

О «метастабильной» плазме

С.Н.Андреев, А.А.Рухадзе, А.А.Самохин

Обращено внимание на недостаточную обоснованность ряда выводов недавней работы (А.Н.Ткачев, С.И. Яковленко. «Квантовая электроника», т.30, с.1077 (2000)), касающихся основных положений статистической физики.

Ключевые слова: метастабильные состояния, рекомбинация, энтропия, плазма..

Авторы недавней статьи [1] утверждают, что работу [2] можно рассматривать как первую экспериментальную демонстрацию метастабильного состояния переохлажденной плазмы, предсказанного ими ранее теоретически. На наш взгляд, подобное утверждение не является достаточно обоснованным по причинам, которые уже частично обсуждались в работе [3]. В [3] было указано, что теоретическая интерпретация упоминаемых в [1] численных экспериментов вовсе не требует отказа от принципа детального равновесия и радикального пересмотра других основ физической кинетики и статистической механики.

Напомним в связи с этим, что сам по себе факт существования различных метастабильных состояний хорошо известен [4] и не дает оснований для ревизии основных принципов статистической физики или квантовой механики. Фазовые переходы и метастабильные состояния в неидеальной плазме исследовались различными авторами во многих работах (см., напр., [5–8] и цитируемую там литературу). В статье [8], в частности, «обсуждается природа аномально большого времени жизни конденсированного возбужденного состояния для высоких уровней возбуждения» за счет коллективного подавления рекомбинации.

Авторы [1] в своих публикациях не ссылаются на исследование [5–8], а под «метастабильностью» фактически подразумевают уменьшение скорости рекомбинации по сравнению с той скоростью, которая определяется известной формулой для тройной рекомбинации [9]. О моделировании рекомбинации плазмы с параметрами, соответствующими условиям эксперимента [2], ими не только ранее не сообщалось, но вместо этого подчеркивалось, что для наблюдения задержки рекомбинации естественно обратиться к рассмотрению системы зарядов из тяжелых частиц, поскольку для электрон-ионной плазмы наблюдение подобных эффектов проблематично.

Между тем для заряженных частиц с близкими массами становится существенным влияние упруго отражающих стенок, ограничивающих разлет плазмы в условиях модели [1], когда длина свободного пробега частиц

относительно объемных процессов оказывается сравнимой с расстоянием между стенками или больше него.

На это обстоятельство обращено внимание в работе [3], где было показано, что взаимодействие пары кулоновских частиц со стенками приводит к такому распределению по их полной энергии в системе центра масс, которое соответствует микроканоническому ансамблю и существенно отличается от больцмановского распределения. Добавим к этому, что распределение частиц по их кинетической энергии в лабораторной системе координат напоминает максвелловскую функцию. Релаксация к равновесию в таком ансамбле происходит в основном за время порядка десяти соударений со стенками, причем в ходе этой релаксации преобладающими могут оказаться рекомбинация или ионизация, в зависимости от вида начального неравновесного распределения.

Из этих результатов следует, что при интерпретации поведения совокупности частиц в ограниченном объеме необходимо адекватно учитывать роль отражающих стенок, которые могут влиять как на релаксацию среды, так и на вид равновесного распределения. Без такого учета объяснение данных численного моделирования в рамках общепринятых основ статистической механики действительно может вызвать затруднения. С таким трудностями, на наш взгляд, и столкнулись авторы [1] в своих предыдущих работах, где «метастабильное состояние» связывается только с объемными процессами, без указания соответствующей стабильной фазы, равновесной в данных условиях ограниченного объема с зеркально отражающими стенками, и без определения ее критических зародышей (гетерофазных флуктуаций), которые являются динамически неустойчивыми в объеме метастабильной фазы.

Утверждение авторов [1] о том, что «экспоненциальный спад распределения электронов по полной энергии в области больших отрицательных энергий и приводит к существенному замедлению рекомбинации», представляется странным, т. к в начальный момент эта функция распределения в данной области вообще полагается равной нулю. Ссылки на известную для изолированных систем инвариантность гиббсовской энтропии (среднего логарифма полной функции распределения), которая якобы препятствует рекомбинации, или на то, что точка зрения, изложенная в [1], поддержана в работе [10], также не являются убедительными, поскольку оставляют открытым вопрос о том, почему подобные аргументы не

действуют во всех других известных случаях фазовых переходов или метастабильности.

В экспериментальной работе [2] о «метастабильности» ничего не говорится, но подчеркивается, что наблюдаемые большие времена жизни полученной ультрахолодной плазмы «являются первым ясным указанием» на неприменимость теории тройной рекомбинации и ее обобщения [11] на условия эксперимента [2]. В связи с этим необходимо отметить то оставленное без внимания в [1, 2] существенное обстоятельство, что для приведенных в [1, 2] параметров плазмы формула тройной рекомбинации из работы [9] изначально непригодна, т. к. дает такие времена рекомбинации, например 0.5 фс и 2 нс, за которые электроны успевают пройти лишь малую часть расстояния между ионами.

Отсюда также очевидно, что при низкой температуре использование формулы тройной рекомбинации за пределами ее формальной применимости дает завышенные скорости рекомбинации по сравнению с теми меньшими скоростями, которые в подобных условиях должны следовать из эксперимента или корректной теории. В таком случае вряд ли целесообразно приписывать такому «замедлению» рекомбинации какой-либо особый физический смысл, поскольку этот «эффект» связан с нарушением тех приближений и допущений, которые делаются при выводе соответствующих формул. К сожалению, авторы [1] не только не обозначают теоретические пределы применимости формулы из книги [9] для тройной рекомбинации, но и вообще не обращают внимания на их существование, используя эту формулу далеко за пределами ее физического смысла и не отличая этот случай от того, что ими рассматривалось ранее.

Изложенные выше замечания не исключают, разумеется, возможности результативного использования численных решений уравнений Ньютона для системы кулоновских частиц как для анализа методических вопросов, так и для сопоставления с соответствующими экспериментальными данными. В частности, соответствие ре-

зультатов численного моделирования [1] указанному в [2] времени жизни плазменного сгустка в данном случае не противоречит возможности классического описания некоторых свойств плазмы. В то же время влияние излучения в модели классических частиц, которое в [1] не учитывается, может существенно изменить форму их траекторий [12] и все связанные с этим обстоятельством выводы.

Различные подходы, основанные на классической модели кулоновской плазмы, имеют свою область применимости и свои ограничения, которые необходимо корректно учитывать при интерпретации результатов численного моделирования, чтобы без необходимости не прибегать к ревизии основных положений статистической физики.

Авторы выражают благодарность А.М.Игнатову и сотрудникам теоретического отдела ИОФ РАН за полезные обсуждения.

1. Ткачев А.Н., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **30**, 1077 (2000).
2. Killian T.C., Kulin S., Bergeson S.D., Orozco S.D., Orzel C., Rolston S.L. *Phys.Rev.Letts*, **83**, 4776 (1999).
3. Игнатов А.М., Коротченко А.И., Макаров В.П., Рухадзе А.А., Самохин А.А. *УФН*, **165**, 113 (1995).
4. *Физический энциклопедический словарь* (М., «Советская энциклопедия», 1983).
5. Биберман Л.М., Норман Г.Э. *Теплофизика высоких температур*, **7**, 822 (1969).
6. Норман Г.Э. *Хим.физика*, **18**, 78 (1999); Norman G.E. *Contrib. Plasma Phys.*, **41**, 127 (2001).
7. Манькин Э.А., Ожован М.И., Полуэктов П.П. *ЖЭТФ*, **84**, 442 (1983).
8. Манькин Э.А., Ожован М.И., Полуэктов П.П. *Хим.физика*, **18**, 87 (1999).
9. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. *Физическая кинетика* (М., Наука, 1979).
10. Кадомцев Б.Б. *Динамика и информация* (М., изд-е редакции журнала «Успехи физических наук», 1997).
11. Hahn Y. *Phys.Letts A*, **231**, 82 (1997).
12. Герценштейн М.Е., Кравцов Ю.А. *ЖЭТФ*, **118**, 761 (2000).

ПОПРАВКА

Н.В.Кравцов, Е.Г.Ларионов, Н.И.Наумкин, С.С.Сидоров, В.В.Фирсов, С.Н.Чекина. Влияние магнитного поля на автомодуляционные колебания в кольцевом чип-лазере («Квантовая электроника», 2001, т. 31, № 7, с. 649–652).

В статье допущена следующая опечатка: на рис.4 (с.652) размерность по оси ординат должна быть 10^{-7} Гц $^{-1}$ (вместо 10^{-7} кГц $^{-1}$).

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, т. 31, № 9, 2001

Научные редакторы Н.В.Кравцов, Б.Ф.Полковников, А.С.Семёнов

Редакторы М.Л.Гартаницкая, Т.А.Рештакова

Редакторы – операторы ЭВМ М.Б.Балакирева, Т.С.Волохова, А.И.Корнилова, Б.Ф.Полковников

Формат 60 × 88/8. Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Усл.печ.л. 11.76. Уч.-изд.л. 12.55. Тираж 430 экз. Цена 120 руб. Индекс подписки Роспечати 70470. Издательский № 24293. Заказ № 1990

Набрано и сверстано с использованием редакционно-издательской системы *3B2 Total Publishing System* фирмы «Адвент» («Advent», Суиндон, Великобритания). Отпечатано в ППП «Типография «Наука», 121099 Москва, Шубинский пер., д. 6