تمهيد

ولدت فيزياء البلازما، علم القرن العشرين، كنتيجة مباشرة لدراسة الانفراغ في الغازات.

فمنذ عام 1920 حقق هذا المجال تقدماً كبيراً بسبب أهميته في الطبيعة، وتطبيقاته الصناعية وشموله لأسس المعارف في الفيزياء الحديثة تُشكل البلازما في الطبيعة الحالة الرابعة للمادة، وتنتج حسب تسلسل تزايد درجة الحرارة من الحالة الصلبة فالسائلة فالغازية. ويوافق طور البلازما في وضع التوازن الترموديناميكي حالة التأين الكلي للغاز بسبب تصادم الجسيمات المعتدلة فيما بينها. ولا يمكن بلوغ هذه الحالة ضمن هذه الظروف إلاّ بدرجات حرارة عالية جداً (أعلى من 50.000K)، لكي تكون طاقة التهيج الحراري من مرتبة عتبة تأين الجسيمات المعتدلة كهربائياً نفسها.

بشكل أدق، يجب تخصيص تسمية بلازما للغازات كاملة التأين والمعتدلة بالإطار العام، التي إذا نُظر إليها بشكل كلي لا تملك شحنة كهربائية، فالجسيمات المشحونة (الإلكترونات والأيونات)، والتي تولد أثناء التأثير المتبادل فيما بينها، حقولاً موضعية للشحنة الحجمية يمكن أن تؤدي إلى اهتزازات جماعية شبيهة باهتزازات الجيلاتين.

وتجاوزاً جرت العادة على إطلاق تسمية البلازما على كل غاز متأين، مما قاد إلى عدد كبير من الحالات الفيزيائية المختلفة، إذ إن عدداً كبيراً من بلازما المخابر لا توجد في وضع التوازن الترموديناميكي بسبب التأين الناتج عن التصادم بين الإلكترونات والجسيمات المعتدلة (فالإلكترونات المسرعة بحقل كهربائي خارجي، ذات درجة حرارة مرتفعة بالمقارنة مع الجسيمات المعتدلة).

نظراً لهذه الصعوبة في التصنيف، يمكن تمييز البلازما انطلاقاً من درجة التأين والكثافة ودرجة حرارتها الإلكترونية. ويسمح هذا التقريب الأولي بالقول إن فيزياء البلازما تغطي مجالاً من الكثافة الإلكترونية يتراوح ما بين $10^{6}m^{-3}$ (الفضاء بين الكواكب) إلى $10^{30}m^{-3}$ (البلازما في المعادن والنجوم) من أجل درجات حرارة تتراوح بين $10^{2}K$ (الفضاء بين الكواكب) و $10^{8}K$ (داخل النجوم وبلازما الاندماج). وهكذا تحتل فيزياء البلازما مكاناً مهماً في دراسة الأوساط الطبيعية (فيزياء الفلك) والغازات المتأينة التي يمكن الحصول عليها في المخبر.

وعلى الرغم من قبول حقيقة أن 99٪ من الكون مكون من مادة في حالة بلازما، فإنّ هذا المقرر لا يُدرَّس إلاّ قليلاً، والسبب في ذلك يعود دون شك إلى تعقيد مادته، إذ نظراً لتعقيده فهو يتطلب عملياً معرفة جميع فروع الفيزياء (الميكانيك الإحصائي، والميكانيك الكوانتي، ونظرية التصادمات، والفيزياء الذرية والجزيئية، والفيزياء النووية، والنظرية الحركية، ومعادلات النقل، والترموديناميك، والأمواج، والإشعاع، والدراسات الطيفية، والكهرباء، والحركية الكيميائية، والمعادلات المترابطة غير الخطية...). ولقد قادت أهمية هذا العلم الكثير من الأعمال النظرية والتجريبية التي سمحت بتعميق معرفتنا على المستويين الأساسي والتطبيقي.

أدت هذه الجهود تدريجياً إلى إدخال تقنيات البلازما في الصناعة، حيث يمكننا تمييز ثلاثة أنواع من البلازما:

- البلازما الباردة: حيث تبقى درجات حرارة الأيونات والجسيمات المعتدلة بدرجات حرارة أخفض من 1000K، في حين تكون الإلكترونات ذات درجات حرارة مرتفعة (تطبيقاتها في معالجة السطوح وفي تحضير مواد جديدة، والتنقية من التلوث، وتوليد الأوزون، والكيمياء بمساعدة البلازما)

- البلازما الحرارية: التي تتميز بدرجات حرارة عمل أعلى من 3000K (استخدام انفراغ القوس الكهربائية في اللحام والقطع والتنقية من التلوث وغيرها).

- البلازما الحارة: والتي توافق درجة حرارة أعلى من 10^6K، (ويكمن الهدف في إنتاج الطاقة الكهربائية انطلاقاً من الاندماج النووي المتحكم به).

تبيّن مجموعة التطبيقات هذه الطبيعة متعددة الاختصاصات لهذا الفرع الفيزيائي، إذ إن مميزات البلازما الموجودة ضمن مفاعل تتعلق بعدة عوامل منها:

- الغاز: طبيعته وتركيزه (في حالة المزيج)، ضغطه (10^{-4} Torr وحتى الضغط الجوي)، تدفقه ودرجة حرارته.

- هندسة المفاعل: شكل المفاعل، وطبيعة جدرانه (عازلة أو ناقلة)، وقانون الجريان، واللبوسات (توضعها والمسافة الفاصلة بينها وشكلها وعددها).

- التغذية الكهربائية: فرق الكمون مستمر أم متناوب (التواتر، وشكل الإشارة، وزمن تطبيقها)، ونظام عمل الانفراغ، وطبيعة الارتباط بالبلازما (مباشر، تحريضي، سعوي...).

على الرغم من تعقيد هذه التقنيات إلا أنها بدأت تحل بشكل تدريجي محل الطرائق التقليدية لفائدتها في: تخفيض التلوث، والتطبيقات على المواد الحساسة لدرجة الحرارة (عمليات البلازما الباردة)، والتنوع الكبير للتطبيقات، وإمكانية الأتمتة، والاقتصاد في المواد المتفاعلة وسهولة الاستخدام والأداء... وضمن هذه المعطيات لا بد من معرفة توصيف الغاز المتأين المستخدم في كل تطبيق. ولهذا السبب يهدف هذا الكتاب إلى إعطاء خلاصة مختصرة عن فيزياء البلازما تسمح، من وجهة نظر عملية، بالتطرق إلى مختلف الأوجه الجوهرية لهذا المقرر.

ترتكز طريقة العمل المتبناة على الوصف الميكروسكوبي (المجهري) للبلازما. ويجري الانتقال من المقادير الميكروسكوبية إلى المقادير الماكروسكوبية (الجهرية)، وذلك بالاعتماد على الفرضيات الأساسية ونتائجها، وعلى المعرفة العامة للبلازما. والهدف هو تقديم وسائل البحث النظرية اللازمة لدراسة الغاز المتأين من وجهة نظر التطبيقات. إن الدراسة موجهة بشكل أساسي نحو البلازما الحركية الكلاسيكية للبلازما (وبشكل خاص الغازات ضعيفة التأين)، والتي تحظى بمجال واسع من التطبيقات.

قُسِّم الكتاب إلى خمسة فصول تعالج سلوك البلازما المجهري والجهري على افتراض أنها غير محدودة بجدران، أي إن تأثيرات السطح لن تؤخذ بالحسبان، ولن تعالج إلاّ في بعض الحالات الخاصة.

يعطي الفصل الأول وصفاً عاماً للبلازما:

فيعرِّف المقادير الأساسية التي تسمح بتوصيف البلازما وبتصنيفها ضمن أصناف تأخذ بالحسبان خصائصها العامة. فالأطوال الأساسية (المسافة الوسطية بين الجسيمات، ونصف القطر الوسطي الذي يشغله الإلكترون، وطول ديباي، وطول لانداو) عُرِّفت ثم قورنت ببعضها بهدف تحديد الطابع الحركي أو الجماعي للبلازما المدروسة. وتسمح هذه الأطوال المرجعية بتعيين درجة ترابط البلازما (معامل البلازما)، حيث إن التأثيرات المتبادلة بين الجسيمات تعالج عن طريق تابع ترابط الأزواج. ويوصف دور الجسيمات المشحونة تبعاً للحالة الفيزيائية المدروسة (فعل التحجيب، الاهتزازات، ...).

يعالج الفصل الثاني:

مسألة التصادمات المزدوجة بين الجسيمات، ويعرض الوجهين التقليدي والكوانتي لهذه المسألة. ولقد درست الانتقالات الطاقية بين الأوضاع الداخلية والخارجية بالتفصيل لتحديد شروط العتبة التي تظهر في التفاعلات الماصة للطاقة. كما إن فصل التصادم التقليدي وحركة مركز الكتلة والحركة النسبية قاد إلى

إدخال المعادلة القطبية للمسار، ثم عُرِّف المقطع العرضي الفعال بشكل عام للعمليات المرنة وغير المرنة والتفاعلية.

ويعرض الفصل الثالث:

تحليلاً لمختلف الآليات الأساسية التي تظهر في البلازما (الحركية، التهيج أو الإثارة، التفكك، التأين، إصدار الفوتونات)، وحيث يوصف كل منها بتابع إحصائي. وتسمح دراسة توازن كل آلية بتعيين درجة الحرارة لمجموعة الجسيمات المدروسة. وبغية وصف وضع التوازن الترموديناميكي الإجمالي حللت شروط تبادل الطاقة بين الجسيمات والإشعاع بالتفصيل.

ولقد خصص الفصل الرابع:

لدراسة العمليات العنصرية: حيث عيِّن معامل الصدم وتواتر حدوثه انطلاقاً من المقطع العرضي الفعال الكلي. وحسب هذين المقدرين في عدد من الحالات المهمة (الكرات الصلبة، والإثارة، والتأين بالصدم بين إلكترون وجسيم معتدل). وصنفت فيما بعد العمليات العنصرية، ووضعت شروط الاختيار التي تسمح بأخذ الآليات الأساسية الموافقة لكل نوع بلازما مدروسة.

ويركز الفصل الأخير:

على الانتقال من المقادير المجهرية إلى المقادير الجهرية، وذلك بالتوصل إلى معادلات ومعاملات النقل. وحسبت الحصيلة الطاقية لكل نوع من الأنواع (جسيمات، فوتونات) بدراسة حد التصادم من وجهة نظر جهرية. وقد قدم مفهوم المنابع والضياع اعتماداً على خلاصة نتائج تم الحصول عليها في الفصول السابقة، وأخذت التفاعلات وظواهر الانتشار بالحسبان بشكل عام.

يتوجه هذا الكتاب في فيزياء البلازما إلى طلاب نهاية الحلقة الثانية والحلقة الثالثة، وإلى الباحثين الشباب والمهندسين. ويشكل الجزء الأول لمقرر موجَّه نحو تطبيقات البلازما الباردة، فهو يجمع معلومات القاعدة الضرورية لفهم الآليات الأساسية التي تتحكم بسلوك الغازات المتأينة من وجهتي النظر المجهرية والجهرية

للوسط. ولا تتطلب قراءة هذا الكتاب إلاّ معرفة القليل من المعلومات السابقة والمعلومات الرياضية الأولية التي تسمح بمتابعة تطور الحسابات بسهولة. وقد طرحت البراهين الأساسية بأدق ما يمكن، مع المحافظة على المنحى الفيزيائي لهذا الاتجاه متعدد الاختصاصات. ولقد كان الهدف الأساسي للكاتب هو أن يتقاسم مع القارئ تحمسه لهذه الفيزياء الغنية والخصبة.

obeikandl.com