

НЕЭРГОДИЧНОСТЬ КУЛОНОВСКОЙ ПЛАЗМЫ И ГИПОТЕЗА О ПРИРОДЕ ШАРОВОЙ МОЛНИИ

С. А. Майоров, А. Н. Ткачев, С. И. Яковленко

Показано, что последние исследования по неэргодичности классической кулоновской плазмы дают возможность объяснить отсутствие (или аномальное замедление) рекомбинации в плазме шаровой молнии.

Многие свойства шаровой молнии можно объяснить, если считать основой ее вещества переохлажденную (неидеальную) плазму. Основной трудностью плазменных моделей является то, что шаровая молния может существовать десятки и сотни секунд, в то время как плазма с требующимися параметрами должна была бы рекомбинировать за очень короткие времена (< 1 нс). Для устранения этой трудности И. П. Стахановым была выдвинута гипотеза о задержке рекомбинации из-за сольватации ионов: молекулы воды облепляют ионы плазмы и не дают им сблизиться до расстояний, на которых рекомбинация происходит эффективно /1/. Однако для замедления рекомбинации в 10^{12} — 10^{14} раз необходимо, чтобы сольватная оболочка представляла собой сплошной барьер, толщиной в несколько ангстрем, почти непроницаемый для электронных волновых функций /2/. Трактовка сольватной оболочки как непроницаемого барьера вызывает сомнение, а проведенные за последние годы исследования фундаментальных свойств кулоновской плазмы /3, 4/ позволяют объяснить существование шаровой молнии принципиально другими причинами.

Методами компьютерного моделирования из первых принципов /3/ и путем аналитического рассмотрения /4/ выявлено, что классическая кулоновская плазма имеет устойчивое по отношению к рекомбинации состояние. Наличие этого состояния обусловлено неэргодичностью классической кулоновской плазмы, вследствие чего она не релаксирует к состоянию, задаваемому микроканоническим распределением. При этом в кинетическом уравнении, описывающем диффузию заряженной частицы по энергетической оси, для частиц с отрицательной полной энергией ($\epsilon < 0$) и энергией близкой к нулю ($|\epsilon| \lesssim e^2 N_i^{1/3}$, N_i — плотность ионов) нарушается соотношение детального баланса кинетических коэффициентов. Соотношение между коэффициентами диффузии и подвижности (по энергетической оси) оказывается таким, что за счет взаимодействия с плазменными микрополями возникает мощный дрейф из области отрицательных в область положительных энергий. В результате функция распределения частиц в отрицательной

области энергий имеет резкий экспоненциальный спад $\propto \exp(-0,32|\epsilon|/e^2N_i^{1/3})$, где $|\epsilon|$ — энергия связи ионов. Поэтому ионы проникают в эту область лишь на глубину, меньшую характерной энергии кулоновского взаимодействия ($\epsilon > -e^2N_i^{1/3}$).

Исходя из этих результатов, можно попытаться связать факт существования шаровой молнии с тем, что в ее плазме реализуется выявленное в работах /3, 4/ стационарное состояние. При этом плазма шаровой молнии является, по-видимому, не электрон-ионной, а ион-ионной; соответственно в ней легко выполняется условие классичности движения кулоновских центров, существенно использованное в /3, 4/.

Усредненные по объему параметры шаровой молнии можно оценить /2/, исходя из ее радиуса $R \sim 10$ см и запасенной энергии $W \sim 10^4$ Дж. Полагая, что на акт рекомбинации выделяется энергия $\epsilon_r \sim 10$ эВ получаем, что плотность ионов $N_i = W/(4\pi R^3 \epsilon_r / 3) \sim 10^{18}$ см $^{-3}$. Различные оценки приводят к тому, что средняя температура плазмы должна быть сравнительно низкой, $T \sim 0,03$ — 0,3 эВ. В этом случае потери на излучение низки и шаровая молния может существовать достаточно долго. Кроме того, при $N_i \sim 10^{18}$ см $^{-3}$ и $T \lesssim 0,3$ эВ плазма является неидеальной и кулоновские силы могут обеспечить шарообразную форму плазменного сгустка.

В отрицательной области энергий функция распределения имеет резкий экспоненциальный спад /3, 4/. Например, при энергии связи ионов $|\epsilon| \approx 1$ эВ, что соответствует расстоянию между кулоновскими центрами $r \sim 5$ Å, функция распределения спадает более чем на 14 порядков. Следовательно, даже если бы все разноименные частицы, находящиеся близко друг к другу, мгновенно рекомбинировали (за счет каких-либо квантовых эффектов, неучтенных в /3, 4/), то и в этом случае замедление рекомбинации было бы достаточным, чтобы объяснить факт существования шаровой молнии. Более строгая оценка подтверждает этот вывод — рекомбинация замедляется в $10 \exp(-0,32\epsilon_0/e^2N_i^{1/3})$ раз, где ϵ_0 — энергия связи, при которой имеет место мгновенная рекомбинация за счет неучтенных в /3, 4/ эффектов.

Проведенное выше рассмотрение, так же как и результаты /3, 4/, применимо для полностью ионизованной плазмы. Вопрос же о том, может ли вещество шаровой молнии быть ионизованным не полностью и, соответственно, о существовании в такой плазме стационарного состояния пока остается открытым. Компьютерное моделирование показало, что при наличии достаточно мощного внешнего стохастического воздействия рекомбинация в полностью ионизованной плазме имеет место и происходит в количественном согласии с имеющимися теоретическими представлениями /5/. Газ нейтральных частиц, в принципе, может играть роль стимулирующего рекомбинацию стохастизатора.

На нынешнем этапе исследований неизвестно, каким требованиям должен удовлетворять внешний стохастизатор для того, чтобы началась объемная рекомбинация. Предварительные численные эксперименты показали, что не всякая (даже интенсивная) стохастизация стимулирует

рекомбинационный процесс. Недостаточно, например, упругих столкновений с бесконечно тяжелыми частицами. Кроме того, последние расчеты показывают, что для стимуляции рекомбинационного процесса стохастическое воздействие на неидеальную плазму должно быть более интенсивным, чем на идеальную.

В заключение отметим, что цель этой заметки не в построении модели шаровой молнии, а в устранении основной трудности, характерной практически для всех плазменных моделей шаровой молнии. Конкретные модели должны строиться на основе воспроизводимого материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стаханов И. П. Письма в ЖЭТФ, 18, 193 (1973).
2. Гудзенко Л. И., Держиев В. И., Яковленко С. И. Труды ФИАН, 120, 50 (1980).
3. Майоров С. А., Ткачев А. Н., Яковленко С. И. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 2, 6 (1990); Препринт ИОФАН № 36, М., 1990.
4. Майоров С. А., Ткачев А. Н., Яковленко С. И. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 10, 3 (1990); № 10, 18 (1990).
5. Майоров С. А., Ткачев А. Н., Яковленко С. И. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 5, 20 (1990).

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 16 сентября 1991 г.