

ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ЭКЗОТИЧЕСКИХ АТОМОВ

И. М. УМАНСКИЙ

Саратовский государственный аграрный университет

Л. А. МЕЛЬНИКОВ

Саратовский государственный университет

LASER SPECTROSCOPY OF EXOTIC ATOMS

I. M. UMANSKII,
L. A. MELNIKOV

The process of formation and unusual properties of exotic atoms which contain antiproton (antiprotonic helium and protonium) are described. The applicability of laser spectroscopy for measurements of the characteristics of such a system, monitoring and control of the quantum states population kinetics are discussed. The current status of experiments in CERN with such systems is presented in short.

Рассмотрены процесс образования и необычные свойства экзотических атомов, содержащих антипротон (антипротонный гелий и протоний). Обсуждены возможности лазерной спектроскопии для измерения характеристик этих атомов, мониторинга и управления кинетикой заселенностей квантовых состояний. Кратко описаны проводимые в ЦЕРНе эксперименты по исследованию подобных систем.

www.issep.rssi.ru

ВВЕДЕНИЕ

Осмысливая огромное разнообразие материального мира, нельзя не отметить, что природа оказалась достаточно экономным строителем. Действительно, молекулы всех известных нам веществ (десятки миллионов видов) собраны из конструктора, содержащего всего лишь 88 наименований деталей. Именно столько видов атомов существуют в естественных условиях.

В последние десятилетия появилась возможность расширить этот перечень за счет элементов с большим атомным весом, создаваемых (хотя и на очень короткое время) в результате искусственных ядерных реакций. Активное вмешательство человека в процесс сотворения мира, бесспорно, одно из самых впечатляющих достижений науки ушедшего столетия. Но, пожалуй, наиболее удивительными творениями ядерных химиков стали атомы, которых не найти в таблице Менделеева. В состав такого нейтрального атома вместо одного из электронов входит антипротон или отрицательный мезон. Подобные долгоживущие атомы получили название экзотических. В статье рассмотрены экзотические атомы, содержащие антипротоны. Антипротоны (античастицы протона) были открыты в 1955 году Э. Сегре и его сотрудниками при бомбардировке медной мишени протонами с энергией 6,2 ГэВ. Масса и спин антипротона точно такие же, как у протона, но его электрический заряд имеет противоположный знак. В обычных условиях антипротон существует только короткое время, так как вскоре после образования сталкивается с протоном и аннигилирует. Аннигиляция пары протон—антипротон сопровождается образованием π - и K -мезонов, реже γ -квантов. Однако сам по себе антипротон является стабильной частицей, то есть спонтанно не распадается. Это означает, что система частиц, содержащая антипротон, может быть достаточно долговечной, если в ней исключена возможность антипротон—протонных столкновений.

Образование такой системы (антипротонного атома) может произойти в результате замещения антипротоном одного из электронов атома. Это замещение кардинально меняет свойства вещества, например антипротонный гелий $\bar{p}\text{He}^+$ своими химическими свойствами значительно ближе к водороду, нежели к гелию. Атом $\bar{p}\text{He}^+$ (рис. 1, а) стал первым антипротонным атомом, обнаруженным экспериментально в 1991 году группой японских физиков, хотя теоретически его существование было предсказано Г.Т. Кондо еще в 1964 году. Восемь месяцев спустя в ЦЕРНе¹ международная группа исследователей приступила к систематическому изучению антипротонного гелия с помощью установки LEAR². Эксперименты на LEAR позволили внести ясность в процесс формирования $\bar{p}\text{He}^+$, его структуру и обнаружить некоторые его необычные свойства.

В 1999 году стартовало новое поколение экспериментов, базирующихся на установке AD³, строительство которой недавно завершилось в ЦЕРНе. Уникальные возможности этой аппаратуры позволят расширить круг изучаемых антипротонных атомов, в частности осуществить синтез протония $\bar{p}p$ (атома, состоящего из протона и антипротона). В статье вначале будут рассмотрены результаты экспериментов на LEAR, а затем перспективы, открывающиеся при использовании AD.

LEAR: ПЕРВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С $\bar{p}\text{He}^+$

При попадании антипротонного пучка в гелиевую среду примерно 96% антипротонов аннигилирует сразу, а остальные 4%, замещая один из электронов в атоме гелия, образуют атомы $\bar{p}\text{He}^+$, гибель которых в дальнейшем регистрируется по продуктам протон-антипротонной аннигиляции. Зависимость скорости процесса аннигиляции от времени получила название временного спектра задержанной аннигиляции (DATS – Delayed Annihilation Time Spectrum). Пример DATS показан на рис. 2 при давлении гелия 0,38 мбар и температуре 4,2 К.

¹ ЦЕРН (CERN) – Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire – Европейский центр ядерных исследований создан при поддержке ЮНЕСКО в 1954 году 12 европейскими странами для теоретических и экспериментальных работ по физике элементарных частиц. Центр расположен вблизи Женевы, Швейцария.

² LEAR (Low Energy Antiproton Ring) – накопительное кольцо низкоэнергетических антипротонов. В этой установке антипротоны получались при бомбардировке медной мишени протонами с энергией 26 ГэВ. Струя вторичных частиц фильтровалась для выделения из них антипротонов, которые накапливались и охлаждались. Установка позволяла получать пучок антипротонов с энергией 2 МэВ и поперечным сечением 2 мм².

³ AD – Antiproton Decelerator – антипротонный замедлитель, подобный LEAR, характеризуемый большей плотностью протонов в пучке.

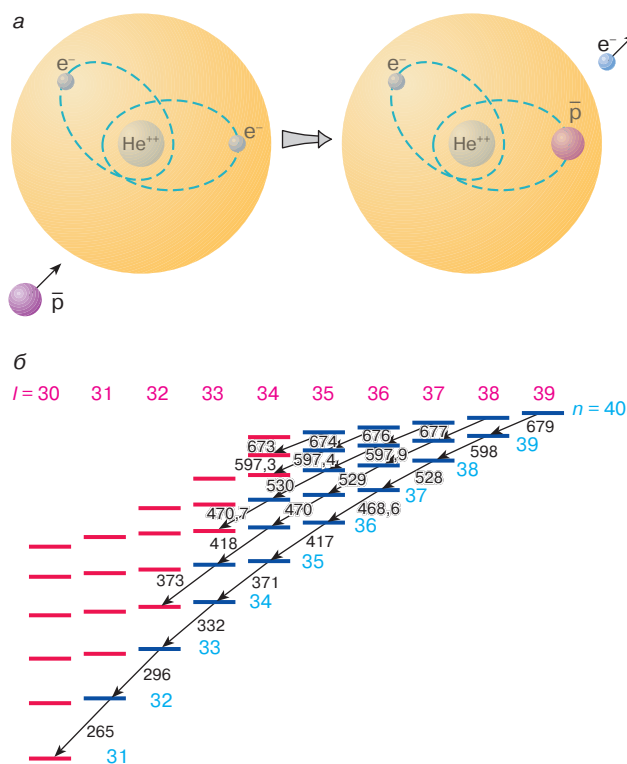


Рис. 1. Антипротонный гелий $\bar{p}\text{He}^+$: а – процесс образования при столкновении атома гелия с антипротоном, б – схема квантовых уровней (n, l). Цифрами указаны длины волн (в нанометрах) переходов между состояниями (n, l) \rightarrow ($n-1, l-1$)

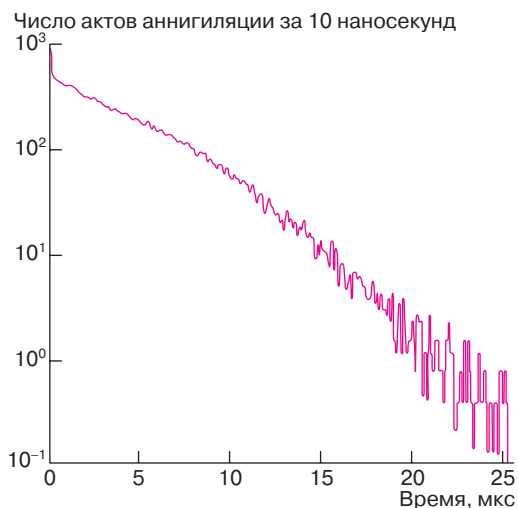


Рис. 2. Временной спектр задержанной аннигиляции $\bar{p}\text{He}^+$

Быстрая аннигиляция на начальном этапе связана с непосредственными столкновениями антипротонов с ядром атома гелия и распадом короткоживущих состояний атомкул (см. ниже) $\bar{p}\text{He}^+$, заселяемых в процессе формирования. Медленно спадающая часть кривой, соответствующая временам $t > 1$ мкс, интерпретировалась как свидетельство долговременного существования \bar{p} на метастабильных орбитах.

КАК ОБРАЗУЮТСЯ МЕТАСТАБИЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ $\bar{p}\text{He}^+$

Чтобы оценить состояние образовавшегося атома, воспользуемся теорией Н. Бора. Как известно, радиус орбиты электрона в водородоподобном ионе выражается формулой

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{Ze^2 m},$$

где n – главное квантовое число, нумерующее энергетические уровни, \hbar – постоянная Планка, Z – порядковый номер элемента, а e и m – заряд и масса электрона. Эксперимент свидетельствует о том, что, замещая электрон, антипротон предпочтительно занимает орбиту того же радиуса и имеет при этом ту же энергию, что и вытесняемый электрон. Полагая, что электрон в атоме гелия находился в основном состоянии с $n = 1$, получаем, что образовавшийся атом $\bar{p}\text{He}^+$ должен находиться в состоянии с главным квантовым числом

$$n_0 = \sqrt{\frac{M}{m}} \approx 38,$$

где M – приведенная масса системы антипротон – ядро атома гелия.

Конечно, эта оценка не является строгой (как известно, атом гелия не описывается классической теорией Бора), однако она показывает, что атомы $\bar{p}\text{He}^+$ изначально находятся в высоковозбужденных квантовых состояниях, близких к $n_0 = 38$. Соответственно могут заселяться квантовые состояния с большими значениями орбитального момента, определяемого квантовыми числами $l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$ и характеризующего форму орбиты. Состояния с $l = n - 1$ соответствуют круговым орбитам, а с $l < n - 1$ – эллиптическим, тем более вытянутым, чем меньше l .

Двигаясь по вытянутой орбите, антипротон обязательно окажется в непосредственной близости от гелиевого ядра, где его ожидает неминуемая аннигиляция с одним из протонов ядра, атом при этом прекращает существование. Чтобы избежать аннигиляции, антипротон не должен приближаться к ядру. Это реализуется только для орбит, близких к круговым, с большими значениями l . Таким образом, метастабильными будут

не все состояния антипротонного гелия, а только состояния с большими l , близкими к $n - 1$.

Другой важной особенностью является то, что радиус метастабильных орбит при $n \leq 38$ меньше размеров электронного облака, образованного уцелевшим электроном атома гелия (см. рис. 1, а). Это облако играет важную роль, экранируя антипротон в атоме $\bar{p}\text{He}^+$ от взаимодействия с окружающими частицами.

Благоприятное сочетание указанных обстоятельств обуславливает возможность длительного (в атомном масштабе времени) существования такой экзотической системы.

Конечно, образующийся антипротонный гелий – атом необычный, и во многих отношениях он похож на полярную двухатомную молекулу, в которой роль ядер играют \bar{p} и He^{++} . И. Шимакура [1] показал, что именно “молекулярность” антипротонного гелия обуславливает необычный для атомов характер переходов между энергетическими состояниями (рис. 1, б). Если для атомов наибольшую вероятность имеют переходы с максимально возможным изменением главного квантового числа (переходы в наименьшие энергетические состояния), то для $\bar{p}\text{He}^+$ наиболее вероятными являются переходы с изменением n на единицу, подобно инфракрасным переходам в двухатомной молекуле. При этом каждый такой переход сопровождается изменением на единицу орбитального квантового числа. Благодаря такой двойственной природе система $\bar{p}\text{He}^+$ получила название атомкулы.

Переходы между состояниями атомкулы происходят по ступенькам $(n, l) \longleftrightarrow (n - 1, l - 1)$, образующим независимые каскады. Заметим, что для переходов внутри каждого из каскадов $\nu = n - l - 1$ остается постоянным.

При движении по каскаду антипротон в конце концов попадает в состояние со сравнительно малым l , то есть переходит на эллиптическую орбиту, двигаясь по которой он оказывается вблизи ядра. В этом состоянии вероятность его аннигиляции становится высокой. Такие короткоживущие состояния показаны на рис. 1, б красным цветом.

Таким образом, каждый каскад ограничен аннигиляционным пределом со стороны малых l . Кроме того, он ограничен и со стороны больших l , но по другой физической причине. Состояния с $n > 40$ оказываются незаполненными в процессе формирования $\bar{p}\text{He}^+$, хотя они имеют большое время жизни по отношению к аннигиляции. Причины этого в настоящее время до конца не выяснены. Наиболее правдоподобная гипотеза заключается в том, что разрушение этих состояний происходит при соударениях с атомами гелия.

Длины волн переходов внутри каскадов указаны на рис. 1, б. Видно, что практически все они попадают в видимый диапазон, что чрезвычайно удобно для исследований.

ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ $\bar{p}\text{He}^+$

Лазерная спектроскопия является сегодня наиболее мощным средством исследований атомных и молекулярных систем [2]. Принцип лазерной спектроскопии в применении к рассматриваемой системе состоит в осуществлении индуцированных резонансных переходов с метастабильных состояний $\bar{p}\text{He}^+$ в короткоживущие с помощью лазерных импульсов. Вследствие такого перехода антипротон практически мгновенно аннигилирует, и это обнаруживается как всплеск на кривой DATS. Варьирование частоты лазерного импульса позволяет измерить форму линии индивидуальных переходов и энергии метастабильных состояний, а также влияние на них столкновений с атомами среды.

С помощью такой методики удалось обнаружить и идентифицировать 13 резонансных переходов. Эти эксперименты вызвали взрыв интереса к теоретическому описанию $\bar{p}\text{He}^+$. Различные исследовательские группы из Японии, Германии, России, Великобритании, США, Болгарии, Италии, Венгрии и Швеции устроили соревнование в повышении точности вычислений энергии уровней и вероятности переходов. Совершенствование методов расчетов позволило теоретически описать спектр $\bar{p}\text{He}^+$, воспроизводящий экспериментальный с точностью 10^{-6} , что соответствует точности самого эксперимента. Более того, на этом уровне точности стало возможно исследование тонкой и сверхтонкой структуры переходов в $\bar{p}\text{He}^+$, обусловленной взаимодействием магнитных моментов антипротона и электрона.

Методы лазерной спектроскопии дают важную информацию о влиянии окружающей среды на свойства $\bar{p}\text{He}^+$. Эта информация заключена в сдвиге частоты и временах жизни метастабильных состояний в зависимости от давления He или наличия в нем примеси, в качестве которой был использован H_2 .

Полученные результаты преподнесли некоторые сюрпризы. Во-первых, сдвиг частоты перехода в красную сторону существенно превысил значения, характерные для обычных атомов, и, во-вторых, времена жизни состояний с меньшими n оказались более подвержены влиянию столкновений с атомами гелия (в противоположность ожидаемому по аналогии с обычными атомами). В то же время влияние примеси водорода соответствует стандартным представлениям, воздействуя в основном на времена жизни высоколежащих состояний. Объяснения этих аномалий пока не найдено.

Возможности лазерной спектроскопии позволяют изучать также и кинетику распада метастабильных состояний, что важно для понимания процессов, происходящих в экзотических атомах. По интенсивности пика на кривой DATS можно судить о заселенности исходного состояния в момент действия импульса. На рис. 3 изображена DATS при воздействии двух лазерных импульсов с одинаковой длиной волны 597,26 нм и меняющимся временем задержки между ними. Амплитуда второго пика по отношению к первому характеризует временную зависимость заселенности состояния (39, 36). Эта зависимость довольно сложна вследствие конкуренции процессов распада этого состояния и его заселения за счет распада лежащих выше состояний в том же каскаде. Аналогичным образом был изучен переход (37, 34) \longleftrightarrow (36, 33) в каскаде с $\nu = 2$. Это дает возможность получить количественную информацию о временном поведении заселенностей отдельных состояний.

Количество информации об энергетической структуре метастабильных состояний и их заселенности может быть существенно увеличено при использовании серий специальным образом подобранных коротких лазерных импульсов. Такой подход позволяет не только осуществить мониторинг процесса распада метастабильных состояний антипротонного гелия, но и активно влиять на его характеристики [3, 4].

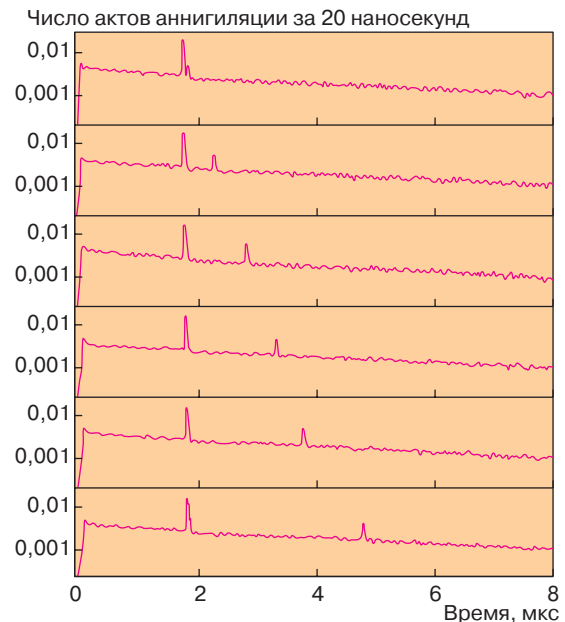


Рис. 3. Временной спектр задержанной аннигиляции при различных временах задержки между двумя последовательными импульсами излучения лазера с длиной волны 597,26 нм

AD: НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Начавшаяся в 1999 году серия экспериментов, рассчитанных до 2004 года, открывает новую эру в исследовании экзотических атомов, получившую в кругах специалистов название “эра AD”. AD способен производить 10^7 антипротонов за 200 наносекунд, в то время как на LEAR для получения этого же числа антипротонов было необходимо время в 20–30 минут. Кроме того, будет использована регистрирующая продукты аннигиляции аппаратура с лучшим временным разрешением (до наносекунд) и лучшим отношением сигнал–шум. Лазерные системы также модернизированы: собственная ширина линии излучения лазера уменьшена настолько, что относительная точность его настройки может быть сделана не более 10^{-7} .

Данные технические решения обеспечивают возможность получения не только новой информации об $\bar{p}\text{He}^+$ (найти незарегистрированные ранее переходы, определить их заселенности, изучить влияние на них окружающей среды и примесей, исследовать более детально тонкую структуру переходов), но также получить и исследовать другие антипротонные атомы.

На первый взгляд достаточно удивителен тот факт, что именно $\bar{p}\text{He}^+$, а не $\bar{p}\text{r}$ — наиболее простая атомная система с антипротоном, был первым изученным антипротонным атомом. Уникальность $\bar{p}\text{He}^+$ состоит в том, что экранирующее действие электрона обеспечивает длительное выживание этого атома в условиях столкновений с окружающими атомами гелия. В других антипротонных атомах такая экранировка отсутствует, что приводит к их гибели за достаточно короткое время. Однако, если использовать среду при малом давлении, можно ожидать, что образующиеся атомы будут метастабильны. Трудность осуществления таких экспериментов в том, что в разреженной среде невозможно замедлить атомы через столкновения \bar{p} от энергий в единицы мегаэлектронвольт до энергий в десятки электронвольт, необходимых для их захвата. Для этого антипротоны, произведенные в AD, необходимо дополнительно замедлить либо накопить антипротоны в ловушке при низкой температуре и инжектировать атомы в эту ловушку. Предполагается, что на первой стадии экспериментов будет изучен захват антипротонов в Li, Ne, а также в молекулярном и атомарном водороде.

Последний случай вызывает особый интерес, поскольку приводит к образованию простейшего антипротонного атома — протония $\bar{p}\text{r}$. Наряду с позитронием $e^+\text{p}$ протоний (антипротонный водород) является прямым аналогом атома водорода, отличаясь от него тем, что легкий электрон заменен в нем тяжелой античастицей.

Поскольку протоний — водородоподобный атом, его спектр похож на водородный с тем отличием, что постоянная Ридберга \bar{R} (а значит, и энергия связи) для $\bar{p}\text{r}$ больше, чем для водорода в $m_{\bar{p}}e^2/(m_e e^2) \approx 2000$ раз. Точные измерения постоянной Ридберга для $\bar{p}\text{r}$ позволят установить возможные различия в массах и зарядах протона и антипротона. Измерения этой постоянной будут осуществлены посредством измерения частот лазерно-индуцированных переходов между квантовыми состояниями. Так же как и в $\bar{p}\text{He}^+$, состояния $\bar{p}\text{r}$ с большими значениями n и l метастабильны и поэтому остаются реально заселенными в ходе эксперимента. С учетом того, что \bar{R} для $\bar{p}\text{r}$ больше, чем для водорода, в тысячи раз, эти измерения возможны только лишь для высоковозбужденных состояний, частоты переходов между которыми находятся в видимом диапазоне. Эти удобные для эксперимента уровни существенно удалены от короткоживущих состояний, поэтому в отличие от $\bar{p}\text{He}^+$ в $\bar{p}\text{r}$ следует не сбрасывать атом в нижележащие состояния, а, наоборот, осуществлять ионизацию, направляя оторвавшийся антипротон на мишень и наблюдая его гибель вследствие аннигиляции.

Метастабильные состояния протония отвечают высоковозбужденным орбитам, однако размеры этого атома несущественно отличаются от размеров атома водорода в основном состоянии. Например, при $n = 50$ радиус орбиты антипротона в протонии лишь в 2,7 раза превышает борковский радиус электрона в атоме водорода. Для сравнения: размер атома водорода в том же состоянии $n = 50$ составляет 2500 борковских радиусов, или 0,13 мкм.

Из-за теплового движения каждый атом воспринимает частоту лазера со сдвигом, зависящим от величины и направления его скорости (эффект Доплера). Используя два встречных лазерных пучка, можно скомпенсировать этот сдвиг для всех атомов при одновременном поглощении двух фотонов, каждый из которых взят из

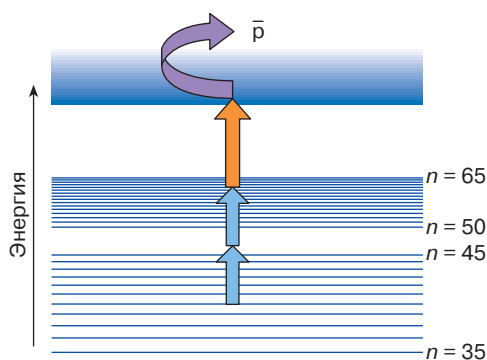


Рис. 4. Схема эксперимента по лазерной двухступенчатой ионизации протония $\bar{p}\text{r}$

разных пучков. Поэтому при экспериментах с пред-полагается использовать двухфотонные переходы из состояний с $n \approx 35, \dots, 45$ в состояния с $n \approx 50, \dots, 65$. Схема такого перехода с последующей ионизацией показана на рис. 4.

Подобная методика нейтрализации доплер-эффекта позволит обеспечить измерение частоты перехода с точностью до десятков мегагерц, что даст точность в определении антипротонной постоянной Ридберга в 10^{-7} .

ЛИТЕРАТУРА

1. Shimamura I. // Phys. Rev. A. 1992. Vol. 46, № 7. P. 3776–3788.
2. Попов А.К. Лазерная спектроскопия, ограниченная доплеровским уширением // Соросовский Образовательный Журнал. 1998. № 3. С. 105–111; № 5. С. 102–109.
3. Derbov V.L., Melnikov L.A., Umanskii I.M., Vinitzky S.I. // Phys. Rev. A. 1997. Vol. 55, № 5. P. 3394–3400.
4. Дербов В.Л., Мельников Л.А., Уманский И.М., Виницкий С.И. // Оптика и спектроскопия. 1998. Т. 84, № 4. С. 533–539.

Рецензенты статьи Н.Б. Делоне, Н.Ф. Степанов

* * *

Игорь Маркович Уманский, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой инженерной физики Саратовского государственного аграрного университета. Область научных интересов – молекулярная спектроскопия, динамика волновых пакетов, спектроскопия экзотических систем. Автор более 90 научных и методических работ.

Леонид Аркадьевич Мельников, доктор физико-математических наук, зав. кафедрой лазерной и компьютерной физики Саратовского государственного университета. Область научных интересов – лазерная физика, лазерная спектроскопия, нелинейная динамика, спектроскопия экзотических систем. Автор более 150 научных и методических работ.