



ФІЗИКА ПЛАЗМИ

Плазма (П.) — це електропровідне середовище, в якому є приблизно однакова кількість позитивно та негативно заряджених частинок, що утворюються, коли атоми в газі стають іонізованими. На відміну від твердого, рідкого та газоподібного станів її іноді називають четвертим станом речовини. Негативний заряд переважно несуть електрони, кожен з яких має одну одиницю негативного заряду. Позитивний заряд несуть атоми або молекули, у яких відсутні ті самі електрони. У деяких випадках електрони, відсутні в одному типі атома чи молекули, приєднуються до іншого компонента, у результаті чого утворюється П., що містить як позитивні, так і негативні іони. Найекстремальніший випадок відбувається, коли малі, але макроскопічні частинки пилу стають зарядженими в стані, який називають пиловою П. Унікальність стану П. пояснюється важливістю електричних і магнітних сил, що діють на П., на додаток до таких сил, як сила тяжіння, що впливає на всі форми матерії. Оскільки ці електромагнітні сили можуть діяти на великих відстанях, П. діятиме колективно, як рідина, навіть якщо частинки рідко стикаються одна з одною. Майже вся видима матерія у Всесвіті існує в стані П. Це Сонце, зірки, міжпланетний та міжзоряний простір, полярне сяйво, блискавка, зварювальні дуги. Середовище у неонових і люмінесцентних трубках також є П. Сама Земля занурена в розріджену П., яку називають сонячним вітром, і оточена щільною П., яку називають іоносферою. П. можна створити в лабораторії шляхом нагрівання газу до надзвичайно високої температури, що спричиняє такі інтенсивні зіткнення між його атомами та молекулами, що електрони вириваються із електронної оболонки атома, утворюючи необхідні електрони та іони. Подібний процес відбувається всередині зірок. У космосі домінуючим процесом утворення П. є фотоіонізація, під час якої фотони сонячного або зоряного світла поглинаються наявним газом, спричиняючи випромінювання електронів. Оскільки Сонце та зірки світять безперервно, у таких випадках практично вся речовина стає іонізованою, а П. називають повністю іонізованою. Але П. може бути і лише частково іонізованою. Повністю іонізована воднева П., що складається виключно з електронів і протонів (ядер водню), є простою П. Сучасна концепція стану П. виникла на початку 1950-х рр. Значний вплив на розвиток фізики П. як дисципліни мали такі галузі дослідження: електричні розряди, магнітогідродинаміка (вивчає провідну рідину) та кінетична теорія. Основи уявлень про електричний розряд заклали британські фізики М. Фарадей, Дж. Томсон і Дж. Таунсенд. 1923

американський хімік І. Ленгмюр, досліджуючи електричні розряди, ввів термін «плазма». 1929 він і американський фізик Л. Тонкс використали цей термін для позначення тих областей розряду, в яких можуть відбуватися певні періодичні зміни густини негативно заряджених електронів. Це і є коливання електронної підсистеми П. Колективне поведіння заряджених частинок у магнітних полях і концепція провідної рідини є неявними в магнітогідродинамічних дослідженнях М. Фарадея і французького фізика А.-М. Ампера. 1942 шведський фізик Г. Альфвен запропонував концепцію магнітогідродинамічних хвиль. Ці два окремі підходи — дослідження електричних розрядів і вивчення поведінки рідин, що проводять струм у магнітних полях, були об'єднані введенням кінетичної теорії стану П. Важливою властивістю П. є існування плазмових коливань та хвиль. Час τ , необхідний для такого типу коливань, є найважливішим часовим параметром у П. Основним просторовим параметром є довжина Дебая h , що є відстанню, яку проходить середній тепловий електрон за час $\tau/2\pi$. За цими параметрами П. можна визначити як частково або повністю іонізований газ, який відповідає наступним критеріям: 1) плазмовий електрон може здійснити багато плазмових коливань, перш ніж зіткнеться з іоном або однією з інших важких складових; 2) всередині кожної сфери з радіусом, рівним довжині Дебая, повинно бути багато частинок; 3) розміри П. повинні бути набагато більшими за довжину Дебая. Іншим важливим часовим параметром є час між зіткненнями частинок. Можуть мати місце два основних види зіткнення: пружне і непружне. При пружному зіткненні сумарна кінетична енергія всіх частинок, що беруть участь у зіткненні, однакова до і після події. При непружному зіткненні частка кінетичної енергії переходить у внутрішню енергію частинок, що стикаються. Для вивчення властивостей П. потрібно сформулювати методи опису плазмових явищ. Якщо зіткнення частинок відбуваються відносно рідко, можна враховувати рухи окремих частинок. Магнітне поле діє на заряджену частинку лише тоді, коли частинка рухається, причому сила діє під прямим кутом як до напрямку поля, так і до напрямку руху частинки. В однорідному магнітному полі (В) заряджена частинка обертається навколо силової лінії. Центр орбіти називають направляючим центром. Частинка також може мати компонент швидкості, паралельний магнітному полю, і таким чином формує спіраль в однорідному магнітному полі. Якщо однорідне електричне поле (Е) прикладено під прямим кутом до напрямку магнітного поля, напрямний центр дрейфує з рівномірною швидкістю, величина якої дорівнює від-

ношенню електричного до магнітного поля (E/B), перпендикулярно як до електричного, так і до магнітного полів. Із збільшенням густини P з'являються внутрішні поля, що обумовлені виникненням областей, де мають місце ущільнення або розрідження зарядів. В цьому випадку P можна описувати за допомогою рівнянь гідродинаміки. На більш високому рівні опису поведінки P використовують кінетичні рівняння типу Больцмана. Такі рівняння, по суті, описують поведінку цих частинок навколо точки в елементі малого об'єму, причому швидкості частинок лежать у невеликому діапазоні відносно даного значення. При такому підході враховується взаємодія з усіма іншими групами швидкостей та будь-якими внутрішніми і зовнішніми електричними та магнітними полями. У багатьох випадках рівняння для опису рідинної моделі P гідродинамічні рівняння можуть бути отримані з кінетичних рівнянь, бо вони виражають збереження маси, імпульсу та енергії на одиницю об'єму для кожного типу частинок. Основними змінними, важливими при дослідженні P , є густина частинок, температура, напруженість електричного та магнітного полів і швидкості частинок. У лабораторії та в космосі електростатичні (заряджені) і магнітні типи сенсорних пристроїв, які називають зондами, допомагають визначити величини таких змінних. За допомогою електростатичного зонда можна визначити густину іонів, температуру електронів та іонів і різницю електростатичних потенціалів. Невеликі котушки та інші типи магнітних зондів дозволяють з'ясувати значення магнітного поля, а з електромагнітних рівнянь Максвелла можна знайти густину струму, густину заряду та індуковану складову електричного поля. Для утримання P високої щільності з високою температурою використовують магнітні поля, оскільки такі поля чинять на P тиск і утримують її. Рівноважної конфігурації досягають лише тоді, коли в усіх точках P ці тиск і напруга точно врівноважують тиск від руху

частинок. Утримання P магнітним полем характеризується часом утримання (τ_c), або середнім часом, протягом якого заряджена частинка дифундує з P ; цей час різний для кожного типу конфігурації магнітної системи і P . Загалом існує два основні методи ефективного утримання P . Це використання тороїдальних плазмових систем і магнітних дзеркал. Ці методи важливі при реалізації завдань керованого термоядерного синтезу.

Рекомендована література

1. I. Langmuir. The effect of space charge and initial velocities on the potential distribution and thermionic current between parallel plane electrodes // *Physical Review*. 1923. Vol. 21;
2. N. A. Krall, A. W. Trivelpiece. *Principles of plasma physics*. New York, 1973;
3. Ахиезер А. И., Ахиезер И. А., Половин Р. В., Ситенко А. Г., Степанов К. Н. *Электродинамика плазмы*. Москва, 1974;
4. V. E. Golant, A. P. Zhilinskii, I. E. Sakharov. *Fundamentals of plasma physics*. New York, 1980;
5. Кондратенко А. Н. Поверхностные и объемные волны в ограниченной плазме. Москва, 1985;
6. N. A. Azarenkov, K. N. Ostrikov. Surface magnetoplasma waves at the interface between a plasma-like medium and a metal in the Voigt geometry // *Physics Reports*. 1999. Vol. 308;
7. M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg. *Principles of plasma discharges and materials processing*. New York, 2005;
8. Загородний А. Г., Черемных О. К. *Введение в физику плазмы: В 2 ч.* К., 2014;
9. Азаренков М. О., Денисенко І. Б., Загородній А. Г., Момот А. І. *Моделювання процесів у заповненій газорозрядній плазмі*. Х., 2021.

М. О. Азаренков

Бібліографічний опис:

Фізика плазми / М. О. Азаренков // *Енциклопедія Сучасної України* [Електронний ресурс] / Редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. — К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2025. — Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-889273>

2001-2025 © Ця енциклопедична стаття захищена авторським правом згідно з чинним законодавством України ([докладніше](#)).