فيزياء البلازما

PLASMA PHYSICS

سهام قندلا
كلية العلوم جامعة بغداد

مقدمـــة

ان الغازات العالية التأين موصلات جيدة للكهربائيـــة لان الدقائق المشحونة في مثل هذه الغازات تتحرك تحت تأثير المجال الكهرومغناطسي الموضعي مولدة مجالا مغناطيسيا اضافة الى مجالها الكهربائي • فالغـــاز المتأين يعمل كأي موصل آخر اذا ما سلط عليـــه مجـــال كهربائي لان الدقائق المشحونة في الغاز تتوزع بسرعة وبطريقة بحيث تحجب معظـــم الغاز من تأثير المجال ولقد اطلق لانكمور Langmuir على المنطقة التـــى تتعادل فيها الشحنات الموجبة والسالبة بأسم البلازما Plasma ، كما أطلق على منطقة الشحنات او المناطق الشديدة المجال والتى تحيط بالبلازمـــا بأسم الغـــلاف Sheath ، لذلك يمكن تعريف البلازما مبدئيا بانهـــا غاز متأين يحتوي على عدد كبير من الدقائق المشحونة يقي نفسه بها من المجال الكهربائى الستاتيكى ضمن سمك وقائي ، على اننا سنورد فيما بعـد تعريفا ادق للبلازما بدلالة هذه المسافة الوقائية •

والفرق بين البلازما كموصل والموصل السائل ليس كبيرا ويمكـــن التعبير عنه بدلالة كثافة الدقائق المشحونة ففى الموصل السائل تكون الكثافة عادة من القدر $١٠^{٢٢}$ دقيقة/سم^{٣} على حين تكون الكثافة في البلازما مـــن القدر $١٠^{١٨}$ او اقل ، لذا يمكن اعتبار البلازما موصل غازي •

هذا ولقد اعتبرت البلازما ذات التأين التام كحـــالة رابعة للمـــادة

fourth state of matter تدعى حالة البلازما plasma state

والتحول من الحالة الغازية الى الحالة البلازمية يقترن بصرف مقدار كبير من الطاقة أكبر من أية طاقة تقترن بالتحولات الاخرى (كالتحول من الحالة الصلبة الى الحالة السائلة ومن الحالة السائلة الى الحالة الغازية) على الرغم من وجود التشابه بين هذا التحول والتحولات الاخرى كما في الغاز المتأين جزئيا والذى يحدث في التفريغ الكهربائى في الغازات فهو خليط من حالة غازية وحالة بلازمية وهو يناظر تماما خليط الحالة الغازية والحالة السائلة التى تحدث في ظواهر التصعيد والتكثف • والبلازما والموصوفة اعلاه يندر حصولها في الطبيعة فالبلازما الطبيعية (معظم مادة الكون في حالة البلازما مثلا جو الارض الايوني،الجو الغازي مابين النجوم والكواكب ، جو الاشعة الكونية •• الخ) والبلازما الصناعية (المستحصلة مختبريا في اجهزة تفريغ الغازات ، الاقواس الكهربائية ، اجهزة التفاعلات النووية الحرارية •• الخ) تشذ عنها شذوذا سنوضحه فيما بعد •

كانت أهمية البلازما في البداية موجهة الى الناحية الالكترونية للغازات أي التفريغ الكهربائى خلال الغازات ، الاقواس Arcs والهاب Flames ولكن ظهرت لفيزياء البلازما مؤخرا تطبيقات جديدة كالنظرية الهيدوداينميكية المغناطيسية ـ أي ميكانيك الموائع للاوساط الموصلة تحت تأثير المجالات المغناطيسة القوية ـ ابرزت احتمال تحويل الطاقة الحرارية مباشرة الى طاقة كهربائية دون الحاجة الى استخدام المكائن الدوارة • وفي جو الارض تتحرك اجسام بسرعة كالشهب والنيازك والصواريخ ، التى تخلق جوا من البلازما يبدو انه سيفتح حقولا جديدة لها أهمية في علم الطيران والمواصلات • وفي فيزياء الفلك فان وجود البلازما يشكل قاعدة ضرورية لا في الفضاء ما بين النجوم والكواكب فحسب ولكن في فضاء الاشعة الكونية حيث تأخذ الظواهر الهيدروداينميكية المغناطيسية محلها فصواريخ البلازما Plasma Rockets تكفل بكفاءة تسير مركبات في الفضاء •

ومن أهم البحوث في حقل فيزياء البلازما العمليات الحرارية النووية المسيطر عليها لان أهم مايتوجه اليه انتباه العلماء في الوقت الحاضر مصدر واسع للطاقة الرخيصة الديتريوم Deuterium • فالطاقة الحرارية النووية في كالون واحد من الماء الاعتيادى أكبر بثلاثمائة مرة من الطاقة الكيميائية التي يحتويها كالون واحد من الكازولين • ومفهوم البلازما مهم ومفيد ليس للغاز وحده وانما في دراسة بعض خواص المواد الصلبة ايضا كما في البصريات المعدنية والرنين السايكلوتروني في شبه الموصلات•

دلائل البلازما (Plasma Parameters)

تتصف البلازما الموجودة في الطبيعة أو المستحصلة مختبريا بعدة دلائل قد تختلف بمقاديرها بمراتب ومنها :

١ – كثافة الالكترون N التى تتراوح بين $١٠^{-٣}$ لكل ١ سم^{٣} في وسط مابين النجوم و١٠ لكل ١ سم^{٣} في وسط كالذى بين السحب • اما في جو الارض الايوني فان N تتراوح بين $١٠^{٣} - ٣ \times ١٠^{٦}$ وفي اجهزة التفاعلات النووية الحرارية تبلغ مايقارب $١٠^{١٥}$ وفي مختلف اجهزة التفريغ الكهربائى خلال الغازات تكون القيمة الطبيعية $N >$ $١٠^{١٢}$ واخيرا فان الكترونات التوصيل في المعادن تبلغ تقريبا ٣×١٠^{٢٢} وهى الكثافة التى تؤخذ بنظر الاعتبار عند تطبيق مفهوم البلازما في المعادن•

٢ – كثافة الدقائق المتعادلة Nm أو درجة التأين $R = \frac{N}{Nm}$

ففي جو الارض الايوانى وفي الطبقة D السفلى Nm $\backsim ١٠^{١٠}$ و R $\backsim ١٠^{-١١} - ١٠^{-١٢}$ ، وفي الطبقة E , Nm $\backsim ١٠^{١٢}$ و R $\backsim$ $١٠^{-٧}$ وفي الطبقة F , Nm $١٠^{١٠}$ أو أقل و R $\backsim ١٠^{-٤}$ وفي طغاوة الشمس فان Nm = صفر أي أن $R = \infty$ • اما في الاماكن الاخرى من الكون فان Nm احيانا اصغر بكثير من N ولكن الغالب في معظم

الاحيان هو أن $Nm >> N$ ، أى ان الغاز متأين جزئيا .

٣ ـ كثافة الايونات الموجبة N_+ والسالبة N_- : اذا وجدت الايونات الموجبة في البلازما فقط فان كثافتها N_+ = N في حالة التعادل ، اما بوجود الايونات السالبة فان $N = N_+ + (N_-)$ (ستعتبر جميع الايونات احادية الشحنة للسهولة) ولذا فان $\frac{N_-}{N_+}$ او $\frac{N_-}{N}$ يعتبر كبراميتر للبلازمـــا .

٤ ـ معدل الطريق الحر للدقائق : يتغير الطريق الحر للدقائـــق تبعا لتغير كثافتها ، ومدى التغير مقارب لمدى تغير الكثافة .

٥ ـ درجة الحرارة : تقدر درجة الحرارة للانواع المختلفـة من البلازما بدرجـــات كلفن كما يلي : جـــو الارض الايونى $\sim$ ٣٠٠ ـ ٣٠٠٠ ، الجو الغازي بين النجوم $\sim 10^2$ للمناطق الضعيـفة التـــأين و $\sim 10^4$ للمناطق الشديدة التأين ، الطغاوة الشمسية $\sim 10^6$ ، الاجهزة المختبرية لدراسة التفاعلات النووية الحـــرارية $\sim 10^6 - 10^7$.

طرق دراسة خواص البلازما

يدعى حقل دراسة تفاعل الغازات المتأينة مع المجال الكهرومغناطيسي المعتمد على الزمن بداينامیك البلازما ، ومعظم المسائل في هذا الحقل مهمة وشيقة لعدم امكان معاملتها بصيغ مرقبية ومن الضرورى استخدام مايسمى بالنظرية الحركية حيث تدرس حركة الايونات والالكترونات بصورة مفردة ويؤخذ التصادم الحاصل بينها وبين الدقائق الاخرى بنظر الاعتبار عنـد حل معادلة بولتزمان . والمعادلات التي تصف مختلف الظواهر الحادثـة في البلازما ليست خطية ، ولذا فانها معقدة وحلها صعب على العموم الا في الحالات التى يمكن فيها أهمال بعض الحدود في معادلة بولتزمان . وهناك ثلاثة طرائق تقريبية تلقي ضوء على مايحدث في داخل البلازما .

اولى هذه الطرائق ، نظرية التوازن equilibrium theory

والتى تعتمد على كون التصادم بين الدقائق المشحونة كاف لادامة ما هو معروف لتوزيع السرعة لماكسويل ـ بولتزمان للدقائق التى يحتويها جسم البلازما ، ولذا فالخواص الحركية يمكن حسابها بدلالة هذا التوزيع للسرعة .

اما الطريقة التقريبية الثانية فهى نظرية المدار orbit theory

والتى تفسر حركة الدقائق المشحونة (الايونات والالكترونات) في المجالات الكهربائية والمغناطيسية المعطاة ، وقد تكون هذه المجالات دالة لكل من الزمان والمكان .

ونظرية المدار تقريب جيد لحركة الدقائق داخل البلازما عندما لايلعب التصادم بين الدقائق دورا هاما ، ولذا فانها تطبق للبلازما ذات الكثافة الواطئة حيث ان معدل الطريق الحر للتصادم كبير بالمقارنة بالابعاد المميزة للمدار ، فتحت هذه الظروف يمكن معاملة التأثيرات الناتجة عن التصادم كانحرافات على حركة الدقيقة وفي هذه الحالة يعتبر المجال المعطى هو المجال الخارجي والمجال الناتج عن حركة الدقائق المدارية .

ومن المفيد ان نذكر ان حل معادلات مدارات الدقائق لدراسة خواص البلازما مكافىء تماما لحل معادلة بولتزمان عند غض النظر عن التصادم وان هذا التكافؤ يدعى بنظرية جينز Jeans's theorem

والطريقة التقريبية الثالثة هى الصيغة الهيدرومغناطيسية Hydromagnatic formulation وتستخدم فيها المعادلات الكهرومغناطيسية الكلاسيكية (معادلات ماكسويل) مع المعادلات الكلاسيكية لحركة الموائع وهي طريقة مرقبية وتصبح تقريبية جيدة عندما يكون معدل الطريق الحر للتصادم صغيرا جدا بالمقارنة بالمسافات ذات الاهمية الفيزيائية في جهاز البلازما ، والوصف الهيدرومغناطيسى يعمل كبداية جيدة لشرح الحركة الجماعية لدقائق البلازما ـ اى تذبذب البلازما .

مع ان استخدام النظرية الحركية لحل مشاكل البلازما طريقة معقدة. الا ان الكثير من الخصائص المهمة للبلازما يمكن شرحها بواسطة الطرق التقريبية المذكورة اعلاه وفيما يلي تطبيق لكل منها •

التعادل الكهربائى فى البلازما

من الخصائص المهمة في البلازما ميلها للبقاء متعادلة كهربائيا ، وهذا يعني ميل الشحنات الموجبة لمعادلة الشحنات السالبة في حجم كل حيز مرقبي ، فالاختلال البسيط في كثافة فضاء الشحنات يؤدي الى نشوء قوة كهربائية ستاتيكية تعمل دوما في اتجاه اعادة التوازن • هذا من جهة اما من الجهة الاخرى فاذا وضعت البلازما تأثير مجال كهربائي خارجي فأن الكثافة لفضاء الشحنات تنتظم بشكل ما بحيث ان الجزء الاعظم من جسم البلازما يحجب عن المجال • ولنأخذ مثلا بسيطا ونفرض ان شحنة اختبارية Q ادخلت الى جسم البلازما فاصبحت البلازما تحت تأثير مجال كهربائى وان المسألة غدت تعيين كيفية توزيع الشحنات وقيمة المجال في النقاط المجاورة للشحنة الاختبارية • فالمتوقع هو ان شحنة الاختبار تجذب نحوها دقائق البلازما ذات الشحنة المخالفة وتبعد عنها الدقائق ذات الشحنة المماثلة وبهذه الطريقة يحجب المجال الكهربائى الناتج عن شحنة الاختبار عن الاجزاء الاخرى البعيدة في البلازما • وتحت ظروف التوازن فان احتمال وجود الدقائق المشحونة في موضع معين وبطاقة كامنة W تتناسب مع معامل بولتزمان $\exp\left(\frac{-W}{KT}\right)$ ، فمثلا تعطى كثافة الالكترونات N بالعلاقة $N = No \exp\left(q\,\frac{U - Uo}{KT}\right)$ حيث ان U هو الجهد الموضعى ، Uo الجهد الابتدائي (جهد البلازما) ، T درجة الحرارة المطلقة ، K ثابت بولتزمان No كثافة الالكترونات فى المواقع التى جهدها Uo ، q شحنة الالكترون •

اما الجهد الموضعى فيستحصل من حل معادلة بواسون والحل المناسب

ذو المعنى الفيزيائى الذى يصبح فيه جهد القيم الكبيرة لـ r مساويا لـ Uo يكون

$$U = U_0 + \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} \exp\left(-\frac{r}{h}\right)$$

حيث ان r هي المسافة عن شحنة الاختبار θ و l المسافة الوقائية لديباى Debye shielding sistance والتى تعطى بالمعادلة .

$$h = \left(\frac{\epsilon_0 K \varepsilon}{2N_0 q^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

لذا نرى انه لمسافات صغيرة بالمقارنة بالمسافة h يكون الجهد بالقرب من شحنة الاختبار ناتجا عن مجالها الكولومي وان هذا الجهد يضمحل كاضمحلال دالة قوى كلما اصبحت المسافة أكبر من مسافة ديباي الوقائية ، اى ان الاخيرة تعمل كمسافة قطع لا يكون بعدها للمجال الناتج عن شحنة الاختبار تأثير يذكر على دقائق البلازما .

لذا يكون تنظيم الالكترونات والايونات في الغاز بحيث تحجب عنها Q تماما في مسافة مقدارها بضع مرات من h .

والغاز المتأين يدعى بالبلازما اذا كانت مسافة ديباى (h) صغيرة بالمقارنة بالابعاد الفيزيائية ذات الاهمية . فمثلا في درجة حرارة ٢٠٠٠ مطلقة و No = $١٠^{١٨}$ الكترون أو ايون /م^{٣} فان مسافة ديباي = ٢ر٢ × $١٠^{-٦}$ متر .

مدارات الدقائق وحركة الانسياق فى البلازما :

يمكن حساب المدار الذى تسلكه الدقيقة المشحونة المتحركة بسرعة V في مجال كهربائى E ومغناطيسى B من معادلة القوة :

$$\overline{F} = q\left(\overline{E} + \overline{V} \times \overline{B}\right)$$

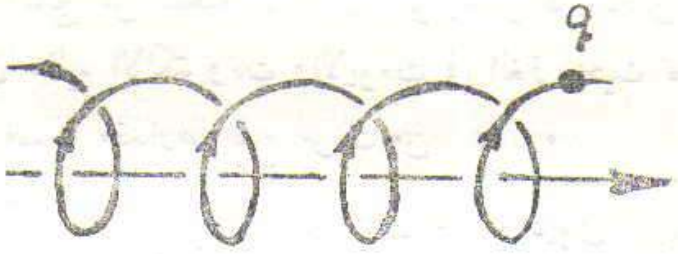
وقد تكون المجالات منتظمة او دالة للزمان او المكان او لكليهما •

وليس تعريض البلازما لمجال كهربائي ثابت بذي أهمية لان البلازما كما اسلفنا تنظم نفسها لتكوين حاجز دقيق من الدقائق المشحونة يقيها من المجال المسلط على حين ان تسليط مجال مغناطيسي ثابت يؤدي الى تدويم الدقائق حول خطوط المجال دون تغير في كيفية توزيع الشحنات •

فاذا عرضت البلازما لمجال مغناطيسى منتظم فيمكن وصف الحركة الكلية لدقائقها بانه تدويم للدقيقة في مدار يدعى بمدار لارمور Larmour Orbit سرعة زاوية w تدعى بتردد لارمور تتمثل بالعلاقة

$$W = \frac{VI}{R} = \frac{q\,B}{m}$$

حيث ترمز m لكتلة الدقيقة و VI لمركبة سرعتها العمودية على B كما يتحرك مركز المدار (المركز الدليلي (guiding center)) باتجاه خطوط المجال بسرعة منتظمة مقدارها ـ . (مركبة سرعة الدقيقة باتجاه ـ) والحركة اللولبية الناتجة مبينة في الشكل (١) ومن الواضح ان الشحنات المختلفة تدور



شكل (١)

باتجاهين متعاكسين كما ويدور الالكترون بمدار اصغر من مدار الايون في حالة تساوي طاقتهما الحركية فالنسبة بين قطري مداريهما كالنسبة بين الجذر التربيعى لكتلتيهما • ومن الملاحظ ايضا ان تردد لارمور يتناسب طرديا مع المجال المغناطيسى على حين ان نصف القطر المناظر يتناسب عكسيا

مع المجال وعليه فان الدقائق تدور عند زيادة قيمة B بسرعة اكبر وبمدارات اصغر •

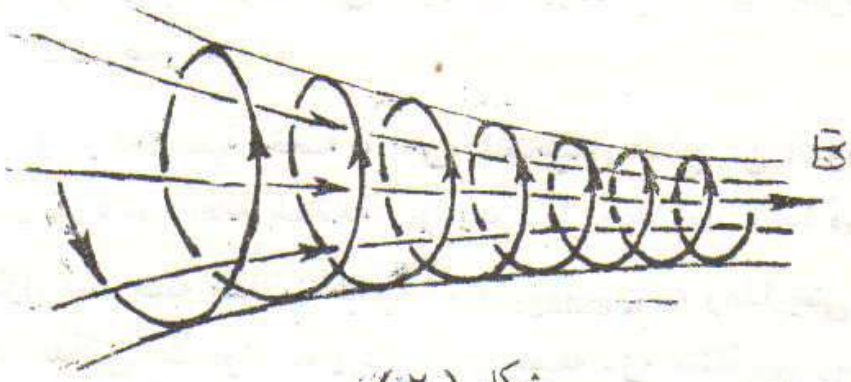
ومما له أهمية خاصة ، العزم المغناطيسى الناتج عن الدوران والذى يكون في هذه الحالة باستقامة B ومعاكسا له بالاتجاه ، لذا فأن البلازما تحاول اخذ صفة الدايامغناطيسية diamagnetic ، وهذا يعنى ان توزيعا معينا للدقائق المشحونة قد يؤدى الى محصلة عزم مغناطيسى ربما يكون بمقدار كاف للتأثير على المجال المغناطيسى المسلط •

ولو عرضت البلازما للمجال الكهربائي المنتظم اضافة الى المجال المغناطيسي المنتظم فان ذلك قد يعمل على تغير سرعة المركز الدليلي لدقائق البلازما دون المساس بترددها فأن كان E عمودي على B فأنه يعمل على انسياق دقائق البلازما الموجبة والسالبة معا بسرعة منتظمة وبأتجاه عمودي على كل من E و B تدعى سرعة الانسياق الكهربائية electric drift velocity او سرعة انسياق البلازما • هذه السرعة لا تعتمد على الشحنة او الكتلة او سرعة الدقيقة ولذا فان جميع اجزاء البلازما تنساق معا بالرغم من الاختلاف الكبير الذى قد يحدث في حركة دورانها الفردية • اما اذا كانت E غير عمودية على B وكانت للمجال الكهربائى مركبة موازية لخطوط المجال المغناطيسي فان هذه المركبة تعمل على تعجيل المركز الدليلي للدقيقة باتجاه خطوط المجال المغناطيسي •

نستنتج مما سبق انه يمكن السيطرة على حركة دقائق البلازما باستخدام المجال المغناطيسي والكهربائي ومما يجدر ذكره استخدام المجال المجال المغناطيسي المعتمد على المكان B(r) لاهميته التطبيقية وخاصة في المفاعلات الحرارية النووية •

فلو فرضنا ان الدقيقة المشحونة تتحرك في مجال مغناطيسي منتظم تقريبا خطوطه تتقارب ببطء وهذا يعني ان B تزداد باتجاه حركة الدقيقة وأن الزيادة تحصل بأبعاد كبيرة بالمقارنة بنصف قطر لارمور فان

نصف قطر المدار يقل كما هو مبين في الشكل (٢) ..

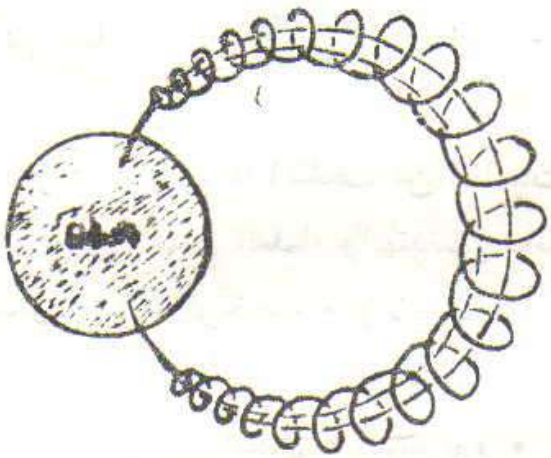


شكل (٢)

فحركة الدقيقة يمكن اعتبارها كانحرافات على المدار اللولبي ومن السهل ان نرى ان هناك قوة تحاول دفع الدقيقة الى المناطق الضعيفة من المجال فالدقيقة الدائرة تبطىء في اقترابها من مناطق المجال الشديدة اى تتناقص ، ولكن مبدأ حفظ الطاقة يحتم من جهة اخرى زيادة VII آنية في مركبة سرعتها VI مما يؤدي الى دوران الدقيقة في مسارات لولبية اضيق ، فاذا كان تقارب المجال كافيا فأن الدقيقة تنعكس نحو المناطق الضعيفة من المجال . ان مجالا كهذا يعمل على عكس مسار المركز الدليلي لمدار الدقيقة الدائرة يدعى بالمرآة المغناطيسية magnetic mirror والجهاز الذى يبني على هذا الاساس يحتوى على مرآتين على الاقل . فالقنينة المغناطيسية magnetic bottle تتألف من اسطوانة طويلة يلف حولها سلك ذو كثافة لف منتظمة في الوسط وعالية عند الطرفين يمر به تيار كهربائي ثابت فالدقائق متى دخلت القنينة فانها ستعاني عدة انعكاسات من الطرفين . ان ميكانيك المرآة المغناطيسية مهم جدا في المفاعلات النووية الحرارية .

وقد استخدم تأثير المجال المغناطيسى على الدقائق وتسييرها بهذه الكيفية من قبل فرمي Fermi عند محاولته تفسير الطاقة العالية التى تحملها دقائق الاشعة الكونية فقد فرض وجود سحب كبيرة من الدقائق

فى فضاء ما بين المجرات يصطحب كل منها مجاله المغناطيسى فاذا وجدت سحابتين تتحركان نحو بعضهما بسرعة صغيرة ووقعت دقيقة في مثل هذه المصيدة فأنها ستعاني اصطدامًا متكررا معهما وتزداد سرعتها VII ببطء نتيجة لحركتهما النسبية حتى اذا أصبحت ذات طاقة تكفيها للافلات من هذه القنينة وصلت الارض وهى تحمل هذه الطاقة العالية • كذلك هى احزمة الاشعاع لفان الن Van Allen فما هى الا امثلة للدقائق المسيرة بهذه الطريقة ولكن بمقياس كونى واسع • والكرة الارضية شكل (٣)



شكل (٣)

مثال آخر لهذا الجهاز حيث يعمل قطباها المغناطيسيان كمرآتين فالمجال الارضى تتقارب خطوطه كلما اقتربنا من القطب والدقائق التى تقع بشرك المجال المغناطيسى تنعكس ذهابا وايابا بين القطبين الشمالى والجنوبى للكرة الارضية الا ان حركتها اكثر تعقيدا نظرا لوجود الجاذبية الارضية وعدم تجانس المجال المغناطيسى ، ولذلك تنساق الجسيمات حول الارض باتجاه من الشرق نحو الغرب اضافة الى حركتها المذكورة آنفا •

تذبذب البلازما والحركة التموجية

تتميز البلازما بمقدرتها على اسناد التذبذب وانتقال الامواج وامكانية حصول الاشكال المختلفة للتذبذب • ومن الافضل معاملة الحركة الجماعية

لدقائق البلازما بالمبادىء الهايدرومغناطيسية ، حيث تعتبر البلازما على هذا الاساس مائع كلاسيكى يخضع للمعادلات الهايدروداينميكية • كما ان هذا المائع موصل للكهربائية ، لذا يجب ان تؤخذ القوى الكهرومغناطيسية بنظر الاعتبار والتذبذب معقد لكون المعادلات الهايدروداينميكية غير خطية •

بعض التطبيقات لفيزياء البلازما

فيزياء البلازما حقل من حقول العلم السريعة التوسع ، بقي لوقت طويل محشورا فى حقل التفريغ الكهربائى للغازات • وقد ظهرت له فى الاونة الاخيرة ميادين تطبيقية جديدة • ولعل أهم ما دعى لهذا التوسع السريع خلال السنوات الاخيرة ما اكتشف من العلميات النووية الحرارية المسيطر عليها عن طريق اهتمام العلماء والمهندسين دائما للحصول على مستودع غير محدود للطاقة الرخيصة • والانصهار النووى الحرارى اقرب الحلول المثالية للحصول على هذه الطاقة الرخيصة من الوقود المتوفر لهذه العملية وهو ايون الهيدروجين الثقيل ، الديتريوم •

ومن المؤسف ان يغدو بناء الجهاز الذى يتم فيه الحصول على هذه الطاقة المسيطر عليها شاقا • وتنشأ الصعوبة من مقدار الحرارة اللازمة لبدء التفاعل النووى الحرارى فهذه التفاعلات ليست كالتفاعلات الكيميائية لانها على العموم تتطلب عتبة لدرجة الحرارة فالديتريوم قد يتفاعل مع نفسه بدرجة من الحرارة تقرب من ٤٠٠ مليون درجة مطلقة وهذه الدرجة العالية من الحرارة تخلق مشاكل اهمها رفع درجة حرارة الوقود الى هذه القيمة ثم توفير وحجز الوقود بهذه الحالة لفترة كافية للسيطرة على التفاعل •

ولحل هذه المشاكل معا يجب تفهم حالة الوقود تحت هذه الظروف فالديتريوم الاعتيادي غاز في درجة حرارة الغرفة ، ثنائي الذرة ويصبح احاديا فى درجة تقرب من ٥ الاف مطلقة اما فى حوالى ١٠ الاف مطلقة

فيغدو متأينا وهذا يعنى ان الوقود النووى الحرارى بلازما واذا رفعت درجة الحرارة عن ذى قبل فانه يميل اكثر فاكثر الى حالة التأين التامة • ولذا يغدو التفاعل فى درجات الحرارة العالية مع دقائق مشحونة ومن هنا نشأت فكرة استخدام المجال المغناطيسى فى ابحاث فيزياء البلازما للسيطرة عليها • فحجز الوقود يتم باستخدام القناني المغناطيسية وتنحصر المشكلة عندئذ فى تصميم القنينة المناسبة •

ومتى اصبح المفاعل النووى ناجحا فسيلعب دورا مهما ، إذ يصبح بالامكان تحويل الطاقة النووية الى طاقة كهربائية مباشرة دون استخدام المكائن الدوّارة ويتم ذلك بادخال الوقود النووي الحراري ، تأينه وتحوله الى بلازما ، اتمام السيطرة عليه باستخدام القنانى المغناطيسية حيث يتم كبس البلازما عند زيادة المجال المغناطيسى وعندها يبدأ الاشتعال النووى الحرارى ومتى ما سمح للبلازما بالتمدد تولد تيار كهربائى فى ملفات السيطرة نتيجة للطاقة التى تفقدها • لما الوقود المستنفذ فيتم ارجاعه الى المفاعل ميكانيكيا •

ان اعتبار البلازما حالة رابعة للمادة يعطي نظرة خاصة للتطبيقات الصناعية الحاضرة والمستقبلة لفيزياء البلازما • فمن السهل مثلا ان نتفهم عند ذاك لماذا تغدو العمليات النووية الحرارية صعبة المنال • فالمفاعل النووي الحراري لا يتطلب جعل الوقود في حالة بلازما فقط وانما يتطلب الاستمرار فى رفع درجة حرارته بحوالى اربع مراتب اخرى ولكون الحرارة الكامنة للتحول عالية فبامكان حالة البلازما خزن مقدار كبير من الطاقة لكل وحدة من وزنها • وقد استغلت هذه الميزة فيما يدعى بمشعل البلازما Plasma Torch وهو جهاز معروف لدى خبراء المعادن اساسه قوس كهربائى ينفذ منه قسم من البلازما بصورة مستمرة • فبالاضافة الى الحرارة الكامنة العالية ، فان بمقدور البلازما نقل كمية هامة من الطاقة الحرارية فبهذين العاملين استخدم المشعل لتسخين المواد الصلبة لدرجة حرارة ١٥٠٠٠°م ويمكن زيادتها بسهولة ان دعت الضرورة • ومن هنا تبدو

أهمية هذا الجهاز فباستطاعة الفرد ان يبدأ بعمليات جديدة فى حقـــل التعدين (قطع المعادن ولحمها ، مزج المعادن فى حالتها الغازية .. الخ) .

ونستطيع ان ننتقل بسهولة من مبدأ المشعل البلازمى الى الصاروخ البلازمى Plasma Rocket اذ من المعلوم ان انبثاق البلازما من فتحة ضيقة فى المشعل البلازمى المتوفر تجاريا ناتج عن قوة دفع ، شبيهة بما يحدث فى الصاروخ الكيميائى فيمكن تحوير الجهاز من آلة قطع او لحيم الى جهاز يؤثر بدفع . اما الفائدة الناتجة عن استخدام البلازما في الصواريـخ فتكمن في ان سرعة البلازما المتدفقة اكبر بكثير مما هي عليه في الصواريخ الكيميائية التى تكون سرعتها محددة بدرجة حرارة الغاز داخل غرفـة الاحتـــراق .

ان صاروخ البلازما يمثل نوعا من المحرك الكهربائى يمكن عكس عمله من حيث المبدأ واستخدامه كمولد ، وهذا أساس مايدعى بالمولـد الهيدودانيميكي المغناطيسي Magnetohydrodynamicm generator (MHD) واذا استطاع الفرد في الماضى ان يستغل الحالة السائلة والغازية فـــى المولدات الكهربائية فليس هناك مايمنعه من استخدام حالة البلازما اضافة الى فائدتها كموصل يتعامل مع المجال المغناطيسى فهى لاتفتقر الى استخدام عجلات التربن او المكابس او ... الخ) .

ومن الفوائد الكبرى لحالة البلازما استخدامها في الحصول على تميز واحسن للنظائر المختلفة لنفس العنصر وذلك لان ايونات النظائر تـدور بانصاف اقطار مختلفة في نفس المجال المغناطيسى فيمكن استغلال هذه الصفة في تركيز او حذف النظير المشع .

بقـي علينـا ان نتطـرق الـى العلاقـة الوطيـدة بيـن فيزيـاء البلازمـا وبحـوث المعـادن فهـي علاقـة متبادلـة وبأمكان خبيـر المعـادن مساعدة فيزيائى البلازما بأحسن النتاج (الموصلات الكهربائية ، مـــواد المغناطيس الكهربائى ...) فبناء الجدار الذى يحيط بقلب المفاعل النووى

الحراري لازال مشكلة تخص علم المعادن فهناك احتمال لهروب الشحنات وعدم تقيدها بمجال القنينة المغناطيسية مما يشكل خطرا على كفاءة الجهاز. اما فيزيائي البلازما فباستطاعته مساعدة خبير المعادن في تحسين النتاج بتجهيزه بأدوات وآلات وظروف عمل احسن . فازدياد استغلال علم المعادن للفائدة الناجمة عن الظواهر التي تحدث في الحالة الغازية بالرغم من انها تتضمن عمليات اعقد سيؤدي الى سيطرة احسن لنقاوة النتاج الاخير .

كذلك من المؤمل ان يتم خلال وقت قصير اكمال المشعل البلازمي وتعزيزه بعدد اخر من الاجهزة لاستغلال الفائدة العظمى للاختراعات في حقل البلازما ليتمكن خبير المعادن من معالجة نتاجه بظروف أحسن سواء أكان هذا النتاج في حالة البلازما أو في حالة أخرى . فقد أصبح من المعلوم الان ان تكوين الطبقات الرقيقة او التخلص منها يمكن انجازه بواسطة اجهزة البلازما باشكال متعددة وبدقة اكثر من التي تنجز بواسطة التحليل الكهربائي .

واخيرا لنتذكر ان التقدم السريع في حقل فيزياء البلازما الذي حصل خلال السنوات العشر الاخيرة كان حافزه الاساسي الاهتمام الذي حدث في ميدان التفاعلات النووية الحرارية المتحكم فيها والمسيطر عليها ، كما ان هذا الانتعاش لفيزياء البلازما ادى في نفس الوقت الى فتح عدد من الميادين الفرعية التي تم في بعضها احراز تطبيقات عملية مهمة .

1. Solomon Gartenhaus, *Elements of Plasma Physics* Holt, Rinehart and Winston, INC., 1964.

2. R. D. Stuart, *Electromagnetic Field Theory*. Addison-Wesley publishing company, INC., 1965.

3. Chandraasekhar. *Plasma Physics*. The University of Chicago Press, 1961.

4. V. L. Ginzburg, The propagation of *Electromagnetic Waves in Plasma*. Addison - Wesley publishing company, INC., 1960.

5. K.G. Emeleu's, *The Conduction or Electricity Through Gases*. New York: John Wiley & Sons, INC., 1951.

6. A. Guthrie and R. K. Wakerling, *Characteristics of Electrical Discharges in Magnetic Field*. Mc graw - Hill Book Company, INC., 1949.

7. Tonks & Langmuir, Phys., 37: 1458 (1961).

8. M. F. Hoyaux, *Plasma Physics and Metallurgy*. American Scientist, June 1966.