

РЕЛАКСАЦИЯ ЭНЕРГОИЗОЛИРОВАННОЙ КУЛОНОВСКОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ СТОХАСТИЗИРУЮЩЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ

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

Методом динамики многих частиц исследована релаксация кулоновской плазмы, подвергающейся внешнему стохастическому воздействию, не меняющему полной энергии системы. Показано, что такое воздействие может стимулировать релаксацию энергетического спектра.

Исследование фундаментальных свойств кулоновской плазмы путем численного моделирования динамики многих частиц (ДМЧ) привело к неожиданным результатам /1–3/. Было показано, что система кулоновских частиц, помещенных в энергоизолирующую оболочку, не является вполне эргодической системой. Такая система оказалась устойчивой по отношению к рекомбинации. Точнее говоря, в этих условиях устанавливается равный нулю (или близкий к нулю) поток электронов по энергетической оси. При этом функция распределения по полной энергии качественно отличается от больцмановской, хотя функция распределения по кинетической энергии является максвелловской /1, 2/.

Эти численные результаты можно описать аналитически /4, 5/, если отказаться от эргодической гипотезы, а вместе с тем и от принципа детального баланса для энергоизолированной кулоновской плазмы. В то же время, численное моделирование показало, что кулоновская плазма, помещенная не в энергоизолирующую, а в термостатирующую оболочку, объемно рекомбинирует с характерными временами, соответствующими имеющимся теоретическим представлениям /3/. На основании этих данных сделан вывод, что термостат играет роль внешнего "стохастизатора", без которого для кулоновской плазмы невозможно выполнение эргодической гипотезы. В настоящей работе рассмотрено влияние различных стохастизирующих воздействий, оставляющих неизменной полную энергию системы.

Как и в работах /1–3/, решались уравнения Ньютона для n электронов и n протонов, помещенных в куб с длиной ребра α , такой, что $N_e = N_i = n/\alpha^3$ — плотность электронов и ионов. Основное отличие от расчетов /1, 2/ состояло в том, что система подвергалась стохастическому воздействию, которое в отличие от работы /3/ было таким, что полная энергия системы не менялась.

Были предприняты численные эксперименты со стохастизацией направлений скоростей. В одной серии расчетов отражение частиц от стенки полагалось диффузным: модуль скорости сохранялся, но направление внутрь куба выбиралось случайным. В другой серии расчетов частицы,

пролетев некоторое расстояние, мгновенно меняли направление скорости на произвольное, сохраняя модуль скорости. Длина пролета частицы до изменения направления скорости определялась законом Пуассона. Такие расчеты в какой-то мере моделируют упругие столкновения с бесконечно тяжелыми жесткими нейтральными частицами.

Результаты этих серий расчетов совпали с аналогичными результатами, полученными в [1, 2]: формировались такие же функции распределения электронов по полной энергии; рекомбинация не имела места. Такой результат не является неожиданным, поскольку хаотизация направлений скоростей может облегчить лишь формирование максвелловского распределения, которое хорошо устанавливается и без дополнительной стохастизации. По-видимому, для того, чтобы имела место релаксация электронов по энергетической оси необходимо воздействие стохастизатора, перемешивающего энергии подсистем микроканонического ансамбля.

В связи с этим был поставлен следующий численный эксперимент. Через некоторые временные интервалы скорости различных частиц перераспределялись: скорость одной частицы передавалась другой частице, скорость этой другой частицы — третьей и т.д. При этом координаты их не изменялись. Очевидно, что при такой перестановке скоростей при неизменном положении частиц полная энергия системы не меняется, но меняется полная энергия отдельных частиц.

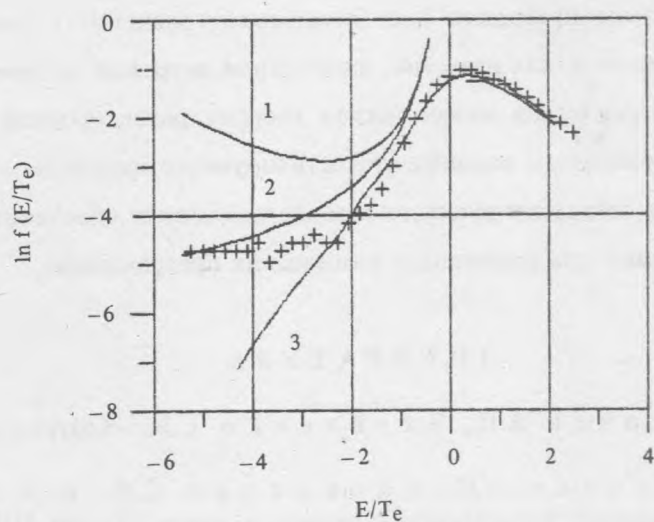


Рис. 1. Функция распределения электронов плазмы водорода по полной энергии при наличии перемешивания полных энергий электронов (маркеры). Параметры плазмы и расчета: $N_e = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $T_0 = 0,2 \text{ эВ}$, $T_e = 0,35 \text{ эВ}$, $n = 512$, время наблюдения $t = 50\tau_{ei}$. Сплошные кривые: 1 — распределение Больцмана, 2 — рекомбинационное распределение, 3 — распределение электронов по полной энергии в ДМЧ-расчете без наличия стохастизирующего воздействия.

При такой стохастизации, в отличие от стохастизации по направлениям скоростей, характеристики кулоновской плазмы несколько изменились. Однако и в этом случае не устанавливался отличный от нуля квазистационарный рекомбинационный поток. Установившаяся

при наличии стохастизирующего воздействия функция распределения несколько отличается от функции, получаемой в отсутствие стохастизации (рис. 1): в отрицательной области энергий она ближе к рекомбинационному распределению $f_{FP}(E) = f_B(E) [1 - \xi(|E|/T_e)]$, получаемому из решения уравнения Фоккера — Планка с коэффициентами, удовлетворяющими принципу

детального баланса. Здесь $f_B(E)$ — больцмановское распределение; $\xi(x) = (4/3\pi^{1/2}) \int_0^x z^{3/2} \exp(-z) dz$.

Как и в отсутствие перемешивания электронов по полной энергии, заполнения электронами области $E < -4T_e$ практически не происходит. Соответственно устанавливается некоторое стационарное количество электронов в отрицательной области и дальнейшая рекомбинация останавливается. Формирование функции распределения в диапазоне $-4 < E/T_e < -1$ происходит за время $t \sim (15-20) \cdot \tau_{ei}$, где τ_{ei} — среднее время пролета электроном межионного расстояния; в дальнейшем функция распределения не изменяется.

Из представленных в данной работе и предшествовавших им [1-3] результатов можно сделать следующие выводы.

1. Модель классически двигающихся частиц, не обменивающихся энергией с оболочкой и не подвергающихся внешнему стохастическому воздействию, в общем случае не описывает релаксацию к микроканоническому распределению. Точное следование движения частиц законам классической механики может приводить (как показывают расчеты) к запрету на химические превращения, сопровождающиеся, как известно, изменением энтропии системы.

2. Для того, чтобы классическая механическая система релаксировала к термодинамически равновесному состоянию, необходимо внешнее стохастизирующее воздействие.

3. Не всякий механизм стохастизирующего воздействия может обеспечить достаточный поток энтропии в систему, требуемый для реализации химических превращений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Майоров С.А., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. Краткие сообщения по физике ФИАН, №2, 6 (1990).
2. Майоров С.А., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. В сб. Методы исследования спектральных и релаксационных характеристик атомов и ионов. Труды НПО ВНИИФТРИ, М., 1990, с. 35-54.
3. Майоров С.А., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. Краткие сообщения по физике ФИАН, №5, 20 (1990).
4. Майоров С.А., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. Краткие сообщения по физике ФИАН, №10, 3 (1990).
5. Майоров С.А., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. Краткие сообщения по физике ФИАН, №10, 18 (1990).