

стабильными состояниями при фазовых переходах первого рода, отраженная в аннотации и названии статьи, но практически не развитая в основном тексте, порождает больше вопросов, чем ответов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность участникам семинаров отдела физики плазмы и теоретического отдела ИОФРАН за полезные стимулирующие дискуссии.

Список литературы

1. Майоров С А, Ткачев А Н, Яковленко С И *УФН* **164** 297 (1994)
2. Яковленко С И *Препринт ИОФАН* № 51, 1991.
3. Майоров С А, Ткачев А Н, Яковленко С И *Иzv. вузов. Сер. Физика* (11), 5 (1991); *ibidem* (2) 10 (1992); *ibidem* (11) 76 (1992); *ibidem* (1) 68 (1993)
4. Майоров С А, Ткачев А Н, Яковленко С И *Мат. моделирование* **4** (7) 3 (1992)
5. *Физический энциклопедический словарь* (Под ред. А.М. Прохорова) (М.: "Советская энциклопедия", 1983)
6. Исихара А *Статистическая физика* (М.: Мир, 1973)
7. Жидков А Г, Галеев Р Х *Физика плазмы* **19** 1181 (1993)

ON THE INTERPRETATION OF A COMPUTER EXPERIMENT WITH CLASSICAL COULOMB PLASMA

A M Ignatov, V P Korotchenko, V P Makarov, A A Rukhadze, A A Samokhin

General Physics Institute Russian Academy of Sciences, ul. Vavilova, 38, Moscow, 117942 Russia

Tel: (7-095) 135 02 47

E-mail: aign@ewr.gpi.su

The conclusions on the violations of some of the basic principles of statistical mechanics and physical kinetics — reported by Mayorov, Tkachev, and Yakovlenko (thereafter referred to as MTY) in *Usp. Fiz. Nauk* **164** (3) 297 (1994) [*Physics–Uspekhi* 62 (3) 276 (1994)] — are shown to be insufficiently substantiated. MTY have drawn these conclusions from the results of their computer experiment with a classical Coulomb plasma; however, these data are found to admit an alternative interpretation. The alleged necessity to reject the detailed balancing principle is shown not to be an inevitable consequence of the MTY simulation results; this necessity is also discarded by the microscopic process analysis in the present study. Contrary to the MTY implicit assumption, the behaviour of the considered plasma is substantially dependent on near-wall phenomena. A limiting case of the considered system (two opposite charge-sign particles confined in a closed space) is analyzed: the particle collisions with perfect-reflector walls are found to make the system behaviour ergodic and to lead to a distribution function sloping down in the domain of negative center-of-mass energies.

PACS numbers: 52.20. –j, 52.25.Jm

Received 8 August, revised 30 November 1994

Комментарий к статье

А.М. Игнатова, А.И. Коротченко, В.П. Макарова, А.А. Рухадзе, А.А. Самохина "Об интерпретации вычислительного эксперимента с классической кулоновской плазмой"

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

Об ошибочности новой интерпретации. Основное содержание комментируемой статьи Игнатова и др. состоит в том, что в ней дана новая интерпретация той части результатов наших вычислительных экспериментов, которая изложена в основном в работе [1] и кратко описана в обзоре [2]. Мы обнаружили замедление рекомбинационной релаксации в системе большого числа кулоновских частиц (~1000), помещенной в трехмерный ящик с зеркально отражающими (абсолютно упругими) стенками. Авторы комментируемой статьи объясняют этот эффект "ионизацией" связанных частиц на стенках. По их мысли, при столкновении со стенкой идет ионизация за счет перераспределения полной энергии пары частиц между энергией их движения как целого и энергией связи пары.

Эта интерпретация ошибочна.

1. Для обсуждаемых результатов наших вычислительных экспериментов указанный эффект очень слаб. Действительно, в рассматриваемом случае эффекты неинерциальности при отражении связанных частиц от стенок пренебрежимо малы ввиду большого различия массы электрона и протона (напомним, что мы моделировали динамику частиц с реальными массами). Слабость обсуждаемых эффектов следует из простых оценок. Кроме того, мы это проверяли и прямым моделированием. Ясно, что в случае бесконечной массы иона указанные эффекты вообще отсутствуют. Расчеты же, проведенные нами в предположении бесконечно большой массы иона, как и следовало ожидать, дали функции распределения электронов практически не отличающиеся от случая ионов с массой протона.

2. В рассматривавшейся нами переохлажденной плазме (начальные условия соответствуют низкой температуре и полной ионизации), согласно принятым представлениям, любой обратимый на микроскопических временах обмен энергией между поступательными и ионизационными степенями свободы должен приводить не к ионизации, как полагают авторы комментируемой статьи, а к противоположному эффекту — преимущественной рекомбинации. Это тоже непосредственно

проверялось нами в вычислительных экспериментах. В случае частиц с равной массой функция распределения по полной энергии приближалась к рекомбинационной (как и следовало ожидать, увеличивалось количество связанных электронов по сравнению с аналогичными условиями в электрон-ионной плазме). Результаты моделирования динамики многих частиц с равной массой и обсуждение эффектов, обусловленных неинерциальностью системы центра инерции при отражении от стенки можно найти в работе [3].

Итак, замедление рекомбинационной релаксации в наших условиях нельзя связать с высказанным Игнатовым и др. предположением о деформации распределения связанных электронов за счет отражения частиц от абсолютно упругих стенок.

Другие неверные утверждения. Следует также отметить, что в статье Игнатова и др. имеется еще целый ряд существенных неточностей как в понимании процесса тройной рекомбинации, так и в пересказе результатов работ других авторов. Создается, в частности, впечатление, что авторы комментируемой статьи изучали наши результаты не столько по научным работам, приведенным в списке литературы обзора [2], сколько по научно-популярной литературе, ими упоминаемой. Приведем лишь некоторые примеры.

1. Как следует из пункта 3 обсуждаемой статьи, ее авторы не поняли, что время установления рекомбинационной релаксации (установления распределения в "горлышке стока") много меньше времени рекомбинации (времени перетекания основного количества электронов через "горлышко стока") и, проведя неадекватное сопоставление времен в табл. 1, сделали неверный вывод о недостаточности времени счета. Это особенно удивительно в связи с тем, что в работе [1] (процитированной под тем же номером в обзоре [2]) данный вопрос детально разобран. Там же проведено сравнение характерных времен рекомбинационной релаксации и времен счета; все эти времена, как и параметры расчетов, приведены в таблицах. Да и в обсуждаемом Игнатовым и др. обзоре [2] несоответствие времен релаксации, полученных из моделирования и вытекающих из традиционной теории, убедительно демонстрирует рис. 1, взятый из работы [4].

2. В том же пункте 3 комментируемой статьи авторы справедливо утверждают, что для выявления природы характерного времени t_{ei} надо определить время расщепления корреляций. Именно это и было сделано нами в работе [5] на основании, в частности, анализа корреляционных функций плазменных микрополей и потенциальных энергий электронов и ионов. Прямая ссылка на эту работу дана в обзоре [2] на с. 299, где это время вводится.

3. В п. 4 комментируемой статьи авторы используют результат своего рассмотрения двумерного случая двух частиц с одинаковой массой для интерпретации наших результатов, что вызывает удивление. И без численных расчетов ясно, что для двух энергоизолированных частиц равновесное распределение не будет больцмановским. Это не зависит от того, стеночный или какой-нибудь другой механизм вызывает релаксацию к равновесию.

Распределение же для "ансамбля из большого числа невзаимодействующих между собою пар", обсуждаемое авторами, на самом деле радикально отличается от равновесного распределения для уже хотя бы десятка частиц.

Вопрос о том, начиная со скольких частиц равновесное распределение для моделируемых нами условий будет близко к больцмановскому, довольно подробно обсужден в Приложении нашей работы [1]. Надо, кстати, напомнить, что мы наиболее детально сопоставляем результаты моделирования не с больцмановским распределением, а с рекомбинационным, т.е. с тем, которое следует из традиционной теории рекомбинации, основанной на принципе детального баланса в обычной формулировке.

4. В конце п.4 Игнатов и др. утверждают, что в заметке [6] сделан вывод, аналогичный нашему, относительно сохранения динамической памяти в системе многих кулоновских частиц. На самом же деле там сделано диаметрально противоположное утверждение о том, что рассматриваемое "движение неустойчиво по Ляпунову, а следовательно, стохастично" [6]. Кстати, это утверждение получено в [6] на основе ошибочного анализа характера движения динамической системы (подробнее см. [7]).

5. В сноске к п. 4 авторы приписывают нам заведомо ошибочное утверждение о том, что равновесие газа со стенкой имеет место при разных стеночной и газовой температурах. В наших работах сделано другое утверждение. Мы пишем (см., например, [1, с. 11 и 8, с. 9]), что при неупругом отражении частиц от стенок (такие вычислительные эксперименты нами также проводились) нарушается равновесие и поэтому максвелловость распределения надо независимо контролировать (что и делалось в расчетах). Факт нарушения равновесия при выбранном нами законе отражения проиллюстрирован тем, что в этом случае равенство энергетических потоков со стенки и на стенку имеет место при различающейся стеночной и газовой температурах.

На других неточностях обсуждаемой статьи нет возможности останавливаться, читатель может сам установить истинное положение дел, ознакомившись с нашими работами.

Список литературы

1. Майоров С А, Ткачев А Н, Яковленко С И *Изв. вузов. Сер. Физика* **34** (11) 3 (1991)
2. Майоров С А, Ткачев А Н, Яковленко С И *УФН* **164** (3) 297 (1994)
3. Майоров С А, Яковленко С И *Изв. вузов. Сер. Физика* **37** (11) 44 (1994)
4. Ткачев А Н, Яковленко С И *Изв. вузов. Сер. Физика* **37** (9) 3 (1994)
5. Майоров С А, Ткачев А Н, Яковленко С И *Изв. вузов. Сер. Физика* **35** (2) 10 (1992)
6. Жидков А Г, Галеев Р Х *Физика плазмы* **19** (9) 1181 (1993)
7. Майоров С А, Ткачев А Н, Яковленко С И *Изв. вузов. Сер. Физика* **37** (8) 127 (1994); *Физика плазмы* **20** (12) 1107 (1994)
8. Майоров С А, Ткачев А Н, Яковленко С И *Математическое моделирование* **4** (7) 3 (1992)