

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
С АТОМАМИ И МОЛЕКУЛАМИ**
Научная школа проф. Л.П.Рапопорта



**THE INTERACTION OF OPTIC
RADIATION WITH ATOMS
AND MOLECULES**
Science school of prof. L.P.Rapoport

Краткая характеристика научной школы

Понятие «Научная школа», как известно, подразумевает определенное направление в науке, связанное единством основных взглядов, преемственностью принципов и методов. Необходимым признаком школы является также и достаточно узкий круг научных проблем, оригинальное решение которых и есть достоинство именно данного коллектива ученых. Всеми этими признаками безусловно обладает научная школа «Фундаментальные проблемы взаимодействия оптического излучения с атомами и молекулами». Ее основал и много лет идейно вдохновлял доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель



Проф. Рапопорт Л.П. (1920-2000)

науки России **Рапопорт Лев Павлович** (1920–2000). С 1956 г. по 1993 г. он возглавлял кафедру теоретической физики Воронежского государственного университета, а с 1993 г. до самого последнего времени в должности профессора продолжал на ней активную работу. За этот период через институты аспирантуры и соискательства Л.П.Рапопорту удалось подготовить и собрать около себя наиболее талантливых учеников, сплотив их не только общим направлением тематики научных исследований, но и едиными принципами научных и чисто человеческих взаимоотношений. Л.П.Рапопорт был безусловным авторитетом при решении всевозможных проблем, возникающих при функционировании такого сложного коллектива, как научная школа. Этому в значительной мере способствовали такие его индивидуальные черты, как чрезвычайно обо-

стренное чувство нового, актуального, способность постоянно быть на переднем крае научных исследований, и это несмотря на «периферийность» университета, умение выбрать собственный оригинальный путь исследования. Большая эрудиция и удивительная широта научных интересов всегда помогали Л.П.Рапопорту относительно легко переключаться с тех проблем, где главные задачи уже решены, на новые, нередко из совсем других разделов физики. Ему также свойственны были требовательность, умение ставить высокую планку и в науке, и в учебной работе, не поддаваясь конъюнктурным веяниям и влиянию авторитетов. Все эти черты он пытался привить своим ученикам и реализовать в деятельности научной школы. Ее успешное функционирование и международная известность свидетельствуют, что в значительной мере Л.П.Рапопорту это удалось.

Главное направление научных исследований последнего двадцатилетия, с которым связаны наиболее весомые результаты, отраженное в официальном на-

звании научной школы, возникло не сразу. В 50 – 60-х годах, в период, когда особенно актуальны были исследования по ядерной физике, научные исследования Л.П.Рапопорта и его учеников проводились в области теории ядра. Их усилиями были разработаны современные варианты теории α -распада, протонной и кластерной радиоактивности атомных ядер, β -распада и электронного захвата в них, теория вторичных процессов в ядерном поле. Эти исследования составили основу диссертаций д.ф.-м.н. С.Г.Кадменского (с 1978 г. — заведующий кафедрой ядерной физики ВГУ), д.ф.-м.н. И.В.Копытина (с 1993 г. — заведующий кафедрой теоретической физики ВГУ), д.ф.-м.н. И.С.Баткина (до 1992 г. — профессор кафедры ядерной физики, с 1993 г. — профессор университета г. Оттава (Канада)). Кроме того, коллективом кафедры теоретической физики в этом направлении подготовлен ряд специалистов, ставших известными впоследствии своими научными достижениями: это д.ф.-м.н., проф. Пятов Н.И. (главный научный сотрудник Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна), Фурман В.И. (заместитель директора Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ), Иванов И.Н. (заместитель директора Лаборатории высоких энергий ОИЯИ), Пустыльник Б.И. (ученый секретарь Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ). Исследования этого направления продолжаются и в настоящее время на кафедрах теоретической и ядерной физики, сосредоточившись на проблемах теории ядерных реакций, столкновений тяжелых ионов и ядерной астрофизики. На кафедре теоретической физики направление, связанное с исследованием электромагнитного излучения при столкновениях тяжелых ионов, возглавляет профессор И.В.Копытин.

Научный потенциал, накопленный на кафедре теоретической физики на этой начальной стадии исследований, оказался достаточным для расширения их тематики и переключения на новый круг задач, поставленных интенсивным развитием экспериментальных исследований в области лазерной физики. В частности, наибольшую актуальность в теоретическом плане приобрела проблема поведения атомов и молекул в интенсивных электромагнитных полях оптического диапазона частот. С начала 70-х годов и до последнего времени именно процессы такого рода стали определять круг научных интересов Л.П.Рапопорта и его ближайших учеников — д.ф.-м.н. Б.А. Зона (с 1980 г. — заведующий кафедрой математической физики ВГУ), д.ф.-м.н. Н.Л.Манакова (с 1980 г. — профессор кафедры теоретической физики ВГУ), д.ф.-м.н. В.Д.Овсянникова (с 1995 г. — профессор кафедры теоретической физики ВГУ), д.ф.-м.н. С.А.Запрягаева (с 1998 г. — профессор кафедры теоретической физики ВГУ, первый проректор ВГУ), д.ф.-м.н. П.А.Головинско-



Проф. Манаков Н.Л.

го (профессор Воронежской архитектурно-строительной академии), д.ф.-м.н. А.Ф.Клиных (доцент Воронежского государственного агроуниверситета, докторскую диссертацию защитил в 2000 г.), д.ф.-м.н. В.Г.Пальчикова (ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института физико-технических и радиоизмерений (ВНИИФ-3, г. Менделеево Московской обл.)) и др.

Основное направление этих научных исследований, получившее название «Фундаментальные проблемы взаимодействия сильных электромагнитных полей с атомами и молекулами», в настоящее время значительно разветвилось и трансформировалось в новые **научные направления**, развиваемые учениками Л.П.Рапопорта на кафедрах теоретической и математической физики Воронежского государственного университета:

1. Теория атомов и молекул в сильных электромагнитных полях и нелинейно-оптические процессы в газах.
2. Релятивистская теория атомов и многозарядных ионов.
3. Преобразование лазерных частот и проблемы устойчивости квантовых систем в сверхсильных электромагнитных полях.
4. Использование диссипативно-индуцированного поляризационного дихроизма для нелинейной лазерной спектроскопии атомов и ионов.

Исследования по этим направлениям стимулируются устойчивым интересом мирового научного сообщества к процессам взаимодействия лазерного излучения с веществом. Достаточно указать на тот диапазон применения современных лазеров, который достигнут в последнее время в науке и технике, в том числе и технике бытовой — от создания сверхточных приборов для сварки металлов до миниатюризации современных компьютерных средств, от кабельного телевидения и волоконно-оптических систем связи до современных средств космической навигации и передачи информации. Значительные надежды в деле освоения новых источников энергии физики связывают с лазерно-управляемой термоядерной реакцией.

Понимание процессов взаимодействия мощных импульсов лазерного излучения с веществом невозможно без фундаментальных знаний, основанных на строгом математическом описании элементарных эффектов взаимодействия сильных электромагнитных полей с атомами, молекулами и элементарными частицами. Приобретению этих знаний и посвящена научно-исследовательская деятельность сотрудников кафедры теоретической физики ВГУ.

Каждое из направлений возглавляется одним из профессоров кафедры — учеником Л.П.Рапопорта. Так, группа сотрудников и аспирантов, руководимая проф. **Н.Л.Манаковым**, проводит исследование поведения простейших квантовых систем в сверхсильных лазерных полях. В частности, всесторонне изучена возможность использования обнаруженного Н.Л.Манаковым и А.Г.Файнштейном в 80-х годах эффекта диссипативно-индуцированного оптического дихроизма как для изучения спектроскопических свойств атомов и молекул, так и для повышения эффективности преобразования поляризационно-частотных свойств мощных световых пучков в нелинейной атомарной среде.



Под руководством **проф. С.А. Запрягаева** проводится изучение квантово-электродинамических эффектов в спектрах многозарядных ионов — специфических объектов, существующих в высокотемпературной плазме. Основой этих исследований является метод релятивистской кулоновской функции Грина, разработанный на кафедре в 1970-х годах. Полученные в этих исследованиях данные предоставляют важную спектроскопическую информацию, требующуюся как для изучения структуры плазменных объектов, так и для управления происходящими в них процессами.

Научные исследования, выполняемые студентами и аспирантами кафедры под руководством **проф. В.Д. Овсянникова**, направлены на изучение влияния сильных электромагнитных полей на спек-

троскопические свойства атомов.

На кафедре математической физики под руководством **проф. Б.А. Зона** проводятся исследования ридберговских состояний в полярных атомах и молекулах, а также процессов внутренней конверсии. В круг научных интересов данной группы входит также нелинейная магнитооптика, туннельная ионизация, ориентация молекул в сильном лазерном поле и т.д.

Основные результаты, полученные школой в течение последних пяти лет

1. Предложен метод учета межэлектронных корреляций в процессах взаимодействия атомов с сильным лазерным полем, основанный на использовании специальных унитарных преобразований гамильтониана, позволяющих эффективно учесть корреляционное взаимодействие наряду с эффектами сильного поля. Приложение указанного подхода к расчету изменения спектра инертных газов в интенсивном высокочастотном поле показывает существенное отличие полученных результатов от результатов теории возмущений по взаимодействию с лазерным полем.
2. Развита новая методика анализа угловых распределений в реакциях с поляризованными частицами, основанная на специальных редуцированных формулах для биполярных гармоник и новых, инвариантных представлений для матриц конечных вращений (D -функций Вигнера). Развита техника особенно эффективна при анализе фотопроцессов и позволила получить канонически-простые выражения для поляризационно-угловой структуры сечений фундаментальных однофотонных процессов (тормозное излучение,



Проф. Зон Б.А.

двухэлектронный фотоэффект) и ряда двухфотонных переходов (рассеяние жестких фотонов, двухфотонная ионизация) в атомах с произвольным значением полного углового момента.

3. Найдено решение уравнения Шредингера для электрона в кулоновском поле и поле быстро вращающегося точечного диполя. На основе полученного решения показано существенное влияние квантовых эффектов на спектр ридберговского электрона в полярных молекулах, проявляющееся в скачках квантовых дефектов в области главных квантовых чисел $n \sim 60$ (для типичных молекул). Построена функция Грина ридберговского электрона в полярной молекуле, позволяющая рассчитывать сечения многофотонных переходов. Эффективность метода продемонстрирована на

впервые выполненных расчетах динамической поляризуемости ридберговских состояний двухатомных молекул.

4. Построена теория туннельной ионизации молекул из ридберговских состояний, обобщающая известные результаты Смирнова–Чибисова и Келдыша, полученные ранее для атомов. Изучено влияние дипольного момента и ориентации оси молекулы относительно вектора напряженности внешнего поля на вероятность туннелирования. Предложено обобщение приближения Борна–Оппенгеймера для молекул в поле лазерного излучения, позволившее объяснить ряд экспериментальных результатов по «кулоновскому взрыву» молекулы в интенсивном лазерном поле.

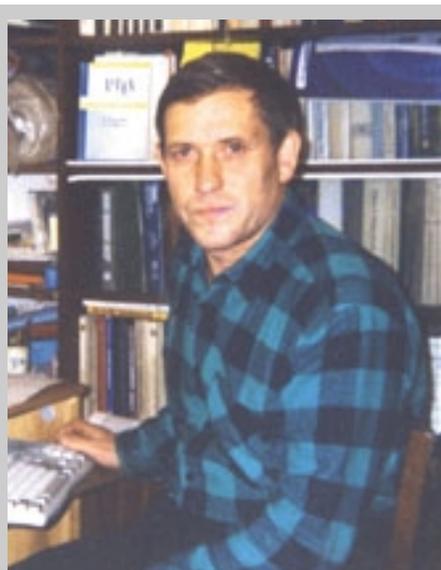
5. Изучен новый класс поляризационных явлений в атомных фотопроцессах на свободных атомах — циркулярный и эллиптический дихроизм, состоящих в зависимости сечений от знака степени циркулярной поляризации фотонов (эллиптический дихроизм исчезает в случае чисто циркулярной поляризации). Указанные эффекты являются «диссипативно-индуцированными» и отличны от нуля лишь при наличии в задаче T -нечетных (диссипативных) параметров, обусловленных, например, реальным заселением промежуточных резонансных уровней или ионизацией. Впервые выполнен анализ циркулярного дихроизма в процессах рассеяния света, спонтанного тормозного излучения, электрон-атомного рассеяния в поле световой волны, а также в рассеянии жестких рентгеновских и γ -квантов атомами. Эллиптический дихроизм исследован в трехфотонных процессах и в генерации высших гармоник сильного лазерного излучения. В последнем случае указан-

ный эффект позволил объяснить обнаруженное экспериментально вращение эллипса поляризации гармоники относительно оси поляризации излучения накачки.

6. Исследовано взаимодействие светового излучения с поляризованными атомными мишенями. Проанализированы сечения спонтанного и когерентного рассеяния света и многофотонная ионизация поляризованных атомов, а также предсказан эффект возникновения атомной ориентации при резонансном двухфотонном возбуждении линейно-поляризованными фотонами или при рассеянии линейно-поляризованного света. Используя технику инвариантных матриц конечных вращений, получено компактное выражение для углового распределения поляризованного спонтанного излучения атома при несимметричном механизме возбуждения атомной поляризации, а также установлена поляризационно-угловая структура сечения фотоионизации поляризованного атома из состояния с произвольным полным угловым моментом.

7. Выполнен анализ влияния статических электрического и магнитного полей на атомные фотопроцессы. Проанализирован обратный эффект Коттона–Мутона в атомарных газах и проведены численные расчеты соответствующих нелинейных восприимчивостей. Показано, что в ряде случаев (двухфотонные переходы между состояниями противоположной четности, генерация четных гармоник лазерного излучения) наложение внешних полей приводит к принципиально новым явлениям (поляризационные аномалии, индуцированные резонансом между S -состояниями; генерация гармоник циркулярно-поляризованной накачки), наблюдение которых вполне реально в стандартных лазерных экспериментах. С использованием высших порядков теории возмущений по диамагнитному взаимодействию исследовано возмущение спектра ридберговских состояний в области промежуточных магнитных полей, для которых ограничение членами низшего порядка уже недостаточно.

8. Получены новые данные об эффектах Штарка и Зеемана для интенсивности атомных линий. Расчеты зависимости интенсивности штарковских линий атома водорода от напряженности электрического поля выполнены аналитически с помощью кулоновской функции Грина в параболических координатах, полученной Н.Л.Манаковым и Л.П.Рапопортом в начале 1970-х годов.



Проф. Овсянников В.Д.

Результаты расчетов дают возможность не только описать экспериментально наблюдаемые зависимости, но и предсказать появление запрещенных штарковских компонент излучения водородоподобных атомов в сильных полях. Аналогичные зависимости от напряженности магнитного поля позволили детально описать процесс перехода от аномального эффекта Зеемана к полному эффекту Пашена–Бака с уменьшением числа зеемановских компонент излучаемых атомами мультиплетов. Получены простые аналитические выражения, определяющие зависимость интенсивности атомных линий от напряженности магнитного поля в условиях полного эффекта Пашена–Бака как для водородоподобных, так и для щелочных атомов. Определены условия магнито-индуцированного тушения и однофотонного заселения метастабильных состояний инертных атомов.

9. На основе нового представления радиальной части кулоновской функции Грина, содержащего свободные параметры, получены замкнутые аналитические выражения для амплитуд двухфотонных переходов в кулоновском поле между состояниями с произвольными квантовыми числами (включая случай двухфотонной ионизации). Эти результаты обобщают известные формулы Гордона для однофотонных переходов и применимы к широкому кругу задач двухфотонной, в том числе поляризационной, спектроскопии водородоподобных атомов и ионов. Замкнутое выражение амплитуды свободно-свободных переходов с фиксированными асимптотическими импульсами электрона получено с помощью функции Грина в параболических координатах и использовано для анализа двойного тормозного излучения и поглощения и линейных по интенсивности световой волны поправок к формуле Резерфорда для упругого кулоновского рассеяния.

10. Выполнены систематические расчеты радиационных характеристик многозарядных *He–Ne*-подобных ионов с высокой кратностью ионизации, необходимые для решения задач физики лазерной плазмы и при анализе перспективных схем генерации коротковолнового излучения на рентгеновских переходах в ионах. В вычислениях использованы как традиционные методы расчета атомной структуры, так и новые подходы, разработанные в коллективе школы (функции Грина уравнения Дирака с кулоновским потенциалом, релятивистский метод квантового дефекта).

11. Разработана общая теория процесса генерации жесткого электромагнитного излучения при ион-ионных столкновениях. Рассмотрение основано на квантово-оптической модели, базирующейся на физически ясных предположениях. Выполненный анализ эмиссии фотонов, стимулированной столкновениями тяжелых ионов, показывает высокую чувствительность спектрально-угловых характеристик излучения к структурным особенностям сталкивающихся частиц и характеру их взаимодействия. По материалам исследований разработаны проекты экспериментальных работ в г.г. Дубна (Россия) и Уппсала (Швеция).

Результаты научных исследований ученых научной школы за последние пять лет отражены в 173 статьях, опубликованных в реферируемых российских и зарубежных журналах.

Основные монографии

1. Л.П.Рапопорт, Б.А.Зон, Н.Л.Манаков. Теория многофотонных процессов в атомах. М., Атомиздат, 1978.
2. С.А.Запрягаев, Н.Л.Манаков, В.Г.Пальчиков. Теория многозарядных ионов с одним и двумя электронами. М., Энергоатомиздат, 1985.
3. М.Я.Амусья, В.М.Буймистров, Б.А.Зон и др. Поляризационное тормозное излучение частиц и атомов. М., Наука, 1987 (англ. пер.: Plenum Press NY 1992).
4. N.L.Manakov, V.D.Ovsiannikov, L.P.Rapoport. Atoms in a Laser Field. Physics Reports, v.141, p.319–433, 1986 (специальный заказной обзор).
5. A.G.Fainshtein, N.L.Manakov, V.D.Ovsiannikov, L.P.Rapoport. Nonlinear Susceptibilities and Light Scattering on Free Atoms. Physics Reports, v.210, p.111–221, 1992 (специальный заказной обзор).
6. А.В.Боровской, С.А.Запрягаев, О.Н.Зацаринный, Н.Л.Манаков. Плазма многозарядных ионов (элементарные процессы, кинетика и рентгеновские лазеры). С.-Пб.: Химия, 1996.

Участие в международных и федеральных научно-технических программах, выполнение грантов различного уровня за последние 5 лет.

Подтверждением важности и актуальности проводимых в рамках научной школы исследований могут служить также присуждение ученым школы грантов различного уровня и включение тематики исследований в международные и федеральные научно-технические программы. За последние пять лет наиболее важными являются следующие:

- Участие в Государственной научно-технической программе «Физика лазеров и лазерных систем», Международный лазерный центр при МГУ (1995 – 1996 гг.).
- Участие в программе «Университеты России» в разделах «Автоионизационные явления в атомах» (НИИЯФ МГУ) и «Фундаментальные взаимодействия» (НИИЯФ МГУ).
- Участие в межвузовской программе «Ноосфера» (С.-Пб.ГУ).
- Гранты Конкурсного центра по фундаментальному естествознанию Минобразования РФ при С.-Пб.ГУ:
1996–1997 гг. — 3 гранта (И.В.Копытин, Н.Л.Манаков, В.Д.Овсянников);
1998–2000 гг. — 5 грантов (С.А.Запрягаев, Б.А.Зон, И.В.Копытин, Н.Л.Манаков, В.Д.Овсянников);

- Гранты РФФИ:
 - 1996–1997 гг. — 4 гранта (Б.А.Зон, Н.Л.Манаков, Л.П.Рапопорт, И.В.Копытин);
 - 1997–1998 гг. — 2 гранта (В.Д.Овсянников, Л.П.Рапопорт);
 - 1998–1999 гг. — 3 гранта (Н.Л.Манаков, Л.П.Рапопорт, И.В.Копытин);
 - 1999–2000 гг. — 2 гранта (Н.Л.Манаков, Л.П.Рапопорт).
- Международные гранты:

International Science Foundation Grant RJ 4000
(1994–1995 гг., Н.Л. Манаков).

International Science Foundation and Russian Government Grants, 1995:
(JEW 100, Л.П. Рапопорт); (RJ 4300, Н.Л. Манаков).

International Supplement to NSF Grant No: PHY-9722110, University of
Nebraska, USA (1998–2000, Н.Л. Манаков).

Можно отметить также и индивидуальные заслуги некоторых ученых научной школы. Так, профессора Л.П.Рапопорт и Б.А.Зон получили почетное звание «Заслуженный деятель науки России», они же в 1994–1996 гг. имели стипендию Президента РФ для выдающихся ученых, а в 1997–1999 гг. и с 2000 по 2002 гг. награждены государственной научной стипендией Президиума Российской академии наук. Профессора Б.А.Зон и Н.Л.Манаков становились победителями конкурса на почетное звание «Соросовский профессор». Профессор И.В.Копытин в 1998 г. награжден знаком «Почетный работник высшего образования России». Профессор Б.А.Зон является иностранным членом Американского оптического общества, а профессор Н.Л.Манаков — Американского физического общества. Несколько студентов и аспирантов кафедры теоретической физики были стипендиатами Стипендии Президента РФ и Соросовскими студентами и аспирантами.

Научные связи школы

В настоящее время существуют тесные научные связи с рядом российских и зарубежных организаций. В частности, с Российской академией наук (Институт общей физики) организована совместная лаборатория «Физика волновых процессов» (руководитель — проф. Б.А. Зон). Кроме того, совместно с Лабораторией когерентной и нелинейной оптики ИОФ РАН в течение длительного времени выполнялись работы по исследованию перспективных схем генерации рентгеновского излучения на переходах многозарядных ионов, результаты которых отражены в совместной монографии. Среди других наиболее тесные связи налажены со следующими **организациями**:

- ОИЯИ (г. Дубна);
- ГНЦ «ВНИИФТРИ» (п. Менделеево, Московская обл.);
- Международный лазерный центр при МГУ;
- Санкт-Петербургский государственный университет;
- НИИЯФ МГУ;

и зарубежными университетами:

- University P & M Curie Paris VI (Париж, Франция);
- University of Nebraska (Линкольн, США);
- University of Pittsburgh (Питтсбург, США);
- University of Palermo (Палермо, Италия);
- Hebrew University (Иерусалим, Израиль).

В 1997 г. Н.Л.Манаков являлся приглашенным профессором университета П. и М. Кюри (Париж), а с 1998 г. он — адъюнкт-профессор университета Линкольна.

Подготовка кадров высшей квалификации

Ученые школы проводят активную работу и по подготовке научно-педагогических кадров для вузов города. За последнее время по научной тематике школы состоялось 6 защит докторских и 7 кандидатских диссертаций, в том числе 4 докторские и 2 кандидатские диссертации было защищено сотрудниками других вузов. На кафедре теоретической физики были разработаны и введены в действие 2 двухлетние программы магистерской подготовки «Теоретическая и математическая физика» (руководитель — проф. И.В.Копытин) и «Физика атомов и молекул» (руководитель — проф. Н.Л.Манаков).



Сотрудники кафедры теоретической физики.
Вверху: А.С.Корнев, С.А.Запругаев, А.Н.Алмалиев, Н.Л.Манаков, И.В.Копытин,
А.А.Хускивадзе.
Внизу: В.Н.Кишпари, Л.П.Рапопорт, Т.А.Чуракова

В заключение отметим, что научно-педагогическая школа, участвуя в течение последних трех лет в конкурсе научных школ университета, выходит с большим отрывом по баллам победителем этого конкурса, проф. Н.Л.Манаков в 1998, 1999 г. был абсолютным победителем этого конкурса среди ученых ВГУ, а к.ф.м.н. А.В.Меремьянин — среди молодых ученых ВГУ в 1999, 2000 г. Рекорд по такому наиболее престижному показателю, как индекс цитирования научных трудов в ВГУ также принадлежит школе теоретической физики и в личном конкурсе — проф. Н.Л.Манакову.