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 سمى بلازما (التي تعني "جيلي") من قبل العالم الطبيب التشيكي، يوهانس بركينيي (١٧٨٧-١٨٦٩). استخدم هذا المصطلح، لأول مرة، من قبل عالم الكيمياء الأميركي لانجمير الحائز على جائزة نوبل لوصف الغاز المتأين في عام ١٩٢٧. نظرًا للتشابه القريب جدا ببلازما الدم، يحمل المائع المؤين الإلكترونات والأيونات. فحص لانجمير، جنبا إلى جنب مع زميله تونكس، فيزياء وكيمياء فتيلة تنجستن المصابيح الكهربائية؛ بهدف إيجاد وسيلة لإطالة عمر الفتيلة (وهو الهدف الذي تتحقق معه في نهاية المطاف). في هذه العملية، تطورت نظرية بلازما الأغماد، وهي الطبقات المتاخمة 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 لانجمير. وكان هذا هو نشأة فيزياء البلازما. ومن المثير للاهتمام أن أبحاث لانجمير في الوقت الحاضر تكون الأساس النظري لمعظم تقنيات المعالجة بالبلازما لإنتاج الدوائر المتكاملة. بعد لانجمير، انتشرت تدريجيًا بحوث البلازما في اتجاهات أخرى، منها خمس تكتسب أهمية خاصة.

أولا، أدى تطور البث الإذاعي إلى اكتشاف أيونوسفير الأرض، وطبقة من الغاز المؤين جزئيًا في الغلاف الجوي العلوي، الذي يعكس موجات الراديو، ويكون مسؤولا 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 تنشر 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 أبليتون 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 فهمًا 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 عموما أنها الآلية الأساسية وراء الانفجارات الشمسية. تدرس نظرية دينامو تدرس كيفية حركة المائع MHD؛ لتؤدي إلى توليد مجال مغناطيسي عيني (ماكروسكوبي). وهذه العملية مهم جدًّا؛ 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 مائعًا MHD كتقريب معقول.

ثالثا، إنشاء القنبلة الهيدروجينية في عام ١٩٥٢ أحدث قدرًا كبيرًا من الاهتمام في الاندماج النووى الحرارى، كمصدر ممكن للطاقة في المستقبل. في البداية تمت هذه الدراسة التي كانت تجري سرًّا، 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 أدي إلى نشر عدد من الأوراق المهمة والمؤثرة جدًّا في أواخر ١٩٥٠ وأوائل عام ١٩٦٠. بشكل عام، ظهرت لأول مرة فيزياء البلازما النظرية كتخصص رياضي دقيق في هذه السنوات. وليس مستغربًا أن معظم فيزيائي الاندماج

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

رابعا، اكتشاف چيمس ڤان ألن في عام ١٩٥٨ أحزمة من الإشعاع محيطة بالأرض، تعرف باسم ڤان 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.

أخيرًا، تطوير أنظمة الليزر عالية الطاقة في عام ١٩٦٠ فتحت مجال فيزياء الليزر البلازما. عندما يضرب شعاع الليزر عالي الطاقة هدفًا صلبًا 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.

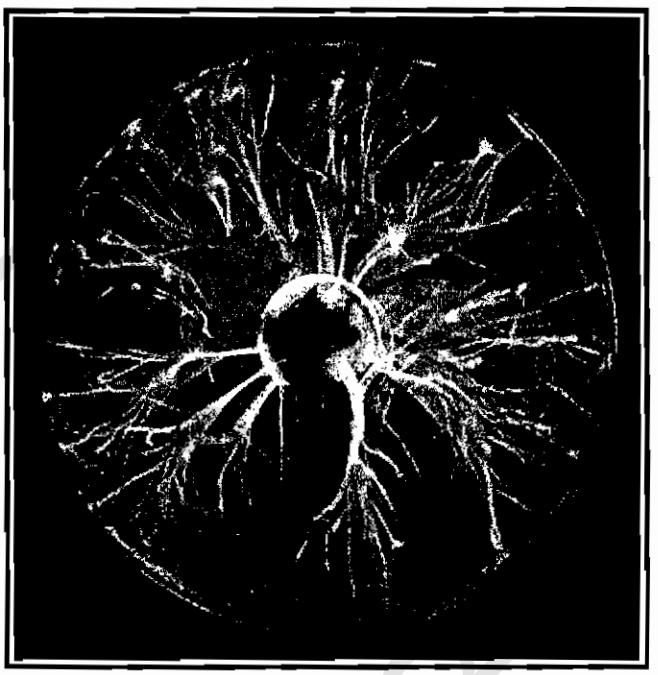
في الأزمنة القديمة كان يعتقد أن العالم مكون من أربعة عناصر أساسية، هى: التربة –الماء – الهواء والنار؛ حيث تمثل التربة الحالة الصلبة والماء الحالة السائلة والهواء الحالة الغازية للمادة، وتناظر البلازما العنصر الرابع، وهو النار الذي يظهر الحالة الغالبة على المستوى الكوني. وبالتالي البلازما هي حالة متميزة 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 الكهربية 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 كمصايد 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 جدا، وبالتالي تقريبا المقاومة ضعيفة جدًا لمرور التيار الكهربي 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 عديدًا من الألكترون ڤولت (حيث ١ الكترون ڤولت يساوي ١١٦٠٠ درجة كلڤن) أما البلازما الساخنة، فإن درجة حرارتها تصل عديدًا من المئات الإلكترون ڤولت أي تقريبا مليون درجة كلڤن. 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 لانغمويز في عام ١٩٢٨؛ ربما لأنه رأى أنها تشبه بلازما الدم.



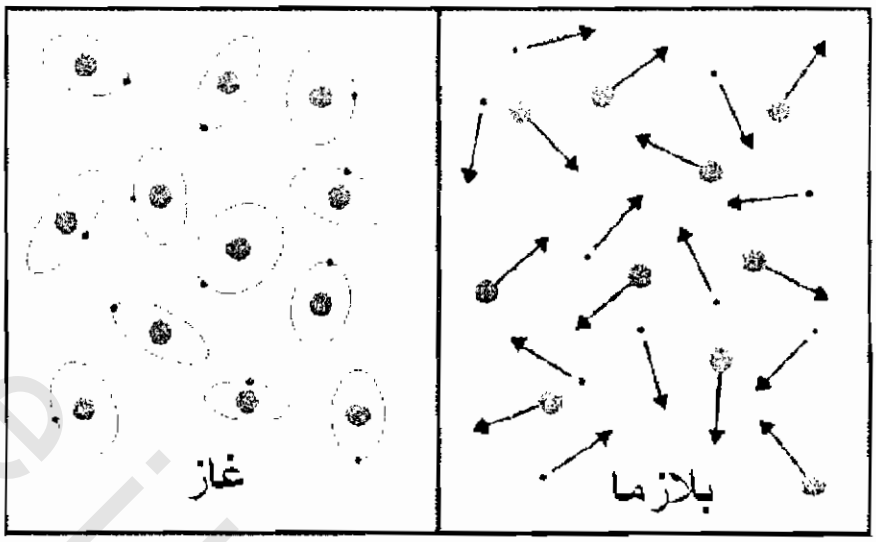
شكل (١): لمبة بلازما توضح إحدى ظواهر البلازما الأكثر تعقيدًا، والتي من ضمنها الفتائل.

يعتبر التفريغ الكهربي من أقدم فروع المعرفة في العلوم الطبيعية؛ حيث استخدم العالم لانغمويز اصطلاحًا خاصًّا 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 الكهربية). 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 الكهربية 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 الكهربية 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 الكهربية 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 جدًا، 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؛ وتبعًا لذلك يتحول جزء من هذه الطاقة إلى إثارة المستويات الدورانية للجزيئات. في النهاية انحلال الجزيئات وتأينها، سوف تأخذ هذه الجزئيات مكانها إذا أصبحت الصدمة فعالة

بدرجة كافية. في طبقات الغلاف الجوي العليا، تحتفظ البلازما بحالتها؛ نظرًا لوجود الأشعة الشمسية القادمة من الشمس، والإشعاعات الأخرى القادمة من الفضاء الخارجي، وتكون البلازما في الأيونوسفير عند درجة حرارة ١٠٠٠ كلفن، وعند ارتفاع ٦٠ كيلومترًا، وتكون كثافة الإلكترونات في المدى ١٠ ٤ – ١٠ ٧ سم-٣، والميكانيكية التي تعمل على حفظ هذا المستوى من كثافة البلازما هي ظاهرة التأين الضوئي؛ حيث تمتص الذرات الفوتونات، وتتحرر 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 كهربي، يؤدي إلى انجراف البلازما.. ونتيجة لحركة الشحنات يتولد تيار كهربي، وبالتالي يتولد مجال مغناطيسي. ونتيجة لتوليد المجالين الكهربي والمغناطيسي، فإنهما يؤثران على حركة الجسيمات المشحونة الأخرى.

معادلة سها Saha

الجزء المتأين من الغاز في حالة الاتزان الحراري يعطى بالعلاقة:

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

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

$n_n \approx 3\times10^{25}\text{m}^{-3}$, $T \approx 300\text{K}$, $U_i = 14.5\text{eV}$ ($1\text{eV} \approx 1.6\times10^{-19}\text{J}$)

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

هذه النسبة على الأرض نادرًا ما تكون المادة في حالة بلازما

obeikandl.com

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 مأتم تسخينها إلي 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)، وغالبًا 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 بالتاين 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 أيضًا على تأين الطبقات الخارجية للغلاف الجوي للأرض. أما عن التأين بالإشعاع في تكنولوجيا البلازما، فإنه ليس ناجحًا بدرجة كافية؛ نظرًا لعملية الاتحاد بين الإلكترونات وتكون الأيونات سريعة محققة شرط الاتزان.

٣ – التأين بالتفريغ الكهربي

يعتبر التأين بالتفريغ الكهربي هو العملية الأكثر شيوعًا في مختبرات، وتكنولوجيا البلازما أيضا تحدث التأين بالتفريغ الكهربي 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 الكهربي في تكنولوجيا

البلازما، فإننا نجده ملموسًا في أنابيب الليزر الغازي، مثل: الهليوم – نيون ليزر والقوس الكهربي ولمبات الفلوريسنت وغيرها. تعتمد عملية التأين بالتفريغ الكهربي على وجود مجال كهربي كبير، يعمل على وجود كثرة من الإلكترونات (أي زيادة سريعة جدًّا 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 استخدامًا.. 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
- موجودة بشاشات البلازما مثل التلفاز.
- مصابيح التألق (لمبات الفلوريسنت) (إنارة ذات طاقة ضعيفة)، إشارات النيون.
- عوادم الصواريخ.
- النطاق الموجود أمام الحاجز الحرارى لسفن الفضاء خلال دخولها غلاف الأرض الجوي.
- داخل هالة مولد تفريغ الأوزون.
- أبحاث الاندماج النووي.
- القوس الكهربي الموجود بالإنارة القوسية، لحام القوس الكهربي أو المصباح (المدفع) البلازمي.
- مصابيح البلازما وتسمى كرة البلازما.
- يستخدم البلازما لحفر رقائق الحاسوب لإنتاج الدوائر الكهربية وصنع أشباه الموصلات.

بلازما طبيعية أرضية
- البرق والصواعق.
- كرة اللهب.
- نار سانت إلمو.
- طبقة الأيونوسفير.
- الشفق القطبي.

بلازما طبيعية كونية : فيزياء فلكية وفضاء كوني
- الشمس والنجوم (البلازما تسخن بالاندماج النووي).
- رياح شمسية.
- الفراغ المحيط بين الكواكب.
- الفراغ المحيط بين النجوم.
- الفراغ المحيط بين المجرات.
- حلقة أحد أقمار المشتري
- الأقراص الناشئة من تكوين الأجسام النجمية الضخمة.
- سديم المجرات.

معايير البلازما

يعتبر وصف البلازما على أنها وسط متعادل من الجسيمات سالبة وموجبة الشحنة، وصفاً ضعيفاً يحتاج الى 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 ديباي)، لها نصف قطر من الجسيمات الكبيرة يسمى (طول ديباي). معدل عدد الجسيمات بمجال ديباي هو قيمة أو مقدار البلازما ويرمز λ_D.

طول ديباي Debye

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

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 k T_e}{n_e q_e^2}} \qquad (1.2)$$

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

obeikandl.com

ويمكن حساب λ_D مباشرة من العلاقة:

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

أو

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

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

حجم التفاعلات في البلازما: حيث إن نصف قطر ديباي 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 ديباي، ونصف قطره يسمى طول ديبي داخل، ويعطى بالعلاقة:

$$N_D = \frac{4\pi}{3}\lambda_d^3 n_e \qquad (1.5)$$

أو

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

غشاء ديباي

غشاء ديباي (يعرف أيضًا بالغشاء الكهربائي الساكن (أو الإلكتروستاتيكي) 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

obeikandi.com

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

يتكون غشاء ديباي 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 ديباي وكثافة البلازما ويرمز له Λ.

يمكن تلخيص مقدار Λ بالجدول التالي:

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

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}	$6x10^4$	0.7	$4x10^6$
Solar Chromosphere	10^{18}	2	$6x10^{10}$	$5x10^{-6}$	$2x10^3$
Solar wind (1 A U)	10^7	10	$2x10^5$	7	$5x10^{10}$
Ionosphere	10^{12}	0.1	$6x10^7$	$2x10^{-3}$	$1x10^5$
Arc discharge	10^{20}	1	$6x10^{11}$	$7x10^{-7}$	$5x10^2$
Tokamak	10^{20}	10^4	$6x10^{11}$	$7x10^{-5}$	$4x10^8$
Inertial Confinement	10^{28}	10^4	$6x10^{15}$	$7x10^{-9}$	$5x10^4$

٣. تردد البلازما:

من أهم خصائص البلازما هي استقرارية التعادلية الكهربية الماكروسكوبية. ولكن عند حدوث اضطراب لحظي للبلازما، يختل التوازن وتتولد مجالات كهربية داخلية، تؤدي إلى التحرك الجماعي للجسيمات، والتي تعمل على إعادة التعادلية إلى وضعها الأصلي. والتحرك الجماعي للجسيمات ماهو إلا ذبذبات ذات تردد، يعرف باسم تردد البلازما. وبسبب فرق الكتلة بين الأيونات والإلكترونات، فإن الإلكترونات تتذبذب جماعيًا 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 لانجمویر تقيس 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).

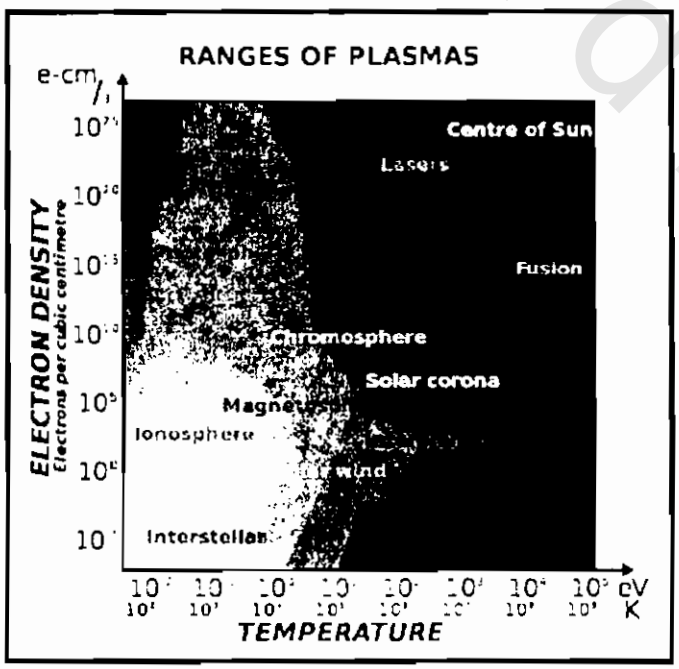
الأرض منبع البلازما؛ حيث نرى أيونات الأكسجين والهيدروجين والهليوم تتدفق إلى الفضاء من مناطق قريبة من القطبين. يرمز اللون الأصفر الذي فوق القطب الشمالي إلى ضياع الغازات إلى الفضاء الخارجي. وترمز

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

شكل (٤): شفق القطب الشمالي.

نطاق بارامترات البلازما

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



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^{2}متر (البرق)	10^{-6}متر (غلاف سفينة الفضاء) حتى 10^{25}متر (سديم المجرات)
الحياة بالثواني	10^{-12}ثانية (البلازما الليزرية) حتى 10^{7}ثانية (لمبات الفلورسنت)	10^{1}ثانية (الانفجارات الشمسية) حتى 10^{17} ثانية (بلازما المجرات)
الكثافة الجسيمات لكل متر مكعب	10^{7}حتى 10^{32} لكل متر مكعب (حصر البلازما العطالي)	١ ما بين (المجرات حتى 10^{30} m^{-3} باطن النجوم)
درجة الحرارة بالكالفن	0-كلفن (بلازما متبلورة غير متعادلة حتى 10^{8}كلفن (بلازما الاندماج المغناطيسي)	10^{2}كلفن (الشفق) حتى 10^{7}كلفن (باطن الشمس)
المجال المغناطيسي بالتسلا	10^{-4}تسلا (بلازما مختبرات) حتى 10^{3}تسلا (البلازما النبضية)	10^{-12}تسلا (ما بين المجرات) حتى 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 ١% من الجسيمات قد تأينت، فسوف يأخذ الغاز صفة البلازما (بمعنى أنه يتأثر بالمجال المغناطيسي، وهو التوصيلية الكهربائية العالية).

درجة التأين α تعرف بالمعادلة:

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

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

ترتبط كثافة الإلكترون بدرجة التأين، عن طريق حالة متوسط الشحنة $\langle Z \rangle$ للأيون خلال المعادلة التالية:

$n_e = \langle Z \rangle n_i$ حيث إن 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 الحركة الحرارية لكل جزيء. فى كثير من الأحيان، تكون الإلكترونات قريبةً 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 لاحرارية.

- **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 تيارًا 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 الكهربية ستأخذ دورًا مهمًا. وبما أن الجهد موجود ما بين جسيمين مشحونين بالفضاء، فإذا وضع إلكترود أو قطب كهربي بالبلازما؛ فإن الجهد بشكل عام سيتحرك بقوة إلى مادون جهد البلازما؛ بسبب نشوء ما يسمى غشاء ديباي. وبسبب جودة التوصيل الكهربي، فإن المجال الكهربي للبلازما يصبح صغيرًا جدًا، 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 المعادلـــة: ($n_e = \langle Z \rangle n_i$) على مقياس طول ديباي قد يكون الشحن فيها غير متـــوازن. بهـــذه الحالـــة الخاصة، تكون الطبقات المزدوجة متشكلة، ويمكن توزيع الشحن أن يمتد إلى عشرات من أطوال ديباي.

إذا كانت البلازما في حالة اتزان ديناميكي حراري، نجد كثافة الالكترونات n_e تعطى بالعلاقة الاتية:

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

حيث: φ الجهد الكهروستاتيكي، و k_B ثابت بولتزمان، و T_e درجة حـــرارة الالكترونات..

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

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

يمكن إنتاج بلازما ليست شبه محايدة، فمثلا كثافة البلازما غير المحايدة يجب أن تكون قليلة أو صغيرة جدا، وإلا فإنها ستنتشر بطريقة الكهرباء الساكنة غير المرغوب فيها. في البلازما الكونية، يمنع حاجز ديباي المجال الكهربي مـــن التأثير المباشر على البلازما، خلال مسافة كبيرة (أبعد من طول ديباي). ولكن ظهور الجزيئات المشحونة يجعل البلازما تولد، وتتأثر بالمجال المغناطيسي. وهذا يسبب سلوكًا معقدًا مثل نشوء الطبقات المزدوجة، التي تفصل الشحنات عن بعضها البعض، خلال العشرات من أطوال ديباي. تتأثر ديناميكا البلازما مع المجالات المغناطيسية سواءا الخارجية أو المنتجة ذاتيا.

المغنطة

البلازما الممغنطة هي التي توضع في مجال مغناطيسي قوي؛ لدرجة أنه يؤثر على حركة الجسيمات المشحونة. المعيار الكمي الشائع هو أن الجسيم يكمـــل 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). يكـــون بالعـــادة أن الإلكترونـــات ممغنطـــة والأيونات غير ممغنطة. تكون البلازما الممغنطة متباينة الخواص؛ بمعنى أن

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

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

حيث: E هو المجال الكهربي..، وv هو السرعة وB هو المجال المغناطيسي)، وهذا المجال الكهربي لم يتأثر بحاجز ديباي، ولكن على أطراف البلازما يكون المجال الكهربي أساسا صفر.

مقارنة بين طوري البلازما والغاز

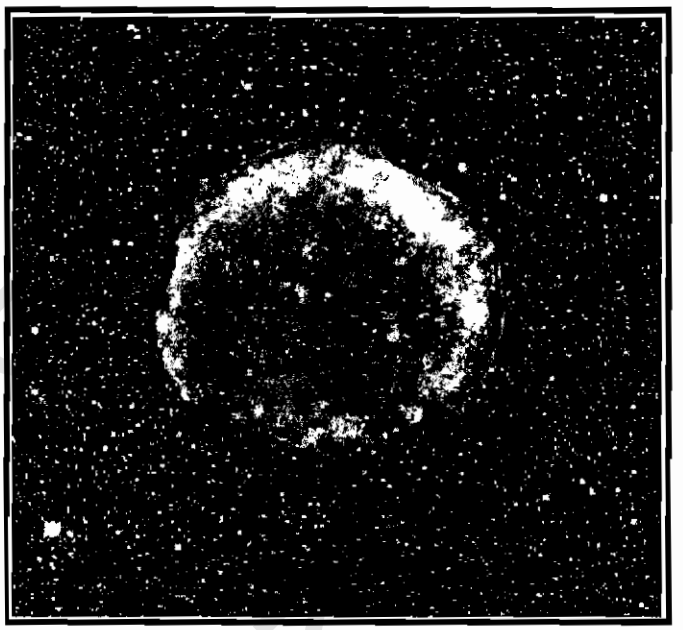
البلازما هي الحالة الرابعة للمادة، وتتميز عن غيرها من حالات المادة بالطاقة الهائلة، التي تمتلكها. وهو ذو صفات مقاربة للحالة الغازية، ولكن ليس له شكل محدد أو كتلة. ينظر العلماء إلى البلازما على أنها أكثر أهمية من الغاز؛ بسبب الحالات المتميزة لها. ويوضح الجدول التالي الفرق بين الحالتين البلازما والغاز:

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

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

حالات البلازما المعقدة

على الرغم أن المعادلات التي تحكم البلازما هي بسيطة نوعاً ما، إلا ان 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 وتنبعث الأشعة السينية بواسطة الإلكترونات ذات الطاقة الحركية الكبيرة.



شكل (٧): بقايا نجم متفجر عبارة عن كرة ضخمة من البلازما المتمددة، 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 معمليًّا فيً بادئ الأمر، ومن ثمّ تعرف الناس عليها.

تشتمل أمثلة على تعقيدات وتركيب الأجسام بالبلازما على:

التفتيل

ترى الشروخ والقنوات أو الأشياء الضئيلة في أغلب البلازمات، مثل: كرة البلازما، والشفق والبرق، والنقوس الكهربي ووهج الشمس، وترتبط أحيانًا 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 تمركز 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 الكهربي والدوائر

تتطلب خاصية شبه الحيادية بالبلازما من تيارات البلازما، أن تكون متقاربة من بعضها البعض بالدوائر الكهربية، وهذه الدوائر تخضع لقانون كيرشوف للدائرة الكهربية، 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 معًا مع عدم الاستقامة؛ مما يقود إلى سلوك معقد. تخزن الدوائر الكهربية بالبلازما طاقة مستحثات (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 الكهربي وبالتحديد المجال المغناطيسي المصطف مع التيار الكهربي (الذي أحيانًا 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 المغناطيسي 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 الكهربي، 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 ضخت 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؛ لإمساك وتبريد الذرات المحايدة إلى درجة حرارة، تعادل ١مللي كلڤن 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 كالڤن، ونطاق التردد لليزر النبضي محدد سلفاً؛ فالأيون يحافظ على درجة حرارة تساوي مللي كالڤن 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 ديناميكات غريبة وسلوك إعادة الارتباط؛ مما زاد من حدود معرفتنا بعلم البلازما. إحدى الحالات غير المستقرة للبلازما غير المثالية هي حالة ريدبرج، 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 لاحيادية. وبالبلازما المجال الكهربي 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 كالزئبق أو الفلزات القلوية المنصهرة، أو قد يكون غازًا ضعيف التأين أو بلازمات) وهي تتعامل مع البلازما كمائع وحيد محكوم بتركيبة من (معادلات ماكسوين 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 اصطياد 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. ووصف 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 ١<<٨، 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 (الإصطدامات) الزوجية الخشنة. معادلة الحالة في البلازما المثالية هي نفسها في الغاز المثالي.

البلازما الاصطناعية

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

- نوع مصدر الطاقة المنتجة لتلك البلازما، بمعنى التيار الكهربي، تردد موجي، وتردد ذو الموجات الدقيقة (Microwave).
- مجال الضغط لديها: ضغط الفراغ < ١٠ مللي تور، ضغط جزئي ~ ١ تور، الضغط الجوي ٧٦٠ تور=١ بار=١,٠١٣ نيوتن/متر مربع.
- درجة التأين بالبلازما: تأين كامل، تأين نسبي، تأين ضعيف.
- علاقة الحرارة داخل البلازما: بلازما حرارية ($T_{gas} = Te = T_{ion}$)، بلازما غير حرارية أو باردة ($T_{gas} = T_{ion} << Te$).
- شكل القطب المستخدم لتوليد البلازما.
- مغناطيسية الجسيمات الداخلة بالبلازما: ممغنطة (الأيون والإلكترون كلاهما محاصران في مدار لارمور، بواسطة المجال المغناطيسي)، ممغنطة جزئيًا (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 الكهربي المستمر، أو تردد منخفض لموجات المجال الكهربي للفراغ ما بين

obeikandl.com

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

- **بلازما التقارن بالسعة:** شبيهة لما قبلها، ولكن تحتاج إلى مجال كهربي ذى تردد عالٍ من الموجات (تقديريا 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 يثير البلازما بالحث.
- **بلازما الموجات المسخنة:** مشابهة للتقارن بالحث والسعة من حيث الترددات، ولكن الموجات تسخن بواسطة كلتا الوسيلتين الكهروستاتيكية والكهرومغناطيسية، وهي تحتاج إلى مجال مغناطيسي، متحد المحور لانتشار الموجات.

إفراغ بالضغط الجوي

- **التقوس الكهربي:** 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 الألمونيوم.
- **التفريغ الإكليلي:** تفريغ لا حراري، ويولد بواسطة تطبيق جهد كهربي عالٍ على الأطراف الحادة للقطب. ويستخدم بشكل عام لتوليد غاز الأوزون، ومرسبات الجسيم.
- **تفريغ حاجز العازل الكهربي:** تفريغ لا حراري، يولد بتطبيق جهد كهربي عالٍ، خلال فجوات بحيث العازل غير الموصل، يمنع انتقال تفريغ البلازما إلى تقوس. والعادة يخطأ بالتسمية بالتفريغ الإكليلي بالصناعة مع إنهما متشابهان بالتطبيقات. وتستخدم بنطاق واسع لعمل تشابك الأنسجة الصناعية واللدائن.