

## Математическое моделирование ближнего космоса

В последнее десятилетие наблюдается существенное расширение исследований плазмы и возможностей ее практического использования. В лабораторных условиях одной из важнейших является проблема нагрева высокотемпературной сильноионизированной плазмы с целью осуществления в ней реакции управляемого термоядерного синтеза, в том числе с помощью мощного радио- или оптического излучения и быстрых потоков нейтральных частиц. Интерес к слабоионизированной плазме определяется прежде всего созданием магнитогидродинамических (МГД) преобразователей энергии, в основу которых положен принцип использования ионизированного газа в качестве проводника, пересекающего силовые линии магнитного поля. Среди других многочисленных примеров практического применения плазмы можно указать на плазменные ускорители, генераторы и газоразрядные приборы. Возникла новая область электроники — плазменная электроника, в которой одним из наиболее перспективных направлений стало использование плазменных эффектов в твердых телах с целью усиления и генерации колебаний и волн.

С плазмой приходится очень часто встречаться и в естественных условиях. Изучение плазмы ионосферы и космического пространства необходимо при решении ряда проблем распространения радиоволн, солнечно-земной физики, при интерпретации огромного наблюдательного материала по радиоизлучению галактических и метagalacticких объектов, межзвездной среды и звездных атмосфер. В этих случаях исследователям приходится сталкиваться с множеством разнообразных задач гидродинамики и кинетики плазмы, связанных с генерацией, распространением и поглощением волн в плазме, взаимодействием волн и частиц, развитием в плазме неустойчивостей.

Например, возникновение и развитие такого крупного раздела теоретической астрофизики, как космическая электродинамика было обусловлено применением методов магнитной гидродинамики. Магнитогидродинамический подход оказался плодотворным при изучении крупномасштабных процессов в галактической и метagalacticкой плазме, в солнечном ветре, представляющем собой истечение корональной плазмы в межпланетное пространство, при описании взаимодействия солнечного ветра и магнитосферы Земли, а также ряда явлений в ионосфере. Вместе с тем кинетический метод описания процессов в плазме позволил существенно продвинуться в решении задач об излучении и поглощении волн, о мелкомасштабном расслоении плазмы и др.

Очень многообразны проблемы электродинамики магнитосферных явлений. Само объяснение формирования магнитосферы Земли при обтекании солнечным ветром геомагнитного поля приводит даже при сильной идеализации к необходимости решения сложной задачи магнитной гидродинамики. Достаточно трудными являются и задачи ионосферной физики, при решении которых кроме влияния на ионосферу солнечного ионизирующего излучения и многообразных рекомбинационных процессов необходимо учитывать эффекты электродинамического взаимодействия ионосферы и магнитосферы, а иногда и ее динамическое взаимодействие с нижними слоями атмосферы.

Волновые явления в космической плазме занимают особое место. Можно упомянуть, например, что с низкочастотными волнами в плазме связывают решение проблемы нагрева солнечной короны. Высокочастотные волновые явления определяют неравновесное излучение плазмы в радио- и более коротковолновом диапазонах электромагнитных волн.

Излучение из плазмы и ее влияние на характер распространения радиоволн лежат в основе многочисленных методов исследования ионосферы и космического пространства. Спорадическое радиоизлучение Солнца и звезд, радиоизлучение Юпитера и магнитосферы Земли являются одним из основных методов диагностики параметров плазмы. Эффекты поглощения и рассеяния радиоволн широко используются при изучении ионосферы и космической среды.

Физика ионосферы является одной из тех областей, где исследования различных явлений в плазме имеют определяющее значение ввиду их тесной связи с практикой распространения радиоволн. В этих исследованиях используется и наиболее обширный арсенал экспериментальных методов и средств, опирающихся на эффекты распространения радиосигналов. Следует заметить, что многие экспериментальные методы, разработанные ранее для изучения ионосферы и космической среды, в последние годы используются и для диагностики параметров лабораторной плазмы.

Если говорить о распространении в магнитосферной плазме электромагнитных волн, то здесь нужно в первую очередь упомянуть о низкочастотных волнах в диапазоне частот 1—15 кГц, который называют иногда свистовым диапазоном. Радиоизлучение на этих частотах возникает при разряде молний и может генерироваться специальными передатчиками. Важной его особенностью является возможность проникновения из ионосферы в магнитосферу, что связано с влиянием геомагнитного поля. При определенных обстоятельствах радиоизлучение канализируется и распространяется вдоль силовых линий магнитного поля Земли. Так, например, радиоизлучение, возникшее при вспышке молнии в северном полушарии, может по «подковообразному» пути последовательно пройти через ионосферу и магнитосферу и быть принято в южном полушарии (или же после отражения вернуться в район генерации). Из-за дисперсии плазмы излучаемые молниями сигналы в виде помех после однократного или многократного прохождения через магнитосферу воспринимаются уже не как трески, а как свистящие звуки с постепенно понижающейся частотой. Эти сигналы грозового происхождения получили название свистящих атмосфериков (свистов).

Свистящие атмосферерики являются не единственными представителями принимаемых на Земле электромагнитных низкочастотных сигналов естественного происхождения, имеющих «звуковую» окраску. Если интересоваться только свистовым диапазоном, то и в нем существует несколько различных по своим спектральным свойствам излучений, получивших название ОНЧ-излучений. Эти излучения не связаны с молниями и имеют чисто магнитосферное происхождение. На более низких частотах в магнитосфере могут возбуждаться колебания (волны) магнитогидродинамического характера, которые на наземных станциях регистрируются как пульсации геомагнитного поля.

Одна из интересных проблем взаимодействия волн и частиц связана с нелинейными явлениями, возникающими при воздействии на ионосферную плазму мощным коротковолновым радиоизлучением. Успешные эксперименты позволили осуществить искусственное возбуждение мелкомасштабных ионосферных неоднородностей, генерацию низкочастотного радиоизлучения ионосферных токовых систем и др. Все это позволяет говорить о новом эффективном инструменте изучения ионосферы.

Из приведенного беглого обзора видно многообразие проблем, связанных с излучением плазмы и распространением в ней различных волн. Это относится к плазме естественного происхождения не в меньшей степени, чем к лабораторной плазме. Без овладения методами физики плазмы и активного использования ее результатов невозможно развитие исследований в области распространения радиоволн, радиоастрономии, во многих разделах астрофизики и геофизики.

$$\begin{aligned} & \rho_e \frac{\partial u_e}{\partial t} + \rho_e (u_e \nabla) u_e = -\nabla p_e - \Gamma_e + \frac{\rho_e F_e}{M_e} - \\ & 1) - eN_e \left( E + \frac{1}{c} [u_e H] \right) - M_e v_{en} N_e (u_e - u_n) - \\ & \quad - M_e v_{ei} N_e (u_e - u_i) \\ & \rho_i \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho_i (u_i \nabla) u_i = -\nabla p_i - \Gamma_i + \frac{\rho_i F_i}{M_i} - \\ & 2) - eN_i \left( E + \frac{1}{c} [u_i H] \right) - M_e v_{ei} N_e (u_i - u_e) - \\ & \quad - M_i v_{in} N_i (u_i - u_n) \\ & 3) \rho_n \frac{\partial u_n}{\partial t} + \rho_n (u_n \nabla) u_n = -\nabla p_n - \Gamma_n + \frac{\rho_n F_n}{M_n} - \\ & \quad - M_e v_{en} N_e (u_n - u_e) - M_i v_{in} N_i (u_n - u_i) \\ & 4) 3 \left[ \frac{\partial p_e}{\partial t} + (u_e \nabla) p_e \right] + 5 p_e \operatorname{div} u_e + \operatorname{div} Q_e = 0 \\ & 5) 3 \left[ \frac{\partial p_n}{\partial t} + (u_n \nabla) p_n \right] + 5 p_n \operatorname{div} u_n + \operatorname{div} Q_n = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
6) \quad & \frac{\partial p_i}{\partial t} + (u_i \nabla) p_i = \frac{5}{3} \frac{p_i}{\rho_i} \left( \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + u \nabla \rho_i \right) \\
& \frac{\partial T_e}{\partial t} + u_e \nabla T_e + \frac{2}{3} T_e \operatorname{div} u_e = \frac{3}{2} \frac{M_e}{\chi} v_{en} u_e (u_e - u_n) - \\
7) \quad & - \frac{2}{3} \frac{M_e}{\chi} v_{ei} u_e (u_e - u_i) + \frac{1}{3} v_{en} \frac{M_e}{M_n} (T_n - T_e) + \\
& + \frac{1}{3} v_{ei} \frac{M_e}{M_i} (T_i - T_e) + \operatorname{div}(\chi_{T_e} \nabla T_e) \\
& \frac{\partial T_i}{\partial t} + u_i \nabla T_i + \frac{2}{3} T_i \operatorname{div} u_i = \frac{3}{2} \frac{M_i}{\chi} v_{in} u_i (u_i - u_n) - \\
8) \quad & - \frac{2}{3} \frac{M_i}{\chi} v_{ei} u_i (u_i - u_e) + \frac{1}{3} v_{in} \frac{M_i}{M_n} (T_n - T_i) + \\
& + \frac{1}{3} v_{ei} \frac{M_i}{M_e} (T_e - T_i) + \operatorname{div}(\chi_{T_i} \nabla T_i) \\
& \frac{\partial T_n}{\partial t} + u_n \nabla T_n + \frac{2}{3} T_n \operatorname{div} u_n = \frac{3}{2} \frac{M_n}{\chi} v_{en} u_n (u_n - u_e) - \\
9) \quad & - \frac{2}{3} \frac{M_n}{\chi} v_{in} u_n (u_n - u_i) + \frac{1}{3} v_{in} \frac{M_n}{M_i} (T_i - T_n) + \\
& + \frac{1}{3} v_{en} \frac{M_n}{M_e} (T_e - T_n) + \operatorname{div}(\chi_{T_n} \nabla T_n)
\end{aligned}$$

Где  $\Gamma_e = \eta_e \Delta u_e + \frac{1}{3} \eta_e \operatorname{grad} \operatorname{div} u_e$ ,  $\eta_e = \rho_e \left( \frac{\chi T_e}{M_e v_{ee}} \right)$  - коэффициент динамической вязкости электронного газа,  $\Gamma_i = \eta_i \Delta u_i + \frac{1}{3} \eta_i \operatorname{grad} \operatorname{div} u_i$ ,  $\eta_i = \rho_i \left( \frac{\chi T_i}{M_i v_{ii}} \right)$  - коэффициент динамической вязкости ионного газа,  $\Gamma_n = \eta_n \Delta u_n + \frac{1}{3} \eta_n \operatorname{grad} \operatorname{div} u_n$ ,  $\eta_n = \rho_n \left( \frac{\chi T_n}{M_n v_{nn}} \right)$  - коэффициент динамической вязкости нейтронного газа  $H$  - магнитное поле,  $N_e$  - количество электронов,  $N_i$  - количество ионов,  $N_n$  - количество нейтронов,  $Q_e = -\frac{15}{2} \frac{p_e \chi}{M_e v_{ee}} \nabla T_e$ ,  $Q_n = -\frac{15}{2} \frac{p_n \chi}{M_n v_{en}} \nabla T_n$  - потоки тепла полностью ионизированной плазме,  $M_e$  - масса электрона,  $M_i$  - масса иона,  $M_n$  - масса нейтрона,  $E$  - полная энергия,  $e$  - кинетическая энергия.

### Численный алгоритм для системы уравнения:

- 1) Уравнения (1), (2) и (3) решаем с помощью метода дробных шагов и находим компоненты скорости для электрона, иона и нейтрона.
- 2) Потом решаем уравнения (4), (5) и (6) с помощью метода Фурье в сочетании с матричной прогонки и находим давления для каждой компоненты электрона, иона и нейтрона. Найденные значения подставляем в уравнения (7), (8) и (9) и находим температуру для компоненты электрона, иона и нейтрона