

**Е.С. Нектаров, В.В. Сычев**

## Развитие гиператомной физики в России

ГУП «НПО «Астрофизика»», г. Москва

Поступила в редакцию 15.09.2005 г.

Приводится обзор исследований, выполненный учеными разных стран и, в частности СССР, по проблеме гиператомной физики — раздела атомной физики, возникшего в последние десятилетия в результате изучения высоковозбужденных водородоподобных атомов при значениях определяющего размер орбиты внешнего электрона — главного квантового числа 10–1000.

Решению этой оказавшейся непростой проблемы и исследованиям свойств гиператомной среды, как *в космосе*, так и *в атмосфере Земли*, была посвящена многолетняя научная работа большого авторского коллектива. Этот коллектив представляет отечественные научные школы в области теоретической и экспериментальной физики, химии, весь цвет научной и технической мысли России.

Описана новая установленная закономерность существования сильновозбужденных атомов в зависимости от параметров среды, и разработана новая модель взаимодействия низкотемпературной плазмы с нейтральным газовым потоком, позволившая объяснить наблюдавшиеся аномальные эффекты и связать их со специфическими критическими явлениями в области взаимодействия таких сред.

Показаны большие перспективы, открывающиеся для гиператомных технологий. Описаны созданные широкополосные и широкополосные генераторы, разрабатываются аналогичные квантоэлектронные усилители, исследуется возможность создания устройств высокотемпературной сверхпроводимости.

### Введение

Гиператомная физика — раздел атомной физики, возникший в последние десятилетия в результате изучения высоковозбужденных водородоподобных атомов при значениях определяющего размер орбиты внешнего электрона — главного квантового числа  $n \sim 10 \dots 1000$  (с границами спектрального излучения от субмиллиметровых до декаметровых волн).

Боровская модель водородоподобного атома 1913 г. строилась на основе выполненных в 1885–1906 гг. Бальмером, Пашеном и Лайманом исследований оптических спектров излучения при низких уровнях возбуждения водорода (для значений  $n \sim 2, 3, 4$ ), подтверждение этой модели было получено по сериям Брэкета, Пфунда (для  $n \sim 5, 6$ ) в 1922–1924 гг., Хэмфри (для  $n \sim 7$ ) в 1953 г.

Экспериментальные исследования высоковозбужденных атомов щелочных металлов были начаты Амальди и Сегре в 1934 г., результаты которых были проанализированы тогда же Ферми, заложившим основы теории взаимодействия высоковозбужденных атомов со средой. Несовершенная лабораторная техника того времени не позволяла продолжать исследования в этой новой области физики вплоть до 70-х гг. XX в., когда изобретение перестраиваемых по частоте лазеров обусловило стремительный рост исследований свойств высоковозбужденных атомов и молекул *в лабораторных условиях*.

Ферми впервые поставил вопрос о максимальной возможной степени возбуждения атомов *в окру-*

*жающей среде*. Решению этой оказавшейся непростой проблемы и исследованиям свойств гиператомной среды как *в космосе*, так и *в атмосфере Земли*, была посвящена многолетняя научная работа большого авторского коллектива. Этот коллектив представляет отечественные научные школы в области теоретической и экспериментальной физики, химии, весь цвет научной и технической мысли России. Среди них заметную роль играли коллективы таких организаций нашей страны, как ГАИШ, ФИАН, ГАО, ЦНИРТИ, РИАН, ОКБ «Вымпел», ОКБ «Алмаз», ГНИИП-10, ГУП «НПО «Астрофизика»», РНЦ «Курчатовский институт», ЦАГИ им. Жуковского, ОКБ им. Сухого, ЛИИ им. Громова и др.

### 1. Гиператомы в межзвездной плазме

#### 1.1. Открытие гиператомов

Как известно, примерно половина межзвездного вещества, состоящего в основном из водорода, под воздействием космического ультрафиолетового излучения находится в ионизованном и возбужденном (плазменном) состояниях. Излучение высоковозбужденных атомов с главным квантовым числом  $n \geq 30$  соответствует межуровневым квантовым переходам в радиодиапазоне частот

$$\nu \approx 2R_M c n^{-3} \Delta n [1 + (m/M)]^{-1},$$

где  $R_M$  — постоянная Ридберга;  $m$  и  $M$  — массы электрона и атомного ядра;  $c$  — скорость света;  $\Delta n$  — изменение квантового числа.

Возможность наблюдения рекомбинационных радиолиний в спектрах эмиссионных туманностей

(областей ионизованного водорода – III) впервые была предсказана в 1959 г. Н.С. Кардашевым [1]. В том же 1959 г. на Пушинской радиоастрономической станции был создан уникальный радиотелескоп РТ-22 ФИАН с 22-метровым зеркалом для радиоастрономических измерений в сантиметровом и миллиметровом диапазонах.

В апреле 1964 г. радиолиния возбужденных атомов водорода, соответствующая переходам между уровнями с главными квантовыми числами 91 и 90 на частоте 8872 МГц – волна 3,38 см, в излучении туманности Омега была обнаружена Р.Л. Сороченко и Э.В. Бородзичем [2].

Одновременно в Пулковской главной астрономической обсерватории А.Ф. Дравских, З.В. Дравских и В.А. Колбасовым была обнаружена водородная радиолиния в туманности Омега на частоте 5763 МГц – волна 5,21 см, соответствующая переходам между 105-м и 104-м квантовыми уровнями [2]. Сообщение наших ученых об открытии радиолиний возбужденного водорода на Гамбургской генеральной ассамблее Международного астрономического союза в августе 1964 г. стало полной неожиданностью, поскольку, по оценкам авторитетных зарубежных ученых, радиолинии должны были быть настолько слабыми и размытыми из-за штарковского уширения (возникающего вследствие взаимодействия высоковозбужденных атомов с заряженными частицами и электрическими полями), что не могли быть наблюдаемыми.

Годом позже водородные рекомбинационные радиолинии были обнаружены на радиотелескопе Национальной радиоастрономической обсерватории США ( $n = 109$ ) и радиотелескопе Гарвардского университета ( $n = 156$  и  $158$ ).

Успех и приоритет отечественных ученых были зарегистрированы Госкомитетом по делам изобретений и открытий СССР с формулой открытия: «Явление излучения радиолиний, обусловленных переходами между высоковозбужденными состояниями атомов» (авторы: Р.Л. Сороченко, Э.В. Бородзич – ФИАН; А.Ф. Дравских, З.В. Дравских – ГАО; Н.С. Кардашев – ГАИШ). В 1967 г. на радиотелескопе РТ-22 в туманности Орион была обнаружена радиолиния возбужденного гелия на частоте 5765,2 МГц ( $n = 104$ ).

Проблема поиска радиолиний при переходах между все более высоковозбужденными уровнями в разреженной межзвездной среде, как было упомянуто выше, заключается в сильном влиянии штарковского уширения, которое должно сопровождаться нарастающим их расширением и перекрыванием радиолиний соседних уровней. Так, столкновение возбужденных атомов с электронами (так называемое кинетическое штарковское уширение) должно быть пропорционально 7-й степени значения главного квантового числа для однородной плазмы [3].

Уточнение этой закономерности позволило преодолеть казавшуюся недосягаемой возможность наблюдения более чем стократно возбужденных «радиоатомов». Новое теоретическое рассмотрение показало, что при соударениях высоковозбужденных

атомов с заряженными частицами происходит своеобразная компенсация влияния штарковского эффекта: очень близкие между собой соседние уровни возмущаются почти одинаково, так что разность энергий между возмущенными уровнями изменяется на несколько порядков меньше, чем сами уровни. Это позволило объяснить последующие результаты, когда были обнаружены радиолинии до значений  $n = 166$  [2]. И это было предельным значением для пересмотренной теории, поскольку штарковское уширение увеличивается так же и с частотой эмиссионного радиоизлучения.

В связи с этим экспериментальное наблюдение радиолиний при  $n = 220$  без достаточно сильного штарковского уширения привело к новой проблеме: стало необходимым определить действительные закономерности, управляющие штарковским уширением линий «сверхвозбужденных радиоатомов».

## 1.2. Решение проблемы штарковского уширения

Решение этой проблемы потребовало существенного усовершенствования средств наблюдения и организации исследований неоднородной области туманности Орион сразу на двух радиотелескопах в различных диапазонах волн.

С этой целью в 1968 г. радиотелескоп РТ-22 ФИАН был оснащен радиоспектрометром миллиметрового диапазона с квантовым парамагнитным усилителем на входе, настроенным на волну 8 мм, что наряду с усовершенствованием антенной системы повысило чувствительность спектральных измерений более чем в 10 раз (при этом на модернизированном телескопе впервые были зарегистрированы радиолинии водорода при  $n = 56$  и  $66$  на волне 8,23 и 13,5 мм соответственно).

Другим радиотелескопом при исследовании закономерности штарковского эффекта был 100-метровый радиотелескоп Института радиоастрономии Общества Макса Планка РТ-100, работавший на волне 3,3 см.

В результате проведенных экспериментов было найдено [2, 3], что наблюдаемая закономерность штарковского уширения радиолиний высоковозбужденных атомов пропорциональна электронной плотности среды и 4,4-й степени значения главного квантового числа:

$$\Delta\nu_{\text{шт}} \sim N_e n^{4,4}\nu,$$

и это находилось в хорошем соответствии с пересмотренной теорией уширения спектральных линий в неоднородной плазме.

## 1.3. Поиски предельно больших гиператомов

С разрешением проблемы штарковского уширения стал возможным поиск радиолиний в метровом и декаметровом диапазонах. С этой целью был использован крестообразный радиотелескоп метрового диапазона ДКР-1000 радиоастрономической станции ФИАН с антенным полотном  $1000 \times 1000$  м,

а также радиотелескоп декаметрового диапазона УТР-2 Радиоастрономического института Академии наук УССР с антенной размером  $1800 \times 900$  м.

В результате многолетней работы на радиотелескопе УТР-2 А.А. Коноваленко и Л.Д. Содин впервые зарегистрировали в 1979 г. спектральную линию поглощения высоковозбужденного атома углерода на частоте 26,13 МГц ( $n = 631$ , волна 11,5 м) в радиоисточнике Кассиопея А. Там же в последующих измерениях были обнаружены углеродные радиолнии с уровней  $n = 603, 611, 630, 640, 686$  и  $732$  на волнах от 10 до 18 м.

На радиотелескопе ДКР-1000 в совместных наблюдениях ученых ФИАН и ГАИШ были обнаружены еще четыре радиолнии углерода в диапазоне 3,56–6,12 м с уровней  $n = 427, 486, 538$  и 610–612. При этом интенсивность линий метрового диапазона оказалась вопреки теории ниже, чем на декаметровых волнах, в связи с чем для их обнаружения чувствительность аппаратных средств была поднята до величины, обеспечивавшей прием спектрального сигнала, составлявшего  $4 \cdot 10^{-4}$  от уровня сигнала в сплошном спектре. Заниженная интенсивность радиолний метрового диапазона оказалась обусловленной сложным неравновесным заселением соответствующих уровней.

#### 1.4. О верхней границе возбуждения атомов в космосе

Проведенные исследования [4, 5] показали, что в условиях Галактики атом как квантовая система может существовать до уровней возбуждения  $n \sim 1000$ . Существование высоковозбужденных атомов выше этого уровня становится невозможным вследствие разрушительного воздействия на них пронизывающего всю Галактику нетеплового магнитотормозного радиоизлучения.

#### 1.5. Размеры гиператомов

Как известно, «боровский радиус» атома в основном (невозбужденном) состоянии является одной из мировых констант:

$$a_0 = 0,53 \cdot 10^{-8} \text{ см.}$$

Размеры возбужденных атомов в зависимости от значения главного квантового числа определяются соотношением

$$a_n = a_0 n^2.$$

Поэтому размеры гигантских высоковозбужденных атомов с главным квантовым числом  $n = 1000$  — радиоатомов, излучающих в декаметровом диапазоне волн, составляют макроскопическую величину  $d \sim 0,1$  мм. В условиях космической среды, например с плотностью порядка  $10^4 \text{ см}^{-3}$ , среднее межатомное расстояние составляет 20 см, так что размеры гигантских атомов на два порядка меньше этого расстояния.

#### 1.6. Космическая радиоспектроскопия

Возможность исследования космоса по информации, получаемой радиоастрономическими мето-

дами при анализе рекомбинационных спектров радиоизлучения межзвездной среды, обусловила новое направление в космологии — космическую радиоспектроскопию.

Проведенные в свое время отечественными и зарубежными радиоастрономами измерения дали принципиально новые сведения [1, 2] о свойствах межзвездной среды по сравнению со сведениями, полученными традиционными оптическими методами наблюдения.

В межзвездной среде происходят многообразные процессы, связанные с воздействием на нее ультрафиолетового и рентгеновского излучений галактической короны и внегалактических объектов, а также остатков сверхновых звезд. На нее воздействуют космические частицы большой энергии и ударные волны, вызванные звездным ветром, столкновением межзвездных облаков, расширяющимися областями ионизованного водорода и сверхзвуковыми потоками газа, связанными с образованием звезд и взрывами сверхновых. Эти процессы разогревают межзвездный газ и приводят к возбуждению энергетических уровней составляющих его элементов с последующим излучением в широком спектральном диапазоне, в том числе и в радиодиапазоне, а также в обширной области непрерывного тормозного излучения в условиях, далеких от термодинамического равновесия.

Космическая радиоспектроскопия позволила выяснить очень широкий круг вопросов, связанных с теорией формирования звезд, со строением и эволюцией галактик, а также с внегалактическими явлениями. Полученные сведения использовались при разработке современной космологии.

Перечислим основные проблемы, которые были разрешены методами космической радиоспектроскопии.

Положение радиолний на частотной шкале определяется *массой химического элемента*. Так были отождествлены водород, гелий, углерод, сера, магний и некоторые другие элементы.

Интенсивность радиолнии (яркостная температура) свидетельствует о *распространенности элемента*. При сравнении интенсивностей радиолний различных элементов были получены данные о том, что после водорода наиболее распространенным элементом является гелий. Данные по распространенности гелия, составляющего 10% от водорода, были использованы *в модели происхождения Вселенной и в определении ее возраста*. Содержание углерода относительно водорода в областях СП составляет  $3 \cdot 10^{-4}$ .

По доплеровскому сдвигу радиолний определяются *скорости движения источников излучения и расстояния до них*. Измеренные в различных радиоисточниках лучевые скорости составляли от 20 до 200–400 км/с.

Важнейший параметр космической среды — *электронная температура* — получается из соотношения интенсивностей излучения в радиолниях водорода и в близлежащих участках непрерывного спектра в областях ионизованного водорода.

Температура галактических областей НП составляет от 4000 до 13000 К, а в областях СП не превышает 200 К. При этом была установлена важная закономерность: температура этих областей уменьшается с приближением к галактическому центру до 5000 К, что подтвердило гипотезу о том, что в центре Галактики идет интенсивный процесс звездообразования. Понижение температуры происходит там вследствие образования при термоядерных реакциях тяжелых элементов, являющихся хладагентами в этих условиях.

Другой важный параметр межзвездной среды — *электронная плотность* — может быть определен по штарковскому уширению радиолиний. Так, в туманности Орион электронная плотность в центре составляет  $1,5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ , уменьшаясь к периферии. В областях СП электронная плотность составляет примерно  $\sim 10 \text{ см}^{-3}$  (что соответствует плотности нейтральных атомов  $10^5 \text{ см}^{-3}$ ), в центре Галактики — также  $\sim 10 \text{ см}^{-3}$ , а в планетарной туманности NGC 7027  $\sim 5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ .

За пределами нашей Галактики наблюдалось несколько радиорекомбинационных линий водорода в неправильной галактике M82, расположенной за Магеллановыми облаками на расстоянии 3,3 Мпк. Температура газа составила там примерно 5000 К, а электронная плотность —  $10^2 \text{ см}^{-3}$ .

### 1.7. Рождение звезд

Исследование рекомбинационных радиолиний является в настоящее время единственным средством изучения начальных процессов в звездообразовании, поскольку сквозь густую непрозрачную для оптического излучения пыль радиоволны проходят без значительных потерь.

При образовании звезды вокруг нее образуется оболочка ионизованного водорода, которая под давлением исходящего звездного ветра начинает расширяться. По доплеровскому сдвигу рекомбинационного радиоизлучения этой оболочки определяется скорость ее расширения. Зная размеры газовой оболочки, можно определить время ее расширения и, соответственно, *возраст звезды*. Вместе с этим могут быть получены и основные физические параметры оболочки — ее температура и плотность, необходимые для описания процесса звездной эволюции.

Отметим в заключение этого раздела, что, по отзывам мировой научной общественности, отечественная наука внесла достойный вклад в разработку инструментальных средств радиоастрономии, в развитие космической радиоспектроскопии, а также в открытие гиператомов в космосе [1, 2].

## 2. Гиператомы в плотных средах

### 2.1. Моделирование сильно возбужденных сред

Земная атмосфера (как и космическая среда) находится под постоянным воздействием ближайшей звезды — Солнца, и непрерывные, меняющие-

ся во времени потоки лучистой энергии, солнечный ветер, а также космические лучи и метеориты вызывают изменение ее физических свойств, обуславливают процессы ее ионизации и образование ионосферных слоев. Сильное возбуждение атмосферной среды со значительным изменением ее локальных параметров происходит и при техногенном воздействии, например ударных волн, возникающих при мощных взрывах, а также при гиперзвуковом движении ракетно-космической техники.

В 1940–1960-х гг. в связи с разработкой атомной и ракетной техники одним из актуальнейших физико-технических направлений была физика ударных волн и высокотемпературных газодинамических явлений [3, 4]. В частности, тщательно изучался вопрос о расчетах термодинамических функций методом статистических сумм. При этом считалось, что в расчетах электронной статистической суммы достаточно учесть только несколько первых членов в этой сумме (в точных расчетах порядка 5–10), поясняя это тем, что в не слишком плотном газе электрону в атоме или ионе энергетически «выгоднее» оторваться, чем занять более высокий уровень возбуждения.

Другая аргументация исходила из того, что электрон, движущийся по удаленной орбите, размеры которой сравнимы с межатомным расстоянием в среде, по существу, не отличается от свободного электрона и столь высоковозбужденный атом не отличается от ионизованного атома.

В качестве экспериментального подтверждения этой идеи приводились факты, что в спектрах дуговых разрядов низкого давления не наблюдалось больше 5–10 спектральных линий водородной серии Бальмера и что даже в спектрах газовых туманностей, где плотность частиц не превышает порядка  $10 \text{ см}^{-3}$ , не наблюдается больше 50–60 бальмеровских линий [3].

### 2.2. Аномальные эффекты ослабления радиосигналов в ударных волнах и усиления в спутных плазменных потоках

При проведении ракетно-космических экспериментов как на зарубежных, так и на отечественных научно-исследовательских испытательных полигонах, оснащенных средствами космической радиолокации, процесс входа баллистических тел в атмосферу сопровождался неизвестными ранее радиофизическими эффектами [4].

На высотах от 65–50 до 15–10 км происходило нарушение радиосвязи с космическими аппаратами, прерывалось поступление телеметрической информации, а также возникало интенсивное отражение радиолокационных сигналов за баллистическими телами от спутных потоков, которое превышало фоновый уровень в десятки и сотни тысяч раз (на 40–60 дБ).

Одновременно на этом же участке траектории атмосферного спуска Е.С. Нектаровым в 1968 г. было обнаружено с помощью радиолокаторов, обо-

рудованных доплеровской спектроанализирующей аппаратурой, что амплитуда радиолокационных сигналов, отраженных от поверхности наблюдаемых объектов, постепенно уменьшалась в 100–10000 раз к высоте наибольшего торможения 20 км, а затем восстанавливалась к высоте 10 км, когда скорость уменьшалась примерно до звукового значения [5].

Эти эффекты оказались связанными с процессами взаимодействия радиосигналов с пристеночной плазмой и плазменным спутным потоком. Однако существующие на то время теоретические модели, основанные на традиционных классических представлениях о процессах поглощения электромагнитных волн в импедансной пристеночной плазме и их рассеяния на флуктуациях электронной плотности в ионизованном спутном потоке, никак их не объясняли. Попытки дать численные оценки величины проявления этих эффектов на основе существующих моделей приводили к существенно заниженным результатам (в десятки и тысячи раз), не говоря уже о некорректном и произвольном выборе ключевых констант в рассматриваемых моделях [4].

### 2.3. Квантовая модель рассеяния радиоволн в плотных средах

В 1970-х гг. Е.С. Нектаровым при сотрудничестве с отечественными учеными и специалистами была разработана и предложена альтернативная модель обнаруженных эффектов как квантовая модель рассеяния радиоволн в веществе со сверхвозбужденными атомами [5].

Суть этой модели заключалась в том, что для объяснения сильного поглощения радиолокационных сигналов в поле гиперзвукового течения за ударной волной рассматривалась *квантовоэлектронная модель* взаимодействия электромагнитного излучения с нормально заселенной возбужденной средой сжатого ударной волной высокотемпературного потока, где температура на высоте около 40 км может достигать 7000 К, а электронная концентрация постепенно нарастает в релаксационных слоях за ударной волной до  $10^{15}$  см<sup>-3</sup> у поверхности тела.

Как показано ниже, в переходной зоне между плазмой и набегающим воздушным потоком за фронтом ударной волны на высотах около 60 км возникает запирающий резонансное излучение слой сильно возбужденных атомов, в котором практически все атомы в результате рекомбинации заряженных частиц оказываются в высоковозбужденных состояниях [6]. И при нормальной заселенности это обуславливает действие квантового механизма поглощения внешнего резонансного электромагнитного излучения.

Для объяснения отражения радиолокационных сигналов от ионизованного спутного потока была предложена [5] *мазерная модель* усиления электромагнитного излучения в инверсно заселенной среде расширяющегося за баллистическим телом потока, в котором значения температуры и электронной концентрации вдоль потока ниспадают от

5000 К и соответственно от  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>. При этом наиболее вероятная область мазерного переизлучения радиосигналов в неоднородной плазме, как утверждает теория этого эффекта, находится в зонах отклонения от локального термодинамического равновесия при значениях электронной концентрации ниже  $10^6$  см<sup>-3</sup>.

Как показали радиолокационные измерения, такие зоны оказались в конечной области спутного потока, заторможенной до околосвуковых значений. При этом вследствие рассеяния излучения на флуктуациях плотности возбужденного потока переизлученные высоковозбужденными атомами радиолокационные сигналы могли возвращаться к антенне приемного устройства.

Однако самым проблемным оставался вопрос, *а могут ли существовать в таких сильно возбужденных плотных средах высоковозбужденные атомы при значениях главного квантового числа 100–200*, с этой целью и развивались радиолокационные наблюдения в сантиметровом-дециметровом диапазоне на радиолокационных станциях космического назначения ЦСО-С РИАН, РПЦ-200 и С-300 ОКБ «АЛМАЗ», РТН и «Аргунь» ОКБ «Вымпел».

### 2.4. Закономерность существования высоковозбужденных атомов в сложных средах и земной атмосфере

В радиоастрономических наблюдениях в условиях сильно разреженной межзвездной среды экспериментально была установлена возможность наблюдения излучения водородоподобных атомов с уровней  $n \sim 1000$ . И это нашло свое теоретическое обоснование в качестве максимально возможного значения существования таких радиоатомов.

Соотношение между максимально возможной степенью возбуждения высоковозбужденных атомов  $n_{\max}$  и электронной плотностью  $N_e$  в межзвездной среде было предложено А. Унзольдом [7]:

$$n_{\max} = [(6a_0)^{-1}(4\pi N_e/3)^{-1/3}]^{1/2},$$

где  $a_0$  – «боровский радиус» атома.

Однако это соотношение, определяя возмущение кулоновского потенциала плазмой, не учитывает роли кинетических процессов в сложных средах с сильно возбужденными атомами.

В 70-е гг. XX в. были проведены многочисленные исследования по кинетике субатомных столкновений, получены численные результаты значений вероятности взаимодействия таких частиц при различных условиях. Это позволило установить *закономерность существования высоковозбужденных атомов в сложных средах* в зависимости от параметров состояния среды. Такая закономерность была найдена Е.С. Нектаровым в 1977 г. [8]:

$$n_{\max} = [h(m_e a_0^2 / \tau_a)^{-1}]^{1/3}.$$

Это соотношение получается при сравнении минимально возможного времени существования возбужденного атома, определяемого периодом обращения внешнего электрона

$$\tau_e = h^{-1} m_e a_0^2 n^3,$$

и соответствующего времени динамического существования возбужденного атома, выражаемого обратной величиной частоты ионизационных столкновений

$$\tau_a \equiv \nu_{\text{ион}}^{-1}.$$

По существу, полученная закономерность показывает, что кроме плотности и скорости частиц среды решающее значение для степени возбуждения атомов имеет величина вероятности ионизации возбужденных атомов при столкновениях с частицами среды.

Наибольшая вероятность ионизации возбужденных атомов (порядка  $10^{-10} \text{ см}^2$ ) оказывается при столкновениях с электронами; при столкновениях с ионами — порядка  $10^{-18} \text{ см}^2$ ; при столкновениях с возбужденными молекулами — от  $10^{-11}$  до  $10^{-16} \text{ см}^2$ ; при столкновениях с атомными частицами — от  $10^{-16}$  до  $10^{-25} \text{ см}^2$ .

Проведенные численные оценки по этим данным показали, что *у поверхности Земли* могут существовать высоковозбужденные атомы при значении главного квантового числа  $n \sim 100$ , а на высоте 60 км в земной атмосфере, выше которой простирается ионосфера, могут существовать  $n \sim 1000$  и обуславливать сильное поглощение (до 40 дБ) радиоволн при увеличении солнечной активности [9].

С такой же максимальной степенью возбуждения  $n \sim 1000$  могут находиться атомы и в низкотемпературной плазме при  $T_e \sim 1$  эВ с электронной плотностью  $\sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$  в периферийных областях термоядерных устройств при плотности среды  $10^{11} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

## 2.5. Гиператомы в термоядерных системах

В 1980-е гг. в Институте ядерного синтеза РНЦ «Курчатовский институт» проводились эксперименты по взаимодействию плазменных потоков с нейтральным газом с целью поиска способов снижения тепловой нагрузки на приемные диверторные устройства термоядерных установок типа «Токамак».

Работы по моделированию этих процессов проводились на линейных установках пучково-плазменного разряда, разработанных под руководством В.В. Шапкина. При местной подаче к диверторным пластинам холодного нейтрального газа на этих установках было обнаружено такое новое явление, которое теперь известно как *marfe* — аномально сильное *2000-кратное снижение тепловой нагрузки* на приемные пластины, которое сопровождалось отрывом плазмы от стенки и переходом рекомбинации со стенки в объем камеры, аномальной диффузией электронов поперек магнитного поля (намного превышающей бомовскую диффузию), а также *возникновением интенсивного резонансного излучения холодного нейтрального газа в ультрафиолетовой части спектра* — все это не находило объ-

яснения в принятых моделях радиационно-конвективных неустойчивостей в плазме.

На одной из установок такого типа «Лента» при объемном электрическом разряде на высокоэнергетический электронный пучок диаметром 1–3 см мощностью до 1,5 кВт создавался 1,5-метровый поток гелиевой плазмы диаметром 16 см. Плотность плазмы составляла  $10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , электронная температура могла достигать 10–20 эВ. При подаче к приемной пластине холодного нейтрального гелия с плотностью, превышающей  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ , возникает область взаимодействия нейтрального газа с плазменным потоком протяженностью около 1 м. При этом на расстояниях до 40 см от приемной пластины электронная температура спадала до 0,3 эВ (при давлениях, превышавших 15 мторр), что свидетельствовало о сильной диссипации энергии плазменного потока в области взаимодействия.

Параметры плазмы измерялись стационарными ленточными зондами, измерение оптических и СВЧ-спектров осуществлялось комплексом на базе монохроматора МДР-6 в диапазоне 2500–7300 Å и широкополосного низкочастотного усилителя в дециметровом диапазоне 2,4–3,8 ГГц.

## 2.6. Оптические и СВЧ-спектры высоковозбужденных атомов гелиевой плазмы при взаимодействии с нейтральным газом

Впервые на особую роль сильновозбужденных атомов не только в атмосферных ударных волнах и спутных потоках, но также в теплофизических и излучательных процессах, протекающих в реагирующей низкотемпературной плазме термоядерных устройств, обратили внимание Е.С. Нектаров и В.В. Шапкин.

Б.И. Хрипуновым и В.Б. Петровым были проведены многолетние тщательные исследования и спектрометрические измерения в области взаимодействия плазменного потока с нейтральным газом на установках пучково-плазменного разряда.

Исследование излучения стационарного плазменного потока при давлениях 1–5 мторр ( $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) показало, что спектр его излучения находится в *оптическом* диапазоне 3889–7281 Å (соответствующем переходам между уровнями  $n \leq 5$ ) и состоит из линий нейтрального гелия, обычно наблюдаемых при значениях электронной температуры 2–8 эВ, а СВЧ-излучение заполняет всю регистрируемую полосу усилительного устройства от 2,4 до 3,8 ГГц.

При подаче в зону взаимодействия нейтрального гелия, начиная с *порогового* значения плотности 15 мторр ( $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ), характер спектра реагирующей среды (измерявшегося на расстоянии 50 см от приемной пластины и в 3–4 см от центральной оси камеры) изменяется радикальным образом: в остывающей до электронной температуры 0,5–0,1 эВ плазме, находящейся в более плотной среде нейтрального газа при давлении 17 мторр, начинают

наблюдаться интенсивные линии, соответствующие переходам с уровней  $n = 10-14$  (с орбитальным квантовым числом  $l = 0; 1$ ), а при давлении 70 мторр – с уровней  $n = 20-22$  (при  $l = 2$ ), которые расположены в ближней ультрафиолетовой области от 3200 до 3700 Å!

Анализ спектрограмм показывает, что повышение давления приводит к появлению и нарастанию интенсивности свечения линий нейтрального гелия с уровней, вплотную примыкающих к границе сплошного спектра, потенциал возбуждения которых отличается от потенциала ионизации менее чем на 0,03 эВ; например, энергия возбуждения верхнего уровня перехода  $20d \rightarrow 3D$  составляет 24,55 эВ, тогда как потенциал ионизации атомов гелия – 24,58 эВ. Вместе с тем в спектре появляются даже линии ионов HeII, интенсивность которых также нарастает с увеличением давления.

Как будет показано ниже, пороговый характер возникновения аномального излучения при переходах между уровнями  $n > 10$  обуславливается достижением *критического состояния* среды в области взаимодействия потоков, которое возникает именно при плотности, превышающей значение  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ .

В то же время обусловленное циклотронной неустойчивостью плазменных колебаний в неоднородном магнитном поле собственное интенсивное СВЧ-излучение плазмы во всей регистрируемой усилителем полосе 2,4–3,8 ГГц, как показали измерения, оказывается ослабленным, по крайней мере, до уровня собственных шумов усилителя.

Очевидно, этот эффект должен быть связан с образованием нормально заселенной поглощающей СВЧ-излучение среды с возбужденными атомами до уровней  $n \sim 200$ , как это имеет место в атмосферных ударных волнах. Параллельным каналом поглощения СВЧ-излучения в диапазоне 1,5–10 ГГц могут быть переходы между вырожденными по орбитальным квантовым числам подуровнями  $n1 \sim 15 \dots 201$  [10]. Однако сравнение интенсивностей поглощения по обоим каналам не проводилось.

Нормальный характер заселенности возбужденных уровней подтверждается спектром рекомбинационного излучения дейтериевой плазмы тороидальной установки ASDEX-U в режиме отрыва плазмы от дивертора, имеющим ниспадающую интенсивность линий от соседних переходов с  $n = 6 \rightarrow 2$  до  $n \geq 15 \rightarrow 2$  [11].

Более пестрый спектральный портрет имеет реагирующая с собственным нейтральным газом гелиевая плазма, в частности при давлении 39 мторр:

- 3447,57 Å:  $6p \rightarrow 1P0$ ;
- 3498,65 Å:  $13d \rightarrow 3D$ ;
- 3512,51 Å:  $12d \rightarrow 3D$ ;
- 3530,49 Å:  $11d \rightarrow 3D$ ;
- 3554,40 Å:  $10d \rightarrow 3D$ ;
- 3587,30 Å:  $9d \rightarrow 3D$ ;
- 3613,64 Å:  $5p \rightarrow 1P0$ ;
- 3634,20 Å:  $8d \rightarrow 3D$ .

Общей закономерностью спектров излучения в ближнем ультрафиолете является ниспадающий характер интенсивностей в сериях  $8 \dots 13d \rightarrow 3D$

и  $5 \dots 6p \rightarrow 1P0$ , что свидетельствует о нормальной заселенности уровней возбуждения атомов в реагирующей плазме.

Как уже отмечалось выше, с увеличением давления нейтрального газа интенсивность спектральных линий реагирующей плазмы возрастает во всех диапазонах от ультрафиолетового до радиодиапазона.

Анализ спектрограмм показывает, что повышение чувствительности и расширение регистрируемой полосы спектрометрической аппаратуры позволят установить действительный спектральный состав реагирующей плазменной среды.

Несомненный интерес представляет также исследование взаимодействия реагирующей плазмы с внешним электромагнитным излучением, что особенно важно для задач, решаемых радио- и оптической локацией.

Теоретические исследования результатов экспериментов по взаимодействию потока гелиевой плазмы с нейтральным газом, проведенные в Институте водородной энергетики и Институте ядерного синтеза под руководством Г.В. Шолина при участии Е.С. Нектарова, показали, что эти эффекты могут быть объяснены с помощью новой физической модели, основанной на учете процесса накопления в пограничной области «плазма–газ» сильно возбужденных атомов с главным квантовым числом  $n > 10$  и их резонансного излучения. Вместе с тем, как показывают результаты математического моделирования, на границе плазменного и нейтрального потоков устанавливается ионно-звуковой барьер, на котором и происходит отрыв плазменного потока, где плазма, сильно снижая свое энергосодержание, отдает тепловую энергию частиц на излучение сильно возбужденных атомов в пограничной области [12].

## 2.7. Новая модель взаимодействия плазмы с нейтральным газом

Новая модель взаимодействия плазмы с нейтральным газом разработана на основе достижений последнего времени в области физико-химической кинетики плазменных процессов [13].

Особое внимание в этой области обращается на свойства *неравновесных процессов*, где температура электронов и колебательная температура молекул значительно превышают температуру сложной газовой среды, причем низкая поступательная температура нейтрального газа в области взаимодействия затормаживает обратные реакции и обеспечивает устойчивость образованных в неравновесной плазме продуктов.

В частности, концентрация электронов в реакционной зоне неравновесных систем оказывается на много порядков больше величины, определяемой по формуле Саха для равновесных систем. При этом исключительное многообразие физико-химических механизмов в процессах превращения вещества, энергии и излучения в неравновесной плазме требует детального исследования всех возможных путей их взаимодействия при математическом моделировании этих процессов.

В рассматриваемой нами проблеме «главным продуктом» в сложной неравновесной среде на границе взаимодействия плазмы и газа оказывается аномально высокая концентрация сильновозбужденных атомов вследствие высокой плотности резонансного ультрафиолетового излучения и широкого спектра низкотемпературных электронов в этой области.

Полный и адекватный всем физическим процессам учет превращений, происходящих в неравновесных условиях на границе взаимодействия плазмы и газа, нашел свое выражение в системе кинетических уравнений, решение которых позволило найти ответы на поставленные в новой модели далеко не ординарные вопросы.

До сих пор считалось, что взаимодействие плазменных и нейтральных потоков в разреженных средах с корональным распределением не может существенно влиять на состояние такой среды из-за ничтожной концентрации возбужденных атомов, имея в виду, что радиационная скорость распада уровней  $A_n \sim 10^8 \text{ с}^{-1}$  в такой среде намного превышает столкновительную скорость  $v_n \approx N_e \langle \sigma_{nj} v \rangle \sim 10^2 - 10^4 \text{ с}^{-1}$ . В таком случае заселение возбужденных уровней должно быть пренебрежимо малым.

Однако в условиях проводившихся экспериментов корональная модель оказывается неприменимой по двум обстоятельствам. Во-первых, в низкотемпературной среде  $T \sim 0,1 \text{ эВ}$  при плотности нейтрального потока  $N_0 \geq 10^{14} \text{ см}^{-3}$  коэффициент поглощения резонансного излучения возбужденных атомов, как показали проведенные оценки, составляет не менее  $\sim 0,3 \text{ см}^{-1}$ , так что оно оказывается *запертым* в пограничном слое между плазмой и газом толщиной менее 3 см. Во-вторых, скорость изменения концентрации атомов вследствие диффузии при характерной толщине пограничного слоя в несколько сантиметров сравнима со скоростью их столкновительного возбуждения или ионизации. Таким образом, в этой области создаются условия для накопления возбужденных атомов (с энергией  $E_n$ ), связанных резонансными переходами с основным состоянием, и установления их распределения, близкого к равновесному с температурой  $T_e$ , определяемой электронами

$$N_n \sim N_0 n^2 \exp(-E_n / T_e).$$

Эта качественная картина затем была детализирована. Были подробно исследованы процессы переноса резонансного излучения, а также переноса энергии возбуждения и кинетической энергии электронов, что позволило получить новые результаты [14, 15].

Итак, возбужденные атомы нейтрального потока со стороны дивертора или фронта ударной волны приходят в столкновение с электронами плазмы и резонансное излучение возбужденных атомов, выходящее в направлении плазменного потока, заполняет пограничную область и накапливается там, существуя без поглощения, поскольку согласно уравнению Саха в местных равновесных

условиях концентрация нейтральных атомов ничтожна по сравнению с ее значением в окружающем газе.

Резонансное излучение, выходящее в противоположном направлении к дивертору или к фронту ударной волны, напротив, испытывает сильное поглощение, и на границе «газ–плазма» возникает запирающий слой, который при достаточной плотности газа может рассматриваться как идеально отражающий. Толщина этого слоя связана с глубиной проникновения резонансного излучения в газ  $l_{ef}$ , которая зависит от величины доплеровского уширения линий и, следовательно, связана с распределением температуры нейтральных атомов в переходном слое.

Приравнивая изменение температуры нейтральных атомов силе трения между электронами и ионами, получаем закономерность возрастания температуры атомов от внешней границы (от поверхности приемной пластины или от фронта ударной волны) к границе раздела «газ–плазма» и далее внутрь плазменного потока. В нулевом приближении глубина взаимного проникновения заряженных и нейтральных частиц определяется длиной пробега ионов  $l_0$ . Глубина обратного проникновения  $l_{ef}$  атомов в плазму уменьшается вследствие процессов ионизации электронным ударом.

Поскольку взаимное проникновение пограничных слоев при сохранении полного числа частиц по глубине проникновения приводит к уменьшению локальной концентрации нейтральных атомов в отношении длин  $l_{ef} / l_0$ , то именно на этих размерах будут происходить процессы аномального заселения возбужденных состояний атомов и изменение термодинамических свойств нейтрального газа.

Для описания стационарной структуры переходного пограничного слоя между плазмой и газом с учетом роли излучения исследовалась следующая система уравнений.

### *Уравнения непрерывности*

Одно уравнение для нейтралов (с описанием изменения состояния возбуждения атомов под влиянием излучения и столкновений с электронами) и второе – для заряженной компоненты. Из уравнений непрерывности в первом приближении вытекает уравнение Саха, в котором роль основного состояния играет первый возбужденный уровень. Его заселенность поддерживается резонансным излучением, а распределение заселенностей остальных состояний контролируется локальным значением температуры электронов.

### *Уравнения переноса тепла*

Уравнения переноса тепла, характеризующие как кинетическую энергию заряженной компоненты, так и внутреннюю энергию нейтральной компоненты с учетом как резонансного излучения, так и рекомбинационного континуума в предположе-



нии, что процессы обычной теплопроводности не играют заметной роли для тяжелых частиц, поскольку в переходном слое почти все атомы находятся в возбужденном состоянии, а скорость их перемещения чрезвычайно мала.

Из уравнений переноса тепла следует *чрезвычайно важный вывод*: в области, где локальная температура электронов  $(T_e)_{loc}$  уменьшается от начальной до значения  $\sim 0,1$  эВ, степень ионизации плазмы при плотности среды взаимодействия  $N_0 \geq 10^{14} \text{ см}^{-3}$  оказывается порядка 1 (!) при учете роли резонансного излучения, тогда как без такого учета степень ионизации составила бы лишь  $10^{-7}$ .

Таким образом, резонансное излучение смещает условие равновесия в сторону полной ионизации при низкой температуре и, соответственно, изменяется заселение высоковозбужденных уровней вплоть до состояний с максимальным возможным главным квантовым числом  $n \sim 1000$ .

Подчеркнем при этом, что наличие в среде с высоковозбужденными атомами высокого внутреннего трения между частицами, которое обусловлено увеличением эффективного сечения взаимодействия  $\sigma_{ae}$  таких атомов с частицами пропорционально 4-й степени главного квантового числа

$$\sigma_{ae} \sim \sigma_{ai} \sim a_0^2 n^4,$$

требует, с термодинамической точки зрения, при описании свойств такой среды перехода от уравнения идеального газа к уравнению Ван-дер-Ваальса и необходимости учета собственного объема гигантских высоковозбужденных атомов. Возбуждение высоких уровней, при которых размер возбужденных атомов сравнивается с межчастичным расстоянием в среде:

$$a_0 n^2 \sim N_0^{-1/3},$$

соответствует существованию *критической*, непроницаемой для других субатомных частиц области газа в пограничном слое взаимодействия плазменного и нейтрального потоков.

При концентрации нейтрального газа  $N_0 \geq 10^{14} \text{ см}^{-3}$  достаточным требованием для образования пограничного слоя в критическом состоянии будет соответствие возбуждения на уровне  $n \geq 10$ , обеспечивающие возможность наблюдения резонансного излучения как в оптическом, так и в радиодиапазоне.

## 2.8. Новые критические явления в системе «газ–плазма»

Явления, происходящие вблизи критических точек параметров состояния как в простых веществах, так и в сложных средах и сопровождающиеся специфическими аномальными проявлениями их физических свойств, в настоящее время широко известны: от критической опалесценции в системе «жидкость–пар» до возрастания магнитной восприимчивости и диэлектрической проницаемости в ок-

рестности точек Кюри в ферромагнетиках и сегнетоэлектриках и многие другие эффекты.

Эти явления связаны с аномальным ростом флуктуаций параметров и их взаимодействием, а критические показатели в этих явлениях описываются зависимостью термодинамических величин от температуры, давления, плотности и др. вблизи критических точек или точек фазового перехода второго рода. Иногда целая область параметров, таких как плотность и концентрация, намагниченность и поляризация, представляют собой критическую область состояний сложной среды.

Разработанная новая модель взаимодействия плазменного и нейтрального потоков позволила установить новые критические явления в системе «газ–плазма».

Ранее считалось, что такая система является не взаимодействующей. Однако обнаруженные аномальные радиофизические и теплофизические эффекты в таких, как оказалось, подобных средах, какими являются гиперзвуковые потоки у поверхности летательных аппаратов в атмосфере и потоки нейтрального и ионизованного гелия у диверторов в термоядерных устройствах, указывают на то, что при заданных термодинамических условиях существует целая область значений плотности в таких средах (начиная от значений 15 мторр и выше), когда при взаимодействии этих потоков проявились неизвестные ранее эффекты аномально сильного поглощения внешнего электромагнитного излучения за ударной волной, набегающей на поверхность гиперзвукового тела, и аномально большого снижения тепловых нагрузок на диверторы термоядерных устройств.

Причина этих явлений заключается в увеличении внутреннего трения в среде при взаимодействии этих потоков, сопровождающегося аномально высоким (в  $10^7$  раз!) накоплением сильно возбужденных атомов, которое обуславливает аномально сильное поглощение электромагнитного излучения в такой среде с одновременным преобразованием кинетической (тепловой) энергии частиц плазмы в ультрафиолетовое излучение, снимающее тепловые нагрузки на поверхности. При этом критическим параметром проявления таких эффектов оказывается плотность смешанной среды, значение которой составляет порядка  $10^{14} \text{ см}^{-3}$  при температурах ниже 1 эВ.

Таким образом, область взаимодействия газового и плазменного потоков при указанных значениях параметров находится в специфическом критическом состоянии, которое обуславливает проявление описанных выше аномальных эффектов.

## 2.9. Новое уравнение критического состояния «газ–плазма»

Как известно, уравнение состояния реального  $N$ -частичного газа описывается уравнением Ван-дер-Ваальса:

$$(p + N^2 a V^{-2})(V - Nb) = NkT,$$

где  $p$  – давление;  $V$  – скорость;  $T$  – температура; второе слагаемое первой скобки выражает внутреннее давление, а второй член во второй скобке представляет учетверенный объем молекул газа.

Представив собственный объем возбужденных атомов в виде

$$b \sim \frac{4}{3}\pi a_0^3 n^6,$$

можно предложить новую редакцию уравнения Ван-дер-Ваальса для описания критического состояния сложной среды, где происходит фазовый переход от газа к гиператомной плазме:

$$P_{\max} = RT \left[ V - \frac{8}{3}\pi h^2 m_e^{-2} a_0^{-1} N (\Sigma p \langle \sigma v \rangle)^{-2} \right]^{-1} - a N^2 V^{-2}.$$

В заключение этого раздела следует отметить, что новая модель взаимодействия плазменных и нейтральных потоков с ювелирной точностью позволяет описывать и рассчитывать микропроцессы в таких сложных средах.

## 2.10. Конденсированные гиператомные среды

Радиофизические эффекты, связанные с эмиссией и поглощением электромагнитного излучения в космосе и земной атмосфере, представленные выше, описывались с позиций существования в этих средах *свободных* сильновозбужденных атомов.

В 1980-е гг. Э.А. Маныкиным с сотр. была предложена новая концепция рассмотрения газовых сред, состоящих из сильновозбужденных атомов и молекул, которая была основана на представлениях физики твердого тела об электронно-дырочном состоянии конденсированных экситонов – элементарных возбуждений в полупроводниках [16, 17].

Существование металлоподобной фазы в полупроводниках было предсказано Л.В. Келдышем в 1968 г. Такая водородоподобная электронно-дырочная Ферми-жидкость наблюдалась и в экспериментах. Теоретическое описание свойств такой среды было предложено в 1977 г. Т. Райсом, а также Дж. Хенселом, Т. Филлипсом и Г. Томасом.

Взаимодействие между сильновозбужденными атомами в достаточно плотных средах обуславливает качественное изменение структуры и свойств среды: образуется энергетически более предпочтительное конденсированное состояние из «коллективизированных» внешних электронов возбужденных атомов и молекул (часто именуемое «ридберговским» состоянием). Такое состояние становится возможным при выполнении условия Мота:

$$N_n^{4/3} a_n \geq 1,$$

которое соответствует существованию критического состояния сильно возбужденной среды.

Расчеты параметров таких сред, проводившиеся в соответствии с теорией функционала плотности при использовании концепции псевдопотенциала

возбужденных атомов, указывают на возможность существенного изменения физических свойств этих сред: предсказывается значительное увеличение времени их существования, возрастание диэлектрической проницаемости, значительное увеличение проводимости, что может быть использовано для получения высокотемпературной сверхпроводимости, а также изменение других параметров.

Как показывают расчеты, время существования конденсированных состояний, возбужденных выше 13-го уровня, может составлять несколько часов, а при еще более высоких степенях возбуждения может быть неограниченно большим вследствие пространственного разнесения начальных и конечных состояний внешних электронов и образования между ними широкого потенциального барьера.

Это находит экспериментальное подтверждение в существовании долгоживущих образований в натуральных условиях, которые наблюдаются радиолокационными средствами в виде многочасовых отражений от областей, образованных в виде протяженных шлейфов за ионно-плазменными двигателями, баллистическими телами, а также при мощных взрывах в атмосфере. При этом наблюдения в дециметровом диапазоне свидетельствуют о степени возбуждения таких гиператомных сред до значений главного квантового числа порядка 200, а также о существовании возбуждений, вырожденных по орбитальному квантовому числу.

Эксперименты в лабораторных условиях по наблюдению конденсатов высоковозбужденных атомов цезия проводились в 1990–1991 гг. Аманом, Петерсоном, Холмлидом, Свенссоном, Лунгреном, Линдрозом.

Методом времяпролетной масс-спектрометрии наблюдались кластеры – сгустки высоковозбужденных атомов цезия, содержавшие около 10 000 атомов. Было обнаружено существование электрического сопротивления такой среды при удельном сопротивлении конденсата порядка  $10^{-3} \dots 10^{-2}$  Ом·м.

## 2.11. Шаровая молния

Одним из интересных приложений теории конденсированных сильновозбужденных сред является возможность описания некоторых физических свойств такого феномена атмосферного электричества, как шаровая молния.

Как известно, шаровая молния, возникающая чаще всего во время сильных гроз, представляет собой парящую в воздухе, легко подвижную, светящуюся холодным излучением сферу низкотемпературной плазмы диаметром 30 см. Примерно через 10 с своего существования она распадается, как правило, с сильным хлопком и часто сопровождается возгоранием окружающих предметов.

Исследованиям различных моделей и процессов, происходящих в шаровой молнии, посвящено много публикаций. В последнее время проводятся исследования маломощных микроволновых разрядов при атмосферных условиях, сопровождающихся возникновением локализованных плазменных

образований сферической формы размером около 5 см. Энергосодержание таких образований соответствует 0,5–1,5 кВт поглощенной СВЧ-мощности, что позволяет моделировать некоторые процессы, происходящие в шаровой молнии [18].

Было установлено, что плотность плазмы в таких образованиях составляет  $10^{12}$ – $10^{13}$  см<sup>-3</sup> при температуре от 2500 до 4000 К, которая поддерживается потоком СВЧ-мощности через поверхность плазмоида от 5 до 50 Вт/см<sup>2</sup> при удельной поглощаемой мощности от 5 до 50 Вт/см<sup>3</sup>. При этом глубина скин-слоя составляет 1–3 см, что соответствует радиусу плазмоида, а потенциал его составляет незначительную величину +5 В относительно металлической поверхности или +0,05 ... 0,07 В относительно диэлектрической стенки. Скорость циркуляционных потоков в плазмоне также небольшая и составляет 0,3 м/с. В свободном полете плазмод поднимается со скоростью около 0,5 м/с.

При введении в камеру мощности более 1,5 кВт плазмоды существуют стационарно по несколько часов, при этом их излучательные потери незначительны по сравнению с теплопроводными и конвективными потерями на стенке разрядной камеры. Напряженность СВЧ-поля максимальна на поверхности плазмоида и убывает к его центру. При прекращении подачи СВЧ-мощности угасание его свечения происходит по экспоненциальному закону и составляет характерное время 0,1 с (в условиях ограниченного времени движения между стенками камеры).

Гиператомная модель шаровой молнии позволяет объяснить такие ее физические свойства, как продолжительное существование, устойчивость и легкая подвижность.

Проблема продолжительного существования может быть решена, если допустить, что каркас шаровой молнии образуют атомы, имеющие более чем 13-кратную степень возбуждения, поскольку, как уже упоминалось, время существования таких возбуждений может превышать несколько часов. Вместе с тем факт энергетического взаимодействия шаровой молнии с СВЧ-излучением свидетельствует о том, что уровень возбуждения атомов в ее среде может превышать 200-кратное значение.

Концентрация сильновозбужденных атомов в атмосферных условиях при температуре около 3000 К, вычисленная методом статистических сумм при  $n \sim 10$ , может составить  $10^{13}$ – $10^{14}$  см<sup>-3</sup>, тогда как в соответствии с новой моделью взаимодействия плазмы с нейтральным газовым потоком, всасываемым плазмодом через нижний центральный канал, концентрация сильновозбужденных атомов в шаровой молнии составляет значение порядка плотности ее среды, т.е.  $\sim 10^{18}$  см<sup>-3</sup> при  $n \sim 1000$ .

Непродолжительное время существования шаровой молнии в природных условиях, очевидно, связано с тем, что гиператомный конденсат является достаточно «рыхлым» образованием, так что реальный механизм распада высоковозбужденных состояний в шаровой молнии может быть обусловлен происходящими в ней химическими реакциями

при возможности легкого проникновения в ее объем частиц окружающей среды.

Устойчивость шаровой молнии определяется ламинарными циркуляционными потоками внутри плазмоида, а также поверхностным натяжением конденсированной гиператомной среды, обусловленным энергией связи атомов в конденсате. Для 14-кратно возбужденной среды значение поверхностного натяжения составляет около 0,06 дин/см при энергии связи около 0,1 эВ, что обеспечивает устойчивость шаровой молнии в окружающей среде с температурой до 1000 К.

Легкая подвижность шаровой молнии объясняется значительно меньшей плотностью гиператомного конденсата по сравнению с плотностью окружающей среды: равновесная плотность 14-кратно возбужденного конденсата на два порядка ниже плотности окружающей среды при нормальных условиях.

Конечно, остается еще много невыясненных вопросов, связанных с природой и свойствами этого и многих других загадочных и завораживающих внимание явлений, и наша цель — привлечь пытливых молодых ученых к разрешению этих таинственных явлений природы.

### 3. Гиператомные технологии

#### 3.1. Теплофизические технологии

Для современных и перспективных термоядерных реакторов, таких как «Токамак», «ITER», воздействие высоких тепловых нагрузок на приемные пластины диверторного устройства является одной из наиболее серьезных научно-исследовательских и инженерных проблем. Необходимость стационарного отвода огромного потока тепловой энергии, выделяющейся в плазме при термоядерных реакциях, ставит задачу поиска новых материалов и конструкций, которые помогли бы разрешить эту проблему. Аналогичная задача стоит также при поиске способов снятия больших тепловых нагрузок с поверхности космических аппаратов при движении в планетарных атмосферах.

Результаты исследований в РНЦ «Курчатовский институт» процессов взаимодействия плазменных потоков с нейтральными газовыми потоками позволяют подойти к выработке практических рекомендаций по созданию инженерных устройств на основе *теплофизических эффектов* в рабочих средах с сильновозбужденными атомами, способных снижать в 2000 раз огромные тепловые нагрузки на конструкции термоядерных устройств и космических аппаратов. А разработанная физическая модель этих процессов позволяет ясно представлять и рассчитывать микропроцессы, происходящие в области взаимодействия таких потоков.

#### 3.2. Радиофизические технологии

Другую возможность открывает применение инженерных устройств на основе *радиофизических эффектов* в средах с сильновозбужденными

атомами для усиления или ослабления электромагнитного излучения [19].

Выше были приведены результаты проявления таких эффектов в ударных волнах и спутных плазменных потоках при радиолокационных наблюдениях за движением космических аппаратов в земной атмосфере.

Инженерная реализация квантовых радиофизических эффектов в искусственных средах с сильновозбужденными атомами была осуществлена в научно-исследовательских работах, проведенных в 1980-е гг. в ЦНИРТИ и ЦАГИ, а затем воплощена в 1990-х гг. в опытно-конструкторских разработках ОКБ им. Сухого и ЛИИ им. Громова. Такие среды позволяют уменьшать радиовидимость летательных аппаратов в 100 раз, сокращая почти вдвое дальность их обнаружения [20].

### 3.3. Квантоэлектронные устройства

На основе упомянутого выше способа преобразования электромагнитного излучения ведутся работы по изысканию искусственных сред на основе сильновозбужденных атомов с целью создания широкоспектральных и широкополосных устройств генерации и усиления электромагнитного излучения. Первые образцы таких генерирующих устройств были созданы в ЦНИРТИ под руководством Р.А. Пустынского, а работы по созданию широкополосных усилителей в искусственных плазменных средах проводятся в ИЯС РНЦ «Курчатовский институт» под руководством В.В. Шапкина, Е.С. Нектарова, К.И. Хрустачева.

### 3.4. Перспективные работы

Дальнейшие перспективные направления по применению гиператомных сред и технологий находятся помимо упомянутых направлений также в области исследования плазмохимических реакций и взаимодействия таких сред с поверхностью тел, а также во многих других областях, включая проводимые под руководством Г.В. Шолина работы по моделированию солнечной хромосферы и взаимодействия потоков солнечных космических лучей и солнечного ветра с земной ионосферой. Исследуется возможность создания устройств высокотемпературной сверхпроводимости.

### Заключение

Основополагающие работы в области гиператомной физики по обнаружению радиоастрономическими средствами высоковозбужденных атомов в космосе, по обнаружению радиолокационными средствами эффектов взаимодействия сильновозбужденных атомов с внешним электромагнитным излучением в земной атмосфере, а также научно-прикладные работы, выполненные отечественными учеными и специалистами ведущих научных организаций страны, позволили построить адекватные математические модели для описания физических процессов в сложных средах, происходящих с уче-

том определяющей роли сильновозбужденных атомов, таких как процессы взаимодействия плазменного и нейтрального потоков на диверторах термоядерных реакторов, а также в шаровой молнии.

При этом принципиальной трудностью на пути поиска максимально возможной степени возбуждения атомов в космосе являлась проблема штарковского уширения эмиссионных радиолиний, тогда как для земной атмосферы принципиальным вопросом стало обоснование самой возможности существования сильновозбужденных атомов в сложных плотных средах, а также вопрос о величине их возможной концентрации в таких средах.

В результате многолетних исследований было установлено следующее:

– максимальной степени возбуждения атомов в космосе, в атмосферных условиях, а также в низкотемпературной плазме соответствует значение главного квантового числа  $n \sim 1000$ ;

– концентрация сильновозбужденных атомов в области взаимодействия плазменных и нейтральных сред в условиях низкотемпературной плазмы составляет величину одного порядка с плотностью среды при  $N > 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Эти результаты были получены средствами радиоастрономии и космической радиолокации, а также физическим и математическим моделированием измеренных аномальных эффектов взаимодействия низкотемпературных плазменных сред с внешним электромагнитным излучением, а также с нейтральными газовыми потоками.

При этом была установлена новая закономерность существования сильновозбужденных атомов в зависимости от параметров среды и разработана новая модель взаимодействия низкотемпературной плазмы с нейтральным газовым потоком, позволявшая объяснить наблюдавшиеся аномальные эффекты и связать их со специфическими критическими явлениями в области взаимодействия таких сред.

Большие перспективы открываются для гиператомных технологий. Созданы широкоспектральные и широкополосные генераторы, разрабатываются аналогичные квантоэлектронные усилители, исследуется возможность создания устройств высокотемпературной сверхпроводимости. Создан летательный аппарат со сниженной радиовидимостью.

### Хронология основополагающих работ в области гиператомной физики

**1959 г.** – Н.С. Кардашев (ГАИШ). Предсказана возможность радиоастрономического наблюдения гиператомов в космосе.

**1964 г.** – Р.Л. Сороченко, Э.В. Борознич (ФИАН), А.Ф. Дравских, З.В. Дравских, В.А. Колбасов (ГАО). Обнаружены гиператомы в межзвездной среде.

**1968 г.** – Е.С. Нектаров (ЦНИРТИ, ИЯС, ОКБ «Алмаз», ОКБ «Вымпел», ГНИИП-10).

**1969–1977 гг.** – Е.С. Нектаров (ЦНИРТИ). Разработана теория гиператомных сред, и установ-

лена закономерность существования гиператомов в сложных средах.

**1978 г.** — Е.С. Нектаров, В.В. Сычев, Н.Д. Устинов, Т.И. Чинарева (ЦНИРТИ, НПО «Астрофизика»). Разработан способ преобразования электромагнитного излучения в гиператомных средах.

**1979 г.** — Е.С. Нектаров, В.В. Сычев, Н.Д. Устинов (ЦНИРТИ, НПО «Астрофизика»). Разработана квантовая модель рассеяния радиоволн в гиператомных средах.

**1979–1999 гг.** — ЦНИРТИ, ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, ОКБ им. Сухого, ОКБ им. Громова. Разработаны искусственные радиопоглощающие гиператомные среды и устройства для уменьшения радиолокационной видимости летательных аппаратов.

**1980–2000 гг.** — Е.С. Нектаров, В.В. Сычев, В.Б. Петров, Б.И. Хрипунов, В.В. Шапкин, Г.В. Шолин и др. (ЦНИРТИ, РИЦ «Курчатовский институт», НПО «Астрофизика»). Разработана новая физико-математическая модель взаимодействия низкотемпературного плазменного гиператомного потока с нейтральным газовым потоком.

**1981–2000 гг.** — Э.А. Манькин и др. (РИЦ «Курчатовский институт»). Разработана теория конденсированных гиператомных сред.

1. *Кардашев Н.С.* // Астрон. ж. 1959. Т. 36. С. 838–844.
2. *Sorochenko R.L., Borodzich E.V.* // Trans IAU. 1964. V. 12. 360 с.
3. *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
4. *Мартин Дж.* Вход в атмосферу. М.: Мир, 1969.
5. *Нектаров Е.С., Сычев В.В., Устинов Н.Д.* Квантовая модель рассеяния радиоволн в веществе со сверх-

возбужденными атомами // Квант. электрон. 1979. Т. 6. № 7. С. 1389–1400.

6. *Нектаров Е.С. и др.* // Докл. РАН. 1999. № 2. С. 1–4.
7. *Windsold A.* // Astrophys. 1948. N 24. P. 335.
8. *Нектаров Е.С.* // Квант. электрон. 1979. Т. 6. № 7. С. 1393.
9. *Mumra A.* Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. М.: Мир, 1977.
10. *MacAdam K.B., Wing W.H.* // Phys. Rev. A. 1977. N 15. P. 678–688.
11. *Mertens V. et al.* // Proc. 16<sup>th</sup> IAEA Fus. Energy Conf. Montreal. Canada. October 1996.
12. *Нектаров Е.С., Петров В.Б., Сычев В.В., Хрипунов Б.И., Шоткин В.В., Шолин Г.В.* О роли сильновозбужденных атомов в процессах торможения потоков плазмы на газовых мишенях // Физ. плазмы. 1996. Т. 22. № 5. С. 431–435.
13. *Русанов В.Д., Фридман А.А.* Физика химически активной плазмы. М.: Наука, 1984.
14. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез.* 1999. Вып. 2. С. 53–60.
15. *Нектаров Е.С.* // Прикл. физ. 1999. № 5. С. 51–58.
16. *Манькин Э.А., Ожован М.И., Полуэктов П.П.* О коллективном электронном состоянии в системе сильновозбужденных атомов // Докл. АН СССР. 1981. Т. 260. № 5. С. 1096–1098.
17. *Манькин Э.А., Ожован М.И., Полуэктов П.П.* Теория конденсированного состояния в системе возбужденных атомов // Ж. эксперим. и теор. физ. 1983. Т. 84. Вып. 2. С. 442–453.
18. *Жильцов В.А., Ляйтнер Ж.Ф., Манькин Э.А., Петренко Е.А., Скворода А.А., Хэндел П.Х.* Пространственно-локализованный микроволновый разряд в атмосфере // Ж. эксперим. и теор. физ. 1995. Т. 108. Вып. 6(12). С. 1966–1985.
19. *Нектаров Е.С., Сычев В.В., Устинов Н.Д., Чинарева Т.И.* Способ преобразования электромагнитного излучения: Авт. свид. № 805889 от 05.10.1978.
20. *Самолетов А.* Телерепортаж РТР. 1999.

**E.S. Nektarov, V.V. Sychev. Development of hyper-atomic physics in Russia.**

World investigations, including performed in the USSR, are reviewed, which concern with the problem of hyper-atomic physics, i.e. the field of atomic physics appeared in the last decades as a result of studying of highly excited hydrogen-like atoms at 10–1000 values of principal atom number determining the size of the outer electron orbit.

A many-year researchers of a large collective were devoted to solving this complicate problem, as well as to studying the hyper-atomic medium properties both in space and in Earth atmosphere. This collective presents national scientific schools in the field of theoretical and experimental physics and chemistry.

A new found regularity of existing of highly-excited atoms depending on the medium parameters is described and a new model of interaction between low-temperature plasma and neutral gas flow is worked out, which allowed one to explain some observed anomalous effects and relate them with specific phenomena occurring in such media interactions.

Wide prospects of hyper-atomic technologies are demonstrated. The worked out wide-spectral and wide-band generators are described; analogous quantum-electronic amplifiers are under development; and a possibility for creating instruments with high-temperature super-conductivity is studied.