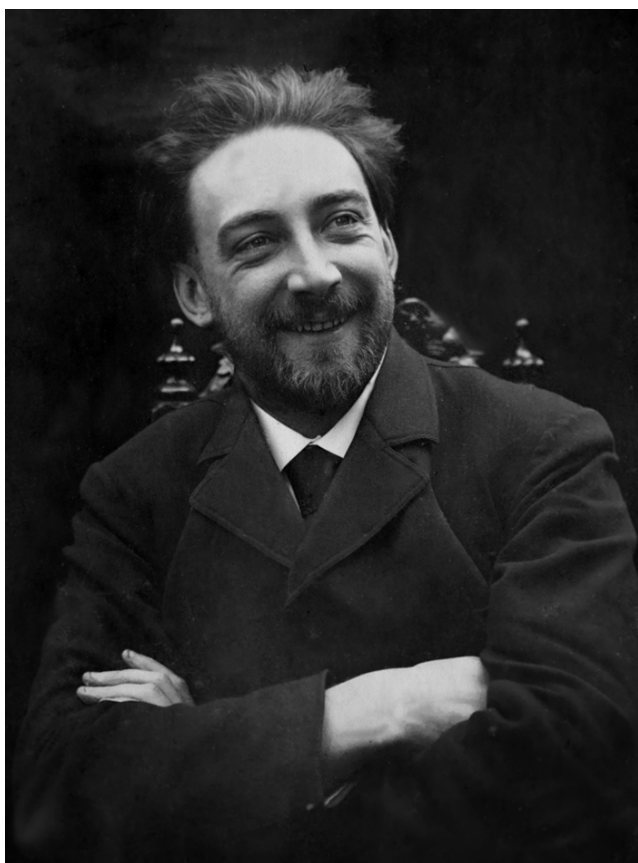


НАУЧНАЯ ПРОГРАММА ВЫДАЮЩЕГОСЯ ФИЗИКА

К 150-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ П.Н. ЛЕБЕДЕВА

Поступила в редакцию 22.10.2015 г.

DOI: 10.7868/S0869587316020080



Пётр Николаевич Лебедев (1866–1912)

Пётр Николаевич Лебедев – выдающийся российский физик, прославившийся своими опытами по измерению силы давления света. Эти опыты стали ярким подтверждением теории Максвелла, трактующей свет как волны электромагнитного излучения.

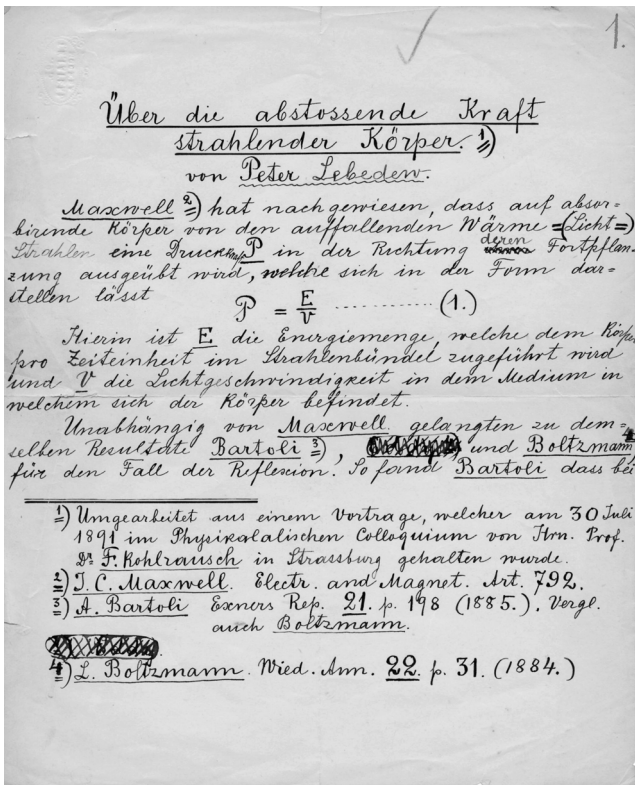
При беглом знакомстве с тематикой статей П.Н. Лебедева может создаться впечатление разрозненности экспериментальных работ учёного. Имеет ли отношение к давлению света его магистерская диссертация “Об измерении диэлектрических постоянных паров и о теории диэлектриков Моссотти–Клаузиуса”? Каково место статьи

“О двойном преломлении лучей электрической силы”, где продемонстрированы “оптические” явления с электромагнитным излучением на длине волны 0.6 см? Однако связь этих работ с программой Петра Николаевича, которую он сформулировал в начале 90-х годов позапрошлого столетия и выполнению которой посвятил отпущенные ему судьбой 20 лет активной творческой жизни, вполне просматривается.

Научная деятельность П.Н. Лебедева началась в 1887 г. в Страсбургском университете. Его учителем был физик-оптик А. Кундт – создатель знаменитой страсбургской школы экспериментаторов. В Германии же в 1891 г. он защитил магистерскую диссертацию. Вернувшись в Россию, Пётр Николаевич по предложению А.Г. Столетова стал сотрудником Московского университета, где проработал почти до конца своих дней. Именно здесь были выполнены исследования, принёсшие ему мировую известность.

Годы творческой активности П.Н. Лебедева (1887–1912) приходятся на период важнейших открытий в физике. Многие привычные нам сегодня физические концепции тогда только формировались. Электрон как частица, несущая заряд, был открыт Дж.Дж. Томсоном в катодных лучах только в 1897 г., и лишь в 1911 г. Э. Резерфорд сформулировал планетарную модель атома в виде тяжёлого положительно заряженного ядра с вращающимся вокруг него электроном. Атомы и молекулы трактовались во времена П.Н. Лебедева как частицы, содержащие заряды и способные поляризоваться под действием света. На языке поляризующихся частиц Х. Лоренц в 1892 г. объяснил дисперсию света как результат сложения падающей световой волны с вторичными волнами, испускаемыми поляризующимися частицами. П.Н. Лебедев называл атомы и молекулы “резонаторами”, подчёркивая наличие в них собственных колебаний заряда, обеспечивающих поглощение и испускание света.

В первой научной работе Лебедева – упомянутой выше магистерской диссертации, выполненной в Страсбургском университете, – представлены результаты измерений диэлектрических посто-



Страница рукописи доклада, прочитанного П.Н. Лебедевым 30 июля 1891 г. в Страсбурге на физическом коллоквиуме профессора Ф. Кольрауша

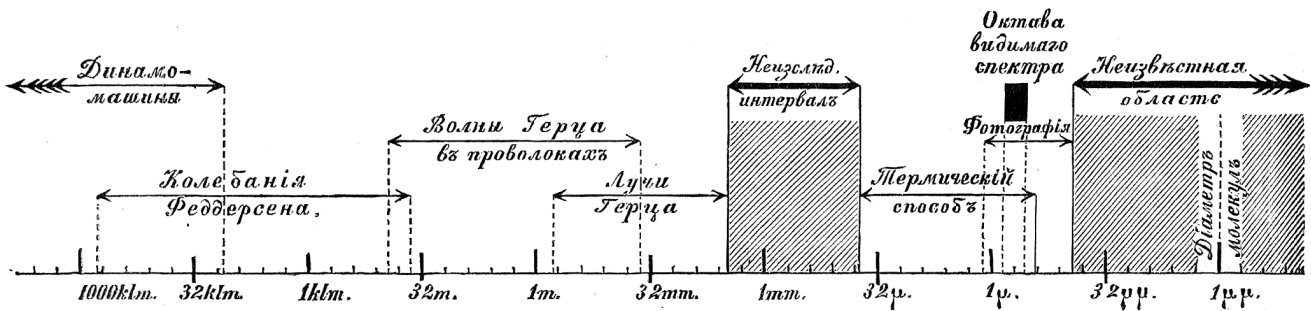
янных паров некоторых жидкостей при различных концентрациях (“величинах пространственного заполнения”) [1, с. 11]. Важным элементом проверяемой теории Моссотти была реакция произвольной частицы вещества на действие полей от окружающих частиц. Диссертация, по сути дела, предваряла вопрос о силах, действующих на молекулу вещества со стороны электрического поля, который оказался в центре будущей программы исследований учёного.

Вторая научная работа “Об отталкивательной силе лучеиспускающих тел” — доклад, представленный на коллоквиуме в Страсбургском университете накануне отъезда в Москву. Заявив, что речь идёт об отталкивательной силе электромагнитных волн по Максвеллу, и опираясь далее на данные об излучении Солнца (близкие к современным данным), Пётр Николаевич оценил силу светового давления солнечного излучения на макроскопическую частичку вещества в сравнении с силой притяжения (“ньютоновской силой”). Поскольку обе силы обратно пропорциональны квадрату расстояния до Солнца, их соотношение зависит не от расстояния, а от размера частицы и её плотности. Согласно оценке, если размер частицы (в мкм) меньше обратной величины плотности (в г/см³), то сила светового давле-

ния доминирует. Это означает, что пылевые частицы кометного хвоста размером 0.1 мкм и меньше отклоняются давлением солнечного излучения. П.Н. Лебедев замечает: «Полученные формулы применимы, однако, только для абсолютно чёрных тел, размеры которых велики сравнительно с длинами волн падающих на них лучей; поэтому для интересных вопросов относительно отталкивания кометных хвостов Солнцем, а также и взаимодействия двух соседних молекул в телах, может быть намечен только путь к решению... Принимая радиус тела всё меньше и меньше, мы можем таким образом перейти к молекулярным размерам. Для молекул, однако, наша формула (8) неприменима, так как молекулы не суть абсолютно чёрные тела, и как размеры их, так и их взаимные расстояния в телах малы сравнительно с длинами лучеиспускаемых волн: взаимодействие молекул можно рассматривать как более сложный случай, как действие резонаторов друг на друга. Если формула (8) и не даёт нам величины лучистого взаимодействия молекул, то она обращает наше внимание на то обстоятельство, что при изучении сущности так называемых “молекулярных сил” мы не можем пренебрегать силами, возникающими от лучеиспускания, не определив предварительно той доли молекулярных сил, которую они составляют, и не отделив эти известные силы от неизвестных» [1, с. 31].

В этих рассуждениях учёный выходит за рамки вопросов, связанных с формированием кометных хвостов. Здесь явно прослеживаются главные пункты программы: изучение механических сил, действующих на атомы и молекулы вещества, со стороны излучения, а также сил “лучистого” взаимодействия молекул между собой.

В работе “О двойном преломлении лучей электрической силы” (1895), посвящённой демонстрации “оптических эффектов” с электромагнитным излучением с длиной волны 0.6 см, Лебедев повторил опыты Герца в более коротковолновой области спектра. Он описал источник и приёмник излучения, а также изготовленные им отражающее зеркало, поляризатор, преломляющие призмы, фазовую пластинку. Преобразования излучения демонстрировались на лабораторном столе размером в несколько десятков сантиметров. По мнению ряда авторов, данная работа являет собой рекорд того времени по продвижению в область коротких длин волн электромагнитного излучения со стороны радиоволн. Это так, но Пётр Николаевич стремился не к рекорду. Он задумал применить волны Герца для изучения механического действия электромагнитных волн на молекулы (по его терминологии — *пондеромоторного действия волн на резонаторы*). Поскольку опыты с одиночными молекулами в поле излучения были тогда немислимы, Лебедев запланировал (и выполнил) эксперименты с “макроскопической мо-



Шкала электромагнитных волн, предназначенная для демонстраций в аудитории Московского университета (из статьи П.Н. Лебедева “Шкала электромагнитных волн в эфире”, 1901 г.)

Шкала начерчена на длинной полосе чертёжной бумаги, подклеенной холстом для прочности. Её длина около 8.5 м; длина малого деления – 16.5 см (равна величине фортепианной октавы)

делью” молекул – реальным электрическим или магнитным резонатором в поле “герцевских колебаний”. Опыты с излучением с длиной волны 0.6 см привлекали его компактностью схемы генерации и наблюдения волн.

Работа “Экспериментальное исследование пондеромоторного действия волн на резонаторы” – это уже докторская диссертация, защищённая в России. В ней описаны три группы независимых экспериментов: действие электромагнитных волн (“герцевских колебаний”) на электромагнитные резонаторы, действие волн в жидкости на гидродинамический резонатор и действие акустических волн на акустический резонатор. Главный вопрос – как изменяются знак и величина действия волн на резонаторы при изменении соотношения частоты волны и частоты резонатора. Во всех трёх случаях было обнаружено, что отклик резонаторов в зависимости от расстройки имел знакопеременный вид с изменением знака при точном совпадении частоты волны с резонансной частотой. Опыты с гидродинамическим и акустическим резонаторами должны были продемонстрировать общий характер действия волн любой природы на резонансные структуры. Как пишет П.Н. Лебедев, «простейшей и ближайшей задачей, естественно, представляется вопрос о действии простой (монохроматической) волны на отдельную покоящуюся молекулу в зависимости от отношения периодов падающей волны и собственного периода молекулы... Непосредственно и притом в достаточно простой форме экспериментально исследовать действие света на отдельные молекулы какого-либо тела не представляется возможным, а потому я обратился к опытам с длинными электромагнитными волнами Герца, заставляя их действовать на схематическую “молекулу”, которая обладает интересующими нас свойствами, т.е. имеет собственный период колебания... Изменяя по желанию период колебания резонатора (что не представляет каких-либо затруднений) и заставляя падать на него

электромагнитную волну определённой длины, мы можем наблюдать образующиеся в этом случае пондеромоторные силы и установить законы их зависимости от резонанса». И далее, завершая статью, Лебедев формулирует вторую часть своей научной программы по изучению молекул, взаимодействующих через излучение: “Если мы станем на точку зрения электромагнитной теории света, если мы сделаем допущение, что волны Герца суть световые волны большого периода, то мы можем наши опыты рассматривать как попытку на размерно больших схематических моделях молекул в основных чертах исследовать законы тех молекулярных сил, которые обусловлены взаимным лучеиспусканием молекул” [1, с. 67].

Таким образом, в середине 1890-х годов продуманная П.Н. Лебедевым программа научных исследований предстала в виде чётких формулировок: изучение механических сил воздействия электромагнитных волн на атомы и молекулы, а также межмолекулярных сил, обусловленных излучением.

Следующие работы учёного, посвящённые измерению сил давления света на твёрдые тела и газы, получили широкую известность и признание мировой научной общественности. Они продемонстрировали вершину его экспериментального мастерства и вошли в перечень выдающихся достижений физики XX в. Работа “Опытное исследование светового давления” рассматривается сегодня как экспериментальное подтверждение одного из выводов теории электромагнитного излучения Максвелла, которая в конце XIX в. ещё не получила полного признания среди физиков. Опыты Герца, впервые продемонстрировавшие существование электромагнитных волн, были опубликованы лишь в 1888 г., когда Пётр Николаевич учился в Страсбурге. Одной из трудностей в признании теории Максвелла было отсутствие ответа на вопрос об эфире – среде, колебания которой передавали электромагнитные волны. Опыты Майкельсона и Морли, показавшие по-

стоянство скорости света (независимо от движения Земли), как это предсказывала теория Максвелла, были проведены в 1885–1887 гг. Предсказанное Максвеллом давление света на тела и приведённая им формула позволили Лебедеву оценить реальные силы светового давления на примере солнечного излучения. Судя по данным им оценкам светового давления, которое можно реализовать в лабораторных условиях, требуется беспрецедентная чувствительность измерений. Однако без этого первого опыта трудно было рассчитывать на осуществление задуманной программы исследований. Лебедеву были известны неудачные попытки измерить величину светового давления. Возможно, он надеялся на тот опыт, который приобрёл по достижению высокого вакуума, когда работал у А. Кундта, отмечавшего мастерство Петра Николаевича в этом деле.

Годы упорного труда завершились уверенной регистрацией силы светового давления на поглощающие и отражающие металлические пластинки. Измерения величины силы оказались в хорошем соответствии с предсказаниями Максвелла. Это позволило учёному заявить, что существование максвелл-бартолиевых сил давления опытным путём установлено для лучей света. Биографы П.Н. Лебедева и историки науки считают эти измерения кульминацией его научной деятельности. Представляется, что, скорее, это важная ступень на пути исследования воздействия света на атомы и молекулы. Неудивительно, что после опытов с твёрдыми телами Лебедев стал готовить опыты по обнаружению давления света на газы. Именно в газах можно было рассчитывать на проявление давления света на индивидуальные частицы в силу их удалённости друг от друга. Предваряя описание опытов с газами, Пётр Николаевич отмечал: “Я в своё время обратил внимание на недопустимость предположения, будто можно без всяких оговорок переносить рассуждения, касающиеся шаров, на молекулы газа; я указывал, что молекулы газов мы должны рассматривать как отдельные резонаторы, обладающие определённым избирательным поглощением” [1, с. 299].

Потребовалось более трёх лет, чтобы осуществить наблюдение эффекта давления света на газы и измерить величину действующей силы. Было построено и исследовано более 20 поршневых приборов разных типов. Детали схемы установки и измерительных процедур заслуживают отдельного разбирательства. Можно лишь упомянуть достигнутую чувствительность построенной установки. Под давлением света в газе возникала разность давлений, на неё реагировал подвижный поршень. Движение поршня через коромысло закручивало кварцевую нить, на которой было закреплено зеркало. Отсвет вспомогательного источника света, отражённый от зеркала, переме-

щался по шкале на расстояние 5.3 м. Достигнутая чувствительность составила 1.4×10^{-6} дин/см² (около 1.4×10^{-12} атмосфер) на одно деление шкалы. При этом уверенные отчёты можно было проводить с точностью до десятых долей делений шкалы. Поглощающие свет газы приходилось испытывать в смеси с водородом, быстро выравнивающим неравномерности нагрева газов из-за его высокой теплопроводности. Источником света служил штифт Нернста (нагреваемый током стержень из оксидов редкоземельных элементов). Дуговой разряд давал в 10 раз больше света, но от него пришлось отказаться из-за сильных колебаний интенсивности. Установленное опытным путём давление света на газы оказалось прямо пропорционально энергии пучка света и коэффициенту поглощения газа, а величина давления соответствовала количественным оценкам. По словам Петра Николаевича, гипотеза о давлении света на газы, 300 лет тому назад высказанная Кеплером, получила теоретическое и экспериментальное обоснование.

Успех опытов по измерению давления света на газы означал, что сделан важный шаг в выполнении той части научной программы П.Н. Лебедева, где ставились вопросы о пондеромоторном действии электромагнитных волн на молекулы. Что же касается изучения межмолекулярных сил, обусловленных лучеиспусканием, то здесь вопросы остались открытыми, ведь они были поставлены задолго до появления идей и опытных данных о строении атомов и молекул. От последних опытов Лебедева до создания квантовой механики, позволившей описать энергетические состояния атомов и переходы между ними, оставалось более полутора десятилетий. Ключевые положения его программы были выполнены спустя несколько десятилетий.

Большой вклад в изучение межмолекулярных взаимодействий лучеиспускающих молекул внесли последователи П.Н. Лебедева Сергей Иванович Вавилов (1891–1951) и его ученик Михаил Дмитриевич Галанин (1915–2008). С.И. Вавилов возглавил созданный в 1934 г. Физический институт АН СССР и превратил его в передовой научный центр, применяя на практике принципы П.Н. Лебедева: сосредоточие множества учёных, оснащение лучшим оборудованием, организация механических, стеклодувных, оптических мастерских. Сергею Ивановичу принадлежит инициатива присвоить Физическому институту имя П.Н. Лебедева. Особое внимание уделялось научному коллоквиуму. В своей лаборатории люминесценции Вавилов проводил еженедельные коллоквиумы по средам так же, как было заведено у Петра Николаевича (название “коллоквиум” продержалось до 1957 г.; сегодня в Физическом институте вместо “коллоквиум” говорят “семи-

нар”). С.И. Вавилов вёл в Физическом институте обширные исследования люминесценции. Важной их частью были вопросы “программы Лебедева”: тушение и сенсбилизация люминесценции. Оба эти процесса обусловлены передачей энергии возбуждения молекул посредством излучения. В тетради учёта докладов на коллоквиуме лаборатории люминесценции 5 октября 1949 г. есть запись о докладе С.И. Вавилова и М.Д. Галанина “Излучение и поглощение света в системе индуктивно связанных молекул”. По-видимому, это одна из первых работ М.Д. Галанина по передаче энергии электронного возбуждения между молекулами с близкими энергетическими уровнями [2]. Созданная им (уже после смерти С.И. Вавилова) теория передачи энергии электронного возбуждения сегодня широко известна [3]; с учётом вклада западных учёных она называется теорией передачи энергии Фёрстера–Декстера–Галанина.

Новый этап в реализации программы П.Н. Лебедева наступил в конце 1970-х годов, когда появились лазеры и давление света на атомы было проанализировано на квантовом языке. Давление есть результат передачи импульса фотона атому. Такая формулировка дана в пионерских работах, посвящённых применению светового давления для манипулирования атомами в условиях резонанса излучения с атомным переходом [4, 5]. Инициатором этих исследований был Владилен Степанович Летохов (1939–2009), проработавший несколько лет в Физическом институте им. П.Н. Лебедева. При резонансном поглощении фотона атом приобретает импульс фотона $\hbar\omega/c$ (\hbar – постоянная Планка, ω – частота излучения, c – скорость света). Такой импульс весьма мал по сравнению с собственным количеством движения атома; например, в газе при комнатной температуре импульс фотона видимого света составляет менее одной тысячной типичного значения импульса атома. Поэтому заметное влияние света на движение атома может происходить при многократных актах поглощения фотона. В таких условиях следует принять во внимание процесс спонтанного испускания фотонов атомами после актов поглощения. При каждом акте испускания атом возвращает испущенному фотону положенное ему количество движения. Однако средний импульс большого числа спонтанно испущенных фотонов равен нулю вследствие изотропии испускания. Получается, что импульсы поглощаемых фотонов суммируются, а импульсы испускаемых фотонов гасят друг друга, – так формируется световое давление на резонансные атомы. Величина светового давления на атомы значительно снижается, когда частота излучения выходит из резонанса с атомным поглощением. Это

даёт ещё один рычаг манипулирования атомами благодаря тому, что линии лазерного излучения весьма узки и могут настраиваться в резонанс не со всеми атомами, а только с определённой группой. В атомных ансамблях атомы имеют разные скорости движения и отличаются резонансной частотой поглощения в зависимости от движения атома к направлению лазерного пучка (доплеровский сдвиг частоты). Если частота лазерного излучения настроена на “красный” край линии поглощения, то резонансное давление и тем самым замедление будут испытывать только атомы с движением навстречу лазерному пучку, остальные атомы в ансамбле отреагируют на свет незначительно. На этих принципах основан ряд устройств манипулирования атомными пучками и атомами в ловушках для новых областей исследований и разработок – прецизионной спектроскопии холодных атомов и так называемой атомной оптики. На протяжении последних десятилетий получила развитие техника удержания одиночных атомов и атомных ансамблей в ловушках. Такие атомы после процедур охлаждения представляют собой уникальные объекты прецизионной лазерной спектроскопии. Низкие температуры в ловушках (до единиц микрокельвинов) позволяют изучать структуру атомных энергетических уровней без влияния доплеровских сдвигов, проверять самые тонкие эффекты строения атомов и создавать атомные стандарты частоты нового поколения. За разработку методов охлаждения и удержания атомов в ловушках была присуждена Нобелевская премия по физике 1997 г. С. Чу, К. Коэн-Таннуджи и У. Филиппу. В своих нобелевских лекциях они отметили, что в их исследованиях важную роль сыграли эксперименты П.Н. Лебедева по измерению светового давления. Возможность управления атомными пучками с помощью лазерного излучения с избирательным воздействием на определённые скоростные группы атомов позволяют формировать и преобразовывать уникальные атомные пучки, без которых невозможен прогресс в нанотехнологиях [6]. Данное направление получило название *атомная оптика*.

Приведём примеры методов манипулирования атомами, основанных на резонансном давлении лазерного излучения на атомы.

Во-первых, это метод “лазерной патоки”, предназначенный для охлаждения облака атомов, находящихся в созданной для них ловушке. На облако атомов направляют со всех сторон лазерное излучение (обычно с помощью шести лазерных пучков), частота которого настроена в резонанс только с встречно движущимися атомами. Эти атомы замедляются световым давлением, что затрудняет их выход из облака. Здесь световое

давление выступает в роли замедлителя (“патоки”) атомного движения и не только препятствует разлетанию атомов, но и способствует их охлаждению.

Во-вторых, следует назвать метод “зеemanовского охлаждения”. Он предназначен для замедления атомов в атомных пучках теплового происхождения, чтобы в дальнейшем с такими пучками можно было осуществлять более тонкие манипуляции. Для загрузки атомных ловушек необходимы атомные пучки с низкими скоростями движения, иначе атомы не будут захвачены ловушкой. Исходные атомные пучки, получаемые при нагреве материалов в печи, имеют немало атомов с высокими скоростями. В зеemanовском охладителе навстречу пучку направляют лазерный луч с определённой настройкой частоты на “красное” крыло линии поглощения атомов. Часть атомов, скорости которых обеспечивают резонанс поглощения, замедляется лазерным излучением. Однако замедлившиеся атомы не выпадают из резонанса с излучением, поскольку по мере движения они попадают в область со специально настроенным магнитным полем, которое за счёт зеemanовского сдвига уровней восстанавливает резонансные условия. Поэтому на выходе из области взаимодействия заметная часть атомов оказывается замедленной до фиксированной скорости.

Наконец, нужно упомянуть метод коллимации атомных пучков [6]. С его помощью удаётся предотвратить поперечное расхождение атомов в пучках, которое неизбежно возникает в первичных источниках атомов. Для этого атомный пучок облучают с боковых сторон лазерным излучением, настроенным по частоте в резонанс со встречными атомами, то есть как раз с теми атомами, которые имеют поперечную компоненту скорости и создают расхождение пучка. Давление облучающего света останавливает поперечное расхождение атомного пучка, приближая его к идеально коллимированному.

Исследования, связанные с лазерным манипулированием атомами, их удержанием и охлаждением, являются одной из бурно развивающихся областей современной оптики, сулящих приложения в разных сферах — от метрологии до квантовых компьютеров.

Сегодня в условиях огромного разнообразия изысканий в области естественных наук, произнося слова “школа выдающегося учёного”, мы подразумеваем прежде всего новое научное направление, связанное с именем учёного и его последователями. Школа П.Н. Лебедева выходит за рамки такого узкого понимания. Свою научную деятельность он начинал в 1891 г. в Москве, где не было центра физических исследований, хотя бы отдалённо напоминавшего ведущие научные

центры Европы. За 20 лет работы его усилиями такой центр был создан. При Московском университете стала функционировать физическая лаборатория, в ней работало более 10 учеников Петра Николаевича, многие из которых впоследствии возглавили собственные научные направления и внесли серьёзный вклад в развитие физической науки в России. Стиль и характер экспериментальных исследований был положен в основу работы АН СССР.

Школу П.Н. Лебедева отличало индивидуальное мастерство экспериментатора в изготовлении узлов и приспособлений для проведения измерений. Особое внимание уделялось исключению факторов, затрудняющих поиск ожидаемого эффекта. Такой подход должен опираться на хорошо оснащённую механическую мастерскую при научной лаборатории. Именно с оснащения механической мастерской Пётр Николаевич начал свою работу в лаборатории А.Г. Столетова в Москве сразу по возвращении из Страсбурга. Времена “верёвочной петли и палки” давно ушли в прошлое. Опыты требовали от экспериментатора искусного рукоделия по созданию установок и измерительных устройств. Без механических мастерских, без умения работать с разнообразными материалами невозможно было рассчитывать на проведение серьёзных исследовательских работ передового уровня. Начиная с П.Н. Лебедева, отношение к мастерским как важнейшей составной части физической лаборатории укрепилось в сознании многих основателей новых лабораторий в СССР. Достаточно вспомнить С.И. Вавилова и Г.С. Ландсберга, оснастивших Физический институт им. П.Н. Лебедева при его создании в 1934 г. механической, стеклодувной и оптической мастерскими. Умение создавать искусные узлы и схемы опытных установок до сих пор остаётся важнейшим качеством в оценке физика-экспериментатора.

Другим важным компонентом школы П.Н. Лебедева был уже упоминавшийся коллоквиум — регулярный научный семинар, где обсуждались текущие научные результаты сотрудников и заслушивались новости, почерпнутые из научной литературы. В Страсбургском университете, в котором Пётр Николаевич начинал свою научную деятельность, коллоквиумы вёл его учитель профессор А. Кундт. Практику регулярных коллоквиумов подхватили многие последователи Петра Николаевича. Регулярные семинары вели практически все руководители лабораторий в ФИАНе. Самым знаменитым был семинар В.Л. Гинзбурга, на который в течение многих лет еженедельно собиравались сотни участников из институтов Москвы и других городов.

Выдвинутая П.Н. Лебедевым программа научных исследований — изучение механических сил воздействия электромагнитных волн на атомы и молекулы, а также межмолекулярных сил, обусловленных излучением, — не могла быть в полной мере реализована в период творческой активности учёного. В то время ещё не сформировались представления о строении атомов и молекул, не было идей об их энергетических состояниях и роли световых квантов во взаимодействии с атомами. Квантовая теория появилась только 15 лет спустя. Тем не менее программа П.Н. Лебедева определила новые направления исследований на десятки лет вперёд. С.И. Вавиловым и его учениками были выполнены исследования по передаче электронного возбуждения между молекулами за счёт излучения. Понятия “тушение” и “сенсбилизация люминесценции”, относящиеся к этой области, стали терминами современной науки. Пионерские работы В.С. Летохова по квантовому описанию давления света на атомы и применению лазеров для манипулирования атомами положили начало бурно развивающемуся направлению по охлаждению атомов в ловушках. На “холодных” атомах выполнены прецизионные спектроскопические измерения и созданы стандарты частоты, сулящие разнообразные при-

ложения — от метрологии до квантовых компьютеров.

В связи с кончиной П.Н. Лебедева Х. Лоренц в письме его супруге от 1 мая 1912 г. написал: “Я считал его одним из первых и лучших физиков нашего времени...”

А.В. МАСАЛОВ,
доктор физико-математических наук,
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
e-mail: masalov@sci.lebedev.ru

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лебедев П.Н.* Собрание сочинений. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
2. *Вавилов С.И., Галанин М.Д.* Излучение и поглощение света в системе индуктивно связанных молекул // Доклады АН СССР. 1949. С. 811–818.
3. *Агранович В.М., Галанин М.Д.* Перенос энергии электронного возбуждения в конденсированных средах. М.: Наука, 1978.
4. *Летохов В.С., Миногин В.Г., Павлик Б.Д.* Охлаждение и удержание атомов и молекул резонансным световым полем // ЖЭТФ. 1977. № 4. С. 1328–1341.
5. *Миногин В.Г., Летохов В.С.* Давление лазерного излучения на атомы. М.: Наука, 1986.
6. *Балыкин В.И.* Атомная оптика и нанотехнология // УФН. 2009. № 3. с. 297–305.