطاب الذي يحدث في البلازما عند تسليط المجال الكهربائي المتغير نع الزمن هو مشابة للاستقطاب في المواد الصلبة وان ثنائية

القطب في حالة البلازما هي الايونات والالكترونات مفصولة بمسافة ($r_L$) لكن اليونات والالكترونات تتحرك لتحافظ على شبة التعادل

٩- المجال المغناطيسي المتغير مع الزمن

قوة لورنز تكون عمودية على السرعة . المجال المغناطيسي لايمكن ان يضيف طاقة للجسيمات المشحونة ، وبما ان البلازما لها سلوك المواد الدايا مغناطيسية وهذا يعنى ان العزم المغناطيسي لايتغير $dm = 0$

عند تغير شدة المجال المغناطيسي ، يتبع هذا توسع وتقلص في نصف قطر لارمر والجسم بالتالي يفقد ويكتسب طاقة والتبادل في الطاقة بين الجسيمات والمجال موضحة من خلال العلاقة اعلاة حيث ان عدم التغاير في العزم المغناطيسي تعود الى ان الفيض المغناطيسي خلال مدار لارمر هو ثابت .
والفيض المغناطيسي عبارة عن حاصل ضرب المجال المغناطيسي فى المساحة التى تكون على شكل دائرة لها نصف قطر لارمر

$$\Phi = BS = Bpr_L^{\ 2}$$

$$\Phi = Bp\,\frac{v_\perp^{\ 2}}{w_c^{\ 2}}$$

$$\Phi = Bp\,\frac{v_\perp^{\ 2} m^2}{q^2 B^2}$$

$$\Phi = \frac{2pm}{q^2}\,\frac{\frac{1}{2} m v_\perp^{\ 2}}{B}$$

$$\Phi = \frac{2pm}{q^2}\, m$$

من هذة المعادلة يكون الفيض المغناطيسي ثابت عند ثبوت العزم المغناطيسي هذة الخاصية تستخدم في تسخين البلازما وتدعى الانضغاط الاديباتيكي (adiabatic compression)

من الشكل تضخ البلازما في منطقة مابين المرايا المغناطيسية Aو B
والملفات A,B تولد مجال نبضي يؤدي الى زيادة في المجال المغناطيسي وتزداد السرعة العمودية والبلازما المسخنة تنتقل الى المنطقة C-D ونبضة اخرى في A تؤدي الى زيادة في نسبة المرايا . ثم تتبعها نبضة عند C,D لاجل زبادة الضغط وتسخين البلازما

الكواظم الثابتة ADIABTIC INVARIANTS

من المعروف في الميكانيك الكلاسيكي ان الحركة الدورية تكرر نفسها من حيث الموقع والزخم . اذا حدث تغير ولو بسيط فأن الحركة ليست دورية تامة وثابت الحركة لايتغير تدعى هذة الحالة الكواظم الثابتة وهذة العمليات هي على ثلاثة انواع

أ- الكاظم الثابت الاول

سبق وان عرفنا العزم المغناطيسي بأنة النسبة بين الطاقة الحركية الى مقدار شدة المجال المغناطيسي ولاحظنا ان هذة الكمية ثابتة.

خلال الحركة العزم المغناطيسي لايتغير مادام النسبة بين الشحنة الى الكتلة ثابتة .ان العزم المغناطيسي يكون غالبا ثابت حتى لو تغيرت شدة المجال المغناطيسي خلال فترة واحدة من الدوران وهنالك امثلة على ذلك

**الضخ المغناطيسي**

اذا تغير المجال المغناطيسي في حالة المرايا المغناطيسية تغير جيبيا فان السرعة العمودية للجسيمات سوف تتذبذب ولايوجد اكتساب للطاقة لكن عند حدوث التصادم فأن العزم المغناطيسي لايبقى ثابت وفي هذة الحالة تسخن البلازما

عمليا الجسيم الذي يعمل تصادم خلال الانظغاط يمكن ان ينقل جزء من طاقتة الدورانية الى طاقة انتقالية

بمعنى اخر تتم زيادة الطاقة الحركية للجسيم المشحون تدريجيا بواسطة زيادة شدة المجال المغناطيسي المسلط على البلازما

**التسخين الدوراني**

**لـو كـان المجـال المغناطيـسي يتذبـذب بتـردد $w_c$ فالمجـال** الكهربـائي المحتـث يكـون بـنفس الطـور مـع بعـض الجـسيمات ويعمـل علـى تعجيـل دورانهـا ، وفـي حالـةكون تـردد المجـال المغناطيـسي أقـل مـن التـردد الـسايكتروني ،فـان العـزم المغناطيسي لايبقى ثابت وبالتالي سوف تسخن البلازما

التقرن المغناطيسي

عند عكس اتجاة التيار الكهربائي في احدى ملفات الحصر المغناطيسي فانة تتولد القرنة المغناطيسية واضافة لهذا فان المريا الاعتيادية هنلك تقرن مغزلي حول المحور

البلازما التي تكون محصورة عن طريق تقرن المجال المغناطيسي لـة استقرارية عالية أفضل من المحصورة بالمرايا العادية ويكون مخروط الفقد اكبر

**الثابت الكظيم الثاني**

هنالك ثابت كظيم أخر ذا فائدة كبيرة في دراسة حركة الجسيمات المحصورة بين مرآتين مغناطيسيتين متحركتين وهذا الوضع هو ما يسمى بالا تغير أو الثابت الكظيم الطولي

$$J = \int_a^b v \, ds$$

حدود التكامل على مدى فترة كاملة لتحرك الجسيم بين المرأتين وعودته إلى نفس نقطة البداية المسافة بين المرأتين يجب ان تتغير بشكل بطئ مع الزمن

مراة مغناطيسية ثابتة

مرأة مغناطيسية متحركة

# الفصل الثالث

## البلازما كمائع

هنالك طريقة يمكن من خلالها دراسة الخواص الهيدروديناميكية للبلازما تحت تأثير المجلات المغناطيسية وهو التعامل مع البلازما على أنها مائع له جميع الخواص المعروفة للموائع إضافة إلى بعض الخواص الجديدة الأخرى التي تفرضها حقيقة إن البلازما مكونة من خليط من الايونات والالكترونات والذرات المتعادلة التي تتأثر خواص تصرفها لوجود المجالات المغناطيسية والكهربائية المؤثرة على هذا الخليط وهذا سوف يفرض بالضرورة ليس فقط إخضاع البلازما لقوانين الموائع( الهيدرودانميك) بل لمعادلات ماكسويل الكهرومغناطيسية في حالة البلازما الوضع معقد ولايمكن إن يوصف أو يعالج من خلال المجالين الكهربائي والمغناطيسي ولكن أيضا يحتاج لحساب الموقع وطبيعة حركة الجسيمات نفسها . لكن يجب ان تحل بثبات وهو وجود مجموعة من مسارات الجسيمات وتوزع المجال حيث ان الجسيمات نفسها تولد مجالها الخاص بها أثناء حركتها وهذا المجال سوف يودي إلى جعلها تأخذ المسار الفعلي لها وبالتالي يحتاج حل هذه المعادلات إدخال التأثير الزمني
ان بلازما ذات الكثافة ١٠ ايون- إلكترون لكل سم$^{٣}$ فهذا يعني لكل جسيم من هذه الجسيمات له مساره الخاص فان هذا يصعب متابعة حركة الجسم الواحد وبالتالي عدد كبير من معادلات الحركة.

لذا فان هنالك موديل لدراسة البلازما كمائع ندرس من خلاله البلازما ليس دقائق منفصلة ولكن حركة مجموعة من الدقائق تعتبر مائع وطبيعي في حالة البلازما فان هذا المائع يحتوي على شحنات كهربائية وفي المائع الاعتيادي التصادمات المستمرة تجعل الدقائق تتحرك جماعيا .
كذلك يمكن وصف والتعامل مع البلازما كغاز من خلال النظرية الحركية للغازات

**<u>معادلة الحركة للمائع</u>**

معادلات ماكسويل تخبرنا عن المجال المغناطيسي و الكهربائي لحالة البلازما ومن اجل حل هذه المعادلات يجب إن تكون هنالك معرفة لحالة البلازما وتأثرها بالمجالات المغناطيسية والكهربائية في حالة النظر إلى البلازما كمائع فان التغير هنالك نوعين من الموائع في هذه البلازما واحد لكل نوع من مكونات البلازما . بأبسط صورة عندما تكون البلازما من نوع واحد هو الايونات فأننا نحتاج إلى معادلتين للحركة واحدة للايونات الموجبة الشحنة ولآخر للالكترونات ذات الشحنة السالبة وفي حالة التأين الجزئي نحتاج إلى معادلة للذرات المتعادلة. المائع المتعادل يتأثر مع الايونات والالكترونات من التصادم . الالكترونات والايونات تتأثر مع بعض حتى بعدم وجود التصادم بسب تأثرها بالمجالات الكهربائية والمغناطيسية
معادلة الحركة للجسيم المنفرد

$$m\frac{dv}{dt} = q(E + v \times B)$$

عند إهمال تأثير التصادمات والحركة الناتجة من الحرارة فان جميع الجسيمات ضمن المائع تتحرك سويا ومتوسط السرعة (u) للجسيمات في مقطع معين هي نفسها كما لو كان الجسيم المنفرد ذو سرعة مقدارها(v)ومعادلة الحركة يمكن الحصول عليها بعد ضرب طرفي معادلة الحركة بالكثافة

$$mn\ \frac{du}{dt} = qn\ (E\ + u \times B\ )$$

وبالتالي ليس هنالك حد لظاهرة الانتقال بطريقة الحمل
إن المشتقة بالنسبة الزمن هي مأخوذة بالنسبة لحركة الجسيم في وسط معين
لأجل تحويل المتغيرات وجعلها ثابتة بالنسبة للمراقب
لتكن G(x,t) دالة لخصائص المائع بالنسبة لبعد واحد هو x وبالنسبة للزمن فان التغير لهذه الدالة بالنسبة للزمن لمراقب يتحرك مع المائع تكون كالأتي

$$\frac{dG_{(x,t)}}{dt} = \frac{dG}{dt} + \frac{dG}{dx}.\frac{dx}{dt} = \frac{dG}{dt} + u_x \frac{dG}{dx}$$

بالنسبة للحد الأول يمثل التغير في (G) في نقطة ثابتة في الفراغ والحد الثاني يمثل التغير في (G) للمراقب يتحرك مع المائع إلى موقع تتغير فيه G في حالة ثلاثة أبعاد تكون

$$\frac{dG}{dt} = \frac{\partial G}{\partial t} + (u.\nabla)G$$

تدعى هذه مشتقة التحميل
في حالة البلازما يمكن اعتبار( G) تمثل سرعة المائع ( u) فتصبح المعادلة الأولى

$$mn[\frac{\partial u}{\partial t} + (u.\nabla)u] = qn(E + u \times B)$$

**<u>الضغط</u>**

عند اخذ الحركة الحرارية بنظر الاعتبار فان القوة الناتجة من الضغط يجب إضافتها للطرف الأيمن من معادلة الحركة
هذه القوة تظهر من خلال الحركة العشوائية للجسيمات الداخلة والخارجة ضمن مقطع معين من المائع وهي لا تظهر عند اخذ معادلة الحركة

و ان الضغط يمكن أن يعرف من خلال المعادلة

$$P \equiv nKT$$

معادلة الحركة للمائع

$$mn[\frac{\partial u}{\partial t} + (u.\nabla)u] = qn(E + u \times B) - \nabla P$$

وفي حالة الايسوثيرمي

$$\nabla P = KT.\nabla n$$

**التصادم**

في حالة المائع المتعادل يكون تبادل الزخم أثناء التصادم والزخم المفقود خلال كل تصادم يتناسب مع السرعة النسبية$(u\text{-}u_{\circ})$ لو كان $\tau$ يمثل الزمن الحر بين كل تصادم تقريبا ثابت فيمكن كتابة القوة المحصلة بدلالة التغير في الزخم

فتكون معادلة الحركة

$$mn[\frac{\partial u}{\partial t} + (u \bullet \nabla)u] = qn(E + u \times B) - \nabla \bullet P - \frac{mn(u - u_{\circ})}{t}$$

في حالة احتواء البلازما على الالكترونات والايونات فقط فان جميع التصادمات تكون من نوع تصادم كولومبي
(بدون اتصال) بين الجسيمات المشحونة وهنالك نوعين من التصادمات :

(١) تصادمات بين الجسيمات المتشابهة مثل تصادم ايون –ايون أو إلكترون-إلكترون
(٢) تصادمات بين الجسيمات الغير متشابهة مثل تصادم ايون- إلكترون

لنأخذ مثلا تصادم بين الجسيمات متشابه كما موضح بالشكل ادناة عند حدوث تصادم مباشر فانه يؤدي إلى التغير في السرعة وبالتالي يؤدي إلى تغير في المسار ويبقى مركز التدوير في محلة.و إن مركز الكتل يبقى ساكن لهذا لسبب فان التصادم بين الجسيمات المتشابهة يؤدي إلى زيادة طفيفة في عملية الانتشار. وهذا يحدث مع الايون عند تصادمه مع الذرات المتعادلة أيضا حيث تكون السرعة النهائية للذرة المتعادلة غير ذات تأثير ويتحرك الايون بعيدا عن موقعة قبل التصادم. في حالة تصادم ايون – ايون لكل ايون يبتعد من منطقة التصادم هنالك ايون يقترب كنتيجة لهذا التصادم.

عند تصادم جسيمات متعاكسة في الشحنة يكون الوضع مختلف
إن الجسيمات سوف تستمر في الدوران حول خطوط القوة فان كلا مركز التدوير سوف يتحركان في نفس الاتجاه وبالتالي فان التصادم يؤدي إلى زيادة لعملية الانتشار ومع ذلك وبسب حفظ الزخم لكل تصادم فان معدل الانتشار يكون متشابه في حالة الايون والإلكترون
معادلات الحركة للمائع والتي تحتوي على تأثير التصادم للجسيمات المشحونة يمكن كتابتها بالشكل

$$Mn\frac{dv_i}{dt} = en(E + V_i \times B) - \nabla P_i + \nabla P_{ie}$$
$$mn\frac{dv_e}{dt} = -en(E + V_e \times B) - \nabla P_e + \nabla P_{ei}$$

ان الحدود $P_{ei}$ , $P_{ie}$ هي الربح بالزخم للايون عند تصادمه مع الإلكترون والعكس بالعكس
وحفظ الزخم يتطلب

$$P_{ie} = - P_{ei}$$

ويمكن كتابة $P_{ei}$ بدلالة التردد التصادمي (مقلوب $\tau$)

$$P_{ei} = mn(v_i - v_e)u_{ei}$$

وعلى اعتبار ان هذا التصادم هو تصادم كولومبي فان $P_{ei}$ يتناسب مع قوة كولومب والتي تتناسب مع مربع الشحمة وبالتالي فان $P_{ei}$ سوف يتناسب مع كثافة الالكترونات وكثافة الايونات المستطيرة والتي تكون مساوية لالكترونات بالنهاية فان$P_{ei}$ تتناسب مع السرعة النسبية للنوعين (الالكترونات والايونات) من هذا يمكن كتابة

$$P_{ei} = he^2n^2(v_i - v_e)$$

حيث$\eta$ هي ثابت التناسب وبالمقارنة مع المعادلة

$$P_{ei} = mn(v_i - v_e)u_{ei}$$

$$u_{ei} = \frac{ne^2}{m}h$$
$$= \frac{w_p{}^2}{4p}h$$

حيث $\eta$ هي المقاومة النوعية للبلازما (specific resistivity )

الانجراف الدايا مغناطيسي

(١) انجراف المائع عموديا على المجال المغناطيسي

كما معروف إن المائع متكون من عدد منته من الجسيمات لذا يتوقع انجراف عموديا على المجال المغناطيسي في حالة مراكز التدوير حصل فيها زحزحة يمكن كتابة معادلة الحركة نحصل

$$mn[\frac{\partial v}{\partial t}+(v\bullet\nabla)v]=qn(E+v\times B)-\nabla p$$

حل هذه المعادلة على اعتبار ان الانجراف بطئ مقارنة مع التردد الدوران

$$v_{\perp}=\frac{E\times B}{B^2}-\frac{\nabla P\times B}{qnB^2}$$

$$v_{\perp}\equiv v_E+v_D$$

$$v_E=\frac{E\times B}{B^2}\qquad \mathrm{E\times B\ drift}$$

$$\mathrm{v_D}\equiv-\frac{\nabla P\times B}{qnB^2}\qquad \mathrm{Diamagnetic\ drift}$$

والسرعة $\mathrm{V_D}$ تدعى انجراف الدايامغناطيسية وتكون عموديا على اتجاه الانحدار ان هذا الانجراف لا يعتمد على الكتلة

الالكترونات والايونات تنجرف معاكسة لبعضها وبالتالي هنالك تيار انجرافي دايمغناطيسي

$$j_D=ne(v_{Di}-v_{De})$$

$$j_D=(KT_i+KT_e)\frac{B\times\nabla n}{B^2}$$

(٢) انجراف المائع موازيا للمجال المغناطيسي

معادلة الحركة باتجاه z

$$mn[\frac{\partial v_z}{dt} + (v \bullet \nabla)v_z] = qnE_z - \frac{\partial p}{\partial z}$$

بعد إهمال الحدود المسئولة عن التوصيل

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{q}{m}E_Z - \frac{gKT_e}{mn}\frac{\partial n}{\partial z}$$

حيث $g = \frac{C_P}{C}$

تظهر هذه المعادلة ان المائع سوف يتعجل باتجاه B بتاثير القوة الالكتروستاتكية والانحدار بالضغط وعند

$$m \to 0$$
$$q \to -e$$
$$E = -\nabla\Phi$$
$$qE_Z = e\frac{\partial\Phi}{\partial z} = \frac{gKT_e}{n}\frac{\partial n}{\partial z}$$

الالكترونات أكثر تحركا والسعة الحرارية لها غير محدودة وفي حالة الايسوثيرمي $\gamma$=١

بعد إجراء التكامل نحصل

$$e\Phi = KT_e \ln n + C$$
$$n = n_0 \exp\frac{e\Phi}{KT_e}$$

وتدعى هذه علاقة بولتزمان للالكترونات
ان الالكترونات كتلتها قليلة وتتحرك بسرعة وتتعجل إلى طاقة عالية إذا كانت هنالك قوة مؤثرة .وعند حركة الالكترونات فإنها تترك خلفها منطقة فيها ايونات لذا فان انحدار الضغط والقوة الكهروستاتيكية سوف توازن هذا الوضع وتؤدي إلى علاقة بولتزمان.

المعادلات المغناطوهيدروديناميكية magnetohydrodynamics(MHD)

في حالة البلازما التامة التأين يمكن اعتبار البلازما مائع مكون من نوع واحد مثل سائل الزئبق لها كثافة كتلية $\rho$ وتوصيلة كهربائية $\frac{1}{h}$ وهناك مجموعة من المعادلات تدرس حالة البلازما تدعى(MHD) هذه المعادلات هي كل من معادلة الاستمرارية والزخم والطاقة وقانون اوم العام إضافة إلى معادلات ماكسويل ان هذه المعادلات هي

| | |
|---|---|
| الاستمرارية | $r^{\bullet} + r_{0}\nabla.u = 0$ |
| الزخم | $r_{0}u^{\bullet} = J \times B - \nabla P$ |
| قانون اوم | $J = s_{0}(E + u \times B)$ |
| ماكسويل | $\nabla \times E = -B^{\bullet}$ |
| | $\nabla \times B = m_{0}J$ |
| الطاقة | $\nabla P = u^{2}\nabla r$ |

ان حل هذه المعادلات يعتبر من مهام أية نظرية في فيزياء البلازما تحاول تفسير الظواهر والخواص عن طريق اعتبار البلازما مائع كهرومغناطيسي

الضغط المغناطيسي

عند تعويض قيمة كثافة التيار( j )من معادلة ماكسويل في معادلة الزخم ينتج

$$ru^{\circ} = \frac{1}{m_{0}}(\nabla \times B) \times B - \nabla P$$

وباستخدام المتطابقة الاتجاهية

$$\nabla \times B \times B = (B.\nabla)B - \frac{1}{2}\nabla B^{2}$$

نحصل على

$$ru^{\circ} = \frac{(B.\nabla)B}{m_{0}} - \nabla(P + \frac{B^{2}}{2m_{0}})$$

ان الحد $\frac{B^{2}}{2m_{0}}$ الذي يظهر هنا يسمى بحد الضغط المغناطيسي وذلك لأنة يلعب دور مهم يشابه تماما الدور الذي يلعبه الضغط

الاعتيادي بالنسبة للمانع لو فرضنا الآن ان البلازما في حالة توازن ستاتيكي اى إنها غير متحركة فان سرعة المائع ستكون صفر إضافة إلى ان تفاضل هذه السعة بالنسبة للزمن سيكون صفرا وبالتالي

$$\frac{(B.\nabla)B}{m_0} = \nabla(P + \frac{B^2}{2m_0})$$

وإذا افترضنا إضافة لذلك ان البلازما موجودة في مجال مغناطيسي منتظم اى ان خطوط المجال فيه متوازية كأن يكون هذا المجال ناتج من ملف لانهائي الطول فحاصل الضرب ( ) يساوي صفر وبذلك يكون

$$\nabla(P + \frac{B^2}{2m_0}) = 0$$

$$P + \frac{B^2}{2m_0} = \text{constant}$$

ان هذه النتيجة توفر تقدير لابأس بة لحساب شدة المجال المغناطيسي اللازم لاحتواء البلازما لأغراض مفاعلات
الاندماج حيث وفي الحالة المثالية سيكون الضغط الهيدروستاتيكي للبلازما نفسها خارج منطقة الاحتواء مساويا
للصفر وإذا افتر ضنا ان($B_\circ$ ) هو شدة المجال خارج منطقة الاحتواء وان (B) هي شدة المجال داخل البلازما فأن

$$P + \frac{B^2}{2m_0} = \frac{B_0^{\,2}}{2m_0}$$

وتعرف النسبة بين ضغط البلازما والضغط المغناطيسي الناتج عن المجال بمعامل بيتا($\beta$)

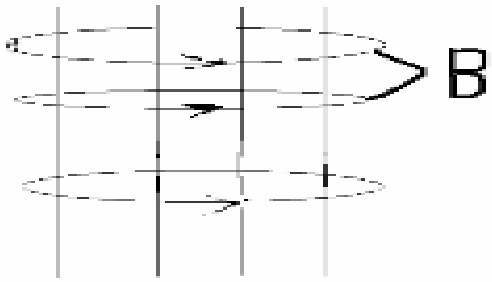
$$b = \frac{particle \text{ pressure}}{\text{magnetic field pressure}}$$

$$b = \frac{\sum nKT}{B^2 / 2m_0}$$

نلاحظ ان قيمة هذه النسبة ستكون محصورة بين الصفر والواحد لان شدة المجال المغناطيسي داخل البلازما ستكون دائما اقل من شدته خارجها وذلك بسب قيام الشحنات المنفردة في البلازما بتوليد عزوم مغناطيسية تأخذ اتجاها مجتمعا معاكسا للمجال المغناطيسي المسلط على البلازما

## ظاهرة التقلص Pinch effect

من تطبيقات المعادلة السابقة هو في ميدان احتواء البلازما لأغراض إحداث الاندماج النووي وتعتمد هذه الطريقة على إمرار تيار كهربائي طولي في البلازما ويؤدي هذا التيار إلى توليد خطوط مجال مغناطيسي دائرية الشكل حول خط اتجاه سير التيار كما نبين في الشكل ادناة




الحاويات المغناطيسية الحلقية

ان احتواء البلازما باستخدام الضغط المغناطيسي الناتج عن تيار التفريغ في البلازما نفسها واجهت مشكلة انفلات البلازما المحصورة من منطقة نهاية أنبوب التفريغ وتم التغلب على هذه المشكلة بتحويل نموذج المجال اللانهائي الطول إلى شكل حلقي

الاحتواء باستخدام الترتيب الحلقي (التوكاماك)

من الممكن التعرف على طبيعة جهاز التوكاماك بواسطة معرفة معنى كلمة توكاماك باللغة الروسية والتي تعني حجرة مغناطيسية حلقية وتتضمن المواصفات الرئيسية لجهاز التوكاماك مايلي:

١- احتواء البلازما داخل وعاء مغناطيسي حلقي الشكل ينتج عن ملفات حلقية إضافة إلى ملفات المحولات لتوليد التيار المحتث في البلازما

٢ - حقن حزمة متعادلة لتسخين البلازما إلى درجة الحرارة المطلوبة

٣- يتحدد زمن الاحتراق بمقدار توفر المجال المغناطيسي في مركز مقطع الحلقة

٤- يجب استخدام نظام لإخراج الوقود المستعمل

يتكون الجهاز من حجرة فراغ حلقية الشكل يتولد فيها مجال مغناطيسي خطوطه بشكل دوائر ويتولد هذا المجال بواسطة نلف كهربائي خارجي ملفوف حول حجرة الفراغ ان وجود جسيمات البلازما المشحونة داخل مثل هذا المجال سيعرضها إلى حركات انجراف بسب وجود تقوس في المجال المغناطيسي إضافة إلى الحركة الدائرية الاعتيادية وستكون حركة انجراف كل من الايونات الموجبة والالكترونات السالبة في اتجاهات متعاكسة مما سيؤدي إلى انفصالها عن بعضها وتكوين مجالات كهربائية تؤدي إلى دفع كلا النوعين من الشحنات باتجاه جدار الحجرة وهذا أمر غير مرغوب فيه طبعا

الاحتواء باستخدام المرايا المغناطيسية

يتكون جهاز المرآة المغناطيسية في ابسط صورة من حجرة اسطوانية يلف حولها موصل حامل للتيار الكهربائي يقوم بتوليد المجال المغناطيسي المنتظم لغرض احتواء البلازما.ان جعل عدد اللفات لكل وحدة طول عند النهايات اكبر منة على مدى طول الملف يؤدي إلى تكوين مرايا مغناطيسية عند النهايات تحاول منع الجسيمات من الهرب.

ان الميزة الرئيسية لهذا النوع من الأجهزة هو انه يعمل عند الحالة المستقرة وبكثافة طاقة عالية ولكن العيب المهم الذي يعاني منة هو مشكلة انفلات البلازما خلال النهايات

# الفصل الرابع

# تحويل الطاقة بواسطة البلازما

احد التطبيقات المهمة للبلازما اعتمادها وسيلة في تحويل الإشكال الأخرى للطاقة الى طاقة كهربائية والتي يمكن اعتبارها من أكثر أشكال الطاقة ملائمة كأساس للحياة العصرية.

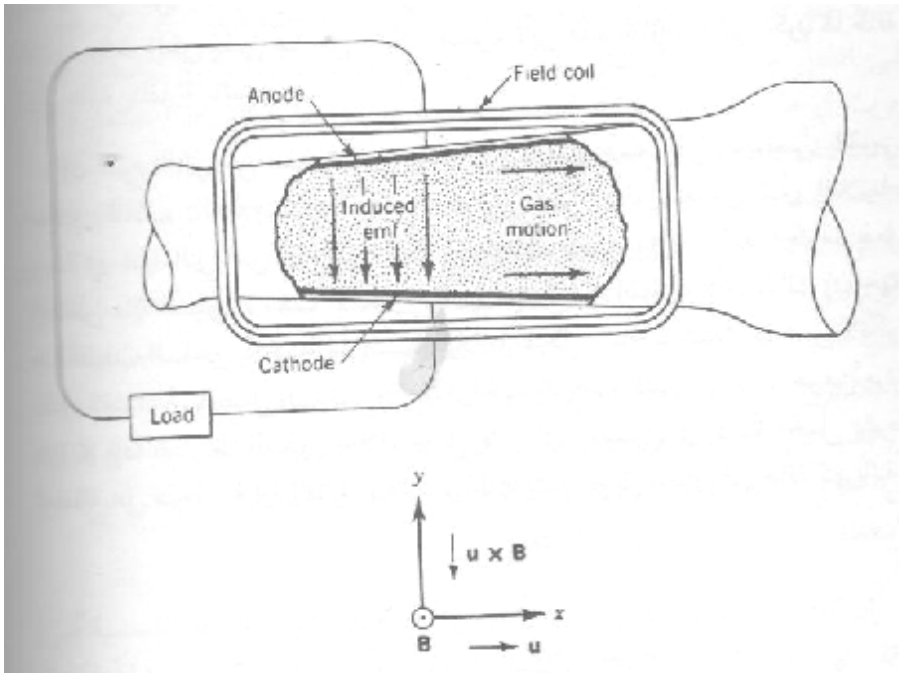
ومن اهم هذة الطرق في تحويل الطاقة هو ما يسمى بالمولد المغناطوهيدوديناميكي والذي يشابة في طريقة عملة الى المولد التوربيني الاعتيادي حيث يعتمد في عملة على ادخال البلازما الساخنة (المتعادلة تقريبا) الى مجال مغناطيسي عمودي على أتجاة حركتها ويقوم المجال بفصل الايونات عن الالكترونات لتتجة كل منها باتجاة قطب من الاقطاب وبذلك تتكون قوة دافعة كهربائية بين القطبين .

## المولد المغناطوهيدوديناميكي

والذي يتكون من أنبوب تجري داخلة الموائع العاملة الغازية ويقع الأنبوب داخل المجال المغناطيسي للملفات الخارجية ويوجد داخل الأنبوب قطبان احدهما أعلى والأخر أسفل الأنبوب ويتولد بين هذين القطبين قوة دافعة كهربائية تنتج عن حركة الغاز نفسه داخل المجال المغناطيسي يمكنها توليد تيار كهربائي في دائرة حمل خارجي.

أن استخدام جهاز كهذا في دورة حرارية تقليدية لا تختلف عن الدورات الحرارية العادية عدا كون درجات الحرارة عالية يمكن أن يؤدى إلى قيام الجهاز بوظيفتي كل من المحرك التوربيني والمولد في المولدات التقليدية

يوضح الشكل(١) رسم مبسط لمولد MHD




.

## ميكانيكية التأين ومعامل التوصيل النوعي للبلازما

هنالك نوعان من أنواع عمليات إحداث التأين في الغازات

الأولى هي التأين الحراري أو المتوازن والذي يمكن أحداثة ببساطة عن طريق تسخين الغاز. أما الطريقة الثانية فهي طريقة اللاتوازن كما يحدث خلال عمليات التفريغ الكهربائي في الغازات تحت الضغوط الواطئة.إن الطريقة الاولى اكثر ملائمة للاستخدام في احداث التأين الغازي في هذا النوع من المولدات

ان لمعظم الغازات المعروفة كالهواء واكاسيد الكاربون والغازات الخاملة طاقات تأين عالية نسبيا ولذلك فأنها لايمكن ان تتأين الا بعد وصولها الى درجات حرارة عالية ولكن وجد فعلا ان إضافة نسب قليلة من مواد ذات طاقات تأين واطئة كما في أبخرة الفلزات القلوية سيؤدي الى حصول على نسبة عالية من التأين في الغاز عند درجات حرارة اوطأ بكثير مما سيؤدي الى الحصول على نسبة عالية من التأين في الغاز عند درجات حرارة أوطأ بكثير مما هي الحالة بدون إضافة هذه الابخرة . ان خفض درجة الحرارة اللازمة للتأين يساعد بدرجة كبيرة في حل مشكلة توفير مادة البناء للمولد التي تستطيع تحمل هذة الدرجات.

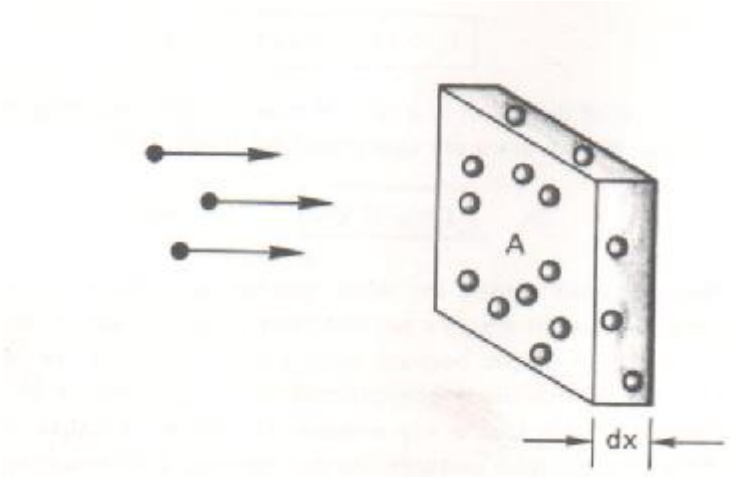
ان مقدار معامل التوصيل هو الذي يحدد مقدار المجال المغناطيسي وحجم المولد اللازم لتوليد مقدار معين من القدرة الكهربائية فاذا كان معامل التوصيل واطئا فان المولد يجب ان يكون كبير الحجم وفي حالة كهذة فان من المتوقع ان يحتاج المولد الى قدرة كبيرة للمحافظة على المجال المغناطيسي وبذلك تزداد مشاكل التبادل الحراري وخسارات الطاقة الاخرى وهذا كلة يؤدي الى زيادة كلفة صنع وتشغيل المولد.

ان السبب في عدم استخدام غازات نقية يعود بسب ان الذرات لها مساحة مقطع كبيرة جدا للتصادم مع الالكترونات ولذلك فان زيادة عدد هذة الذرات بنسبة كبيرة سيؤدي الى

الوصول الى مرحلة معينة يكون فيها معدل انخفاض السرعة المؤثرة للالكترونات اكبر من معدل زيادة عددها ولذلك فان معامل التوصيل سيبدأ بالانخفاض. ان الحصول على اعلى توصيل يتم عادة عندما تكون نسبة تركيزا لغازات مساوية للنسبة بين مساحات مقاطع ذراتها تجاة الالكترونات.

## التصادم :

عند أصدام الإلكترون بذرة متعادلة فمن المحتمل ان يفقد جزء من زخمة ، ويعتمد هذا الجزء المفقود من الزخم على الزاوية التي يحدث بها التصادم . عند تصادم رأسي مع ذرة ثقيلة فقد يفقد الالكترون اغلب زخمة وبالتالي اتجاة سرعتة ينعكس . احتمالية فقدان الزخم يمكن تمثيلها بدلالة مساحة المقطع العرضي ($\sigma$ ) الذي يمثل امتصاص الذرة للزخم



الشكل يوضح الكترونات تسقط على شريحة ذات مساحة A ولها سمك ( dx) وتحتوي على ($n_n$ ) من الذرات المتعادلة لوحدة الحجم . والالكترونات عند دخولها ضمن مساحة مقطع عرضي (σ) فأنها تفقد زخمها

عدد الذرات في هذة الشريحة

$$n_nAdx$$

والجزء الذى يحوي هذة الذرات يكون

$$\frac{n_n A s dx}{A} = n_n s dx$$

فأذا كان فيض من الالكترونات ( Γ) يسقط على هذة الشريحة فأن الخزء الذي ينفذ من الطرف الاخر يكون

$$\Gamma = \Gamma - \Gamma n_n s dx$$

$$\frac{d\Gamma}{dx} = -n_n s \Gamma$$

$$\Gamma = \Gamma_0 e^{-n_n s x}$$

$$\Gamma = \Gamma_0 e^{-x/l_m}$$

حيث ان $\lambda_m$ معدل المسار الحر =

وتمثل المسافة التي تصل فيها قيمة الفيض الساقط الى من قيمتها الابتدائية

عند مسافة $\lambda_m$ الجسيم لة احتمالية عالية لحدوث التصادم . ومعدل الزمن بين تصادمين لجسيم لة انطلاق v يعطي

ومعدل التردد للتصادمات يكون

وعند اخذ توزيع ماكسويل للسرع يمكن ان يعرف هذا التردد ( التردد التصادمي )

$$u = n_n s v$$

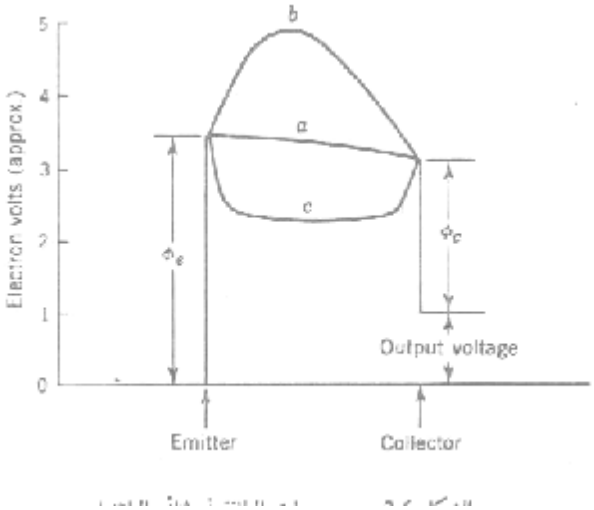
## مولد ثنائي البلازما :

هو عبارة عن قطبين قريبين من بعضهما يكون الاول وهو الباعث في درجة حرارة عالية في حين يكون الثاني وهو الجامع في درجة حرارة واطئة مما يؤدي الى انبعاث الالكترونات من الباعث وانتقالها بين القطبين الى الجامع بحيث تتحول طاقتها الحركية ( المتولدة من الحرارة )

الى طاقة كهربائية في الدائرة الخارجية للثنائي .

وهو في الواقع عبارة عن الة حرارية تخضع لقوانين الثرموداينمك وتتحدد كفائتها في تحويل الطاقة حسب قانون دورة كارنو .

يمكن الاستعانة بالشكل لمعرفة عمل الثنائي




حيث تمثل $\Phi$ ، $\Phi$ هما دوال الشغل لكل من الباعث والجامع على التوالي في حين تمثل $V$ مقدار الفولتية المتولدة عبر القطبين في الجهاز وهذا يعني انة عند تشغيل الجهاز فان علينا ان نعطي للالكترونات في الباعث طاقة تزيد عن $\Phi$ لجعلها قادرة على الانفلات من الباعث حيث تتعرض هذة الالكتلرونات للسقوط خلال الجهد $\Phi$ على الجامع وبذلك يتبقى لنا الجهد $V$ لتشغيل الحمل الموجود في الدائرة الخارجية

هنالك عدة عوامل تؤدي الى خسارات في كفاءة تحويل هذة الطاقة واهم تلك العوامل :

انتقال الحرارة من الباعث الى الجامع مباشرة ، درجة الحرارة العالية

## الاندماج النووي:

يمكن اعتبار التفاعلات النووية الاندماجية التي تحدث في الشمس والنجوم الاخرى احد اهم الطرق التي قد تصبح في نهاية المطاف مسؤولة عن توفير معظم احتياجات الانسان من الطاقة في المستقبل

تأتي أهمية التفاعلات الاندماجية النووية كمصدر من مصادر توليد الطاقة من حقيقة ان الوقود اللازم لهذة التفاعلات يمكن ان يعتبر متوفرا ولفترة مستقبلية طويلة جدا بل وشبه لانهائية ذلك ان هذا النوع من التفاعلات يستخدم نظائر الهيدروجين وهما الديتريوم $H^2$ والتريتيوم $H^3$ كوقود اساسي . ولما كانت نسبة اليتريوم في هيدروجين ماء البحر هي ١:٦٥٠٠ فهذا يعني ان الديتريوم الموجود في مياة البحر والمحيطات سيكون كافيا لتشغيل مفاعلات الاندماج النووي التي ستلبي حاجة الانسان من الطاقة لعدة الالف من السنين وعلى الرغم من عدم توفير التريتيوم بكميات كبيرة في الطبيعة الا ان هذا لا يشكل اية مشكلة حيث ان اية مفاعلات نووية اندماجية سيكون بمقدورها توليد الكميات اللازمة لتشغيلها من هذا النظير من تفاعل النيوترونات المتولدة في المفاعل مع عنصر الليثيوم الوفير في الطبيعة

$$H^2 + H^3 \rightarrow He^4 + H^1 + 18.34 \quad Mev$$

المشكلة الرئسية في تحقيق تفاعل اندماجي هي ان النوى المتفاعلة يجب إن تقترب من بعضها البعض الى مسافة في حدود $10^{-14}m$ لكي يظهر تأثير القوى النووية القصيرة المدى.

وبما أن نوى الذرات تحمل شحنات موجبة فأنها تتنافر مع بعضها حسب قانون كولوم لذلك ولأجل التغلب على هذا التنافر الكهروستاتيكي والاقتراب إلى المسافة المطلوبة فأن من الضروري أن تكون الطاقة الحركية للنوى المتفاعلة مساوية أو اكبر من مقدار طاقة الجهد الكهربائي بين الشحنات المتنافرة عند تلك المسافة.

## قاعدة لوسن

ان الوصول الى درجة حرارة كافية لاحداث التفاعلات الاندماجية لايمثل شرطا كافيا لعمل مفاعل اندماجي نحصل منة على الطاقة

الشرط الذي يجب ان يتوفر في اى مفاعل اندماجي ناجح هو ان يقوم هذا المفاعل بانتاج اكبر كمية من الطاقة اكبر من تلك التي يستهلكها ويسمى هذا الشرط بقاعدة لوسن

لاجل معرفة القيود التي تفرضها هذة القاعدة على خواص البلازما المستخدمة في المفاعل لنفترض ان لدينا بلازما مكونة من خليط بنسب متساوية من الديتريوم والتريتيوم كثافة مقدارها n من الجسيمات لكل وحدة الحجم وعند درجة حرارة T ان هذا يعني وجود 2n من الالكترونات من هذة البلازما وعلى افتراض ان البلازما متعادلة كهربائيا

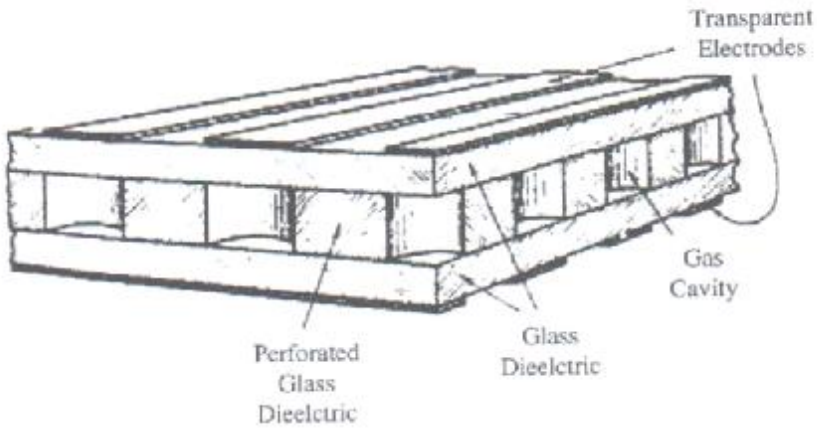
ان موازنة الطاقة لهذة البلازما تتطلب ان تكون مقدار الطاقة المتولدة من عمليات الاندماج مساويا على الاقل للطاقة المصروفة لرفع درجة حرارة١البلازما الى T أى ان

$$n\tau > 10^{14} \text{ cm}^{-3}\text{sec} \quad \text{for D-T}$$

ان هذة النتيجة تعني ببساطة ان علينا توليد بلازما عند درجة حرارة تزيد عن درجة حرارة الاتقاد والتي هي $50X10^6$ درجة مئوية لتفاعل DT وبكثافة كافية واحتواء هذة البلازما لفترة زمنية كافية $\tau$ بحيث يصبح حاصل الضرب $n\tau$ اكبر من $١٠^{١٤}$
ان هذا الشرط قد ادى الى دفع حركة البحوث في مجال المفاعلات الاندماجية باتجاهين ينصب الاول على زيادة زمن احتواء البلازما الى اكبر حد ممكن في حين يعمل الاتجاة الثاني على الحصول على كثافات عالية وان كان ذلك لفترات احتواء اقصر

## شاشات البلازما :

الشكل (أ ) يوضح اول نموذج للشاشة التى تم صنعها في جامعة Illinois والتي عبارة عن مجموعة متوازية من الاسلاك الرقيقة الموصلة التي تم ترسيبها على قاعدتين من الزجاج ومجموعة موصلة اخرى عمودية على كل واحدة.
المسافة الفاصلة مابين القاعدتين الزجاجيتين بحدود100μm
وهذه الفاصلة تملأ بغاز خامل وذو ضغط يقارب نصف الضغط الجوي وتسلط فولتية مناسبة مابين الاسلاك لأجل تأين الغاز.




الشكل (ا)

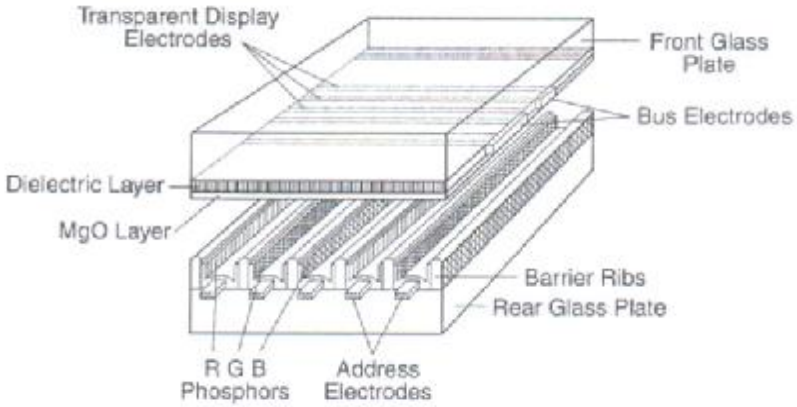
وبعد ذلك تم طرح للاسواق شاشة بلازما الغاز فيها صور الزينون والشكل (ب) يوضح هذا.

هذه الشاشات يمكن ان تعمل اما على AC أو DC

في حالة DC الغاز المستخدم يكون تماس مباشر مع الاقطاب والالكترونات المتولدة ضمن منطة التفريغ الكهربائي تتجه وتتحرك سريعا نحو الانود بينما الايونات تكون ابطئ في الحركة والانتقال الى الكاثود.

الفارق بين AC و DC هوفرق طفيف في حالة AC الاسلاك الموصلة تغطى بغشاء رقيق من العازل ويستخدم عادة اوكسيد الرصاص (PbO) والذي يمتلك ثابت عزل بحدود(15) ويكون سمكه بحدود (25μm) واغلب الشاشات التي تعمل ACيستخدم غشاء رقيق ذو سمك يتراوح (50 - 200μm) من مادة اوكسيد المغنسيوم MgO يعطى به PbO ويكون بتماس مباشر مع الغاز الفعال وهذا الازدواج بالاغشية العازلة يؤمن وظيفتين الاولى خزن الشحنة والانبعاث الالكتروني الثانوي .

الفولتية المطلوبة لأحداث تأين الغاز تعتمد على مقدار الفجوة وضغط الغاز ومقدار ما يضاف اليه.




الشكل(ب)