

К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СОУДАРЕНИЯ ЧАСТИЦ

К.И. Хадкевич, М.А. Сковородко

Полоцкий государственный университет имени Ефросинии Полоцкой,
Новополоцк, Беларусь

Рассматривается математическое моделирование процессов взаимодействия частиц в плазме с использованием модели упругого столкновения электрона с атомом. Приведены результаты компьютерной визуализации динамики соударений и передачи энергии между частицами.

Ключевые слова: математическое моделирование процессов в плазме, столкновения в плазме, упругие соударения.

Основная часть. Математическое моделирование процессов, происходящих в плазме, играет важную роль в современной науке, позволяя расширять сведения о поведении плазмы и получить более глубокую информацию о происходящих в ней процессах. Методы математического моделирования используются во многих процессах, в том числе и тех, где применяется плазма – при проектировании и прогнозировании явлений, происходящих в плазме, конструировании, расчетах и оптимизации плазменных источников и многое другое. Компьютерное моделирование на основе предложенных математических моделей позволяет уменьшить объем экспериментальных работ и снизить количество циклов исследовательских процессов. Таким образом, построение корректных математических моделей процессов, происходящих в плазме, является актуальной и востребованной задачей.

Рассмотрим упрощенную модель взаимодействия частиц на примере процесса столкновения электрона с атомом, используя в качестве приближенной модели – модель упругих шаров. Представим атом в виде неподвижного шара радиусом r и массой M , а электрон в виде материальной точки массой m . При соударении электрон отклоняется на угол θ , а атом приобретает скорость v_2 и движется вдоль линии центров масс, mv – вектор импульса или количества движения налетающего электрона; mv_1 – импульс электрона после упругого взаимодействия; Mv_2 – импульс нейтрального атома после столкновения; расстояние h называется прицельным параметром (рисунок 1) [1].

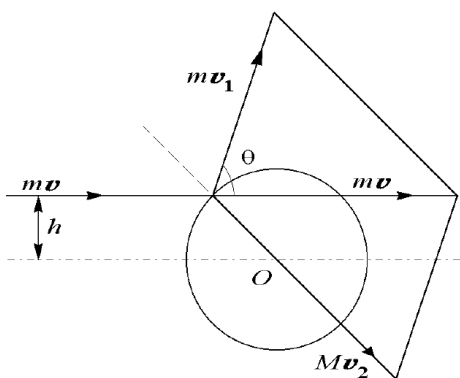


Рисунок 1. – Столкновение электрона с атомом в модели упругих шаров

В процессе соударения должен выполняться закон сохранения импульса и закон сохранения энергии (1). Важной характеристикой является то, какую часть своей кинетической энергии электрон отдает атому в упругом соударении [2]

$$mv = mv_1 \cos \theta + Mv_2 \sin \frac{\theta}{2}. \quad (1)$$

В, например, газоразрядной плазме, электроны, сталкиваясь с атомами, отклоняются на углы θ в пределах от 0 до π . В среднем каждый электрон отдает атому долю своей кинетической энергии K (2)

$$K = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{2m}{M} (1 - \cos \theta) d\theta = \frac{2m}{M}. \quad (2)$$

Средняя энергия электронов в газоразрядной плазме существенно превышает среднюю энергию тяжелых частиц.

Опираясь на представленные теоретические сведения, данную модель упругого столкновения визуализируем, применяя язык программирования Python с использованием библиотек для математических расчетов и графического отображения.

Данный программный продукт, позволяет наглядно представить и понять динамику взаимодействия электрона с атомом в плазме, демонстрирует, как после упругого соударения изменяются направления и величины импульсов обеих частиц, визуализируя ключевые аспекты передачи энергии и взаимодействия (рисунок 2).

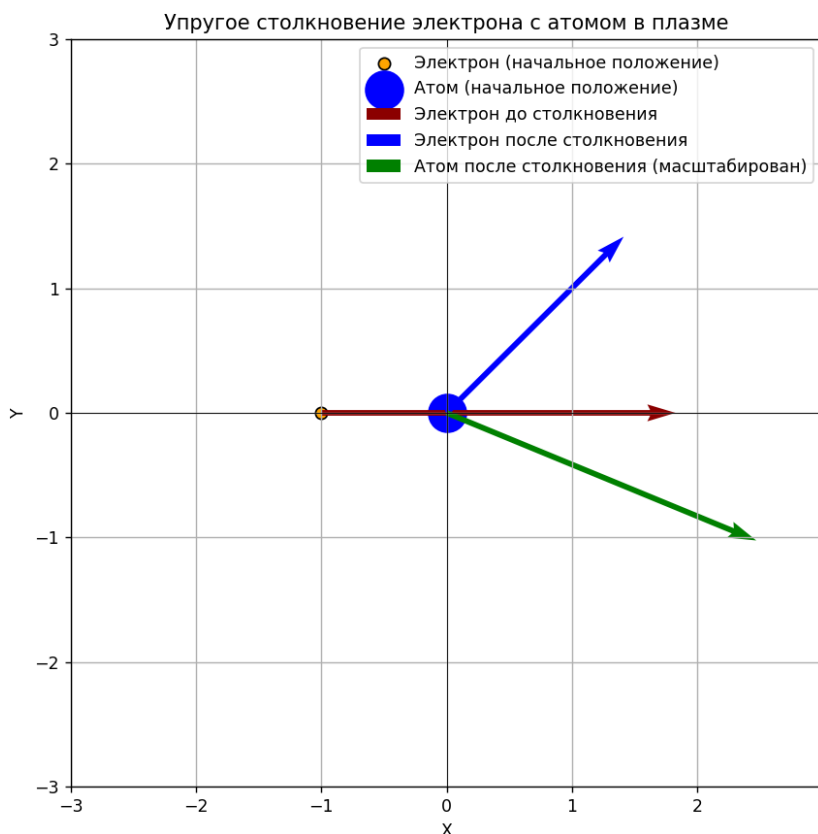


Рисунок 2. – Визуализация столкновения электрона с атомом в модели упругих шаров

Во время прохождения электрического тока через газ основная часть энергии, подводимой к разряду, преимущественно тратится на нагрев электронов. Электроны, в свою очередь, передают свою энергию атомам и молекулам через упругие столкновения, возбуждение колебательных и вращательных уровней молекул, а также возбуждение электронных уровней. Возбуждение электронных уровней требует довольно высокой энергии от электрона, в то время как возбуждение колебательных и вращательных уровней, хоть и является эффективным, присутствует только как канал потери энергии в молекулярных газах.

Таким образом, в атомарных газах основным механизмом потери энергии электронами является передача этой энергии атомам через упругие столкновения. Для того чтобы полностью передать свою энергию, электрону необходимо пройти через множество столкновений, что приводит к значительной разнице в температурах между электронами и атомами. С увеличением степени ионизации плазмы температурная разница между ее компонентами сокращается, поскольку частота столкновений возрастает. Высокие температуры тяжелых частиц, таких как атомы и ионы, характерны, например, для дуговых разрядов при атмосферном давлении, где степень ионизации газа составляет примерно 1 % или более.

Также стоит отметить, что при одинаковых электрических полях, приложенных к плазме, температура электронов в одноатомных газах, как правило, выше, чем в молекулярных. Это объясняется тем, что в благородных газах отсутствует механизм передачи энергии от электронов к колебательным и вращательным уровням молекул.

Эти различия в поведении плазмы и механизмах передачи энергии между электронами и атомами имеют важные практические последствия. В условиях низкого давления, когда ионизация газа незначительна, плазма ведет себя как практически идеальный газ, и разница температур между компонентами системы может быть значительной. Это явление важно учитывать при проектировании и эксплуатации плазменных установок, таких как плазменные экраны, плазменные реакторы и ионные двигатели.

Когда речь идет о контролируемом термоядерном синтезе, понимание механизмов обмена энергии между электронами и тяжелыми частицами становится особенно актуальным. В условиях термоядерного синтеза необходима высокая температура для достижения достаточной энергии столкновения, чтобы ионы могли преодолеть кулоновское отталкивание. Поэтому эффективное возбуждение атомов и ионов является критическим моментом для успешного поддержания реакции синтеза.

Сложные модели плазмы, которые учитывают различные физические процессы, такие как столкновения, излучение, конвекция и магнитные поля, становятся необходимыми для прогнозирования поведения плазмы в реальных условиях. Современные вычислительные методы позволяют учёным создавать детализированные трехмерные модели, которые учитывают геометрию установки и физику процессов, происходящих в плазме. Такие модели могут включать уравнения Навье-Стокса для описания течений плазмы, уравнения Больцмана для описания распределения частиц и уравнения Максвелла для описания электромагнитных полей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Королёв Ю.Д., Элементарные и кинетические процессы в газоразрядной плазме: учеб. пособие / Ю. Д. Королёв; Томский политехнический университет.— Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. — 128 с.
2. Александров А.Ф., Основы электродинамики плазмы : учеб. для физ. спец. ун-тов / А.Ф. Александров, Л.С. Богданкевич, А.А. Рухадзе; под ред. А.А. Рухадзе. — 2-е изд., перераб. и доп. —М.: Высш. шк., 1988. — 424с.: ил.