

# ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИМЕНИМОСТИ НЬЮТОНОВСКОГО ОПИСАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ В ГАЗЕ ВСЛЕДСТВИЕ СПОНТАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ФОТОНОВ

*М. Е. Герценштейн*

*Научно-исследовательский институт ядерной физики  
Московского университета им. М. В. Ломоносова  
119899, Москва, Россия*

*Ю. А. Кравцов\**

*Институт космических исследований Российской академии наук  
117810, Москва, Россия  
Space Research Center, Polish Academy of Sciences  
00716, Warsaw, Poland*

Поступила в редакцию 28 марта 2000 г.

Показано, что спонтанное излучение низкочастотных фотонов, сопровождающее соударения атомов и молекул в газе, весьма быстро, буквально за несколько интервалов свободного пробега, радикально меняет форму траекторий и порядок соударений частиц по сравнению с предсказаниями уравнений классической механики.

PACS: 05.40.-a

Модель абсолютного упругого взаимодействия молекул в газе настолько глубоко укоренилась в классической теории, что обсуждение вопроса о пределах предсказуемости этой модели может показаться неуместным. Между тем классическая теория отражает далеко не все свойства реальных атомов и молекул, состоящих из заряженных частиц, и не может претендовать на универсальное описание поведения системы атомов и молекул. В частности, классическая модель соударений полностью пренебрегает квантовомеханическим расщеплением волновых пакетов, связанных с частицами [1–4], игнорирует способность частиц поляризоваться во внешнем электромагнитном поле (радикальные изменения траекторий частиц под действием теплового электромагнитного поля были описаны в работе [5]) и, наконец, не допускает излучения электромагнитных волн сталкивающимися частицами. На последнее ограничение было обращено внимание в работах [6–8], где обсуждался вопрос об излучении низкочастотных фотонов в газе при умеренных температурах.

Ясно, что перечисленные выше эффекты (квантовомеханическое расщепление волновых пакетов, воздействие теплового электромагнитного поля и квантовое излучение низкочастотных фотонов) в конце концов приведут к нарушению закономерностей, диктуемых классической механикой, что делает актуальными оценки времени, в течение которого система еще подчиняется классическому описанию.

Данная работа посвящена анализу влияния излучения низкочастотных фотонов на траектории сталкивающихся молекул газа («фотонный механизм» возмущения траекторий). Мы оценим интервал времени, за пределами которого теряют силу предсказания ньютоновской теории, касающиеся траекторий частиц и последовательности их соударений, и убедимся, что длительность этого интервала составляет всего лишь несколько интервалов свободного пробега. Кроме того, мы отметим прямую связь обсуждаемого здесь квантового эффекта с проблемой обоснования статистической физики.

При умеренных температурах, скажем, при  $T \sim 300$  К, кинетическая энергия молекул газа  $kT \sim (1/40)$  эВ мала по сравнению с энергией фо-

\*E-mail: kravtsov@asp.iki.rssi.ru

тонов, отвечающих оптическим переходам. Однако этой энергии вполне достаточно для излучения низкочастотных (ИК и микроволновых) фотонов с энергией  $\hbar\omega \leq kT$  (таким низкочастотным квантам соответствуют частоты  $\nu = \omega/2\pi < 6 \cdot 10^{12}$  и длина волны  $\lambda > 50$  мкм).

Излучение низкочастотных фотонов может возникать в результате слабонеупругих процессов двух типов. Во-первых, при соударениях происходит деформация электронных оболочек атомов и молекул, в результате чего они приобретают электрические дипольные моменты, меняющиеся с характерным временем соударения  $\Delta t_c \approx a/v_T$ , где  $a$  — диаметр молекул, а  $v_T$  — их тепловая скорость. Длительности соударения  $\Delta t_c$  соответствует характерная частота излучения  $\nu_c = \omega_c/2\pi \approx 1/\Delta t_c \approx v_T/a$ . Для воздуха при нормальных условиях ( $T = 300$  К, давление 1 бар, молекулярная масса около 30) длительность соударения  $\Delta t_c$  оценивается как  $0.5 \cdot 10^{-12}$  с, а характерная частота излучения — как  $\nu_c \approx 2 \cdot 10^{12}$  с<sup>-1</sup>. Соответствующая длина волны  $\lambda_c \approx 0.15$  мм лежит в субмиллиметровом диапазоне электромагнитного спектра. Во-вторых, при соударении молекул могут возбуждаться квантовые переходы в колебательном или вращательном спектрах молекул с частотами меньшими  $\nu_c$ . Значительное число таких переходов лежит в микроволновом диапазоне волн (частоты  $10^9$ – $3 \cdot 10^{10}$  с<sup>-1</sup>, длина волны 1–30 см).

Низкочастотные фотоны, возникающие в результате слабонеупругих соударений частиц газа, уносят импульс  $p_{ph} = \hbar\omega/c$  и тем самым возмущают траектории разлетающихся частиц. Начальное угловое возмущение траекторий  $\Delta\theta_0$  при испускании одного фотона пропорционально постоянной Планка  $\hbar$  и при излучении одного фотона оценивается как

$$\Delta\theta_0 \approx \frac{p_{ph}}{p_T} \approx \frac{\hbar\omega}{cmv_T} \approx \frac{3}{2} \frac{\hbar\omega}{kT} \frac{v_T}{c}, \quad (1)$$

где  $p_T = mv_T$  — типичный импульс теплового движения молекул, а  $kT$  — средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул.

Вследствие экспоненциальной неустойчивости траекторий частиц в газе (описание этой неустойчивости, ответственной за появление молекулярного хаоса, можно найти, например, в книге [9]) угловое отклонение  $\Delta\theta$  увеличивается при каждом соударении в  $l/a$  раз, где  $a$  — радиус частиц, а  $l$  — средняя длина свободного пробега. После  $M$  соударений угловое отклонение  $\Delta\theta$  относительно невозмущенной траектории составит

$$\Delta\theta_M \approx \Delta\theta_0 \left(\frac{l}{a}\right)^M. \quad (2)$$

В воздухе при нормальных условиях отношение  $l/a$  составляет  $10^4$ , так что формула (2) описывает механизм гигантского усиления флуктуаций в газе: после  $M$  соударений угловое отклонение молекулы увеличивается в  $10^{4M}$  раз!

Ситуация, когда угловое отклонение траектории  $\Delta\theta$  достигает углового диаметра молекулы  $a/l$ , является критической: после достижения критического угла  $\Delta\theta_c \approx a/l$  порядок соударений между молекулами радикально меняется по сравнению со сценарием, предписанным уравнениями Ньютона и классической моделью абсолютно упругих соударений. Если при  $\Delta\theta < \Delta\theta_c$  можно было говорить о малых возмущениях траекторий молекул, то при достижении критического значения  $\Delta\theta_c$  предсказания, основанные на уравнениях Ньютона и на модели абсолютно упругих соударений, утрачивают свою силу, поскольку при  $\Delta\theta > \Delta\theta_c$  форма траекторий частиц радикально меняется и уже ничем не напоминает траекторию невозмущенного движения.

Критическое число соударений  $M_c$ , отвечающее достижению критического возмущения  $\Delta\theta_c \approx a/l$ , определяется из условия  $\Delta\theta_M \approx \Delta\theta_c \approx a/l$ :

$$M_c = -\frac{\lg \Delta\theta_0}{\lg l/a} - 1. \quad (3)$$

При излучении фотонов субмиллиметрового, миллиметрового и сантиметрового диапазонов волн критическое число соударений оказывается на удивление малым:  $M_c \leq 2$ . Полезно отметить, что воздействие 300-градусного теплового электромагнитного поля дает сопоставимые значения:  $M_c \approx 2.5$  [5].

Приведенные оценки означают, что «фотонный механизм» возмущения классических траекторий, как и действие внешнего теплового электромагнитного поля, ограничивает применимость ньютоновского описания движения молекул всего лишь несколькими интервалами свободного пробега частиц после испускания фотона.

Удивительным представляется не только и не столько факт ограниченной применимости уравнений Ньютона, сколько исключительно короткое время их действия. Здесь уместно отметить, что в условиях действующего в газе механизма гигантского усиления флуктуаций любой, даже самый слабый фактор, лежащий за пределами ньютоновской парадигмы, проявится за микроскопически малое вре-

мя. Так, включение дополнительного фактора, который на 1000 порядков величины (т. е. в  $10^{1000}$  раз!) слабее ньютоновских сил, проявится всего лишь за  $\lg(10^{1000})/\lg(l/a) = 1000 : 4 = 250$  соударений [5]. Эта оценка заставляет скептически относиться к возможности ньютоновского описания траекторий молекул газа на сколько-нибудь длительных временах наблюдения.

Предмет данной статьи имеет непосредственное отношение к дискуссии по проблеме обоснования статистической физики, важность которой недавно подчеркнул Гинзбург [10]. Заславский [9] основной вопрос дискуссии сформулировал следующим образом: «Откуда в системе соударяющихся частиц берется хаос, позволяющий применять для ее описания различные вероятностные методы?» На наш взгляд, спонтанное излучение низкочастотных фотонов в полной мере может выполнить роль фактора, вносящего случайные возмущения в ньютоновские уравнения движения. В условиях гигантского усиления флуктуаций эти возмущения как раз и создают условия для перехода от динамического описания к вероятностному.

Фотонный механизм возмущения траекторий частиц вряд ли существенно отразится на статистических характеристиках газа, таких, как распределение частиц по скоростям, корреляционные функции положений молекул и др. Однако фотонный механизм имеет принципиально важное значение для решения вопроса о том, насколько быстро динамическое описание движения молекул на основе уравнений Ньютона уступает место вероятностному описанию на базе кинетического уравнения Больцмана. Приведенные выше оценки указывают на то, что переход от обратимых уравнений Ньютона к необратимому кинетическому уравнению может происходить за весьма короткие времена порядка нескольких интервалов свободного пробега.

Таким образом, в самой природе явлений заложен квантовый механизм, обеспечивающий переход от ньютоновского описания к огрубленному вероятностному описанию.

В заключение авторы выражают свою глубокую благодарность О. А. Чичигиной за разнообразную помощь в подготовке статьи, а также Ю. А. Кухаренко и Г. Э. Норману за внимание к работе.

Работа одного из авторов (Ю. А. К.) поддерживается Федеральной целевой программой «Интеграция» (проект А-0030/90).

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Каклюгин, Г. Э. Норман, *Термодинамика необратимых процессов*, Наука, Москва (1987), с. 5.
2. A. S. Kaklyugin and G. E. Norman, *J. Moscow Phys. Soc.* **5**, 167 (1995).
3. A. S. Kaklyugin and G. E. Norman, *J. Moscow Phys. Soc.* **8**, 283 (1998).
4. А. С. Каклюгин, Г. Э. Норман, *Российский химический журнал*, **44**(3) (2000).
5. Ю. А. Кравцов, *ЖЭТФ* **96**, 1661 (1989).
6. М. Е. Герценштейн, И. А. Болошин, М. П. Суворов, *Изв. ВУЗов. Физика* № 2, 119 (1996).
7. М. Е. Герценштейн, *Наука и технология России* № 5, 16 (1997).
8. М. Е. Герценштейн, Ю. А. Кравцов, *Наука и технология России* № 6, 9 (1998).
9. Г. М. Заславский, *Стохастичность динамических систем*, Наука, Москва (1984).
10. В. Л. Гинзбург, *УФН* **169**, 419 (1999).