

## NONEQUILIBRIUM GAS

A. I. OSIPOV

*One of the new field in the modern physics of gases is related to the studies of their nonequilibrium properties. We discuss how the nonequilibrium state is formed and where it may appear. On the examples from different branches of science and technics such as the reentry of vehicles, laser-induced chemical reactions, cooling down of interstellar gas and molecular lasers, the primary role of nonequilibrium effects has been demonstrated.*

**Одно из новых направлений современной физики газов связано с изучением их неравновесных свойств. В статье рассказывается, как возникают неравновесные процессы и где они встречаются. На примерах из различных областей науки и техники (проблема спускаемых аппаратов, лазерное инициирование химических реакций, выхолаживание межзвездного газа, молекулярные лазеры) показана определяющая роль неравновесных эффектов при быстропротекающих процессах.**

© Осипов А.И., 1998

## НЕРАВНОВЕСНЫЙ ГАЗ

А. И. ОСИПОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

## ИСТОРИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Физика газов, как и вся современная европейская наука, начала развиваться с XVII века. Слово "gas" введено в физику в 1640 году бельгийским химиком, врачом и фармацевтом Ж.Б. ван Гельмонтом (1580–1644) и по смыслу было синонимом латинского слова "spiritus". Трехсотлетняя история современной физики газов выявила основную особенность этой области науки: она всегда развивалась в тесном взаимодействии с техникой и сейчас остается ее теоретической основой, а запросы техники, в свою очередь, стимулировали развитие физики газов.

Поясним это на примерах. Первые технические применения газов – насосы использовали механические свойства окружающего нас воздуха. Изобретение насосов стимулировало исследования по пневматике. Началось систематическое изучение механических свойств воздуха и других газов (XVII век), которое впоследствии привело к созданию физики атмосферы, а в более общем плане к созданию гидростатики и гидродинамики. Величайшее техническое изобретение XVIII века – паровая машина – означало использование более глубинных тепловых свойств газов. Изучение тепловых свойств газов открыло дорогу для создания термодинамики. Во второй половине XIX века появился двигатель внутреннего сгорания. Техника поставила на службу химические процессы, происходящие в газах. Начала интенсивно развиваться химическая кинетика. Развитие энергетики и создание МГД-генераторов в наше время означали вовлечение в сферу технических приложений электрических процессов в газах (низкотемпературная плазма). Наконец, лазерная революция в физике и химии и оснащение техники лазерами ознаменовали использование еще более глубинных свойств газов – неравновесных свойств. Именно этой проблеме посвящена настоящая статья.

Неравновесный газ стал привлекать внимание физиков с конца прошлого столетия, то есть с момента возникновения кинетической теории газов. Исторически датой возникновения кинетической теории газов, как мы ее понимаем сегодня, следует считать 1859 год, когда Дж. Максвелл на заседании Британской ассоциации содействия развитию науки прочитал доклад, в котором впервые был использован статистический подход к проблеме. Первоначально интерес к статистической механике газов носил академический характер. После создания

формальных основ кинетической теории неоднородных газов Л. Больцманом и Х.А. Лоренцом неравновесным состоянием газа занимался узкий круг исследователей, интересовавшихся явлениями переноса, связанными с вязкостью, теплопроводностью и диффузией. Была разработана теория переноса в одноатомных газах, а начиная с 40-х годов нашего столетия стала развиваться кинетическая теория многоатомных газов.

Начало становления физики неравновесных газов следует отнести к 30-м годам нашего столетия, когда выяснилось, что аномальные дисперсия и поглощение ультразвука в многоатомных газах, наблюдавшиеся физиками неоднократно, объясняются нарушением равновесия между поступательными и внутренними степенями свободы при прохождении звуковой волны. Таким образом, неравновесные состояния, которые казались присущими только неоднородным газам с градиентами температуры, скорости и концентрации, оказались существенными и в другой группе явлений, относящихся к молекулярной акустике. Развитие ультраакустических исследований в дальнейшем сформировалось в новое научное направление – акустическую спектроскопию.

В 40–50-х годах развитие ракетной техники сделало актуальным изучение структуры ударных волн. Оказалось, что ударная волна имеет конечную ширину, от которой во многом зависят сопротивление и теплообмен при движении летательных аппаратов со сверхзвуковой скоростью. В свою очередь, ширина ударной волны определяется процессами установления равновесия по внутренним степеням свободы. Эти исследования послужили началом еще одного нового направления – физической газодинамики.

В 60-е годы в связи с развитием лазерной физики резко возрос интерес к изучению существенно неравновесного газа, являющегося активной средой газовых лазеров. Один из основных итогов лазерной революции помимо создания и внедрения в практику уникальной лазерной технологии и заключается в привлечении внимания физиков к неравновесным средам, и в частности к неравновесным газам. Неравновесный газ – это не только активная среда газовых лазеров. Это верхняя атмосфера, межзвездная среда, включая межзвездные облака, разрядная плазма и т.д. С физической точки зрения неравновесный молекулярный газ представляет собой необычное состояние вещества, своеобразие свойств которого определяется возможностью варьировать в определенных пределах запас и распределение внутренней энергии. Изучение неравновесных газов позволило физикам вскрыть новый пласт явлений. Отчетливое осознание этого факта произошло в 80-е годы. С того же времени началось интенсивное изучение неравновесного газа. Таким образом, интерес к неравновесным явлениям в газе, зародившийся первоначально в довольно уз-

кой области физики при изучении явлений переноса, очень скоро распространился на всю физику быстропротекающих процессов.

### КАК ВОЗНИКАЮТ НЕРАВНОВЕСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЗАХ

В соответствии с законом о равнораспределении энергии по степеням свободы на каждую классическую степень свободы молекулы в состоянии статистического равновесия приходится энергия, равная  $kT/2$ . Каждая бесструктурная частица имеет три степени свободы, соответствующие трем независимым движениям вдоль координат  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Многоатомная молекула, состоящая из  $N$  атомов, имеет  $3N$  степеней свободы, из которых три обусловлены движением центра тяжести, то есть движением молекулы как целого, три – вращением молекулы как целого (в случае линейных молекул число вращательных степеней равно двум). Остальные  $3N - 6$  (или  $3N - 5$ ) степеней свободы описывают колебательное движение атомов в молекуле.

В состоянии равновесия, как уже указывалось, на каждую степень свободы приходится вполне определенная энергия. Таким образом, классический газ, состоящий из  $n$  молекул, имеет энергию поступательного движения, равную  $3kTn/2$ , вращательного движения  $3kTn/2$ , энергию колебания  $(3N - 6)kTn$ . Квантовые эффекты уменьшают запас энергии. Это обстоятельство позволило А. Зоммерфельду еще в 1911 году высказать свое знаменитое утверждение, что степени свободы следует взвешивать, а не считать.

Образно говоря, запас энергии молекулярного газа в состоянии равновесия распределен по трем энергетическим резервуарам, соответствующим поступательным, вращательным и колебательным степеням свободы (считаем, что температуры таковы, что электронные степени свободы не возбуждены). Эти резервуары сообщаются, и энергия сравнительно свободно может переливаться из одного резервуара в другой (обмен энергией между различными степенями свободы происходит при молекулярных столкновениях). Предположим теперь, что мы изменили (например, увеличили) запас энергии в одном из резервуаров. Ясно, что избыточная энергия начнет тотчас же переливаться в соседние. Так возникает представление о неравновесных (необратимых) процессах, которые идут в газах за счет механизма обмена энергией при молекулярных столкновениях. О необратимых процессах, приводящих к установлению в системе статистического равновесия, говорят как о релаксационных процессах.

В типичных условиях неравновесность в газе возникает, если газовая система подвергается внешнему воздействию. Приведем несколько примеров.

1. Известно, например, что верхние слои атмосферы планет (Земли, Венеры, Марса и т.д.) – разреженные газы, которые подвергаются воздействию

корпускулярного и электромагнитного излучения Солнца. Воздействие солнечных потоков нарушает равновесное распределение энергии и равновесный химический состав верхней атмосферы. Это, в частности, сказывается на характеристиках излучения, например на характере инфракрасного излучения при колебательно-вращательных переходах в молекулах. Такое излучение играет чрезвычайно важную роль в тепловом режиме верхних слоев атмосферы Земли и может дать интересную информацию о процессах в этих средах.

2. Распространение сильной ударной волны в газах сопровождается интенсивным нагревом. Вспомним разогрев спускаемых летательных аппаратов при входе в плотные слои атмосферы или сгорание метеоритов. Физическая причина нагрева такова.

Ударная волна представляет собой скачок уплотнения, распространяющийся со сверхзвуковой скоростью. В системе координат, связанной с волной, картина движения будет выглядеть следующим образом. На ударную волну набегает поток газа (масса газа, проходящая через единицу площади в секунду, равна  $\rho_1 v_1$ , где  $\rho_1$  и  $v_1$  – плотность и скорость газа перед волной). В соответствии с законом сохранения массы втекающая в ударную волну за единицу времени масса равна вытекающей из ударной волны, то есть  $\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2$ , где  $\rho_2$  и  $v_2$  – плотность и скорость газа за ударной волной. Поскольку  $\rho_2 > \rho_1$ , то  $v_2 < v_1$  ( $\rho_2$  может в несколько раз превосходить  $\rho_1$ , соответственно  $v_2$  может быть в несколько раз меньше  $v_1$ ). В силу закона сохранения энергии разность энергии упорядоченного (гидродинамического) движения молекул при переходе через фронт волны не может исчезнуть. Она переходит в тепловую и внутреннюю энергию частиц, а также растратчивается на сжатие газа. Таким образом, скачок уплотнения сопровождается нагревом газа.

Однако разогрев газа за ударной волной происходит неравномерно. Сначала непосредственно за фронтом ударной волны разогреваются поступательные и вращательные степени свободы. В дальнейшем этот переполненный резервуар снабжает энергией колебательные и электронные степени свободы и инициирует химические реакции, поэтому за фронтом ударной волны существует достаточно протяженная релаксационная зона, в которой происходит установление полного статистического равновесия.

3. Поглощение лазерного излучения в газах приводит к накоплению энергии в отдельных степенях свободы. Возникает система с неравновесным распределением энергии, которая обладает особыми оптическими характеристиками, уникальной реакционной способностью и т.д.

4. Тлеющий разряд в молекулярном газе, проходящий, например, в длинной цилиндрической трубке с электродами в торцах при давлении в несколько миллиметров ртутного столба, приводит к

возникновению сильно неравновесного состояния. При разряде в молекулярном газе непосредственно в тепло (в поступательные степени свободы) преобразуется не более 1–5% вводимой электрической энергии, основная же часть расходуется на колебательное возбуждение молекул.

5. Химические реакции, например в процессах горения, сопровождаются, как правило, появлением “горячих” частиц, имеющих неравновесное распределение энергии по поступательным и внутренним степеням свободы. Число приведенных примеров можно легко увеличить.

До сих пор мы рассматривали интенсивное внешнее воздействие – мощное излучение, ударную волну, разряд, химическую реакцию. Однако нарушение равновесия возникает и при слабом возмущении. Например, при прохождении звуковой волны или при наличии градиентов температуры, скорости и давления. Существенно, что малые возмущения равновесной функции распределения иногда определяют не поправки к эффектам, а сами эффекты: аномальное поглощение и дисперсию ультразвука, коэффициенты вязкости, теплопроводности и диффузии и т.д.

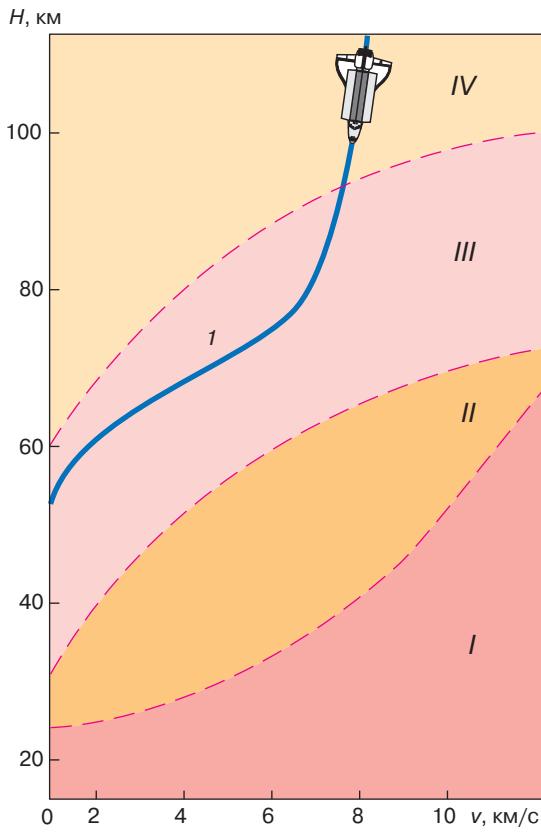
### НЕРАВНОВЕСНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ГАЗАХ

Одной из основных характеристик процесса установления равновесия является время релаксации энергии на данной степени свободы. Оно определяется как время достижения такого значения энергии, которое отличается от равновесного на  $1/10$  или на  $1/e$  своей величины. Эта характеристика релаксационного процесса задает масштаб времени (или пространственный масштаб) существования неравновесности. Если исследуемое явление рассматривается в промежутке времени, много большем времени релаксации, то можно считать, что релаксационные процессы в основном уже закончились и установилось состояние локального равновесия. Если характерное время изучаемого явления порядка времени релаксации, то неравновесность оказывается существенной.

Приведем примеры, иллюстрирующие важность неравновесных эффектов в газах.

### Спускаемые аппараты и неравновесность

Одна из основных проблем при конструировании спускаемых летательных аппаратов состоит в разумном сочетании веса аппарата и достаточной тепловой защиты. Спускаемые аппараты входят в атмосферу Земли на высоте около 100 км со скоростью примерно 7,8 км/с (рис. 1). Эта скорость во много раз превосходит скорость звука, поэтому перед летящим телом возникает сильная ударная волна, которая движется с такой же скоростью, как и спускаемый аппарат. Интенсивность ударной волны характеризуется числом Маха, равным отношению



**Рис. 1.** Траектория спускаемых аппаратов "Шаттл" и "Буран" (кривая 1): I – равновесный поток, II – область неравновесных химических реакций, III – область неравновесного газа электронно- и колебательно-возбужденных молекул, IV – поток постулатально- и вращательно-неравновесного газа

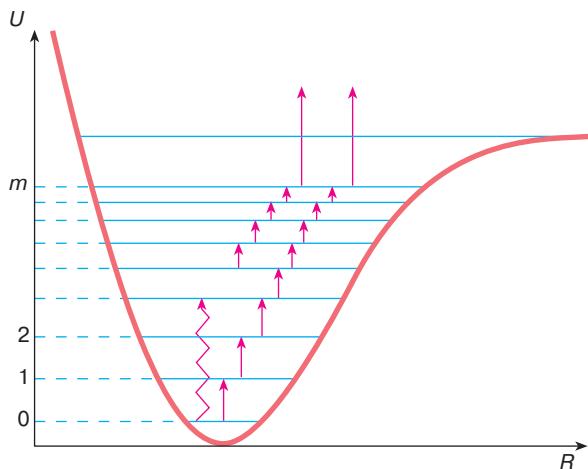
скорости ударной волны к скорости звука в той точке, через которую проходит ударная волна. Число Маха при входе в атмосферу составляет примерно 30. Действие ударной волны сводится к нагреванию газа, а также к повышению его давления и плотности. При входе в атмосферу температура непосредственно за фронтом ударной волны составляет несколько десятков тысяч градусов, а давление меняется от  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  атм на входе до сотен атмосфер в нижних слоях. Таким образом, спускаемый аппарат движется в атмосфере горячего воздуха. Температура воздуха, определяющая тепловую нагрузку на тело, зависит от того, успел ли газ прийти в состояние равновесия. Как видно на рис. 1, в наиболее напряженной части траектории на высотах 70–40 км, где аппарат быстро сбрасывает скорость, он движется сквозь атмосферу неравновесного газа. Таким образом, конструкция тепловой защиты аппарата определяется свойствами конкретного неравновесного газа, обтекающего тело.

### Колебательная неравновесность в химической кинетике

Химические реакции, протекающие в газовой системе, нарушают равновесное максвелл-больцмановское распределение. Действительно, в химическую реакцию вступают, как правило, частицы, обладающие избыточной энергией. Это приводит к уменьшению числа частиц с более высокой энергией. Их концентрация становится меньше равновесной, происходит нарушение равновесия. Одновременно в результате химической реакции в системе возникают новые частицы, энергия которых может превышать равновесную. Появление в газе частиц, спектр энергии которых отличается от равновесного, возмущает статистическое равновесие в системе. На первый взгляд кажется, что этот эффект хотя и интересен, но не имеет практического значения. Однако это впечатление ошибочно. Химическая реакция приводит не только к нарушению статистического равновесия в системе, но и сама испытывает влияние этой неравновесности. Прежде всего это сказывается на ее скорости. Скорость реакции определяется в самом общем случае произведением числа реагирующих частиц на вероятность реакции. В условиях равновесия число реагирующих частиц определяется равновесной функцией распределения. Однако в реальных условиях химическая реакция приведет к уменьшению числа частиц по сравнению с равновесным значением, что естественно уменьшит и скорость реакции. Это уменьшение может быть весьма значительным.

Нарушение равновесия по колебательным степеням свободы наиболее отчетливо проявляется в одной из самых простых химических реакций – термической диссоциации двухатомных молекул. Термическая диссоциация двухатомных молекул протекает в основном за счет колебательного возбуждения. Под действием столкновений атомы в молекуле начинают колебаться. Когда энергия колебаний достигнет энергии диссоциации, происходит разрыв связи, молекула диссоциирует.

На языке квантовой механики этот процесс описывается следующим образом. При столкновениях молекула совершает одноквантовые переходы между дискретными колебательными уровнями энергии (рис. 2) вплоть до некоторого уровня  $m$ , с которого осуществляется переход в непрерывный спектр колебательных энергий, соответствующий непосредственному акту диссоциации. Как правило, переход молекул с уровня  $m$  в непрерывный спектр происходит с высокой вероятностью, поэтому поток молекул с нижних уровней на уровень  $m$  не успевает компенсировать опустошение  $m$ -го уровня вследствие диссоциации. Таким образом, заселенность  $m$ -го и близких к нему уровней в процессе диссоциации оказывается меньше равновесной. Этот результат является достаточно общим и справедлив для любого



**Рис. 2.** Потенциальная энергия  $U$  как функция межатомного расстояния  $R$ . Прямые стрелки соответствуют столкновительным переходам

процесса, сопровождаемого уносом колебательной энергии.

Нарушение равновесного распределения энергии в процессе диссоциации наводит на мысль: нельзя ли создать условия, при которых существовала бы избыточная заселенность на колебательных степенях свободы? Это открыло бы широкие перспективы для химической кинетики, поскольку можно было бы управлять ходом химических реакций. В долазерный период об этом можно было только мечтать. Тогда не было источников излучения инфракрасного диапазона, перекрывающих область колебательных переходов, которые обладали бы интенсивностью в какой-нибудь одной, пусть даже не очень узкой области спектра, достаточной для генерации колебательно-возбужденных частиц со скоростями, большими, чем скорость колебательной релаксации. А действие малоинтенсивных источников, не удовлетворяющих этому требованию, может приводить лишь к равновесному нагреву.

Появление мощных лазеров инфракрасного диапазона (например,  $\text{CO}_2$ -лазеров) решило проблему источников в этом диапазоне. А это, в свою очередь, создало предпосылки для рождения новой области — инфракрасной фотохимии.

Принцип воздействия лазерного излучения на скорость химической реакции можно пояснить на примере диссоциации молекул. Поглощение лазерного излучения на низких уровнях переводит молекулы на верхние уровни. Если лазерное излучение действует достаточно долго, то на верхних уровнях создается избыточная заселенность. За счет столкновительных процессов эта избыточная заселенность распространяется на еще более высокие колебательные уровни, включая уровень  $m$ , с которого происходит диссоциация. Превышение заселенности  $m$ -го уровня над равновесной, естественно, увеличивает скорость диссоциации.

Отметим одно существенное обстоятельство: инфракрасная лазерная фотохимия использует кванты излучения, энергия которых гораздо меньше энергии разрыва химических связей. Недостающая энергия черпается из поступательных степеней свободы или других колебательных степеней свободы, участвующих в поглощении лазерного излучения.

Проблема контролируемого воздействия на скорость химических реакций не ограничивается фотохимией. Для селективного воздействия на химические реакции можно использовать любые методы, осуществляющие “разогрев” тех степеней свободы, которые непосредственно участвуют в реакции. Физический механизм этого воздействия такой же, как и при лазерной накачке.

### Выхолаживание межзвездного газа

В обычных условиях, то есть при нормальном давлении и не очень высоких температурах, собственное излучение слабо искажает равновесную функцию распределения. Рассмотрим, например, излучение молекул  $\text{CO}$  во вращательной полосе, то есть при вращательных переходах. Время жизни для радиационного перехода  $\text{CO}$  на первом вращательном уровне около 50 с, а среднее время между столкновениями при нормальном давлении  $10^{-10}$  с. Таким образом, между двумя актами излучения молекула испытывает в среднем очень много столкновений. Это приведет к тому, что опустошение вращательных уровней, вызванное излучением, будет скомпенсировано возбуждением вращательных состояний молекул за счет столкновительного обмена энергией между поступательными и вращательными степенями свободы. Поэтому совокупность излучающих молекул постоянно будет находиться в равновесном состоянии. Скорость уноса энергии за счет излучения определяет скорость охлаждения (выхолаживания) газа. В стационарных условиях энергия, уносимая излучением, компенсируется потоком энергии из окружающей среды.

Иное положение возникает в разреженных газах. Если плотность числа частиц при нормальном давлении  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ , то в межзвездных облаках она составляет всего  $10^4 \text{ см}^{-3}$ . В этих условиях столкновительный механизм восстановления равновесия уже не сможет конкурировать с излучательным опустошением уровней, нарушающим равновесие. Процесс дезактивации излучением оказывается относительно настолько интенсивным, что совокупность излучающих молекул уже не будет находиться в состоянии равновесия: заселенности вращательных уровней будут меньше равновесных. Поскольку мощность излучения (или скорость выхолаживания межзвездного облака) определяется произведением заселенности на вероятность излучения, то она, естественно, будет зависеть от степени вращательной

неравновесности. В этой задаче мы сталкиваемся с общей проблемой неравновесной кинетики: возмущение (например, излучение) искажает равновесную функцию распределения, а это искажение, в свою очередь, определяет саму величину возмущения (например, интенсивность собственного излучения).

Скорость выхолаживания является одной из основных характеристик энергетического баланса межзвездных облаков. Плотные межзвездные облака представляют собой скопления молекул водорода с концентрацией порядка  $10^4 \text{ см}^{-3}$  и температурой около 10 К, которые содержат малые примеси C, C<sup>+</sup>, CO, CO<sup>+</sup>, CH, OH, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> и т.д. Среди этих примесей относительное содержание CO существенно больше других компонент, поэтому в такой системе основной механизм выхолаживания будет связан со спонтанным излучением CO во вращательной полосе, поскольку при таких температурах колебательные и электронные степени свободы не возбуждены.

Большой интерес к процессам в межзвездных облаках определяется в первую очередь возможностью образования звезд путем гравитационного сжатия межзвездной материи. Межзвездная среда представляет собой фазу эволюции вещества Галактик. Звезды к концу своего развития сбрасывают газовую оболочку, а из межзвездного газа образуются молодые звезды.

### Молекулярные лазеры

Молекулярные лазеры представляют собой наиболее яркий пример практического использования неравновесных свойств.

Принцип работы молекулярного лазера удобнее всего проиллюстрировать на примере CO<sub>2</sub>-лазера. Линейная симметрическая молекула CO<sub>2</sub> может совершать колебания трех типов. Движение атомов для каждого типа колебаний и схема нижних энергетических уровней изображены на рис. 3. Колебания типа 1 называются симметрическими, типа 2 – деформационными, типа 3 – антисимметрическими.

В условиях равновесия заселенности колебательных уровней уменьшаются с увеличением энергии уровней. Для создания лазерного эффекта необходимо, чтобы заселенность частиц на верхнем уровне (00<sup>0</sup>1) превосходила заселенности на нижних (10<sup>0</sup>0) и (02<sup>0</sup>0). Такая ситуация называется инверсной заселенностью, так как она обратна нормальному положению, существующему в состоянии равновесия. Под действием излучения, всегда существующего в системе, молекулы совершают вынужденные переходы с верхнего лазерного уровня с инверсной заселенностью на нижний, сопровождающиеся излучением той же частоты, поляризации, направления и фазы, что и возбуждающая волна. Если это излучение организовать, введя обратную связь, например с помощью резонатора, то получим лазерную систему. В простейшем случае резонатор – это

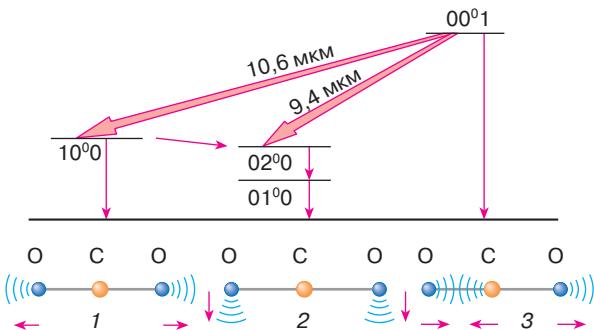


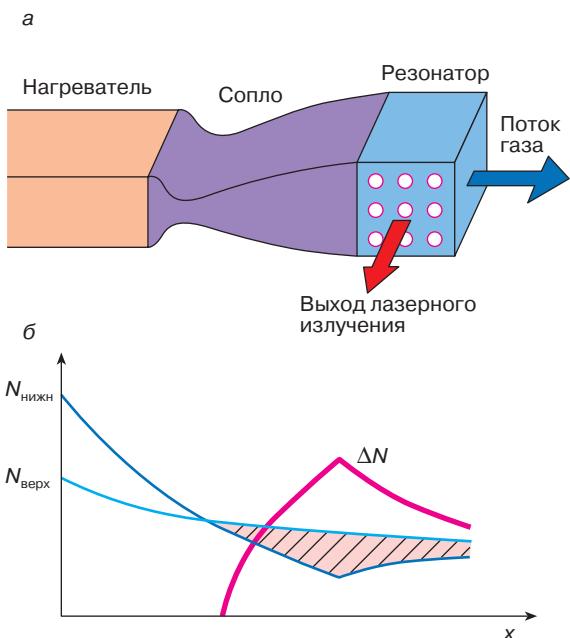
Рис. 3. Нижние уровни колебательной энергии молекулы CO<sub>2</sub>

два плоских зеркала, одно из которых полностью отражающее, а другое полупрозрачное, чтобы пропускать излучение.

Есть несколько типов CO<sub>2</sub>-лазеров, различающихся по способам возбуждения. В настоящее время самые мощные лазеры непрерывного действия – это газодинамические лазеры, работающие на колебательно-вращательных переходах молекул.

Принцип действия газодинамического лазера можно понять рассмотрев физическую схему процессов в лазере (рис. 4). Вначале рабочий газ нагревается (обычно до  $T_0 = 1000\text{--}3000 \text{ K}$ ), при этом происходит возбуждение колебательных степеней свободы его молекул. Сильно нагретый газ можно получить в большом количестве любым из хорошо разработанных методов: нагревом электрическим током, сжиганием различных топлив, сжатием в компрессорах, ударных трубах или при взрывах, в теплообменниках ядерных реакторов и т.д. Нагретый газ поступает в сопло, где ускоряется и охлаждается. Если время жизни молекул на верхнем лазерном уровне больше, чем на нижнем, то возникает инверсия заселенности. В резонаторе часть колебательной энергии, связанная с инверсией  $\Delta N = N_{\text{верх}} - N_{\text{ниж}}$ , переходит в когерентное излучение.

Если расширение и охлаждение газа происходят достаточно быстро, то колебательная энергия верхнего лазерного уровня не успевает перейти в поступательную. Говорят, что энергия замораживается в состоянии с высокой исходной температурой. Термин “замораживание” означает, что при общем снижении температуры газа энергия антисимметрических колебаний застывает на прежнем уровне. Вместе с тем энергия деформационного и симметричного колебаний углекислого газа, особенно в присутствии воды и гелия, очень быстро переходит в тепловую. Таким образом, для смеси азота, углекислого газа и воды или гелия можно так подобрать скорость расширения, что антисимметрические колебания CO<sub>2</sub> замораживаются, а деформационные и симметрические колебания будут находиться в состоянии равновесия с “холодными” поступательными



**Рис. 4.** Схема газодинамического лазера (а) и распределение заселенностей верхнего и нижнего лазерных уровней вдоль оси сопла (б). Заштрихованная область – зона инверсии ( $\Delta N > 0$ )

степенями свободы. При этих условиях возникнет инверсия заселенностей и станет возможной генерация света.

Изобретение лазеров и применение когерентного света представляют собой прекрасный пример постоянного обмена между наукой и практикой. Первоначально лазер был лишь лабораторным прибором, а сейчас он незаменим в самых разных областях науки и техники. К тому же широкие практические применения лазеров требуют дальнейшего развития научных исследований, например для создания лазеров коротковолнового диапазона – гамма-лазеров или лазеров рентгеновского диапазона.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Здесь приведены только некоторые примеры неравновесных эффектов в газах. Число их можно легко увеличить. Однако уже этих примеров достаточно, чтобы сделать основной вывод: неравновесные эффекты существенны во всех явлениях, протекающих с характерными временами и пространственными масштабами, соизмеримыми с соответствую-

щими масштабами релаксационных процессов. Именно этим обстоятельством объясняется бурное развитие неравновесной молекулярной физики в последние годы. По мере совершенствования техники изучения быстропротекающих процессов неравновесность завоевывала все новые и новые научные области. Из акустики она проникла в газовую динамику, потом в химическую кинетику, в физику горения, астрофизику и т.д.

Становлению неравновесной молекулярной физики, понимаемой в широком смысле как наука о физико-химических процессах, во многом способствовало развитие лазерной техники. Использование лазеров позволило, по существу, впервые приготавливать молекулы с беспрецедентной селективностью и необычайно высокой чувствительностью детектировать отдельные молекулярные состояния.

Неравновесная молекулярная физика делает только первые шаги. Сейчас трудно оценить в полной мере результаты будущих исследований. Однако открывающиеся перспективы грандиозны, поскольку уже первые успехи привели к лазерной революции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Осипов А.И. Неравновесный газ. М.: Знание, 1984. 64 с.
2. Осипов А.И. Самоорганизация и хаос. М.: Знание, 1986. 64 с.
3. Осипов А.И., Уваров А.В. Кинетические и газодинамические процессы в неравновесной молекулярной физике // Успехи физ. наук. 1992. Т. 162, № 11. С. 3–41.
4. Осипов А.И., Уваров А.В. Неравновесный газ: Проблемы устойчивости // Там же. 1996. Т. 166, № 6. С. 639–650.

\* \* \*

Алексей Иосифович Осипов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры молекулярной физики и физических измерений физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Область научных интересов: физико-химическая кинетика, физическая гидро- и газодинамика. Автор свыше 180 работ, в том числе десяти монографий.