

ПЕРЕНОС ЛИНЕЙЧАТОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В НЕОДНОРОДНЫХ СЛОЯХ ПЛАЗМЫ

В.И.ТОЛКАЧ

Институт Тепло и Массообмена, Минск, Беларусь

Задача плазмодинамики включает решение системы уравнений гидродинамики, переноса излучения, а также зарядовой и урвневой кинетики. В общем случае эта задача чрезвычайно сложная и ее, обычно, упрощают. Традиционным стал подход: независимое решение уравнений кинетики и дальнейшее использование термодинамических и оптических свойств плазмы при решении совместной системы уравнений гидродинамики и переноса излучения. Большинство работ выполнено именно по этой схеме. В ряде случаев такой подход наталкивается на серьезные трудности.

В первую очередь это проблема выбора частотных точек для уравнения переноса. Число частотных точек обычно весьма ограничено, поэтому спектр осредняется в спектральные группы. Такая процедура удовлетворительно описывает перенос излучения в континууме, но совершенно не пригодна для резонансных линий. Осреднение коэффициентов поглощения и испускания в группе большей, чем характерная ширина линии приводит к завышению излучения, если оптическая толщина в центре линии $\tau \gg 1$.

Второй проблемой является учет реабсорбции в линиях и влияние излучения на кинетические характеристики плазмы. В приближении раздельного решения уравнений кинетики и переноса излучения эта проблема вообще не может быть решена, так как кинетические характеристики в этом случае зависят только от локальных параметров T и ρ (или T и P).

Для решения этих проблем мы решили отказаться от общепринятой схемы: кинетика + гидродинамика-перенос и перейти к схеме кинетика-перенос + гидродинамика-перенос. Суть первой части этой схемы в том, что уравнения кинетики решаются одновременно с уравнениями переноса излучения на заданом газодинамическом профиле T и ρ . При этом не создаются обширные таблицы, а используются кинетические характеристики в конкретных термодинамических точках профиля. Кроме того, такой подход позволяет более объективно выбрать шкалу частот для уравнения переноса излучения. Эта процедура выполняется в 4 этапа:

1. Расчет оптических свойств вдоль заданного профиля T, ρ на регулярной шкале с большим числом частотных точек. Выбор наиболее сильных линий по интенсивности излучения.

2. Расчет индивидуальных частотных шкал для этих линий и построение общей шкалы. Пересчет оптических свойств на новой шкале.

3. Расчет оптических толщин линий вдоль всего профиля T, ρ .

4. Огрубление детальной шкалы и создание компактной с малым числом групп. При этом в широкие группы осредняются участки спектра с $\tau \ll 1$ и $\tau \gg 1$, а участки спектра с $\tau \approx 1$ остаются максимально детализированными. Такая процедура позволяет адекватно передать перенос излучения в линиях.

Для тестирования этого метода проводился расчет переноса излучения в плазме углерода на реальном спектре. Расчет проводился на детальной

шкале из 2000 точек и оптимизированной из 230 точек. Результаты практически совпадают.

Вторая проблема - влияние поля излучения на кинетические характеристики плазмы. Это наиболее сложная часть задачи. Нужно отметить, что эта проблема достаточно широко изучалась в литературе, однако чаще всего на модельных спектрах. Переход от модельных спектров к реальным порождает новые проблемы. В числе их можно назвать такие:

1. Прогнозирование ситуаций, в которых действительно реабсорбция влияет на кинетические характеристики плазмы.
2. Выбор объектов (отдельные линии или фоторекомбинационные скачки), для которых необходимо учитывать излучение в кинетике.
3. Проблемы сходимости итераций.

Автором был разработан эффективный метод решения этой задачи. В процессе решения задачи выбираются участки профиля и перечень линий, для которых учитывается реабсорбция, причем с ростом числа итераций этот перечень может меняться. Критерием выбора является соотношение скоростей электронного и радиационного возбуждения, а также роль данной линии в общем балансе переноса.

Расчет уравнений кинетики совместно с уравнениями переноса излучения проводился для углеродной плазмы с характерным профилем от 2 до 40 эВ. Расчет показал, что учет реабсорбции важен для плазменных объектов с большими градиентами температур и плотностей и для ионов, представленных в широком диапазоне температур. Прежде всего это относится к резонансным линиям гелиоподобного иона $C5\ 1s^2 - 1s2p^1P$ и $1s^2 - 1s3p^1P$. Излучение из областей плазмы с температурой $T \approx 40$ эВ пришедшее в область 10-15 эВ дает значительно большую скорость возбуждения, чем электронная. Соответственно населенность уровней $2p$ и $3p$ значительно превосходят больцмановские величины. В некоторых ионах важны не только резонансные переходы. Так например, в литиеподобном ионе помимо переходов $2s-2p$ и $2s-3p$ необходимо учитывать переход $2p-3d$. В бериллиеподобном ионе кроме перехода $2s^{21}S - 2s2p^1P$ необходимо учитывать $2s2p^3P - 2p^23P$ и $2s2p^3P - 2s2p^3D$.

Вычисленные таким методом оптические свойства являются не только функцией T, ρ , но и всего поля излучения. Оптические свойства, вычисленные по схеме кинетика-перенос поступают в гидродинамический блок программ. Здесь самостоятельно решается задача: гидродинамика-перенос. Поскольку перенос излучения влияет на гидродинамические характеристики, то профиль T, ρ может несколько измениться. При этом также изменится картина переноса излучения, но влияние переноса на кинетику уже в основном учтено. Впрочем, эта задача может решаться итерационно.

Следует отметить, что совместное решение уравнений кинетики и переноса излучения представляет очень трудоемкую задачу, поэтому автором была создана модель кинетики с одномерным переносом, в то же время эти результаты можно использовать и для двумерной задачи гидродинамика-перенос.

Данная модель разрабатывалась для решения задач диверторной плазмы в токамаке в рамках международной программы ITER.