الجامعة التكنولوجية
قسم العلوم التطبيقية

محاضرات في فيزياء البلازما

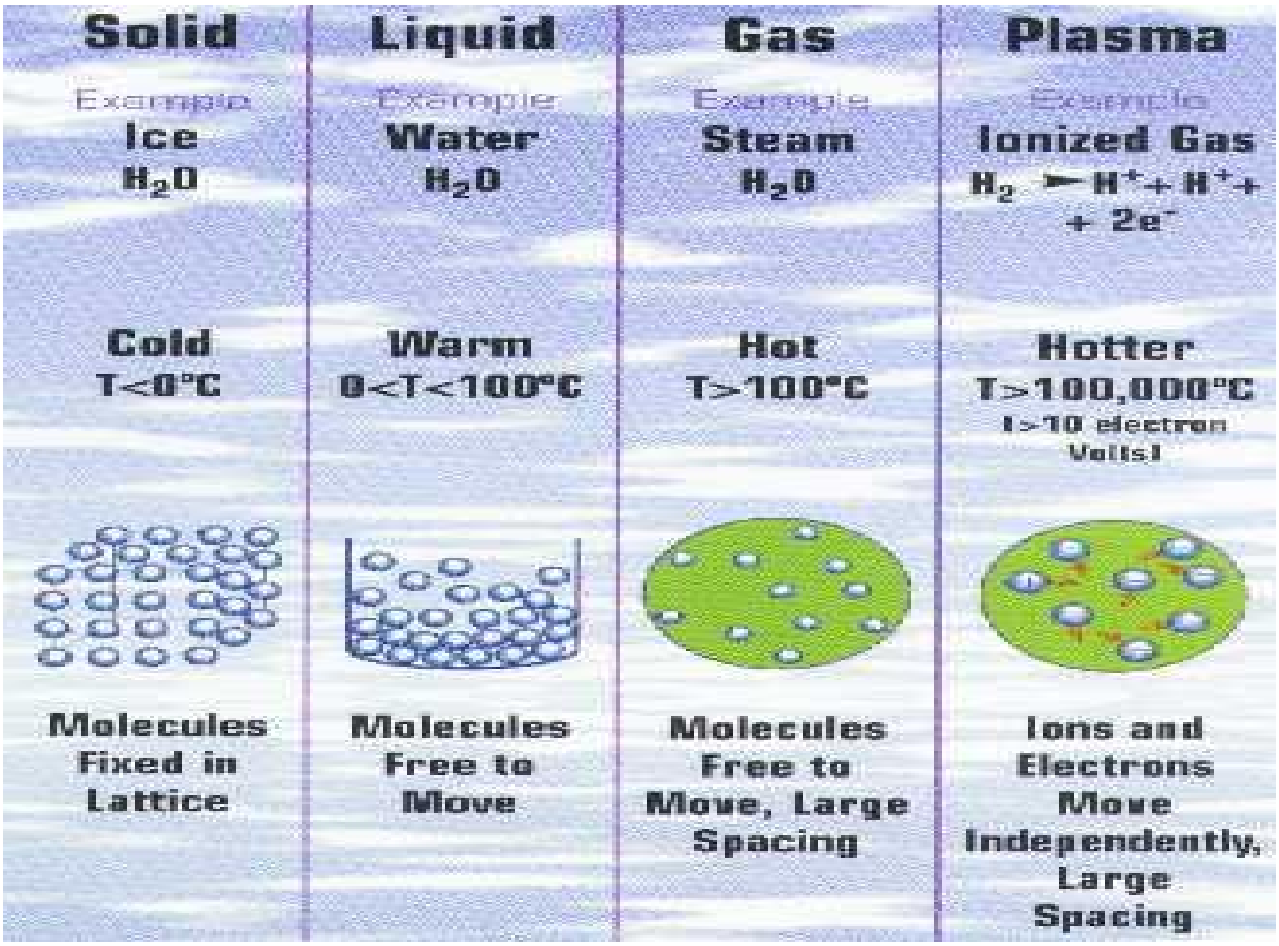
الدكتور رعد عزاوي الربيعي

الفصل الاول

المقدمة

وجود البلازما بالطبيعه

تتواجد البلازما بالكون المعلوم في اربعة عناصر اساسية كما وصفها الاغريق تاريخيا حيث ادعوا ان المادة هي تراب او ماء او هواء او نارا والجسم الصلب على هذا الاساس ترابا والسائل ماءا والغاز هواءا اما النار فهي في هذه الحالة يجب ان تكون البلازما. الاختلاف بين الحالات الأربعة يكمن في شدة الترابط بين الحسيمات المكونة لكل حالة ، فالجسم الصلب تكون قوة الترابط بين مكوناته قويه وفي السائل ضعيفه وفي الغاز معدومه تقريبا. عموما يمكن القول ان حالة المادة يعتمد على الطاقة الحركية الموضعية او الطاقة الحرارية للجسيمات لذلك فان في اية درجة حرارة معينة يكون التوازن بين الطاقة الحرارية لهذه الجسيمات وقوى الترابط الداخلي لها معيارا يمكن منه معرفة حالة المادة فالحديد يكون في الحالة الصلبة بدرجة ١٠٠ مئوي وسائل بدرجة ٥٠٠٠ وغاز بدرجة ١٠٠٠٠٠مئوي وهكذا



من الممكن تحويل الجسم الصلب الى سائل باضافة طاقة والتغلب على طاقة الربط بين الذرات او الجزيئات وهي الطاقة المسمات بالطاقة الكامنة للانصهار وكذلك تحويل السائل الى غاز وتعرف الطاقة اللازمة للتحول بالطاقة الكامنة للتبخر وفي الحالتين هي طاقة محددة لذلك فالتحول الى الحالة الصلبة او السائلة يحدث على شكل مراحل وحيث ان التعادل الكهربائي محفوظ في الدواخل والنواتج لذلك يعتبر هذين التحولين بالتحولات الطورية .

اما التحول الى حالة البلازما فيتم عند اضافة طاقة كافية لفصل الكترون الذرة عن نواتها وهي ما تعرف بطاقة التاين ويتم التاين جزئيا في الغاز عند توفر الطاقة اللازمة للتاين ويحدث ذلك تدريجيا . ونلاحظ هنا ان التحول يحدث من مكونات متعادلة كهرائيا الى مكونات مشحونة لذلك لايعتبر التحول الى حالة البلازما تحولا طوريا.

نسبة التاين ومعادلة ساها Saha equation

وهي معادلة تبين نسبة التاين المتوقعة لأي نوع من الغاز عند درجة حرارة معينة . حيث ان معادلة ساها تبين لنا النسبة بين الكثافة العددية للجسيمات المشحونة الى الكثافة العددية للجسيمات المتعادلة للغاز في حالة التوازن الحراري:-

$$\frac{n_i}{n_n} = 2.4\times10^{21}\,\frac{T^{\frac{3}{2}}}{n_i}\,EXP\,-(\frac{u_i}{KT})$$

حيث:

n_i: الكثافة العددية للجسيمات المشحونة لوحدة الحجم (m^{-3})

n_n: الكثافة العددية للجسيمات المتعادلة للغاز (m^{-3}).

n_i / n_n: نسبة التأين

T: درجة حرارة الغاز

K: ثابت بولتزمان

u_i: طاقة تأين الغاز (وهي الطاقة اللازمة لأزالة الكترون من الغلاف الخارجي للذرة)

وكمثال تطبيقي لفهم معادلة ساها في ظروف المختبر تكون :-

$$n_n = 3\times10^{25}\,m^{-3}$$

$$T = 27 + 273 = 300\,K^{\circ}$$

$$m_i = 14.5ev \Rightarrow 1ev = 1.6\times10^{-19}\,J$$

$$\therefore\ \frac{n_i}{n_n} \approx 10^{-122}$$

وهذه النسبة ضئيلة ولكنها موجودة في ظروف المختبر وفي ارتفاع درجة الحرارة تزداد النسبة بعد ان تتجاوز درجة الحرارة طاقة التأين وعندما تكون n_i اكبر بكثير من n_n تسمى البلازما متأينة كلياً ، وهذه الحالة هي التي جعلت تكون الأجسام الفلكية في حالة بلازما حيث يوجد الهيدروجين بدرجات حرارية عالية . ان تكون البلازما في هذه الظروف هي وراء تسميتها بالحالة الرابعة للمادة . ان البلازما هي الحالة الأكثر شيوعاً للمادة في الكون حيث ان 99% من المادة هي في حالة البلازما . ان معظم المادة الموجودة في الكون تكون في درجات حرارية عالية جداً بحيث تسمح لحدوث عمليات التأين لذرات المادة الكونية عند عمليات التصادم المستمرة

ملاحظات حول المعنى الفيزياوي لمعادلة ساها

- نسبة التاين تزداد كلما زادت درجة الحرارة .
- زيادة تكون الجسيمات المشحونة بارتفاع درجات الحرارة .
- نقصان الكثافة العددية للجسيمات المتعادلة بارتفاع درجات الحرارة.
- الزيادة في كثافة الجسيمات المشحونة تكون على حساب النقصان في الكثافة العددية للجسيمات المتعادلة وتكون هذه الزيادة مضطرده بارتفاع درجة الحرارة وتجاوزها طاقة التاين (وهذا سبب وجود Exp)

كيف نحصل على بلازما ؟

نحصل على بلازما بالتاين ويتم كما يلي : للحصول على بلازما كثيفة تنتج من تصادم الألكترونات والايونات بالذرات المتعادلة والذرات المتعادلة فيما بينها . اما للحصول على بلازما متخلخلة او قليلة التأين فيتم بواسطة ما يسمى التأين في المجالات الكهربائية او التأين بالأشعاع ذات الطاقة الكافية للتاين .

ملاحظات

- عكس عملية التأين هي عملية اعادة الأتحاد Recombination وتحصل فقط عند فقدان الطاقة من قبل الألكترونات.
- ان مثال البلازما في الحالة الغازية هي طبقة الأيونوسفير وفي الحالة الصلبة هي اشباه الموصلات وفي الحالة السائلة هي المحاليل الالكتروليتية .

مقارنة بين الغاز والبلازما :

١. البلازما والغاز لهما حجم كأي غاز حقيقي .
٢. درجة حرارة البلازما عالية مقارنة بدرجة حرارة الغاز .

٣. البلازما كالغازات تخضع للقانون العام للغازات .

٤. البلازما موصلة للكهربائية بينما الغازات رديئة التوصيل .

٥. البلازما تؤثر وتتأثر بالمجالات الكهرومغناطيسية حيث لاينفذ المجال المغناطيسي في البلازما إلا في حالة كون كثافة ودرجة الحرارة للبلازما قليلة ، في حين ان الغازات لاتتأثر بالمجالات المغناطيسية بأي كثافة .

٦. ان البلازما هي مادة دايا مغناطيسية اي انها تولد مجالاً مغناطيسياً عندما يسلط عليها مجال مغناطيسي خارجي . مقدار المغناطيسية التي تولدها تعتمد على كثافتها ودرجة حرارة مكوناتها .

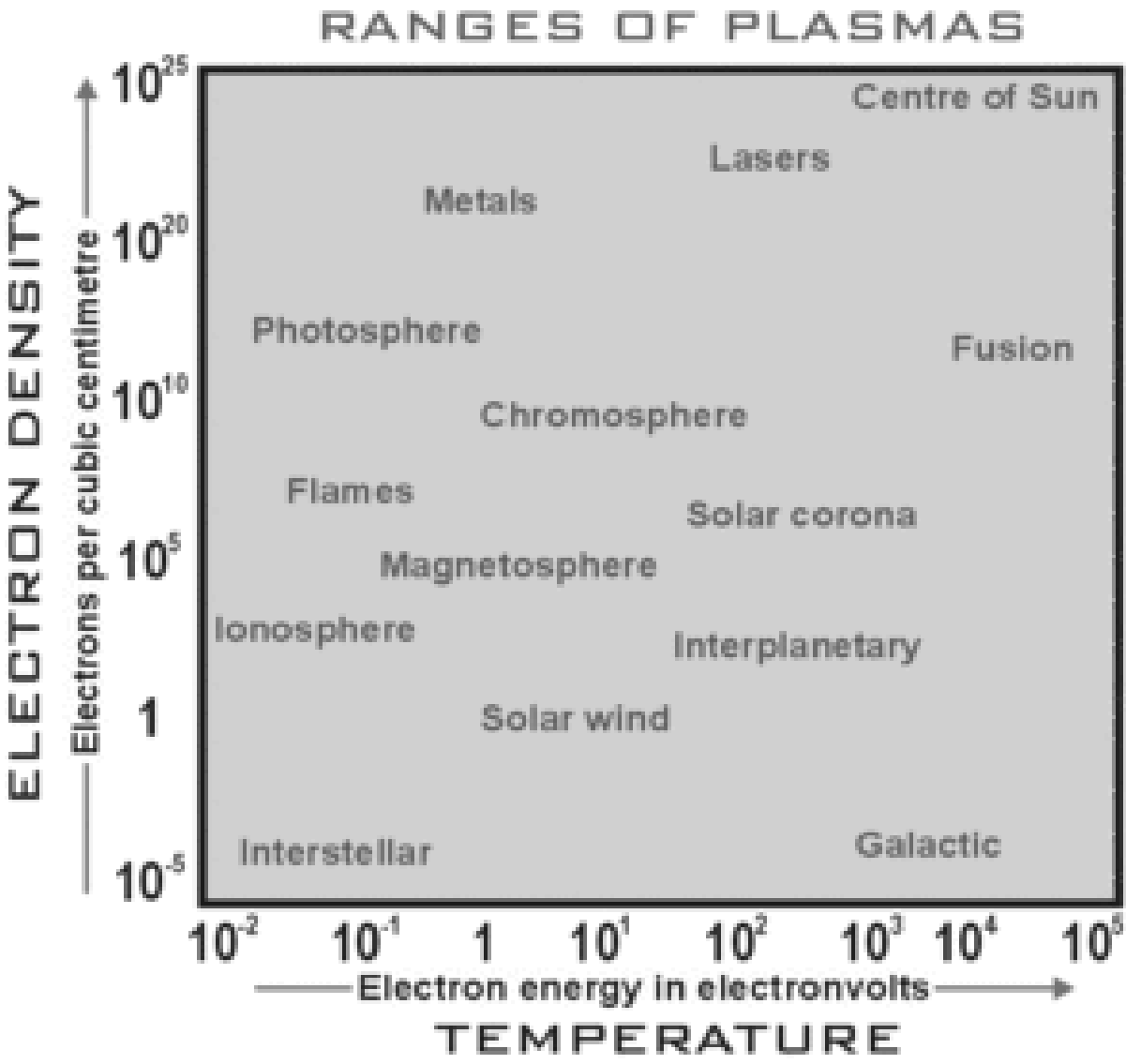
س/ احسب الكثافة بوحدات ١ لكل سم^{٣} لغاز مثالي في الظروف التالية :-

١) حرارة صفر مئوي وضغط ٧٦٠ ملم زئبق (١جو).

٢) في درجة حرارة الغرفة 27c وضغط 10^{-3} تور .

امثلة على البلازما :

Plasma being	Density(m^{-3})	Temp.(e.V)
Air at S.T.P	١٠^{٢٥}	(1/40)
Sun interior	١٠^{٢٨}	2000
Interstellar plasma	10^{4} - 610	1
Solar Corona	10^{12} - 1410	100
Ionosphere	10^{16}	0.1
Gas discharge	10^{20}	1


RANGES OF PLASMAS
ELECTRON DENSITY
Electrons per cubic centimetre
10^{25}
10^{20}
10^{10}
10^{5}
1
10^{-5}
Centre of Sun
Lasers
Metals
Photosphere
Fusion
Chromosphere
Flames
Solar corona
Magnetosphere
Ionosphere
Interplanetary
Solar wind
Interstellar
Galactic
10^{-2}
10^{-1}
1
10^{1}
10^{2}
10^{3}
10^{4}
10^{5}
Electron energy in electronvolts
TEMPERATURE

تعريف البلازما Plasma Definition

هي حالة المادة المكونة من الجسيمات المشحونة والمتعادلـــةعلى ان يكـــون المجمـــوع الجبـــري للشـــحنات الكهربائية يساوي صفرا والتي تتصرف جسيماتها تصرفاً جماعيا. عموما ان حالة البلازما هي حالة المادة أثناء وجودها بدرجة عالية من التأين اي عندما تتحول ذرات المادة هذه الى أيونات موجبة مع ألكترونات سالبة وهذا لا يعني ان تكون البلازما بحالة غاز متأين فقط حيث يمكن ان تكـــون البلازمـــا مـــن الحالـــة الصـــلبة (اشـــباه الموصلات) او الحالة السائلة (المحاليل الألكتروليتية) او الحالة الغازية (طبقة الأيونوسفير)

ان انتاج البلازما المختبرية يتم عادة بتسخين غاز ذو ضغط أقل من الضغط الجوي الأعتيادي للحد الذي تصبح فيه الطاقة الحركية لجزيئات هذا الغاز كافية لأحداث عملية التأين من خلال عمليات التصادم غير المرن فيما بينها ، وان طاقة تأين الذرات هي بحدود بضعة الكترون فولت ، ترجع كلمة البلازما لغوياً من اصل اغريقي ويعني المادة الجلاتينية ، وقد اطلق هذا الأسم العالم Longmuir ولايمكن ان نطلق كلمة بلازما على كل غاز متأين ، حيث يجب ان تتوفر شروط معينة في الغاز في ظروف معينة ويمكن تعريفها كما يأتي :-

(غاز شبه متعادل Quasineutal من الجسيمات المشحونة والمتعادلة والتي تتصرف (تسلك) سلوكاً جماعيا (Collective behavior

شبه التعادل Quasineutal

بغياب التأثير الخارجي تمتلك البلازما تعادل عياني وهذا يعني ان المجموع الجبري للجسيمات المشحونة تساوي صفر، وعند النظر بشكل مجهري نرى بأن البلازما تحتوي على نوعين من الجسيمات موجبة وسالبة وعند اختلاف هذا التعادل فان طاقة الجهد المرافق لقوة كولوم تتضاعف (تتضاخم) قياساً للطاقة الحركية للجسيمات بحيث ترجع الى الحالة الأصلية . ان التعادل العياني يعني البلازما تحافظ على تعادلها ومكوناتها مشحونة لذلك نسمي الحالة بشبه النعادل .

التصرف الجماعي للبلازما Collective behavior

في كل الغازات يكون التصادم بين الجسيمات (الجزيئات) هو العنصر الأساسي الذي يحدد حركة هذه الغازات ، فمثلاً الحركة الأهتزازية يمكن ان تنتقل كطاقة بالجو بواسطة التصادم بين الذرات او الجزيئات كأنتقال الصوت في الهواء اما في حالة البلازما فأن الحالة تختلف حيث ان البلازما تتكون من شحنات كهربائية بالأضافة الى الجسيمات المتعادلة حيث ان الشحنات تولد مجالات كهربائية وعند حركتها تولد تيارات كهربائية تنتج عنها مجالات مغناطيسية ، وهذه المجالات المغناطيسية بدورها تؤثر على الجسيمات نفسها وعلى الجسيمات البعيدة ايضاً. ان حركة جزء من البلازما في منطقة معينة يؤثر على جسيمات البلازما بمناطق بعيدة بواسطة التأثيرات الكهربائية والمغناطيسية لذا فأن البلازما العديمة التصادم تعتبر دراستها مهمة لحساب القوى الكهرومغناطيسية .ومن هنا يمكن تعريف التصرف الجماعي للبلازما بالشكل التالي :-

(ان حركة البلازما لاتعتمد فقط على الحالة المحلية فحسب وانما على حالة البلازما في المناطق البعيدة ايضاً)

ان ديناميكية الجسم في البلازما تتحكم به المجالات الذاتية الناشئة عن حركة الجسيمات الأخرى وان الجسم المشحون يحاط بمجال كهربائي ومتأثر ببقية الأجسام المشحونة طبقاً لقانون كولوم بأعتماده العكسي على مربع المسار الفاصل بينه وبين الجسيمات الأخرى ، بالأضافة الى المجال المغناطيسي المرافق للجسيم المشحون والذي ينتج عنه قوة تؤثر على بقية الجسيمات المشحونة وهذا ما يجعل قانون كولوم هو القانون الأساسي في حساب الخواص الأساسية للبلازما ويكون تأثير التصرف الجماعي واضح بشكل كبير في البلازما عديمة التصادم .

ملاحظة

ان المجال المغناطيسي يؤثر فقط على الجسيمات المشحونة المتحركة عمودياً وحسب العلاقة التالية $F = q (V \times B)$ كذلك فأن المجال المغناطيسي يؤثر على حركة الالكترونات بقدر مركبته العمودية .اما المجال الكهربائي يؤثر على الجسيمات الساكنة والمتحركة وهذا ما يجعل قانون كولوم القانون الأساسي لحساب ودراسة خواص البلازما .

مفهوم درجة حرارة البلازما:

من المفاهيم الفيزياوية المهمة في دراسة البلازما هو مفهوم درجة الحرارة ، وهي دالة تمثل درجات حرارة الجسيمات داخل حيز او في حيز معين ، ان اي غازفي حالة التوازن الحراري (Thermal equilibrium) تكون الجزيئات او الذرات في سرع مختلفة وفي كل الأتجاهات وان اقرب توزيع لهذه السرعة ممثلة بأعداد الجسيمات يمكن التعبير عنه بتوزيع ماكسويل في الفضاء (3D) اي بثلاث محاور للتبسيط نفرض ان حركة الغاز بمستوى واحد وربما هذا الأفتراض ليس صحيحاً بالنسبة بغاز ولكن يمكن افتراضه على البلازما بأعتبار وجودها في مجال مغناطيسي يجعلها تتحرك بمستوى واحد ، حيث يستطيع هذا المجال جعل حركة الألكترونات و الأيونات الموجبة بمستوى واحد وتوزيع ماكسويل في احداثي واحد يعطى بالعلاقة التالية :-

$$f(u) = A \exp\left(\frac{-\frac{1}{2} m u^2}{KT} \right)$$

f(u) تمثل عدد الجسيمات في المتر المكعب الواحد والتي سرعتها تتراوح بين ($u \rightarrow u + \Delta u$)

($1/2\ mu^2$) تمثل الطاقة الحركية للجسيمات و K ثابت بولتزمان ، اما A كمية ثابتة تسمى عمق التوزيع و تحددها درجة الحرارة.

$$A = n\left(\frac{m}{2pKT}\right)^{\frac{1}{2}}$$

لذل فان عدد الجسيمات لوحدة الحجم المكعب (الكثافة عددية)تاتي من تكامل دالة التوزيع وكما يلي:

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

لحساب معدل درجات الحرارة يجب حساب معدل الطاقة الحركية للجسيمات وكما يلي:

يعطى معدل الطاقةالحركية بالمعادلة

$$E_{av.} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} m u^{2} f(u)\,du}{\int_{-\infty}^{\infty} f(u)\,du}$$

لآيجاد معدل الطاقة الحركية نفرض ان :

$$KT = \frac{1}{2} m v_{th}^{2} \Rightarrow v_{th} = \left(\frac{2KT}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$y = \frac{u}{v_{th}} \Rightarrow u = v_{th}\, y \;\&\; du = v_{th}\, dy$$

$$\therefore\; f(u) = A\exp\left(-\frac{u^{2}}{v_{th}^{2}}\right)$$

$$E_{av} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} m y^{2} v_{th}^{2} A \exp(-y^{2}) v_{th}\, dy}{\int_{-\infty}^{\infty} A \exp(-y^{2}) v_{th}\, dy} = \frac{1}{2} m v_{th}^{2} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} y^{2} \exp(-y^{2})\, dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-y^{2})\, dy}$$

نكامل البسط بطريقة التجزئة

$$\int_{-\infty}^{\infty} y^{2} \exp(-y^{2})\, dy = \int u\,dv = uv - \int v\,du$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} y.\left[\exp(-y^{2})\right] y\,dy = \left[-\frac{1}{2}\left[\exp(-y^{2})\right] y\right]_{-\infty}^{\infty} - \int_{-\infty}^{\infty} -\frac{1}{2}\exp(-y^{2})\,dy$$

$$= 0 + \frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-y^2)\,dy$$

وبذلك يكون التكامل مع المقام

$$E_{av} = \frac{1}{2} m v_{th}^{\,2} \frac{\frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-y^2)\,dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-y^2)\,dy}$$

$$E_{av} = \frac{1}{4} m v_{th}^{\,2} = \frac{1}{2} KT$$

وفي حالة توسيع النتائج لتشمل المحاور الثلاثة يجب ان تكون (3D):

$$f(u,v,w) = A_3 \exp\left[-\frac{1}{2} m(u^2+v^2+w^2) \Big/ KT \right]$$

$$A_3 = n\left(\frac{m}{2pKT} \right)^{\frac{3}{2}}$$

يجب ان تكون هناك ثلاثة تكاملات لكل من (u, v, w):

$$E_{av} = \frac{\iiint_{-\infty}^{\infty} A_3 \frac{1}{2} m\left(u^2+v^2+w^2\right) \exp\left[-\frac{1}{2} m\left(u^2+v^2+w^2\right)/KT \right] du\,dv\,dw}{\iiint_{-\infty}^{\infty} A_3 \exp\left[-\frac{1}{2} m\left(u^2+v^2+w^2\right)/KT \right] du\,dv\,dw}$$

نتيجة هذه التكاملات سوف تؤدي الى

$$E_{av} = 3\left(\frac{1}{2} KT \right)$$

1/2 KT per degree of freedom

لكل درجة من درجات الحرية 1/2KT وهذا يعني ان معدل درجة الحرارة

ملاحظات :

- **طالما كل من E و T يعتمد احدهما على الاخر و K هو ثابت يمكن أعطاء درجة الحرارة وحدات طاقة .**
- **لو وضع e بين لوحين وسلط عليه (فولت) كم سيكتسب طاقة ؟**

KT = 1 e.V

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

احسب سرعة الألكترون بدرجة حرارة تساوي $1000c^0$؟

س/ البلازما هي المادة الوحيدة التي تحتوي على عدة درجات حرارة بنفس الوقت ؟

لأن كل من الأيونات و الألكترونات لهما درجات حرارة مختلفة T_e و T_i كذلك عند تسليط مجالا مغناطيسيا يكون للالكترونات $T_{e\perp}$ & $T_{e\parallel}$ و الايونات لها $T_{i\perp}$ & $T_{i//}$ حيث ان احتمالية التصادم في البلازما بين الأيونات والألكترونات قليلة جداً اقل من احتمالية تصادم الألكترونات فيما بينها او بين الأيونات فيما بينها وهذا ما يؤدي الى ان كل نوع من الجسيمات يأخذ نظام توزيع خاص به عند حصول حالة التوازن الحراري ، من الممكن ان يكون للبلازما عدة درجات حرارة بنفس الوقت وذلك لأن لكل من الألكترونات والايونات توزيع ماكسويل خاص بهما ويحصل هذا التوزيع عندما تكون في حالة تعادل حراري اي ان للألكترونات معدل درجات حرارة و للايونات معدل درجات حرارة ، وعند وضع البلازما في المجالات المغناطيسية فأن الألكترونات تتأثر بأختلاف عن الأيونات وذلك لكتلتها الصغيرة ، وكذلك فأن قسماً منها لا تتأثر عندما تكون موازية وتتأثر بشكل اقصى ما يمكن عندما تكون عمودية لذلك فأن للألكترونات $T_{e//}$ و $T_{e\perp}$ وللايونات $T_{i//}$ و $T_{i\perp}$.

أن الفلورسنت يحتوي على الكترونات تصل درجة حرارتها الى20000 درجة كلفن وهي اكبر من درجة حرارة الأيونات وهي١٠٠٠ درجة كلفن ودرجة حرارة الجسيمات المتعادلة فيها 300 درجة كلفن

$$T_e(20,000) > T_{ions}(1,000) > T_{neu.}(320)$$

س/ لماذا انابيب الفلوسنت ليست ساخنة على الرغم من انها تمتلك درجات حرارية عالية ؟

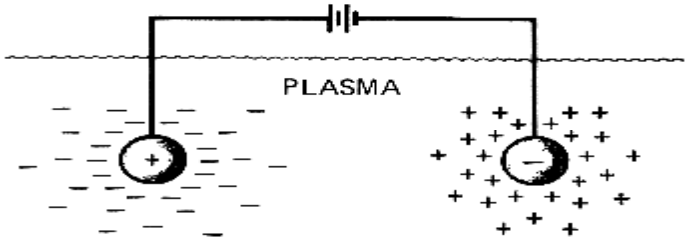
يجب ان نأخذ السعة الحرارية عند الحساب ، فكثافة الألكترونات هي قليلة جداً مقارنة بكثافة الغاز او الجسيمات المتعادلة وعندها تكون درجة الحرارة الكلية المنتقلة من هذه الألكترونات غير كافية لتسخين جزيئات الغاز وتوصيلها الى درجات حرارية محسوسة.

غلاف ديبـــاي Debye Shielding :

من السلوكيات الأساسية للبلازما هو قابليتها على الغاء اي جهد كهربائي يطبق عليها وتحصره في منطقة صغيرة تسمى غلاف ديباي ويمكن تعريفه بأنه معدل المسافة التي يقع فيها تأثير المجال الكهربائي لجسيم مشحون ، وهذا يعني ان الجسيمات المشحونة تترتب بحيث تلغي اي مجال كهروستاتيكي خارجي ضمن مسافة تعادل طول ديباي .

يمكن ملاحظة طول ديباي عندما نقوم بتسخين قطعة من الحديد على النار فعندما تصبح هذه القطعة حمراء بسبب التسخين فسوف نلاحظ منطقة عديمة اللون تقع بين النار و القطعة الحديدية وهذه المنطقة تسمى بطول ديباي

١ .عند وضع مجال كهربائي من خلال امرار تيار كهربائي داخل البلازما وذلك بأدخال كرتين مشحونتين احدهما موجبة والأخرى سالبة مربوطتين ببطارية كما موضح بالشكل اعلاه ، حيث ان كل من الكرتين ستجذب الشحنات المضادة لها مكونة سحابة من الأيونات الموجبة تحيط بالكرة السالبة وسحابة من الالكترونات تحيط بالكرة الموجبة حيث انها سوف تشكل طبقة عازلة بحيث تبقى البلازما بمأمن من تأثير الجهد الكهربائي بين الكرتين وبالتالي تلغي اي مجال كهربائي يمكن ان يحدث بين الكرتين .



Debye shielding.

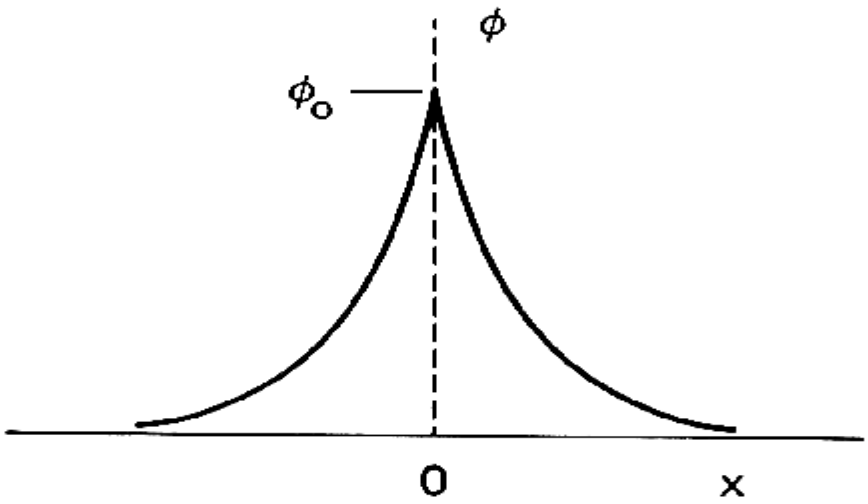
٢.عند وضع اقطاب مشحونة كهروستاتيكية (كهربائية مستقرة) فأن الألكترونات تتجمع حول القطب الموجب والايونات تتجمع حول القطب السالب لألغاء المجال المطبق

٣.عند وضع قطعة سلك موصل في البلازما فأن عدد كبير من الالكترونات يصطدم بهذا الموصل ويجعله سالباً ، حيث ان عدد الe المصطدمة به اكبر من عدد الأيونات وذلك بسبب قلة كتلة الe . وبهذا نتوقع تكوين غلاف سالب حول الموصل يعتمد سمك هذا الغلاف على كثافة الألكترونات ودرجة حرارتها .

ان الجسيمات على حافة الغلاف (السحابة) قد تمتلك طاقة كافية للدخول الى الغلاف او الهروب منها ومن هنا يكون الجهد الكهربائي على حافة الغلاف يساوي طاقة جسيمات البلازما (معدل الطاقة) .

حساب سمك ديباي :

ان الجهد Ø عند x = 0 هي اعلى ما يمكن وليكن Ø₀ والمطلوب هنا ايجاد دالة لتغير هذا الجهد مع المسافة x :



Potential distribution near a grid in a plasma.

حيث ان(n_i) عدد الأيونات و(n_e) عدد الألكترونات .
هذه المعادلة صحيحة عندما يكون هناك فرق بين عدد الألكترونات وعدد الأيونات داخل الغلاف .
اما في البلازما فأن $n_\infty = n_i = n_e$

Poisson eq. in one dimension:-

$$\nabla^2 f = \frac{d^2 f}{dx^2} = -4pe(n_i - n_e)$$

n_e تمثل كثافة الألكترونات و n_i تمثل كثافة الأيونات .

ان كثافة الأيونات الموجبة لا تتأثر فهي نفس كثافة البلازما خارج الغلاف

$$n_i = n_\infty$$

اما كثافة الالكترونات داخل الغلاف فهي اكثر ولكنها مساوية لكثافة البلازما عند حافة الغلاف اي عندما يكون الجهد صفرا

$$n_e(f \Rightarrow 0) = n_\infty$$

بوجود الجهد الكهربائي φ لأي نقطة تقع ضمن الغلاف يعني ان الألكترون سوف يكون له جهد (طاقة) مضافة الى الطاقة الموضعية الأصلية ، ان مقدار الطاقة المضافة تساوي (qφ) وعيه يكون توزيع ماكسويل للألكترونات داخل الغلاف بالشكل التالي :-

هذه دالة توزيع الألكترونات التي لم تدخل الغلاف

$$f(u) = A\exp -\left(\tfrac{1}{2} mu^2 \big/ KT \right)$$

هذه دالة توزيع الألكترونات التي تدخل الغلاف حيث ستكتسب طاقة اضافية

$$f(u) = A\exp -\left(\tfrac{1}{2} mu^2 + qf \big/ KT \right)$$

بالتكامل لاستخراج الكثافة لهذه الالكترونات

$$n = \int A\exp -\tfrac{1}{2} mu^2 + qf \big/ KT$$

$$\therefore n_e = n_\infty \exp \frac{ef}{KT}$$

بالتعويض

$$\nabla^2 \Phi = \frac{d^2\Phi}{dx^2} = -4pe\left(n_i - n_e\right) = -4pe\left(n_\infty - n_\infty \exp \frac{ef}{KT} \right)$$

Using Taylor expansion when eØ / KT << 1 in the sheath

$$\Rightarrow \qquad \left(\exp \frac{ef}{KT} - 1 \right) \approx ef \big/ KT$$

$$\therefore \nabla^2 f = 4pen_\infty \frac{ef}{KT}$$

لنفرض ان مجموعة الثوابت تساوي λ_D وكما يلي

$$l_D = \left(\frac{KT_e}{4pe^2 n} \right)^{\frac{1}{2}}$$

ان لهذه المادلة حل عام وكما يلي

$$\therefore \nabla^2 f = \frac{f}{l_D^2} \Rightarrow f = f_\circ \exp\left(-\frac{\left| X^2 \right|}{l_D^2} \right)$$

وهذا يعني ان المسافة التي يكون فيها الجهد يساوي صفرا تقع على بعد λ_D وهي تمثل طول ديباي

$$l_D = \left(\frac{KT_e}{4pe^2n}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$l_D = 69\left(\frac{T_e}{n}\right)^{\frac{1}{2}} \Rightarrow T_e \ in \ K^\circ, n \ in \ m^{-3}$$

$$l_D = 7430\left(\frac{KT_e}{n}\right)^{\frac{1}{2}} \Rightarrow KT_e \ in \ e.V, n \ in \ m^{-3}$$

$$l_D = 740\left(\frac{KT_e}{n}\right)^{\frac{1}{2}} \Rightarrow KT_e \ in \ e.V, n \ in \ cm^{-3}$$

ملاحظات :

- **عندما تكون البلازما الكثيفة غنية بالالكترونات فأنها تستطيع القضاء على الجهد بمسافة اقل ، بزيادة الكثافة يقل طول ديباي وهذا يعني بزيادة الكثافة تكون طبقات البلازما غنية بالالكترونات وباستطاعتها القضاء على المجال الكهربائي بمسافة اقل .**
- **تزداد طول ديباي بزيادة درجة حرارة الالاكترونات التي لها طاقة كبيرة تحتاج الى مسافة كبيرة نسبياً للتغلب على الجهد الذي تصنعه .**
- **لحساب طول ديباي نستخدم درجة حرارة الالكترونات وليس الايونات ؟ وذلك لأن للالكترونات كتلة أقل من الايونات ولها القابلية على الحركة اكبر من الايونات ولذلك يحسب طول ديباي على اساس الالكترونات وليس الايونات .**
- ***كرة ديباي*** **: هي الكرة التي نصف قطرها طول ديباي وحجمها هو** $\frac{4}{3}p\left(\frac{KT_e}{4pe^2n}\right)^{\frac{3}{2}}$
- ***عدد ديباي*:** **هو عدد الجسيمات الموجودة في كرة ديباي ويرمز له N_D ويساوي :**

$$N_D = \frac{4}{3}p\left(\frac{KT_e}{4pe^2n}\right)^{\frac{3}{2}} n$$

$$\therefore N_D = 1.38\times10^{6}\,\frac{T^{3/2}}{n^{1/2}}$$ **T in K° , n in m^{-3}**

تردد البلازما Plasma Frequency :

تردد البلازما يمثل مقلوب الزمن الذي تحتاجه البلازما لأعادة التعادل الكهربائي (مجموع الشحنات = صفر) حيث ان جسيمات البلازما في الحالة الأعتيادية مرتبة بشكل بحيث يكون المجموع الجبري للشحنات = صفر اي ان هناك مجالات كهربائية تحافظ على التعادل الكهربائي ، وحيث ان الالكترونات تكون لها تحركية كبيرة بسبب كتلتها الصغيرة ، فأذا اقتطفنا جزء من البلازما فأنه لفترة قصيرة جداً قد تكون البلازما فقدت تعادلها بسبب هذه الحركة المسببة للمجالات الكهربائية التي تحاول ارجاعها الى حالتها المتعادلة وهذه تستغرق فترة من الزمن تعتمد على كثافة البلازما فهي تقل عند زيادة الكثافة وبالتالي فان تردد البلازما يزداد بزيادة الكثافة . ان الفترة الزمنية التي تحتاجها البلازما لأعادة التوازن الكهربائي تعتمد على كثافتها حيث ان $n_e = n_i = n$ لذلك فأن تردد البلازما يعتمد على كثافتها .

$$\boxed{W_p = \left(\frac{ne^2}{e_\circ m}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

$$F_p = \frac{W_p}{2p} = 9000\sqrt{n}\quad Hz$$

$$F_p = 9\sqrt{n}\quad Hz$$ **(n in m^{-3})**

س/ بلازما كثافتها ١٠^{١٨}جسيمة بالمتر المكعب احسب ترددها ؟

ملاحظات :

- **ان تردد البلازما يعتمد على كتلة الe باعتباره اكثر تحركية من الأيونات .**
- **ان تردد البلازما يعتمد على كثافتها ، لذلك كلما زادت الكثافة زاد التردد بسبب قلة الفترة الزمنية التي تحتاجها البلازما الكثيفة لأعادة التعادل الكهربائي .**
- **ان التردد للبلازما يقع ضمن الموجات المايكروية اي ان تردداتها عالية**

شروط الغاز المتأين ليكون في حالة البلازما Criteria For Plasma :

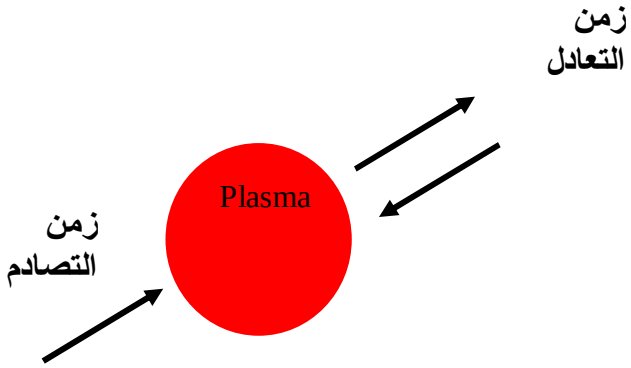
١. $l_D << L$: شرط يتطلبه حالة السلوك الجماعي ، حيث يجب ان يكون طول ديباي اقل بكثير من طول المنظومة . تصغر منظومة اشباه الموصلات لزيادة الكثافة مما يؤدي الى تقليل طول ديباي فيحقق شرط من شروط البلازما ، ولذلك تعمل هذه الدوائر مثل الدايود . وعلى هذا الاساس يجب ان تكون كثافة الجسيمات المشحونة كبير جداً .

٢. $N_D >>> 1$ كرة ديباي يجب ان تحتوي على عدد كبير جداً من الجسيمات المشحونة وهذا ما يتطلبه السلوك الجماعي للبلازما .

٣. $wt > 1$ هذا الشرط له علاقة بالتصادم اي ان زمن التصادم t يجب ان يكون اكبر من الزمن الذي تحتاجه البلازما لأعادة التعادل الكهربائي حيث ان التصادمات بين مكونات الغاز هي التي تحدد حركة الغاز. اما في البلازما فأن الذي يحدد حركتها هو التصادم والقوى الكهرومغناطيسية (قوى كولوم) وكلما قل تأثير التصادم اقترب الغاز من حالة البلازما.

س/ لماذا لا يعتبر عادم الطائرات بلازما ؟

ج/ نارعادم الطائرات ليس بلازما لأنه ناتج عن التصادم المتعدد حيث نسبة التصادمات تكون كبيرة(اي ان زمن التصادمات يكون بسرعة اكبر من الزمن الذي تحتاجة البلازما لأعادة التعادل الكهربائي). ان المخلفات الغازية التي تخرج من عادم الطائرات تكون بدرجات حرارية عاليةمع ذلك فأنها لاتعتبر بلازما لأنها ناتجة عن حركة الكتل الغازية بسبب الصطدام .



ضغط البلازما Plasma Pressure :

غالباً ما تدرس البلازما على اساس انها موجودة ومحصورة في مجال مغناطيسي ،وعندما يكون المجال المغناطيسي مؤثرا تكون البلازما ممغنطة ان المجال المغناطيسي المستقر يولد ضغطاً مستقر Static pressure يعطى بالعلاقة

$$\frac{B^2}{2m_\circ} \qquad (\frac{N}{m^2}) \qquad m_\circ = 4p \times 10^{-7}$$

والمعروف ايضا ان البلازما تعتبر من المواد ضعيفة النفاذية للمجال المغناطيسي ، اي انها من المواد الدايامغناطيسية وهذا يعني انها تولد مجالا مغناطيسيا معاكسا مايجعل البلازما تحاول دفع المجال المغناطيسي للخارج بضغط حركي قDynamic pressure يعطى بالعلاقة التالية :

$$\sum nKT = nKT_i + nKT_e = n\left(KT_i + KT_e\right)$$

بلازما بيتا(b) :

هي النسبة بين الضغط الذي تولده البلازما الى الضغط المغناطيسي الخارجي .

$$b = \frac{dynamic \quad pressure}{static \quad pressure}$$

$$b = \frac{n\left(KT_e + KT_i\right)}{B^2 / 2m_\circ}$$

وهذا القانون فيه حالتين :

١. (b > 1) ويعني ان قوة الضغط الحركي اكبر من قوة ضغط المجال المغناطيسي الخارجي ، وتعتبر البلازما في هذه الحالة غير محصورة (غير مسيطر عليها) .

٢. (b < 1) يعني ان البلازما سيطر عليها بالمجال المغناطيسي كما هو الحال في منظومة الحصر المغناطيسي التي يجب ان يكون فيها المجال المغناطيسي قوي للسيطرة على البلازما.

الفصل الثاني

تطبيقات فيزياء البلازما Application of plasma physics

يمكن وصف البلازما من خلال معرفة درجة الحرارة لمكوناتها والكثافة وتطبيقات البلازما تشمل المساحات الواسعة لكل من درجة الحرارة والكثافة ، حيث ان الكثافة تتغير من $10^3 - 10^6$ ودرجة الحرارة $0.1 - 10^6$ من هذا يتضح انه في تطبيقات البلازما يجب تحديد كل من الكثافة ودرجة الحرارة لكل تطبيق.

التفريغ الكهربائي Gas Discharger :

ان دراسة التفريغ في الغازات يعني دراسة ظواهر التفريغ الكهربائي بالغازات وان العالم لانكمور هو اول من عمل في هذا المجال وكان الغرض الأساسي هو الحصول على انبوب يحوي على غاز موصل للكهربائية ، والمعروف ان التوصيل الكهربائي في المواد الصلبة يتم عن طريق انجراف وحركة الألكترونات وقتيا بين الذرات ، اما في السوائل فيتم عن طريق المحاليل المتأينة .

ان التوصيل الكهربائي في المواد الصلبة يتم عن طريق انجراف وحركة الالكترونات اما التوصيل في السوائل فيتم عن طريق المحاليل التأينة كما هو الحال في محلول ملح الطعام NaCl حيث تساهم الايونات المتولدة من تحلل الجزيئات في مرور التيار الكهربائي اما التوصيل الكهربائي في الغازات فهو شبيه الى حد ما التوصيل بالسوائل حيث تساهم كلا من الايونات السالبة والموجبة في نقل التيار الكهربائي ويختلف التوصيل في السوائل لكون عدد الايونات يكون قليل عند بدء التفاعل حيث ان اغلب الايونات في الغاز تنتج بعملية التصادم بين جزيئات الغاز والايونات في الغاز بعضها ذري وبعضها الكتروني.

الغاز في الضروف الاعتيادية رديء التوصيل للكهربائية بسبب قلة الايونات (حوالي ١٠٠٠ كل سم ^{٣}) عند الظروف القياسية وعند تسليط فرق جهد واطيء حيث ان الايونات المتصادمة لاتمتلك طاقة كافية للتأين اما اذا ازداد فرق الجهد بحيث ان الطاقة التي تكسبها الايونات من المجال الكهربائي بين فتراتها الحرة تمكنها من تأيين الذرة او الجزيئة التي تصطدم بها فتولد المترونات حرة وايونات فتتضاعف عملية التأين بزيادة عدد الالكترونات والايونات ويحصل ما يسمى بالشرارة الكهربائية Spark خلال الغاز كما يحدث في الصواعق وهذا النوع من التصادم يسمى تصادم تأيني ويعتمد

١. نوع الغاز
٢. الكثافة العددية للغاز

$$l = \frac{1}{x\,n} = \frac{KT}{x\,p}$$

٣. معدل المسار الحر

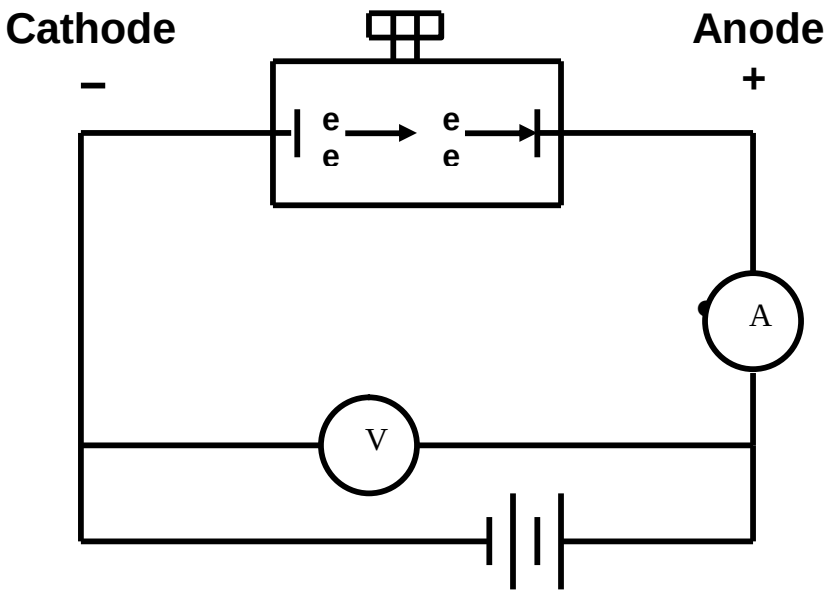
ومعدل المسار الحر يعتمد على كل من الكثافة العددية ومساحة المقطع التصادمي

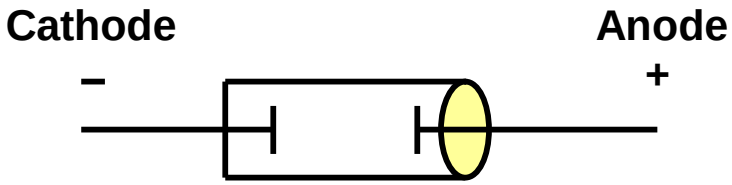
$$x = coll.cross\ section$$

$$n = Density$$

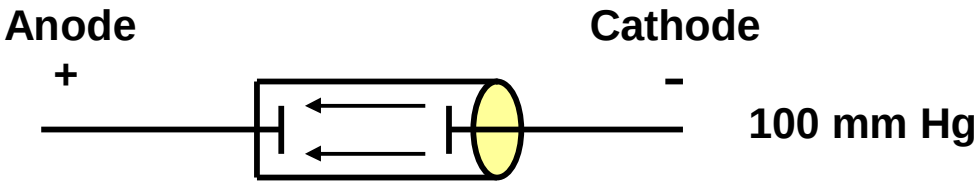
وباختصار يمكن القول ان الجهد اللازم لتوليد شرارة (تفريغ كهربائي) يعتمد الى ضغط الغاز فنحتاج مثلا الى جهد مقداره (٣ مليون فولت) للحصول على تفريغ كهربائي لمتر من الهواء الجاف في الظروف القياسية وكلما انخفض الضغط تحتاج الى فرق جهد اقل بسبب زيادة المسافة الحرة بين الذرات وان الجهد المؤدي الى التفريغ الكهربائي يسمى جهد الانهيار (Breakdown Potential) .

$$V = f(p.d)$$

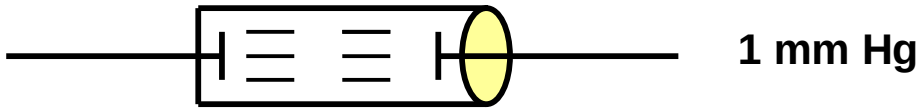




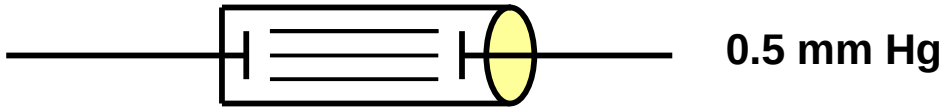
ليس هناك ضوء لأن كل الجسيمات متعادلة



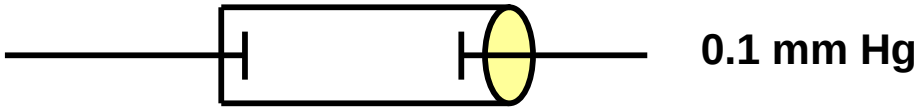
التفريغ يظهر على شكل خط رفيع براق



تموجات بين مناطق مضيئة ومظلمة بين القطبين سببها الألكترونات والأيونات والتي اكتسبت طاقة من الجهد الكهربائي فالطاقة تكون مختلفة بسبب الفرق بالكتلة

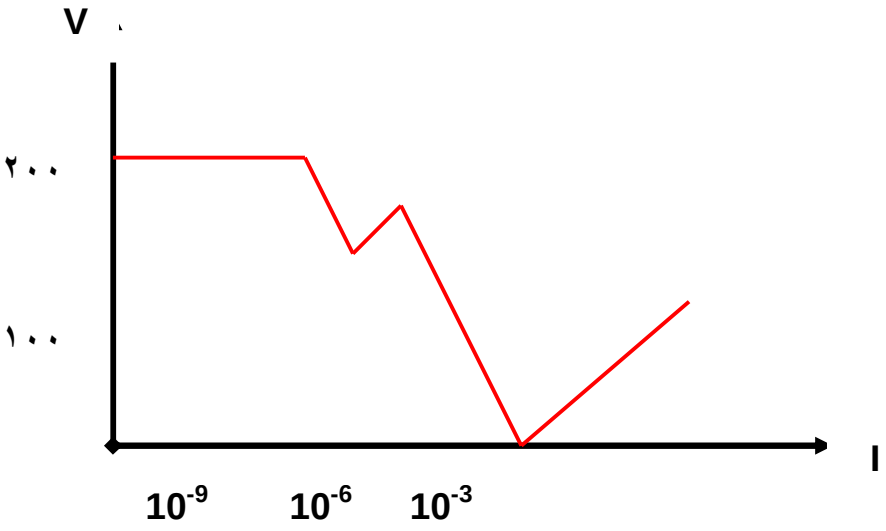


دليل على ان كل الجزيئات تكون في حالة تأين حيث تصبح كلها ضوء



لايوجد ضوء (كل الجسيمات موصلة)

ان العلاقة بين فرق الجهد المسلط والتيار يمكن تمثيله بالرسم التالي :



علم البلازما عرف عند ظاهرة التغرغ الكهربائي ، و ***التفريغ الكهربائي*:** هو جعل الهواء المحصور بين القطبين يمر فيه تيار كهربائي اي يصبح موصلا .

<u>العوامل المؤثرة على التفريغ الكهربائي</u> هي *الفولتية* ، *شكل الاقطاب* ، *نوع الغاز* ، *ضغط الغاز الموجود* ، *المسافة بين الاقطاب* .

ان الغرض من العمل في مجال التفريغ الكهربائي هو الحصول على غاز موصل للكهربائية وهذا الغاز موجود في انبوبة مفرغة جزئياً وقد يحمل تياراً كهربائياً عالياً ، تتراوح كثافة البلازما (الجسيمات المشحونة) بالتفريغ الكهربائي من ($10^{14} \rightarrow 10^{18}\ m^3$) اما درجه الحرارة للe تصل الى 3ev ، وفي مثل هذه الضروف يمكن رؤية غلاف ديباي اي رؤيه غلاف عند وضع جسم موصل في الأنبوب المفرغ .

اما التطبيقات في مجال التفريغ الكهربائي فهي كثيرة منها مصابيح الفلورسنت والنيون والاقواس الكهربائيه التي تستعمل لتقويم التيار المتناوب وشمعات القدح (بلكات) واللحام . ان عملية التقويم للتيار ذات الفولتية العالية يتم بواسطة التفريغ الكهربائي . هناك نوعان من التفريغ الكهربائي هما :

١. ***<u>Glow discharge التفريغ التوهجي:</u>***

وهو التفريغ الكهربائي الذي يكون فيه التيار المار في الدائرة اقل من (١ امبير) ويتصف بأنه مضيء ويستخدم في سبيل امثال في توليد الليزر الغازي .

٢. ***<u>ARC discharge التفريغ القوسي:</u>***

وهو التفريغ الذي يكون فيه التيار اكبر من (١ امبير) ويستعمل في عملية اللحام .

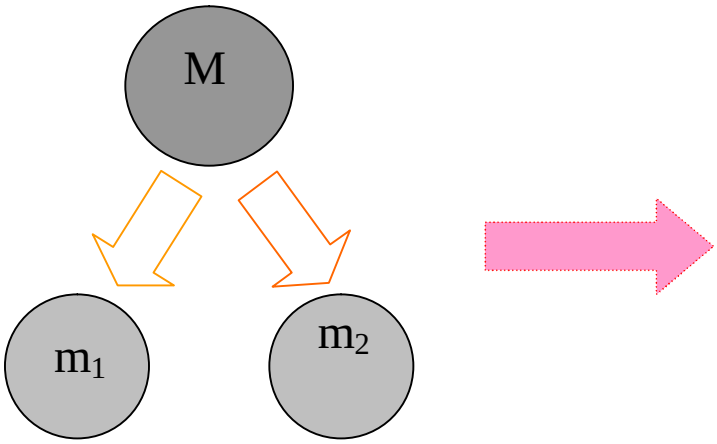
***هناك نوعان من الكاثود في التفريغ الكهربائي* :**

١. ***الكاثود البارد*** : **الذي يعتمد على عدد الe الموجودة في الهواء .**
٢. ***الكاثود المشع*** : **يوضع على شكل فتيلة ليشع الالكترونات .**

س/ التفريغ الكهربائي أسهل في الكاثود المشع ؟
ج / لأنه يزيد عدد الالكترونات في انبوبة التفريغ الكهربائي مما يجعل التفريغ اسهل بأقل فولتية ممكنة .

الأندماج النووى المحكوم Controlled Fusion Reaction :

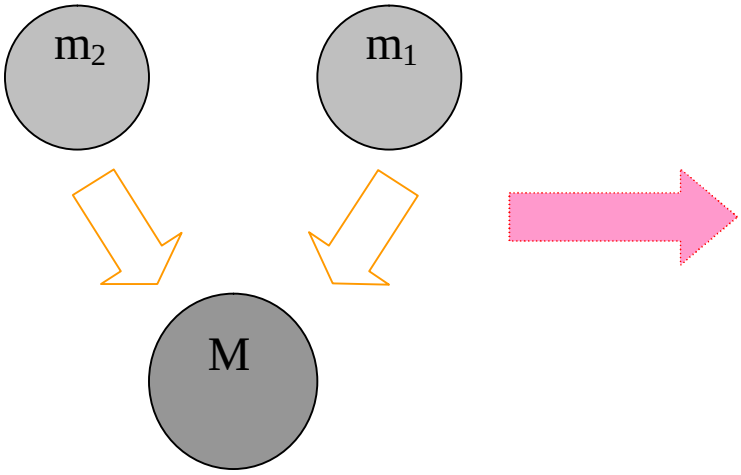
الانشطار النووي :



$M > m_1 + m_2$

$\Delta mc^2 = Energy$

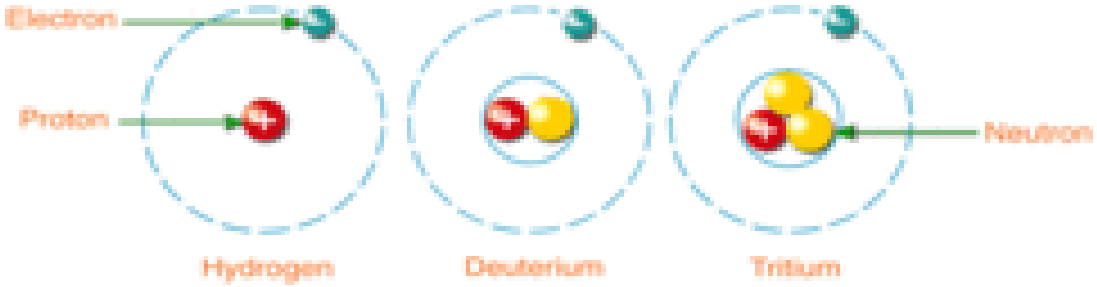
الاندماج النووى :



$M < m_1 + m_2$

$\Delta mc^2 = Energy$

ان دراسة تأثير فيزياء البلازما الحديثة بدأت عام ١٩٢٨ عندما فكر العلماء بأمكانية السيطرة على انفجار القنبلة الهيدروجينية بواسطة مفاعل خاص ، ان هذا النوع من التفاعل النووي يتطلب نويات ذات كتلة قليلة وتكون نتيجة التفاعل نواة لذرة اكبر من كل نواة دخلت التفاعل ولكنها اصغر من مجموع كتلتيهما مثل اندماج نواة الديتريوم ونواة التريتيوم .



وقد يحدث التفاعل بأحد او كل التفاعلات التالية :

$$_{1}D^{2} + {}_{1}D^{2} \longrightarrow {}_{2}He^{3} + {}_{0}n^{1} + 3.2\ M\ e.V$$

$$_{1}D^{2} + {}_{1}D^{2} \longrightarrow {}_{1}T^{3} + P_{1} + 4.0\ M\ e.V$$

$$_{1}D^{2} + {}_{1}T^{3} \longrightarrow {}_{2}He^{4} + {}_{0}n^{1} + 17.6\ M\ e.V$$

$$_{2}He^{3} + {}_{1}D^{2} \longrightarrow {}_{2}He^{4} + P + 18.3\ M\ e.V$$

ان هذه التفاعلات لايمكن ان تحدث في ضروف عادية ، من المشاكل الكبيرة في الأندماج النووي والتي جعل الخوض فيها فيزياء البلازما تتطور بشكل سريع :-

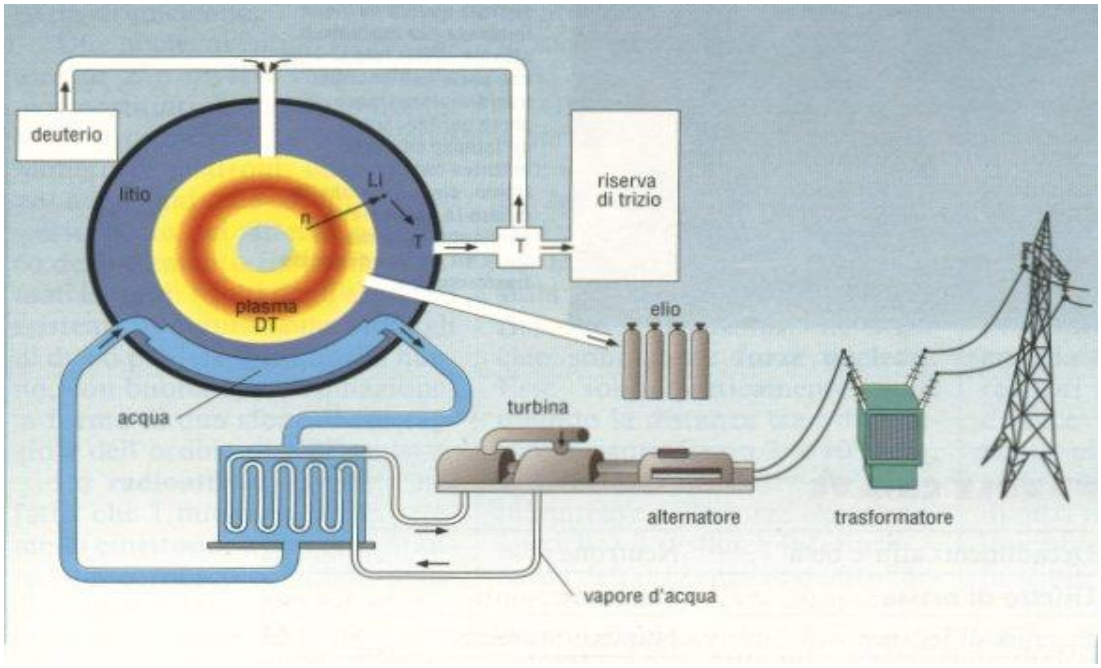
١. رفع درجة حرارة العناصر الداخلة في التفاعل الى درجات حرارية عالية .

٢. احتواء البلازما في وعاء يتحمل هذه الدرجة الحرارية .

ان الغرض من تفاعلات الأندماج النووي هو جعل نواتي العنصرين المتفاعلين يقتربان من بعضهما البعض الى الحد الذي يجعلهما ضمن مدى قوى التجاذب النووي وذلك بتزويدهما بطاقة كافية للتغلب على قوى التنافر الكهروستاتيكي ولذلك يجب وضع المزيج في وعاء مناسب ولفترة زمنية مناسبة.

<u>ملاحظة</u>

- التفاعل من نوع DDD هو تفاعل الذي يعطي طاقة مقدارها 21 Me.V . كذلك فأن اكثر التفاعلات احتمالاً هو التفاعل رقم (٣) حيث يتعلق بنوع التصادم ومساحة المقطع العرضي وهو الاكثر احتمالاً.



قاعدة لاوسن Lawson atoner :

لقد دلت الحسابات النظرية الكلاسيكية بأن الطاقة الازمة لحدوث الأندماج النووي يمكن حسابها من العلاقة :-

$$E = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4p \in_o r}$$

حيث r تمثل المسافة بين النويات (مع العلم ان نصف قطر النواة لذرة الهيدروجين بحدود 10^{-14} m وفيما يتعلق بنظائر الهيدروجين تكون الطاقة اللازمة تعادل 5×10^{9} كلفن وهذه الطاقة يمكن حسابها ايضاً بأعتماد الميكانيك الكمي وتكون اقل في هذه الدرجة وحسب نوع التفاعل حيث ان التفاعل من نوع DD يتطلب اقل طاقة (300×10^{6}k) والناتج هو طاقة اكبر . ان المشكلة الرئيسية وحسب ميكانيك الكم تتعلق باحتمالية حدوث تفاعل اندماجي فليس كل التصادمات تؤدي الى اندماج نووي ، وللتغلب على مشكلة تأثير التصادمات المرنة يتم بزيادة نسبة التصادمات وذلك بزيادة الكثافة حيث يقل معدل المسار الحر كذلك يمكن زيادة زمن التفاعل حيث يؤدي بالتالي الى زيادة احتمالية حدوث تفاعلات الأندماج . ان الشرط الأساسي الذي يجب ان يتوفر في كل مفاعل نووي اندماجي هو ان يقوم بأنتاج طاقة اكبر من الطاقة التي يستهلكها وهذا ماتنص عليه قاعدة لاوسن حيث يجب ان تكون:

$$n\,t \;\geq\; 2\times10^{20}\;\frac{\sec}{m^{3}}\,DT$$

$$n\,t \;\geq\; 10^{22}\;\frac{\sec}{m^{3}}\,DD$$

ومن هنا نلاحظ ان تفاعل DT هو الأرجح حيث يحتاج الى طاقة اقل والناتج هو طاقة كبيرة جداً .

طرق حصر البلازما وأحتوائها :

هناك ثلاثة طرق لحصر البلازما او احتوائها

١. *الحصر الجذبي (التثاقلي) Gravitational Confinement :*

ويكون هذا الحصر عندما تكون الكتل كبيرة جداً وفقاً لمعادلات كتلر للجذب ، لذا تطبق هذه الحالة على الكتل الكبيرة مثل الشمس لذلك لا يمكن اعتبار هذه الطريقة نافعة للاستفادة منها في الارض.

٢. *الحصر الذاتي* ***Inertial Confinement***:

ان الحصر الذاتي يحدث عن طريق جمع المزيج بكثافة عالية جداً ويكون التسخين بواسطة الليزر وعلة شكل نبضات تكون بحدود 10^{-9} ثانية في احسن الأحوال وهذا يتطلب ان تكون الكثافة اكثر من 10^{29} لتحقيق الأندماج النووي للنواة حسب قاعدة لاوسن ، وهو استخدام الليزر في الاندماج النووي ويتم ذلك بصنع اقراص صلبة من الديتيريوم وقصفها بالليزر .

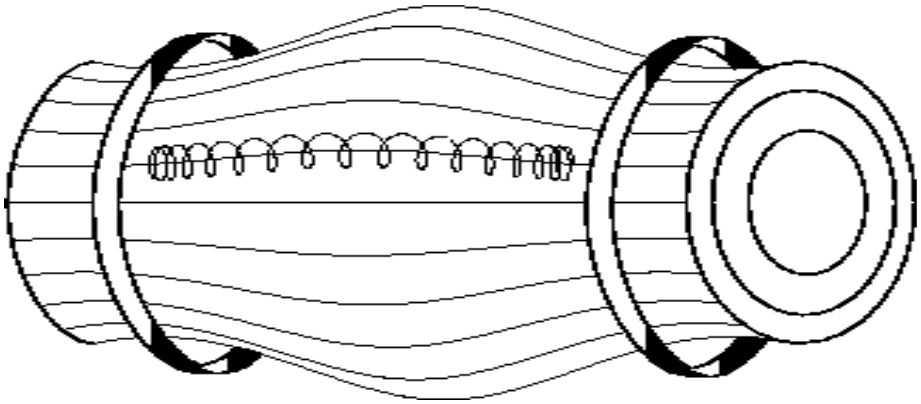
٣. *الحصر المغناطيسي* **Magnetic Confinement** :

يمكن حصر البلازما في مجال مغناطيسي لفترة زمنية مناسبة لحدوث الأندماج النووي والقاعدة الأساسية في هذا الحصر هو الحركة الحلزونية للجسيمات المشحونة حول خظوظ المجال المغناطيسي يجعل البلازما غير مستقرة وامكانية هروبها من الحاوية كبير ، هذا بالأضافة الى انه يجب ان يكون ضغط البلازما في حالة توازن مع الضغط المغناطيسي . ان مشاكل هذا النوع من الحصر تتعلق بهروب البلازما من المجال المغناطيسي والتي تسمى عدم الأستقرارية . بأعتبار ان المجال المغناطيسي يؤثر بقوة مقدارها $F = q\ (V \times B)$ على الجسيمات المشحونة وهذه القوة تجعل الجسيمات تدور حول المجال المغناطيسي ويمكننا ايجاد شكل مناسب للمجال المغناطيسي ووضع البلازما فيه .

هناك نوعان من الحصر المغناطيسي :

i. منظومات الحصر المغناطيسي المفتوحة :

حيث تخرج خطوط المجال من حيز الحصر وتتحرك الجسيمات داخل المجال فتعاني انعكاسا بواسطة منطقة ذات مجال مغناطيسي عالي الشدة مثل المرايا المغناطيسية .



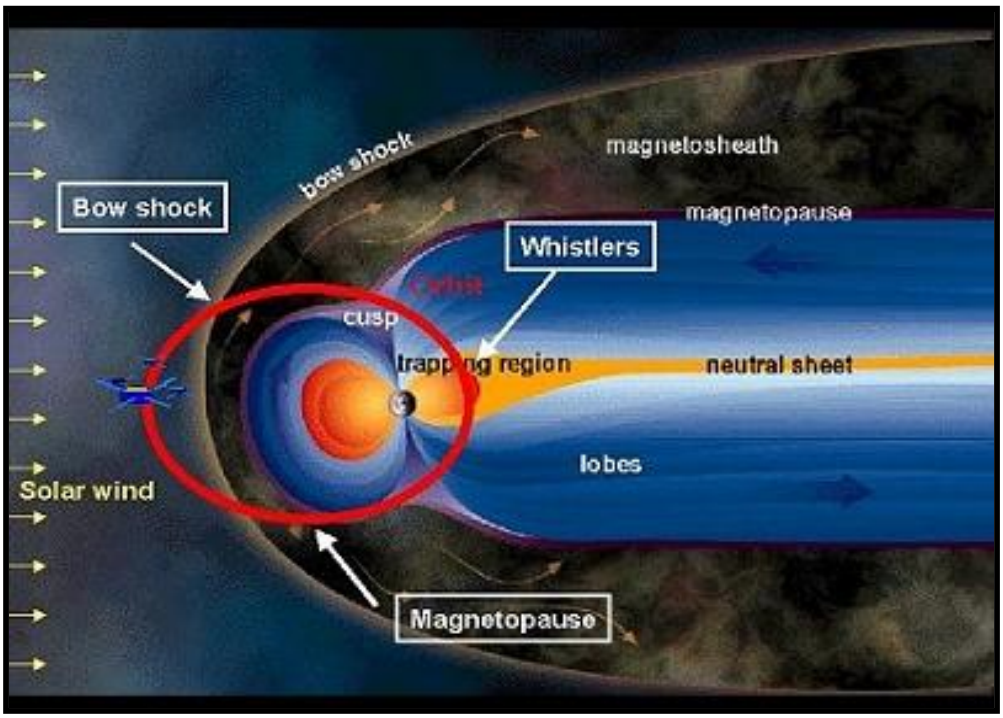
ii. منظومات الحصر المغناطيسي المغلق :

في هذه الأنظمة تكون خطوط المجال المغناطيسي في حيز الحصر والذي يكون بشكل حلقي كما هو الحال في منظومات Tokomak حيث تمتاز هذه الأنظمة عن المفتوحة بأنها اكثر كفائة .

تطبيقات البلازما في مجال الفضاء Space Physics :

تطبق القوانين الخاصة بالبلازما في مجال الفضاء وهي عملية دراسة المحيط الفضائي للارض اي دراسة الجريان المستمر للجسيمات المشحونة او الرياح الكونية حيث ان الغلاف الكوني المشحون (الأيونوسفير) يغطي الأرض ويحميها حيث تشكل طبقة تمنع وصول الأشعاع من الشمس . ان الفضاء بين النجوم والغلاف الجوي للأرض يكونا حارين جداً لذا فأنهما يكونا في حالة بلازما ، ان درجة حرارة قلب الشمس تكون بحدود (2Kev) والتفاعلات النووية الأندماجية يمكن حدوثها في مثل هذه الدرجات الحرارية والتي تكون مسؤولة عن الأشعاعات الشمسية في حين ان هالة الشمس تكون بدرجة حرارة (1ev of temp. KT=11600 K).

لقد استخدمت نظريات فيزياء البلازما لتوضيح ماهية الأشعة الكونية (Cosmic Rays) وبالرغم من ان النجوم في المجرات غير مشحونة لكنها تتصرف بشكل جسيمات في فضاء البلازما الكوني ،كذلك أن دراسة نظريات الطاقة للبلازما تحت موضع الأهتمام لتطوير المعرفة عن المجرات الكونية . ان الراديوات الفلكية الحالية قد اعطت معلومات واسعة عن الأشعاعات القادمة للأرض والتي مصدرها البلازما . ان الغيمة السديمية الكونية تكون محددة في البلازما لأحتوائها على مجال مغناطيسي .



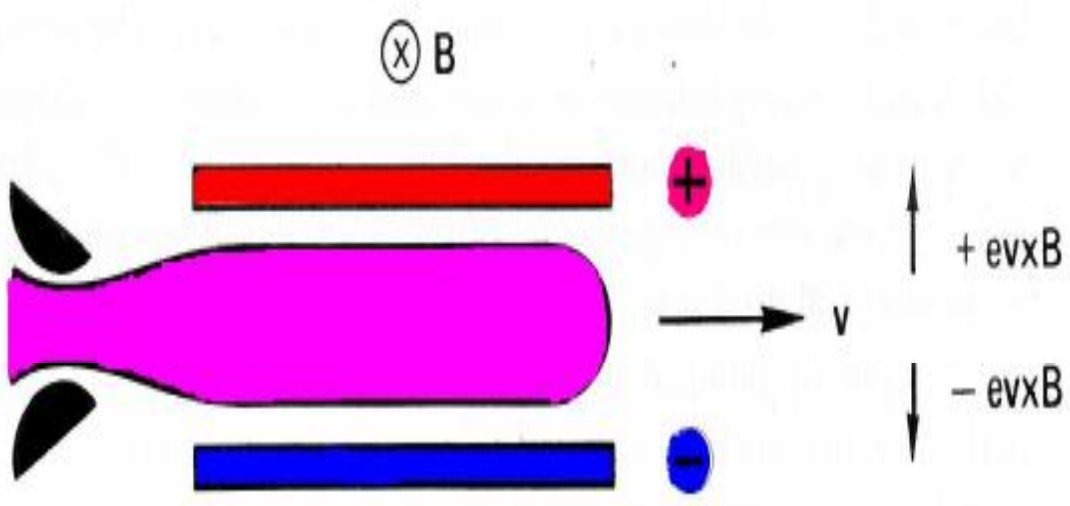
فيزياء الكون الحديثة :

يمكن من دراسة البلازما في الجو الوصول الى معلومات مهمة في دراسة النجوم ومكوناتها وكذلك دراسة النجوم في المجرة الواحدة حيث تسلك جسيماتها سلوكاً يشابه سلوك جسيمات البلازما وعليه يمكن تخمين تطور هذه المجرات من خلال النظرية الحركية للبلازما .

منظومات مغنيتودايمك لتحويل الطاقة والقاذف الأيوني *Magneto Hydro Dynamic :*

١. منظومة تحويل الطاقة Energy Conversion :

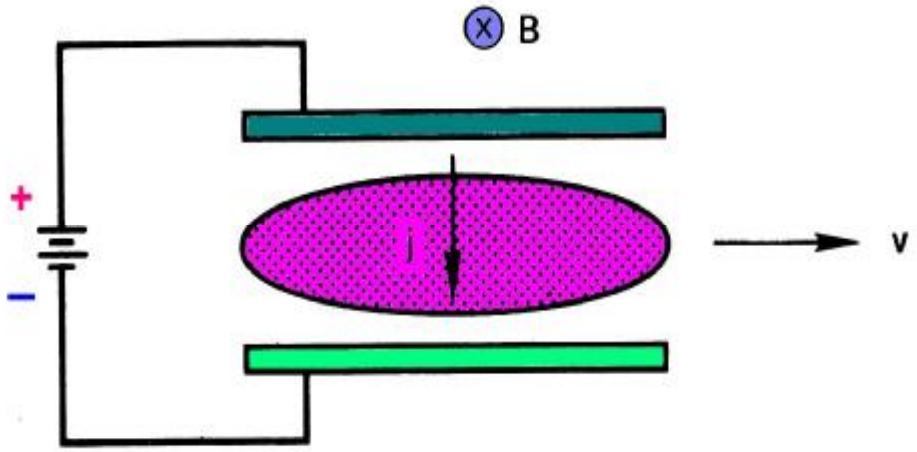
وهي منظومة يمكن من خلالها تحويل الطاقة الحركية للبلازما الى طاقة كهربائية ،حيث أن البلازما تتأثر بالقوة : $F = q (V \times B)$



Principle of the MHD generator.

٢. منظومة القاذف الأيوني Ion Propulsion :

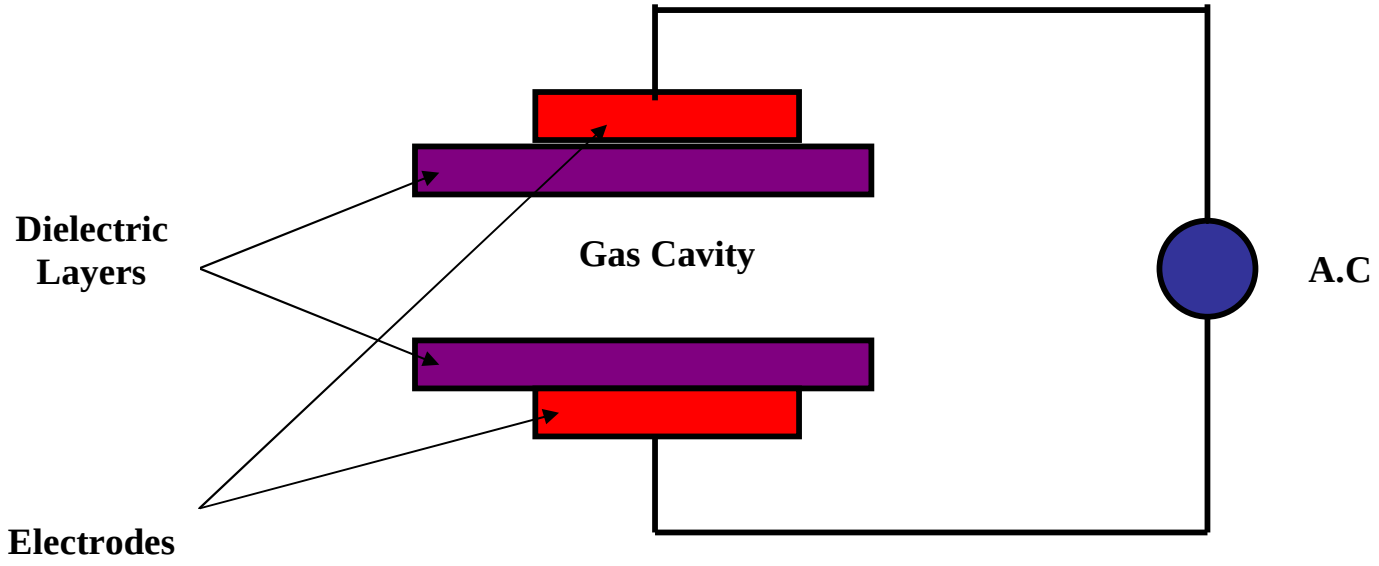
ان منظومة القاذف الايوني تعمل على المركبات الفضائية حيث يمر التيار خلال البلازما بوجود المجال المغناطيسي المتعامد مما يؤدي الى انطلاق البلازما خارج المركبة الفضائية بقوة مقدارها $F = J \times B$ فيما تعمل قوة رد الفعل على حركة المركبة الفضائية بالأتجاه الآخر .



Principle of plasma-jet engine for spacecraft propulsion.

شاشة البلازما Plasma Displays :

ان شاشة العرض المضيئة للبلازما تعتمد على التوهج الحاصل عند مرور تيار كهربائي خلال غاز ما وعادة ما يستخدم غاز النيون ، تتولد البلازما عادة خلال عملية التفريغ الكهربائي . من الممكن حصول عملية التفريغ بأستخدام مصادر الفولتية A.C أو D.C ، ان الأول هو الأكثر شيوعاً في الاستعمال ، ان عرض حجرة البلازما عادة تكون بحدود 100µm وضغط الغاز 400Torr .يحتاج التغريغ الكهربائي الى فولتية ابتدائية V_f (Firing voltage) وفولتية تشغيل V_s بحدود 90V



Construction of an A.C Plasma Display

الفصل الثالث

حركة الجسيمات المفردة Single partial motion

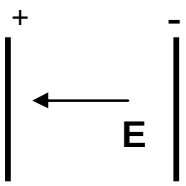
يمكن دراسة البلازما على اساس دراسة تأثير المجالات الكهربائية والمغناطيسية على الجسيمات المنفردة ، اي ندرس تأثير هذه المجالات على كل من الالكترونات والأيونات الموجبة بشكل منفصل ولا نأخذ بالأعتبار تأثير هذه الجسيمات على بعضها او تأثيرها على المجالات الخارجية ويمكن دراسة البلازما على انها مائع يحتوي على خليط من مائع الكتروني ومائع ايوني موجب ومائع للجسيمات المتعددة وفي هذه الحالة يجب دراسة تأثير هذه الموائع على بعضها اي دراسة اللزوجة وتصح دراسة الموائع للبلازما الكثيفة ودراسة حركة الجسيمات المنفردة للبلازما قليلة الكثافة. ان الصعوبة في تحليل ودراسة حركة البلازما هو بسبب كثافتها حيث انها تقع في حدود كثافة الموائع والتي لايمكن اعتبار حركة الجسيمات المنفردة مهمة ، ان البلازما هي دائما في كثافة وسطية بين الحالتين ودراسة حركتها تستوجب معرفة حركة الجسيمات منفردة وكذلك مجتمعة . ان دراسة الجسيمات المنفردة تعطي تفاصيل عن حركة الجسيمات كل على حدة ، وفي هذا الفصل نكتفي بدراسة تأثير المجالين الكهربائي والمغناطيسي على الجسيمات المنفردة على فرض ان هذه الجسيمات ليس لها تأثير على كل من المجالين .

١.قوة لورينز Lorenz Forces :

تتأثر الجسيمات المشحونة بالبلازما بقوى ناتجة من تأثير مايلي :

§ ***المجال الكهربائي:***

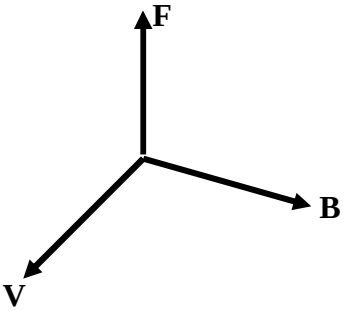
$$F = q\,E$$



§ ***المجال المغناطيسي:***

يؤثر على الجسيمات المتحركة بسرعة V بقوة مقدارها : $F = q\,(V \times B)$

يكون اتجاه القوة عمودي على المجال المغناطيسي ويجب ان تكون الجسيمة متحركة بسرعة عمودية على المجال المغناطيسي .حيث ان الجسيمة تتأثر بالمجال المغناطيسي فقط اذا تحركت بأتجاه عمودي على المجال المغناطيسي وحسب قانون لورينز: $F = J \times B$



ان معادلة الحركة تعتمد على نوع القوى المؤثرة :

$$F = m\frac{dV}{dt} = F + qE + q\left(V \times B\right)$$

حيث ان السرعة لجسيمة كتلتها m تتأثر بالمجال الكهربائي والمغناطيسي هي:

المعادلة العامه للحركة

$$m\frac{dV}{dt} = q\left[E + \left(V \times B\right)\right]$$

٢ - الحركة الدورانية Cyclotron Motion :

التردد الدوراني (Cyclotron Frequency)

ان معادلة الحركة هي :

$$F = m\frac{dV}{dt} = q\left(V \times B\right)$$

$$\left.\begin{aligned} m\dot{V} &= q\left(V \times B\right) \\ m\dot{V}_X &= qV_y B \\ m\dot{V}_y &= qV_X B \\ m\dot{V}_Z &= Zero \end{aligned}\right\} \text{معادلات حركة الجسيم}$$

$$m\ddot{V}_X = q\dot{V}_y B \quad \Longrightarrow \quad \ddot{V}_X = \left(\frac{qB}{m}\right)^2 V_X$$

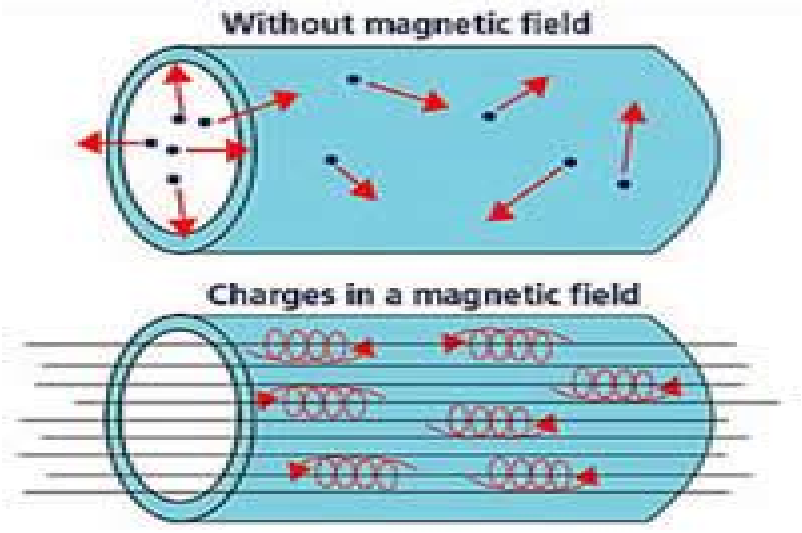
$$m\ddot{V}_y = q\dot{V}_X B \qquad \ddot{V}_y = \left(\frac{qB}{m}\right)^2 V_y$$

ان هذه تمثل معادلات توافقية بسيطة اي ان الحركة هنا دائرية ترددها يساوي:

$$W_C = \left|\frac{qB}{m}\right|$$

ان التردد الدوراني W_C يأخذ قيم موجبة فقط لأنه لايمكن ان يدور بالأتجاه السالب اضافة الى ان اتجاه الدوران للشحنة السالبة يكون عكس اتجاه الدوران للشحنة الموجبة .

ان التردد الدوراني للألكترون يكون اكبر من التردد الدوراني للأيون وذلك لكتلة الألكترون الصغيرة مقارن بالأيون



نصف قطر لارمر Larmor radius :

ان نصف قطر لارمر هو نصف قطر الدوران للشحنة حول خطوط المجال المغناطيسي ويمكن حسابه من معادلة التعجيل العمودي للحركة الدورانية اي ان :-

$$a_m = \frac{V_\perp^{\,2}}{r}$$

حيث:

m: الكتلة (ايون او الكترون)

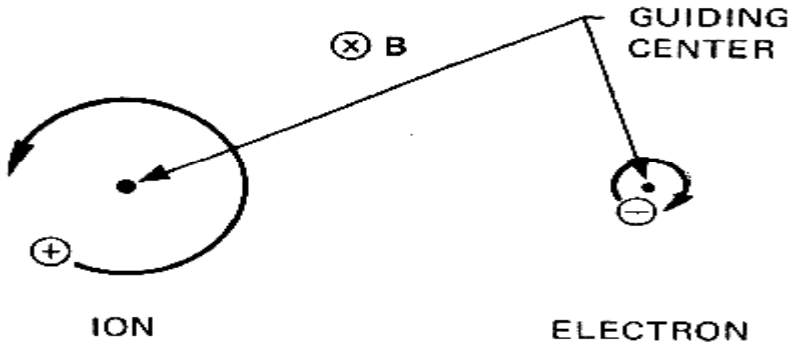
$V_\perp$: السرعة العمودية

وحيث ان

$$F = m\frac{dV}{dt} = qV_\perp B \Rightarrow m\frac{V_\perp^{\,2}}{r} = qV_\perp B$$

$$\therefore r_L = \frac{mV_\perp}{qB} \qquad \boxed{r_L = \frac{V_\perp}{W_C}}$$

نصف قطر لارمر



Larmor orbits in a magnetic field.

ملاحظة

لاحظ نصف قطر لارمر للايون اكبر من نصف قطر لارمر للالكترون بسبب كتلته الكبيره ولكن عدد الدورات بالثانية الواحدة (التردد) اقل لنفس السبب.

س/ جسيمة مشحونة ساكنة طبقنا عليها مجال مغناطيسي ، احسب نصف قطر لارمر ؟
ج/ صفر لأن الجسيمة ساكنة والمجال المغناطيسي لا يؤثر على الجسيمات الساكنة .

٣. سرعة الانجراف الناتجة من المجال الكهربائي (Electric Field Drift Velocity)

من المعروف ان وجود شحنات كهربائية او جسيمات مشحونة في مجال كهربائي فأنها تتأثر بهذا المجال و بأتجاهه حسب نوع الشحنة ، ولكن عند تطبيق المجال المغناطيسي بأتجاه عمودي على حركة الشحنات سوف تتولد حركة دورانية بأتجاه وانصاف اقطار تعتمد على نوع وكتلة الجسيمات المشحونة .

ان معادلة الحركة لجسيم في مجال كهربائي ومجال مغناطيسي تعطى بالعلاقة التالية :

$$m\frac{dv}{dt} = q\left[E + \left(V \times B\right)\right]$$

Velocity Component in Z Direction:

$$\frac{dv_z}{dt} = \dot{V}_z = \frac{q}{m}E_z + 0$$

$$V_z = \frac{q}{m}E_z t + V_{z\circ}$$

Velocity Component in X Direction:

$$\frac{dV_X}{dt} = \dot{V}_X = \frac{q}{m}E_X \pm W_C V_y$$

$$\frac{dV^2}{dt} = 0 \pm W_C \dot{V}_y$$

$$\frac{dV_y}{dt} = \pm W_C V_X \Rightarrow \ddot{V}_X = -W_C{}^2 V_X$$

$$\ddot{V}_y = \pm W_C\left(\frac{q}{m}E_X \pm W_C V_y\right) = -W_C{}^2\left(\frac{E_X}{B} + V_y\right)$$

$$\frac{d^2}{dt^2}\left(V_y + \frac{E_X}{B}\right) = -W_C{}^2\left(V_y + \frac{E_X}{B}\right) \Rightarrow$$

$$V_X = V_\perp e^{iw_c t}$$

$$V_y = \pm i V_\perp e^{iw_c t} - \frac{E_X}{B}$$

Velocity Component in Y Direction:

$$V_y = \pm \dot{W}_C V_X$$

$$\ddot{V}_y = W_C \dot{V}_X \Rightarrow \therefore \dot{V}_X = \frac{q}{m}E_X + \frac{qB}{m}V_y$$

$$\ddot{V}_y = \pm W_C\left(\frac{qE_X}{m}\left(\frac{B}{B}\right) \pm W_C V_y\right) = \pm W_C\left(\frac{W_C E_X}{B} \pm W_C V_y\right)$$

$$= -W_C{}^2\left(\frac{E_X}{B} \text{ m } W_C V_y\right) V_y = \pm i V_\perp e^{iw_c t} - \frac{E_X}{B}$$

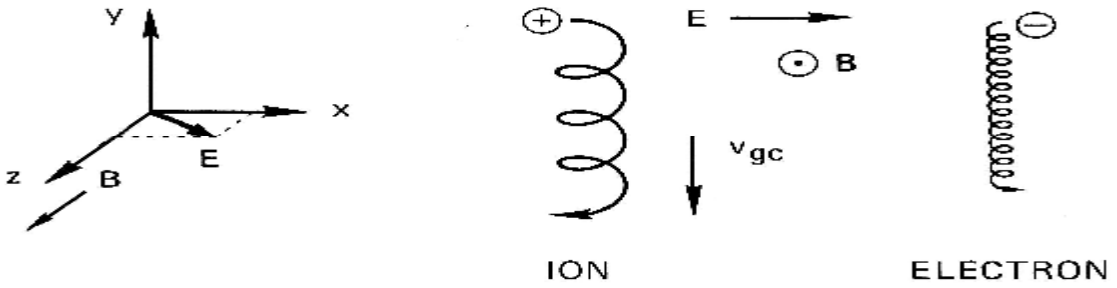
نلاحظ من المعادلة الخاصة بسرعة مركز التدويم ان هذه السرعة هي مقدار ثابت لايعتمد على نوع الشحنة او طاقتها او حتى كتلتها :

١) ان الجسيمة في النصف الأول من الدورة تكتسب طاقتها من المجال الكهربائي ويحصل لها تعجيل وتزداد لديها السرعة العمودية وبذلك يزداد نصف قطر لارمر ، اما النصف الثاني من الدورة فأن الجسيمة سوف تفقد هذه الطاقة وسوف تقل السرعة العمودية وبذلك يقل نصف قطر لارمر. والفرق بين نصف قطر لارمر والتغير في نصف قطر لارمر لوحدة الزمن يمثل سرعة انجراف الجسيمة .

٢) طالما ان الألكترون يدور بعكس اتجاه دوران الأيون فأن الفرق في نصف قطر لارمر يكون بنفس الأتجاه .

٣) في حالة ان الجسيمات تختلف بالكتلة ولكن لها نفس الطاقة ، فأن الأقل كتلة يكون لها اقل نصف قطر لارمر وبهذا يكون الأنجراف اقل لدورة واحدة ولكن لها عدد دورات اكبر وبهذا يتعادل مقدار الأنجراف في الحالتين .

٤) عندما تكون الجسيمتين لهما نفس الكتلة ولكن بطاقات مختلفة فأنه سوف يكون لها نفس التردد الدوراني ولكن الذي له طاقة اقل يكون له اقل نصف قطر لارمر ، وبهذا يحصل على اقل طاقة من المجال الكهربائي وان مقدار التغير في نصف قطر لارمر يقابله تغير كبير بالطاقة وبهذا يحصل التعادل ايضاً .



Particle drifts in crossed electric and magnetic fields.

س/ مجال مغناطيسي مقداره (٢ تسلا) أثر على البلازما بوجود مجال كهربائي مقداره (100 v) للسنتمتر ، كم مقدار السرعة ؟

$$V = E/B$$

س/ اشتق علاقة لحساب سرعة انجراف مركز التدويم (Guiding Center Drift (V_g):

$$m\dot{V} = q\left(E + V \times B\right)$$

$$m\dot{V} \times B = q\left(E + V \times B\right) \times B$$

$$0 = q\left(E + V \times B\right) \times B \Rightarrow q\left[E \times B + B \times \left(V \times B\right)\right] = 0$$

بأستخدام القانون

$$A \times \left(B \times C\right) = -B\left(A.C\right) - C\left(A.B\right)$$

$$E \times B - \left(B.B\right)V - B\left(V.B\right) = 0$$

$$E \times B - VB^{2} = 0 \Rightarrow \therefore \quad V_{g} = \frac{E \times B}{B^{2}} = \frac{E}{B}$$

ملاحظات :

- **ان الحركة الدورانية لا تتأثر بالمجال الكهربائي حيث يبقى كل من نصف قطر لارمر (نصف قطر الدوران) و تردد الدوران (W_L) ثابتين .**
- **اضافة الى الحركة الدورانية توجد حركة خطية بأتجاه y– عند وجود مجال كهربائي بأتجاه x ومجال مغناطيسي بأتجاه z بسرعة مقدارها E/B اتجاهها y– ولاتعتمد هذه السرعة على نوع الجسيمة لذلك تسمى *السرعة الأنجرافية لمركز التدويم* *Guiding Center* .**

س/ بين لماذا ان الالكترون والايون بالبلازما لهما نفس السرعة الانجرافية ؟

ج/ ان الالكترون له نصف قطر لارمر صغير ولكن عدد الدوران اكبر (تردد الدوران) اما الايون فان نصف قطر لارمر له كبير لكن عدد الدوران اصغر (تردد الدوران صغير) حسب الكتلة .

س/ بين لماذا كل من الالكترون والايون يتجهان بنفس الاتجاه ؟

ج/ ان الالكترون يتحرك بسرعة دورانية بالمجال المغناطيسي بأتجاه معاكس للحركة الدورانية للايون ، كذلك فأنه يتأثر بالمجال الكهربائي بأتجاه معاكس للايون ايضاً ، ونتيجة لذلك فأنهما يكونان بنفس الاتجاه .

مسـائل :

س/ في بلازما $E = B = 0$ احسب طاقة وزخم الالكترون اذا تبين لك ان سرعته $2\times10^6 m/sec$

س/ احسب الطاقة الحركية الناتجة من حركة انجراف الالكترون والايون اذا كان المجال الكهربائي يساوي 10 Kv/cm والمجال المغناطيسي يساوي 20 KG على فرض ان المجال الكهربائي عمودي على المجال المغناطيسي .

س/ ما مقدار التغير في الطاقة والزخم للأيونات الموجبة لبلازما هيدروجينية محصورة في مجال مغناطيسي شدته 10 KG عند تسليط مجال كهربائي بشكل عمودي بشدة 10 Kv/cm .

س/ مجال مغناطيسي شدته ٣٠٠٠ كاوس احسب التردد الدوراني ونصف قطر لارمر لألكترون طاقته 10 ev وطاقة الأيون 1 ev يتحركان عمودياً على المجال المغناطيسي ؟

س/ لماذا تكون حركة الجسيمات المشحونة بالمجال المغناطيسي لولبية ؟

ج/ ان المجال المغناطيسي لا يؤثر على الجسيمات المتحركة موازية ، وعندما تكون له مركبة عمودية للسرعة فأنها تتأثر بقوة وتصبح حركتها دائرية ومحصلة الحركات تكون حركة حلزونية .

س/ المجال المغناطيسي يقلل التصادم بين الجسيمات المشحونة ؟

ج/ عندما نضع البلازما في المجال المغناطيسي نهمل التصادم ، لان المجال المغناطيسي يجعل الجسيمات تتحرك حركة دورانية بأنصاف اقطار تختلف عن بعضها فلا تتصادم .

س/ ان نصف قطر لارمر للالكترون اقل من نصف قطر لارمر للايون ؟

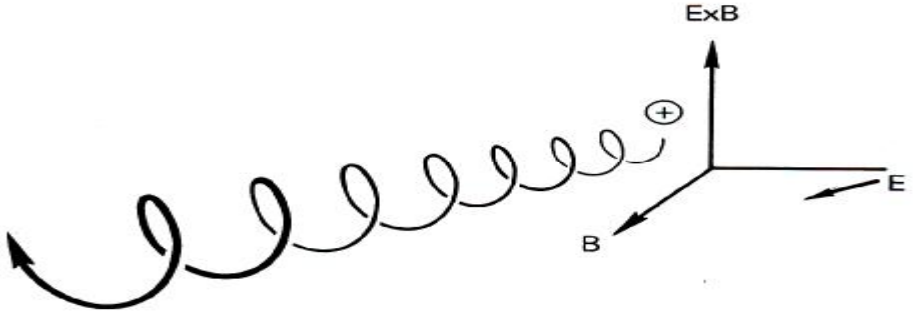
ج/ لأن كتلة الأيون اكبر من كتلة الالكترون .

س/ في بلازما $B = E = 0$ احسب طاقة وزخم الألكترون اذا تبين لك ان سرعته 2×10^6 m/sec

س/ احسب الطاقة الحركية الناتجة من حركة انجراف الألكترون والأيون اذا كان المجال الكهربائي يساوي 10 kv/cm والمجال المغناطيسي يساوي 20kG على فرض ان المجال الكهربائي عمودي على المجال المغناطيسي؟

س/ ما مقدار التغير في الطاقة والزخم للأيونات الموجبة لبلازما هيدروجينية محصورة في مجال مغناطيسي شدته 10kG عند تسليط مجال كهربائي بشكل عمودي بشدة 10 kv/cm ؟

٤.الأنجراف الناتج من تأثير قوة خارجية او التعجيل الأرضي:



The actual orbit of a gyrating particle in space.

تحدث سرعة انجرافية (V_F) عند وجود قوة عمودية على المجال المغناطيسي :-

$$F = \frac{q}{E} \Rightarrow E = \frac{F}{q}$$

$$\therefore V_E = \frac{E \times B}{B^2} \Rightarrow V_F = \frac{F \times B}{qB^2} = \frac{F}{qB}$$

لحساب السرعة الأنجرافية الناتجة من قوة الجذب :-

$$F = mg$$

$$V_F = \frac{F \times B}{qB^2} \Rightarrow \frac{mg \times B}{qB^2}$$

س/ طبقة الأيونوسفير تبقى تدور حول الكرة الأرضية ولا تنجذب نحو مركز الأرض بتأثير قوة الجذب ؟

ج/ لأن قوة الجذب لهذه الطبقة تكون عمودية على المجال المغناطيسي لذا فأن حركة هذه الطبقة تكون عمودية على الأثنين فتكون حركتها بمستوى حول الأرض . اي ان طبقة الأيونوسفير سوف تبقى عالقة حول الكرة الارضية متأثرة بقوة تجعلها تدور حولها ناتجة من قوة الجاذبية والمجال المغناطيسية .

ملاحظات :

- **ان سرعة الأنجراف V_f و V_G عمودية على كل من القوى الخارجية و قوة الجذب والمجال المغناطيسي .**
- **ان اتجاه الأنجراف يعتمد على نوع الشحنة كما نلاحظ من المعادلة :**

$$V_F = \frac{F}{qB} \qquad V_G = \frac{mg}{qB}$$

- **ان هذا النوع من الأنجرافات طالما تحتوي على q فأن ذلك يسبب في جريان الجسيمات بأتجاهات مختلفة فيؤدي الى جريان تيار وهذا يعني خصارة البلازما ، حيث ان كل تيار يمر في البلازما يتسبب في خسارتها .**

ان التيار الناتج من هذه السرعة الأنجرافية يكون بالشكل التالي :

$$\boxed{I = nqVA}$$

حيث:
n: عدد الجسيمات المارة
q: الشحنة
v: سرعة
A: مساحة

$$J = \frac{I}{A} = nqV$$ **الجسيمات المارة المقطع**

ان التيار الكلي $$J = nq\left(m + M\right)\frac{g \times B}{qB^2}$$ **للالكترونات والايونات هو :**

ان الحركة الدورانية للالكترون تكون عكس الحركة الدورانية للايون ولكن القوة المؤثرة عليهم بنفس الأتجاه لذلك يكون الأنجراف لكليهما بأتجاهين متعاكسين .

س/ كيف تثبت ان الألكترونات والأيونات لا تتأثر بالتعجيل الأرضي ؟

ج/ ان اي تيار كهربائي عمودي على مجال مغناطيسي يولد قوة تساوي $F = J \times B$ قوة لورنز : ان التيار الناتج بسبب السرعة النجرافية V_G لألكترون واحد تساوي :

$$F = J \times B$$

$$J = nq\,(m)\frac{g \times B}{qB^2}$$

$$F = \frac{m}{B^2}(g \times B) \times B$$

$$F = \frac{m}{B^2} - B \times (g \times B)$$

$$F = -\frac{m}{B^2} - B \times (g \times B)$$

$$A \times (B \times C) = -B(A.C) - C(A.B)$$

$$F = -\frac{m}{B^2}\left[g(B.B) - B(B.g)\right]$$

$$F = -\frac{m}{B^2} gB^2 \Rightarrow \therefore \boxed{F = -mg}$$

يعود السبب كما في النتيجة اعلاه ان الجسيمات المشحونة تولد تياراً كهربائياً عمودياً على المجال المغناطيسي فتحدث هذه القوة التي بدورها تلغي قوة الجذب فلذلك لا تتأثر الجسيمات المشحونة بمجال الجذب الارضي .

س/ بين مقدار واتجاه القوة المتولدة بسب مرور تيار كهربائي بتأثير قوة الجاذبية ؟

٥.الانجراف الناتج من العزم المغناطيسي Magnetic Moment :

يتولد العزم المغناطيسي عند دوران الجسيمات المشحونة حول خطوط المجال المغناطيسي ، ان دوران الجسيمات المشحونة تجعل تياراً كهربائياً يدور مما يولد مجال مغناطيسي هذا المجال يكون معاكس للمجال المغناطيسي الاصلي ، لذا سميت البلازما مادة دايا مغناطيسية لأنها تولد مجالاً مغناطيسياً معاكس للمجال المغناطيسي الاصلي .

$$\mu = I\,A$$

نلاحظ من المعادلة اعلاه ان العزم المغناطيسي يعتمد على مقدار التيار و مساحة المدار . ان التيار المتولد من الايون يكون بنفس اتجاه دوران الايون ، اما التيار المتولد من الالكترون فيكون عكس دوران الالكترون .

$$m = IA$$

$$I = \frac{e}{t} = \frac{ew_c}{2p} \quad \mathbf{K\ K\ K\ K} \quad (1)$$

$$A = p\,r_L^{\,2} = \frac{p\,V_\perp^{\,2}}{w_c^{\,2}} \quad \mathbf{K\ K\ K} \quad (2)$$

$$\therefore\ m = \frac{ew_c}{2p}.p\ \frac{V_\perp^{\,2}}{w_c^{\,2}}$$

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

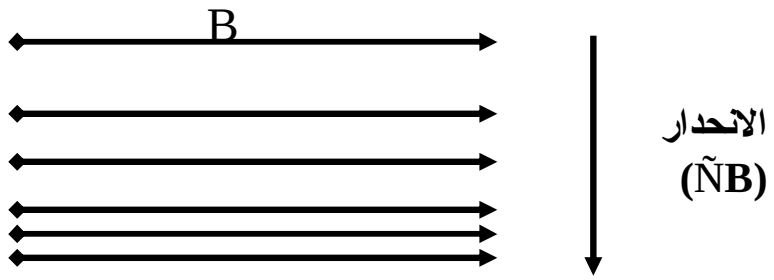
$$m = \frac{w_\perp}{B}$$

μ: العزم المغناطيسي **I:** التيار **A:** المساحة

ملاحظات:

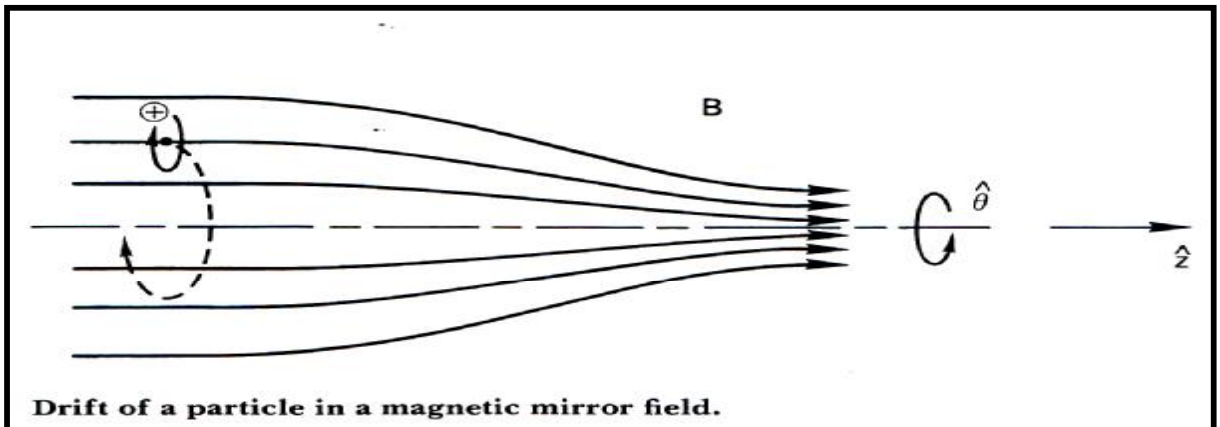
- يستخدم المجال المغناطيسي لحصر البلازما لأنه يحول الطاقة الافقية الى طاقة عمودية .
- ان المجال المغناطيسي المتغير ببطىء لا يتبادل الطاقة مع الجسيمات المشحونة لذلك عند تغيره وحسب معادلة العزم المغناطيسي فأن الزيادة في المجال المغناطيسي تعني الزيادة في الطاقة العمودية وتأثير هذه الزيادة على حساب الطاقة الافقية لذلك يستخدم المجال المغناطيسي لحصر البلازما .

٦. الأنجراف الناتج من انحدار المجال المغناطيسي Magnetic Field Gradient
(B ⊥ Ñ B):



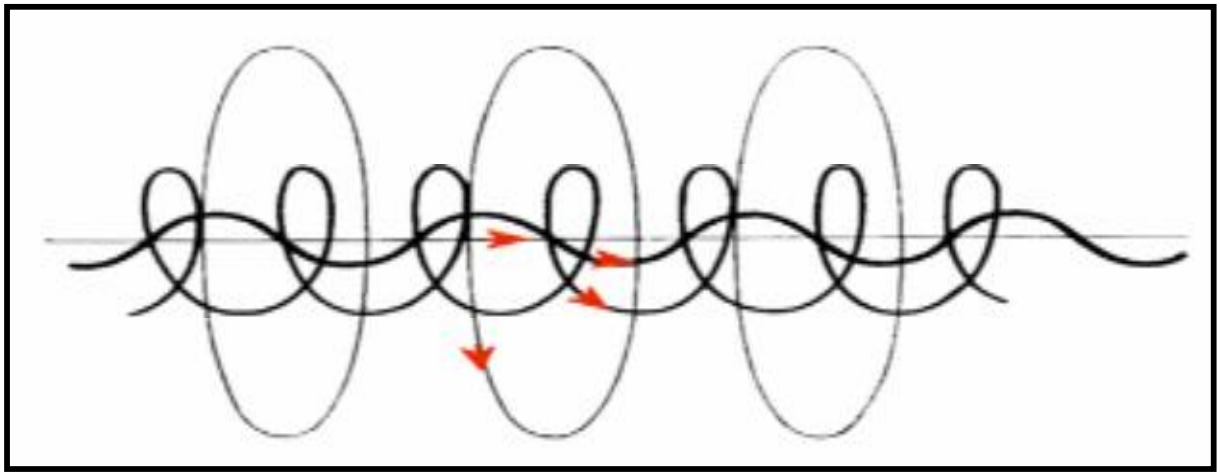
ملاحظات:

- الانحدار في المجال المغناطيسي اما ان يكون عمودي كما في الشكل السابق او موازي كما في الشكل :



Drift of a particle in a magnetic mirror field.

- عند وضع جسيمات مشحونة في وسط فيه المجال المغناطيسي منحدر ، فأن هذه الجسيمات ستنجرف بأتجاه يعتمد على اتجاه المجال المغناطيسي وكما موضح بالشكل :



- ان وجود الانحدار في المجال المغناطيسي يتسبب في انجراف الجسيمات ويمكن حساب سرعة الانجراف كما يلي :

$$U = \frac{w_{\perp}}{B} \Rightarrow w_{\perp} = UB$$

$$F = \nabla w_{\perp} = \nabla UB = U \nabla B$$

$$V_F = \frac{F \times B}{qB^2} = \frac{U \nabla B \times B}{qB^2}$$

$$V_{\nabla B} = \frac{U \nabla B \times B}{qB^2}$$

<u>نستنتج ما يلي :</u>

عند وجود انحدار في المجال المغناطيسي المتعامد مع المجال المغناطيسي ، فأن البلازما سوف تنجرف بأتجاه عمودي على كل من B و ÑB . ويعتمد هذا الانجراف على نوع الشحنة ، والناتج هو تيار كهربائي يسري في جسم البلازما ويتسبب في خسارتها .

<u>اسئـــلة:</u>

س/ اثبت ان السرعة الانجرافية لجسيمات مشحونة في المجال المغناطيسي يكون فيه B ⊥ ΔB يعطى بالمعادلة الاتية :

$$V_{\nabla B} = \frac{U \nabla B \times B}{qB^2}$$

س/ برهن ان :

$$V_{\nabla B} = \frac{w_{\perp} \nabla B \times B}{qB^3}$$

س/ برهن ان :

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

٧. الانجراف الناتج بسبب أنحناء خطوط المجال المغناطيسي V_R Curvature Drift

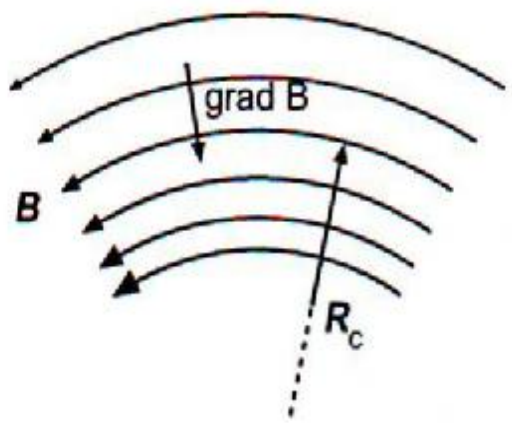
ان استخدام المجال المغناطيسي في حصر البلازما سواء في انظمة الحصر المغناطيسي المفتوحة او المغلقة ، فان خطوط المجال المغناطيسي تكون منحنية دائماً وهذا مايؤدي الى هروب جسيمات البلازما بسبب الأنجراف الناتج من انحراف هذه الخطوط . لنفرض ان البلازما وضعت في مجال مغناطيسي وخطوط المجال منحنية كما موضحة بالشكل ، ان في هذا النوع من المجال المغناطيسي فأن السرعة لها مركبتين هما المركبة العمودية والأفقية ، حيث ان المركبة الأفقية تتسبب في توليد القوة المركزية والتي تعطى بالعلاقة التالية :-

$$F = \frac{mV_{//}^{2}}{Rc^{2}}$$

$$F_{c.f} = \frac{mV_{//}^{2} R_c}{R^{2}{}_c}$$

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

$$V_{Rc} = \frac{mV_{//}^{2} R_c \times B}{R_c^{2} qB^{2}}$$



عندما تكون خطوط المجال المغناطيسي منحنية فأن لجسيمات البلازما طاقة موازية ، وبذلك سوف تنجرف الجيسمات بسرعة تساوي المقدار (V_{Rc}) بأتجاه عمودي على كل من R_C و B . ان اتجاه الانجراف يعتمد على نوع الجسيمة المشحونة (اي ان الايون يدور عكس الالكترون) .
يصاحب اي انحناء في خطوط المجال المغناطيسي انحداراً فيه بأتجاه معاكس لـ R_C (نصف قطر الانحناء) لهذا فأن اي منظومة تحوي على المجال المغناطيسي يحصل فيها انجرافين يعتمد احدهما على الطاقة العمودية للجسيمات والثاني يعتمد على الطاقة الموازية ، لذلك لا يمكن لأحدهما الغاء الأخرى وتكون السرعة النهائية تساوي مجموع السرعتين :

$$V_{ÑB+R} = V_{ÑB} + V_R$$

تعتمد على السرعة العمودية

تعتمد على السرعة الموازية

- ان هذا الأنجراف يعتبر من اخطر الأنجرافات في مجال حصر البلازما وذلك لأن الجسيمات تنجرف مولدة تيار متجه نحو الجدران ولايمكن السيطرة عليه . في توزيع ماكسويل للجسيمات تكون $E_{ava.} = 3/2\ KT$ وان السرعة العمودية لها مركبتان عمودية على المجال المغناطيسي

لذلك يمكن كتابة معادلة السرعة الحرارية كمايلي :-

$$V_{th.}^{2} = V_{//}^{2} + \frac{1}{2}V_{\perp}^{2}$$

س/ برهن بأن الانجراف الكلي لمنظومة التوكوماك يساوي المقادير التالية :

$$V_{\nabla B+R} = \left(\frac{m}{q}\right)\frac{R_C \times B}{B^2 R_C^{\ 2}}\left(V_{//}^{2} + \frac{1}{2}V_{\perp}^{2}\right) \mathbf{L\ L\ L}\ (1)$$

$$V_{\nabla B+R} = \pm\frac{V_{th}^{\ 2}}{R_C w_c}\ \mathbf{L\ L\ L}\ (2)$$

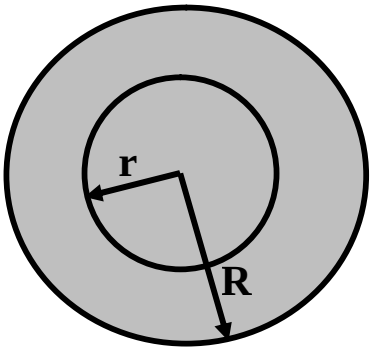
$$V_{\nabla B+R} = \frac{2KT}{qBR}\ \mathbf{L\ L\ L}\ (3)$$

$$V_{\nabla B+R} = \pm\frac{r_L V_{th}}{R_C}\ \mathbf{L\ L\ L}\ (4)$$

$$\boxed{\begin{array}{l} V_{\nabla B}\ a\ V_{\perp}^{\ 2}\ \perp\ \nabla B \times B \\ V_R\ a\ V_{//}^{\ 2}\ \perp\ R_C \times B \end{array}}$$

* عندما تكون السرعة الموازية مساوية للسرعة العمودية فتلغي واحدة الاخرى ولا يحدث انجراف . ان الانجراف الكلي في منظومة توكوماك عبارة عن الانجراف للمنظومتين :

$$\boxed{V_{\nabla B+R} = \frac{2KT}{qBR}}$$

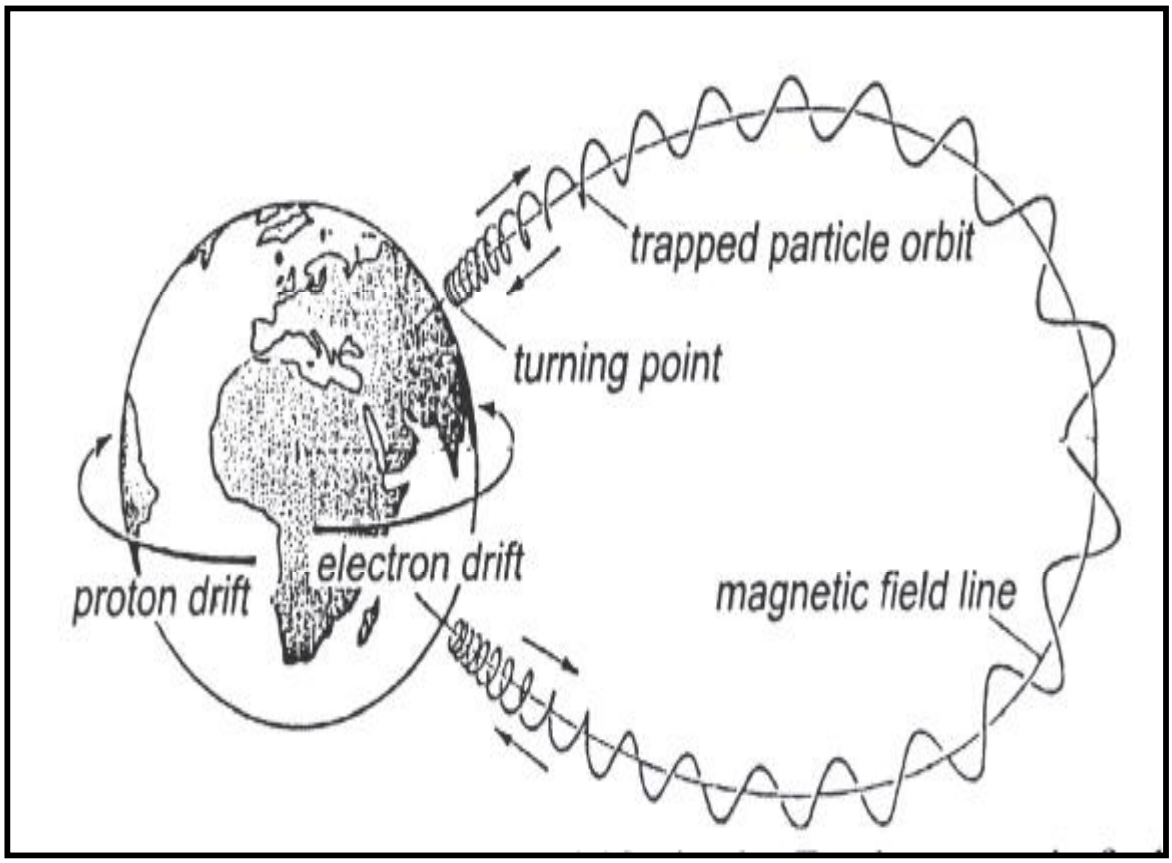


R: Major Radius (3 – 5) m
r: Minor Radius (0.5) m

(منظومة التوكوماك لحصر البلازما)

ملاحـظة:

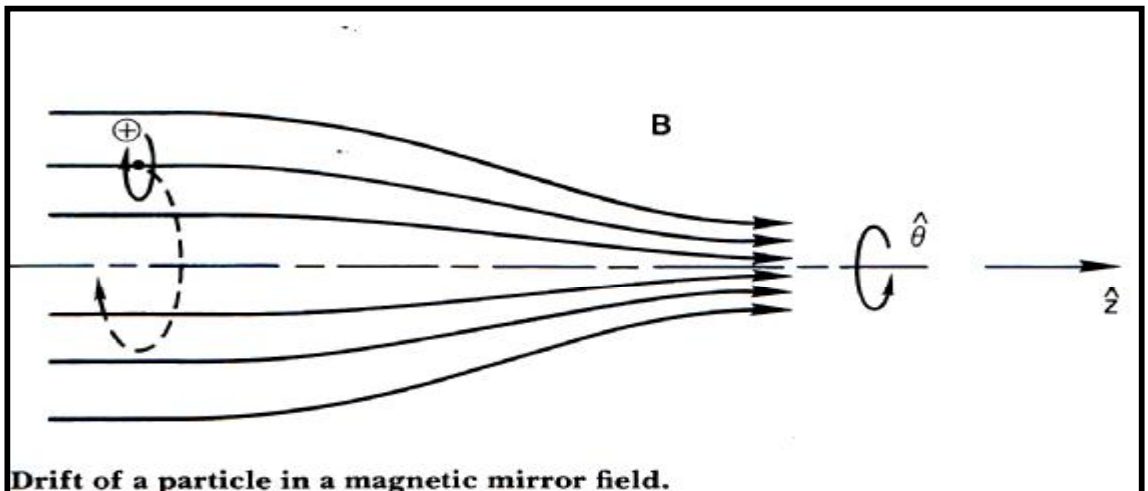
(R) تستخدم لحساب سرعة الانجراف ، اما (r) فتستخدم لحساب الزمن من السرعة عن طريق المعادلة التالية :
V = X / t



س/ في منظومة توكوماك تجريبية يتغير فيها المجال المغناطيسي ببطىء ، احسب نسبة تغير نصف قطر لارمر عندما يزداد المجال المغناطيسي بمقدار ٩ مرات ؟

٨. الانجراف الناتج من الأنحدارفي المجال المغناطيسي بموازاة المجال المغناطيسي: (ÑB//B)

ان الجسم الشحون الذي يتحرك في مجال مغناطيسي منتظم تكون حركته منتظمة حيث يبقى نصف قطر لارمر ثابت وله عزم مغناطيسي ، اما حركة الجسم المشحون في مجال مغناطيسي غير منتظم وفيه انحدار موازي لأتجاه المجال المغناطيسي اي ان خطوط المجال تتقارب ، ويمكن الاستفادة من هذا الموضوع لعمل منظومات لحصر البلازما وعكسها كما في المراة عندما تعكس الموجات الكهرومغناطيسية .



Drift of a particle in a magnetic mirror field.

س/ اثبت ان العزم المغناطيسي (U) لمنظومة يتغير فيها المجال المغناطيسي ببطىء كمية ثابتة؟

ان حركة الجسيمات المشحونة في سلك يقطع خطوط المجال يعطى بقانون فراداي:

$$e.m.f = -\frac{d\Phi}{dt} = \oint E d\mathbf{l}$$

$$\Phi = \int_s B.dA \Rightarrow \oint E d\mathbf{l} = -\frac{d\int_s B.dA}{dt}$$

$$dW_\perp = -e\oint E d\mathbf{l} = e\int_s \dot{B} dA = e\,\dot{B}\,A = e\,\dot{B}\,p r_L^{\,2}$$

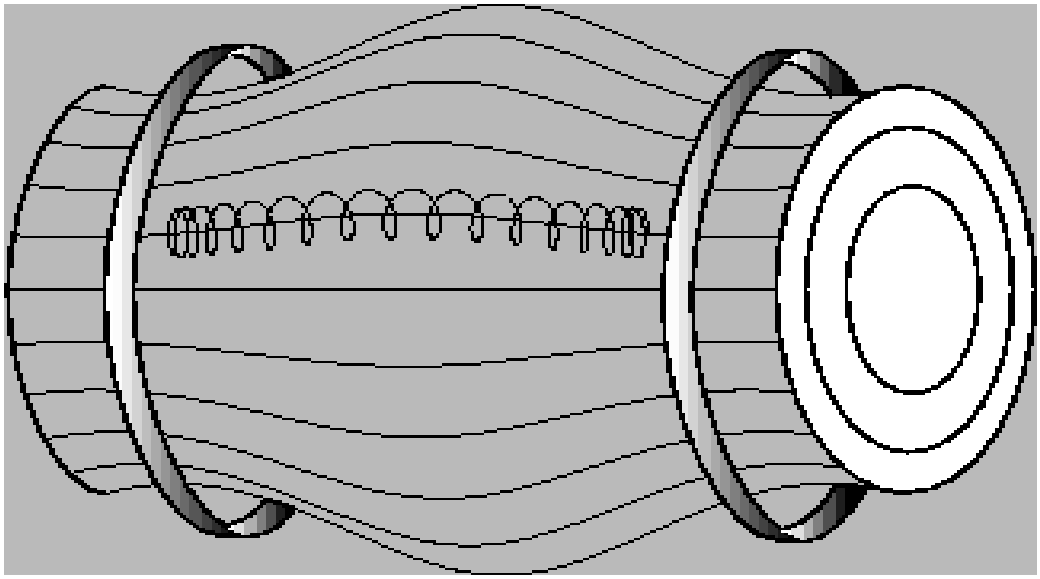
$$dW_\perp = e\,Bp\,\frac{\dot{V}_\perp^{\,2}}{W_C^{\,2}} = e\,\dot{B}\,pm\,\frac{V_\perp^{\,2}}{qBW_C}\left(\frac{2}{2}\right)$$

$$\Rightarrow = \frac{2p}{W_C} W_\perp \frac{\dot{B}}{B} \Rightarrow \therefore \frac{2p}{W_C}\dot{B} = dB$$

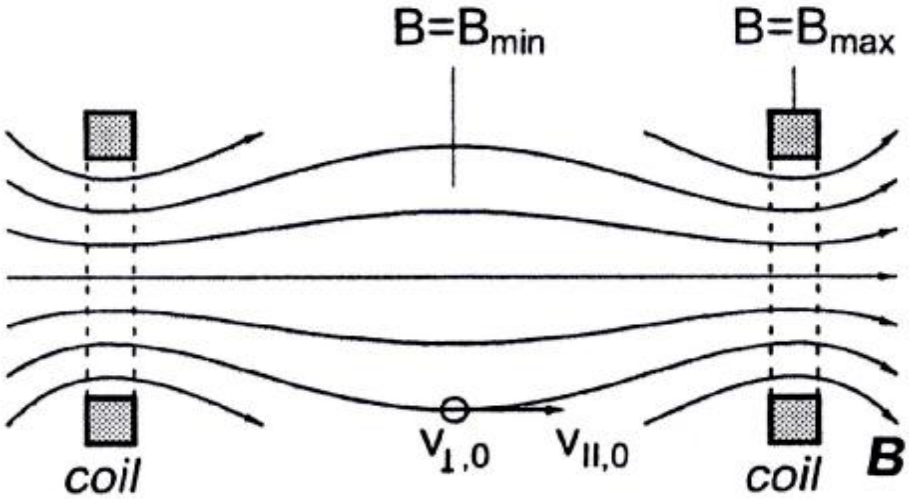
$$\frac{dB}{B} W_\perp = dW_\perp \Rightarrow \frac{dW_\perp}{W_\perp} - \frac{dB}{B} = 0 \Rightarrow d\left(\frac{W_\perp}{B}\right) = 0 \Rightarrow dU = 0$$

المرأة المغناطيسية Magnetic Mirror :

وهي عبارة عن منظومات تستخدم المجال المغناطيسي لحصر البلازما حيث ان المجال المغناطيسي الذي يتقارب ببطىء يمكنه حصر البلازما حيث تنحني الجسيمات بمدارات دائرية وبزوايا قائمة على اتجاه المجال المغناطيسي الرئيسي وتتباطىء الجسيمات اي تقل السرعة الموازية تدريجياً على طول اتجاه المجال الرئيسي واخيراً تنعكس . يجب ان تكون هناك مرأتين في كل منظومة حصر مغناطيسية .



تنعكس الجسيمات عندما تصل سرعتها الموازية صفر وتكون سرعتها العمودية اعلى ما يمكن .
R: نسبة المرأة وتكون اكبر من ١ دائماً ، وهي تمثل النسبة بين شدة المجال المغناطيسي عند الاطراف الى شدته في الوسط.



***المرايا المغناطيسية*:** هو ترتيب للمجال المغناطيسي ينتج من تيارات كهربائية تسري بأتجاه واحد في ملفين متوازيين ، يكون المجال المغناطيسي كبيراً عند الاطراف وخفيفاً في الوسط ويتغير المجال المغناطيسي ببطىء وهذا ما يجعل تغير نصف قطر لارمر منتظماً وعملية المرأة تعتمد على ثبوت العزم عند الاطراف و الوسط .

فلو فرضنا ان شدة المجال المغناطيسي في منطقة الوسط هي $B_\circ$ وعند الاطراف $RB_\circ$:

$$U = \frac{W_\perp}{B}$$

$$U_\circ = \frac{W_{\perp\circ}}{B_\circ} = \frac{mV_{\perp\circ}^2}{2B_\circ}$$

$$U_R = \frac{W_{\perp R}}{RB_\circ} = \frac{mV_{\perp R}^2}{2RB_\circ}$$

$$dU = 0 \Rightarrow U_\circ = U_R \Rightarrow \frac{mV_\perp^2}{2B_\circ} = \frac{mV_{\perp R}^2}{2RB_\circ}$$

$$\therefore RV_{\perp\circ}^2 = V_{\perp R}^2$$

نستنتج بأن مربع السرعة العمودية عند الاطراف سوف تكون اكبر بمقدار R من المرات من مربع السرعة العمودية في الوسط .

***وحسب قانون حفظ الطاقة* :**

$$\left[\frac{1}{2}mV_{//\circ}^2 + \frac{1}{2}mV_{\perp\circ}^2\right] = \left[\frac{1}{2}mV_{//R}^2 + \frac{1}{2}mV_{\perp R}^2\right]$$

ان الطاقة الموازية و العمودية في الوسط هو نفسه مجموع الطاقة العمودية والموازية عند الاطراف.

$$V_{//\circ}^2 + V_{\perp\circ}^2 = V_{//R}^2 + V_{\perp R}^2$$

وبالتعويض عن قيمة

$$V_{\perp_R}{}^2 = RV_{\perp_\circ}{}^2 \quad V_{//_\circ}{}^2 + V_{\perp_\circ}{}^2 = V_{//_R}{}^2 + RV_{\perp_\circ}{}^2 \Rightarrow V_{//_\circ}{}^2 = V_{\perp_\circ}{}^2 (R-1$$

$$\frac{V_\perp}{V_{//}} = \frac{1}{\sqrt{R-1}}$$

$$\therefore Tan\,\Phi = \frac{V_\perp}{V_{//}} = \frac{1}{\sqrt{R-1}}$$

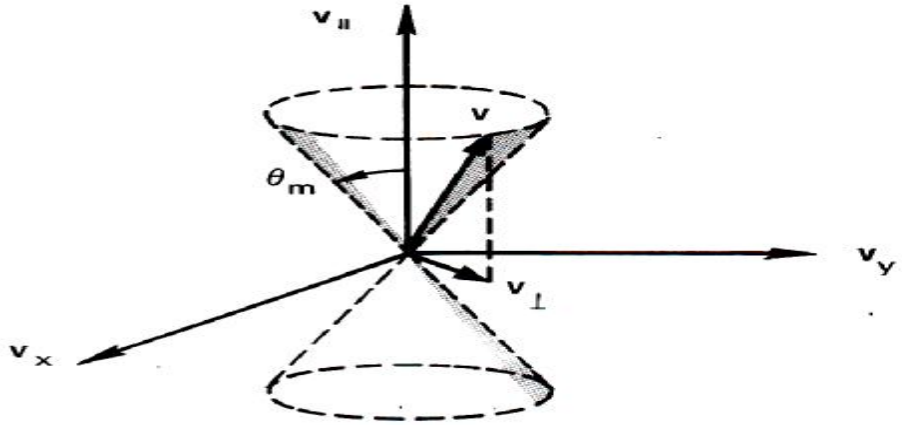
معادلة الجسيمات غير المحصورة

V⊥

V//

$1 - Tan\ \Phi$ ***معادلة الجسيمات غير المحصورة***

حيث Φ هي زاوية صلبة تسمى زاوية الفقد ، وهي زاوية الفضاء السرعي لمخروط الفقد كما في الشكل:



The loss cone.

*** كل جسيمة تقع في مخروط الفقد تخرج خارج المنظومة مباشرة .**

<u>ملاحظات :</u>

- **بزيادة R تزداد كفائة المنظومةحيث يقل مخروط الفقد حجماً ، وكل الجسيمات التي تقع داخل المخروط غير محصورة اصلاً .**
- **لماذا تكون الالكترونات اكثر عرضة للخسارة من الايونات ؟**

في غياب التصادم ، مخروط الفقد لا يعتمد على الشحنة او الكتلة اما بوجود التصادم فأن بعض الجسيمات تنحرف بأتجاه مخروط الفقد وبذلك تزداد نسبة هروب الجسيمات ، وبما ان الالكترونات لها تردد تصادمي كبير (لان كتلتها صغيرة) اكبر من الايونات فهي اكثر عرضة للهروب من الايونات .

- **ان الجسيمات المشحونة داخل منظومة الحصر (المرايا) هي غير متناظرة في السرعة ؟**

لأن قسم من هذه السرع تقع في منظومة مخروط الفقد .

- **ان المجال المغناطيسي الارضي هو اكبر مرأة نعرفها حيث ان المجال قوي عند القطبين وضعيف عند الوسط .**

أهم خصائص منظومة المرايا المغناطيسية :

انها تعمل بشكل مستمر ، وليست نبضية . اما *عيوبها* هي هروب الجسيمات من زاوية الفقد .

س/ كيف تملأ (تحقن) منظومة المرايا المغناطيسية بالجسيمات المشحونة ؟

١) تطلق جسيمات متعادلة ذات طاقة عالية وتتصادم مع الذرات داخل المنظومة لتتأين وتبقى داخله .

٢) شعاع من الايونات الموجبة تطلق عبر خطوط المجال المغناطيسي في تفريغ قوي كثيف .

اسئلــة:

س/ أحسب نصف قطرلارمر(R_L) للديترونات الموجبة والتي لها طاقة 10 K ev في منظومة حصر لها زاوية فقد 45° وشدة مجال مغناطيسي في وسطه ٠.٥ تسلا .

س/ ما نسبة الجسيمات المحصورة في منظومة مرأة مغناطيسية فيها $R_m = 8$ ؟

س/ كيف يمكن للجسيمات ان تتأثر وهي تتحرك بشكل موازي للمجال المغناطيسي ؟

س/ متى تتأثر السرعة الموازية بالمجال المغناطيسي ؟

ج/ تتأثر السرعة الافقية عندما يكون المجال المغناطيسي متغيراً ، اي بوجود انحدار في المجال المغناطيسي . بشكل عام ان المجال المغناطيسي لا يتبادل الطاقة مع الجسيم ، اي لايزيد سرعتها (بينما المجال الكهربائي يتبادل الطاقة) حسب قانون حفظ الطاقة ولكن عندما يتغير المجال المغناطيسي :

١. ببطىء تتحول الطاقة الافقية الى طاقة عمودية .

٢. عندما يتغير بسرعة يحدث استقطاب اي فصل الجسيمات الموجبة عن السالبة فيحدث مجال كهربائي وهذا المجال قد يضيف طاقة للجسيمات المشحونة .

وتعتبر هذه طريق لتسخين البلازما وتسمى عملية التسخين هذه بالأنضغاط الكضيم **Adiabatic Compression** ، ان التيار المتناوب **A.C** يستخدم للتسخين حيث يعمل أستقطاب (بتردد المجال المغناطيسي) مما يؤدي الى توليد مجال كهربائي متردد وهذا المجال يعطي طاقة للجسيمات .

<u>الانضغاط الكظيم :</u> وهي طريقة لتسخين البلازما وتتم بأمرار تيار كهربائي من نوع **A.C** (متناوب) لتوليد مجال مغناطيسي متناوب يتغير مع الزمن وهذا بدوره يستقطب الجسيمات وبالتالي يتولد مجال كهربائي يضيف طاقة للجسيمات المشحونة وهذه الطاقة تذهب كطاقة افقية وبوجود المرأة تتحول الى طاقة عمودية بالتالي تسخين البلازما . تتم اثناء عملية التسخين زيادة الطاقة الحركية للجسيمات تدريجياً بواسطة اعطاء نبضات من التيار المتناوب على المجال المغناطيسي المساط على البلازما .

س/ على اي اساس يمكن للمجال المغناطيسي المتغير مع الزمن اعطاء طاقة للجسيمات ؟

ج/ استناداً الى معادلة ماكسويل الثالثة :

عندما يتغير المجال المغناطيسي مع الزمن يتولد مجال كهربائي نتيجة استقطاب $\nabla \times E = -B$ الجسيمات وهذا المجال يمكن ان يضيف طاقة افقية او موازية للجسيمات

س/ ما نسبة تغير السرعة العمودية في مرأة مغناطيسية عندما تتغير نسبة المرأة **R** من**9→4** ؟

ج/

$$V_{\perp R}^{2} = RV_{\perp \circ}^{2}$$

$$\frac{V_{\perp R}}{V_{\perp \circ}} = \sqrt{R} = \sqrt{\frac{4}{9}} = \frac{2}{3}$$

تغير المجال المغناطيسي مع الزمن :

بوجود المجال المغناطيسي ، فأن الجسيمات المشحونة سوف تتأثر بقوة عمودية هي قوة لورنز وان المجال المغناطيسي الثابت او غير المتغير لايضيف طاقة الى هذه الجسيمات وحسب العلاقة $F = qv \times B$ وان الجسيمات تدور في مدار نصف قطره يساوي نصف قطر لارمر ولكن عند تغير المجال المغناطيسي فأنه سوف يتولد مجال كهربائي استناداً الى معادلة ماكسويل :-

$$\nabla \times E = -B$$

وان المجال الكهربائي هذا يتسبب في تعجيل الجسيمات ، ان التغير البطيء في المجال المغناطيسي يتسبب في تغير الطاقة العمودية للجسيمات استناداً الى :-

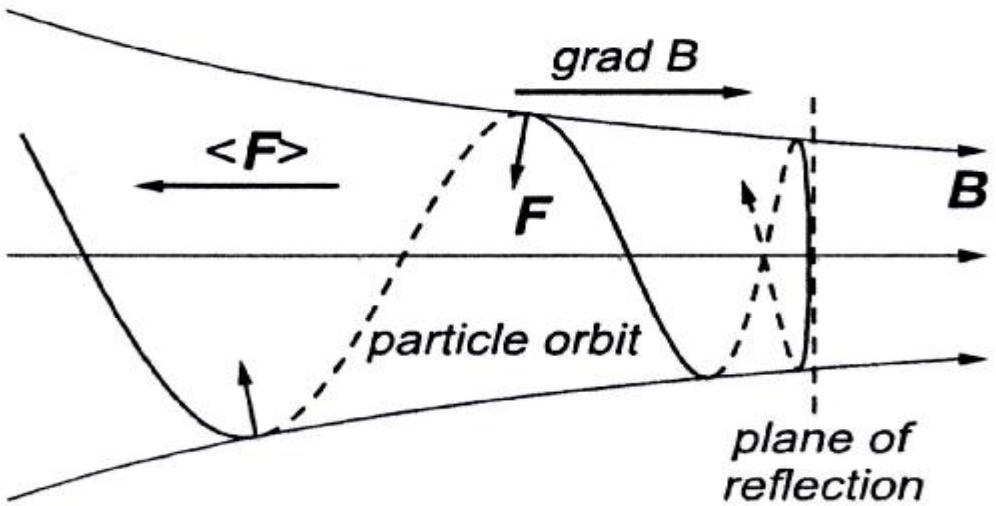
$$m = \frac{dW_{\perp}}{dB}$$

$$d\left(\frac{1}{2}mv^{2}\right) = mdB$$

$$\therefore dm = 0$$

μ كمية ثابتة عند تغير المجال المغناطيسي ببطيء

ان مدار لارمر يتمدد ويتقلص نتيجة هذا التغير في المجال المغناطيسي وبذلك تكتسب الجسيمات الطاقة العمودية او المستعرضة وحيث يمكن اثبات النظرية القائلة (ان خطوط الفيض المغناطيسي في مدار لارمر هي كمية ثابتة) .



س/ اثبت بأن الفيض المغناطيسي خلال مدار لارمر مقدار ثابت ؟

ج/

$$\Phi = BA$$

$$\Phi = B p r_L^{\ 2}$$

$$\Phi = B p \frac{m^2 V_\perp^{\ 2}}{q^2 B^2}$$

$$\Phi = \frac{2 p m B \ \frac{1}{2} m V_\perp^{\ 2}}{q^2 B^2}$$

$$\Phi = \frac{2 p m}{q^2}\left(\frac{W_\perp}{B}\right) \Rightarrow \therefore \quad \Phi = \frac{2 p m}{q^2}(U)$$

اي ان Ø تعتبر كمية ثابتة اذا كانت μ كمية ثابتة ، حيث ان الحركة في اتجاه المجال لاتتغير ويمكن التغير فقط في الطاقة العمودية وهذا ناتج من الشغل الذي ينجزه المجال الكهربائي والذي يصاحب اي تغير بالمجال المغناطيسي بالنسبة للزمن . يمكن الأستفادة من هذه الظاهرة في عملية تسخين البلازما ، ان هذه الخاصية تسمى الأنضغاط الكظيم Adiabatic Compression ويستفاد من عملية تسخين البلازما (التسخين المغناطيسي للبلازما) بزيادة الطاقة الحركية للجسيمات المشحونة تدريجياً وذلك بزيادة شدة المجال المغناطيسي المسلط على البلازما .

بما ان U كمية ثابتة سوف تكون Φ كمية ثابتة لأن ($2\pi\ m / q^2$) كمية ثابتة .

<u>ملاحظات :</u>

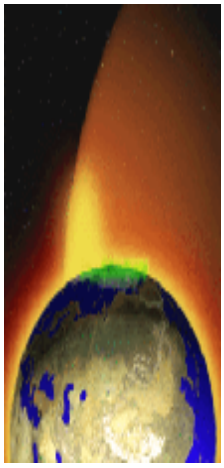
- **نسبة الجسيمات المحصورة :** $\mathbf{Tan\Phi = 1 / (R-1)^{1/2}}$

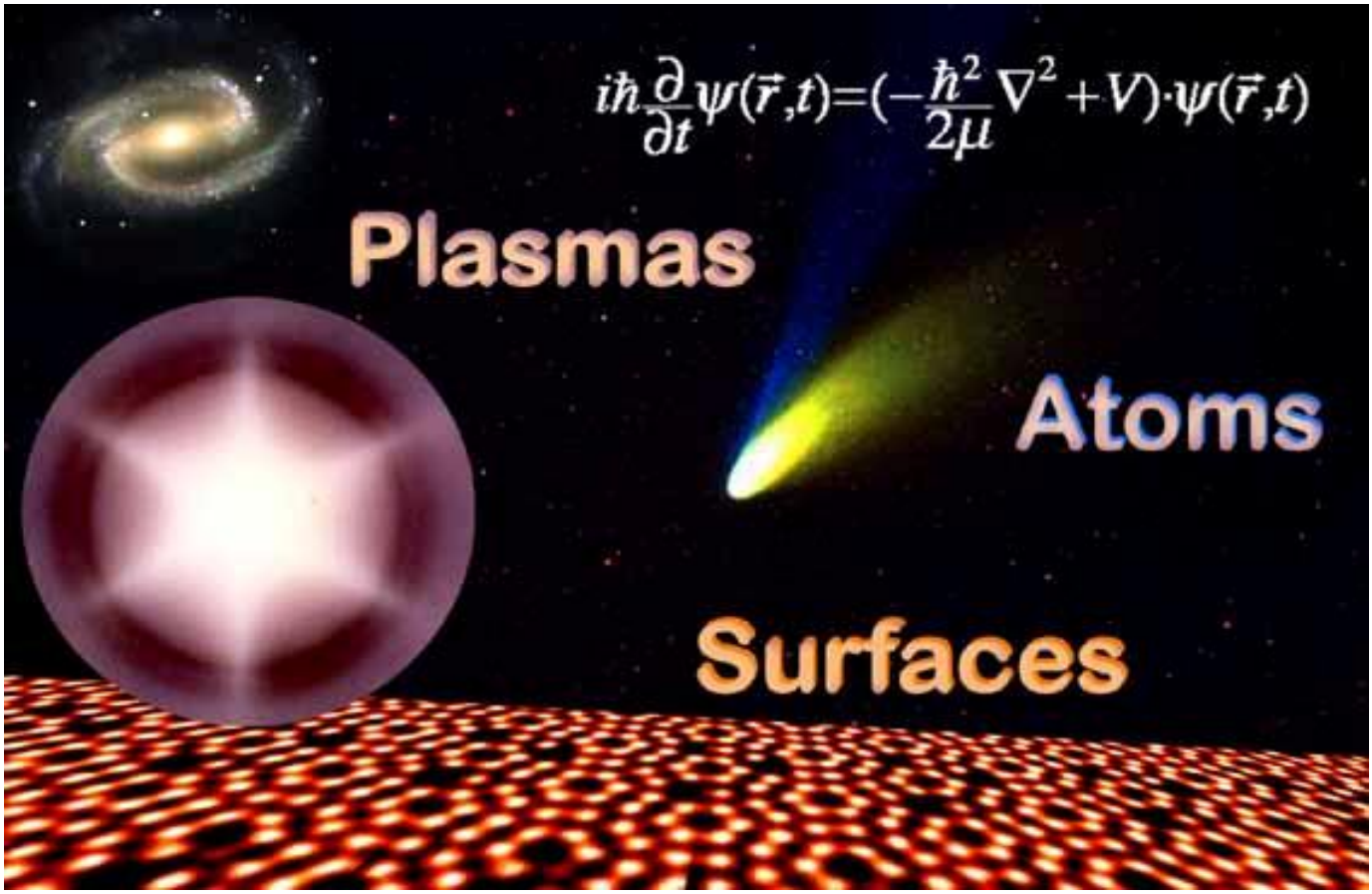
- نسبة الجسيمات غير المحصورة : $1 - \tan\Phi$

س/ قارن بين منظومة المرايا المغناطيسية وطريقة الانظغاط الكظيم (تسخين البلازما) :

المرايا المغناطيسية	تسخين البلازما(الأنضغاط الكظيم)
١. تستخدم تيار كهربائي بأتجاه واحد (D.C)	١. تستخدم تيار كهربائي متناوب (A.C)
٢. تستخدم لحصر البلازما .	٢. تستخدم لتسخين البلازما .
٣. عملها تحويل الطاقة الافقية الى طاقة عمودية.	٣. عملها تحويل الطاقة العمودية الى طاقة افقية.
٤.مبدأ عملها يعتمد على تغير المجال المغناطيسي ببطىء .	٤. مبدأ عملها يعتمد على تغير المجال المغناطيسي بسرعة .

	Typical ranges of plasma parameters: orders of magnitude (OOM)	
Characteristic	**Terrestrial plasmas**	**Cosmic plasmas**
Size in metres	10^{-6} m (lab plasmas) to 10^{2} m (lightning) (~8 OOM)	10^{-6} m (spacecraft sheath) to 10^{25} m (intergalactic nebula) (~31 OOM)
Lifetime in seconds	10^{-12} s (laser-produced plasma) to 10^{7} s (fluorescent lights) (~19 OOM)	10^{1} s (solar flares) to 10^{17} s (intergalactic plasma) (~17 OOM)
Density in particles per cubic metre	10^{7} m^{-3} to 10^{32} m^{-3} (inertial confinement plasma)	10^{0} (i.e., 1) m^{-3} (intergalactic medium) to 10^{30} m^{-3} (stellar core)
Temperature in kelvins	~0 K (crystalline non-neutral plasma[9]) to 10^{8} K (magnetic fusion plasma)	10^{2} K (aurora) to 10^{7} K (solar core)
Magnetic fields in teslas	10^{-4} T (lab plasma) to 10^{3} T (pulsed-power plasma)	10^{-12} T (intergalactic medium) to 10^{11} T (near neutron stars)




$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi(\vec{r},t)=(-\frac{\hbar^2}{2\mu}\nabla^2+V)\cdot\psi(\vec{r},t)$
Plasmas
Atoms
Surfaces