

СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

53(048)

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ  
И АСТРОНОМИИ АКАДЕМИИ НАУК СССР  
(20—21 февраля 1980 г.)**

20 и 21 февраля 1980 г. в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии АН СССР. На сессии были заслушаны доклады.

*20 февраля*

1. Е. Б. Александров, Н. Н. Якобсон, Оптическая самонакачка атомов.
2. Д. А. Варшавич. Оптическая накачка космических мазеров на радиокалах ОН.
3. И. И. Соболевман. Исследование эффекта несохранения четности в атомном висмуте.

*21 февраля*

4. Б. Б. Кадомцев. ИНТОР — международный токамак-реактор.
5. В. С. Стрелков. Токамаки: статус и перспектива.
6. Г. И. Димов. Амбиполярные ловушки.

Ниже публикуется краткое содержание трех докладов.

539.184(048)

**Е. Б. Александров,<sup>1</sup> Н. Н. Якобсон.** Оптическая самонакачка атомов.

1. Обнаружено, что в парах атомов с оптически разрешенной сверхтонкой структурой (СТС) основного состояния в условиях возбуждения (в газовом разряде или иным образом) возникает тенденция к перераспределению населенностей подуровней СТС причем преимущественно заселяются подуровни с меньшим статистическим весом. Это явление, названное оптической самонакачкой, было впервые найдено в разряде паров таллия методами радиооптической спектроскопии<sup>1</sup>. Исследование явления<sup>2-4</sup> обнаружило его универсальный характер, что было в дальнейшем продемонстрировано в экспериментах с парами рубидия  $Rb^{871}$ <sup>5</sup> и серебра  $Ag^{109}$ .

2. Рис. 1 поясняет механизм самонакачки. Условно показана схема СТС основного состояния (ОС) атома из двух подуровней с моментами 0 и 1 и первое возбужденное состояние. Пусть первоначально подуровни ОС заселены в соответствии статистических весов (равенство населенностей магнитных подуровней). Изменение населенностей может возникнуть при различии скоростей возбуждения атомов с этих подуровней, и (или) если различаются вероятности их заселения в ходе дезактивации. Вероятности возбуждения электронным ударом равны для обоих подуровней СТС вследствие их энергетической близости, как и вероятности дезактивации ударами второго рода. Радиационные процессы при малых оптических плотностях газа также не

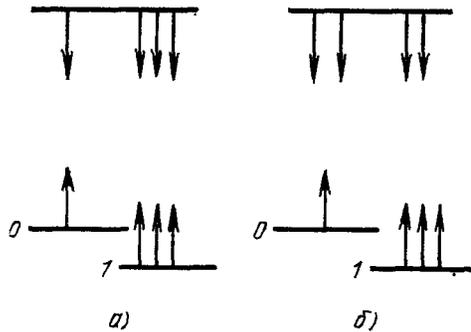


Рис. 1. Схема возникновения самонакачки. Число стрелок символизирует интенсивность актов первичного возбуждения (вверх) и излучительной дезактивации (вниз). а) Малая оптическая плотность  $h \ll 1$ ; б)  $h \gg 1$ .

меняют соотношения населенностей, поскольку в согласии с правилом интенсивности числа возбужденных атомов, спонтанно распадающихся на подуровни ОС, относятся как статистические веса последних.

Положение меняется с ростом оптической плотности паров. Как известно, соотношение интенсивностей спектральных линий с ростом плотности излучающего пара отклоняется от исходного, стремясь в пределе к распределению Планка, что для близких компонент линий соответствует сближению интенсивностей. Это отвечает относительно увеличению радиационного возврата атомов на подуровень с меньшим статистическим весом, т. е. к его перенаселению (рис. 1, б). Схема рис. 1 описывает структуру резонансных переходов серебра, в парах которого самонакачка ведет к инверсии населенностей подуровней ОС.

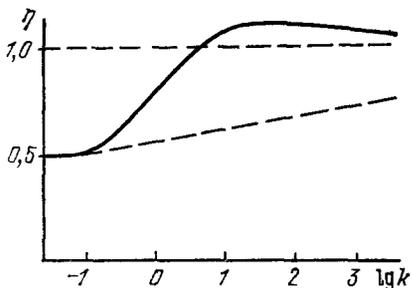


Рис. 2. Зависимость отношения интенсивностей  $\eta$  резонансных линий с общим верхним уровнем от оптической плотности  $k$  излучающей среды. Штриховая линия — та же зависимость для несвязанных линий.

компонент с ростом оптической плотности происходит немонотонно, как схематически показано на рис. 2 для начального соотношения  $\eta = 0,5$ . Аномальный рост слабых компонент резонансных линий в спектроскопии неоднократно наблюдался ранее<sup>6-8</sup>, но не получал объяснения. В условиях конкуренции резкие отклонения от правила интенсивностей возникают уже при умеренных оптических плотностях излучающего объема  $k \sim 3 - 10$ , что благоприятно для развития самонакачки, поскольку темп препятствующей ее релаксации подуровней СТС пропорционален концентрации атомов.

4. Самонакачка позволяет проводить радиоспектроскопическое исследование атомов в ОС в газовом разряде и распространять методы радиооптической спектроскопии на объекты, для которых традиционные методы оптической накачки<sup>9</sup> непригодны (например, галоиды, кислород). В отдельных случаях самонакачка может приводить к лазерным ситуациям, как, например, в парах серебра.

Очевидно, что самонакачка не ограничена СТС ОС атомов. Подобный процесс должен влиять на соотношение населенностей любых долгоживущих состояний, например уровней тонкой структуры. Можно думать, что самонакачка участвует в формировании населенностей метастабильных уровней атомов и молекул в разреженных областях атмосфер звезд и планет. В частности, самонакачка должна способствовать заселению метастабильного уровня  $^1S_0$  кислорода, ответственного за яркую «авроральную» линию 5577 Å полярных сияний.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Александров Е. Б., Якобсон Н. Н. — Письма ЖЭТФ, 1977, т. 26, с. 463.
2. Александров Е. Б., Безуглов Н. Н. — Опт. и спектр., 1978, т. 45, с. 218.
3. Александров Е. Б., Якобсон Н. Н. — В кн. Тезисы 6-й конференции по атомной физике. — Рига, 1978, — С. 59.
4. Александров Е. Б., Безуглов Н. Н., Якобсон Н. Н. — Опт. и спектр., 1979, т. 46, с. 1061.
5. Александров Е. Б., Якобсон Н. Н. — Ibid., 1980, т. 48, с. 828.
6. Фриш С. Э. — Тр. ГОИ, 1931, вып. 71, с. 1; Zs. Phys., 1931, Bd. 68, S. 758.
7. Туркин Ю. И. — Опт. и спектр., 1957, т. 2, с. 290; 1959, т. 7, с. 10.
8. Туркин Ю. И., Чайка М. П. — Ibid., 1961, т. II, с. 695.
9. W. H. R. — Rev. Modern Phys., 1972, v. 44, p. 169.
10. Нагирнер Д. И., Шнейвайс А. Б. — Астрон. ж., 1977, т. 54, с. 162, 367.

533.9(048)

**Б. Б. Кадомцев.** ИНТОР — международный токамак-реактор. По инициативе советских ученых в 1979 г. в Международном агентстве по атомной энергии (МАГАТЭ) была создана международная рабочая группа с целью оценить возможности создания термоядерного реактора на основе системы токамак. Более точно, группа должна была определить программные и технические цели, определить параметры установки и оценить существующий научно-технический базис для создания на международной основе термоядерного реактора, который должен продемонстрировать техническую возможность получения энергии от термоядерного синтеза и который являлся бы наибольшим разумным шагом вслед за сооружаемыми в настоящее время крупными установками — Т-15 в СССР, UT-60 в Японии, JET в Европе и TFTR в США.

Оспираясь на поддержку национальных коллективов, участники группы из СССР, США, Японии и Европейского сообщества подготовили подробный отчет по оценке научно-технического базиса и пришли к выводу, что этот базис достаточен для проектирования и сооружения в десятилетний срок Международного токамака-реактора ИНТОР.

Группа определила также основные характеристики этого реактора. Предполагается, что в ИНТОРе будут достигнуты условия зажигания и длительного горения самоподдерживающейся термоядерной D — T-реакции. Размер плазмы (большой радиус  $R = 5,2$  м, малый радиус  $a = 1,3$  м, параметр эллиптичности сечения  $b/a = 1,6$ ), величина магнитного поля  $H \approx 5,5$  Тл, ток плазмы  $I \approx 6$  МА, плотность  $n = 1,4 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> и температура  $T = 10$  кэВ выбраны путем оптимизации параметров при условии достижения условий зажигания (с небольшим запасом). Время горения составляет более 100 с при мощности термоядерной реакции около 600 МВт и при нагрузке на первую стенку 1, 3 МВт/м<sup>2</sup>. Для контроля уровня примесей и продукта реакции — гелия в дейтериево-тритиевой плазме будет использован дивертор, нагрев плазмы до температуры зажигания может быть осуществлен с помощью инжекции потока нейтронов с энергией 175 кэВ, мощностью 75 МВт в течение времени 5—6 с.

На установке ИНТОР могут быть установлены экспериментальные модулиblankета для разработки технологии воспроизводства трития и получения электричества (на уровне мощности 5—10 МВт).

В 1980 г. начато эскизное проектирование реактора ИНТОР, одновременно разрабатывается программа исследований и разработок в обоснование проекта крупномасштабного термоядерного реактора ИНТОР.

533.9(048)

**Г. И. Димов.** Амбиполярные ловушки. Одним из возможных способов увеличения времени удержания плазмы в открытых ловушках по отношению к ее уходу вдоль магнитного поля является создание двойных электрических барьеров на открытых концах ловушки, как это показано на рис. 1, а. Ионы удерживаются положительными барьерами  $\Delta\phi$ , а электроны — отрицательными барьерами  $\phi_0$ . Разумеется, при этом должно выполняться условие квазинейтральности плазмы на всей длине ловушки, включая ее концевые участки с электрическими полями; на этих участках необходимая плотность ионов должна поддерживаться другим способом (инерциальное удержание, удержание магнитным полем).

Создание электрических полей на концевых участках возможно за счет поляризации плазмы. Пусть на этих участках поддерживаются сгустки плазмы за счет ионизации инжектируемых поперек поля быстрых атомов дейтерия (рис. 1, б). При этом продольное распределение плазмы в сгустках будет определяться растеканием ионов. Для удержания около ионов более быстрых электронов, сгустки плазмы поляризуются, как это показано на рис. 1, в; между концами соленоидального поля образуется потенциальная яма для ионов (рис. 1, г). Если в эту яму ввести плазму с достаточно малой плотностью, такой, чтобы она несильно влияла на поляризацию концевых сгустков, и с ионной температурой  $T_{i0} \ll \phi_K$ , то потенциал ямы поднимется до некоторого значения  $\phi_0 < \phi_K$ , но не превысит потенциала концевых сгустков  $\phi_K$  (рис. 1, а). При этом введенная в яму плазма поляризуется только на своих концах (рис. 1, д). Соотношение между величинами  $\Delta\phi$  и  $\phi_0$  устанавливается из условия равенства времен удержания ионов и электронов этой плазмы барьерами  $\Delta\phi$  и  $\phi_0$  соответственно.

Электроны, относящиеся как к удерживаемой амбиполярными барьерами плазме (основной плазме), так и к концевым сгусткам, находятся в общей потенциальной яме. При температуре электронов  $T_e \ll \phi_0$  они находятся в равновесии и распределены по закону Больцмана  $n_e = n_0 \exp\{(\phi - \phi_0)/T_e\}$ . Вследствие условия квазинейтральности потенциал  $\phi = \phi_0 + T_e \ln(n_i/n_0)$ , где  $n_i$  — суммарная плотность ионов (рис. 1, е). Соответственно  $\Delta\phi = T_e \ln(n_K/n_0)$ , и время удержания ионов основной плазмы

$$\tau_{i0} \sim \tau_1 \frac{\Delta\phi}{T_{i0}} \exp \frac{\Delta\phi}{T_{i0}} = \tau_1 \ln \frac{n_K}{n_0} \frac{T_e}{T_{i0}} \left( \frac{n_K}{n_0} \right)^{T_e/T_{i0}},$$

где  $\tau_1$  — ионное время релаксации. При  $n_K \gg n_0$  и  $T_e > T_{i0}$  время удержания основной плазмы значительно больше по сравнению с временем удержания в классических открытых ловушках, в которых оно порядка  $\tau_1$ .

Энергозатраты на поддержание концевых сгустков плазмы, которые можно уменьшить, выполнив концы соленоида в виде пробкотронов, не зависят от длины соленоида. Термоядерная энергия, выделяемая в основной плазме, при достаточно большой длине ловушки может стать много больше этих энергозатрат.

Расчеты энергобаланса в классическом приближении показывают, что на основе ловушки с амбиполярными барьерами — пробками в принципе возможно создание термоядерного реактора с большим коэффициентом усиления мощности. Чтобы реактор был не очень длинным (100—200 м), в концевых сгустках необходимо поддерживать

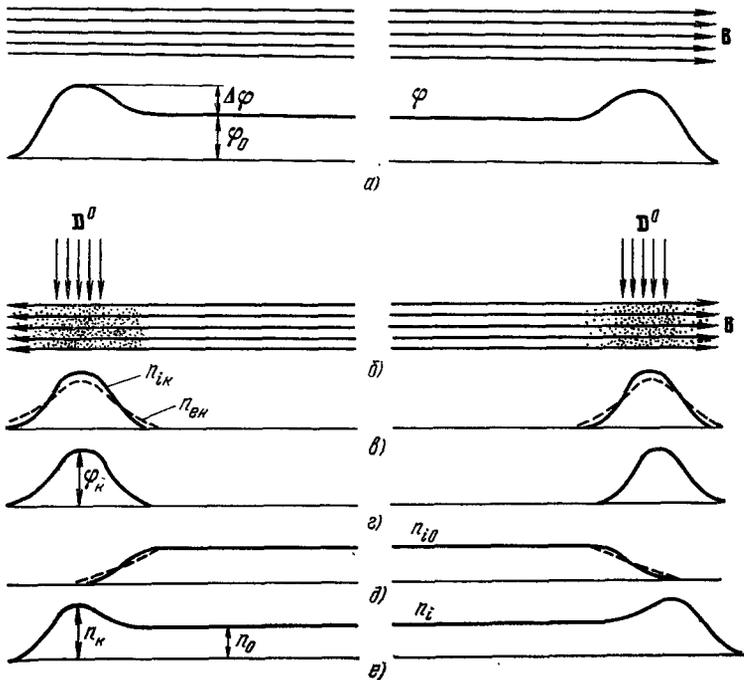


Рис. 1.

ионы дейтерия с высокой энергией порядка 1 МэВ. Требующиеся для этого высокоэнергетические атомарные пучки дейтерия можно с высокой эффективностью получать из ускоренных отрицательных ионов. Необходимо также достаточно сильное магнитное поле в концевых пробкотронах (120—160 кГс). В основной же соленоидальной части реактора требуемое магнитное поле составляет десятки килогаусс, и конструкция этой части, в которой и должен осуществляться термоядерный синтез, представляется достаточно простой.

Из теории и результатов многолетних экспериментальных исследований классической открытой ловушки следует, что можно надеяться на преодоление гидродинамических и кинетических неустойчивостей плазмы в амбиполярной ловушке. Поперечные потери плазмы по оценкам могут сравниваться с продольными, однако имеются пути их уменьшения.

Созданы или создаются четыре экспериментальные амбиполярные ловушки: АМБАЛ в ИЯФ СО АН СССР, ТМХ и Федр в США и Гамма-6 в Японии. Новые экспериментальные пробкотроны ОГРА-4 в ИАЭ им. И. В. Курчатова и МФТФ, сооружаемый в США, также позволяют получить ответы на ряд вопросов, важных для развития амбиполярных ловушек. На рис. 2 представлена схема установки АМБАЛ. Она выглядит довольно сложной вследствие того, что в ней наиболее простая соленоидальная часть укорочена до минимума. Летом 1979 г. запущена установка ТМХ. В ней получена квазистационарная плазма с параметрами, близкими к проектным. Время удержания основной плазмы на оси системы существенно превышает его значение, вычис-

ленное для удержания без амбиполярных барьеров. Опыты с выключением концевых пробкотронов достаточно убедительно показали, что амбиполярные барьеры действу-

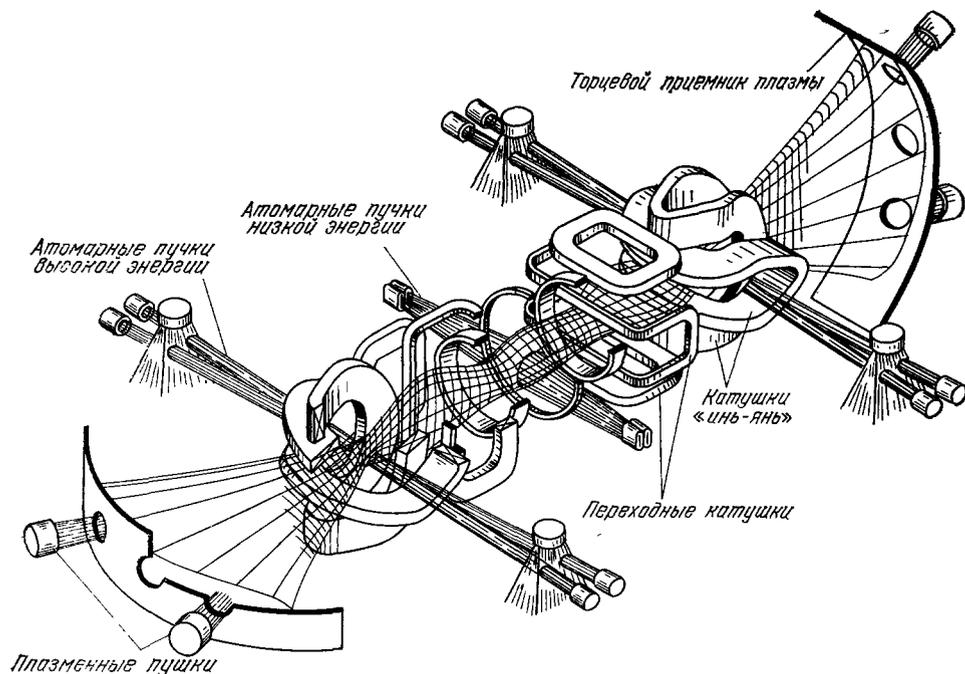


Рис. 2.

ют. Главная задача будущих экспериментов — повышение температуры основной плазмы с сохранением ее устойчивости и с увеличением энергетического времени жизни.

**МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДА ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

Димов Г. П., Закайдаков В. В., Кишиневский М. Е. — Физ. плазмы. 1976. т. 2. с. 597. В кн. Труды VI Межд. конференции по физике плазмы и УТС. Берхстенгаден, 1976. — Вена, 1977. — Т. III, с. 177.  
 Fowler T. K., Logan B. G. — Comm. Plasma Phys. and Contr. Fusion, 1977, v. II, p. 167.  
 Рытов Д. Д., Ступаков Г. В. — Письма ЖЭТФ, 1977, т. 26, с. 186.  
 Рытов Д. Д., Ступаков Г. В. — ДАН СССР, 1978, т. 240, с. 1086.  
 Димов Г. П. Основные параметры установки АМБАЛ; Препринт ИЯФ СО АН СССР. №77-46. — Новосибирск, 1977.  
 Соенсген Ф. Н. Отчет Ливерморской лаборатории LLL-Prop-148.-1977.  
 Carlson G. A. et al. Отчет Ливерморской лаборатории UCRL-52836. — 1979.  
 Fowler T. K., Соенсген Ф. Н. — В кн. Труды IX Европейской конференции по физике плазмы и УТС. — Оксфорд, 1979.  
 Соенсген Ф. Н. Отчет Ливерморской лаборатории UCRL-83594. — 1979.