البلازما

إبراهيم سعد الله
أستاذ متقاعد، قسم الفيزياء، المدرسة العليا للأساتذة، القبة
brsadallah@gmail.com

1. ما البلازما؟

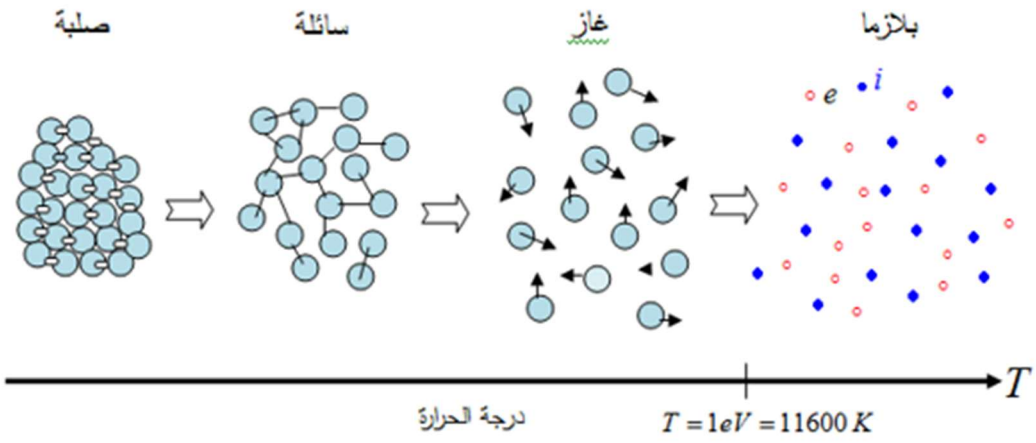
شاهد مِخبريٌ ذات يوم من عام 1922 توهّج مادة في أنبوب يشبه توهّج المادة في البرق واللِّحام وأنابيب النيون. كان مشهدًا لم يألفه الناس. وبعد أن درس العلماء المادة المتوهجة، وجدوها نتيجة حركة الشحنات في حقول كهربائية ومغناطيسية عنيفة، فشبّهوها بحركة الكُرَياتِ البيضاء والحمراء في الدم، المعروفة ببلازما الدم. فأطلقوا على المادة المتوهجة " ظاهرة البلازما"، وذلك سنة 1929. سنحاول هنا عرضها.

غاية هذا المقال هي تقريبُ ظاهرة البلازما للقارئ، بل محاولة إقحامه في معمعتها بقدر الإمكان، لِمَا لها من تواجد حولنا، بل إن الحياة تتوقف عليها. قال العالم السويدي هانس ألفين Hannes Alfvén (1908-1995)، الحاصل على جائزة نوبل في الفيزياء عام 1970، ما معناه: "إن الفيزيائي غير الملّم بعلم البلازما هو فيزيائي جاهل".

2. إنشاء البلازما في المخابر

يبيّن الشكل 1 تخطيطًا تتغير فيه حالة المادة بفعل درجة الحرارة، فلمّا تُرفع درجة حرارة جسم صلب ما، مادة نحاس مثلًا، إلى درجة كافية، تتحول الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة. ولمّا ترفع درجة حرارة السائل بما فيه الكفاية تتحول حالة السائل إلى حالة الغاز. ولمّا تُرفع درجة حرارة الغاز بما فيه الكفاية (أكثر من $1MeV = 11600K \approx$)، تنفصل إلكترونات الذرة عن نواتها، فتصبح الإلكترونات، ومثلها الأيونات، تتحرك بحرية وبلا قيد في حقول كهربائية ومغناطيسية فائقة الشدة، وعدد أجسامها هائل.

فتصبح حالة المادة مكونة من غازين: غاز إلكتروني مطيّة للشحنات السالبة، (كثافته $n_e \approx 1710$ في المتر المكعب)، وغاز أيوني مطيّة للشحنات الموجبة (كثافته Zn_i مثل كثافة الغاز الإلكتروني $n_e = Zn_i$). عندئذ يقال إن حالة المادة صارت بلازما، كما في الشكل 1. لهذا السبب يقال إن البلازما عبارة عن غاز مشحون/متأيّن مكوّن من عدد هائل من الإلكترونات والأيونات تتحرك في حقول كهربائية ومغناطيسية شديدة.



الشكل 1. يبين تغيّر حالة المادة بفعل درجة الحرارة.

وبناءً عليه، نستخلص ما يلي: البلازما هي حالة رابعة للمادة؛ بها حقول وأنشطة، تختلف اختلافًا جذريًا عن الحالات الثلاث.

3. تواجد البلازما في الكون

تبيّن أنّ المواد التي درجة حرارتها تفوق درجة التأيّن (وهي $T \approx 1MeV = 11600K$)، حالتها بلازما. لقد شاهد سكان كوكب الأرض، على مر السنين، البراكين وهي تقذف حممها وألسنة لهب ومواد متوهجة، إلخ؛ ذلك دليل على أن حالة المادة في جوف الأرض شديدة الحرارة، فهي حالة بلازما. وقد بيّنت القياسات وجود براكين في كواكب أخرى، وهذا الوضع ينطبق على كافة الكواكب في الكون. ولذلك يمكننا استنتاج أن حالة المادة في جوف الكواكب في الكون هي بلازما.

ومن خلال المشاهدة والقياسات تبيّن أن درجة حرارة باطن الشمس تبلغ $T = 10^7K$ ، ودرجة حرارة جوها هي $T = 1.510^6K$. يقودنا هذا الوصف إلى الاعتقاد الراسخ أن حالة المادة في الشمس وحولها هي حالة بلازما. وهذه حالة الشموس والنجوم المضيئة بذاتها في الكون.

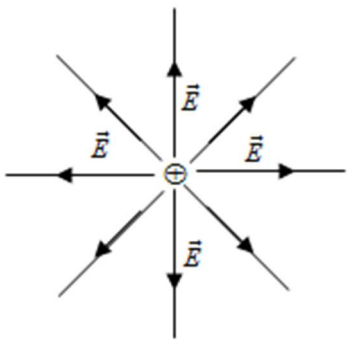
أما الفضاء ما بين الكواكب والمجرات فهو خلاء تسبح فيه جسيمات مشحونة وأخرى غير مشحونة وإشعاعات كهرومغناطيسية صدرت من الشموس والنجوم، نتجت عن تفاعلات بها. نذكر من هذه الجسيمات إلكترونات وبروتونات وجسيمات ألفا (نواة الهيليوم) والنيترونات، إلخ. فحالة المادة في الفضاء بين الكواكب والمجرات هي بلازما أيضًا. هذه البلازما تُعرف بالرياح الكونية (أو الرياح الشمسية).

وبناءً عليه، استخلص العلماء ما يلي: أن 99.9% من حالة المادة في الكون هي بلازما. هذه حالة الكون الذي نعيش فيه، فتحس ابصارنا به، وتتفاعل أجسادنا معه.

4. تعريف البلازما

غالبًا ما تُعرَّف البلازما على أنها "الحالة الرابعة للمادة " أو "الغاز المشحون". وهما تعبيران يكتنفهما غموض، إذ ليست أي جملة من الشحنات تشكل بلازما. كما أنهما لا يحملان أيًّا من خصائصها الفيزيائية الأساسية. في الواقع، تبدي البلازما تصرفات لا تظهر في الحالات الثلاث الشائعة، تُسمّى سمات أو ظواهر البلازما. يعود ذلك لتفاعل شحنات البلازما مع الحقول الكهربائية والمغناطيسية. وعليه ينبغي أن يحمل تعريف البلازما سماتها. لذا يمكن تعريف البلازما على النحو التالي: "البلازما هي غاز من جسيمات مشحونة، عددها هائل، شبه متعادلة، تبدي الفعل الجماعي". هذا التعريف أدق من التعريفين السابقين، لكنه يتضمن مصطلحي "شبه متعادلة" و"الفعل الجماعي". وهما مصطلحان ينبغي توضيحهما.

يُردّد أهل العلم المقولة: لا تستتب الجمل الفيزيائية حتى تقضي على حقولها! دعنا نوضح معنى هذه المقولة. "الفعل الجماعي" و" شبه التعادل".

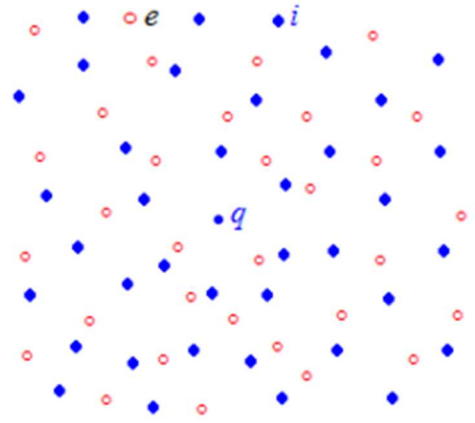


الشكل 2. يبيّن الشحنة الموجبة وحقولها.

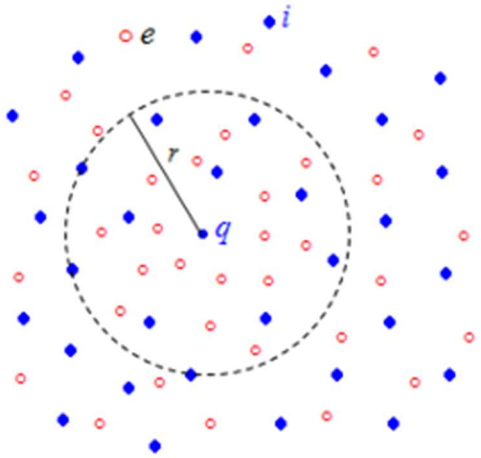
قبل محاولة فهم المصطلحين، دعنا نذكّر بقاعدة مهمة تقول: تُولّد الشحنة الموجبة حقولًا كهربائية في كل نقطة من الفضاء، تخرج منها، وتوازي خطوطًا مستقيمة تتقاطع في الشحنة، شدتها تتناقص مثل$\frac{1}{r^2}$، كلما زادتr ، وهي البعد عن الشحنة، كما يوضح الشكل 2.

فإذا وقعت شحنة سالبة في حقولها تجذبها، وإذا وقعت شحنة موجبة في حقولها تدفعها وتبعدها.

بناءً عليه، هَلُمَّ نقتفي أفعال شحنة من شحنات البلازما، ولتكن أيونًا شحنتهq ، كما يوضح الشكل 3. فاعتمادًا على القاعدة، يجذب الأيونq إلكترونات البلازما القريبة والبعيدة ويدفع أيوناتها القريبة والبعيدة؛ فتتحرك شحنات البلازما حركة جماعية موحدة ومنظمة وفي وقت واحد، محدثة تغييرًا في توزيع أجسام البلازما. ومن ثمّ يصير المشهد كما في الشكل 4، ويتشكل حول الأيونqغَيْمٌ إلكتروني، وتقلّ حوله الأيونات؛ ولا تزال الإلكترونات تتدفق عبر السطح المنقط داخلةً والأيونات تتدفق خارجةً حتى تتعادل الشحنة الكهربائية في الكرة(q, r_D). عندئذ يتوقف التدفق عبر السطح المنقط فتصبح الشحنة الموجبة،$Q_i = Zn_i eV$ ، تساوي الشحنة السالبة،$Q_e = n_e eV$ في الكرة(q, r_D)، أي$Q_i =$ Q_eأو$Zn_i = n_e$. وفي تلك اللحظة يصبح المراقب خارج الكرة(q, r_D) لا يحس بوجود شحنة في الكرة، ولذلك لا يحس بحقل الأيونq. وبعبارة أخرى، فقد عُدِم حقل الأيون خارج الكرة(q, r_D). نشير إلى أنه يمكن الوصول إلى النتيجة ذاتها رياضيًا باستخدام نظرية تدفق الحقل الكهربائي المعروفة.



الشكل 3. يبيّن إلكترونات (○) وأيونات (♦) وأيون اختبارq ، تتحرك في الحقول بحرية وبلا قيد.



الشكل 4. يبيّن أيون اختبارq ، جلب إلكترونات ودفع أيونات بحقله، فشكل حوله غيم من إلكترونات.

يمكننا تلخيص ما تقدّم فيما يلي: لمّا وقعت شحنات البلازما في حقول الأيونq تحركت جماعيًا بحركة موحّدة ومنظمة في وقت واحد. وإثر ذلك أحاطَ الغيمُ بالأيون، لدرجة جعلت الشحنة في الكرة(q, r_D)تتعادل. فيصير مراقب خارجها لا يحس بشحناتها ولا بحقولها. فيقال: "الغيمُ حجب حقل الأيون" على بعدr_D. ها هي نتائج قد تجلّت: إن الحركة الجماعية لشحنات البلازما تسببت في تكوين غيم أحاط بالأيونq ، والغيم تسبب في تعادل الشحنة في الكرة(q, r_D)؛ وتعادل الشحنة في الكرة تسبب في حجب حقل الأيون. لذا فتكوين الغيم، والتعادل (شبه التعادل)، والحجب هي نتائج الفعل الجماعي. تسمى الكرة(q, r_D) كرة ديباي (Debye) للأيّون.

5. تعميم

- ما قام به الأيون q تقوم به كافة أيونات البلازما على قدم المساواة، بل يقوم به كلّ إلكترون من البلازما أيضًا.
- يصبح المشهد العيني للبلازما جملة من غاز متأيّن كثافته عالية، متعادل كهربائيًا، خاليًا من الحقول، جملة مستقرة تبدي الفعل الجماعي. هذا تعريف جيد للبلازما.
- يبيّن الحساب أن نصف قطر كرة ديباي لأيون هو $r_{Di} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 k_B T_i}{Z n_i q_i^2}}$، وللإلكترون هو $r_{De} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 k_B T_e}{n_e e^2}}$.
- تأمّل كيف أبادت جملة الشحنات حقولها، واستقرت. لقد صدق العلماء!

6. ملاحظات

- إن ما يحدث داخل كرة ديباي أمر صعب التخيل؛ ففي كرة ديباي تخيّم حقول كهربائية ومغناطيسية فائقة الشدة. هناك تتفاعل شحنات البلازما مع الحقول وتتصادم (e,e) و (i,e) و (i,i)، كما تتصادم ذرة معتدلة مع (e) و (i)، وتتسارع الشحنات فتصدر من كرة ديباي جميع أنواع الأمواج الكهرومغناطيسية وغيرها. ومن ثمّ ندرك أن كرة ديباي مرتع لظواهر فيزيائية جمّة يصعب حصرها.
- ينبغي التنويه بأن الشحنات في كرة ديباي التي تساهم في حجب حقل الأيون بعضها يعود إلى الحركة الحرارية لأجسام البلازما ولا تعود إلى الحقول الكهربائية (الفعل الجماعي).
- كما نشير إلى أن الإلكترونات القريبة من الأيون q تساهم في تشكيل الغيم بصفة أقل بكثير من مساهمة الإلكترونات البعيدة عن الأيون. ندرك هذه الظاهرة بسهولة عندما نقارن عدد الإلكترونات القريبة من مركز كرة ديباي بعدد الإلكترونات القريبة من محيط كرة ديباي. لذا يُقال إن عملية حجب حقل الأيون يعود أساسًا إلى الإلكترونات البعيدة.

7. استخدامات البلازما

تُستخدم البلازما في عديد التطبيقات الصناعية والتكنولوجية والعلمية نظرًا لخصائصها الفريدة من حيث التوصيل الكهربائي والتفاعل والطاقة العالية. وتنقسم استخداماتها بصفة عامة إلى فئتين: البلازما الحرارية (لها درجة حرارة عالية)، والبلازما الباردة.

على سبيل المثال، تصيب الرياح الشمسية (بلازما) الغلاف الخارجي لجوّ الأرض فيتسبب ذلك في أضرار تطال نظامها المغناطيسي، مما يؤدي أحيانًا إلى تشويهه. ومن ثمّ تتضرّر الاتصالات على وجه الأرض. كما تتعرض جزيئات الهواء في الغلاف الخارجي لجو الأرض (80% منه من غاز النيتروجين N_2) للإشعاع فوق البنفسجي، فيؤدي ذلك إلى تأيُّن غاز الطبقة العليا محدثًا ما يُسمى بـ "البلازما الأرضية"، وهي بلازما باردة، توجد تحتها "طبقة أيونية"، فتحدث انتقالات في طيف النتروجين في البلازما. ونتيجة لذلك يُرسل إشعاع لونه أزرق، وهو اللون المميز لطيف النتروجين. ذلك اللون هو الذي نتمتع به أثناء النهار عندما نرى السماء زرقاء. أما الطبقة الأيونية فتُستغل في الاتصالات اللاسلكية، استغلالًا يصعب حصره، ويؤثر على نظام التموضع العالمي (GPS).

كما تعدّ النواقل بلازمات باردة. فمثلًا هناك ذرة من كل ثلاث ذرات من النحاس فاقدة لإلكترون (فهي بلازما باردة) وذلك هو سبب سريان التيار الكهربائي في الأسلاك، إلخ.

8. استخدام البلازما الحارة

من بين استخدامات البلازما الحارة الكثيرة أنه يُعتمد عليها لإنتاج طاقة الشمس؛ لذا نجيب عن السؤال: ما الشمس؟

تتكون الشمس من الهيدروجين والهيليوم:75% من كتلتها هيدروجين و25% من كتلتها هيليوم، وجزء تافه0.13% من مزيج من الأكسجين والكربون والنتروجين. ويتألف جسم الشمس من طبقات مختلفة الخواص تحيط بباطنها الأحمر، كما في الشكل 5. فالشمس عبارة عن كرة ضخمة من الغاز شديد الحرارة، جميع طبقاتها متوهّجة. وتبلغ درجة الحرارة في باطنها1.510^7K ، وكثافتها150 مرة كثافة الماء، وضغطها أكثر من 200 مليون مرة الضغط الجوي على الأرض. وهكذا نرى أن الشمس بمثابة بلازما بأتم معنى الكلمة. نشير إلى أن في قلب الشمس الكثيف الشديد الحرارة تُنتَج طاقة الشمس من خلال تفاعل اندماجي نووي حراري (فالشمس عبارة عن مفاعل نووي اندماجي متسق ذاتيًا). أما الجو المحيط بها فهو بمثابة بلازما اسمها "هالة" (أو "كورونا")، درجة حرارتها1.510^6K تمدّ الكون بالحرارة والأضواء.

الشكل 5. يبين الشمس والطبقات المكونة لها، الهالة هي البلازما المحيطة بالشمس وتزود بالضوء والحرارة.

9. ما هو المفاعل النووي الحراري الاندماجي الهيدروجيني؟

المفاعل النووي الحراري هو جهاز مصمّم لتوليد الطاقة عن طريق دمج نوى ذرات الهيدروجين في درجات حرارة عالية فائقة؛ وذلك لإنتاج الكهرباء. فقلب الشمس ومحيطه هو مفاعل نووي حراري اندماجي، ذلك أن درجة حرارة قلب الشمس شديدة1.510^7K ، تتحرك فيه نوى الهيدروجين ونظائره حركة حرارية فائقة السرعة، بالطاقةk_BT_i فتتصادم بعنف، رغم تنافرها، ومن ثمّ تندمج إثر ذلك، فيتشكل الهيليوم، وتنساب طاقة هائلة قدرها$17.6MeV$، من خلال التفاعل:

$$^2_1H + ^3_1H \rightarrow ^4_2H_e + ^1_0n + 17.6MeV$$

أو

$$^2_1H(\text{الديوتريوم}) + \ ^3_1H(\text{التريتيوم}) \rightarrow \ ^4_2H_e(\text{هيليوم}) + \ ^1_0n(\text{نيوترون}) + 17.6\ \text{MeV}\ (\text{طاقة منسابة من الاندماج})$$

اطلع الإنسان على هذا التفاعل منذ الأربعينيات من القرن الماضي، وتمكّن من استخدامه سلاحًا نوويًا هيدروجينيًا. ومنذ ذلك الحين وهو يحاول إحداث محاكاة شمسية على الأرض (أي إنشاء مفاعل نووي اندماجي حراري هيدروجيني متحكّم في الطاقة المنسابة)، ففشل لأن الطاقة المنسابة فائقة وتتلف جدران الحاوية فورًا. ولا يزال الأمل يحدو بالباحثين، ويأملون بلوغ ذلك خلال العقود الخمسة المقبلة.

الطاقة المنسابة من هذا التفاعل نظيفة، ووقوده رخيص، ومتوفر، وهو سهل التخزين والنقل، ولا يترتب على هذا التفاعل تلوث إشعاعي (طاقة نظيفة). كما لا يحتاج إلى تخصيب. والوقود موجود في البحر.

لقد استخدمت البلازما الحارة في حرب السنة الجارية بالشرق الأوسط لتعمية الرادارات، إذ ترفع سرعة الصاروخ إلى 15 مرة سرعة الصوت. فلمّا يغُوصُ الصاروخ في الهواء نحو الأرض يسخن ويتوهّج ويصير جسمه بلازما. ومن سمات البلازما إرسال وامتصاص الأمواج، فلمّا تصادف أمواج الرادارات جسمَ الصاروخ تمتزج بأمواج البلازما ولن تعود إلى الرادار.

****

الفيزيائي والكيميائي الهولندي الحائز على جائزة نوبل في الكيمياء عام 1936
بيتر ديباي Peter Debye (1884-1966) صاحب "كرة ديباي".