

الفصل الأول

مقدمة في علم البلازما

مقدمة

عند تفريغ الدم من الكريات المختلفة (كرات الدم الحمراء والبيضاء والصفائح الدموية) لا يزال هناك سائل شفاف، والذي سمي بلازما (التي تعني "جيلي") من قبل العالم الطبيب التشيكي، يوهانس بركينبي (١٧٨٧-١٨٦٩). استخدم هذا المصطلح، لأول مرة، من قبل عالم الكيمياء الأميركي لانجميور الحائز على جائزة نوبل لوصف الغاز المتأين في عام ١٩٢٧. نظرًا للتشابه القريب جدا ببلازما الدم، يحمل المائع المؤين الإلكترونات والأيونات. فحصر لانجميور، جنبًا إلى جنب مع زميله تونكس، فيزياء وكيمياء فتيلة تتجسطن المصاييح الكهربائية؛ بهدف إيجاد وسيلة لإطالة عمر الفتيلة (وهو الهدف الذي تتحقق معه في نهاية المطاف). في هذه العملية، تطورت نظرية بلازما الأغمد، وهي الطبقات المناخمة بين البلازما المتأينة والسطوح الصلبة. اكتشف أيضًا أن بعض المناطق من أنبوب تفريغ البلازما تظهر تغيرات دورية في كثافة الإلكترونات، والتي تعرف في الوقت الحاضر بموجات لانجميور. وكان هذا هو نشأة فيزياء البلازما. ومن المثير للاهتمام أن أبحاث لانجميور في الوقت الحاضر تكون الأساس النظري لمعظم تقنيات المعالجة بالبلازما لإنتاج الدوائر المتكاملة. بعد لانجميور، انتشرت تدريجيًا بحوث البلازما في اتجاهات أخرى، منها خمس تكتسب أهمية خاصة.

أولاً، أدى تطور البث الإذاعي إلى اكتشاف أيونوسفير الأرض، وطبقة من الغاز المؤين جزئيًا في الغلاف الجوي العلوي، الذي يعكس موجات الراديو، ويكون مسؤولاً عن تلقى إشارات الراديو، عندما يكون الإرسال في الأفق. لسوء الحظ، في بعض الأحيان يمتص ويشوه أيضًا الغلاف الجوي المتأين موجات الراديو. على سبيل المثال، المجال المغناطيسي للأرض يسبب للموجات مختلفة الاستقطابات (بالنسبة لاتجاه المجال المغناطيسي) أن تنتشر بسرعات مختلفة، وهو التأثير الذي يمكن أن يؤدي إلى "إشارات ظل" (أي

الإشارات التي تصل قليلا من قبل، أو قليلا بعد، الإشارة الرئيسية). من أجل فهم وربما تصحيح بعض أوجه القصور في مجال الاتصالات اللاسلكية. وضع علماء كثيرون مثل أبلتون وبودن كغ، منهجية متطورة لنظرية الموجات الكهرومغناطيسية، خلال أنظمة البلازما غير المنتظمة الممغنطة.

ثانيا، أدرك علماء الفيزياء الفلكية ان معظم الكون يتكون من البلازما، وبالتالي لكي يتم التوصل إلى فهم أفضل للظواهر الفيزيائية الفلكية، فإن الأمر يتطلب فهما أفضل لفيزياء البلازما. وكان من أبرز رواد هذا المجال العالم هانز الفين، الذي طور عام ١٩٤٠ نظرية ديناميكا الموائع الممغنطة، أو MHD؛ حيث يتم تعامل البلازما على أساس مائع موصل. وهذه النظرية استخدمت على نطاق واسع وبنجاح؛ لفحص البقع الشمسية، الانفجارات الشمسية، والرياح الشمسية، وتكوين النجوم، ومجموعة كبيرة من المواضيع الأخرى ذات الصلة بالفيزياء الفلكية. ومن المواضيع ذات الأهمية في نظرية MHD إعادة الارتباط المغناطيسي ونظرية الدينامو. إعادة الارتباط المغناطيسي هو العملية، التي من خلالها تغير فجأة طوبولوجيا خطوط المجال المغناطيسي؛ لتؤدي إلى التحول المفاجئ لقدر كبير من الطاقة المغناطيسية إلى طاقة حرارية، فضلاً عن تعجيل بعض الجسيمات المشحونة إلى طاقات عالية للغاية، ويعتقد عموماً أنها الآلية الأساسية وراء الانفجارات الشمسية. تدرس نظرية دينامو تدرس كيفية حركة المائع MHD؛ لتؤدي إلى توليد مجال مغناطيسي عيني (ماكروسكوبي). وهذه العملية مهم جداً؛ لأنه على حد سواء في المجالات المغناطيسية الأرضية والشمسية التي تضمحل بسرعة. ويحتفظ المجال المغناطيسي للأرض من قبل حركة باطنها المنصهر، والذي يمكن أن يعامل بوصفه مائعاً MHD كتقريب معقول.

ثالثاً، إنشاء القنبلة الهيدروجينية في عام ١٩٥٢ أحدث قدراً كبيراً من الاهتمام في الاندماج النووي الحراري، كمصدر ممكن للطاقة في المستقبل. في البداية تمت هذه الدراسة التي كانت تجري سرّاً، وبشكل مستقل، من قبل الولايات المتحدة والاتحاد السوفيتي وبريطانيا العظمى. ومع ذلك كانت أول أبحاث الاندماج النووي الحراري، التي رفعت عنها السرية في عام ١٩٥٨، مما أدى إلى نشر عدد من الأوراق المهمة والمؤثرة جداً في أواخر ١٩٥٠ وأوائل عام ١٩٦٠. بشكل عام، ظهرت لأول مرة فيزياء البلازما النظرية ك تخصص رياضي دقيق في هذه السنوات. وليس مستغرباً أن معظم فيزيائي الاندماج

النووي مهتمون بفهم كيفية حصر البلازما الحرارية. يتم حصر معظم الحالات عن طريق المجالات المغناطيسية، وفحص عدد من حالات عدم استقرار البلازما، التي قد تسمح لها الهرب.

رابعاً، اكتشاف جيمس فان ألن في عام ١٩٥٨ أحزمة من الإشعاع محيطة بالأرض، تعرف باسم فان ألن، وذلك باستخدام البيانات المرسلة من مستكشف القمر الصناعي بالولايات المتحدة؛ مما فتح المجال لفيزياء بلازما الفضاء. اقتبس علماء الفضاء نظرية حصر البلازما بالمجال المغناطيسي من بحوث الاندماج، ونظرية موجات البلازما من فيزياء الغلاف الأيوني، وفكرة إعادة الربط المغنطيسي كآلية لإطلاق الطاقة، وتعجيل الجسيمات من الفيزياء الفلكية.

أخيراً، تطوير أنظمة الليزر عالية الطاقة في عام ١٩٦٠ فتحت مجال فيزياء الليزر البلازما. عندما يضرب شعاع الليزر عالي الطاقة هدفاً صلباً على الفور، تستأصل المادة من الهدف، وتتكون البلازما على الحدود المتاخمة لمادة الهدف (بين الهدف والحزمة الإشعاعية). الليزر بلازما لها خصائص، لا توجد في البلازما التقليدية. من أهم تطبيقات فيزياء الليزر البلازما، هو نهج الطاقة الاندماج المعروف بحصر القصور الذاتي. في هذا النهج، وتستخدم أشعة الليزر بتركيز عالٍ، وبشكل محكم لتسخين وانضغاط الطبقة الخارجية لمادة الهدف؛ حتى يتم تحقيق الكثافة ودرجات الحرارة التي هي سمات الاندماج النووي (أي مركز من القنبلة الهيدروجينية). هناك تطبيق آخر لفيزياء ليزر البلازما، هو استخدام مجالات كهربائية قوية للغاية، عند مرور نبضة ليزر ذات شدة عالية عبر البلازما لتعجيل الجسيمات. يأمل فيزيائيو الطاقة العالية في استخدام تقنيات تعجيل البلازما إلى حد، يقلل من حجم وتكلفة معجلات الجسيمات.

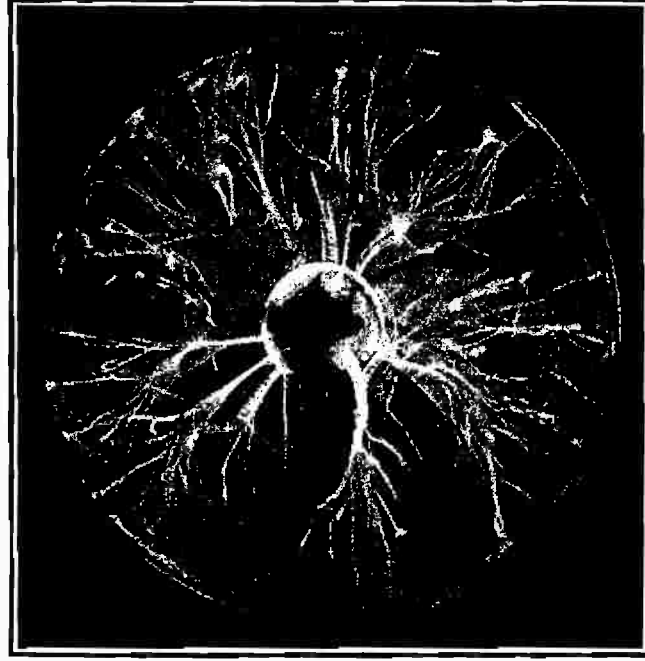
في الأزمنة القديمة كان يعتقد أن العالم مكون من أربعة عناصر أساسية، هي: التربة - الماء - الهواء والنار؛ حيث تمثل التربة الحالة الصلبة والماء الحالة السائلة والهواء الحالة الغازية للمادة، وتناظر البلازما العنصر الرابع، وهو النار الذي يظهر الحالة الغالبة على المستوى الكوني. وبالتالي البلازما هي حالة متميزة من حالات المادة، يمكن وصفها بأنها غاز متأين تكون فيه

الإلكترونات حرة، وغير مرتبطة بالذرة أو بالجزئ. فإذا علمنا أن المادة توجد في الطبيعة في ثلاث حالات: صلبة وسائلة وغازية، فإنه بالإمكان تصنيف البلازما على أنها الحالة الرابعة، التي يمكن أن توجد عليها المادة.

البلازما تخضع لقوانين الغازات، وفي حالات متعددة تسلك البلازما سلوك الغازات. على النقيض من الغازات فإن للبلازما صفاتها الخاصة، ويؤدي التأين لخروج واحد أو أكثر من الإلكترونات عند تسليط حرارة أو طاقة معينة. هذه الشحنة الكهربائية تجعل البلازما موصلة للكهرباء؛ ولذلك ستستجيب بقوة للمجال الكهرومغناطيسي.

تكون حركة الجسيمات في الغاز العادي محدودة فقط بالتصادمات مع بعضها البعض، أو مع الجدران، أما حركة الجسيمات في البلازما، فإنها تكون مقيدة بالمجال المغناطيسي، ويمكن احتواء البلازما بجدران مغناطيسية تعمل كمصائد مغناطيسية. في وجود المجال المغناطيسي القوي، تقيد الجسيمات بدوائر حول خطوط قوى المجال، على الرغم من تحركها بحرية على طول خطوط المجال، وتكون محصلة الحركة الحرة للجسيمات حلزونية. إذا أجبرت جسيمات البلازما لتتحرك عبر خطوط المجال؛ فإنها تنزلق على خطوط المجال. يمكن القول بأن جسيمات البلازما تلتصق بخطوط المجال، أو أن المجال المغناطيسي يتجمد بالبلازما في حالة البلازما الساخنة؛ حيث تمرر جسيمات البلازما الساخنة كل منهما الآخر بأقل تداخل. فمن المعلوم أن البلازما الساخنة تتميز بتوصيلية عالية جداً، وبالتالي تقريباً المقاومة ضعيفة جداً لمرور التيار الكهربائي خلالها. وعلى الجانب الآخر، نجد أن البلازما الباردة تتميز بتوصيلية أقل، وبالتالي تسمح التفاعلات بين الجسيمات نتيجة للتصادمات بتسرب المجال المغناطيسي خلال البلازما. تبلغ درجة حرارة البلازما الباردة عديداً من الألكترون فولت (حيث ١ إلكترون فولت يساوي ١١٦٠٠ درجة كلفن) أما البلازما الساخنة، فإن درجة حرارتها تصل عديداً من المئات الإلكترون فولت أي تقريباً مليون درجة كلفن. في عام ١٨٧٩، اكتشف العالم السير وليام كروكس البلازما عن طريق أنبوب كروكس، وأطلق عليها آنذاك "المادة الإشعاعية" (شكل ١). واكتشف العالم البريطاني جوزيف

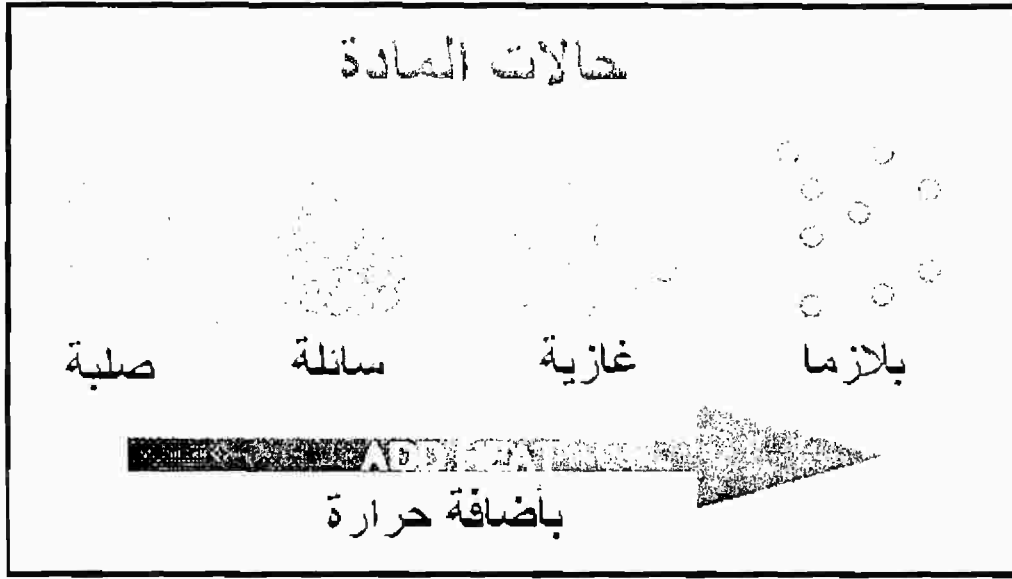
طومسون خصائص وطبيعة البلازما عام ١٨٩٧. ويرجع الفضل في تسمية البلازما إلى العالم لانغموير في عام ١٩٢٨؛ ربما لأنه رأى أنها تشبه بلازما الدم.



شكل (١): لمبة بلازما توضح إحدى ظواهر البلازما الأكثر تعقيداً، والتي من ضمنها الفئائل.

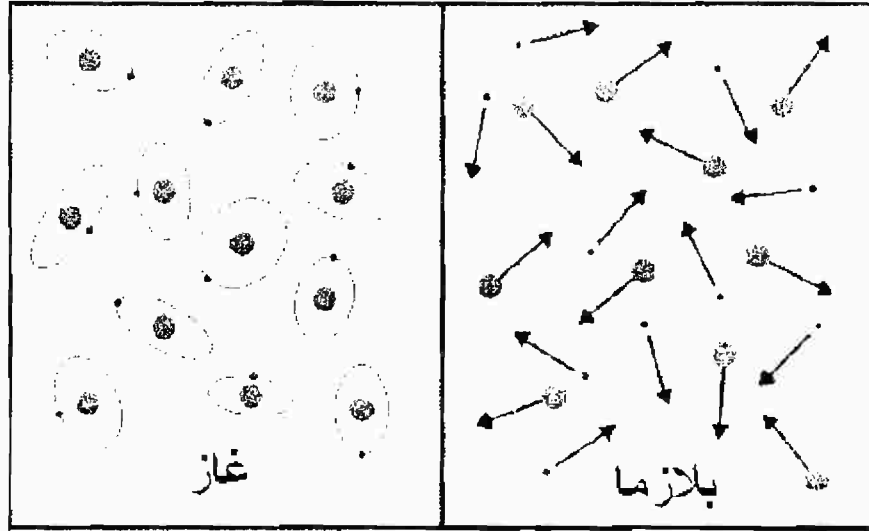
يعتبر التفريغ الكهربى من أقدم فروع المعرفة في العلوم الطبيعية؛ حيث استخدم العالم لانغموير اصطلاحاً خاصاً للغازات المتأينة، وهو البلازما التي تعتمد على درجة التأين للغاز. أما في إطار علم الكونيات، تعتبر البلازما هي أصل الكون، وهي الحالة المتغلبة على بقية الحالات الأخرى للمادة (الصلبة والسائلة والغازية).

البلازما هي حالة متميزة من حالات المادة، يمكن وصفها بأنها غاز متأين تكون فيه الإلكترونات حرة وغير مرتبطة بالذرة أو بالجزيء. فإذا علمنا أن المادة توجد في الطبيعة في ثلاث حالات: صلبة وسائلة وغازية، فإنه بالإمكان تصنيف البلازما على أنها الحالة الرابعة، التي يمكن أن توجد عليها المادة (شكل ٢).



شكل (٢): الأطوار الانتقالية المختلفة للمادة.

ويوضح الشكل (٢) الأطوار الانتقالية المختلفة للمادة، عند إضافة حرارة (كمثال الطاقة الكهربائية). عند درجات الحرارة المنخفضة، تكون المادة في حالة صلبة، وبارتفاع درجات الحرارة تتحول إلى الحالة السائلة، وبارتفاع الحرارة تتحول إلى الحالة الغازية، وبزيادة الحرارة يتحول الغاز إلى بلازما (غاز متأين). ويوضح الشكل (٣) الفرق بين الحالة الغازية والبلازما عند تسليط الطاقة على ذرات الغاز ناحية اليسار تتحول إلى بلازما - خليط من الأيونات الموجبة (النقاط الحمراء)، والإلكترونات السالبة (النقاط السوداء) ناحية اليمين. هذا الخليط يسمى بالغاز المتأين أو البلازما Plasma، وحيث إن البلازما حالة غير مستقرة، فإن قوة التجاذب الكهربائية تعمل على إعادة اتحاد الشحنات الموجبة والسالبة مع بعضها البعض، وتكون نتيجة إعادة الاتحاد هو انطلاق ضوء، ذي تردد معين يعتمد على مستويات الطاقة للذرات المكونة لمادة البلازما.



شكل (٣): الفرق بين الحالة الغازية والبلازما.

على النقيض من الغازات، فإن للبلازما صفاتها الخاصة. يؤدي التأين إلى خروج واحد أو أكثر من الإلكترونات، عند تسليط حرارة أو طاقة معينة (كهربية أو موجات كهرومغناطيسية). هذه الشحنة الكهربائية تجعل البلازما موصلة للكهرباء؛ ولذلك تستجيب بقوة للمجال الكهرومغناطيسي. تأخذ البلازما شكل غاز متعادل أو شبه متعادل (أعداد متساوية من الأيونات موجبة الشحنة، وإلكترونات سالبة الشحنة)، على سبيل المثال النجوم والتفريغ الوهاج الجوي، ينتج عنه تخليق بلازما بسبب المجالات الكهربائية الهائلة الموجودة. وينتج عن ذلك حرارة هائلة ينتج عنها موجات الصدمة. وتنتج موجات الصدمة بحركة الجسيمات خلال الغاز بسرعات تتعدى سرعة الصوت. على سبيل المثال، تسير الشهب والنيازك القادمة إلى الغلاف الجوي للأرض بمعدل ١٠ كيلومترات لكل ثانية هذه السرعة كافية لضغط الغاز الموجود في مقدمتها، وهذا يؤدي إلى ارتفاع كثافة الغاز بدرجة عالية جداً، وينتج عن ذلك تحويل جزء من طاقة حركة الجسم (الشهب أو النيازك) إلى طاقة حرارية؛ لإثارة جزيئات الغاز في منطقة الصدمة. ويمكن القول بأن جزيئات الغاز تكتسب الطاقة من خلال طاقة الانتقال العلية من الأجسام؛ وتبعاً لذلك يتحول جزء من هذه الطاقة إلى إثارة المستويات الدورانية للجزيئات. ففي النهاية انحلال الجزيئات وتأينها، سوف تأخذ هذه الجزيئات مكانها إذا أصبحت الصدمة فعالة

بدرجة كافية. في طبقات الغلاف الجوي العليا، تحتفظ البلازما بحالتها؛ نظراً لوجود الأشعة الشمسية القادمة من الشمس، والإشعاعات الأخرى القادمة من الفضاء الخارجي، وتكون البلازما في الأيونوسفير عند درجة حرارة ١٠٠٠ كلفن، وعند ارتفاع ٦٠ كيلومتراً، وتكون كثافة الإلكترونات في المدى ١٠^٤ - ١٠^٦ سم^{-٣}، والميكانيكية التي تعمل على حفظ هذا المستوى من كثافة البلازما هي ظاهرة التأين الضوئي؛ حيث تمتص الذرات الفوتونات، وتحرر الطاقة التي تؤدي إلى بذل الشغل المطلوب لإزالة الإلكترونات من الذرات. تسلك البلازما السلوك الجماعي؛ فإذا وجد فرق في الكثافة؛ أي هناك منطقة ذات كثافة عالية وأخرى منخفضة، فإن هذا الفرق يتسبب في توليد مجال كهربائي، يؤدي إلى انجراف البلازما.. ونتيجة لحركة الشحنات يتولد تيار كهربائي، وبالتالي يتولد مجال مغناطيسي. ونتيجة لتوليد المجالين الكهربائي والمغناطيسي، فإنهما يؤثران على حركة الجسيمات المشحونة الأخرى.

معادلة سها Saha

الجزء المتأين من الغاز في حالة الاتزان الحراري يعطى بالعلاقة:

$$\frac{n_i}{n_n} \approx 2.4 \times 10^{21} \frac{T^{3/2}}{n_i} e^{-U_i/k_B T} \quad (1.1)$$

حيث n_i كثافة الذرات المتأينة

n_n كثافة الذرات المتعادلة

T درجة الحرارة

k_B ثابت بولتزمان

U_i جهد التأين

كثافة الذرات المتعادلة وجهد التأين للهواء عند درجة حرارة الغرفة

$$n_n \approx 3 \times 10^{25} \text{m}^{-3}, T \approx 300 \text{K}, U_i = 14.5 \text{eV} (1 \text{eV} \approx 1.6 \times 10^{-19} \text{J})$$

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

هذه النسبة على الأرض نادراً ما تكون المادة في حالة بلازما

إنتاج البلازما

لكي يتم تحويل الغاز إلى بلازما، لابد من انتزاع الإلكترون أو أكثر من ذرات الغاز، وبالتالي تتحول الذرات إلى أيونات موجبة وإلكترونات وتعرف هذه العملية باسم التأين.

ويمكن الحصول على عملية التأين بطرق متعددة ومن أهم هذه الطرق:

١ - التأين بالحرارة

تصبح معظم المواد في حالة تأين، إذا مأتَم تسخينها إلى درجة حرارة عالية، وهذه العملية تعرف بالتأين الحراري وتعتمد طاقة التأين للذرات على ترتيب العناصر في الجدول الدوري، فمثلاً العناصر الثقيلة نجد من السهل تأينها؛ لأن طاقة الترابط لإلكترونات ذراتها ضعيفة (مثل: الصوديوم - الليثيوم - البوتاسيوم - السيزيوم - إلخ)، وغالباً ما تستخدم هذه العناصر في الحصول على البلازما الحرارية في المعامل. أما عن الغازات الخاملة (مثل: الهليوم والنيون والأرجون ... إلخ) فنجد أن إلكترونات الترابط لها متينة ويصعب اضطرابها. ولكي نحصل على البلازما بالتأين الحراري، فمن الضروري أن تصل درجة الحرارة عشرات الألف من الدرجات؛ فمثلاً في الطبيعة نجد أن النجوم تتكون من بلازما حرارية.

٢ - التأين بالإشعاع

التأين بالإشعاع يحتل مكانة ذات أهمية في الفيزياء الفلكية؛ حيث تسبب الأشعة فوق البنفسجية القادمة من النجوم في تأين أبخرة الغازات المحيطة بها والغازات البينية بين النجوم، وتعمل الأشعة الشمسية أيضاً على تأين الطبقات الخارجية للغلاف الجوي للأرض. أما عن التأين بالإشعاع في تكنولوجيا البلازما، فإنه ليس ناجحاً بدرجة كافية؛ نظراً لعملية الاتحاد بين الإلكترونات وتكون الأيونات سريعة محققة شرط الاتزان.

٣ - التأين بالتفريغ الكهربائي

يعتبر التأين بالتفريغ الكهربائي هو العملية الأكثر شيوعاً في مختبرات، وتكنولوجيا البلازما أيضاً تحدث التأين بالتفريغ الكهربائي في الطبيعة، ومثال على ذلك البرق. تفريغ البرق للكهرباء يكون عادة ٣٠٠٠٠ أمبير، ويصل إلى ١٠٠ مليون فولت. يصدر منه الضوء وأشعة الراديو وأشعة سينية وحتى أشعة جاما. قد تصل درجة حرارة البلازما بالبرق إلى ٢٨٠٠٠ كالفن وقد تتعدى كثافة الإلكترون ٢٤١٠/متر^٣، أما التأين بالتفريغ الكهربائي في تكنولوجيا

البلازما، فإننا نجده مملوفاً في أنابيب الليزر الغازي، مثل: الهليوم - نيون ليزر والقوس الكهربائي ولمبات الفلوريسنت وغيرها. تعتمد عملية التأين بالتفريغ الكهربائي على وجود مجال كهربائي كبير، يعمل على وجود كثرة من الإلكترونات (أي زيادة سريعة جداً في أعداد الإلكترونات)؛ أي تحدث عملية تضعيف للإلكترونات في صورة متوالية هندسية.

هناك طرق أخرى متعددة في توليد البلازما، بالإضافة إلى الطرق السابقة، ولكنها أقل استخداماً.. على سبيل المثال توليد البلازما بالحقن؛ حيث يتم حقن سيل من الأيونات، ذات سرعات عالية من معجل إلى مصيدة مغناطيسية؛ فتعمل الأيونات على جذب الإلكترونات من الوسط المحيط، ليكون بلازما ساخنة.

أشكال البلازما تتضمن

- بلازما تصدر عن أجهزة صناعية • بلازما طبيعية أرضية • بلازما طبيعية كونية: فيزياء
- موجودة بشاشات البلازما مثل
- التلفاز.
- البرق والصواعق.
- الشمس والنجوم
- مصابيح التآلق (لمبات • كرة اللهب .
- (البلازما تسخن
- الفلوريسنت) (إنارة ذات طاقة • نار سانت إلمو .
- بالاتدماج النووي).
- ضعيفة)، إشارات النيون. • طبقة الأيونوسفير .
- رياح شمسية.
- عوادم الصواريخ.
- الشفق القطبي.
- الفراغ المحيط بين
- النطاق الموجود أمام الحاجز
- الحراري لسفن الفضاء خلال
- دخولها غلاف الأرض الجوي.
- داخل هالة مولد تفريغ الأوزون.
- أبحاث الاندماج النووي.
- التفوس الكهربائي الموجود
- بالإنارة القوسية، لحام القوس
- الكهربائي أو المصباح (المدفع)
- البلازمي.
- مصابيح البلازما وتسمى كرة
- البلازما.
- يستخدم البلازما لحفر رقائق
- الحاسوب لإنتاج الدوائر الكهربائية
- وصنع أشباه الموصلات.
- الكواكب.
- الفراغ المحيط بين
- النجوم.
- الفراغ المحيط بين
- المجرات.
- حلقة أحد أقمار المشتري
- الأقراص الناشئة من
- تكوين الأجسام النجمية
- الضخمة.
- مذنب المجرات.

معايير البلازما

يعتبر وصف البلازما على أنها وسط متعادل من الجسيمات سالبة وموجبة الشحنة، وصفاً ضعيفاً يحتاج إلى الدقة؛ لأن تعريف البلازما لابد أن يتضمن ثلاثة معايير؛ مما يعطى دقة أكثر، وهي:

١. **تقارب البلازما:** يجب أن تكون الجسيمات المشحونة متقاربة بدرجة أن لكل جسيم أن يؤثر على كثير من الجسيمات القريبة بدلاً من مجرد التفاعل مع أقرب الجسيمات (والسلوك الجماعي هو الصفة المميزة للبلازما). لتقارب البلازما تأثير أقوى، كلما كانت أعداد الإلكترونات داخل المجال المؤثر (يسمى كرة ديبي)، لها نصف قطر من الجسيمات الكبيرة يسمى (طول ديبي)، معدل عدد الجسيمات بمجال ديبي هو قيمة أو مقدار البلازما ويرمز λ_D .

طول ديبي Debye

يعتبر طول ديبي من أهم البارامترات الفيزيائية لوصف البلازما؛ فهو يحقق المسافة، التي يشعر عندها الجسيم المشحون الفردي بتأثير المجال الكهربائي للجسيمات المشحونة الأخرى، داخل البلازما. وهذه الجسيمات تقوم بترتيب نفسها لحجب الجهد الكهروستاتيكي، في حدود مسافة تعرف باسم طول ديبي λ_D . عند الأسطح الملامسة للبلازما (الجران) تتكون طبقة، تعرف باسم غشاء البلازما، وسمك هذه الطبقة في حدود طول ديبي λ_D ، وداخل هذه الطبقة تتعدم التعادلية الكهربائية الماكروسكوبية، التي هي معيار البلازما. أما البلازما التي وراء هذه الطبقة، فإنها تحقق التعادلية الكهربائية ويعطى طول ديبي بالعلاقة:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T_e}{n_e q_e^2}} \quad (1.2)$$

حيث:

ϵ هي النفاذية خلال الفراغ.

k هو ثابت بولتزمان.

q_e هو مقدار الشحنة الإلكترونية.

T_e درجة حرارة الإلكترونات.

n_e كثافة الإلكترونات

ويمكن حساب λ_D مباشرة من العلاقة:

$$\lambda_D(cm) = 743 \sqrt{\frac{T_e(ev)}{n(cm^{-3})}} \quad (1.3)$$

أو

$$\lambda_D(m) = 69 \sqrt{\frac{T_e(k^\circ)}{n(m^{-3})}} \quad (1.4)$$

من هذه العلاقات يتضح ان طول ديبياي يتناسب عكسياً مع كثافة البلازما، فكلما زادت الكثافة في التفريغ الكهربائي قل طول ديبياي، ومثال ذلك: اذا كانت كثافة الإلكترونات $n_e = 10^{16} m^{-3}$ ، ودرجة الحرارة $T_e = 10^4 k^\circ$ نجد طول ديبياي $\lambda_D \approx 10^{-4} m$ ؛ أى أنه صغير جداً، ويبلغ طول ديبياي عدة أمتار في البلازما الموجودة بين النجوم.

حجم التفاعلات في البلازما: حيث إن نصف قطر ديبياي Debye صغير بالمقارنة بالحجم الطبيعي للبلازما الموجودة في الكون، وهذا يعنى أن مقدار التفاعلات الحادثة في قلب كتلة البلازما، لها أهمية كبيرة عنها على حواف البلازما، آخذين في الاعتبار تأثير ما يحيط بالبلازما من الوسط المحيط بها. المقدار N_D يقيس متوسط عدد الإلكترونات، الموجودة داخل كرة ديبياي، ونصف قطره يسمى طول ديبي داخل، ويعطى بالعلاقة:

$$N_D = \frac{4\pi}{3} \lambda_D^3 n_e \quad (1.5)$$

أو

$$N_D = 1.38 \times 10^6 T^{1.5} (k^\circ) n_e^{-0.5} (m^{-3}) \quad (1.6)$$

غشاء ديبياي

غشاء ديبياي (يعرف أيضاً بالغشاء الكهربائي الساكن) (أو الإلكتروناتيك) عبارة عن طبقة من البلازما، لها كثافة كبيرة من الأيونات الموجبة، وبالتالي فلها شحنة موجبة فائضة، تقوم بخلق توازن مع شحنة سالبة مقابلة على سطح

مادة ما، تكون على تماس معها. تقدر سماكة هذه الطبقة بعدة وحدات من أطوال ديبياي، تتغير قيمتها اعتماداً على الخصائص المتعددة للبلازما، مثل: درجة الحرارة، والكثافة ... إلخ.

يتكون غشاء ديبياي في البلازما؛ لأن الإلكترونات لديها عادة درجة حرارة مقاربة، أو حتى أكثر من التي للأيونات، بالإضافة إلى كونها أخف وزناً. وبالتالي، فإن للإلكترونات سرعة أكبر من الأيونات بمعامل على الأقل من درجة $\sqrt{m_i/m_e}$ ، وهذا يؤدي لأن تقوم الإلكترونات بالهروب من البلازما على السطح الفاصل للمادة، وبالتالي تشحن السطح بشحنة سالبة، بالمقارنة مع البلازما بحد ذاتها. ويعتمد بارامتر البلازما على كل من طول ديبياي وكثافة البلازما ويرمز له Λ .

يمكن تلخيص مقدار Λ بالجدول التالي:

مقدار قيمة البلازما		الوصف
$\Lambda \gg 1$	$\Lambda \ll 1$	
اقتران البلازما	البلازما مقترنة بقوة	الاقتران
ضعيف		
تكتل كثيف	تكتل خفيف ومتناثر	كرة ديبياي
أحياناً	متواصل بشكل دائم	التأثير الكهروستاتيكي
حار ومتناثر	بارد وكثيف	المميزات
طبيعة طبقة	بلازما الاستئصال بالجراحة عن	أمثلة
الأيونوسفير	طريق الليزر المكثف	
أجهزة الانصهار	التفريغ القوسي البارد ذو الضغط	
المغناطيسي	العالي	
بلازما الفضاء	تجارب انصهار القصور الذاتي	
الخارجي	النجوم الصغيرة البيضاء/طبقات	
كرة البلازما	الجو للنجوم النيوترونية	

الجدول يوضح أهم البارامترات لأنواع مختلفة من البلازما ت (الكونية والأرضية).

	$n(m^{-3})$	$T(eV)$	$\omega_p (sec^{-1})$	$\lambda_D (m)$	Λ
Interstellar	10^6	10^{-2}	6×10^4	0.7	4×10^6
Solar Chromosphere	10^{18}	2	6×10^{10}	5×10^{-6}	2×10^3
Solar wind (1 A U)	10^7	10	2×10^5	7	5×10^{10}
Ionosphere	10^{12}	0.1	6×10^7	2×10^{-3}	1×10^5
Arc discharge	10^{20}	1	6×10^{11}	7×10^{-7}	5×10^2
Tokamak	10^{20}	10^4	6×10^{11}	7×10^{-5}	4×10^8
Inertial Confinement	10^{28}	10^4	6×10^{15}	7×10^{-9}	5×10^4

٣. تردد البلازما:

من أهم خصائص البلازما هي استقرارية التعادلةية الكهربائية الماكروسكوبية. ولكن عند حدوث اضطراب لحظي للبلازما، يختل التوازن وتتولد مجالات كهربائية داخلية، تؤدي إلى التحرك الجماعي للجسيمات، والتي تعمل على إعادة التعادلةية إلى وضعها الأصلي. والتحرك الجماعي للجسيمات ما هو إلاذبذبات ذات تردد، يعرف باسم تردد البلازما. وبسبب فرق الكتلة بين الأيونات والإلكترونات، فإن الإلكترونات تتذبذب جماعياً حول الأيونات، وتتحقق قوة الاسترجاع الجماعية بقانون كولوم للتجاذب بين الأيونات والإلكترونات.

تردد الإلكترونات في البلازما هو كبير بالمقارنة بتردد الإلكترون، في حالته المتعادلة (ويقيس التردد البلازمي للإلكترون، ويسمى موجات البلازما أو موجات لانجموير نقيس كثافة الشحنة في محيط موصل، مثل: البلازما والمعادن. وينتج من الكمية في هذا التردد (البلازمون)، وهو شبه جزيء للبلازما) أكبر من تردد الإلكترون بالحالة الطبيعية (بقياس موجات التصادم بين الإلكترونات والجسيمات المحايدة). بهذه الحالة، تتصرف البلازما بحماية شحناتها بسرعة (شبه محايد هو تعريف آخر للبلازما).

الأرض منبع البلازما؛ حيث نرى أيونات الأكسجين والهيدروجين والهليوم تتدفق إلى الفضاء من مناطق قريبة من القطبين. يرمز اللون الأصفر الذي فوق القطب الشمالي إلى ضياع الغازات إلى الفضاء الخارجي. وترمز

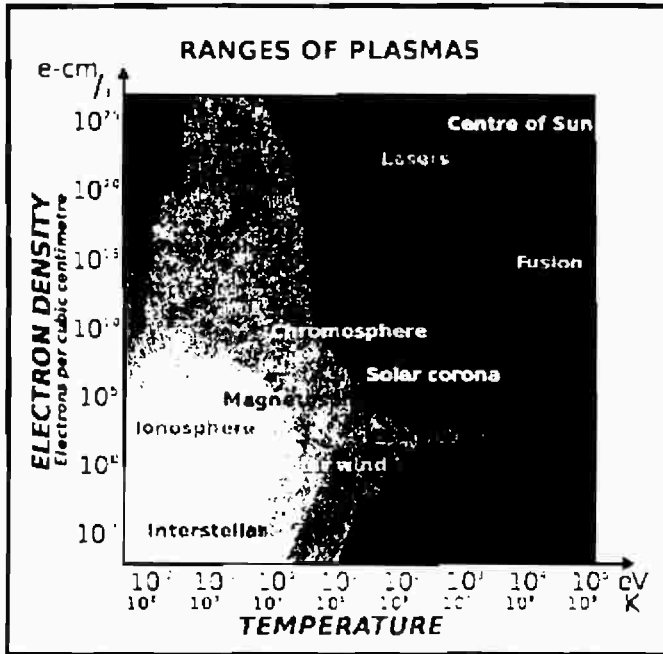
المنطقة الخضراء إلى شفق القطب الشمالي، أو طاقة البلازما، التي تتدفق عائداً إلى الأرض.



شكل (٤): شفق القطب الشمالي.

تختلف قيم البلازما حسب القيم الأسية، ولكن خصائص البلازما قد تكون متقاربة جداً، كما هو موجود بجدول مقياس البلازما. الجدول التالي يبين فقط البلازما الذرية التقليدية فقط، وليست الظواهر الغريبة مثل بلازما الكواركات:

نطاق بارامترات البلازما



شكل (٥): نطاق البلازما من حيث كل من درجة الحرارة والكثافة.

مدى مجموعة من البلازما. تزداد الكثافة لأعلى، وزيادة درجة الحرارة نحو اليمين. ويمكن اعتبار الإلكترونات الحرة في المعادن مثل إلكترونات البلازما.



الحجم بالأمتار	10^{-6} متر (بلازما مختبرات) حتى 10^{-6} متر (غلاف سفينة الفضاء)
10^2 متر (البرق)	حتى 10^{25} متر (سديم للمجرات)
الحياة بالثواني	10^{-12} ثانية (البلازما للليزرية) 10^1 ثانية (الانفجارات الشمسية)
حتى 10^7 ثانية (المبات للفورسنت)	حتى 10^{17} ثانية (بلازما للمجرات)
الكثافة	10^7 حتى 10^{32} لكل متر مكعب 1 ما بين (المجرات حتى
الجسيمات لكل متر مكعب	(حصر البلازما المعطالي) 10^{30} m^{-3} باطن للنجوم
درجة الحرارة	0-كلفن (بلازما متبلورة غير 10^2 كلفن (الشفق) حتى
بالكلفن	متعادلة حتى 10^8 كلفن (بلازما 10^7 كلفن (باطن الشمس)
	الاتصاج المغناطيسي)
المجال المغناطيسي	10^{-4} تسلا (بلازما مختبرات) حتى 10^{-12} تسلا (ما بين المجرات) حتى
بالتسلا	10^3 تسلا (البلازما النبضية) 10^{11} تسلا (قرب النجوم
	النيوترونية)

درجة تأين البلازما

التأين ضروري لتكوين البلازما، والمقصود بـ"كثافة البلازما"، هي الكثافة الإلكترونية؛ بمعنى كمية الإلكترونات المتحررة لكل وحدة حجم. درجة التأين هي كمية الذرات التي خسرت (أو كسبت) إلكترونات، تكون الحرارة هي العامل القوي المتحكم بذلك. لو أن جزءاً من الغاز بما يساوي 1% من الجسيمات قد تأينت، فسوف يأخذ الغاز صفة البلازما (بمعنى أنه يتأثر بالمجال المغناطيسي، وهو التوصيلية الكهربائية العالية).

درجة التأين α تعرف بالمعادلة:

$$\alpha = \frac{n_i}{(n_i + n_a)} \quad (1.7)$$

حيث إن: n_i كثافة الأيونات و n_a كثافة الذرات غير المتأينة (المحايدة).

ترتبط كثافة الإلكترون بدرجة التأين، عن طريق حالة متوسط الشحنة (Z) لأيون خلال المعادلة التالية:

$$n_e = \langle Z \rangle n_i$$

حيث n_e ترمز إلى كثافة الإلكترونات.

تسمى البلازما مع درجة قليلة من التأين "بلازما باردة". ومن الممكن الحصول على بلازما بدرجة قليلة من التأين (أكثر الغازات المحايدة)؛ بمعنى أن الأيونات ذات درجة عالية من التأين، تكون الإلكترونات قليلة موجودة لكل أيون.

درجات الحرارة

تقاس حرارة البلازما بالكلفن أو إلكترون فولت، وهي قياس للطاقة الحركية الحرارية لكل جزيء. في كثير من الأحيان، تكون الإلكترونات قريبة من حالة التوازن الحراري؛ لأن الحرارة تكون واضحة المعالم. حتى بحالة الانحراف في معادلات ماكسويل لتوزيع الطاقة، ومثل: أشعة فوق البنفسجية، والجسيمات النشطة، أو مجال كهربائي قوي. وبسبب التفاوت الكبير بالحجم، تأتي الإلكترونات إلى حالة التوازن ديناميكا الحرارية بأنفسها، أسرع من أن يتحولوا إليها، من خلال الأيون أو الذرات الطبيعية. لهذا السبب تكون حرارة الأيونات مختلفة عن حرارة الإلكترون، وعادة أبرد. وهذا معتاد ببلازما الأيونات الضعيفة؛ حيث تكون الأيونات قريبة من الحرارة المحيطة.

استناداً إلى الحرارة المرتبطة بالإلكترونات والأيونات والجسيمات المحايدة، فإن البلازما يمكن تصنيفها على أنها حرارية أو لاهرارية.

- البلازما الحرارية: تكون فيها الإلكترونات والأجسام الثقيلة بنفس بدرجة الحرارة نفسها؛ أي إنها بحالة التوازن الحراري مع بعضها البعض..
- البلازما اللاحرارية: تكون الأيونات والجسيمات المحايدة بحالة الحرارة المحيطة بها، بينما تكون الإلكترونات أكثر حرارة بكثير.

وكما أسلفنا، فإن الحرارة تتحكم بدرجة التأين بالبلازما؛ خاصة وأن تأين البلازما محدد بدرجة حرارة الإلكترون المتصلة بطاقة التأين (وبدرجة أضعف بالكثافة). وأحياناً يشار إلى البلازما بأنها حارة، إذا كانت متأينة بدرجة تامة، أو باردة إذا كان جزئ بسيط (كمثال ١%) من جزيء الغاز متأيناً، ولكن التعريفات الأخرى للبلازما الحارة والباردة هي معروفة. حتى

في حالة البلازما الباردة، فإن درجة حرارة الإلكترون المثالية، تكون حوالي عدة آلاف من الدرجات المئوية. عادة ما تكون البلازما المستخدمة في التكنولوجيا البلازمية باردة في هذا الصدد.



شكل (٦): البرق كمثال للبلازما الموجودة على سطح الأرض.

تفريغ البرق للكهرباء يكون تياراً تصل شدته عادة إلى 30 كيلو أمبير، ويصل جهد التفريغ إلى 100 مليون فولت. يصدر منها الضوء وأشعة الراديو وأشعة سينية وحتى أشعة جاما. قد تصل درجة حرارة البلازما بالبرق ~ 28000 كلفن، وقد تتعدى كثافة الإلكترون 10^{24} m^{-3} .

الجهد الكهربائي

بما أن البلازما موصل قوي للكهرباء، فإن مقادير الجهد الكهربائية ستأخذ دوراً مهماً. وبما أن الجهد موجود ما بين جسيمين مشحونين بالفضاء، فإذا وضع إلكترون أو قطب كهربائي بالبلازما؛ فإن الجهد بشكل عام سيتحرك بقوة إلى مادون جهد البلازما؛ بسبب نشوء ما يسمى غشاء ديبياي. وبسبب جودة التوصيل الكهربائي، فإن المجال الكهربائي للبلازما يصبح صغيراً جداً، وهذا يفضي إلى مفهوم مهم لشبه الحياد، والذي يقول إذا كانت كمية التقارب الحقيقية جيدة، فالمفروض أن كثافة الشحنات السالبة تعادل كثافة الشحنات

الموجبة خلال مساحة كبيرة من البلازما؛ حيث إن المعادلة: $(n_e = \langle Z \rangle n_i)$ على مقياس طول ديبي قد يكون الشحن فيها غير متوازن. بهذه الحالة الخاصة، تكون الطبقات المزدوجة متشكلة، ويمكن توزيع الشحن أن يمتد إلى عشرات من أطوال ديبي.

إذا كانت البلازما في حالة اتزان ديناميكي حراري، نجد كثافة الإلكترونات n_e تعطى بالعلاقة الآتية:

$$n_e \propto e^{e\Phi/k_B T_e} \quad (1.8)$$

حيث: Φ الجهد الكهروستاتيكي، و k_B ثابت بولتزمان، و T_e درجة حرارة الإلكترونات..

وميزة تلك المعادلة تجعل الحالة قادرة على حساب المجال الكهربائي من الكثافة:

$$\vec{E} = (k_B T_e / e) (\nabla n_e / n_e) \quad (1.9)$$

يمكن إنتاج بلازما ليست شبه محايدة، فمثلاً كثافة البلازما غير المحايدة يجب أن تكون قليلة أو صغيرة جداً، وإلا فإنها ستتشتت بطريقة الكهرباء الساكنة غير المرغوب فيها. في البلازما الكونية، يمنع حاجز ديبي المجال الكهربائي من التأثير المباشر على البلازما، خلال مسافة كبيرة (أبعد من طول ديبي). ولكن ظهور الجزيئات المشحونة يجعل البلازما تولد، وتتأثر بالمجال المغناطيسي. وهذا يسبب سلوكاً معقداً مثل نشوء الطبقات المزدوجة، التي تفصل الشحنات عن بعضها البعض، خلال العشرات من أطوال ديبي. تتأثر ديناميكا البلازما مع المجالات المغناطيسية سواء الخارجية أو المنتجة ذاتياً.

المغطة

البلازما الممغنطة هي التي توضع في مجال مغناطيسي قوي؛ لدرجة أنه يؤثر على حركة الجسيمات المشحونة. المعيار الكمي الشائع هو أن الجسيم يكمل على الأقل دورة كاملة حول المجال المغناطيسي، قبل الاصطدام (بمعنى ω_{ce} / ν_{coll} أكبر من 1؛ حيث إن ω_{ce} هو عدد دورات الإلكترون حول المجال و ν_{coll} هو معدل اصطدام الإلكترون). يكون بالعادة أن الإلكترونات ممغنطة والأيونات غير ممغنطة. تكون البلازما الممغنطة متباينة الخواص؛ بمعنى أن

هناك خصائص البلازما في اتجاه مواز للمجال المغناطيسي، وتختلف عن تلك البلازما العمودية على المجال. بما أن المجال الكهربائي بالبلازما يكون ضعيفاً بسبب قوة التوصيل، إلا أنه يتوافق مع حركة البلازما بالمجال المغناطيسي بالمعادلة التالية:

$$E = -v \times B \quad (1.10)$$

حيث: E هو المجال الكهربائي...، و v هو السرعة و B هو المجال المغناطيسي)، وهذا المجال الكهربائي لم يتأثر بحاجز ديبي، ولكن على أطراف البلازما يكون المجال الكهربائي أساساً صفر.

مقارنة بين طوري البلازما والغاز

البلازما هي الحالة الرابعة للمادة، وتتميز عن غيرها من حالات المادة بالطاقة الهائلة، التي تمتلكها. وهو ذو صفات مقاربة للحالة الغازية، ولكن ليس له شكل محدد أو كتلة. ينظر العلماء إلى البلازما على أنها أكثر أهمية من الغاز؛ بسبب الحالات المتميزة لها. ويوضح الجدول التالي الفرق بين الحالتين البلازما والغاز:

البلازما	الغاز	الخاصة
قوي جداً.	ضعيف جداً.	توصيل كهربائي
لأغراض عديدة التوصيل بالبلازما، فمن الممكن أن يعامل على أنه غير محدود.	الغازات عازل قوي، إلا في حالة تحولها إلى مادة بلازمية، في مجال كهربائي، قوته فوق 30 كيلوفولت/سم.	الأنواع التي تمثلها
اثنان أو ثلاثة. إلكترونات أو أيون أو محايد، وتوزع حسب نوع الشحنة، وتتصرف عند أكثر الحالات باستقلالية حسب الحجم والسرعة والحرارة، وبظهور أنواع جديدة من الموجات وعدم الاستقرار.	نوع واحد. تتصرف جميع الجزيئات بطريقة مشابهة، تتأثر بالجاذبية وتتصادم مع بعضها البعض.	

توزيع السرعة	نظام ماكسويل لتوزيع السرعات.	غير خاضع لنظام ماكسويل.
التفاعلات	يتبع التصادم نظام ماكسويل لتوزيع السرعات عند جميع الجزيئات، عدا بعض الجزيئات السريعة.	تفاعلات التصادم ضعيفة عند البلازما الحارة والقوة الخارجية قادرة على تحريك البلازما من مكانها المتوازن وتؤدي إلى كثافة قوية من الجسيمات السريعة الغير عادية.
	مزدوج.	تراكمي.
	اصطدام بين جسيمين، ونادراً بين ثلاثة.	تموج أو حركة منتظمة للبلازما مهم جداً لأن الجسيمات تتفاعل لمجالات أبعد خلال القوى الكهربائية والمغناطيسية.

حالات البلازما المعقدة

على الرغم أن المعادلات التي تحكم البلازما هي بسيطة نوعاً ما، إلا أن سلوك البلازما غير عادي ومتغير وفيه ذكاء. إن ظهور تصرف غير متوقع من شكل عادي هو تصرف طبيعي من نظام معقد، ومثل هذه النظم تميل - في بعض الأحيان - في سلوكها ما بين النظام والفوضى، ومن الصعب وصفها سواءً عبر قوانين رياضية بسيطة، أو بالعشوائية التامة. والشكل (٧) هو أحد حالات البلازما المعقدة، الناتجة من انفجار نجم من مجرة؛ حيث يحدث تمدد للبلازما وتتبعث الأشعة السينية بواسطة الإلكترونات ذات الطاقة الحركية الكبيرة.



شكل (٧): بقايا نجم متفجر عبارة عن كرة ضخمة من البلازما الممتددة، الغلاف الخارجي الموضح باللون الأزرق، هو الأشعة السينية المنبعثة نتيجة للإلكترونات السريعة.

التشكيل العفوي من الميزات المكانية بالسلسلة الواسعة من الجداول الطويلة هو أحد مظاهر التعقيد بالبلازما. أغلب تلك الجسيمات تمت دراستها معملياً في بادئ الأمر، ومن ثم تعرف الناس عليها. تشتمل أمثلة على تعقيدات وتركيب الأجسام بالبلازما على:

التفتيل

ترى الشروخ والقنوات أو الأشياء الضئيلة في أغلب البلازما، مثل: كرة البلازما، والشفق والبرق، والنقوس الكهربائي ووهج الشمس، وترتبط أحياناً بقايا الانفجار النجمي فهي مع أكبر كثافة موجودة، وتسمى بالحبال المغناطيسية.

الكتل أو الطبقات المزدوجة

الصفائح الضيقة ذات الحواف الحادة، مثل: الكتل أو الطبقات المزدوجة، تسبب التغير السريع بخصائص البلازما. بينما تكون الطبقات المزدوجة مسئولة عن تركز الشحنات المنفصلة، والتي تسبب الاختلاف الكبير بالجهد خلال الطبقة ولكن لا تولد أي مجال كهربائي خارجها. تباعد الطبقات

المزدوجة بين مناطق البلازما المتقاربة بأشكال مختلفة، وتكون موجودة بالعادة بالتيارات حاملة البلازما، وهي تعجل سرعة الإلكترونات والأيونات.

المجال الكهربى والدوائر

تتطلب خاصية شبه الحيادية بالبلازما من تيارات البلازما، أن تكون متقاربة من بعضها البعض بالدوائر الكهربائية، وهذه الدوائر تخضع لقانون كيرشوف للدائرة الكهربائية، وتحتوي على مقاومة وعامل مستحث.. وتلك الدوائر يجب أن تعامل كنظام مزدوج قوي، كل منطقة بلازما مستقلة بسلوكها بالدائرة الداخلية.. إنها الترابط القوي بين عناصر النظام معاً مع عدم الاستقامة؛ مما يقود إلى سلوك معقد. تخزن الدوائر الكهربائية بالبلازما طاقة مستحاثات (مغناطيسية)، وأن تكون تلك الدائرة معطلة؛ فمثلاً عند عدم استقرار البلازما، بينما تخرج الطاقة المستحثة كمسخن ومسارع للبلازما، وهذا هو تفسير الحرارة التي توجد بالهالة الشمسية. التيار الكهربى وبالتحديد المجال المغناطيسى المصطف مع التيار الكهربى (الذي أحياناً يشير إلى تيارات بيركلاند) تلاحظ عادة بالشفق الأرضي، وفي فتائل البلازما.

البناء الخلوي

يمكن أن تعزل الصفائح الضيقة ذات الحواف الحادة المناطق مع خواصهم المختلفة، مثل: المغناطيسية والكثافة والحرارة؛ مما ينتج مناطق تشبه الخلايا. الأمثلة على ذلك المحيط المغناطيسى والمحيط الشمسي، وغطاء المجال الشمسي. كتب هنز ألفن: وجهة نظر عالم بالكونيات، هو أن أهم أبحاث اكتشافات الفضاء، هو بالاحتمال تكوين الكون الخلوي كما تبين في كل منطقة من مناطق الفضاء التي يمكن الاطلاع عليها في الموقع، وهناك عدد من الحوائط الخلوية، وصفائح من التيار الكهربى، التي تقسم الكون إلى أقسام مع اختلاف بالمغناطيسية والحرارة والكثافة... إلخ.

سرعة التأين الحرجة

هي السرعة النسبية ما بين البلازما المتأينة والغاز المحايد؛ حيث يحصل التأين للغاز. عملية التأين الحرجة، هي تقنية عامة للتحويل الطاقة الحركية لتدفق الغاز السريعة إلى طاقة البلازما أو التأين الحرارية. وإذا ضخنا طاقة أكثر.

فإن سرعة الذرات أو الجزيئات لن تتعدى سرعة التأين الحرجة، حتى يكون الغاز كامل التأين، وهذه الظاهرة الحرجة هي حالة نموذجية من نظام معقد، ويمكن أن تؤدي إلى ميزات مكانية أو زمانية شديدة.

البلازما الشديدة البرودة

يمكن إنتاج بلازما شديدة البرودة باستخدام الليزر؛ لإسك وتبريد الذرات المحايدة إلى درجة حرارة، تعادل ١ مللي كلفن أو أقل، وليزر آخر يؤين الذرات بواسطة إعطاء الإلكترونات الأبعد طاقة كافية؛ للخروج من مجالها الذري. النقطة المهمة في البلازما الشديدة البرودة، هي معالجة الذرات بدقة بواسطة الليزر، والسيطرة على طاقة الحركة للإلكترونات المتحررة. وباستخدام ليزر نبضي معين، يمكن إنتاج طاقة إلكترون مقارنة لدرجة حرارة صغيرة تعادل ٠,١ كالفن، ونطاق التردد لليزر النبضي محدد سلفاً؛ فالأيون يحافظ على درجة حرارة تساوي مللي كالفن في الذرة المحايدة. وهذا النوع من البلازما الشديدة البرودة غير المتوازنة ينشأ بسرعة، ويضع أسئلة كثيرة لهذا السلوك دون إجابة لها، وأفضت التجارب إلى كشف ديناميكيات غريبة وسلوك إعادة الارتباط؛ مما زاد من حدود معرفتنا بعلم البلازما. إحدى الحالات غير المستقرة للبلازما غير المثالية هي حالة ريديرج، والذي يشكل من تكثيف الذرات بالإثارة.

البلازما اللاحيادية

الشبه حيادية هي مقدرة ومدى قوة الإلكترون، وجودة التوصيل بالبلازما، تلك التي تضمن عادة تعادلاً في كثافة الشحنات السالبة والموجبة لكل نطاق محدد. أما البلازما المحتوية على كمية إضافية من كثافة شحنة معينة بحالات قصوى يتكون، فقط، لصنف واحد يسمى بلازما لاهيادية. وبالبلازما المجال الكهربائي هو المهيمن، مثل: حزمة الجزيئات المشحونة، والغيوم الإلكترونية، والبلازما البوزيترونية (هو جسيم مضاد مساوي لكتلة الإلكترون، وذو شحنة موجبة).

البلازما المغبرة والبلازما الحبيبية

تكون البلازما المغبرة بالفضاء الكوني عادة، وتتميز بوجود الغبار فيها، فإذا صارت الجسيمات أكبر.. فإنها تكون حبيبية، ولها تصرفات البلازما.

وصف رياضي

لوصف حالة البلازما تمامًا، فإننا نحتاج لنعرف أماكن وسرعة الجسيمات ووصف المجال الكهرومغناطيسي بمنطقة البلازما، ولكن ليس من الضروري أن نفحص جميع الجسيمات بالبلازما، ولهذا يعطى علماء البلازما بتفصيل أقل للنماذج المعروفة، وهناك نوعان مهمان، هما:

نموذج الموائع

يصف نموذج الموائع البلازما من حيث الكميات السهلة، مثل: الكثافة والسرعة المتوسطة حول كل موقع. وأحد نماذج الموائع البسيطة نظرية ديناميكية هيدرومغناطيسي (ديناميكيات الموائع الموصلة في مجالات كهربية ومغناطيسية شبه مستقرة، وقد تكون هذه الموائع معادن فلزية سائلة كـالزئبق أو الفلزات القلوية المنصهرة، أو قد يكون غازًا ضعيف التأين أو بلازما) وهي تتعامل مع البلازما كمائع وحيد محكوم بتركيبة من (معادلات ماكسويل ومعادلات نافير-ستوك). والوصف الآخر هو نظام الموائع الثنائي؛ حيث إن الإلكترون والأيون يعاملان منفصلين عن بعضهما البعض. ويكون نظام الموائع عادة دقيقًا، إذا صار الاصطدام عاليًا بدرجة كافية؛ لكي يصل توزيع سرعة البلازما مقاربًا لقانون (توزيع ماكسويل بولتزمان). والسبب أن نظام الموائع يصف البلازما كمجرى واحد، بدرجة حرارة محددة لكل موقع مكاني، فإنه لا يمكنه اصطيد سرعة الأجسام الفضائية، مثل: الشعاع أو الطبقات المزدوجة، ولا يحل تأثير أجسام الموجات.

النموذج الحركي

يصف هذا النموذج توزيع سرعة الجسيم لكل نقطة بالبلازما، ولا نحتاج للافتراض بقانون توزيع ماكسويل بولتزمان. وصف الحركة ضروري للبلازما العديمة الاصطدام، وهناك طريقتان معروفتان لوصف الحركة بالبلازما: الأولى تعتمد وظيفة التوزيع السهل على الشبكة في السرعة والموقع، أما الأخرى فتسمى تقنية الجزئ في الخلية، فتضم المعلومات الحركية باتباع مسارات لعدد كبير من الجزيئات الفردية. نموذج الحركي أكثر كثافة حسابيًا من نموذج الموائع، ويستخدم معادلة فلاسوف لوصف نشوء نظام الجزيئات بالبيئة.

تقريب البلازما المثالية

أحد المعايير التي تحدد مجموعة الجسيمات المشحونة، وتوصف بدقة البلازما هو $\alpha \ll 1$ ، عندما تكون بهذه الحالة.. فإن التفاعلات الجماعية للكهرباء الستاتيكية تسيطر على الاصطدامات الثنائية، ويمكن التعامل مع جسيمات البلازما كما لو أنها تتفاعل بمجال خلفية ناعمة، أفضل من التفاعلات (الاصطدامات) الزوجية الخشنة. معادلة الحالة في البلازما المثالية هي نفسها في الغاز المثالي.

البلازما الاصطناعية

تنتج معظم البلازما الصناعية بتطبيقات المجالات الكهربائية أو المغناطيسية أو كليهما. والبلازما المنتجة مخبرياً ثم للاستخدام الصناعي، يمكن أن تصنف بشكل عام، حسب:

- نوع مصدر الطاقة المنتجة لتلك البلازما، بمعنى التيار الكهربائي، تردد موجي، وتردد ذو الموجات الدقيقة (Microwave).
- مجال الضغط لديها: ضغط الفراغ $> 10^{-10}$ مللي تور، ضغط جزئي ~ 1 تور، الضغط الجوي 760 تور = 1 بار = 1.013 نيوتن/متر مربع.
- درجة التأين بالبلازما: تأين كامل، تأين نسبي، تأين ضعيف.
- علاقة الحرارة داخل البلازما: بلازما حرارية ($T_{\text{gas}} = T_e = T_{\text{ion}}$)، بلازما غير حرارية أو باردة ($T_{\text{gas}} = T_{\text{ion}} \ll T_e$).
- شكل القطب المستخدم لتوليد البلازما.
- مغناطيسية الجسيمات الداخلة بالبلازما: ممغنطة (الأيون والإلكترون كلاهما محاصران في مدار لارمور، بواسطة المجال المغناطيسي)، ممغنطة جزئياً (الإلكترونات فقط هي المحاصرة بواسطة المجال المغناطيسي)، غير ممغنطة (حيث المجال المغناطيسي ضعيف عن إمساك الجزيئات حول المدارات).
- الاستعمال والتطبيق.

أمثلة على البلازما الصناعية

إفراغ بالضغط منخفض

- بلازما تفريغ متوهج: بلازما غير حرارية، تتولد بتطبيقات من التيار الكهربائي المستمر، أو تردد منخفض لموجات المجال الكهربائي للفراغ ما بين

قطبين معدنيين (أقل من ١٠٠ كيلوهرتز)، وأشهر تطبيق لذلك هو إضاءة الفلوريسنت.

- **بلازما التقارن بالسعة:** شبيهة لما قبلها، ولكن تحتاج إلى مجال كهربائي ذي تردد عالٍ من الموجات (تقديراً ١٣,٥٦ كيلوهرتز). وهذه تختلف عن التفريغ المتوهج بأن الأغلفة أقل كثافة بكثير، وهذه التطبيقات تستخدم بشكل شائع في: الصناعات الدقيقة، وصناعة الدوائر المتكاملة لعمل النقش البلازمي، والإزالة بالبلازما المعززة بالأبخرة الكيميائية.
- **بلازما التقارن بالحث:** مشابه للتقارن بالسعة ومشابه بالتطبيقات، ولكن القطب يحتوي على ملف، يغطي منطقة التفريغ؛ مما يؤثر البلازما بالحث.
- **بلازما الموجات المسخنة:** مشابهة للتقارن بالحث والسعة من حيث الترددات، ولكن الموجات تسخن بواسطة كلتا الوصلتين الكهروستاتيكية والكهرومغناطيسية، وهي تحتاج إلى مجال مغناطيسي، متحد المحاور لانتشار الموجات.

إفراغ بالضغط الجوي

- **التفوس الكهربائي:** وهو ما يسمى باللحام، وهي طاقة لتصريف درجات حرارة عالية (~ ١٠٠٠٠ كالفن). وتولد من عدة مصادر طاقة. وتستخدم بشكل عام بعمليات التعدين؛ فعلى سبيل المثال، تستخدم لإذابة الصخور المحتوية على أكسيد ألومنيوم؛ لإنتاج معدن الألومنيوم.
- **التفريغ الإكليلي:** تفريغ لا حراري، ويولد بواسطة تطبيق جهد كهربائي عالٍ على الأطراف الحادة للقطب. ويستخدم بشكل عام لتوليد غاز الأوزون، ومرسبات الجسيم.
- **تفريغ حاجز العازل الكهربائي:** تفريغ لا حراري، يولد بتطبيق جهد كهربائي عالٍ، خلال فجوات بحيث العازل غير الموصل، يمنع انتقال تفريغ البلازما إلى تقوس. والعادة يخطأ بالتسمية بالتفريغ الإكليلي بالصناعة مع إنها متشابهان بالتطبيقات. وتستخدم بنطاق واسع لعمل تشابك الأنسجة الصناعية واللدائن.