



فيزياء البلازما

المحاضر: كلفي ميرسيلا

جامعة ألو

قسم العلوم الفيزيائية

فصل الربيع 2002



PLASMA PHYSICS

Lecturer: Kalevi Mursula

University of Oulu

Department of Physical Sciences

Spring term 2002



1 المقدمة Introduction

1.1 أساسيات وتاريخ Background and history مرجع رقم (B,K)

تعتبر فيزياء البلازما احد أفرع علم الفيزياء، بل وتعتبر أقدم من بعض نظريات الفيزياء الحديثة الأساسية، مثل النظرية النسبية وميكانيكا الكم. تطور الشكل الحديث لفيزياء البلازما بعد الحرب العالمية الثانية. ولا زالت فيزياء البلازما لا تعتبر جزء من الفيزياء الحديثة لأنها تعتمد بالأساس على الفيزياء الكلاسيكية، وبالأخص على علم الالكتروديناميكا الكلاسيكية (معادلات ماكسويل) والميكانيكا الكلاسيكية.

كلمة "بلازما" هي كلمة يونانية تعني "مصبوب" أو "متشكل". هذه الكلمة صيغت في العام 1929 بواسطة العالمين Langmuir و Tonks عندما كانوا يقومون بتجاربهم على التفريغ الكهربائي للغازات. وعلى كل حال، تمت دراسة ظاهرة البلازما في ظروف مخبرية قبل ذلك بكثير. ففي العام 1879 استخدم العالم Crookes مصطلح "الحالة الرابعة للمادة" لوصف حالة غاز متأين وعند درجة حرارة مرتفعة. هذا الاسم لازال يستخدم بكثرة بالرغم من انه ليس صحيحا تماما كما سوف نناقش هذا الأمر لاحقا بشيء من التفصيل.

على كل حال، في وقت مبكر من تاريخ البلازما حتى الأعوام 1950 تركزت الأبحاث على الملاحظات والمشاهدات والتي لم تكن لها علاقة بفيزياء بلازما الفضاء. حاليا، فيزياء بلازما الفضاء تعتبر جزء هام من فيزياء البلازما بالرغم من ان فيزياء البلازما في المختبر تقدمت بشكل كبير على صعيد العلوم.

فيزياء بلازما الفضاء جزء من فيزياء الفلك الذي يدرس الفضاء حول الأرض بواسطة المراقبة المباشرة أو من خلال المراقبة عن بعد. وترتكز دراسة فضاء الأرض في علم الفيزياء الفلكية على الشمس، والرياح الشمسية، والكواكب (وفي بعض الأحيان النجوم) وطبقة المجنيتوسفير وطبقة



الايونوسفير للكواكب وأقمارها. وفي الآونة الأخيرة، استخدمت النتائج المتعلقة بفيزياء بلازما الفضاء لدراسة بلازما الأجسام البعيدة مثل النجوم والحلقات النجمية إلى آخره.

تعتبر ظاهرة الشفق Auroras ظاهرة بصرية هامة ترتبط بعمليات بلازما الفضاء والتي كثيرا ما أبهرت الناس لآلاف السنوات. وتفسر وثائق مكتوبة إن ظاهرة الشفق موجودة منذ أكثر من ألفي عام. وتسمية "الشفق Auroras" هو في الحقيقة اسم لاتيني يعني إلهة الفجر. وكما نعرف الآن الشفق يحدث حول أو ما قبل منتصف الليل، وليس لها علاقة بأشعة الشمس التي تظهر عند الفجر. ومن المحتمل أن مصطلح الشفق القطبي يعود إلى العالم جاليليو جاليلي. الشفق القطبي والشفق الجنوبي يعودا إلى الشفق الذي يظهر في القطب الشمالي أو القطب الجنوبي للكرة الأرضية على التوالي.

دراسات مبكرة أخرى لها علاقة بفيزياء الفلك مثل مراقبة سلوك المجال المغناطيسي للأرض. في العام 1730 لاحظ العالمين Celcius و Hjorter خلال ظهور قوي للشفق إن إبرة البوصلة تغير اتجاهها. هذه الملاحظة ارتبطت بالشفق والتغيرات في المجال المغناطيسي، وبعد فترة أصبحت هذه الظاهرة تمثل طريقة مهمة لمراقبة عمليات البلازما الفضائية، وبالأخص التيارات الفضائية. وبعد تطوير أول مقياس للمجال المغناطيسي (المجنيتمتر) بواسطة العالم Gauss في العام 1832، فإن التغيرات في المجال المغناطيسي للأرض على المدى القصير والمدى الطويل أصبح هذه الأيام مراقب بمئات الأنواع المختلفة من أجهزة قياس المجال المغناطيسي على مختلف أرجاء العالم، وفي الآونة الأخيرة شملت المراقبة أيضا مجال الفضاء.

كان من الواضح إن التغيرات في المجال المغناطيسي يعود إلى التيارات الكهربائية في الفضاء فوق مناطق الشفق. باحثون نرويجيون (Birkeland و Stormer) درسوا الشفق بواسطة معدات بصرية مختلفة واثبتوا انه معظم ضوء الشفق ينبعث من ارتفاع يتراوح بين 100 إلى 500 كيلومتر. وفي وقت متأخر، تم رصد ارتفاع التيارات الكهربائية على ارتفاع أكبر بقليل من 100 كيلومتر.

اشتهر العالم Birkeland بتجربته التي تعرف باسم Terrella التي قام بها في العام 1896 حيث وجه شعاع من الإلكترونات في اتجاه كرة ممغنطة بشكل قطبي، مثل الأرض. انحرف الشعاع بواسطة المجال المغناطيسي إلى خطوط العرض العليا، واصطدم بسطح الكرة بصورة رئيسية على المناطق البيضاء الشكل حول الأقطاب المغناطيسية. وهذه تشابه تماما شكل الشفق القطبي. وتقترح تجربة



Terrella إن الشفق يتكون من أجسام مشحونة تتبع خطوط المجال المغناطيسي وتصطدم بالذرات والجزئيات في طبقات الغلاف الجوي العليا، وتسبب انبعاث الضوء (الشفق).

تتحرك الجسيمات المشحونة بسهولة على استقامة المجال المغناطيسي (ولكن ليس عموديا عليه)، وهذا يسبب توازن لأي فرق جهد كهربى في اتجاه حركة الشحنات. وعليه، فقد اعتبر وعلى فترة طويلة نمودجا مطلقا وهو عدم وجود مجال كهربى منحاز للمجال أو له علاقة بالتيارات. مثل هذه المجالات الكهربائية تستطيع تسريع الجسيمات لتمكن من توليد ضوء الشفق. ولكن، بالاستناد إلى تلك الدراسات على تيارات الأيونوسفير، اقترح العالم Birkeland في العام 1913 إن المجال الكهربى الناشئ عن التيارات يمكن أن يوجد في طبقة الأيونوسفير فوق منطقة الشفق. هذا الاقتراح الجريء يقابله معارضة كبيرة حتى بعد زمن Birkeland وذلك لأنه لا توجد تقنية نظرية حتى الآن اخترعت تتمكن من إحداث هذه التيارات. كان على اقتراح Birkeland أن ينتظر حتى مراقبة الأقمار الصناعية في الأعوام 1960 و 1970 والتي في النهاية أثبتت إن المجال الكهربى المنحاز والتيارات ليست موجودة فقط بل إنها تقريبا دائمة (ولكن غير مستقرة) في الارتفاعات العالية في الفضاء.

ومن ثم اقترح إن الجسيمات التي تسبب الشفق والاضطراب المغناطيسى ناتج عن الطاقة الشمسية. في الأعوام 1930 قام العالمين Chapman و Ferraro بتكريب نموذج للعواصف المغناطيسية بحيث إن سحب الجسيمات تنبعث بشكل متقطع بواسطة الاضطرابات التي تحدثها الحمم الشمسية. ولكن في العام 1951 اثبت العالم Biermann بواسطة مراقبة المذنبات إن الشمس تبعث باستمرار، وليس بشكل متقطع، سيل من الجسيمات التي متوسط سرعتها حوالي 400 km/s. فيما بعد وفي الأعوام 1960 تم التحقق من ذلك بواسطة قياسات مباشرة بالأقمار الصناعية. هذا السيل من الجسيمات يعرف الآن باسم الرياح الشمسية solar wind. وبعد ذلك مباشرة في العام 1958 تمكن العالم Parker من صياغة أول نظرية واقعية تصف كيف تتكون الرياح الشمسية فوق سمعية كامتداد للهالة الشمسية. وفي العام 1957 افترض العالم Hannes Alfvén إن الرياح المغناطيسية ممغنطة، أي أنها تحمل مجال مغناطيسى معها. هذا المجال الآن يعرف باسم بالمجال المغناطيسى بين الكواكب interplanetary magnetic field والذي يعرف الاختصار (IMF). ومرة أخرى نحتاج إلى تأكيد وجود هذا المجال المغناطيسى بواسطة المراقبة باستخدام الأقمار الصناعية لإثبات وجودها ودراسة خصائصها.



في العام 1958 اقترح العالم Gold مصطلح الكرة المغناطيسية "magnetosphere" للمناطق التي يمنع فيها المجال المغناطيسي الأرضي تدفق الرياح الشمسية. ولأن كثافة الطاقة المغناطيسية وأكثر منها كثافة الطاقة الحركية هي التي تتحكم في الكرة المغناطيسية، فإنه من الممكن كذلك اعتبارها كفقاعة مغناطيسية في الرياح الشمسية. مصطلح الكرة المغناطيسية استمر استخدامه حتى بعد القياسات الفلكية والتي بينت إن الكرة المغناطيسية بعيدة عن كونها كروية الشكل. بل بالعكس إن لها شكل المذنبات بذيل ممتد وطويل ومقدمة مسطحة قليلاً. كذلك وجدت الأقمار الصناعية تركيب معقد ومدعش وديناميكي للكرة المغناطيسية والتي تتكون من بلازما بأنواع مختلفة من الجسيمات وبكثافة تواجد متنوعة. الجزء الكروي الأول اكتشف في العام 1958 بواسطة العالم Van Allen والذي استخدم عداد جايجر في مركبة الفضاء Explorer-1 للكشف عن مناطق الجسيمات ذات الطاقات العالية. هذه المناطق فيما بعد عرفت باسم الحزام الإشعاعي radiation belts، أو حزام Van Allen. فيما بعد تم رصد الحزم الرقيقة بين مختلف طبقات البلازما في الكرة المغناطيسية مثل الفاصل المغناطيسي magnetopause والقوس الصدمي bow shock والفاصل البلازمي plasmopause.

كما إن معرفتنا بالشمس ازدادت بشكل كبير خلال القرن الماضي. بضع 100 عام مضت، لم يكن هناك مشكلة مرتبطة بمصادر الطاقة الشمسية أو النجوم الأخرى. ولكن كان هناك مشكلة كبيرة لها علاقة بمصدر طاقة الشمس وكذلك النجوم الأخرى. لاحظ اللورد كلفن انه من الممكن فقط لمصدر الطاقة المعروف في ذلك الوقت هو طاقة الجاذبية الشمسية، التي من الممكن أن تنتج طاقة لمدة 20 مليون سنة. ومن ناحية أخرى اثبت الجيولوجيون بشكل حاسم إن الأرض أكثر تقدماً في السن. هذه المشكلة كانت فقط لتحل بعد اكتشاف القوة النووية والنظرية النسبية.

الآن نحن نعرف إن الطاقة تأتي من اندماج الأنوية الخفيفة لتكوين أنوية ثقيلة (في الشمس يندمج الهيدروجين ويتحول إلى هيليوم) حيث يتحول جزء صغير من الكتلة إلى طاقة. والمادة في طبقات الشمس الداخلية تكون في حالة بلازما ساخنة جداً وهذا يوفر ظروف مناسبة للتفاعلات النووية لتحدث. والمشكلة الأكثر أهمية في يومنا هذا هي فيزياء البلازما المخبرية حيث يجب أن تحدث عملية التفاعلات النووية بشكل متواصل وبطريقة يمكن التحكم بها لمدة طويلة حيث يمكن الاستفادة من الطاقة الناتجة من هذه العملية. وبالرغم من الأبحاث العلمية المكثفة والتطورات التكنولوجية، فإن الوصول إلى حالة اقتصادية لمفاعل اندماجي اثبت انه صعب جداً، ولازال أمامنا 15 إلى 20 سنة.



ملاحظة أخرى مهمة كان خلفها العالم Hale في العام 1908 وهي إن الشمس لها مجال مغناطيسي. ويكون المجال المغناطيسي السطحي في أشده في البقع الشمسية. والملاحظات المتوالية بعد ذلك أثبتت إن المجال المغناطيسي الشمسي معقد جدا وغير منتظم حتى على مقاييس صغيرة. وعلى المقياس الكبير، وجد إن قطبية المجال المغناطيسي تغير بشكل شبه منتظم كل 11 سنة وبهذا فإن الدورة المغناطيسية والتي تعرف أيضا باسم دورة هال Hale cycle، تحدث كل 22 سنة تقريبا. ولكن من المعروف أيضا إن الشمس أحيانا تدخل بشكل استثنائي بدورة هدوء تعرف باسم (great minima) أي القيمة العظمى الدنيا حيث كل المتغيرات المغناطيسية تختفي تقريبا. يتولد المجال المغناطيسي في قاع طبقة النقل الحراري convection layer حيث يسبب تغير دوران اللب الداخلي الصلب إلى دوران جزئي لطبقة النقل الحراري الخارجية. ويعتبر فهم الحركة الشمسية وديناميكيته من التحديات الرئيسية لفيزياء الطاقة الشمسية.

خارج نطاق دراسة النظام الشمسي، فإن تطوير تقنية الراديو ذو الموجة القصيرة منذ الأعوام 1930 فتح طريقة جديدة تعرف باسم علم فلك الراديو radio astronomy وهو علم مخصص لدراسة الكون من خلال الغلاف الجوي الأرض والغلاف الأيونوسفير. حيث وجد أن جزء كبير من أمواج الراديو ناتج عن ظاهرة bremsstrahlung (الظاهرة المسؤولة عن إنتاج أشعة اكس) للجسيمات المشحونة الساخنة. ولكن، بعد فترة قصيرة اكتشف إن هذه الظاهرة غير كافية لشرح كل أمواج الراديو القادمة من الكون. في العام 1959 اقترح العالم Ginzburg طريقة أخرى، وهي أشعة السنكلترون synchrotron للالكترونات المعجلة في مجال مغناطيسي قوي قد تكون هي المسؤولة عن أمواج الراديو، على سبيل المثال الإشعاع القادم من 1054 بقايا سوبرنوفاء، سديم السرطان Crab Nebula. فيما بعد، اثبت هذا الاقتراح بواسطة قياس استقطاب الإشعاع. ومنذ ذلك الوقت، ازداد الاهتمام بالمجالات المغناطيسية لأنظمة مختلفة في الكون.

ومن اجل تقادي امتصاص حزم الترددات الكبيرة من الطيف الكهرومغناطيسي بواسطة الغلاف الجوي للأرض وغلاف الأيونوسفير، تم إطلاق عدد من الأقمار الصناعية الفلكية في الـ 10 إلى 15 سنة الماضية. هذه الأقمار مخصصة للدراسات الفلكية. وقد أصبح مفهوما من العديد من المشاهدات الفلكية ارتباط هذه الظاهرة بالبلازما. وعلم بلازما الفيزياء الفلكية من الممكن أن يكون احد الأفرع الأساسية في علم فيزياء البلازما في المستقبل القريب.



2.1 الخواص الأساسية للبلازما Basic properties of plasma مرجع رقم (B)

تكون المادة بلازما اذا احتوت على عدد كافي من الجسيمات المشحونة الحرة مثل الالكترونات والايونات بحيث يكون التفاعل الكهرومغناطيسي المتبادل لهم له تأثير أساسي على ديناميكية النظام يؤدي إلى أن يسلك النظام سلوك جماعي. لاحظ إن البلازما لها طبيعة جاهرية. وهذا يعني إنها تحتوي على الكثير من شحنات موجبة وسالبة المتساوية.

يمكن أن نلاحظ السلوك الجماعي على مجموعة صغيرة من الجسيمات المشحونة (والتي تعرف بدرجة التأين) قد تصل إلى 1% من المجموع الكلي للجسيمات. اذا كان مقدار التأين اكبر من 1% فان البلازما تكون قريبة من حالة الموصلية التامة.

وحتى يظهر السلوك الجماعي فان هناك مجموعة محددة من الشروط التي يجب أن تتحقق هذه الشروط تعرف باسم شروط البلازما plasma conditions. وهذا ما سوف نقوم بشرحه وتوضيحه بشيء من التفصيل.

وكما ذكر من قبل، فان البلازما في بعض الأحيان تعرف باسم الحالة الرابعة للمادة، بالإضافة إلى حالات المادة المعروفة وهي الحالة الصلبة والسائلة والغازية. وهذا يتحقق إلى حد ما، وخصوصا في حالة البلازما الغازية. ولكن، لا يوجد انتقال أو تحول في الطور أو في الحرارة الكامنة المرتبطة بتشكيل البلازما، حيث إنها تتكون بطريقة تدريجية. كما إن هذه التسمية تقيدنا إلى حد ما وتعتبر تسمية خاطئة، لان سلوك البلازما يمكن أن يلاحظ في السوائل (مثل المحلل الكهربائي electrolytes) وحتى في المواد الصلبة. هذه على كل حال خارج نطاق هذا البحث حيث إننا هنا سوف نركز فقط على البلازما الغازية.



إنتاج البلازما Production of plasma

نحتاج الطاقة لإنتاج البلازما (الكثرونات حرة وايونات) من الغاز الطبيعي، تماما كما نحتاج الطاقة لتغيير حالات المادة. هذه الطاقة ممكن أن تعطى في صورة حرارة لتعمل على زيادة متوسط الطاقة الحركية لجسيمات الغاز. وبعد ذلك عدد من جسيمات الغاز التي تمتلك طاقة حركية كافية تعمل على تأين الذرات والجزيئات من خلال التصادمات المتبادلة. وبناء على ذلك، يزداد عدد الالكثرونات الحرة والايونات. وعندما تصبح كمية الحرارة مرتفعة بما فيه الكفاية، فان درجة التأين ترتفع لدرجة تفوق مستوى تكوين البلازما.

ملاحظة: الغاز في حالة الاتزان الحراري عادة يحتوي على جزء من الذرات أو الجزيئات التي تمتلك طاقة حركة كافية لتسبب عملية التأين عندما تحدث التصادمات. ولهذا فانه حتى الغاز الطبيعي يحتوي على جزء صغير من الالكثرونات الحرة والايونات. وفي معظم الأحيان يكون هذا الجزء صغير جدا بحيث لا يمكن أن نعتبر الغاز انه في حالة بلازما. فقط عندما يسخن الغاز ويصل إلى ادني طاقة ليتأين فان ذرات الغاز أو جزيئاته تبدأ في التأين تدريجيا ويتحول الغاز إلى حالة البلازما. نسبة التأين في الغاز في حالة الاتزان الحراري توصف بمعادلة ساها saha equation.

من الممكن أن ترتفع درجة التأين بعدة وسائل وطرق مثل تأثير مجالات كهربية عالية أو بواسطة فوتونات بطاقة عالية. والطريقة الأخيرة تعرف باسم التأين الفوتوني photoionization مثل طبقة E لطبقة الايونوسفير للكرة الأرضية تنتج بالأساس بطريقة التأين الفوتوني الناتج عن الأشعة فوق بنفسجية لأشعة الشمس أو بواسطة أشعة اكس. اذا كان مصدر التأين يضمحل تدريجيا، فان درجة التأين سوف تقل لمستوى يصل إلى غاز في حالة اتزان حراري. وينتج عن هذه الحالة إعادة اتحاد أو ارتباط بين الالكثرونات والايونات المتصادمة مع بعضها البعض لنحصل على ذرات متعادلة مرة أخرى (أو جزيئات). لاحظ، على سبيل المثال وجود اختلاف يومي كبير في طبقة الاونوسفير المنخفضة وذلك لتغير الإشعاع الشمسي على مدار اليوم.



السلوك الجماعي Collective behaviour

السلوك الجماعي ضروري للبلازما وذلك بسبب المدى الطويل للتفاعل الكهربائي بين الجسيمات بسبب الجهد الكهربائي الكولومي $\phi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}$. وهذا التفاعل يجعل من كل جسيم في البلازما يتفاعل بشكل آني مع عدد من جسيمات البلازما الأخرى. ديناميكا الجسيمات المشحونة في البلازما تنشأ من المجالات الكهرومغناطيسية الداخلية والخارجية، كذلك بواسطة التصادمات بين الجسيمات المتعادلة وجسيمات البلازما.

إذا وجد الكثير من الجسيمات المتعادلة فإن ديناميكا الجسيمات المشحونة سوف تتأثر بشكل كبير بالتصادمات مع الجسيمات المتعادلة، والبلازما في هذه الحالة تكون ضعيفة التأين weakly ionized. وهذا يكون على سبيل المثال في حالة طبقة الايونسفير للكرة الأرضية. ومن جهة أخرى إذا كانت التصادمات مع الجسيمات المتعادلة لا تأثير لها على ديناميكية جسيمات البلازما ومن الممكن أن نهملها تماماً فإن البلازما في هذه الحالة تكون قوة التأين strongly ionized. وهذه الحالة تشبه حالة طبقة الماجنيتوسفير للكرة الأرضية.

خواص أخرى للبلازما Other plasma properties

الالكترونات لها قابلية حركة أكثر من الايونات وذلك لصغر كتلتها حيث أن

$$m_p/m_e = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} / 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg} = 1835$$

وبسبب قابلية الحركة للالكترونات فإن البلازما تعتبر جيدة التوصيل للكهرباء والحرارة.

إذا تحركت جسيمات البلازما بسبب وجود مجال كهربائي أو بسبب تغير تدريجي في الكثافة أو بأي سبب آخر فإن اختلاف قابلية الحركة بين الالكترونات والايونات سوف يتسبب في توليد مجال كهربائي والذي يعرف باسم المجال الكهربائي المستقطب polarization electric field.



في وجود المجال المغناطيسي B ، فإن خواص البلازما تختلف بشكل كبير في الاتجاه الموازي للمجال المغناطيسي والعمودي عليه. وهذا يعود إلى قوة لورنتز Lorentz force

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B},$$

والتي تجعل الجسيمات تتحرك في مدارات حلزونية أو لولبية (تعرف باسم مدارات لارمور Larmor orbits أو سيكلوترون cyclotron) في المستوى العمودي على المجال المغناطيسي. ولكن، الحركة على امتداد المجال المغناطيسي لا تتأثر بقوة لورنتز.

تعتبر البلازما مادة غير مرتبة أو منتظمة وتدعم العديد من الظواهر الموجية والتي إما أن تكون طولية أو عرضية، وذات تردد منخفض أو عالي، وتنتشر بشكل موازي أو عمودي على المجال المغناطيسي. وتعرف احد أنواع أمواج المجنيتوسفير، باسم whistler والتي تعني الصفير، والتي لها تاريخ دراماتيكي. ويمكنك أن تسمعها أحيانا في أمواج الراديو VLF حيث تستخدم في المجالات العسكرية. لأنها تعتبر أمواج خاصة جدا وذات نغمة منخفضة، ومن الممكن التعرف عليها بسهولة بين الضوضاء والإذاعات الأخرى ولكنها استمرت لفترة طويلة غير مبررة. الآن نحن نعرف إن موجة الصفير whistler تتولد بشكل مفاجئ في الجزء المقابل لنصف الكرة الأرضية ويكون لها إشارة مميزة بنغمة تنخفض تدريجيا بسبب تشتت الموجة خلال انتشارها.

من الممكن للأمواج والجسيمات أن تتفاعل مع بعضها البعض. وقد يحدث في بعض جسيمات البلازما رنين مع الأمواج وتمتص الطاقة منها، وينتج عن ذلك تسارع للجسيمات واضمحلال للأمواج. كما يمكن أيضا أن تفقد طاقة الموجة في عمليات التشتت مثل ما يحدث في حالة تصادم الجسيمات. ومن جانب آخر، فإن العكس ممكن أن يحدث والطاقة تنتقل من الجسيمات إلى الأمواج. في الحقيقة، بهذه الطريقة تتولد كل الأمواج. وعندما يكون تعداد الجسيمات كافيا لإنتاج الأمواج، فإنهم يجب أن يكونوا نوعا ما غير مستقرين، وخارج نطاق الاتزان الحراري. وهنا نتحدث عن حالة عدم الاستقرار. ويوجد من حالات عدم الاستقرار عدة أنواع وكل نوع من الممكن أن ينتج أنواع محددة من الأمواج.



جسيمات البلازما المشحونة تتعرض لتسارع أيضا أثناء حركتها في المدارات اللولبية في وجود مجالات مغناطيسية وتتصادم مع بعضها البعض ومع الجسيمات المتعادلة. وطبقا لذلك، ينطلق إشعاع يعرف باسم إشعاع سيكلوترون cyclotron radiation وكذلك إشعاع بريمشتراهلنج bremsstrahlung radiation. هذه قضايا مهمة للعديد من الأجسام الفلكية والتي لها مجالات مغناطيسية قوية.

3.1 شروط البلازما Plasma conditions المرجع (B)

سوف نوضح الآن مبادئ فيزياء البلازما وشروط البلازما اللازم توفرها لنحصل على بلازما.

1.3.1 طول ديبياي و غلاف ديبياي Debye length and Debye shielding

كما ذكر من قبل، البلازما ذات طبيعة جاهرية macroscopically neutral. ولكن هذا لا يمنع من إمكانية إن الجسيمات المشحونة تحيد بشكل كبير عن التوزيع التام على المقياس الجوهري microscopical scale.

المسافة الحرجة التي تحدد أقصى مدى لاختلال توازن الشحنة، تعرف بأحد أهم معاملات فيزياء البلازما وهو طول ديبياي Debye length ويرمز له بـ λ_D . (هذا الاسم يعود للعالم Peter J. W. Debye 1884-1966، والذي حصل على جائزة نوبل في الكيمياء في العام 1936).

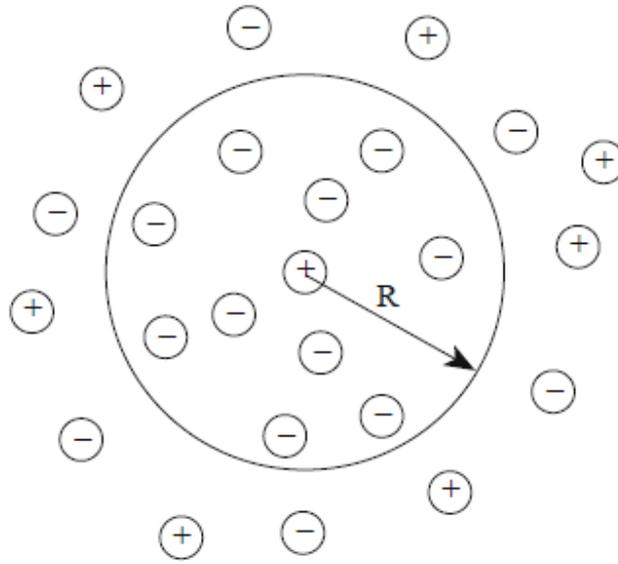
سوف نقدم الآن اشتقاق لـ λ_D ولانجاز ذلك دعنا ندرس بلازما بحيث تكون كثافة ودرجة حرارة الالكترونات والايونات متماثلة أي أن $ne = ni = n$ و $Te = Ti = T$. (لاحظ إن هذا ينطبق على الايونات أحادية الشحنة).



دعنا الآن نفترض منطقة في البلازما بحيث يوجد فيها الكاترونات فقط. ولتكن هذه المنطقة ذات شكل كروي نصف قطره R كما في الشكل 1.1. يوجد عدد N_e من الالكترونات في داخل الكرة تجعل الجهد الكهربائي على سطح الكرة مساويا لـ

$$\phi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R} = \frac{-e \cdot N_e}{4\pi\epsilon_0 R} = \frac{-en_e \frac{4}{3}\pi R^3}{4\pi\epsilon_0 R} = -\frac{e}{3\epsilon_0} n_e R^2 \quad (1.1)$$

هذا الجهد يجذب الايونات الموجبة. ولنفترض الآن إن احد هذه الايونات لها طاقة حركة متوسطة في مركز الكرة.



شكل 1.1 كرة ديباي

ومن الممكن أن يتجاوز غلاف الجهد اذا كان

$$E_{kin} = \frac{3}{2}k_B T \geq e |\phi| = \frac{e^2}{3\epsilon_0} n_e R^2, \quad (1.2)$$



ومنه نحصل على

$$R < \frac{3}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T}{e^2 n_e}}.$$

وطول ديبياي للالكترونات يمكن أن نحصل عليه على النحو التالي:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T}{e^2 n_e}}. \quad (1.3)$$

وفي كثير من الأحيان يفضل أن نستخدم الصيغة التالية:

$$\lambda_D^{-2} = \frac{1}{c_0} \frac{e^2 n_e}{k_B T}. \quad (1.4)$$

وبالتعويض عن القيم الثابتة يمكن أن نحصل على طول ديبياي على النحو التالي:

$$\lambda_D = 69.0 \text{ m} \sqrt{\frac{T/\text{K}}{n_e/\text{m}^{-3}}} = 7.43 \text{ m} \sqrt{\frac{k_B T/\text{eV}}{n_e/\text{cm}^{-3}}}, \quad (1.5)$$

حيث استخدمنا هذه الثوابت:

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} = \text{As وحدة الشحنة}$$

$$(F = \frac{C}{V} = \frac{\text{As}}{V}) \text{ حيث } \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m ثابت الناقدية للفراغ}$$

$$K_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} (J = \text{Nm} = \text{kgm}^2/\text{s}^2 = \text{VAs}) \text{ ثابت بولتزمان}$$

لاحظ هذه العلاقة المهمة:

$$\frac{k_B T}{\text{eV}} = \frac{1}{11600} \frac{T}{\text{K}} \quad (1.6)$$



وهذا يعني إن طاقة حرارية مقدارها 1 eV تعادل درجة حرارة تساوي 11600 K (حاول إثبات ذلك!)

وعليه فإن طول ديبياي يحدد مقدار المدى الذي تكون فيه الشحنة غير متزنة بسبب الحركة الحرارية. كذلك فهي تعرف على إنها طول التأثير للمجال الكهربائي الخارجي على البلازما، والذي يعرف باسم طول الغلاف (varjostuspituus) shielding length. فإذا وضع على سبيل المثال سطح موصل في البلازما، فإنه يعرف باسم غلاف البلازما (plasmavaippa) plasma sheath وهو يتكون حولها حيث تكون الشحنة غير متزنة وسمكها بحدود λ_D .

إذا كان L هو مقدار الطول القياسي للبلازما، فإنه من الواضح إن الشرط الأول للبلازما هو

$$L \gg \lambda_D \quad (1.7)$$

يجب أن يكون متحقق. وإلا فإن البلازما ليس بالضرورة أن تكون ذات طبيعة جاهرية في أي مكان.

ما يسمى بكرة ديبياي Debye sphere هي كرة بلازما نصف قطرها هو λ_D . وكرة ديبياي التي تحيط أي جسيم بلازما تحتوي على جسيمات بلازما أخرى والتي يكون فيها الجسيم في تفاعل جماعي.

عدد الالكترونات في كرة ديبياي هو

$$N_D = n_e \frac{4}{3} \pi \lambda_D^3 = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{\epsilon_0 k_B T}{e^2 \cdot n_e^{1/3}} \right)^{3/2}. \quad (1.8)$$

لاحظ انه عندما $n_e \rightarrow \infty$ فإن $N_D \rightarrow 0$ ، وهذا يعني ان $\lambda_D \rightarrow 0$ أيضا.

ولكي نحصل على تفاعل جماعي حقيقي، فإن الكثير من الجسيمات يجب ان توجد داخل كرة ديبياي:

$$N_D \gg 1 \quad (1.9)$$

هذا هو الشرط الثاني للبلازما. وفي كثير من الأحيان نسمي المجموعة المترابطة بمعامل البلازما plasma parameter.



$$\Lambda = n_e \lambda_D^3 \quad (1.10)$$

وعليه فان الشكل المكافئ للشرط الثاني للبلازما هو

$$\Lambda \gg 1 \quad (1.11)$$

والذي يعرف في اغلب الأحيان بتقريب البلازما plasma approximation.

لاحظ أيضا في بعض الكتب يعرف معامل البلازما بمقلوب المعادلة السابقة:

$$g = \frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{n_e \lambda_D^3} \quad (1.12)$$

حيث تقريب البلازما يكون $g < 1$.

لاحظ أيضا انه بسبب أن متوسط المسافة بين الالكترونات $n_e^{-1/3}$ ، فان تقريب البلازما يتطلب أن تكون المسافة $\lambda_D \ll be$. وطبقا لذلك، يمكن كتابة أول شرطين على النحو التالي:

$$\frac{1}{n_e^{-1/3}} \ll \lambda_D \ll L. \quad (1.13)$$

لاحظ إن $g^{2/3}$ أيضا تعطي النسبة لمتوسط طاقة الجهد بين الإلكترونين ومتوسط طاقة حركة الالكترونات (هذه سوف تثبت في التمارين).

الطبيعة الجاهرية للبلازما يمكن أن توضح في الشكل التالي:

$$n_e = \sum_i n_i, \quad (1.14)$$

حيث أن الكثافات ليست محلية ولكن متوسط الكثافة التي تم حسابها في منطقة البلازما الجاهرية، اكبر بكثير من كرة ديبياي.



وبالمثل للالكترونات، يمكن أن نعرف لكل نوع من الجسيمات المشحونة طول ديبياي خاص بكل نوع. وفي بعض الأحيان، يمكن تعريف طول ديبياي معرف كتأثير يجمع كل الجسيمات المشحونة.

$$\lambda_D^{-2} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{\alpha} \frac{n_{\alpha} q_{\alpha}^2}{k_B T_{\alpha}}, \quad (1.15)$$

حيث أن الجمع يكون لكل أنواع الجسيمات المشحونة والتي لها المعرف α .

وإذا كانت الجسيمات في حالة اتزان فإنها تخضع لتوزيع بلوتزمان والذي يكون في وجود جهد كهربائي ϕ ، يأخذ الشكل التالي:

$$n_{\alpha}(\vec{r}) = n_{0\alpha} \exp\left(\frac{-q_{\alpha} \phi}{k_B T_{\alpha}}\right), \quad (1.16)$$

حيث $n_{0\alpha}$ هي الكثافة بدون الجهد. ويمكن بطريقة سهلة نوعاً ما أن نحسب جهد كولوم الناتج عن جسيم بلازما بشحنة مقدارها qT والتي تحولت في حالة وجود جهد صغير إلى الشكل التالي:

$$\phi = \frac{qT}{4\pi\epsilon_0 r} \exp\left(\frac{-r}{\lambda_D}\right). \quad (1.17)$$

وهذا يعرف باسم غلاف الجهد *shielding potential*. والتي توضح أن المجال الكهربائي مقيد ليكون أساساً داخل مدى طول ديبياي.

2.3.1 تردد البلازما Plasma frequency المرجع (B, K)

البلازما تميل إلى أن تبدأ بالتذبذب بعد أن تتعرض لاضطراب. دعنا الآن ندرس بلازما بسيطة تتكون من الكترونات وايونات موجبة لها كثافة اتزان ابتدائية متساوية بحيث $ne = ni = n_0$. كما أننا سوف نفترض إن سرعة الجسيم الابتدائية مهملة. وبهذه الافتراضات يمكن أن نسمي البلازما بالبلازما الباردة **cold plasma**.



دعنا الآن نجعل النظام في حالة اضطراب من خلال استخدام مجال كهربي خارجي صغير E_1 (الرمز السفلي 1 يستخدم لتميز التقريب من الدرجة الأولى). الالكترونات، نتيجة لقدرتها على الحركة، تتفاعل مباشرة مع المجال الكهربي وتتغير كثافتها إلى

$$n_e = n_0 + n_1(\mathbf{r}, t) \quad (1.18)$$

في حين إن الايونات تبقى تقريبا ساكنة. وطبقا لذلك، التغير يكون منفصل ويتولد مجال كهربي داخلي (مستقطب) في البلازما.

بعد أن نزيل المجال الكهربي الخارجي، تتسارع الالكترونات بواسطة المجال الكهربي الداخلي، وذلك في محاولة لاسترجاع حالة التعادل الكهربي. ولكن، نتيجة لطاقته الحركية التي حصلت عليها من المجال الكهربي، فإن الالكترونات تتحرك بعيدا عن مواقع اتزانها ويتولد مجال كهربي داخلي معاكس، والذي يعمل مرة أخرى على تسريع الالكترونات للخلف في اتجاه مواقع الاتزان وتتكور هذه الحالة. وهذا يقود إلى تذبذب الالكترونات. سنقوم الآن باشتقاق تردد هذه الحركة الاهتزازية.

عدد الالكترونات محفوظ ولذلك فإن كثافة الالكترونات n_e تخضع لنفس المعادلة التي تعبر عن الحفاظ على الشحنة الكهربائية. وهذه المعادلة تعرف باسم معادلة الاستمرار وتكون لكثافة الإلكترون على النحو التالي:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot (n_e \mathbf{u}_e) = 0 \quad (1.19)$$

حيث إن $u_e = u_1$ هي سرعة الالكترونات التي نتجت عن الاضطراب. وفي حالة الرتبة الأولى للاضطراب تكون المعادلة على النحو التالي:

$$\frac{\partial n_1}{\partial t} + n_0 \nabla \cdot \mathbf{u}_1 = 0 \quad (1.20)$$

المجال الكهربي يولد قوة كهربية $F = qE_1$. وطبقا لذلك، فإن معادلة حركة الالكترونات تكون على النحو التالي:



$$m_e \frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial t} = -e\mathbf{E}_1. \quad (1.21)$$

ومن جهة أخرى، المجال الكهربائي \mathbf{E}_1 يعين من كثافة الاضطراب طبقا للقانون الأول لماكسويل (قانون كولوم):

$$\nabla \cdot \mathbf{E}_1 = -en_1/\epsilon_0. \quad (1.22)$$

(سنقوم بمراجعة معادلات ماكسويل في الشبتر الثاني)

بتطبيق التفاضل الجزئي بالنسبة للزمن على المعادلة (20.1) وبمساعدة المعادلتين (21.1) و (22.1) نحصل على،

$$\frac{\partial^2 n_1}{\partial t^2} + \left(\frac{n_0 e^2}{\epsilon_0 m_e} \right) n_1 = 0. \quad (1.23)$$

هذه تصف التردد (موجة موقوفة) والتي لها تردد زاوي ω_{pe} هو

$$\omega_{pe}^2 = \frac{n_0 e^2}{\epsilon_0 m_e}. \quad (1.24)$$

التردد الزاوي ω_{pe} أو تردد الحركة الاهتزازية $f_{pe} = \omega_{pe}/2\pi$ يعرف باسم بتردد البلازما plasma frequency. (لاحظ إن هذه الحالة الغير محددة تؤدي إلى التباس بمقدار 2π . ويجب أن نتحقق دائما أي من المعاملين هو المقصود.)

الحركة الاهتزازية المذكورة بالمعادلة (23.1) تعرف باسم اهتزاز البلازما plasma oscillation أو اهتزاز لانجمير Langmuir oscillation. وفي تقريب البلازما الباردة فإن الاهتزاز يكون ساكنا ولا يصاحبه انتشار.



على كل حال، اذا كانت درجة حرارة الالكترونات محددة وأخذت في الحسبان، فان اهتزاز لانجمير يتغير إلى موجة بلازما منتشرة، تعرف باسم موجة لانجمير Langmuir wave. (سوف نقوم بوصف هذه الموجة بشيء من التفاصيل في الشبتر 10).

تردد البلازما يتناسب عكسيا مع الجذر التربيعي لكتلة الجسم المتحرك. والمجال الكهربائي المضطرب يسبب حركة الايونات ولكن تردد بلازما الايونات أبطء بكثير من تردد بلازما الالكترونات. ولهذا فان فرضيتنا الأولية المتعلقة باستقرار الايونات كانت معقولة. وبالتالي فانه عندما نقول تردد البلازما فإننا نعني بذلك تردد الالكترونات البلازما، وليس الايونات ما لم يتم تحديد ذلك. يعتبر تردد البلازما احد أهم معاملات البلازما. وتتناسب طرديا مع كثافة البلازما (الالكترونات) ويمكن أن تحسب عدديا على النحو التالي للتردد الزاوي

$$\omega_{pe} = 56.4 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \left(\frac{n_e}{\text{m}^{-3}} \right)^{1/2}. \quad (1.25)$$

أو لتردد الحركة الاهتزازية

$$f_{pe} = \frac{\omega_e}{2\pi} \approx 9.0 \text{ Hz} \left(\frac{n_e}{\text{m}^{-3}} \right)^{1/2}. \quad (1.26)$$

3.3.1 تصادمات البلازما Collisions in plasma المرجع (B,K)

تصادمات الالكترونات مع الايونات والجسيمات المتعادلة تسبب إخماد لتذبذبات البلازما. ومن اجل أن تحدث تذبذبات البلازما قبل أن يصبح الإخماد هو المسيطر، يجب أن يتحقق الشرط الثالث من شروط البلازما وهو

$$f_{pe} > \nu_{en} \quad (1.27)$$



حيث v_{en} تشير إلى تردد التصادمات بين الالكترونات والجسيمات المتعادلة. وإذا لم يتحقق هذا الشرط فلن تظهر أي تجمعات في النظام ويصبح النظام (ليس بلازما) محكوم بحركة الجسيمات المتعادلة.

عملياً، المعادلة (27.1) تقيد كثافة تعداد الجسيمات المتعادلة بالنسبة للجسيمات المشحونة. على سبيل المثال بلازما الايونوسفير هي بلازما متأنية جزئياً والذرات المتعادلة والجزئيات تشكل معظم الكتلة الكلية. درجة التأين تتناقص عندما ننتقل إلى الأسفل من طبقة E حتى تصبح الجسيمات المشحونة قليلة ولا تأثير لها.

الحد الفاصل بين الايونوسفير والغلاف الجوي المتعادل (الثيرموسفير) تقريبا على ارتفاع بين 50 إلى 60 كيلومتر.

ومن ناحية أخرى، درجة التأين تزداد عندما تتحرك للأعلى من طبقة E (على ارتفاع 100 كيلومتر)، وفي طبقة المجنيتوسفير تصل درجة التأين عملياً إلى 100%. (يوجد جسيمات متعادلة حتى في طبقة المجنيتوسفير ولكن نظراً لأن للكثافة الضئيلة فإن الجسيمات المشحونة والمتعادلة لا تتصادم). ولكن، بما إن كثافة الجسيمات تتناقص مع الارتفاع، فإن التأين الكلي يكون له قيمة عظمى عند طبقة الايونوسفير F عند ارتفاع 200 إلى 300 كيلومتر.

دعنا الآن ندرس تصادمات كولوم بين الجسيمات المشحونة في البلازما. فإذا كانت مساحة مقطع التصادمات هو σ وكثافة الجسيمات هو n ، فإن متوسط المسار الحر mean free path يكون على النحو التالي:

$$l_{mfp} = 1/(n\sigma) \quad (1.28)$$

وبالمثل، يمكن حساب تردد التصادمات ν_c بسهولة من متوسط المسار الحر ومن متوسط السرعة v ويكون على النحو التالي:

$$\nu_c = v/l_{mfp} = n\sigma v \quad (1.29)$$

ويمكن دراسة تصادمات كولوم ممن خلال دراسة التصادمات ذات التحولات الصغيرة في كمية الحركة، أي تصادمات بزوايا صغيرة. وهذا لأن كل جسيمات البلازما تتفاعل مع عدة جسيمات في



الغالب تكون بعيدة جدا عنها، وكلما كانت الجسيمات بعيدة، كلما كانت متوسط التحولات في كمية الوكة صغيراً. ومن ناحية أخرى، يوجد هناك جسيمات متقاربة ويكون التصادم بينها قويا.

مساحة مقطع التصادم للتصادمات بين الإلكترون والايون هو $\sigma \mu 1/v_0^4$ وتردد التصادم المرتبط يكون على النحو التالي:

$$\nu_c = \nu_{ei} = \frac{2n_0(Ze^2)^2 \ln \Lambda}{\epsilon_0^2 m_e^2 v_0^3}, \quad (1.30)$$

حيث إن n_0 و v_0 هما السرعة والكثافة في المنطقة البعيدة عن منطقة التصادم. (سوف نناقش هذا الموضوع في الشبتر 4 بمزيد من التفصيل). على سبيل المثال، متوسط المسار الحر يكون في جسيمات الرياح الشمسية عند 1 AU (كل 1AU يعادل 150 مليون كيلومتر) هو 1 AU.

ولان غلاف ديباي، لكل جسيم يتفاعل مع الجسيمات في كرة ديباي، أي أن مع الكثير من الجسيمات كما عبرنا عنه بمعامل البلازما Λ . وهذا تم أخذه في الحسبان في المعادلة (30.1) بالمعامل $\ln \Lambda$ والذي يعرف باسم لوغاريتم كولوم. وقيمتة النموذجية هي 10 إلى 20.

طبقا للمعادلة (30.1)، اذا كانت درجة حرارة البلازما ترتفع ا وان كثافة البلازما تنخفض، $\nu_c \rightarrow 0$ والبلازما تصبح بدون تصادمات. لاحظ انه في كلا النهايتين $\Lambda \rightarrow \infty$ ولكن هذا يزداد بسرعة اقل ولا يصبح ذو أهمية في المعادلة (30.1). (انظر أيضا المعادلة (8.1)).

نعني بعديم التصادم في الحالة العملية إن الزمن بين أي تصادمين أو متوسط المسار الحر للجسيمات يزداد كثيرا على التدريج الزمني والتدريج المكاني للظاهرة التي ندرسها. لاحظ كذلك إن عديم التصادم لا يعني إن التفاعلات الكهرومغناطيسية بين جسيمات البلازما مهمة. ولكن، يمكن التعامل معهما بالجملة باستخدام متوسط المجالات، وليس بالضرورة أن نفحص كل تصادم كولومي لكل جسيم على حدا.

ولبلازما موصلة جيدا فان العلاقات التقريبية التالية متحققة:



$$\begin{aligned}v_{ee} &\approx v_{ei} \\v_{ii} &\approx \sqrt{m_e/m_i} v_{ee} \\v_{ie} &\approx (m_e/m_i) v_{ee}.\end{aligned}$$

4.1 المجالات المغناطيسية Magnetic fields المرجع (K)

البلازما عادة ما تكون مغمورة في مجالات مغناطيسية وتتأثر بها، ومصدر المجالات المغناطيسية قد يكون خارجيا (على سبيل المثال نتيجة لعزم القطب المغناطيسي للكرة الأرضية، أو سريان التيار الكهربائي في حجرة توليد البلازما) أو داخليا (على سبيل المثال التيار الناتج في طبقة المجنيتوسفير أو التيارات المتولدة في داخل البلازما الاندماجية).

شدة المجال المغناطيسي تتغير كثيرا من قيم ضعيفة تصل إلى 1 pT في المناطق بين الكواكب والنجوم وتصل لقيم هائلة تصل إلى 10^{12} T في بعض الأجسام الفلكية مثل النجوم النضوية.

حركة الجسيمات المشحونة في مجال مغناطيسي شدته B تكون حركة خطية في اتجاه المجال المغناطيسي وفي اتجاه دوراني في المستوى العمودي على المجال المغناطيسي. (سوف ندرس حركة الجسيمات المشحونة في مجال مغناطيسي في الشبتر 3 بالمزيد من التفصيل).

التردد الزاوي للحركة الدورانية للجسيمات من النوع α بكتلة مقدارها m_α وشحنة q_α يكون على النحو التالي

$$\omega_{cr} = \frac{|q_\alpha|B}{m_\alpha} \quad (1.31)$$

هذه احد العوامل الأساسية للبلازما. وهي تقابل تردد $f_{ca} = \omega_{ca} / (2\pi)$ ويعرف باسم تردد السيكلترون cyclotron frequency أو تردد الجيرو gyrofrequency او تردد لارمور Larmor frequency (مرة أخرى! انته لـ 2π).



وعدديا للالكترونات والبروتونات

$$f_{ce} = 28 \text{ Hz } B/(nT) \quad (1.32)$$

$$f_{cp} = 1.5 \cdot 10^{-2} \text{ Hz } B/(nT) \quad (1.33)$$

المجالات المغناطيسية لا تؤثر فقط على حركة الجسيمات ولكنها أيضا تتفاعل مع مختلف الاضطرابات وذلك من خلال تكون تذبذبات في الشدة والاتجاه للمجال المغناطيسي.

والزمن الدوري للتذبذبات في المجال المغناطيسي يتغير من قيمة كبيرة جدا (الحد الأعلى يعتمد على شدة المجال) إلى قيمة صغيرة جدا وهذا يرتبط بتردد البلازما والسيكلترون.

5.1 حدوث البلازما في الطبيعة Occurrence of plasmas in nature المرجع (B)

معظم المواد المضيئة في الكون تكون في حالة بلازما. ولكن، المواد المضيئة تعتبر جزء من مواد تعرف باسم مواد الجاذبية gravitating matter والتي تعتبر حالة غير معروفة، وتعرف كذلك باسم الكتلة المفقودة "missing mass". (وعليه، فإن الكون محكوم بمادة ذات طبيعة غير معروفة. ولهذا فإن ما نعرفه قليل حتى الآن).

أمثلة عن المواد المضيئة المعروفة.

(1) الشمس والنجوم Sun and other stars

- اللب core: كثافته ($n \sim 10^{33} \text{ m}^{-3}$) ودرجة حرارته مرتفعة ($T > 10^7 \text{ K}$) والبلازما تتكون نتيجة التفاعلات النووية.



- **السطح surface:** يعتبر باردا نوعا ما ($\sim 6000K$) والبلازما لها مجال مغناطيسي $B \sim 10^{-4} - 1 T$.
- **الهالة corona:** ساخنة ($T \sim 10^6 K$) ولكن ذات بلازما ذات سمك صغير ($n \sim 10^{13} m^{-3}$).

(2) الرياح الشمسية (interplanetary plasma) solar wind عند 1AU

- رقيقة جداً بكثافة ($n_e \sim 5 cm^{-3}$).
- ذات درجة حرارة مرتفعة بعض الشيء ($T_i \sim 10^4 K, T_e \sim 5 \times 10^4 K$).
- تتحرك ضد اتجاه الشمس بسرعة $v \sim 300 - 1000 km/s$.
- تحمل معها مجال مغناطيسي بشدة متوسطة تعادل $B \sim 5 nT$ والتي تكون في صورة حلزونية.

(3) طبقة المغنيتوسفير للأرض والكواكب الأخرى The magnetospheres of the Earth and other planets

- تحتوي على مناطق عديدة وكل منطقة مكونة من نوع من أنواع البلازما.
- في الأغلب البلازما خفيفة ($n_e \sim 0.1 - 10 m^{-3}$).
- في اغلب الأحيان تكون كاملة التأيين.
- اغلب الايونات من H^+, He^+, He^{++}, O^+ . وهناك ايونات أخرى في مناطق خاصة مثل تلك الموجودة في Jovian و Saturnian.



(4) طبقة الايونسفير للكرة الأرضية والكواكب الأخرى The ionospheres of the Earth and other planets

- بلازما باردة نوعا ما ($T \sim 100 - 1000K$).
- تأين البلازما جزئي
- أنواع مختلفة من الايونات، وتوجد ايونات سالبة في بعض المناطق.

(5) بلازما المجرات والنجوم Interstellar and intergalactic plasma

- البلازما خفيفة للغاية وكثافتها في حدود ($n_{IS} \sim 10^{-3} - 10^{-1} \text{ cm}^{-3}$, $n_{IG} \leq 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$).
- باردة نوعا ما ($T_{IS} \sim 100 \text{ K}$, $T_{IG} \sim 10^5 \text{ K}$).
- شدة المجال المغناطيسي منخفضة ($B_{IS} \sim 10-10T$, $B_{IG} \leq 10-12T$).
- تشغل مناطق ضخمة جدا.

(6) الأجسام الفلكية الأخرى Other astrophysical objects

- النجوم النيوترونية: والنجوم النبضية: كثيفة جداً (أعلى من $n \sim 10^{48} \text{ m}^{-3}$) والمادة النووية في القلب (نيوترونات ومن الممكن أيضا بلازما الجلون-كوارك). والمجال المغناطيسي قوي جدا ($B \sim 10^8 - 10^{12} \text{ T}$) حتى على السطح.
- أشباه النجوم: أجسام شديدة الإشعاع وتغطي كافة الأطوال الموجية. ومن المحتمل إنها تكونت من المواد التي تسبح في فلك الثقوب السوداء.
- أخرى.

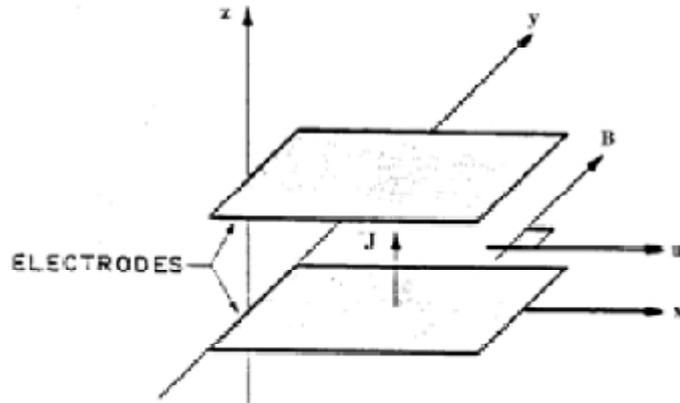


6.1 تطبيقات فيزياء البلازما Applications of plasma physics المرجع (B)

(1) تاريخيا كان التطبيق الأول (غير مقصود) هو استخدام بلازما الأيونوسفير في الاتصالات الطويلة المدى. (طبقة الأيونوسفير تعكس بكفاءة أمواج الراديو الطويلة حيث $\omega \leq \omega_{pe}$ ، وبالتالي يمكن للإشارة أن تذهب ابعد من الأفق.)

(2) التطبيق الأكثر استخداما هو أنابيب التفريغ الكهربائي للغازات والتي تستخدم للحصول على ضوء الفلوريسنت المستخدم في معظم المنازل للإضاءة.

(4) مولد الماجنيتو هيدرو دينامك يستخدم لتحويل جزء من الطاقة الحركية للبلازما إلى كهرباء، وهذا يجنبنا الفقد الناتج عن عمليات التحول الحرارية. والشكل 2.1 يوضح مخطط مبسط لمبدأ عمل المولد. عندما توضع البلازما في مجال مغناطيسي عمودي على خطوط المجال، فإن الإلكترونات والأيونات توجه بواسطة قوة لورنتز في اتجاه معاكس وتصل إلى الألكترودات المقابلة. وبهذا تتولد قوة محرّكة كهربائية (جهد كهربائي). وهذا يعني استخدام جزء من الطاقة الحركية للبلازما للحصول على تيار كهربائي أو طاقة كهربائية.



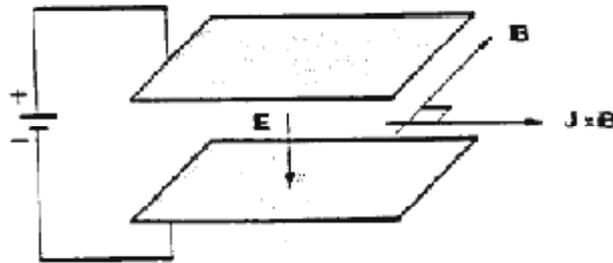
شكل 2.1 مبدأ عمل مولد الماجنيتو هيدرو ديناميك



(4) محرك الصواريخ البلازما يعمل بعكس فكرة مولد الماجنيتوهيدرودينامك، يحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة حركة. والشكل 3.1 يوضح مخطط مبسط لفكرة عمل المحرك. حيث يوجد مجال كهربائي ومجال مغناطيسي متعامدين مع بعضهما البعض وتوجه البلازما في اتجاه يعاكس كلا من المجالين بسرعة

$$\bar{v}_E = \frac{\bar{E} \times \bar{B}}{B^2}. \quad (1.34)$$

تخرج بعض البلازما للخارج، وتدفع الصاروخ في اتجاه معاكس لحركة خروجها. مبدأ عمل محرك الصاروخ البلازما استخدمت بالفعل في مجسات الفضاء بعيدة المدى.



شكل 3.1 مبدأ عمل محرك الصاروخ البلازما

(5) الحلم: التحكم بمفاعل اندماجي. المبدأ: $4 \times m_H > m_{He}$ وهذا يؤدي إلى تحرر طاقة بالاندماج. هذا هو مصدر الطاقة الرئيسي لسلسلة من النجوم.

ولكن، يوجد ثلاث مشاكل رئيسية للتحكم في الاندماج النووي.

- درجة حرارة عالية. قوة التنافر الكولومية تمنع البروتونات والشحنات الموجبة في النواة من الاتحاد. ولهذا فإن درجة الحرارة يجب ان تكون عالية بما فيه الكفاية ($k_B T \geq 10^8 K$) بحيث أن متوسط طاقة الحركة للأيونات يتغلب على جدار التنافر الكولومي. (10 keV)



- **طاقة مكتسبة كافية.** المفاعل يجب أن ينتج طاقة أكثر من المستخدمة لتوليد الحرارة وتخزين البلازما، أو لتعويض الفقد في الإشعاع والفقد بأشكال أخرى. والمستوى الأدنى للطاقة الكافية يعطى بشرط لاوسون condition Lawson على النحو التالي:

$$n\tau > (n\tau)_{min} \sim 10^{20} \text{m}^{-3} \text{s (for a D - T plasma)} \quad (1.35)$$

حيث n كثافة البلازما و τ عمر البلازما. واهم نوعين من أنواع مفاعلات الاندماج النووي الناجحة هو الحلقة المستديرة التي تشكل مفاعل التوكاماك Tokamak وضغط الليزر بنبضات الليزر القوية. ومفاعل التوكاماك له عمر τ طويل وكثافة n مناسبة، في حين ان بلازما الناتجة من ضغط الليزر لها كثافة n كبيرة ولكن عمر البلازما τ قصير. وكلا النوعين وصلا بالكاد إلى شرط لاوسون.

- **الجدوى الاقتصادية.** هذه النقطة الأخيرة والتي تعتبر مشكلة كبيرة. وبالرغم من أن إمكانية الوصول إلى شرط لاوسون، فان المفاعل الاندماجي بعيد عن قيمته الاقتصادية المرجوة، بمعنى إنتاج كمية كافية من الطاقة. إضافة إلى ذلك فانه مستوى التنافس الاقتصادي يمكن أن يتغير في المستقبل عندما يتحول المجتمع عن الاعتماد على النفط. على كل حال، فان مفاعل اندماجي اقتصادي لازال أمامه 10 إلى 15 عاماً.

تمت الترجمة في

المركز العلمي للترجمة

www.trgma.com

1-6-2009



المراجع المهمة:

(K) Koskinen, H., Johdatus plasmafysiikkaan ja sen avaruussovellutuksiin (Limes ry, 2001):

A new book to be tested here as a text book.

(B) Bittencourt, J. A., Fundamentals of Plasma Physics (Pergamon Press, 1986):A complete

text book but contains little of space plasma physics.

(P) Parks, G. K., Physics of Space Plasmas (Addison Wesley, 1991):Modern and versatile in space plasma physics. Many exercises. Unfortunately many errors.

(C) Chen, F., Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion, Volume 1: Plasma Physics (2. edition; Plenum Press):Concise and physical. A good text book.

مراجع اخرى:

Baumjohann, W., and R. Treumann, Basic Space Plasma Physics (Imperial College Press, 1996):A modern introduction.

Boyd, T. J. M., and J. J. Sanderson, Plasma Dynamics (Nelson, 1969):Old but good. Many exercises. (cgs)

Goldston, R. J., and P. H. Rutherford, Introduction to Plasma Physics (IOP Physics Publishing Ltd., 1995):Quite readable.

Kivelson, M. G., and C. T. Russell (eds.), Introduction to Space Physics (Cambridge University Press, 1995):Versatile and a lot of space physics observations. However, not very consistent and therefore not a good text book for beginners.

Krall, N. A., and A. W. Trivelpiece, Principles of Plasma Physics (San Francisco Press, 1986, a reproduction of the original text published by McGraw-Hill, 1973):A theoretical classic. (cgs)

Nicolson, D. R., Introduction to Plasma Theory (John Wiley & Sons, 1983):A fluent introduction to plasma theory. (cgs)

Sturrock, P. A. Plasma Physics, An Introduction to the Theory of Astrophysical, Geophysical

& Laboratory Plasmas (Cambridge University Press, 1994):Fundamental, with many plasma and astrophysical examples. (cgs)

Treumann, R., and W. Baumjohann, Advanced Space Plasma Physics (Imperial College Press, 1996):An advanced text book of plasma waves, instabilities and nonlinear phenomena.